

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HÜCRESEL AĞLARDA NESNELERİN İNTERNETİ VE RÖLE CİHAZLAR ARASINDA İMZA
TABANLI VE ENERJİ VERİMLİ CİHAZ KEŞFİ PROTOKOLÜ**

DOKTORA TEZİ

Muhammet Talha KAKIZ

**AĞUSTOS 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HÜCRESEL AĞLARDA NESNELERİN İNTERNETİ VE RÖLE CİHAZLAR ARASINDA
İMZA TABANLI VE ENERJİ VERİMLİ CİHAZ KEŞFİ PROTOKOLÜ**

Muhammet Talha KAKIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“DOKTOR (BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 / 08 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 08 / 2021

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Nesnelerin İnterneti cihazlarının Bluetooth ve Zigbee gibi kişisel alan ağlarında haberleşmesi için özgün yöntemler geliştiriliyor olsa da son yıllarda hücresel ağlar üzerindeki haberleşme protokolleri büyük önem kazanmıştır. Bunun nedeni, hücresel ağlar gibi güçlü ağların çok fazla sayıdaki cihazın internet erişimini sağlayabilecek kapasiteye ve altyapıya sahip olmasıdır. Nesnelerin İnterneti cihazlarının da ağı dahil olduğu karma bir hücresel ağda, birden fazla bağlantı modeli ortaya çıkmaktadır. Bu bağlantı modellerinden bir tanesi Nesnelerin İnterneti cihazlarının ağına asıl kullanıcıları üzerinden baz istasyonuna erişim sağlayabildiği röle ağ modelidir. Bu modelde cihazların birbirlerinin varlıklarından haberdar olmalarını sağlayan cihaz keşfi protokollerinin çalışma biçimi ve performansı büyük önem arz etmektedir. Özellikle, enerji ve bellek bakımından kısıtlı bir kapasiteye sahip olan Nesnelerin İnterneti cihazlarının en az enerji tüketimi ile cihaz keşfi yapabilmesi oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında, özgün periyot yapısına sahip imza tabanlı ve enerji verimli röle cihaz keşfi protokolü geliştirilerek cihazların minimum enerji tüketimi ve yüksek başarı olasılığı ile birbirlerini keşfetmeleri sağlanmıştır.

Her şeyden önce bana nasip ettiği bütün nimet ve güzelliklerden dolayı Allah'a hamd ederim. Bu çalışmamın her aşamasında belirleyici rol oynayan, yapıcı ve akılcı yönlendirmeleriyle çalışmamın olgunlaşmasını sağlayan ve her daim sunduğu değerli katkılarla yanımda olan çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışma süresince bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Kadir TÜRK ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk CEVHER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatımda bu noktaya gelmemde en büyük pay sahibi olan, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen çok değerli babam Talat KAKIZ'a, sevgili annem Derhan KAKIZ'a şükranlarımı sunarım. Bu çalışmam boyunca sabır, anlayış ve her türlü fedakarlığı göstererek desteğini esirgemeyen, hayatıma anlam katan biricik eşim Aygül'e, güzel kızım Zehra'ya ve güzel kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet Talha KAKIZ

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Hücreyel Ağlarda Nesnelerin İnterneti ve Röle Cihazlar Arasında İmza Tabanlı ve Enerji Verimli Cihaz Keşfi Protokolü” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/08/2021

Muhammet Talha KAKIZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iii
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET.....	vii
SUMMARY	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SEMBOLLER DİZİNİ.....	xii
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. IoT'nin Karakteristik Özellikleri.....	5
1.3. IoT ve İnternet.....	8
1.4. 3GPP Bağlantı Modelleri	9
1.5. Cihaz Keşfi Protokolleri.....	11
1.5.1. Tasarsız Ağlarda ve WSN'de Cihaz Keşfi Protokolleri	12
1.5.1.1. Zaman.....	12
1.5.1.2. Senkronizasyon	15
1.5.1.3. Olasılıksal ve Deterministik Yaklaşımlar	16
1.5.1.4. Mesaj Gönderim Türleri.....	21
1.5.2. Hücresel Ağlarda Cihaz Keşfi Protokolleri.....	25
1.5.2.1. Cihazdan Cihaza Haberleşme (Device-to-Device Communication – D2D)	25
1.5.2.2. Sinyal Türü.....	26
1.5.2.3. Senkronizasyon	27
1.6. Mevcut Cihaz Keşfi Protokollerinin Eksikleri	27
1.7. Tezin Amacı, Kapsamı, Sunulan Katkıları ve Zorlukları.....	28
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	33
2.1. Sistem Modeli	33
2.1.1. İlgili Tanımlar	33

2.1.2.	Ağ Modeli	35
2.2.	Arka Plan ve Önerilen Yöntem	38
2.2.1.	3GPP ve LTE’de Rastgele Erişim Prosedürünün (Random Access Procedure – RAP) Arka Planı.....	39
2.2.2.	İmza Tabanlı ve Enerji Verimli Röle Keşif Protokolü (SERDP).....	45
2.2.2.1.	Aşama #1.....	47
2.2.2.2.	Aşama #2.....	50
2.2.2.3.	Aşama #3.....	52
2.2.2.4.	Aşamaların Optimum Slot Sayılarının Belirlenmesi.....	54
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	63
3.1.	Simülasyon Ortamı.....	64
3.2.	Görev Döngüsü Oranlarının Karşılaştırılması.....	69
3.2.1.	Senaryo #1.....	69
3.2.2.	Senaryo #2.....	71
3.3.	Başarılı Keşif (SD) Oranlarının Karşılaştırılması	73
3.3.1.	Senaryo #1.....	73
3.3.2.	Senaryo #2.....	75
3.4.	Güç Tüketim Miktarlarının Karşılaştırılması	78
3.4.1.	Senaryo #1.....	78
3.4.2.	Senaryo #2.....	80
3.5.	Gönderilen Ortalama Mesaj Sayısı Sonuçları	82
3.5.1.	Senaryo #1.....	82
3.5.2.	Senaryo #2.....	83
3.6.	Optimum K Değeri ve Keşif Performansı	88
4.	SONUÇLAR	90
5.	ÖNERİLER	93
6.	KAYNAKLAR	95

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

HÜCRESEL AĞLARDA NESNELERİN İNTERNETİ VE RÖLE CİHAZLAR ARASINDA İMZA TABANLI VE ENERJİ VERİMLİ CİHAZ KEŞFİ PROTOKOLÜ

Muhammet Talha KAKIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR
2021, 104 Sayfa

IoT cihazlarını internete bağlayacak ağlardan biri hücresel ağlardır. 3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP), hücresel ağlarda IoT cihazlarının röle aygıtlar aracılığıyla ağa bağlandığı bir bağlantı modeli önerir. Cihazların enerji kısıtlamaları, gezginliği ve keşif mesajlarının çakışması nedeniyle bu modelde cihazların aralıklı olarak uyuyup uyanarak cihaz keşfi görevini minimum enerji tüketimi ile gerçekleştirmesi önemlidir. Literatürdeki cihaz keşif protokollerinde, cihazlar periyodik olarak komşu aygıtları aramaları gerektiğinden, bu yöntemler enerji verimliliği açısından 3GPP'nin bahsi geçen bağlantı modeli için uygun değildir. Bu çalışmada, Zadoff-Chu dizilerini kullanan imza tabanlı ve enerji verimli röle keşif protokolü geliştirilmiş ve üretilen diziler cihazların aktif zaman aralıklarını işaret etmek için kullanılmıştır. İmza tabanlı sinyalizasyon ile IoT aygıtları, rölelerin gelecekte ne zaman aktif olacaklarını bildiklerinden röle cihazların aktif zaman aralıklarını aramak zorunda kalmazlar. Ayrıca, geliştirilen üç aşamalı özgün periyot yapısı ile aynı zaman aralığında birden fazla cihaz tarafından gönderilen keşif mesajlarının çakışması da önlenmiştir. Olasılık analizleri ve simülasyon sonuçları, IoT aygıtlarının tasarlanan protokolde literatürdeki protokollere kıyasla daha az mesaj çakışması, daha az enerji tüketimi ile daha fazla cihazı keşfettiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin İnterneti, Hücresel Ağlar, Enerji Verimliliği, İmza Tabanlı Sinyalizasyon, Cihaz Keşfi Protokolü, Röle Ağlar

PhD. Thesis

SUMMARY

SIGNATURE-BASED AND ENERGY-EFFICIENT DEVICE DISCOVERY PROTOCOL BETWEEN THE INTERNET OF THINGS AND RELAY DEVICES IN CELLULAR NETWORKS

Muhammet Talha KAKIZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Tuğrul ÇAVDAR
2021, 104 Pages

One of the networks that will connect IoTDS to the Internet is cellular networks. The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) proposes a connectivity model for cellular networks in which IoTDS connect to the network via relay devices. Due to energy budget constraints, mobility of devices and collision of discovery messages, it is important that they perform discovery with the minimum energy consumption by intermittently sleeping and waking up. The existing device discovery protocols are not energy efficient for this model as they need to continually search their neighbor devices. In this work, signature-based energy efficient relay discovery protocol using Zadoff-Chu sequences has been developed and the generated sequences have been used for pointing the active time intervals of the devices. With the aid of signature-based signalization, IoTDS do not have to search for relay devices because they know when the relays will wake up in the future. Besides, with the designed novel three-stage original period structure, the message collisions have been eliminated. The probabilistic analysis and simulation results show the developed protocol discovers more devices with less energy consumption as well as preventing collisions, as compared with the existing protocols.

Key Words: Internet of Things, Cellular Networks, Energy Efficiency, Signature Based Signaling, Device Discovery Protocol, Relay Networks

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. IoT cihazlarının sahip olması gereken özellikler [5].....	6
Şekil 1.2. 3GPP'nin IoT için önerdiği bağlantı senaryoları [14].....	10
Şekil 1.3. Slot tabanlı zaman modeli	13
Şekil 1.4. Hızsız slot örneği ve çözümü [58].....	14
Şekil 1.5. BLE'de periyodik zaman tabanlı cihaz keşfi gösterimi [59].	15
Şekil 1.6. Eş zamanlı ve eş zamansız cihazlarda periyot gösterimi	16
Şekil 1.7. "Over-half Occupation" yöntemi.....	17
Şekil 1.8. Asallık tabanlı önerilen protokoller.....	18
Şekil 1.9. Quorum tabanlı önerilen protokoller	20
Şekil 1.10. SearchLight protokolü.....	21
Şekil 1.11. Irda cihaz keşfi gösterimi [68].....	22
Şekil 1.12. Bluetooth cihaz keşfi gösterimi [68].	23
Şekil 1.13. Wi-Fi Direct cihaz keşfi gösterimi [68].	24
Şekil 1.14. Bir MicaZ cihazının güç tüketim gösterimi [93].....	29
Şekil 2.1. IoT ve röle cihazlar için slot ve periyot gösterimi.....	34
Şekil 2.2. Ağ modeli	36
Şekil 2.3. SFN ve SF Parametrelerinin Gösterimi.....	37
Şekil 2.4. RAP sürecinin özet gösterimi [110].	40
Şekil 2.5. Ön işaret mesajı yapısı ve formatları [100].	41
Şekil 2.6. RA ön işaret gönderici yapısı [112].	43
Şekil 2.7. RA ön işaret alıcı yapısı [112].....	44
Şekil 2.8. SERDP özgün periyot yapısı.....	46
Şekil 2.9. SERDP sıralı diyagramı	47
Şekil 2.10. Örnek ağ parçası.....	49
Şekil 2.11. $Pi2$, $Pi3$ ve $Pi2 \times Pi3$ gösterimleri	55
Şekil 2.12. Tamsayı Bölümü Örneği ve İlgili Parametreler	57

Şekil 3.1. ApplicationLayerNodeBase bileşik modülü [119].	65
Şekil 3.2. SERDP ve diğer protokollerin farklı S değerleri için DC oranları.	70
Şekil 3.3. SERDP'in Farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için görev döngüsü oranı sonuçları	72
Şekil 3.4. SERDP ve diğer protokollerin farklı S değerleri için SD oranları	74
Şekil 3.5. SERDP'in farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için keşif oranı sonuçları	76
Şekil 3.6. Farklı S değerleri için protokollerin güç tüketim sonuçları	79
Şekil 3.7. SERDP'in farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için IoTD'ler tarafından bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayısı sonuçları	85
Şekil 3.8. Farklı K değerleri için SD sonuçları ve olasılık analizi	89



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Farklı organizasyonların IoT tanımlamaları.....	6
Tablo 3.1. Senaryo #1 parametre değerleri.....	66
Tablo 3.2. Senaryo #2 parametre değerleri.....	67
Tablo 3.3. nNBRavgRUE, nNBRavgIoTD, CR ve optimum K değerleri.....	68
Tablo 3.4. StateBasedEpEnergyConsumer modelinde radyo modları ve güç tüketim miktarları.....	78
Tablo 3.5. SERDP'in farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için güç tüketim miktarı sonuçları.....	81
Tablo 3.6. IoTD'ler tarafından bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayıları.....	83

SEMBOLLER DİZİNİ

IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IoTD	Nesnelerin İnterneti Cihazı (Internet of Things Device)
UE	Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment)
RUE	Röle Kullanıcı Ekipmanı (Relay User Equipment)
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
WSIS	Bilgi Toplumu Dünya Zirvesi (The World Summit on the Information Society)
NIC	National Intelligence Council (National Intelligence Council)
CCSA	Çin İletişim Standartları Birliği (China Communications Standards Association)
EU FP7	Yedinci Avrupa Birliği Çerçeve Programı (Seventh European Union Framework Programme)
CASAGRAS	Küresel RFID ile ilgili Standardizasyon için Koordinasyon ve Destek Eylemi (Coordination and Support Action for Global RFID-related Standardisation)
IETF	İnternet Mühendisliği Görev Gücü (Internet Engineering Task Force)
RFID	Radyo frekansı tanımlama (Radio-Frequency Identification)
NFC	Yakın Alan İletişimi (Near Field Communication)
WBAN	Kablosuz Vücut Alanı Ağları (Wireless Body Area Networks)
OWL	Web Ontoloji Dili (Web Ontology Language)
Irda	Kızılötesi Veri Derneği (Infrared Data Association)
RDF	Kaynak Açıklama Çerçevesi (Resource Description Framework)
WSN	Kablosuz Duyarga Ağlar (Wireless Sensor Networks)
IoE	Her şeyin İnterneti (Internet of Everything)
LAN	Yerel Alan Ağları (Local Area Networks)
LTE	Uzun Vadeli Evrim (Long Term Evolution)
3GPP	3. Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project)
eNB	Gelişmiş Düğüm B (Evolved Node B)
RAT	Radyo Erişim Teknolojisi (Radio Access Technology)

BLE	Bluetooth Düşük Enerji (Bluetooth Low Energy)
ISM	Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal (Industrial, Scientific and Medical)
CSMA/CA	Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim/Çakışmadan Kaçınma (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)
IBSS	Bağımsız Temel Servis Seti (Independent Basic Service Set)
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
D2D	Cihazdan Cihaza (Device-to-Device)
OFDMA	Ortogonal Frekans Bölümü Çoklu Erişimi (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)
CAZAC	Sabit Genlik Sıfır Otokorelasyon (Constant Amplitude Zero Autocorrelation)
RAP	Rastgele Erişim Prosedürü (Random Access Procedure)
PRACH	Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı (Physical Random Access Channel)
PSS	Birincil Senkronizasyon Sinyali (Primary Synchronization Signal)
SSS	İkincil Senkronizasyon Sinyali (Secondary Synchronization Signal)
MAC	Medya Erişim Kontrolü (Media Access Control)
CR	Haberleşme Menzili (Communication Range)
DC	Görev Döngüsü (Duty Cycle)
SD	Başarılı Keşif (Successful Discovery)
SFN	Sistem Çerçeve Numarası (System Frame Number)
SF	Alt Çerçeve (Subframe)
DRX	Süreksiz Alım (Discontinuous Reception)
FDD	Frekans Bölmeli Dupleksleme (Frequency Division Duplex)
TDD	Zaman Bölmeli Dupleksleme (Time Division Duplex)
CP	Çevrimsel Ön Ek (Cyclic Prefix)
GT	Koruma Zamanı (Guard Time)
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform)
IDFT	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (Inverse Discrete Fourier Transform)
STG ₁	Birinci Aşama (Stage 1)
STG ₂	İkinci Aşama (Stage 2)
STG ₃	Üçüncü Aşama (Stage 3)
nSTG ₁	Birinci Aşama Slot Sayısı

$nSTG_2$	İkinci Aşama Slot Sayısı
$nSTG_3$	Üçüncü Aşama Slot Sayısı
λ	Bir Slotluk Zaman Miktarı
δ	Slot
K	Birinci ve İkinci Aşama Slot Sayısı
S	Bir Periyottaki Toplam Slot Sayısı
N_{ZC}	Dizi Uzunluğu
N_{CS}	Çevrimsel Kaydırma Miktarı
u_1	Birinci Aşama Dizi Kökü
u_2	İkinci Aşama Dizi Kökü
Seq_{u_1}	Birinci Aşama Dizisi
Seq_{u_2}	İkinci Aşama Dizisi
$NBR_{IoTD_i}^{RUE}$	$IoTD_i$ Cihazının Röle Komşuları
$NBR_{IoTD_i}^{IoT}$	$IoTD_i$ Cihazının $IoTD$ Komşuları
$nNBR_{IoTD_i}^{RUE}$	$IoTD_i$ Cihazının Röle Komşu Sayısı
$nNBR_{IoTD_i}^{IoT}$	$IoTD_i$ Cihazının $IoTD$ Komşu Sayısı
$IoTD_{avg}$	Ortalama Bir $IoTD$ Cihazı
NBR_{avg}^{RUE}	$IoTD_{avg}$ Cihazının Röle Komşuları
NBR_{avg}^{IoT}	$IoTD_{avg}$ Cihazının Röle Komşularının Kendisi Dışındaki $IoTD$ Komşuları
$nNBR_{avg}^{RUE}$	$IoTD_{avg}$ Cihazının Röle Komşu Sayısı
$nNBR_{avg}^{IoT}$	$IoTD_{avg}$ Cihazının Röle Komşularının Kendisi Dışındaki $IoTD$ Komşularının Sayısı
p_i^2	Birinci Aşamada NBR_{avg}^{RUE} Cihazlarından En Az Birinin Diğerlerinden Farklı Bir Dizi Seçme Olasılığı
p_i^3	İkinci Aşamada $IoTD_{avg}$ Cihazının Röle Komşuları İçin En Az Bir Tane NBR_{avg}^{IoT} Cihazlarından Farklı Bir Dizi Seçme Olasılığı
G_{Alt}	Grup Alternatifleri Fonksiyonu
S_{Alt}	Slot Alternatifleri Fonksiyonu
IP	Tamsayı Bölümü (Integer Partition)
IP_i	Bir IP Satırı
IP_{No1}	IP 'nin İçerisinde 1 Değeri Bulunmayan Alt Kümesi

$IPNo1_i$	Bir $IPNo1$ Satırı
$nCIP_i$	IP_i Satırının Sütun Sayısı
$nCIPNo1_i$	$IPNo1_i$ Satırının Sütun Sayısı
$nOnesIP_i$	IP_i Satırında Tekrarlanan 1 Değeri Sayısı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) kavramı ilk olarak 1999 yılında Massachusetts Institute of Technology'deki Auto-ID merkezinin yönetici müdürü ve kurucularından Kevin Ashton tarafından ortaya atılmıştır. Ashton'a göre, geleneksel internet, sunucular ve yönlendiriciler içerir ancak tamamının en önemli yöneticisi ve yönlendiricisi olan insan kısıtlı zamana, kısıtlı odaklanma kabiliyetine ve kısıtlı doğruluğa sahiptir. Bundan dolayı, gerçek dünyadaki nesneler hakkında bilgi toplama konusunda yeterli değildir. IoT ise bu kısıtlamalardan uzak büyük bir güce sahiptir [1]. 17 Kasım 2005 tarihinde Tunus'ta Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union- ITU) tarafından düzenlenen Dünya Bilgi Toplumu Zirvesi'nde (The World Summit on the Information Society - WSIS) "ITU-İnternet Raporları 2005: Nesnelerin İnterneti" raporu yayınlanarak "Nesnelerin İnterneti" kavramı resmi olarak önerilmiştir [2]. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal İstihbarat Konseyi (National Intelligence Council- NIC) tarafından 2008 yılında yayınlanan bir konferans raporunda bilgi güvenliği konusunda riskler taşımasına rağmen Birleşik Devletlerin çıkarları üzerinde potansiyel etkileri olan altı teknolojiyi biri olarak IoT gösterilmiştir [3, 4].

IoT, fiziksel nesnelerin görmesini, duymasını, düşünmesini, birbirleriyle iletişime geçerek ortak görevler başarmasını, bilgi paylaşmasını ve kararlar almasını öngörür. Bu nesneler çevremizde gördüğümüz herhangi bir nesne olabilir, örneğin bir klima, bir trafik lambası veya bir ağaç. IoT teknolojisi yaygın bilişim, gömülü cihazlar, haberleşme teknolojileri, duyurga ağlar, internet protokolleri gibi birçok farklı teknolojiyi kullanarak geleneksel nesneleri akıllı nesnelere dönüştürmeyi amaçlar [5]. Nesnelerin daha akıllı hale gelmesi ile birlikte akıllı evler, akıllı şehirler, akıllı binalar, akıllı endüstri, akıllı şebekeler gibi yeni kavramlar da IoT ile uygulama alanı bulması beklenen yeni teknoloji alanlarıdır. Böylece, internet tabanlı ağ, insanların haberleşmesinden veya insandan insana haberleşmeden nesnelerin haberleşmesine veya nesneden nesneye haberleşmeye evrilir. Böylece, IoT, milyarlarca cihazın birbiriyle etkileşim halinde olduğu devasa bir ağa dönüşecektir.

IoT teknolojisi, internet erişimi için kendine özgü bir altyapıya sahip olmadığı için bu teknolojiye ait cihazların farklı ağ teknolojileri üzerinden internete erişmesi beklenmektedir. Giyilebilir sensör barındıran IoT cihazlarının akıllı telefonlar ile haberleşmesinde veya cihazların ev ve ofis gibi dar alanlardaki haberleşmesinde Zigbee [6], Bluetooth [7] ve BLE (Bluetooth Low Energy) [8] gibi IEEE 802.15.4 kişisel alan ağlarını kullanırken, bu cihazların internet bağlantısı kablolu veya kablosuz ağlar üzerinden gerçekleşmektedir. Gezinmeyen bir IoT cihazı, algıladığı veriyi kablolu bağlantı ile kenar, sis, bulut (edge, fog, cloud) gibi bir merkeze gönderebilirken, gezinilen bir cihaz LTE/4G [9] veya 5G [10] gibi mobil ağlar üzerinden veri iletimini tercih edebilir. Bundan dolayı, yakın gelecekte yüz milyarlarca IoT cihazının herhangi bir ağa bağlanacağı senaryosu düşünüldüğünde ortaya çıkacak devasa sistemde mobil ağların önemi oldukça fazla olacaktır [11] çünkü mobil olan IoT cihazların internet erişiminin 5G gibi hücreli ağlar üzerinden sağlanması beklenmektedir [12].

Hücreli ağlar konusunda yenilikçi çalışmalar yürüten Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi (The 3rd Generation Partnership Project – 3GPP) [13] raporlarına göre, IoT cihazlarının dahil olduğu bir hücreli ağda iki farklı bağlantı modelinin bulunması gerekmektedir [14]. Bu modellerin ilki IoT cihazlarının doğrudan baz istasyonuna bağlanabildiği doğrudan bağlantı modelidir. 3GPP'nin ikinci bağlantı modeli ise IoT cihazlarının hücreli ağda bulunan ve baz istasyonu ile bağlantı kurmuş olan röle bir cihaz üzerinden bağlantı kurduğu dolaylı bağlantı modelidir. Her bir modelin ağın performansı veya kullanıcı deneyimi açısından avantajları ve dezavantajları bulunsun da her iki model de kullanıcısı çok fazla olan kompleks bir mobil ağ için gereklidir. Bu tez çalışmasında 3GPP'nin dolaylı bağlantı modelindeki problemler dikkate alınmış ve geliştirilen yöntemler bu modele uygulanmıştır.

3GPP'nin ikinci bağlantı modelinde, IoT cihazları baz istasyonuna göndermek istedikleri veriyi öncelikli olarak hali hazırda baz istasyonu ile bağlantısını tamamlamış röle cihazlar üzerinden gönderirler. Ancak, ağda ilk defa aktif duruma geçen bir IoT cihazı haberleşme menziline (komşuluğunda) bulunan röle cihazların varlığından haberdar olmayacaktır. Bundan dolayı, IoT cihazlarının veriyi röleye göndermeden önce komşuluğunda bulunan röle cihazları keşfetmesi gerekmektedir. Literatürde cihaz keşfi ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunsun da bu çalışmalarda geliştirilen yöntemler 3GPP'nin bağlantı modeli için enerji verimliliği ve keşif başarısı açısından yeterli değildir. Bunun en

önemli nedeni, IoT cihazlarının enerji, kaynak ve işlem gücü açısından kısıtlı olmasıdır [15].

Nesneler arasındaki haberleşmeyi öngören IoT'nin birçok avantajı ve insan hayatını kolaylaştıran uygulamalarına rağmen çözüme kavuşturulması gereken birçok problemi de vardır. IoT'nin temeli Kablosuz Duyarga Ağlar (Wireless Sensor Networks- WSN) olduğu için WSN'lerin karşılaştığı zorluk ve problemlerle IoT uygulamaları da karşılaşır. Bunların yanı sıra, IoT'nin kendine özgü farklı zorlukları da vardır. Bu zorluklardan bazıları farklı teknolojileri kullanan cihaz çeşitliliği, enerji ve güç kısıtlamaları, gürültü ve girişim, büyük veri ve ölçeklenebilirliktir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için literatürde önerilmiş çok sayıda çalışma olmasına rağmen daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu reddedilmez bir gerçektir [16, 17].

IoT cihazları işletim gücü, hafıza, güç tüketimi, veri iletim hızı gibi birçok açıdan kısıtlı cihazlardır. Bu kısıtlamaların en önemlilerinden bir tanesi de enerji kısıtlamasıdır. IoT cihazları genellikle mobil cihazlar oldukları için batarya ile çalışırlar. Bundan dolayı, bataryalarını şarj etmek için her an güç kaynağına erişmeleri zordur [18]. Bazı IoT cihazlarının, örneğin ev içerisinde kullanılan cihazların, güç kaynağına sürekli olarak erişebilmeleri mümkün olsa da bu durum birçok senaryo için mümkün olmayabilir. Bundan dolayı, enerji problemi bütün IoT cihazları için ortak bir problemdir.

Daha uzun bir batarya ömrü için daha az güç tüketimi sağlayan tekniklerin geliştirilmesi bir ihtiyaçtır. Bu teknikler donanım ve batarya tasarımı ile olabileceği gibi haberleşme sistemlerinde, ağ protokollerinde de geliştirilebilir [19]. Örneğin, cihaz radyosunun sürekli açık olduğu bir haberleşme protokolü IoT için uygun değildir. Bu protokolün yerine gerektiğinde açık olan ihtiyaç duyulmadığında kapalı olan bir protokolün geliştirilmesi cihazın batarya ömrünü uzatacaktır [20]. Bu enerji kısıtlamasından dolayı, IoT cihazları için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinde cihazlar belirli periyotlarla aktif ve pasif durumları arasında durum değiştirirler. Aktif durumda olan cihaz sinyal gönderir ve alırken, pasif durumda olan cihaz uyku modundadır ve herhangi gönderim ve alım yapamaz [21].

Literatürde cihaz keşfi ile ilgili birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle ağın yapısına ve ağda bulunan cihazların ihtiyaçlarına göre tasarlanmıştır. Örneğin, bir WSN veya tasarsız (ad hoc) ağ için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin odaklandığı kısım cihazların aynı zaman aralığında aktif olduğu durumları çakıştırmaktır çünkü bu ağlardaki cihazlar genellikle asenkron olan cihazlardır [21-26] ve bir cihazın ne

zaman aktif ne zaman pasif olacağı diğer cihazlar tarafından bilinmez. Ayrıca, bu ağlarda bulunan cihazlar enerji açısından kısıtlı cihazlar olduklarından minimum zaman miktarı aktif kalarak cihaz keşfi işlemini gerçekleştirmeleri büyük önem arz etmektedir. Asenkron yöntemlerin yanı sıra cihazların senkron olduğu senaryolar için geliştirilmiş cihaz keşfi protokolleri de mevcuttur [27], [28]. Hücresel ağlardaki cihazlar için geliştirilen cihaz keşfi protokolleri [29-38] ise tam olarak 3GPP'nin ikinci bağlantı modeli için uygun değildir çünkü bu tezde üzerinde çalışılan model hem merkezi ağ modeli ile hem de dağıtık ağ modeli ile benzerlikler içermektedir.

Asenkron yöntemlerin en büyük eksiği cihazların gereksiz zaman aralıklarında aktif kalarak cihaz keşfi sağlamaya çalışmalarıdır. Asenkron yöntemlerdeki bu yaklaşımın nedeni bir cihazın komşuluğunda bulunan başka bir cihazı keşfetmeye çalışırken bu cihazın hangi zamanda aktif olacağını bilmemesidir. Bundan dolayı, periyodik olarak aktif olarak cihaz keşfi yapmaya çalışır. Bu durum enerji ve kapasite açısından kısıtlı olan cihazlar için büyük bir problemdir. Senkron olan cihazlar için geliştirilen yöntemlerde bu problem olmasa da IoT cihazları arasında senkronizasyonu sağlamak ve devam ettirmek hem maliyetli hem de sinyalizasyonun fazla olmasından dolayı enerji verimsizdir. Ayrıca, senkron yöntemlerde aynı zaman diliminde aktif olan cihazlar tarafından gönderilen mesajlar alıcıda çakışabilir. Dolayısıyla, literatürde önerilen çalışmalar enerji verimliliği ve keşif başarısı açısından üzerinde çalışılan yeni bağlantı modeli için uygun değildir.

Bu tez çalışmasında hücresel bir ağda imza tabanlı ve enerji verimli röle cihaz keşfi protokolü (SERDP-Signature Based and Energy Efficient Relay Discovery Protocol) geliştirilmiştir. İmza tabanlı sinyalizasyon ve geliştirilen özgün periyot yapısı ile cihazların bahsi geçen yeni bağlantı modelinde en az enerji tüketimi ile en yüksek cihaz keşfi başarısı sağlanması gerçekleştirilmiştir. 3GPP'nin ikinci bağlantı modelinde cihazlar arasındaki senkronizasyon Zadoff-Chu dizileri ile üretilen ön işaret (preamble) mesajları ile sağlanmıştır. İmza tabanlı mesajlaşma ile üretilen mesajlar hem kısıtlı cihazlar tarafından kolayca üretilebilir hem de mesajlar bir kimlik dışında farklı bir bilgi içermediğinden mesaj yükü azaltılmış olur. Ayrıca, bu mesajların gönderilmesi için kanal kodlama ve kanal tahminine de ihtiyaç yoktur. Bu çalışmada üretilen kimlikler bir cihazın (IoT ve röle) ileride aktif olacakları zaman aralıklarını haberleşme menziline bulunan diğer cihazlara bildirmek için kullanılmıştır. Bundan dolayı, literatürde bulunan çalışmaların aksine bu çalışmada IoT cihazları gereksiz zaman aralıklarında aktif olmak zorunda kalmayacaklarından dolayı cihazların enerji tüketimleri de azalmıştır.

Buna ek olarak, bu tez çalışmasında keşif mesajı çakışmalarının önlenmesi amacıyla özgün bir periyot yapısı geliştirilmiş ve bir periyot üç aşamaya ayrılmıştır. Üzerinde çalışılan sistem modeli üç katmanlı bir yapı barındırdığından dolayı (baz istasyonu – röle – IoT cihazları) geliştirilen periyot yapısı da ağ modeli ile uygunluk arz etmekte ve uyumlu çalışmaktadır. Her bir aşamanın amaca yönelik kendine özgü kuralları bulunmaktadır. Bu aşamaların kuralları ve detayları ikinci bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Geliştirilen özgün periyot yapısı ile keşif mesajlarının çakışması minimuma indirilmiştir.

Tek hücreden oluşan ağ ortamı, röle ve IoT cihazları OMNeT++ [39] simülasyon kütüphanesi ve çerçevesi aracılığıyla oluşturulmuş ve bu tez çalışmasında geliştirilen cihaz keşfi protokolü bu ortamda test edilmiştir. Zaman modeli ve cihaz karakteristiği olarak bu çalışmanın ağ modeli ile büyük benzerlikler gösteren Todis [23], Hedis [23], SearchLight [24], Disco [22] ve RBTP [27] protokolleri ile karşılaştırılan SERDP'in karşılaştırmalı sonuçları üçüncü bölümde detaylarıyla gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar SERDP'in daha az enerji tüketimi ile daha fazla sayıda cihaz keşfedebilme başarısı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bölümde bu tez çalışmasının arka planı, problemler, literatürde yapılmış çalışmalar irdelenirken, ikinci bölümde sistem modeli ve geliştirilen yöntem detaylıca anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmaların bulguları iki farklı senaryo ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Dördüncü bölümde bu tez çalışmasının sonuçlarından, beşinci bölümde ise önerilerden kısaca bahsedilmiştir.

1.2. IoT'nin Karakteristik Özellikleri

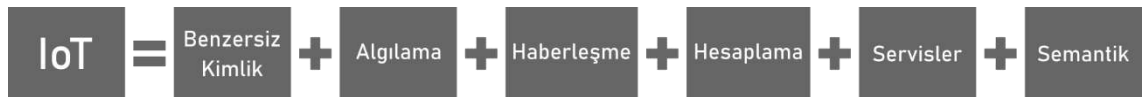
IoT kavramının farklı organizasyonlar tarafından yapılan tanımları Tablo 1'de gösterilmiştir. IoT teriminin üzerinde anlaşılan tek bir tanımı olmasa da bu paradigmaya göre çevremizdeki nesneler birbirleriyle bilgi paylaşmak ve haberleşmek amacıyla bir şekilde ağlara ve ağların ağı olan internete bağlanacaktır [40].

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, IoT teknolojisinin ve cihazların birkaç karakteristik özelliği taşıması gerekir. Bunlardan ilki benzersiz bir kimliğe sahip olmaktır (Identification). Bu kimlik sayesinde bir nesne dünyadaki diğer nesnelerden ayırt edilebilir. IoT nesnelerini kimliklendirmek için kullanılan teknolojilerden bir tanesi RFID'dir (Radio-Frequency Identification). RFID teknolojisi, bir nesneye teçhiz edilen ve RFID tag adı verilen elektronik bir etiketten alınan radyo dalgaları ile nesneleri kimliklendirmeyi ve

takip etmeyi amaçlar. Bir RFID sistemi üç parçadan oluşur; RFID etiketi, RFID okuyucu ve merkezi bilgisayar sistemi [41].

Tablo 1. Farklı organizasyonların IoT tanımlamaları

Organizasyon	Tanım
CCSA (China Communications Standards Association)	Algılama, hesaplama, işletme ve haberleşme kabiliyeti olan ve insanlarla nesneler arasında veya nesnelerle nesneler arasında bilgi göndererek, sınıflandırarak ve işleyerek haberleşmeyi destekleyen bazı cihazların yerleştirilmesiyle fiziksel dünyadan bilgi toplayan ve fiziksel dünya nesnelerini kontrol eden bir ağ.
ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector)	Bilgi toplumu için, mevcut ve gelişen uyumlu bilgi ve iletişim teknolojilerini temel alan (fiziksel ve sanal) şeyleri birbirine bağlayarak gelişmiş hizmetler sağlayan küresel bir altyapı.
EU FP7 (Seventh European Union Framework Programme) CASAGRAS (Coordination and Support Action for Global RFID-related Standardisation)	Veri yakalama ve haberleşme becerilerini en iyi kullanarak, fiziksel ve sanal nesneleri birbirine bağlayan global bir ağ alt yapısı.
IETF (Internet Engineering Task Force)	Birbiriyle bağlantılı olan standart haberleşme protokolleriyle eşsiz olarak adreslenen nesnelerin dünya çapındaki ağı.



Şekil 1.1. IoT cihazlarının sahip olması gereken özellikler [5].

Bir IoT cihazının sahip olması gereken ikinci özellik sıcaklık, nem, hareket, hız, kan basıncı, kalp atış hızı [42] gibi çevresindeki fiziksel değişimleri algılamak için gereken duyargalara sahip olmasıdır (Sensing). Bu duyargalar sayesinde nesneler fiziksel

dünyadaki değişimleri algılayabilir ve bu değişimlerin niteliklerini bilebilirler. Algılanan bu verilerle nesneler hakkında analizler yapılabilir ve bazı kararlar verilebilir. Nesnelere teçhiz edilen duyargalar akıllı duyargalar, giyilebilir duyargalar, gömülü duyargalar veya eyleyiciler (actuators) olabilir. Örneğin, bir hastaya teçhiz edilen giyilebilir bir IoT cihazı hastanın kan basıncının düştüğünü gösteren verileri elde ettiğinde bu hasta için bir ambulans çağırılması kararı verilebilir. Bu örnekte kan basıncının düşmesini algılama görevini duyarga, ambulans çağırma gibi bir tepkiyi verme görevini ise eyleyici kısım yürütür.

Üçüncü özellik ise güvenli bir veri iletimi için haberleşme becerisine sahip olmasıdır (Communication). Böylece, nesnelerle ilgili bilgiler bir dizi radyo ağlar ve internet aracılığıyla her an ulaşılabilir olabilecektir. Bu özellik bir dizi kablolu veya kablosuz haberleşme, anahtarlama, ağ ve ağ geçidi teknolojilerini içerebilir. IoT cihazları kaynak ve kapasite açısından kısıtlı cihazlar oldukları için az güç tüketimi gerektiren haberleşme protokolleri kullanırlar. Wi-Fi, Bluetooth, NFC (Near Field Communication), IEEE 802.15.4 (ZigBee), IEEE 802.15.6 (Wireless Body Area Networks) bu protokollere örnektir [5, 43]. RFID teknolojisi de IoT cihazlarının kullandığı haberleşme protokollerinden biri olarak sayılabilir çünkü bu protokol ile RFID okuyucusu ve RFID etiketi arasında sinyalleşme gerçekleşir. RFID okuyucusu bir nesnenin kimliğini gösteren RFID etiketine sorgu sinyali gönderir ve etiketten yansıyan bu sinyal ile kimlik tespiti yapar [44].

Mikro denetleyiciler, mikroişlemciler gibi işlem birimleri ve yazılım uygulamaları IoT'nin beynini ve işlem kabiliyetini temsil eder (Computation). Arduino, UDOO, FriendlyARM, Intel Galileo, Raspberry PI, Gadgeteer, T-Mote Sky benzeri donanımlar IoT uygulamalarını çalıştırmak için geliştirilmiş donanım platformlarıdır [5]. Bu donanımların yanında birçok yazılım platformları da kullanılır. Örneğin, C programlama diliyle geliştirilen Contiki işletim sistemi kablosuz duyarga ağlar ve IoT senaryoları için en fazla kullanılan işletim sistemlerinden biridir [45]. Duyargalar aracılığıyla algılanan fiziksel veriler bu donanım ve yazılım platformları ile işlenebilir veya gönderilebilir. Milyarlarca nesne tarafından üretilen ve veri tabanlarına kaydedilen büyük veriler ise “Bulut Bilişim” gibi teknolojilerle işlenerek anlamlı bilgilere dönüştürülür.

Farklı teknolojilere sahip olan IoT cihazlarının aynı ağda olması, birbirleriyle haberleşme ve internete açılma gereksinimlerinin olması cihazların birbirleriyle uyumlu çalışabilmesi problemini doğurur. Bu problemin çözümlerinden bir tanesi servis tabanlı

mimaridir (Services) [46, 47]. IoT uygulamaları için kullanılabilecek servislerden bazıları kimlikle ilgili servisler (Identity-Related), bilgi toplama servisleri (Information Aggregation), iş birliğine duyarlı servisler (Collaborative-Aware), yaygın servislerdir (Ubiquitous). Kimlikle ilgili servisler diğer tür servisler tarafından da kullanılan en temel ve önemli servistir. Her IoT uygulaması gerçek dünyadan sanal dünyaya getirmek istediği nesneleri kimliklendirmek zorundadır. Bu servis nesnelere eşsiz kimlikler atamayı amaçlar. Bilgi toplama servisleri IoT cihazları tarafından algılanan ham verilerin uygulamaya gönderilmeden ve işlenmeden önce toplanmasını ve özetlenmesini amaçlar. İş birliğine duyarlı servisler elde edilen veriyi kullanarak karar ve tepki vermeyi amaçlar. Yaygın servislerin görevi ise IoT cihazlarının ve diğer servislerin her yerde ve her zaman ulaşılabilir olmasını sağlamaktır [5].

Servisler tarafından doğru kararların verilebilmesi için algılanan ve işlenen verilerden anlamlı ve işe yarar bilgiler çıkarılması gerekir (Semantics). Bunun yolu ise verileri doğru bir şekilde analiz etmektir. Böylelikle, elde edilen anlamlı veriler ilgili servislere gönderilir ve servisler tarafından uygun karar ve tepkiler verilir. RDF (Resource Description Framework) [48] ve OWL (Web Ontology Language) [49] gibi Semantic Web teknolojileri de bu gereklilik için kullanılan teknolojilerdir. Çalışma [50]'da akıllı şehirlerde duyarga düzeyinde alınan ham veriler bulut bilişim tabanlı sistemlere gönderilerek bu verilerden anlamlı bilgiler çıkarılır. Bu anlamda, bulut bilişim teknolojisinin IoT'nin en büyük destekçisi olacağı söylenebilir [5, 40].

1.3. IoT ve İnternet

Cisco verilerine göre, 2030 yılında internete bağlanacak cihaz sayısı 500 milyar olacak ve bu cihaz sayısının büyük bir kısmını IoT cihazları teşkil edecektir [51]. Yine 2020 yılı için Cisco tarafından tahmin edilen internete bağlanacak cihaz sayısı 50 milyardır. Tahmin edilen cihaz sayısındaki bu üstel artış “Nesnelerin İnterneti” kavramını “Her şeyin İnterneti” IoE (Internet of Everything) kavramına dönüştürebilir [52]. Bunun anlamı çevremizde gördüğümüz her şeyin/nesnenin internete bağlanabilmesidir.

IoT haberleşmesi ile ilgili birçok çalışma ve uygulama geliştirilmiş olsa da bu denli fazla sayıdaki cihazın bağlantı kurma problemleri ve enerji verimliliği yeterince dikkate alınmamıştır. E-sağlık, e-tarım, akıllı evler, akıllı şehirler, akıllı ulaşım gibi birçok alanda IoT cihazlarının birbirleriyle bağlantı kurması gerçekleşecektir. Farklı alanlarda

milyarlarca cihazın internet üzerinden etkileşim halinde olacağı bir senaryodan bahsediyoruz. Bundan dolayı, cihazların uçtan uca haberleşme maliyetlerinin en az enerji tüketimi ile sağlanması büyük önem arz eder [11].

Devasa cihaz sayısının yanı sıra, IoT cihazlarının uygulama alanına göre ağdan beklentileri ve karakteristik özellikleri farklı olabilir. Örneğin, kritik uygulamalar için kullanılacak bir IoT cihazının ağdan beklediği hatasız veri iletimi iken, başka bir IoT cihazı ağdan yüksek veri oranı, en az enerji tüketimi, en az gecikme veya yüksek mobil desteği talep edebilir [53]. Ya da mobil olmayan bir kapalı mekân IoT cihazı yerel bir ağa bağlanarak internete bağlanırken, mobil olan dış mekân IoT cihazları hücresel ağlar üzerinden internete açılabilir. Bundan dolayı, bütün IoT cihazlarının aynı ağı kullanarak internete açılmaları beklenemez. IoT cihaz gereksinimlerinin çeşitliliği bağlantı çeşitliliğini belirler. IoT cihazlarının bağlantı kuracağı potansiyel ağlar,

- IEEE 802.11 (Wi-Fi),
- IEEE 802.16 (WiMax),
- IEEE 802.15.4 (LR-WPAN),
- 3G/4G/5G,
- IEEE 802.15.1 (BlueTooth) ve
- LoRaWAN kablosuz ağlarıdır [54].

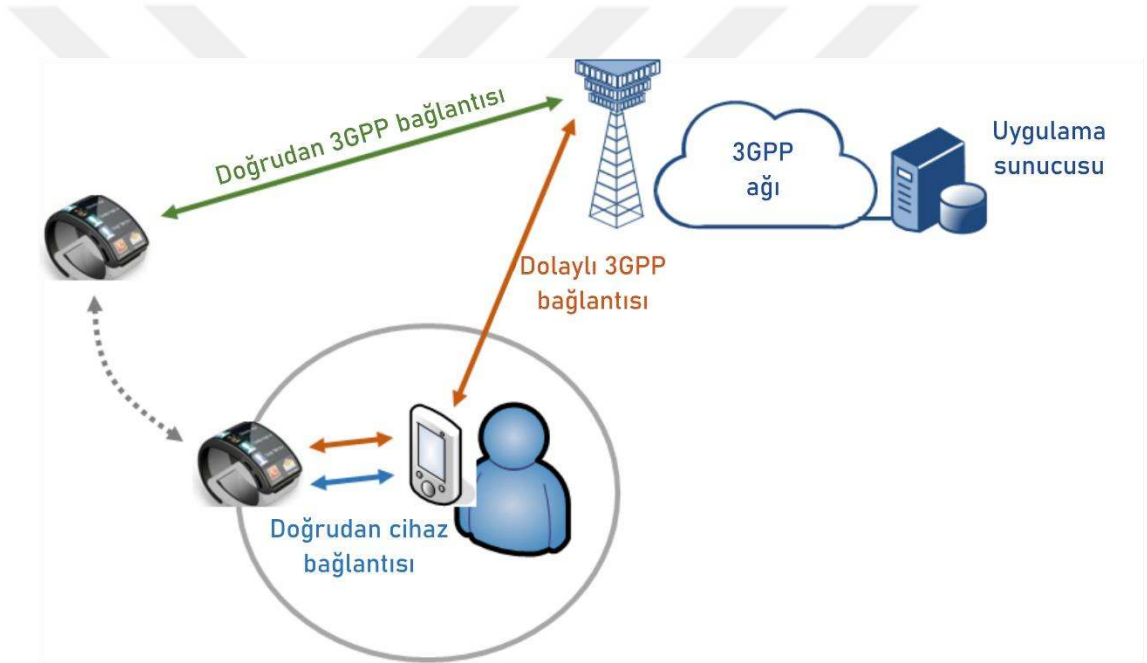
Gezgin olmayan IoT cihazları (örneğin ev eşyaları) kablolu veya kablosuz bir yerel alan ağı (Local Area Network – LAN) ağ geçidi üzerinden diğer IoT cihazlarına ve internete bağlanabilir. Ancak, ağda gezgin olan cihazların LAN ağ geçitlerini sürekli olarak kullanması mümkün değildir. Bu cihazlar için en uygun olan ağ, mobil/hücresel ağlardır (3G/4G/LTE/5G). Bu örnekten anlaşılacağı üzere, IoT cihazlarının ihtiyaç ve ağdan taleplerine göre internete bağlanmak için kullanacakları ağlar değişebilmektedir.

1.4. 3GPP Bağlantı Modelleri

Hiç şüphesiz IoT cihazlarının internete bağlanmak için kullanacakları ağlardan bir tanesi de hücresel ağlardır. Örneğin, 5G mobil ağların IoT ihtiyaçlarını karşılaması konusunda literatürde yapılmış birçok çalışma vardır [11]. Yüksek veri oranı, düşük gecikme, çok fazla sayıdaki IoT cihazlarının ağdaki kontrolü gibi IoT ihtiyaçlarının 5G’de karşılanması beklenmektedir [55]. Ancak, bir küçük hücrenin kapsama alanındaki binlerce

IoT cihazının ağdan farklı beklentilerinin olması cihazların farklı trafik ve bağlantı senaryolarını gerektirebilmektedir.

3GPP, çok fazla sayıdaki IoT cihazının internete bağlantısında ihtiyaç duyulan yeni servisleri ve pazarları desteklemek amacıyla gereken sistem gereksinimlerini, kapasite ve kullanım senaryolarını rapor olarak yayınlamıştır [14]. Bu raporda sunulan kullanım senaryoları, farklı karakteristiğe ve beklentilere sahip olan IoT cihazlarının hücresel ağa bağlantısındaki farklı alternatifleri gösteren trafik ve bağlantı senaryolarını içerir. Çünkü, IoT cihazlarının bazıları basit cihazlar iken, bazıları kompleks cihazlar olabilir. Bazı cihazlarda gecikme zamanı önemliyken, bazı cihazlar yüksek veri iletim oranını önceleyebilir. Bundan dolayı, tek bir bağlantı senaryosundan bahsetmek imkansızdır.



Şekil 1.2. 3GPP'nin IoT için önerdiği bağlantı senaryoları [14].

3GPP, IoT cihazlarının hücresel ağa bağlantısı için iki bağlantı senaryosu önermiştir. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, bu senaryolardan ilki IoT cihazının doğrudan olarak hücresel ağa bağlanmasını öngören senaryodur (doğrudan 3GPP bağlantısı). İkinci bağlantı senaryosu ise IoT cihazının bir röle cihaz üzerinden hücresel ağa bağlanmasıdır (dolaylı 3GPP bağlantısı).

3GPP'ye göre IoT cihazları bu bağlantı modellerinin her ikisini de kullanabilirler. Doğrudan 3GPP bağlantı modeli IoT cihazının direkt olarak 3GPP baz istasyonu (Evolved Node B- eNB) ile haberleşmesini sağlar. Bu modelde IoT cihazı bir uygulama sunucusuna

ya da başka bir cihaza eNB üzerinden erişir. Dolaylı 3GPP bağlantısında ise IoT cihazı eNB'ye bağlı olan akıllı telefon gibi bir röle cihaz üzerinden ağa bağlanır. IoT cihazının röle cihazı ile bağlantı kurması 3GPP'de doğrudan cihaz bağlantısı olarak tanımlanmıştır. Dolaylı 3GPP bağlantısı ile haberleşme yapan bir cihaz istediği zaman doğrudan 3GPP bağlantısına geçebilir. Benzer şekilde, doğrudan 3GPP bağlantısı ile haberleşen bir cihaz ihtiyaca göre dolaylı 3GPP bağlantı modeline geçebilir. Bu bağlantı modellerinde iki farklı Radyo Erişim Teknolojisi (Radio Access Technology - RAT) kullanılır. Dolayısıyla, IoT ve röle cihazlar iki ağ arayüzüne sahiptirler. Bu ağ arayüzlerinden biri doğrudan 3GPP bağlantı modelini kullanarak ağa erişmek için diğeri ise doğrudan cihaz bağlantısını kullanarak IoT veya röle cihazla haberleşmek için kullanılır.

Yakınlık tabanlı mobil sosyal ağların (Proximity-based mobile social networks) yaygınlaşmasıyla birlikte, birbirlerine mesafe olarak yakın olan cihazların haberleşmesi önem kazanmıştır [56]. Ancak bir ağda cihazların birbirleriyle haberleşebilmeleri için ilk olarak birbirlerinin varlıklarından haberdar olmaları gerekir. Birbirlerini keşfetmek isteyen iki cihaz ise aynı frekans ve zamanda aktif olmalı, birbirlerinin kapsama alanları içinde olmalı ve üçüncü bir cihaz tarafından girişime sebep olacak sinyal gönderilmemelidir [57]. 3GPP'nin dolaylı bağlantı modeli göz önünde bulundurulduğunda, IoT cihazının ağa ve internete bağlanması için öncelikle röle cihazı keşfetmesi gerekir. Ancak, bu bağlantı modelinde cihaz keşfi protokolü geliştirirken dikkate alınması gereken bazı zorluklar vardır. Sonraki bölümlerde literatürde bulunan cihaz keşfi protokolleri, bu protokollerin eksikleri, tezin zorlukları, kapsamı ve sunulan katkılar detayları ile açıklanacaktır.

1.5. Cihaz Keşfi Protokolleri

Literatürde farklı ağlar için geliştirilen çok sayıda cihaz keşfi protokolü vardır. Bu kısımda, literatürdeki çalışmaları dağıtık ağlardaki ve merkezi ağlardaki cihaz keşfi protokolleri şeklinde gruplandırarak bu çalışmaların özelliklerinden, eksiklerinden ve güçlü yanlarından bahsedeceğiz. WSN ve tasarsız ağlar dağıtık ağlara örnek verilebilir çünkü bu ağlarda cihazlar merkezi bir düğüm olmaksızın birbirleriyle haberleşirler. Ancak hücreli ağlar gibi merkezi ağlarda cihazlar baz istasyonu gibi bir merkezi düğüm üzerinden haberleşirler. Bu ağların 3GPP'nin dolaylı bağlantı modelindeki ağ topolojisi ve cihaz karakteristikleri benzerliğinden dolayı bu kısımda tasarsız/WSN ve hücreli ağlardaki cihaz keşfi protokolleri değerlendirilecektir.

3GPP'nin ikinci bağlantı modeli iki katmanlı bir yapıya sahiptir. Bir IoT cihazı röle cihaza, röle cihaz da eNB cihazına bağlanır. Bundan dolayı, bu model ne tam olarak merkezi ağ topolojisine ne de dağıtık ağların yapısına benzer. Aynı zamanda, bu model hem merkezi ağlarla hem de dağıtık ağlarla benzerlik gösterir.

3GPP'nin ikinci bağlantı modelinin hücrel ağlardan bazı farkları vardır. Bir hücrel ağda sadece bir merkezi düğüm vardır ve o düğüm eNB'dir. Ancak, 3GPP modelinde her röle cihaz IoT cihazları için merkezi düğüm olduğundan, ağdan çok sayıda merkezi düğüm bulunacaktır. Ek olarak, hücrel ağın merkezi düğümü ağda gezgin değildir ve batarya ile çalışmaz, sürekli güç desteği alabilir. Ancak, bu modelin merkezi düğümleri olarak kabul edilen röle cihazlar ağda gezgin ve batarya ile çalışan kısıtlı cihazlardır.

Bahsi geçen modelin tasarsız ağlar ve WSN'lerden de önemli farkları vardır. Tasarsız ağlarda bütün cihazlar özdeştir ve herhangi bir merkezi düğüm bulunmaz. Ama, bu modeldeki bütün cihazlar özdeş değildir çünkü üç farklı cihaz türü vardır bunlar eNB, IoT cihazları ve röle cihazlar. Bununla birlikte, bu ağ modelinde IoT cihazları için çok sayıda merkezi düğüm vardır. İkinci önemli fark ise, tasarsız ağlar ve WSN'lerde bütün cihazlar ağın geri kalan diğer cihazları tarafından keşfedilebilirken, 3GPP modelinde sadece IoT ve röle cihazlar birbirlerini keşfetmeye çalışırlar.

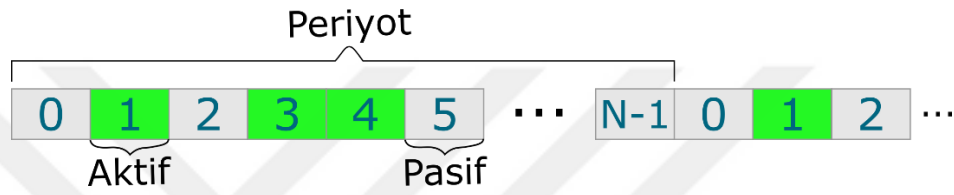
1.5.1. Tasarsız Ağlarda ve WSN'de Cihaz Keşfi Protokolleri

Bu ağlar için önerilen cihaz keşfi protokolleri farklı yaklaşımlarla geliştirilmiştir. Bu çalışmalar genelde deterministik ve olasılıksal protokoller olarak sınıflandırılrsa da biz bu kısımda çalışmaları zamana, ağların senkron olup olmama durumuna, keşif için gönderilen mesajların türlerine ve gönderme biçimlerine göre de detaylandıracağız ve kıyaslayacağız.

1.5.1.1. Zaman

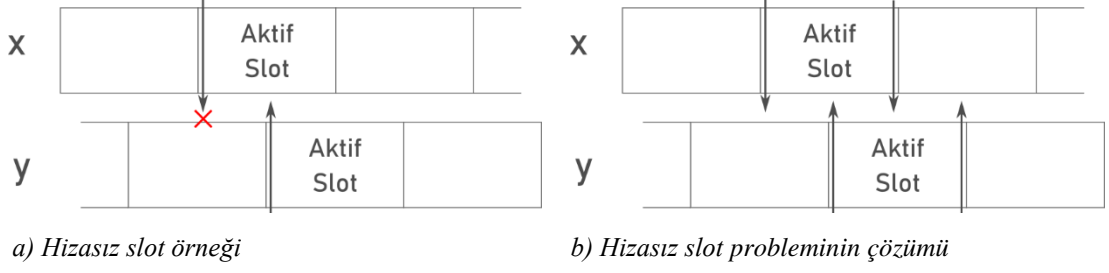
Tasarsız ağlar ve WSN'ler için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin neredeyse tamamı Şekil 1.3'te gösterilen slot tabanlı zaman modelini tercih ederler. Bu modele göre, sürekli zaman slot adı verilen küçük zaman parçalarına bölünür [58]. Slot adı verilen en küçük zaman dilimi, en temel haberleşme için (cihaz keşfi protokolü açısından

düşünüldüğünde keşif mesajlarını gönderebilecek ve alabilecek kadar) yeterli olmalıdır. Bu protokollerde, zaman dilimlerini daha kolay ifade etmek için her slotluk zaman parçası bir indeks ile ifade edilir. Belirlenen sayıda slot dilimlerinin bir araya gelmesi bir periyodu oluşturur. Periyotun son slotundan sonra yeni bir periyot başladığından slot indeksi yeniden sıfır ile başlar. Bir slotta cihaz aktif veya pasif durumda olabilir. Aktif durumda cihazlar mesaj gönderebilir, gönderilen mesajları alabilir veya kanalı dinleyebilirler. Pasif durumda ise cihaz radyosu uyku durumundadır. Herhangi bir sinyal gönderimi veya gönderilen sinyalin alımı yapılamaz.



Şekil 1.3. Slot tabanlı zaman modeli

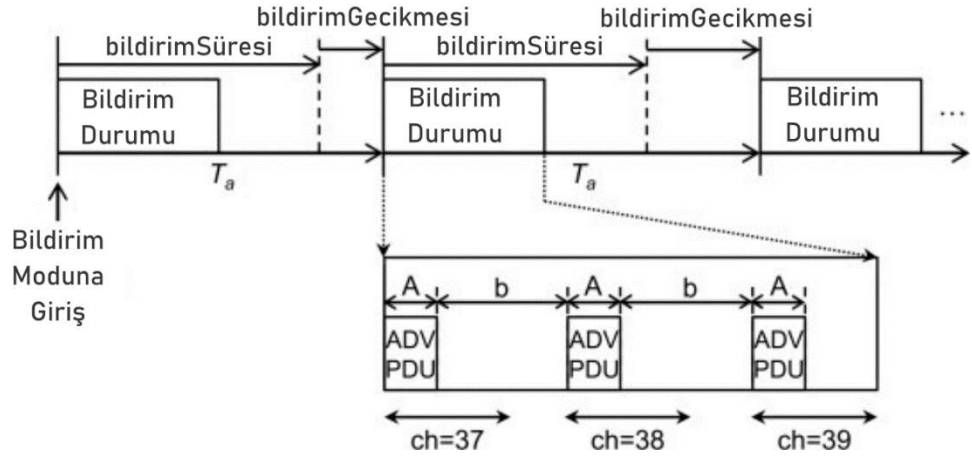
Bu modelde iki cihazın birbirlerini başarılı bir şekilde keşfedebilmeleri için iki cihazın aktif slotlarının denk gelmesi gerekir. Ancak, Şekil 1.4.a'da gösterildiği gibi, bu ağlarda cihazlar asenkron olduklarından dolayı farklı cihazların slotları aynı şekilde hizalanamayabilirler. Genelde slotların başlangıcında keşif mesajları gönderildiği için iki cihazdan biri keşif mesajını alamayabilir. Şekil 1.4.a'da x cihazı aktif slotunun başlangıcında keşif mesajını göndermiştir ancak bu mesaj gönderildiğinde y cihazının radyosu aktif olmadığı için x cihazının gönderdiği keşif mesajı y cihazı tarafından alınamaz. Ancak, y cihazının gönderdiği keşif mesajı x cihazı tarafından alınabilir çünkü bu mesaj gönderildiğinde iki cihaz da aktiftir. Şekil 1.4.b'de gösterildiği gibi bu problemin çözümü için her cihazın aktif slotlarının başlangıcında ve bitişinde keşif mesajı göndermeleri önerilmiştir [22]. Bu şekilde, aktif slotlar tam olarak hizalı olmasalar dahi gönderilen keşif mesajları iki cihaz tarafından da başarıyla alınabilir.



Şekil 1.4. Hizasız slot örneği ve çözümü [58].

Zamanın slotlara bölünmesi cihaz keşfi protokolleri için karmaşıklığı azaltan bir yöntemdir. Böylece, cihazlar hangi slot indekslerinde aktif veya pasif olacaklarına karar verebilirler. Ancak, bu modelde slotların hizalı olmaması geliştirilen protokolün kompleksliğini artırır. Bu nedenle, bu modeli benimseyerek geliştirilen cihaz keşfi protokolleri cihazların slotlarının hizalı olduğunu varsayarlar. Teoride bu varsayım yapılsa da pratikte asenkron olan cihazların slotlarının hizalı olması zor olabilir çünkü her cihaz bağımsız olarak çalışır ve yerel saatleri farklıdır.

Slot tabanlı zaman modelinin dışında periyodik zaman tabanlı keşif protokolleri de vardır. BLE (Enerji Tasarruflu Bluetooth/Bluetooth Low Energy) için geliştirilen komşu keşfi protokolü bu tür zaman modeline bir örnektir [59]. Bu modelde, zaman slotlara bölünmemiştir. Cihazlar belirli bir zaman diliminde periyodik olarak aktifleşerek keşif mesajlarını gönderir veya alırlar. Şekil 1.5'te gösterildiği gibi T_a zaman aralıkları boyunca cihazlar bildirim (advertising) moduna girerek kanal 37, 38 ve 39 da mesaj gönderir ve b süresi boyunca bu mesaja gelecek cevapları dinlerler. Geleneksel bluetooth teknolojisinde cihazlar ISM (Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal/Industrial, Scientific and Medical) bandında haberleştikleri için çakışmaları önlemek amacıyla 79 kanalda cihaz keşfi yaparken [60], BLE'de hem gecikmeyi hem de güç tüketimini azaltmak amacıyla cihaz keşfi yapılan kanal sayısı üçe indirilmiştir.



Şekil 1.5. BLE'de periyodik zaman tabanlı cihaz keşfi gösterimi [59].

1.5.1.2. Senkronizasyon

Senkron bir ağda bütün cihazların yerel saatleri ideal olarak aynı oranlarda çalışması için ve sınırlı ancak sabit bağıl faz farkı ile aynı ortalama oranlarına sahip olması için periyodik olarak kontrol edilir ve güncellenir [61]. Böylece, senkron ağlarda cihazlar harici bir saat tarafından elde edilen ortak zaman referansına sahipken, senkron olmayan ağlarda cihazların böyle bir ortak referansı yoktur. Cihaz keşfi protokollerinde senkron olmayan cihazlar komşuluğundaki cihazları keşfetmek için bu cihazların aktif olacakları zamanı aramak zorundadırlar çünkü komşu cihazların ileride ne zaman aktif olacaklarını bilemezler. Örneğin, Şekil 1.6.a'da gösterildiği gibi, x , y ve z cihazları senkron olmayan cihazlardır. Bundan dolayı herhangi bir andaki slot indeksleri aynı olmayabilir. x cihazının slot indeksi 3 iken, y cihazının 6 ve z cihazının ise 1'dir. Ancak, Şekil 1.6.b'de gösterildiği gibi senkron ağlarda cihazların herhangi bir andaki slot indeksleri aynıdır. Bundan dolayı, bir cihaz komşuluğundaki cihazların ne zaman aktif olacağını tahmin edebilir.

Senkron ağlar kaynakların kullanımı konusunda daha verimli ve cihaz keşfi konusunda daha başarılı olsa da WSN ve tasarsız ağlar için önerilen cihaz keşfi protokollerinin çoğunluğu cihazların asenkron olduğunu kabul etmişlerdir çünkü bu ağlarda senkronizasyon hem karmaşıktır hem de senkronizasyon için enerji tüketimi gerekmektedir. PRS (Pseudo-Random Shuffling) [27], RBTP (Recursive Binary Time Partitioning) [27], FlashLinQ [28] çalışmaları senkron cihazlar için cihaz keşfi öneren çalışmalardır. Bu çalışmalar, senkron olsa da fazla sayıda cihazın bulunduğu yoğun bir

ağda aynı anda birden fazla cihaz tarafından gönderilen keşif mesajlarının çakışmasını önleyemezler. WSN ve tasarsız ağlar için geliştirilen protokoller ağların asenkron olduğunu kabul etmiş olsa da bu çalışmalarda karmaşıklığın azalması için slotların hizalı oldukları ancak periyotların hizalı olmadıkları kabul edilmiştir.

x				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
z							0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			

a) Slot tabanlı zaman modelinde eş zamansız cihazlar

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

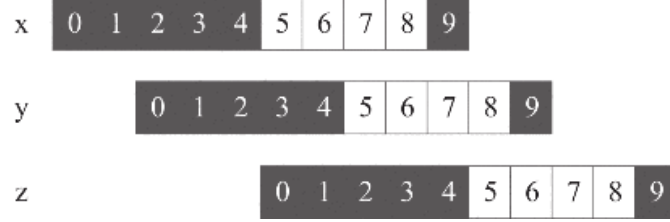
b) Slot tabanlı zaman modelinde eş zamanlı cihazlar

Şekil 1.6. Eş zamanlı ve eş zamansız cihazlarda periyot gösterimi

1.5.1.3. Olasılıksal ve Deterministik Yaklaşımlar

Olasılıksal cihaz keşfi protokollerinde cihazın bir slotta aktif veya pasif olmasına olasılıksal hesaplamalar sonunda karar verilir. Bundan dolayı, cihazın hangi slotlarda aktif olacağını önceden bilinmesi mümkün değildir. Birthday paradoksunu [62] kullanarak geliştirilen Birthday protokolü [63], bir grup içerisinde rastgele seçilen insanların doğum günlerinin aynı gün olma olasılığından esinlenerek önerilmiştir. Aynı mantıkla, bu protokol birkaç cihazın aynı slot indekslerinde aktif olma olasılıklarını hesaplayarak bir slotta aktif veya pasif olmaya karar verir. Bu olasılık hesabı için periyottaki slot sayısı ve ortamdaki cihaz sayısının önceden bilinmesi gerekir. Her slot başlangıcında keşif mesajı gönderme olasılığı P_T , kanalı dinleme olasılığı P_L ve uyuma olasılığı $1-P_T-P_L$ hesaplanır ve bu slotta cihazın aktif veya pasif olacağına karar verilir [64, 65]. Bir ağda A ve B cihazlarının başarılı bir şekilde birbirlerini keşfetmeleri için bu cihazlardan bir tanesi gönderim (transmitting) modunda iken diğerinin alım (receiving) modunda olması ve bu iki cihazın komşuluğunda olan diğer cihazların gönderim modunda olmaması gerekir. Bu protokolün en büyük eksikliği başarılı bir keşfi garanti edememesidir. Bir diğer ifadeyle, deterministik protokoller en kötü senaryoda iki cihazın kaç slot sonra birbirlerini keşfedeceği bilgisini

verebilmesine rağmen, olasılıksal yaklaşımlar böyle bir keşfi garanti edemezler. Bunun temel nedeni keşiflerin olasılık hesaplarına bağlı olmasıdır. Bundan dolayı keşif gecikmesi çok fazla olabilir [66].



Şekil 1.7. "Over-half Occupation" yöntemi

Çalışma [58]'de detaylı olarak ifade edildiği gibi, WSN ve tasarsız ağlarda geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin çoğunluğu deterministik yaklaşımla geliştirilmiştir. Bu protokoller her durumda iki cihazın birbirlerini keşfetmelerini amaçlar ve en kötü senaryoda kaç slot sonunda keşfin gerçekleşeceği bilgisini verebilirler. Örneğin, n slotluk bir periyotta iki cihazın birbirlerini kesin olarak keşfetmeleri için önerilen en basit yaklaşım cihazların bir periyottaki slotların en az yarısından bir fazla slotta $(n/2)+1$ aktif olmalarıdır (Over-half occupation) [21]. Şekil 1.7'de gösterildiği gibi bu yaklaşımla iki cihaz senkron veya asenkron olsalar da birbirlerini mutlaka keşfederler. Periyottaki slotlarda ne kadar bir kayma olduğunun bir önemi yoktur. Ancak enerji tüketimi açısından düşünüldüğünde aktif geçirilen süre %50'den fazla olduğu için enerji verimli bir yöntem değildir. Ayrıca olasılıksal yöntemlerin aksine deterministik olan bu yöntemde cihazlar hangi slotlarda aktif olacaklarını önceden bilirler. Deterministik protokoller üç grupta incelenebilir. Bunlar asallık tabanlı (primality-based) protokoller, periyodu matris biçiminde düşünerek geliştirilen protokoller (quorum-based) ve slotların sabit olmadığı ve farklı periyotlarda değiştiği (anchor-probe-based) çalışmalardır.

Asallık tabanlı önerilen protokoller Çin Kalan Teoremi'nden (Chinese Remainder Theorem) [67] esinlenerek geliştirilmiştir. Bu yaklaşıma göre her cihaz bir asal sayı seçer ve slot indeksinin seçilen bu asal sayı ile bölümünden kalan sıfır olduğunda cihaz radyosunu aktif duruma getirir. Böylece, cihazlar asenkron olsa da farklı slot indekslerinde aktif olacakları için birbirlerini keşfedebilirler. Ancak, eğer iki cihaz aynı asal sayıyı seçerse ve periyottaki slot indeksleri arasındaki kayma belirli bir sayıda olursa bu iki cihaz birbirlerini hiçbir zaman keşfedemeyebilirler. Bu problemi çözmek için Disco [22] her

cihazın farklı iki asal sayı seçmelerini ve slot indekslerinin bu asal sayılarla bölümünden kalan sıfır olduğunda aktif olmalarını önerir. Böylece aynı asal sayıları seçen cihazların birbirlerini keşfedememe problemi ortadan kaldırılmış olur. Bu yöntemde iki cihaz aynı asal sayıları seçmiş olsalar bile bu cihazlar birbirlerini keşfedebilirler. Örneğin, Şekil 1.8.a'da x cihazı, $p_1=3$ ve $p_2=5$ asal sayılarını y cihazı da $p_1=5$ ve $p_2=7$ asal sayılarını seçmiştir. x cihazının 12. slot indeksinde y cihazının da 15. slot indeksinde cihazlar birbirlerini keşfetmişlerdir. Periyottaki slotlar arasındaki kayma ne kadar olursa olsun cihazlar en geç $p_1 \times p_2$ slot sonra birbirlerini keşfederler.

x				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		

a) Disco protokolü, ($x:3$ ve 5 , $y:5$ ve 7)

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19			
y					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

b) Todis protokolü, ($x:5,7$ ve 9 , $y: 7, 9$ ve 11)

Şekil 1.8. Asallık tabanlı önerilen protokoller

Todis [23] başka bir asallık tabanlı geliştirilen ve optimize edilen bir protokoldür. Ancak, bu çalışmada asal sayılar yerine aralarında asal sayılar kullanılır. Bu sayılar belirlenirken art arda gelen tek sayılar kullanılır çünkü art arda gelen tek sayılar her zaman aralarında asal sayılardır. Seçilen iki tek sayı, a ve b , aralarında asal sayılar değilse $a+2$ ve b ya da a ve $b+2$ mutlaka aralarında asal sayılardır. Örneğin, 15 ve 21 tek sayılar ancak aralarında asal sayılar değildir ancak 17 ve 21 veya 15 ve 23 aralarında asal sayılardır. Todis bu özellikten faydalanarak aralarında asal sayıları belirler. Seçilen bu sayıların katları olan slot indekslerinde cihazlar aktif olurlar. Bu protokolda tek, çift, üçlü ve dörtlü olarak aralarında asal sayılar seçilebilir. Örneğin, Şekil 1.8.b'de x cihazı 5, 7 ve 9 aralarında asal sayılarını y cihazı da 7, 9 ve 11 aralarında asal sayılarını seçmiştir. x ve y cihazları x 'in 15. slot indeksinde y 'nin 11. slot indeksinde birbirlerini keşfederler. Fazla sayıda slotta aktif olmak cihazların keşif ihtimalini artırır ancak fazla sayıda aralarında asal sayıların seçilmesi cihazların daha fazla slotta aktif olmalarını gerektireceği için enerji tüketimi de fazla olacaktır.

Deterministik protokollerin ikinci türü olan Quorum tabanlı protokollerde bir periyot matris olarak gösterilecek şekilde satır ve sütunlara bölünür. Bir periyot, n^2 adet slottan meydana geliyorsa bu periyot n adet satır ve n adet sütundan oluşan bir matris şeklinde gösterilir. Ancak, satır ve sütun sayıları her protokol için aynı olmayabilir. Quorum tabanlı protokollerde satır ve sütun sayıları bütün cihazlar için aynı olan global bir parametredir. Ayrıca, bir periyottaki aktif slot sayıları bütün cihazlar için eşittir.

Şekil 1.9.a'da simgelendiği gibi, bu yaklaşımın en basit yöntemi her cihazın oluşturulan bu matristen rastgele bir satır ve sütun seçmesidir [25]. Şekilde ikinci satır ve üçüncü sütun seçilmiştir. Seçilen bu satır ve sütundaki slot indekslerinde cihazlar aktif olurlar. Böylece ikinci cihaz hangi satır ve sütunu seçerse seçsin iki cihazın seçtiği slotlardan en az iki tanesi üst üste denk geleceği için bu slotlarda cihazlar birbirlerini keşfederler.

Bir başka Quorum tabanlı protokol U-Connect [26] protokolüdür. U-Connect yönteminde bir periyot n adet satır ve n adet sütundan oluşan bir matris olarak gösterilir. Şekil 1.9.b'de gösterildiği gibi cihazlar ilk $(n+1)/2$ slot indeksinde ve slot indeksi n değerinin katı olduğunda aktif olurlar ve periyodun geri kalan slotlarında uyku durumuna geçerler. Şekil 1.9.a ile kıyaslandığında, U-Connect protokolü daha az slotta aktif olduğundan daha fazla enerji verimlidir.

Başka bir protokol olan Hedis [23] ise Quorum tabanlı yaklaşımı optimize ederek geliştirilmiş olan bir yöntemdir. Şekil 1.9.c'de temsil edildiği gibi, bu yöntemde bir periyot $n-1$ adet satır ve n adet sütundan oluşan bir matris olarak ifade edilir. Böylece, bir periyot $n \times (n-1)$ adet slottan oluşur. Cihazların slot indeksleri $n \times i$ ve $(n+1) \times i + 1$ olduğunda aktif olurlar. Bu iki ifadede geçen i değeri 0 ile $n-2$ arasında değişen bir tamsayıdır. Hedis'e ait slot indeksi seçimleri Şekil 1.9.c'de $n=5$ için beş satırlık ve altı sütunluk bir matris üzerinden gösterilmiştir.

0	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41
42	43	44	45	46	47	48

a) Rastgele satır ve sütun seçimi

0	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41
42	43	44	45	46	47	48

b) U-Connect

0	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29

c) Hedis

Şekil 1.9. Quorum tabanlı önerilen protokoller

Bazı protokollerde aktif slot indeksleri her periyotta aynıdır. Ancak anchor-probe tabanlı önerilen protokollerde cihazların her periyotta aktif oldukları slot indeksleri değişebilir. SearchLight [24] protokolü bu tür çalışmalara bir örnektir. Bu protokolde aktif slotlar iki farklı şekilde belirlenir. Birinci türde, cihazların bir periyottaki aktif oldukları slot indeksleri aynıdır. Bu slotlara çapa (anchor) slot denir. İkinci tür slot ise probe slottur ki bu slot her periyotta bir slot ileri hareket eder. Yani bir periyotta bir sabit slot bir de hareketli slot vardır.

Bir periyot n adet slottan oluşuyorsa probe slot $n/2$ periyot boyunca yer değiştirir. Şekil 1.10'da x ve y cihazlarının aktif oldukları slotlar gösterilmiştir. Bu örnekte cihazlar asenkron oldukları için iki cihazın periyotlarında üç slotluk bir kayma vardır. x ve y cihazının çapa slotları her periyotta sıfıncı slottur. Ancak probe slotlar birinci periyotta birinci, ikinci periyotta ikinci ve üçüncü periyotta üçüncü slot indekslerinde aktif olacak şekilde her periyotta hareket eder. Böylece iki cihaz mutlaka birbirini keşfederler. Şekilde x 'in çapa slotu ile y 'nin probe slotu üst üste geldiği için bu iki cihaz birbirlerini keşfederler.

x				0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
y	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5			

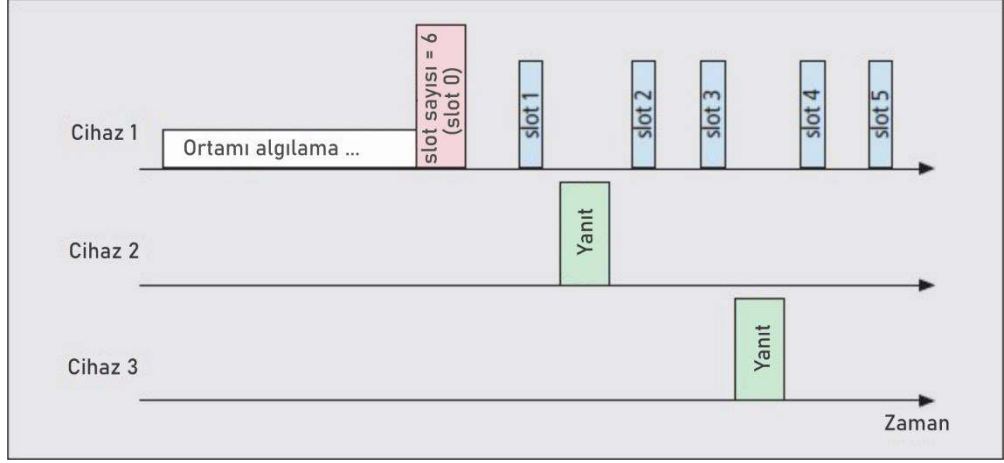
Şekil 1.10. SearchLight protokolü

Deterministik protokollerin dezavantajlarından biri cihazların kendi aktif slot sayılarını belirleyememeleridir. Yeterli enerjisi olmayan veya keşif işlemini daha az aktif slot ile yapmak isteyen cihazların bu protokollerde böyle bir şansları yoktur. Bir diğer dezavantajı ise cihazlar çok sayıda gereksiz slotlarda aktif olurlar. Aktif olunan slotlarda komşuluğundaki bir cihazı keşfedeceklerinin bir garantisi yoktur. Komşuluğunda keşfedilebilecek hiçbir cihaz olmasa dahi cihazlar belirlenen slotlarda aktif olarak gereksiz güç tüketirler. Ayrıca bu protokoller genellikle iki cihazın birbirini keşfetme durumu düşünülerek geliştirilmiştir. Ancak ortamda çok sayıda cihaz olduğunda cihazların keşif için gönderecekleri keşif mesajları alıcıda çakışır. Bu ise gereksiz güç tüketimine sebep olur.

1.5.1.4. Mesaj Gönderim Türleri

Cihaz keşfi protokollerinde keşif mesajları istek-yanıt (request-response) ve doğrudan gönderim olarak iki farklı şekilde gönderilebilir. İstek-yanıt türü mesajlaşmada bir cihaz kapsama alanında bulunan cihazlara keşif istek mesajı gönderir ve bu cihazlardan yanıt mesajı bekler. Bu istek mesajını alan komşu cihazlar keşif için gerekli olan bilgileri içeren bir yanıt mesajı gönderirler. Bundan dolayı, istek-yanıt türü mesajlaşma ile gerçekleştirilen keşif işlemi iki adım gerektirir.

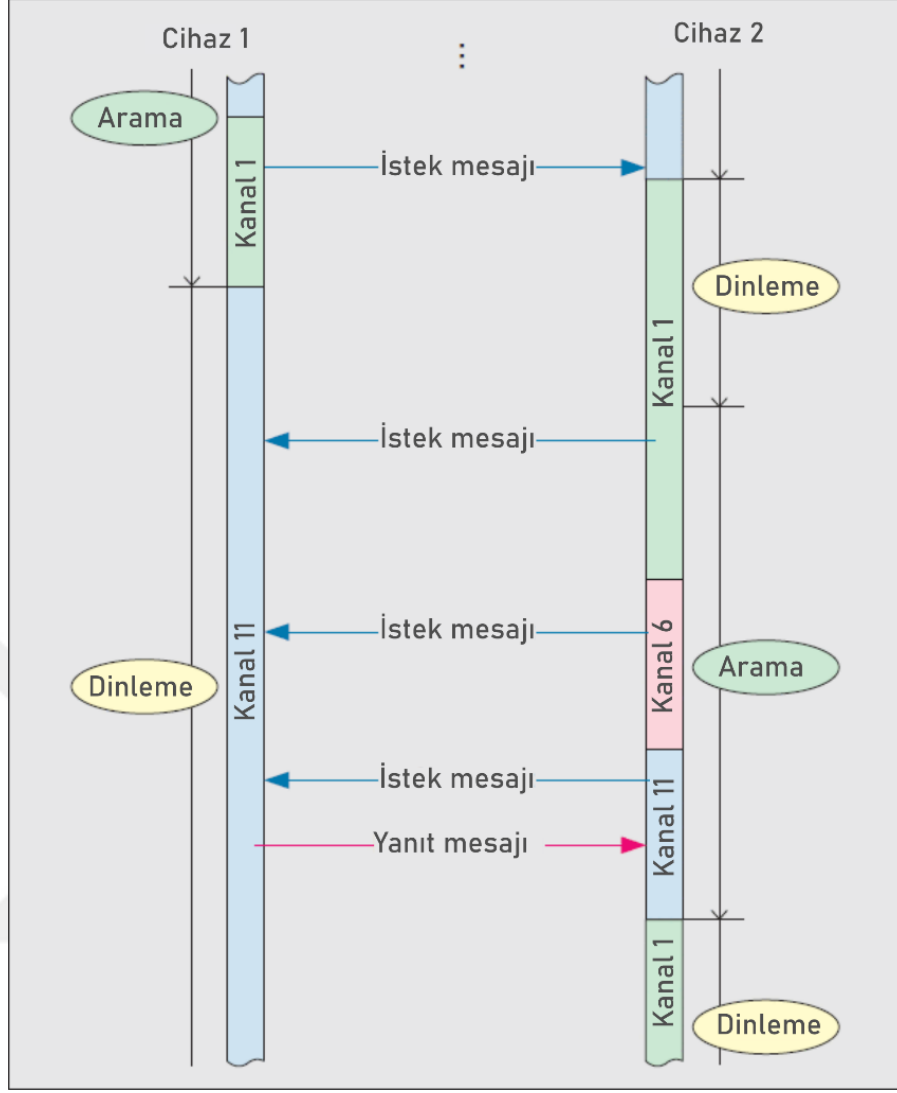
Bu mesajlaşma türünde, gönderme modunda olan bir cihaz bir slotta istek mesajı gönderdiğinde alıcı cihazın da aynı slotta aktif olması gerekir. Bu mesajlaşma türü az sayıda cihazın olduğu ağlar için uygunken çok sayıda cihazın olduğu yoğun ağlar için uygun değildir çünkü yoğun bir ağda çok fazla sayıda istek mesajının gönderileceğinden güç tüketimi de artıracaktır. Bu tür mesajlaşma WSN ve tasarsız ağlardaki cihaz keşfi protokollerinde yaygındır [68].



Şekil 1.11. Irda cihaz keşfi gösterimi [68].

Irda (Infrared Data Association) [69], Bluetooth [70], Bluetooth LE [71] ve Wi-Fi Direct [72] gibi ağlardaki cihaz keşfi protokollerinin kullandığı mesajlaşma türü istek-yanıt şeklindedir. Irda için geliştirilen cihaz keşfi protokolünde, çevresindeki cihazları keşfetmek isteyen düğüm, içinde slot sayısının olduğu bir istek mesajı gönderir. Şekil 1.11’de gösterildiği gibi, bu mesajı alan komşu düğümler mesaj içinde belirlenen slot aralıklarının birinde yanıt mesajı dönerler. Bu örnekte, birinci cihazın gönderdiği slot sayısı altı olduğundan, istek mesajını alan cihazlar ilk altı slot içerisinde belirledikleri bir slotta yanıt mesajını gönderirler. Bu protokole yanıt mesajlarının gönderilebilecekleri slot sayıları 1, 6, 8 veya 16’dır. Bu yöntemin amacı ise istek ve yanıt mesajlarının çakışma ihtimalini azaltmaktır. Eğer istek veya yanıt mesajları çakışırsa keşif işlemi tekrarlanır.

Bluetooth teknolojisi, cihaz keşfi için ISM bandını kullandığından dolayı bu bandı kullanan diğer sistemlerden gelebilecek girişimleri engellemek için kanallar arasında atlama yaparak cihaz keşfini gerçekleştirir. Çünkü ISM bandı birçok sistem tarafından paylaşılan lisanssız bir banttır [73]. Bluetooth cihazları 32 kanallı istek (inquiry) mesajlarını göndermek için, 32 kanallı da yanıt mesajlarını almak için kullanırlar. Bluetooth teknolojisinde cihazlar asenkron ve sürekli zaman slotlara bölünmüştür. Bundan dolayı, istek mesajlarının gönderileceği kanalları her cihaz kendi yerel saatine göre belirler. Şekil 1.12’de detaylandırıldığı gibi, bir cihaz bir slotun yarısında bir kanaldan istek mesajı gönderir ve slotun diğer yarısında ise belirlediği başka bir kanaldan istek mesajı gönderir. Bir sonraki slotta ise slotun yarısında bir kanalı, diğer yarısında ise başka bir kanalı dinleyerek yanıt mesajını almaya çalışır. İstek mesajı alan cihaz bir sonraki slotta bir



Şekil 1.13. Wi-Fi Direct cihaz keşfi gösterimi [68].

Doğrudan mesajlaşma türünde bir cihazın komşuluğunda bulunan başka bir cihazı keşfedebilmesi için gerekli olan bütün bilgileri içeren beacon mesajı gönderilir. Wi-Fi tasarsız [74] ve FlashLinQ [28] sistemlerindeki cihazlar doğrudan mesajlaşma türünü kullanan çalışmalara örnektir. Wi-Fi tasarsız ağlarda cihazlar bir süre belirlerler ve belirlenen süre içerisinde keşif kanalını dinleyerek beacon mesajlarını almaya çalışırlar. Bu süre içerisinde herhangi bir beacon mesajı almayan cihaz beacon mesajı gönderir. Ancak, cihaz bu süre içerisinde bir beacon mesajı alırsa cihaz yerel saatini bu mesaja iliştilen IBSS (Independent Basic Service Set) parametrelerine göre ayarlar. Böylece, cihazlar ağda merkezi bir düğüm olmadan birbirlerini keşfederler ve senkronizasyonu sağlarlar.

Doğrudan mesajlaşma ile cihaz keşfi öneren bir diğer çalışma da FlashLinQ'dur. Bu çalışma tasarsız ağlarda senkron olan cihazlar için önerilmiş bir kablosuz ağ zamanlayıcısıdır. Cihazlar arasındaki senkronizasyon GPS (Global Positioning System) veya hücresel ağlar ile sağlanır. Her sekiz saniyede kaynakların tekrar kullanıldığı bu sistemde her saniyenin 20 milisaniesi cihaz keşif için ayrılmıştır. Keşif için ayrılan bu zaman aralığında cihazların birbirini keşfetmesi için gereken bilgiler direkt olarak gönderilir. Ancak cihazlar mesajlaşmadan önce radyo kaynaklarının kullanılıp kullanılmadığını algılamak zorundadırlar.

Doğrudan mesajlaşma türünün en büyük avantajı ikinci bir sinyalleşmeye ihtiyaç duymadan tek bir mesaj gönderimi ile keşif işleminin gerçekleşmesidir. Bu yaklaşımda mesajın veri boyutu istek-yanıt mesajlarına kıyasla fazladır. Bundan dolayı bir cihazın komşuluğunda herhangi bir düğüm yoksa veri boyutu yüksek mesajların gönderilmesi gereksiz enerji tüketimine sebep olur. Cihaz sayısının fazla olduğu ağlar için avantajlı bir yöntemdir. Başlık 1.4.1.3'te detaylıca bahsedilen deterministik cihaz keşfi protokollerinin birçoğu doğrudan mesajlaşma türüne örnektir [21-26].

1.5.2. Hücresel Ağlarda Cihaz Keşfi Protokolleri

Bu bölümde hücresel ağlar için geliştirilen cihaz keşfi protokolleri incelenecek, güçlü ve zayıf yönleri tartışılacaktır.

1.5.2.1. Cihazdan Cihaza Haberleşme (Device-to-Device Communication – D2D)

Hücresel ağlarda cihaz keşfi için önerilen protokollerin çoğunluğu cihazdan cihaza (Device-to-Device/D2D) haberleşme için geliştirilmiştir. D2D ile birbirlerinin kapsama alanı içerisinde olan cihazlar eNB merkezi cihazının bir dahli olmadan haberleşebilirler. Hayat vd. tarafından yapılan çalışmada [75] D2D sistemlerinde cihaz keşfi için önerilmiş yöntemlerin detayları anlatılmıştır. Bazı D2D protokolleri eNB izniyle ve yönlendirmesiyle cihaz keşfi yöntemleri önerirken bazı çalışmalar eNB'yi dikkate almadan keşif yöntemleri önermiştir [76]. Merkezi bir düğümün olduğu ağlar için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin avantajlarından bir tanesi çakışmaların ve girişimlerin önlenbilmesidir. Ayrıca radyo kaynakları daha verimli bir şekilde kullanılabilir. Ancak, bu ağlar için

geliştirilen yöntemler kompleks olabilir ve fazlasıyla sinyalleşme ihtiyacı doğurabilir. Bazı D2D cihaz keşfi protokollerinde merkezi bir düğümün iznine gerek yoktur. Ancak, bu yöntemler de dağıtık ağlara benzer özellikler göstereceği için cihazlar asenkron ve bu çalışmalarda mesajların çakışması kaçınılmazdır. Ayrıca, radyo kaynakları yeterince verimli kullanılamayabilir. Son yıllarda D2D’de cihaz keşfi için önerilen çalışmaların birçoğu [29-33] senkron cihazlar için önerilmiş olsa da asenkron cihazlar için önerilen çalışmalar da vardır [34-38]. Literatürde cihaz keşfinin farklı bir kanaldan yapıldığı out-band [77-79] çalışmaları olduğu gibi bu sinyalleşmenin veri ile aynı kanalda yapıldığı in-band [80-82] çalışmalar da vardır.

D2D cihaz keşfi için önerilen farklı yaklaşımlar vardır. Örneğin, çalışma [83]’de UE’ler (User Equipment) tarafından eNB’ye gönderilen uplink referans sinyalleri yakalanmaya çalışılır. Eğer bu referans sinyalleri algılanırsa cihaz çevresinde keşfedilebilecek cihazlar olduğu kanısına varılır. Çünkü bu sinyaller periyodik olarak UE’ler tarafından eNB’ye gönderilir. Çalışma [84] kamu düzeni senaryoları için en az enerji ile en fazla cihaz keşfi gerçekleştirmeye odaklanır. Birçok cihaz keşfi protokollerinde cihazların gezgin olduğu varsayılsa da çalışma [85]’da ağına kapsama alanında kalan ve gezgin olmayan cihazlar için keşfetme protokolü önerilmiştir. Bu çalışmada cihaz keşfi gecikmesi dikkate alınmıştır. Sun vd. [86] ise 5G ağlardaki birbirinden farklı cihazların mahremiyetini korumaya odaklanarak cihaz keşfi ve kimlik doğrulama metodu önermiştir.

1.5.2.2. Sinyal Türü

Cihazlar arasındaki iletişimde iki tür sinyal türü kullanılır. Bunlar imza tabanlı sinyaller ve paket tabanlı sinyallerdir [68]. Bu sinyalizasyon türlerinin kullanım yerine ve amacına göre avantajları ve dezavantajları vardır. Paket tabanlı sinyalizasyonda keşif için gerekli olan bilgileri içeren mesajlar gönderilir. Bu tür mesajlaşmada cihazlar bilgilerin gönderilmesi için ikinci bir mesajlaşmaya ihtiyaç duymazlar. Ancak bu paketler kompleks ve veri boyutu yüksek olabilir ve kanalda gönderilmek için kanal kodlamaya ve kanal tahminine ihtiyaç duyarlar. Ayrıca bu mesajlar çakışmalara karşı hassastır ve ek kaynaklara ihtiyaç duyabilirler. İstek-yanıt ve doğrudan mesajlaşma türleri bu sinyalizasyona bir örnektir. Örneğin, çalışma [87] ve [35]’de cihazlar OFDMA (Orthogonal Frequency-

Division Multiple Access) ile paralel kaynaklarda beacon mesajları göndererek komşu cihazları keşfetmeyi denerler.

İmza tabanlı sinyalizasyonda genellikle CAZAC (Constant Amplitude Zero Autocorrelation) dizileri kullanılarak bir kimliği ifade eden basit ve özel bir dalga yapısı üretilerek gönderilir [88]. Paket tabanlı mesajların aksine, imza tabanlı sinyaller bir kimlik/imza dışında herhangi bir bilgi taşımaz. Bu sinyali alan cihaz sadece komşuluğunda başka bir cihaz olduğunu ve bu cihaza ait imzayı algılar. Bu özel dalganın gönderimi için kanal tahminine ve kanal kodlamaya gerek duyulmaz. Ayrıca gönderici cihazla ilgili bilgiler bulunmadığı için boyutu küçük ve yapısı basittir. Böylece daha az radyo kaynağı gerektirir.

Üretilen dalga yapısı senkronizasyon için uygun olduğundan cihazlar arasında senkronizasyonun olmadığı sistemler için kullanımı uygundur. Ancak, bu özel sinyal gönderici bilgilerini içermediğinden başarılı bir keşif için ikinci bir adıma ihtiyaç duyulur. LTE RAP (Random Access Procedure) [89] ve [90] bu tür sinyallerin kullanıldığı keşfetme yöntemlerine örnektir. Ayrıca, LTE’de eNB tarafından gönderilen senkronizasyon sinyallerinden bir kısmı da CAZAC kodlarıyla üretilir. Bunların yanı sıra, literatürde paket ve imza tabanlı sinyalizasyonun birlikte kullanıldığı melez çalışmalar da vardır [68].

1.5.2.3. Senkronizasyon

Dağıtık sistemlerde farklı teknolojileri kullanan cihazları senkronize etmek zordur çünkü bu ağlar genellikle lisanslı olmayan spektrum bandını paylaşımlı olarak kullanırlar. Ancak hücreli ağlar lisanslı radyo kaynaklarını kullandıkları için cihazlar OFDM sembol seviyesinde senkronize olurlar. Örneğin, LTE’de cihazlar PSS (Primary Synchronization Signal) ve SSS (Secondary Synchronization Signal) [91] sinyallerini alarak senkronize olurlar. Bundan dolayı hücreli ağlarda kaynak kullanımı daha verimli, girişim ve çakışmanın engellenmesi daha kolaydır. Bu ise cihaz keşfini oldukça kolaylaştırır.

1.6. Mevcut Cihaz Keşfi Protokollerinin Eksikleri

Bölüm 1.4’te detaylıca anlatıldığı gibi, tasarsız ağlar ve WSN için önerilen cihaz keşfi protokolleri cihazların asenkron olduğunu kabul etmiş ve genellikle bu çalışmalarda

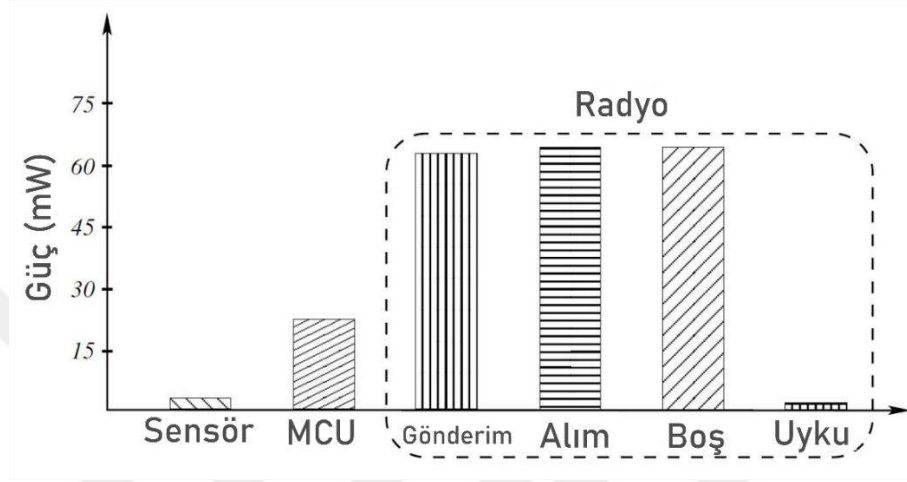
sürekli zaman slotlara bölünmüştür. Cihazlar asenkron oldukları için bir andaki slot indeksleri her cihaza göre farklıdır çünkü periyotlar arasında kaymalar vardır. Bundan dolayı, bir cihaz komşuluğunda bulunan bir cihazın ne zaman aktif olacağını bilmediği için daha fazla slotta aktif olarak komşu cihazın aktif slotlarını bulmaya çalışır. Böylece, bu çalışmalarda cihazlar fazla sayıda gereksiz slotta aktif olarak fazla enerji harcarlar. Ayrıca, bu çalışmalarda çakışmaların önlenmesi MAC (Media Access Control) protokolünün görevi olduğu kabul edilerek aynı zaman ve frekansta gönderilen mesajların çakışma ihtimali de göz ardı edilmiştir. Bu gerçekçi bir yaklaşım değildir. Eğer bir cihazın MAC protokolü aktif olarak veri gönderilmesi gereken bir slotun başında kanalın meşgul olduğunu ve veri iletilmemesi gerektiğini tespit ederse, cihaz keşfi protokollerinin kurallarına uyulmadığı anlamına gelir.

Hücrel ağlarda cihaz keşfi protokolleri ya eNB'nin keşfedilmesini ya da D2D cihazlarının birbirini keşfetmesini amaçlamıştır. D2D için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin çoğunluğu keşif işlemini eNB'nin yardımı ve kontrolü altında gerçekleştirir. Bu çalışmalarda eNB'nin izni ve yönlendirmesi olmadan cihaz keşfi başlayamaz. Bu yaklaşım 3GPP'nin dolaylı bağlantı modeli için uygun değildir çünkü bu modelde tek bir merkezi düğüm yoktur. IoT cihazları eNB ile röle cihazlar üzerinden bağlantı kurduğu için bütün röle cihazlar merkezi düğümler gibi davranır. Ayrıca, bütün röle cihazları da IoT cihazları gibi batarya ile çalışan ve ağda gezgin olan kısıtlı cihazlardır. Bundan dolayı, D2D ile 3GPP'nin dolaylı bağlantı modeli arasında önemli farklar vardır.

1.7. Tezin Amacı, Kapsamı, Sunulan Katkıları ve Zorlukları

Bu tezde 3GPP'nin önerdiği dolaylı bağlantı modeli için IoT ve röle cihazlar arasında bir keşfetme protokolü geliştirilmiştir. Bu modele göre, IoT cihazları hücrel bir ağ olan 3GPP ağına bağlanarak internete açılacaktır. Ancak, ağa bağlantı direkt eNB'ye bağlanarak değil akıllı telefon benzeri röle cihazlara bağlanarak gerçekleşecektir. 3GPP'nin önerisine göre, bir IoT cihazı ihtiyaç duyduğunda doğrudan ve dolaylı bağlantı modelleri arasında geçişler yapabilir. Ancak, biz bu tezde IoT cihazlarının sadece röle cihazlar üzerinden ağa bağlanabileceğini ve doğrudan bağlantı modelinin göz ardı edildiğini varsayıyoruz. Bunun temel nedeni ise doğrudan bağlantı modelinde bir cihazın eNB'yi keşfetme yöntemi halihazırda 2G/3G/LTE gibi hücrel ağlarda bulunmasıdır.

Birinci modelde IoT cihazlarının keşfetmesi gereken eNB gezgin olmayan, batarya ile değil sürekli elektrik ile çalışan ve kablosuz haberleşme için kullanılan bir cihazdır [92]. Ancak, ikinci bağlantı modelinde IoT cihazlarının keşfetmesi gereken röle cihazlar gezgin ve batarya ile çalışan cihazlardır. Ayrıca, röle cihazlar da IoT cihazları gibi kapasite ve enerji açısından kısıtlı olan cihazlardır.



Şekil 1.14. Bir MicaZ cihazının güç tüketim gösterimi [93].

IoT veya WSN cihazları için geliştirilen haberleşme protokollerinde dikkate alınması gereken ilk kriter enerjidir. Çünkü bu cihazlar batarya ile çalışan ve işlem gücü, hafıza ve veri iletim hızı açısından kısıtlı olan cihazlardır. Bazı WSN uygulamalarında batarya değişimi imkansızdır. Bu tür uygulamalarda WSN cihazının ömrü tamamen batarya ömrüne bağlıdır. Bir IoT veya WSN cihazı çevresindeki fiziksel değişiklikleri algılamak, algıladığı verileri işlemek, veri göndermek ve almak için enerji harcar. Bir WSN düğümü olan MicaZ cihazının harcadığı güç oranları Şekil 1.14'te gösterilmiştir [93]. Bu şekle göre, kısıtlı WSN cihazlarının en fazla güç harcadıkları kısım sinyal gönderirken ve alırken harcadıkları güçtür. Bu nedenle, bu cihazlar için geliştirilen haberleşme protokollerinin enerji verimli olmaları büyük önem arz etmektedir. Bunun yolu ise ihtiyaç duyulmadığı durumlarda cihazların radyolarının uyku durumuna alınmasıdır [94-97].

3GPP'nin ikinci bağlantı modelinde IoT cihazlarının röle cihazlarını keşfetmesi için geliştirilecek olan protokolün ikinci zorluğu ise ağın dinamik bir ağ topolojisine sahip olmasıdır. Bu ağ modelinde IoT ve röle cihazlar gezgindir. Bir IoT cihazının komşuluğunda olan bir röle cihaz bir süre sonra komşuluğundan çıkabilir. Bundan dolayı,

IoT cihazlarının periyodik olarak röle cihazları keşfetmeleri gerekir. Cihaz keşfi işleminin periyodik olarak tekrarlanması IoT ve röle cihazların fazla enerji harcamalarına sebep olacağı için keşif protokolünün en az enerji tüketimiyle yapılması önemlidir.

Bir diğer problem ağda çok sayıda cihaz olduğu durumda cihazlar tarafından aynı kanalda ve aynı anda gönderilen keşif mesajlarının veya paketlerinin alıcıda çakışmasıdır [98]. Keşif paketlerinin alıcı cihazda çakışması alıcının paketleri düşürmesine ve keşif sürecinin tekrarlanmasına sebep olur. Bu ise hem gecikmeyi hem de güç tüketimini artırır. Geliştirilecek cihaz keşfi protokolünün keşif işlemlerini en az çakışma ile gerçekleştirmesi hem zaman hem de enerji açısından dikkate alınması gereken önemli bir konudur.

Yukarıda sıralanan problemler bütün cihaz keşfi protokolleri için ortak olsa da 3GPP'nin önerdiği dolaylı bağlantı modeli ayrı bir zorluktur çünkü bu model hem dağıtık sistemlerle hem de merkezi ağlarla benzerlik gösteriyor. Örneğin, tasarsız ağlarda batarya ile çalışan cihazlar komşuluğundaki cihazları keşfetmeye çalışırken aynı zamanda onlar tarafından keşfedilmeye çalışırlar [99]. Keşfeden ve keşfedilen düğümlerin hepsi batarya ile çalışan kısıtlı cihazlardır. Bu ağlarda merkezi herhangi bir cihaz yoktur.

LTE gibi hücresele ağlarda ilk defa aktif olan bir cihaz ise ağda merkezi cihaz olan eNB'yi keşfetmeye çalışır. eNB batarya ile değil sürekli elektrikle çalışan, gezgin ve kısıtlı olmayan bir cihazdır [100]. 3GPP'nin dolaylı bağlantı modeli hem tasarsız ağlara hem de hücresele ağlarla benzerlik gösterir. Çünkü bu modelde IoT ve röle cihazlar mobil ve batarya ile çalışan cihazlardır. Ayrıca, röle cihazlar keşfedilmek istenen merkezi cihazlar olmasına rağmen ağda birden fazla sayıda bulunurlar.

Cihazdan cihaza ağlar da (Device-to-Device- D2D) röle ağlar olmasına rağmen, bu ağlarda birden fazla sayıda kısıtlı merkezi düğüm bulunmaz. D2D ağlarda cihazlar tasarsız ağ cihazları gibi davranırlar çünkü bir D2D cihazının komşuluğundaki bütün cihazlar keşfedilebilecek bir adaydır [101]. Ancak, dolaylı bağlantı modelinde IoT cihazının keşfetmek istediği hedef diğer IoT düğümleri değil röle düğümlerdir.

Bu tezin amacı 3GPP'nin dolaylı bağlantı modelindeki IoT ve röle cihazları arasında imza tabanlı ve enerji tasarruflu röle cihaz keşfi protokolü geliştirmektir. IoT cihazları kısıtlı cihazlar oldukları için cihaz radyoları ihtiyaç duyulduğunda aktif, ihtiyaç duyulmadığında pasif durumda olmalıdır. Bu tezde IoT cihazlarının en az aktif kalma süresi ile daha başarılı röle cihaz keşfi yapabilmesi hedeflenmektedir. Böylece cihaz ömrü de daha uzun olacaktır. İmza tabanlı sinyalleşme ile keşif kanalında meydana gelebilecek çakışmaların da önlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu tezin sunduğu katkılar aşağıdaki gibidir;

- Özgün periyot tasarımı: Önerilen protokolde sürekli zaman periyotlara, bir periyotluk zaman da daha küçük zaman parçaları olan slotlara bölünmüştür. Bu çalışmada bir periyotluk zaman üç farklı aşamadan oluşur ve her aşamanın farklı bir fonksiyonu vardır. Ağda senkron olan IoT cihazları komşuluğunda olan cihazların ne zaman aktif ne zaman pasif olacağını bilemediği için önerilen özgün periyot yapısıyla IoT cihazları gereksiz slotlarda aktif olarak komşu röle cihazları aramak zorunda kalmazlar. Bu aşamaların sunduğu katkı aşağıdaki gibidir;

- Birinci Aşama: Bu aşamada IoT cihazları komşuluğunda röle cihaz olup olmadığının farkına varır. Eğer haberleşme mesafesinde herhangi bir röle cihaz yoksa bir sonraki periyodun birinci aşamasına kadar pasif durumda kalarak enerji tüketimini minimum seviyede tutar. Eğer IoT cihazının komşuluğunda röle cihazlar varsa bu aşama röle cihazların ileride hangi slotlarda aktif olacağı bilgisini sağlar. Böylece IoT cihazı gereksiz slotlarda aktif olmak zorunda kalmayacağı için güç tüketimi minimum olur.

- İkinci Aşama: Bu aşamada röle ve komşuluğundaki IoT cihazları farklı slotlarda aktif olurlar. Böylece, röle cihazlar bu aşamada farklı slotlara dağıtılmış olur. Çakışmaların önlenmesi için bu aşamada IoT cihazlarının üçüncü aşamada aktif olacağı slotlar belirlenir. Böylece, çakışmalar en aza indirilir.

- Üçüncü Aşama: Bu aşama IoT ve röle cihazlarının birbirini keşfettiği son aşamadır. Bu aşamada her röle ve IoT cihazı için farklı bir slot ayrılmış olur. Aynı slotları seçerek aktif olan ve bu slotlarda çakışma yaşayan cihazlar keşif işlemini tekrarlar. Bu aşamanın sonunda periyot ve keşif işlemi biter ve bir sonraki periyotta gerek duyulduğunda devam eder.

- Zadoff-Chu dizilerinin aktif slot gösterimi için kullanılması: Birinci ve ikinci aşamada sırasıyla röle ve IoT cihazları tarafından belirlenen ve bir sonraki aşamadaki aktif slotları ifade eden bilgi sinyali CAZAC dizilerinden Zadoff-Chu [102, 103] dizileriyle üretilir. Bu diziler aynı kanalda ve aynı anda birden fazla sayıda cihaz tarafından gönderilse bile dizilerin dikgen (ortogonal) özelliğinden dolayı alıcı tarafından algılanır. Bu diziler sayesinde cihazlar komşuluğundaki cihazların bir sonraki aşamadaki aktif slot indekslerini bilirler ve sadece bu slot indekslerinde aktif olurlar.

- Aşamalardaki slot sayılarının belirlenmesi: Bir periyot üç aşamadan oluşmaktadır ancak her bir aşamanın kaç slottan oluşacağı önemlidir. Bu slotların sayısı keşif başarısını

doğrudan etkiler. Bu çalışmada her aşama için olasılıksal analizlerle protokolün en yüksek başarıyı sağlayacağı slot sayıları belirlenmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde IoT ve röle cihazlar için önerilecek cihaz keşfi protokolünde sıkça kullanılacak ilgili terimler, keşif protokolünün geliştirileceği ağın ve ağ içindeki cihazların özellikleri, kanal ve mobilite modelleri, cihaz sayıları ve genel kabullerden bahsedilecektir. Bu protokolün nasıl bir ortamda çalışacağından detaylıca bahsedildikten sonra önerilen protokolün detayları ve olasılıksal analizleri anlatılacaktır.

2.1. Sistem Modeli

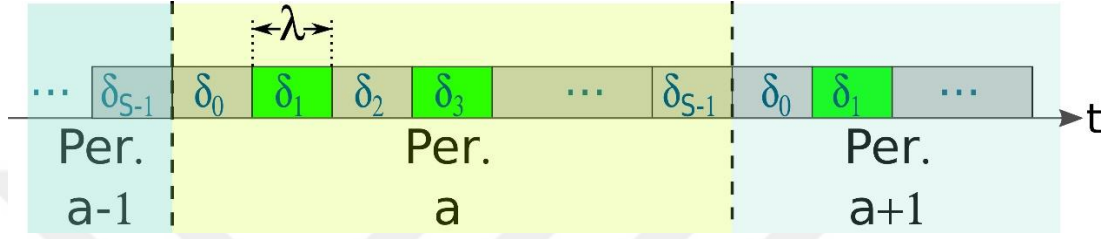
Bu kısımda protokolda sıkça kullanılacak ilgili terimlerin tanımları yapılacak, ağdaki IoT ve röle cihazların sayıları ve özellikleri detaylandırılacak, protokolün çalışacağı ağ ortamı anlatılacaktır. Ayrıca, yöntemde kabul edilen varsayımlar ve nedenlerinden bahsedilecektir.

2.1.1. İlgili Tanımlar

Haberleşme Menzili (Communication Range – CR): Kablosuz haberleşme sistemlerinin en önemli parametrelerinden biridir. Bir cihazın gönderdiği sinyallerin alıcı cihaza bozulmadan ulaşabildiği en uzak mesafeyi ifade eder [104]. Bu çalışmada CR değeri bir cihazın dairesel haberleşme menzilinin yarıçapını ifade eder ve metre olarak ölçülür. Bir cihazın haberleşme menzilinde olan diğer cihazlar komşu cihazlar olarak adlandırılır. Bu çalışmada karmaşıklığı azaltmak için ağdaki bütün cihazların CR değerlerinin aynı olduğunu kabul ediyoruz. Eğer cihazların CR değerleri birbirinden farklı olursa iki cihazdan biri komşu cihazın gönderdiği mesajı alırken diğeri herhangi bir sinyal algılayamayacaktır. Bu durum sistemin karmaşıklığını artırır.

Periyot ve Slot: Şekil 2.1’de temsil edildiği gibi, önerilen cihaz keşfi protokolünde sürekli zaman periyot adı verilen parçalara bölünmüştür. Bir periyot, bu sistemin en küçük zaman birimi olan ve slot adı verilen belirli sayıdaki daha küçük zaman parçacıklarından oluşur. Bir slotluk zaman miktarı, mesajların başarılı bir şekilde gönderilmesi, alınması ve radyo modlarının değişmesi için yeterli olmalıdır.

Biz bu çalışmada bir slotluk zaman dilimini δ ile ifade ediyoruz. S adet slottan oluşan bir periyodun slotları $\{\delta_0, \delta_1, \delta_2 \dots \delta_{S-1}\}$ şeklinde ifade edilir. Bir periyottaki slot sayısını ifade eden S parametresi, bir hücrenin kapsama alanında bulunan bütün cihazlar için aynı ve önceden belirlenmiş bir parametredir. Bir slotun kapsadığı zaman miktarı λ milisaniye olarak ifade edilir. λ değeri temel haberleşme için yeterli olacak bir zaman miktarıdır. Böylece, bir periyodun kapsadığı zaman miktarı $T = S \times \lambda$ şeklindedir.



Şekil 2.1. IoT ve röle cihazlar için slot ve periyot gösterimi

Önerilen protokolün zaman modeli bölüm 1.4.1.1’de anlatılan tasarsız ve WSN ağların zaman modeline benzemektedir. Ağdaki cihazlar bir slotta aktif veya pasif olmak üzere iki durumda bulunabilirler. Aktif durumda olan bir cihaz mesaj gönderebilir, komşu cihazlar tarafından gönderilen mesajları alabilir veya keşif kanalını dinleyebilir. Pasif durumda ise cihazın radyosu uyku modundadır. Pasif durumda olan bir cihaz komşu cihazlar tarafından gönderilen sinyalleri dinleyemez, algılayamaz veya kanalda bir sinyal gönderemez.

IoT ve röle cihazlar, haberleşme menzillerinde bulunan ilgili düğümleri keşfetmeye çalışırken periyottaki bütün slotlarda aktif olmak yerine bazılarında aktif bazılarında pasif olurlar. Cihaz radyolarının aktif ve pasif modları arasındaki değişimin amacı cihazların güç tüketimini azaltmaktır. Cihazların hangi slotlarda aktif, hangi slotlarda pasif olacakları önerilen protokol tarafından belirlenir. Slot tabanlı zaman modelini kullanan cihaz keşfi protokollerinin başarısı bir cihazın bir slotta aktif veya pasif olma kararının doğru verilmesine bağlıdır.

Görev Döngüsü (Duty Cycle – DC): Cihazların bir periyottaki aktif durumda bulunma oranını ifade eder. Bir periyottaki aktif olunan slot sayısının periyottaki toplam slot sayısına (S) bölünmesiyle hesaplanır. Kısıtlı cihazlar için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin en temel amaçlarından biri minimum DC değeriyle başarılı cihaz keşfinin

yapılmasıdır. Cihaz keşfi protokollerinin büyük çoğunluğunda DC değeri ağdaki bütün cihazlar için aynıdır [23, 26, 24]. Ancak, bazı çalışmalar DC değerinin belirlenmesini enerji durumuna göre cihazın kararına bırakmıştır [27].

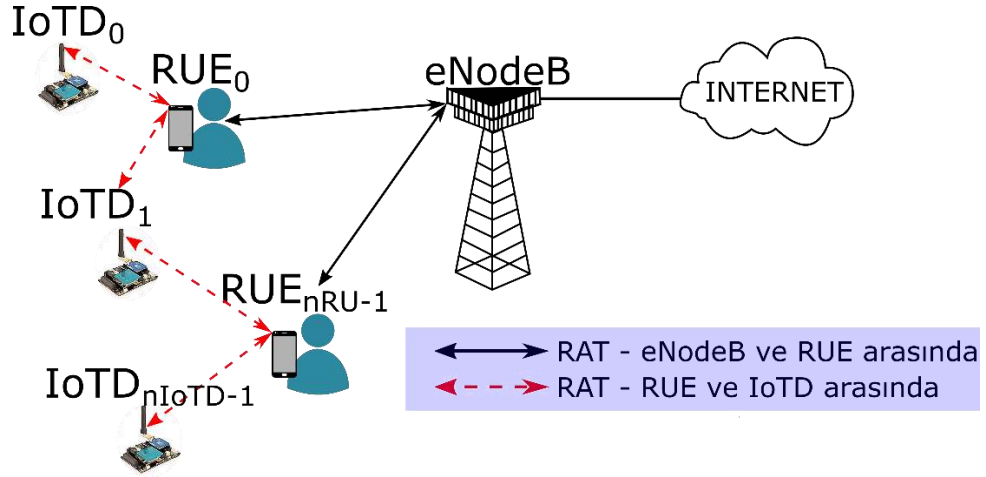
DC değeri ile keşif başarısı veya keşif gecikmesi arasında bir ödünleşim (trade-off) olduğu söylenebilir. Bir protokolde DC değeri düşürülmek istenirse keşif gecikmesi artacak ya da başarılı keşif oranı azalacaktır. DC değeri artırılmak istenirse keşif gecikmesi azalacak veya başarılı keşif oranı artacaktır. DC parametresi, 0 ile 1 arasında olan bir oranı ifade eder.

Başarılı Keşif (Successful Discovery – SD) Oranı: Bir IoT cihazının haberleşme menziline olan röle cihazlardan başarılı bir şekilde keşfedebildiği röle cihaz sayısının oranıdır. Örneğin, bir IoT cihazı komşuluğundaki k adet röle cihazdan z tanesini başarılı bir şekilde keşfettiye bu IoT cihazının keşif oranı z/k olarak hesaplanır. SD parametresi, 0 ile 1 arasında olan bir oranı ifade eder. Sıfır değeri hiçbir cihazın başarılı bir şekilde keşfedilemediğini ifade ederken, bir değeri bütün rölelerin keşfedildiğini ifade eder.

2.1.2. Ağ Modeli

Önerilen yöntemin geliştirildiği ağ ortamı tek hücreden oluşan bir 3GPP ağıdır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, ağda üç tür cihaz vardır. Bunlar eNB cihazı, röle UE (RUE) cihazları $\{RUE_0, RUE_1 \dots RUE_{nRUE-1}\}$ ve IoT cihazlarıdır $\{IoTD_0, IoTD_1 \dots IoTD_{nIoTD-1}\}$. $nRUE$ ve $nIoTD$ değişkenleri sırasıyla ağdaki RUE ve IoTD sayısını ifade eder. eNB cihazı gezgin olmayan, elektrikle çalışan ve sürekli aktif olan merkezi düğümken, RUE’ler ve IoTD’ler gezgin ve batarya ile çalışan kısıtlı cihazlardır. Ağdaki bütün RUE’lerin hücrenin kapsama sınırları içinde olduğu ve eNB’ye bağlı olduğu kabul edilmiştir.

IoTD’ler eNB’ye ve internete sadece RUE’ler üzerinden erişirler. RUE’ler iki adet ağ arayüzüne sahiptir. Bunlardan biri eNB ile haberleşmek için diğeri IoTD’ler ile haberleşmek içindir. Bundan dolayı RUE’ler iki RAT (Radio Access Technology) [105] kullanırlar. 3GPP bağlantı senaryolarından ilki olan doğrudan bağlantı modeli IoTD’nin direkt eNB ile iletişim kurabileceğini ifade etmiş olsa da biz bu çalışmada IoTD’nin sadece RUE üzerinden ağa bağlandığı bağlantı modelini dikkate alıyoruz. IoTD’ler RUE’ler ile haberleşmeyi sağlayan tek bir ağ arayüzüne sahiptirler. Bundan dolayı, IoTD’ler tek bir RAT kullanırlar.

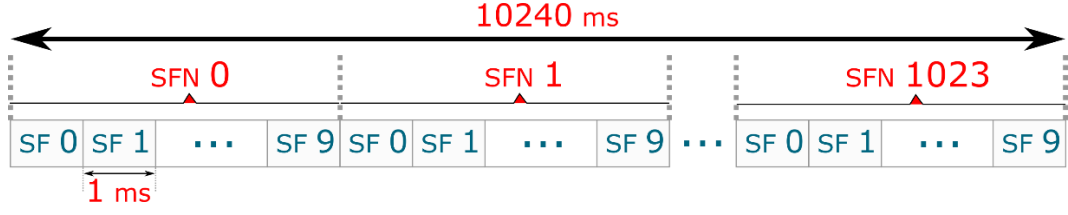


Şekil 2.2. Ağ modeli

Geliştirilen protokolün tek bir hücre için önerilmiş olmasının nedeni ağdaki bütün RUE'lerin senkron olmalarındandır. Aynı hücredeki RUE cihazları eNB'ye bağlı oldukları için birbirleriyle senkronudur. Örneğin, LTE'de cihazlar ağda ilk defa aktif olduğu anda PSS ve SSS sinyallerini alarak ağda senkronize olurlar ve ağa bağlı olan bütün RUE'ler aynı *SFN* (Sistem Çerçeve Numarası – System Frame Number) ve *SF* (Alt çerçeve – Subframe) [106] değerlerine sahip olurlar. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, *SFN* parametresi 0 ile 1023 arasında bir tam sayı değerini ifade eden bir sayaçtır. *SF* ise sıfır ile dokuz arasındaki bir tam sayıyı ifade eden başka bir sayaçtır.

SFN ve *SF* parametrelerinin işleyişi saatin çalışma mantığına benzer. *SF* bir milisaniyelik zaman dilimini ifade eder. Saatin akrep ve yelkovan ibreleri gibi, *SF* değeri her milisaniyede bir artar. *SF* parametresi maksimum değeri olan dokuz ulaştıktan sonra sıfır değerine döner ve *SFN* değeri bir artar. *SFN* parametresi de maksimum değeri olan 1023'e ulaştıktan sonra tekrar sıfır değerine döner. Böylece, aynı hücredeki RUE'ler aynı *SFN* ve *SF* değerlerine sahip olarak ağda senkron olurlar. Ancak, farklı hücrelerdeki cihazlar farklı *SFN* ve *SF* değerlerine sahip olabildikleri için bu cihazlar senkron olmayabilirler.

Biz bu çalışmayı RUE cihazlarının hücresel ağda senkron olma avantajlarını dikkate alarak ve bu avantajı kullanarak geliştirdik. Önerilen yöntemde röle cihazların senkronizasyonu için bir çaba harcanmasına gerek yoktur. Geliştirilen protokolde IoTD'ler de RUE'lerin yardımıyla ağda senkron olacaklardır. Bundan dolayı, IoTD ve RUE'ler ağda senkron olacakları için periyot ve slotları hizalıdır.



Şekil 2.3. SFN ve SF Parametrelerinin Gösterimi

Bir periyottaki slot sayısını ifade eden S parametresi, RUE'lerin sahip olduğu SFN ve SF değerleri dikkate alınarak bir kurala göre belirlenir çünkü RUE'ler ağda senkronizasyonu garanti eden cihazlardır. Bu çalışmada IoTD'ler için geliştirilen protokol bu avantajı kullanarak RUE cihazlarını keşfetmeye çalışır. S değerini belirleyen kural aşağıdaki gibidir:

$$S = \frac{10 \times p}{\lambda} \quad 2.1$$

Daha önce de ifade edildiği gibi, λ bir slotun kapsadığı zamanı ifade eder ve p ise 1024 sayısının pozitif tam bölenlerinden birini ifade eder ($p = \{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024\}$) çünkü SFN ve SF parametrelerinin değerleri her 10240 milisaniye (10,24 saniye) sonunda sıfır değerine döner. Bu kuralın amacı, RUE'ler için SFN ve SF değerleri sıfıra döndüğünde IoTD'lerin slot indekslerinin de sıfır olmasıdır. Böylece, RUE'ler ve IoTD'ler senkron olmaya devam ederler. Bu kurala uyulmadığı takdirde, IoTD'lerin slot indeksleri SFN ve SF değerlerinden farklılaşacağı için slot indekslerinin senkronizasyonu zorlaşacaktır. Bu kural, geliştirilecek protokolün zaman modelini halihazırda senkron olan güçlü bir ağ ile destekleyecektir.

S parametresinin değerinin bir tamsayı olması gerektiği için λ değeri buna göre seçilmelidir. Örneğin, $\lambda = 2$ milisaniye ve $p = 16$ olarak seçildiğinde S parametresi 80 olur ki bu bir periyotun 80 slottan oluşmasını ifade eder ve bir periyotluk zaman $80 \times 2 = 160$ milisaniye olarak hesaplanır. SFN ve SF parametreleri 10240 milisaniye süreden sonra sıfırlandığında IoTD'lerin slot indeksleri de 64 periyodun sonunda sıfırlanmış olur.

RUE cihazları ve IoTD'ler arasındaki keşif kanalı yarı çift yönlü (half duplex) [107] iletişimin yapıldığı bir kanaldır. Bu kanalda iki cihazdan bir tanesi sinyal gönderirken

diğerinin kanalı dinlemesi ve mesajı alması gerekir. Yarı çift yönlü iletişimde bir cihaz sinyal gönderimi ve alımını aynı anda yapamaz. Bu iletişim modeli, bizim ağ modelimiz için daha uygun olduğundan IoTD ve RUE'ler bu model ile haberleşeceklerdir. Önerilen protokol kısmında bu konu detaylandırılacaktır.

Ağdaki bütün cihazlar keşif için aynı kanalı kullanacaklardır. Başlık 1.4.1.4'de açıklandığı gibi, Bluetooth benzeri kişisel alan ağlarında (Personal Area Network – PAN) cihazların kanallar arasında atlayarak keşif yapmalarının bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan bazıları fazla slotta aktif olmak, enerji tüketiminin ve keşif gecikmesinin fazla olmasıdır. Bundan dolayı, BLE'de cihaz keşfi için kullanılan kanal sayısı azaltılarak üçe düşürülmüştür. Bu kayıpların yaşanmaması için biz de önerilen protokolda cihaz keşfi sürecinde tek bir kanal kullanıyoruz.

IoTD ve RUE cihazları ağda gezgindir. Simülasyon ortamlarında cihazların hareketlerini modelleyen birçok farklı yöntem vardır [108]. Bu yöntemlerin amacı, simülasyon ortamında cihazların farklı tür hareketlerini gerçeğe yakın bir şekilde modellemektir. Bizim çalışmamızda IoTD ve RUE cihazları Random Waypoint mobilite modelinin [109] kurallarına göre ağda hareket ederler.

Cihaz hareketi, belirlenen X_{max} , Y_{max} sınırlı alanları içinde gerçekleşir. Random Waypoint mobilite modeline göre, (x,y) konumunda olan bir cihazın hareket edeceği yeni konumu olan (x_{next}, y_{next}) noktası $[0, X_{max}]$ ve $[0, Y_{max}]$ arasından eşit olasılıkla (uniform) seçilir ve cihaz (x,y) konumundan (x_{next}, y_{next}) konumuna doğru hareket eder. Bu hareketi, $[V_{min}, V_{max}]$ arasından eşit olasılıkla seçilen v hızıyla gerçekleştirir. Cihaz (x_{next}, y_{next}) konumuna varınca bir süre bekler ve aynı sınır aralıklarında yeni (x_{next}, y_{next}) konumunu belirleyerek hareketine devam eder. Bu döngü simülasyon bitene kadar devam eder. Böylece gerçekçi bir mobil ağ ortamı oluşturulmuş olur.

2.2. Arka Plan ve Önerilen Yöntem

Bu bölümde, önerilen cihaz keşfi protokolü geliştirilirken esinlenilen 3GPP ve LTE ağlarda eNB keşfi için izlenen Rastgele Erişim Prosedürü (Random Access Procedure-RAP) ve önerilen röle cihaz keşif protokolü detaylıca anlatılacaktır. RAP, terminallerin LTE ve 3GPP ağlarında ilk defa aktif olduğu durumdan eNB ile iletişime geçmesine kadar uygulanan bir dizi işlemdir. Bu prosedürden esinlenerek gezgin IoT cihazlarının RUE'leri keşfetmeleri için yeni ve özgün bir cihaz keşfi protokolü geliştirilmiştir.

2.2.1. 3GPP ve LTE’de Rastgele Erişim Prosedürünün (Random Access Procedure – RAP) Arka Planı

Hücresele ağlarda terminallerin ağa bağlanmak için öncelikle senkronizasyonu sağlamaları ve eNB cihazını keşfetmeleri gerekir. Ağda ilk defa aktif olan UE’ler senkronizasyon süreçlerini tamamladıktan sonra eNB ile bağlantı talebinde bulunabilirler. Rastgele erişim prosedürü, cihazların senkronizasyonu sağladıkları andan ağa bağlandıkları ana kadar olan süreçleri içerir.

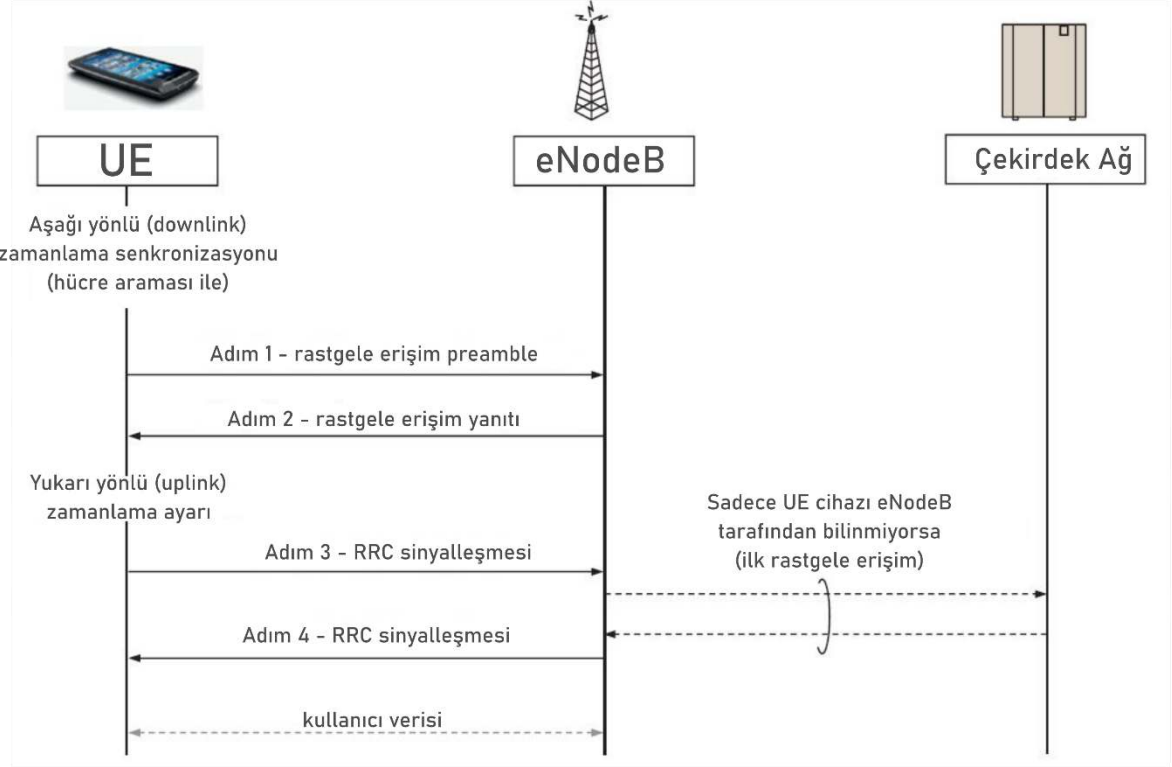
RAP ağda ilk defa aktif olan terminallerin dışında bağlantısı kopmuş terminaller tarafından da işletilmesi gereken bir süreçtir. Örneğin, RRC_IDLE (Radio Resource Control Idle) modunda olan bir terminalin RRC_CONNECTED (Radio Resource Control Connected) moduna geçmesi için RAP sürecini tekrarlaması gerekir. LTE ağlarda cihazlar RRC_IDLE ve RRC_CONNECTED olmak üzere iki durumda bulunabilirler. RRC_CONNECTED durumunda, terminal ve radyo erişim ağı (Radio Access Network – RAN) arasındaki haberleşme için gerekli olan parametreler iki cihaz tarafından da bilinir. RRC_CONNECTED durumu bir UE’nin spesifik bir hücreye ait olduğu anlamına gelir.

UE’lerin güç tüketimini azaltmak için önerilmiş olan süreksiz alım (Discontinuous Reception/DRX) mekanizmasıyla uzun süre veri almayan cihazlar RRC_IDLE durumuna geçerler. RRC_IDLE durumunda olan bir cihaz spesifik bir hücreye bağlı değildir. Bu durumda, cihazlar güç tüketimini minimum tutmak için zamanlarının çoğunluğunu uyku modunda geçirerek senkronizasyon ve veri iletimini göz ardı ederler. Çağrı (paging) sinyalleriyle kendileri için gönderilmiş bir mesaj olduğunu algılayan cihazlar RAP ile tekrar RRC_CONNECTED durumuna geçerler [110].

LTE ağlarda UE’ler RAP ile bağlantı isteği göndermeden önce zaman ve frekans senkronizasyonu için PSS ve SSS sinyallerini alarak ağda senkron olurlar. PSS, Zadoff-Chu dizisiyle oluşturulmuş bir sinyaldir. SSS ise *m-sequence* [111] gibi sözde rastgele ikili dizi (pseudorandom binary sequence) tabanlı oluşturulmuş bir sinyaldir. PSS’i alan cihazlar sembol, slot, alt çerçeve ve yarı çerçeve senkronizasyonunu sağlamış olurlar. Ayrıca cihazlar hücre kimlik grubu içerisinde hücresel kimliğini de PSS ile elde etmiş olurlar.

SSS’i alan cihazlar çerçeve senkronizasyonunu sağlamış olmakla birlikte 0 ile 167 arasında değişen hücre kimlik grubunu da elde etmiş olurlar. Senkronizasyon sinyallerini

alan UE'ler sadece zaman ve frekans senkronizasyonunu sağlamakla kalmaz, bunun yanında fiziksel katman hücre kimliğini elde eder ve ağı FDD (Frequency Division Duplex) ya da TDD'den (Time Division Duplex) hangisini kullandığını algılamış olur [89, 112]. Senkronizasyonun ardından UE'ler eNB ile bağlantı kurmak için RAP sürecini başlatırlar.



Şekil 2.4. RAP sürecinin özet gösterimi [110].

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, rekabet tabanlı (contention-based) RAP süreci dört adımda gerçekleşir [113].

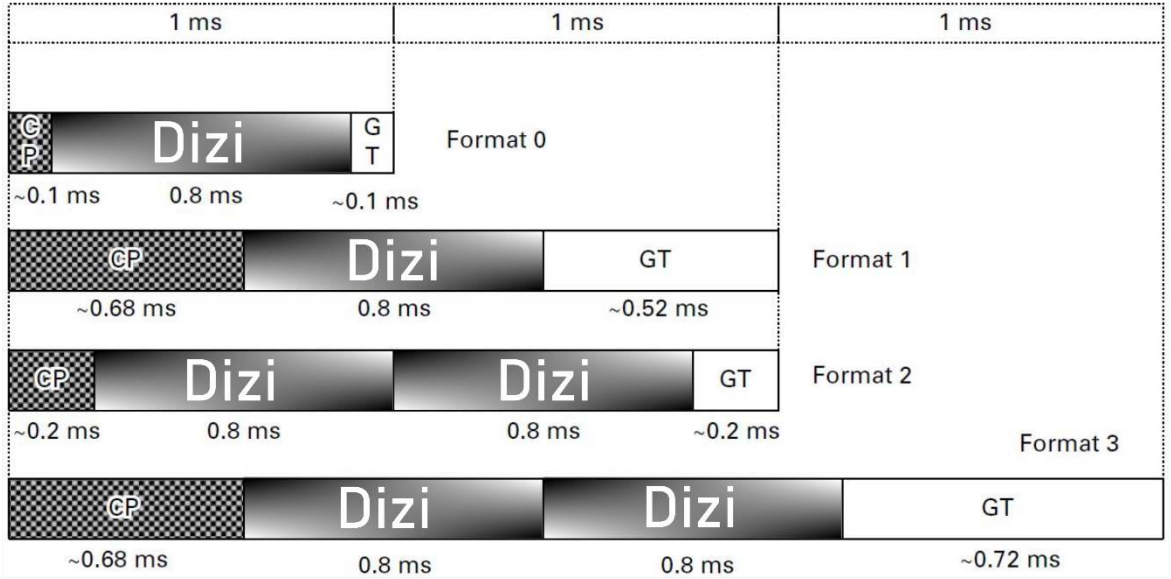
- Birinci adımda, bağlantı kurmak isteyen UE cihazı eNB'ye rastgele erişim (Random Access – RA) ön işaret sinyali gönderir. Bu sinyal gönderimi UE'den eNB'ye doğru yukarı yönlü (uplink) olduğu için bu sinyalden önce UE'nin yukarı yönlü senkronizasyonu tamamlamış olması gerekir. Aksi takdirde, yukarı yönlü bir veri gönderemez. Bu aşamada birçok cihaz tarafından gönderilen ön işaret mesajları Zadoff-Chu kök dizisiyle oluşturulmuş dikgen (ortogonal) sinyallerdir.

• Gönderilen ön işaret sinyalinin alan eNB cihazı sinyalin gönderim zamanını tahmin ederek ikinci adımda UE'nin gönderim zamanını düzeltmesi için bir zamanlama komutunu da içeren RAR (Random Access Response) mesajını gönderir. Bu komutun yanı sıra, eNB cihazı üçüncü adımda kullanmak üzere UE için RAR içerisinde bir kaynak tahsis eder.

• Üçüncü adımda, UE cihazı eNB'ye daha önce belirlenen radyo kaynağı üzerinden kimliğini göndererek RRC bağlantı isteğinde bulunur. UE'nin ağda ilk defa aktif olup olmama durumuna göre üçüncü adımda gönderilen mesajın içeriği değişebilir.

• Son adımda RRC bağlantı isteğine cevap verilerek aynı anda bağlantı isteği gönderen UE'lerin rekabet tabanlı RAP süreci sonlandırılır. Üçüncü adımda UE'lerin gönderdikleri kimlikleri dördüncü adımda tekrar alan UE'ler bu süresi başarılı bir şekilde sonlandırırken, kimliklerini alamayan UE'ler bir süre bekledikten sonra RAP sürecini tekrar başlatırlar [112].

RA ön işaret mesajının gönderilmesi Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı (Physical Random Access Channel – PRACH) ile gerçekleşir. Her hücre için eNB tarafından belirlenen 64 ön işaret dizisi vardır ve cihazlar rastgele 64 adet ortogonal diziden bir tanesini seçerek ön işaret mesajlarını oluştururlar. Ön işaret mesajı Zadoff-Chu dizileriyle üretilen özel bir mesajdır. Karmaşık sayılardan oluşan bu dizilerin uzunluğu FDD için 839, TDD için 139'dur.



Şekil 2.5. Ön işaret mesajı yapısı ve formatları [100].

Şekil 2.5'te listelendiği gibi, farklı senaryolar için dört tür ön işaret mesajı formatı vardır. Örneğin, format sıfır hücre uzunluğunun yaklaşık 15 km olduğu ağlar için kullanılır. Format sıfırda bütün ön işaret süresi 1 ms, oluşturulan dizi 0.8 ms, döngüsel ön ek (cyclic prefix – CP) ve koruma zamanı (guard time – GT) süreleri yaklaşık olarak aynıdır ve 0.1 ms civarındadır. CP, eNB'nin gönderilen ön işaret mesajını daha kolay çözebilmesi için dizinin sonundaki bir parçanın başında tekrar etmesidir. GT ise ön işaret sonunda kullanılmayan zaman parçasıdır. Bu zaman parçası UE'lerin eNB'ye olan uzaklıklarının farklı olmasından kaynaklanır. Geç ulaşan mesajların çakışmalara ve girişimlere sebep olmaması için GT süresi kadar kullanılmayan koruma zamanı bırakılır.

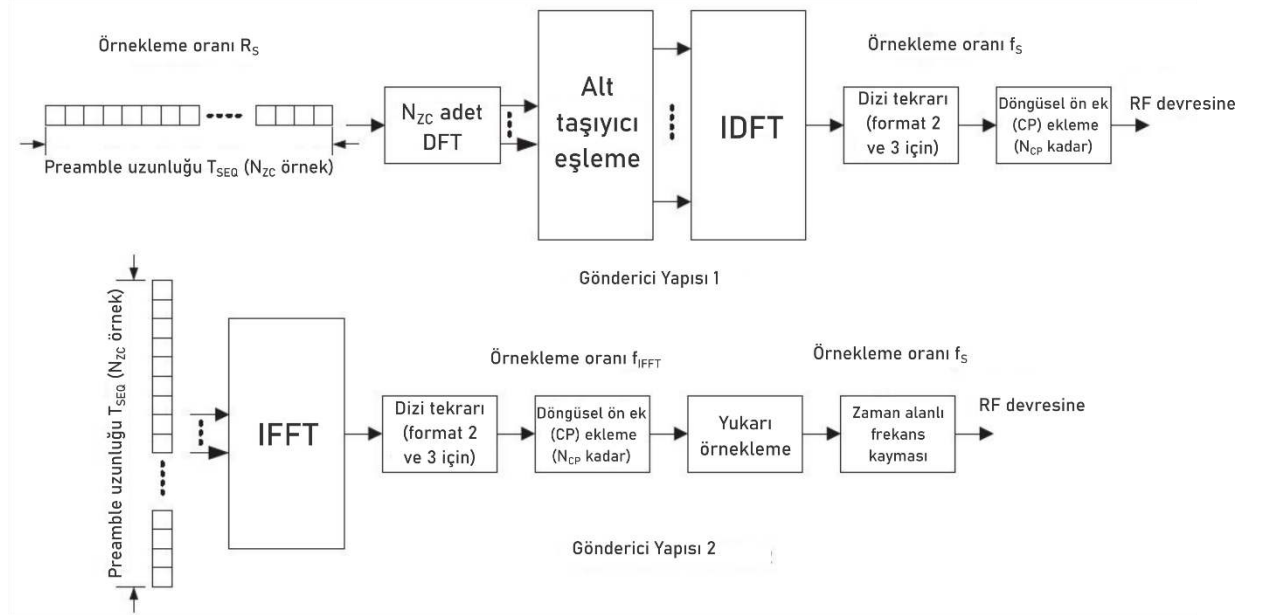
PSS ve SSS senkronizasyon sinyallerinde olduğu gibi RA ön işaret mesajı üretirken 1.08 MHz bant genişliğine karşılık gelen altı kaynak bloğu kullanılır. LTE'de bir alt taşıyıcı 15 KHz olduğu için 1.08 MHz'lik bir bant genişliğinden 72 adet veri alt taşıyıcısı elde edilir. Ancak RAP alt taşıyıcı bant genişliği 1.25 KHz olarak kabul edildiği için RA sürecinde kullanılabilecek 864 veri alt taşıyıcısı elde edilebilir.

RAP'da kullanılabilecek dizi sayısının maksimum olabilmesi RA ön işaret dizisinin uzunluğu bir asal sayı olarak seçilmelidir. Ancak elde edilen alt taşıyıcı sayısı 864 bir asal sayı değildir. Bu sayıya yakın olan asal sayılar 829, 839, 853, 857, 859, 863 ve 877 sayılarıdır. 864 sayısından fazla olmayan en büyük asal sayı 863 sayısıdır ancak şekil 2.5'te gösterildiği gibi ön işaret sonunda kullanılmayan bir koruma alanı da bırakılacağı için seçilecek asal sayı daha küçük olmalıdır. LTE RAP'da 25 adet alt taşıyıcı boş bırakılarak koruma alanı oluşturulduğu için RA ön işaret üretilirken kullanılacak asal sayı 839 olarak belirlenmiştir [100].

RA ön işaret gönderici yapısının iki farklı alternatifi şekil 2.6'da gösterilmiştir. RA ön işaret için N_{zc} uzunluğunda üretilen Zadoff-Chu dizisi Ayırık Fourier Dönüşümünden (Discrete Fourier Transform – DFT) geçirilerek gönderilecek her dizi elemanı ile üzerinden gönderileceği kaynak eşleştirilir. Ardından ters DFT (Inverse Discrete Fourier Transform- IDFT) yapılarak, gerekiyorsa dizi tekrarlanarak birleştirilir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi RA ön işaret format 2 ve 3 için üretilen dizi tekrarlanır ve birleştirilir. Dizinin sonundan bir parça olan CP parçası da RA ön işaret başlangıcına eklenerek gönderilir.

İkinci bir gönderim yöntemi ise üretilen diziyi DFT'den geçirmeden doğrudan üzerinden gönderilecek kaynak ile eşleştirmektir. IFFT (Inverse Fast Fourier Transform- IFFT)'den geçirilen Zadoff-Chu dizisi kök parametresi farklı olan yeni bir Zadoff-Chu

dizisine dönüşür. CP parçası da RA ön işaret başlangıcına eklenerek ve örnekleme yapılarak gönderilir. Şekil 2.6’da gösterilen ikinci gönderici yapısı daha basit olduğu için LTE RA ön işaret gönderiminde tercih edilir.

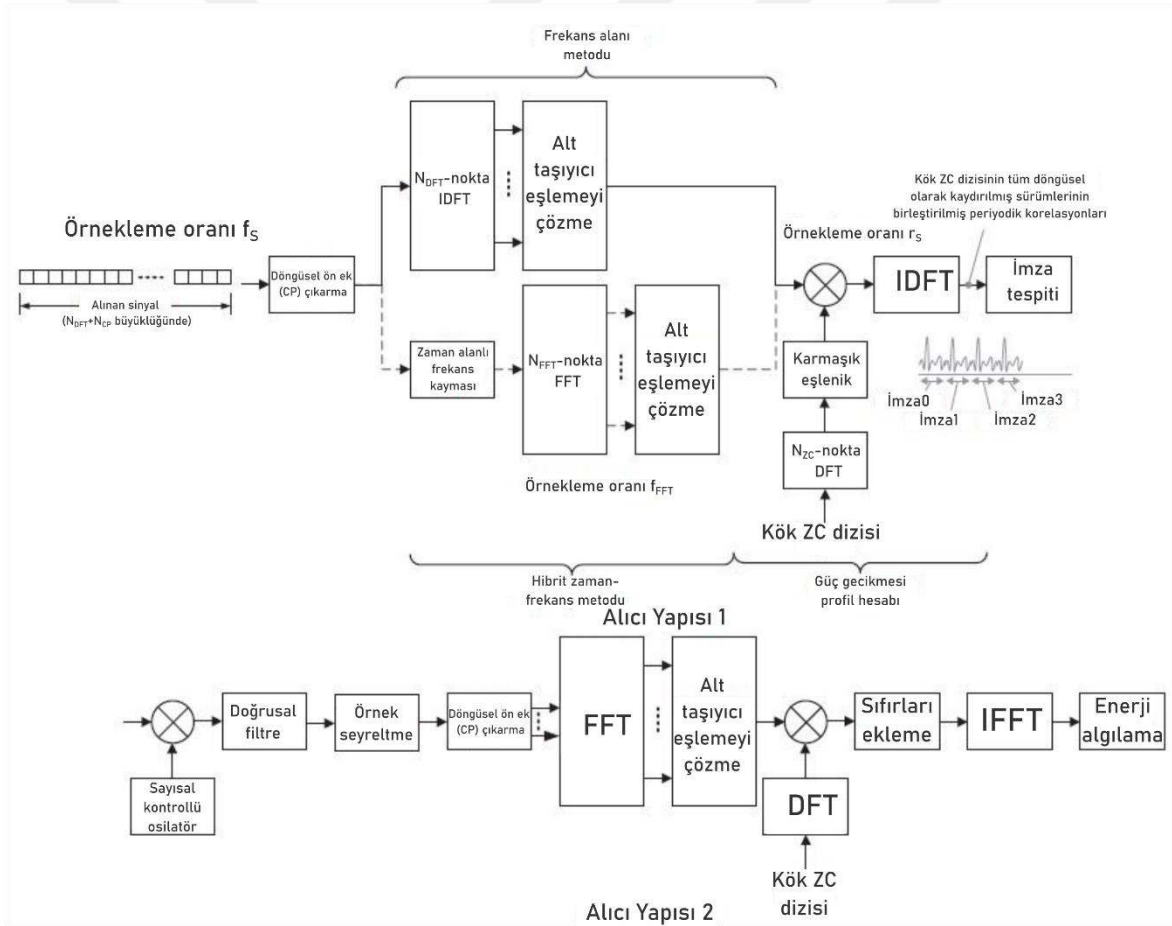


Şekil 2.6. RA ön işaret gönderici yapısı [112].

UE’ler tarafından gönderilen RA ön işaret mesajları 0 ile 64 arasında bir imza içerir. eNB’nin görevi gönderilen RA ön işaret mesajlarından imzaları çıkarmaktır. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, bu imzaların tespit edilmesinde de iki yöntem vardır. Bu iki yöntemde ortak olan kısımlar CP ekinin mesajdan çıkarılması, güç gecikme profilinin (power delay profile) hesaplanması ve imzanın tespit edilmesidir. Bu iki yöntem arasındaki fark RA ön işaret mesajını taşıyan alt taşıyıcıların hesaplanmasındadır. Bu yöntemlerin sonunda elde edilen Zadoff-Chu dizisi, kök dizi ile korelasyonu hesaplanarak gönderilen dizinin işaret ettiği imza tespit edilir. PRACH kanalı üzerinden gönderilen RA ön işaret üretmek için kullanılan Zadoff-Chu dizisi aşağıdaki formüle göre oluşturulur;

$$x_u(n) = \begin{cases} e^{-\frac{j\pi un(n+1)}{N_{ZC}}}, & 0 \leq n < N_{ZC} \quad N_{ZC} \text{ bir tek sayı ise} \\ e^{-\frac{j\pi un^2}{N_{ZC}}}, & 0 \leq n < N_{ZC} \quad N_{ZC} \text{ bir çift sayı ise} \end{cases} \quad 2.2$$

Formül 2.2'deki u parametresi üretilen Zadoff-Chu dizisinin kökü ve N_{ZC} ise daha önce bahsedildiği gibi dizi uzunluğudur. u ve N_{ZC} parametreleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta bu parametrelerin aralarında asal sayılar olması gerektiğidir. Zadoff-Chu bir CAZAC dizisi olduğundan, kök dizisi ve zamanda kaydırılmış her bir dizi arasındaki korelasyon değeri sıfırdır ve bu diziler birbirine diktir (ortogonal). Kök dizisinin zamanda sıfır birim kaydırılmış hali kendisidir. Ayrıca, farklı kök değerleriyle üretilmiş olan diziler birbirine dik olmasa da çapraz korelasyon değerleri çok düşüktür. Eğer N_{ZC} parametresi bir asal sayı olarak belirlendiyse $N_{ZC}-1$ tane dizinin çapraz korelasyon değerleri $\frac{1}{\sqrt{N_{ZC}}}$ 'dir.



Şekil 2.7. RA ön işaret alıcı yapısı [112].

eNB ile bağlantı kurmak isteyen her cihaz birbirine ortogonal olan 64 adet diziden rastgele bir tanesini seçerek PRACH kanalı üzerinden gönderir. eNB, gönderilen dizilerin

güç gecikme profilini hesaplayarak hangi dizilerin gönderildiğini tespit eder. Eğer aynı dizi birden fazla cihaz tarafından seçilerek gönderildiyse, eNB bu dizinin gönderildiğini tespit etse de kaç cihaz tarafından gönderildiği sonucunu çıkaramaz. Örneğin, ağda RAP sürecine giren beş adet cihaz olduğunu $\{UE_1, UE_2, \dots, UE_5\}$ ve bu cihazların sırasıyla 1, 5, 5, 34 ve 61 dizilerini seçerek gönderdiğini varsayalım. eNB güç gecikme profilini hesaplayarak 1, 5, 34 ve 61 dizilerinin cihazlar tarafından gönderildiğini tespit eder ancak dizi 5'in UE_1 ve UE_2 olmak üzere iki cihaz tarafından gönderildiğini algılayamaz. Bundan dolayı, dört cihazın RAP sürecinde olduğunu varsayarak bu dört dizi için üçüncü adımda kullanılmak üzere kaynak tahsis eder.

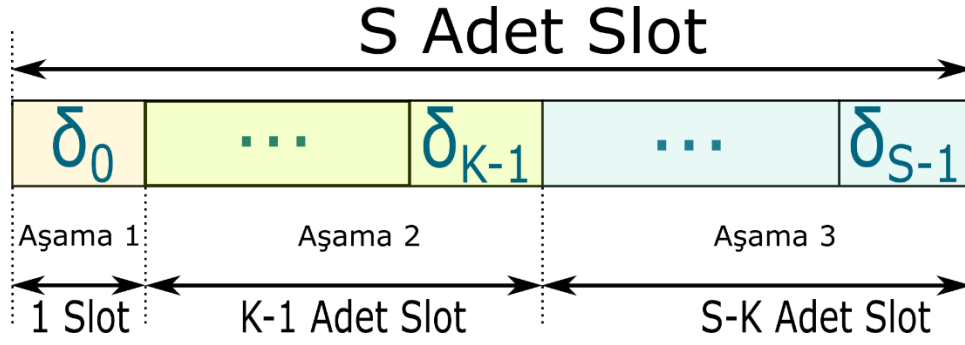
İkinci adımda, eNB tarafından tespit edilen her farklı dizi için farklı bir kaynak tahsis edilir ve kaynak bilgileri RAR mesajı ile gönderilir. Ancak, aynı diziyi seçen cihazlara aynı kaynaklar atandığı için üçüncü adımda gönderilen RRC isteği eNB'de çakışır. Yukarıdaki verilen örneğe göre, UE_1 ve UE_2 birinci adımda aynı dizileri seçtikleri için ikinci adımda tahsis edilen kaynaklar aynı olacak ve üçüncü adımda RRC istek mesajları eNB'de çakışacaktır. Bu çakışmadan dolayı cihazlar dördüncü adımda RRC cevabını alamazlar ve RAP sürecini bir sonraki PRACH slotunda tekrarlamak zorunda kalırlar.

2.2.2. İmza Tabanlı ve Enerji Verimli Röle Keşif Protokolü (SERDP)

Bu bölümde hücresele ağdaki IoT ve RUE cihazları arasında bu tez çalışması ile geliştirilen SERDP çalışmasının detayları anlatılacaktır.

SERDP'in asıl amacı, IoT'lerin minimum slotta aktif olarak komşuluğundaki RUE cihazlarını keşfetmelerini sağlamak ve cihazların gereksiz slotlarda aktif olmalarını engellemektir. Keşif protokolü olarak SERDP'i uygulayan IoT ve RUE cihazları, sonraki periyodun hangi slotlarında aktif olacaklarını imza tabanlı sinyalizasyon yardımıyla komşuluğundaki cihazlara bildirirler. Böylece, cihazlar komşuluğundaki hedef cihazların aktif slotlarını aramak zorunda kalmazlar.

Cihaz yoğunluğunun fazla olduğu ağlarda bir cihazın komşuluğunda çok sayıda cihaz bulunabilir. Bölüm 1.5'te ifade edildiği gibi, aynı anda birden fazla sayıda cihaz tarafından gönderilen keşif mesajlarının alıcıda çakışması, literatürde önerilen birçok cihaz keşfi protokolü için ortak bir problemdir. SERDP, her bir IoT ve RUE komşu çifti için girişimlerin olmayacağı bir slot belirlemeyi amaçlamaktadır.



Şekil 2.8. SERDP özgün periyot yapısı

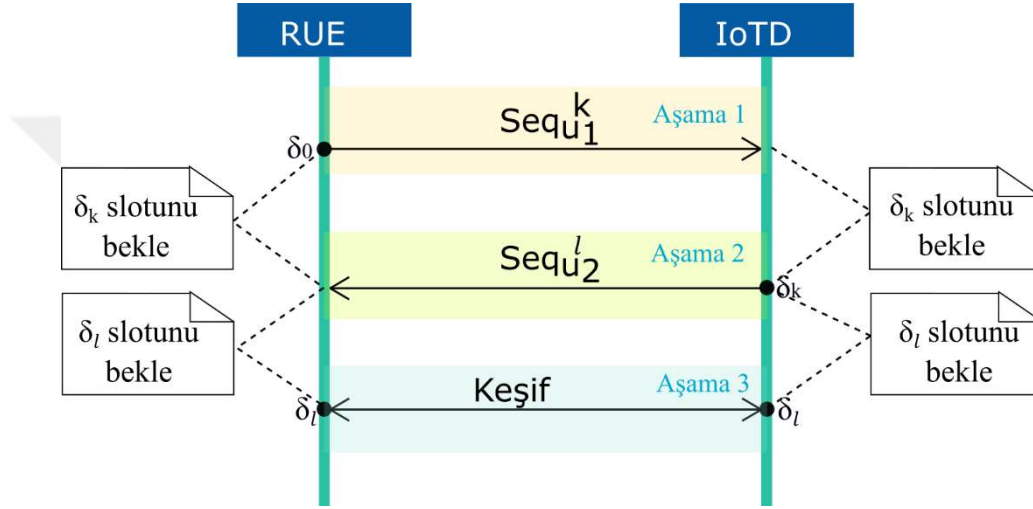
Bu amaçları gerçekleştirebilmek için, bir periyot Şekil 2.8’de gösterildiği gibi üç aşamaya bölünmüştür. Birinci aşama (STG_1) bir slottan oluşur ve bu slot periyodun ilk slotudur (δ_0). İkinci aşama (STG_2) $K-1$ adet slottan oluşur ($[\delta_1, \delta_{K-1}]$). Son olarak, üçüncü aşama periyodun geri kalan slotlarını içerir ve $S-K$ adet slottan oluşur ($[\delta_K, \delta_{S-1}]$). $nSTG_1$, $nSTG_2$ ve $nSTG_3$ sırasıyla STG_1 , STG_2 ve STG_3 ’teki slot sayılarını ifade eden parametrelerdir.

Üzerinde çalıştığımız ağda geleneksel merkezi ağların aksine çok sayıda merkezi RUE cihazları ve IoTD’ler bulunmaktadır ve bu cihazlar ağda gezgindir. Ayrıca, bu iki tür cihazda batarya ile çalışan kısıtlı cihazlardır. Ağın bu özelliği cihaz keşfi protokolünü karmaşıktırmakta ve zorlaştırmaktadır. SERDP ile cihazlar haberleşme menzilinde bulunan komşu cihazların periyodun hangi slotlarında aktif olacaklarını bildikleri için gereksiz slotlarda aktif olarak enerji kaybetmeleri engellenmiş olacaktır. Bunun yanında, önerilen özgün periyot yapısı ile cihazların aktif olacakları slotlar bir periyoda dağıtılmış ve böylece keşif mesajlarının çakışması önlenmiştir.

SERDP’in periyot aşamalarını detaylandırmadan önce cihazların herhangi bir andaki slot indekslerini nasıl bileceklerinden bahsetmek faydalı olacaktır. RUE’ler ağda senkron oldukları için slot indekslerine RUE cihazları karar verirler. Sistem modeli kısmında detaylıca anlatıldığı gibi, bir periyottaki slot sayısı ve bir slotun zaman miktarı SFN ve SF parametrelerine bağlı olarak belirlenir. Bundan dolayı RUE’ler bir andaki slot indekslerini aşağıdaki gibi belirlerler.

$$Slot\ indeks = \frac{(SFN \times 10 + SF) \bmod (S \times \lambda)}{\lambda}$$

Örneğin, $SFN=20$, $SF=3$, $S=40$ slot ve $\lambda=2$ milisaniye olduğunda o andaki slot indeksi 21 olarak hesaplanır. Ağda her an aynı SFN ve SF değerlerine sahip olan ve birbirleriyle senkron olan RUE cihazları slot indekslerinin belirleyicisidirler. Önerilen cihaz keşfi protokolü geliştirilirken RUE cihazların ağdaki senkronizasyonlarından yararlanılmıştır. Diğer taraftan, IoTD'ler ise zamanlayıcılar kullanarak slot indekslerini belirler ve her periyodun ilk slotunda yerel saatlerini düzeltir. Böylece, RUE'ler tarafından δ_0 'da gönderilen sinyaller ile IoT'lerin slot indeksleri belirlenir ve kaymalar güncellenir.



Şekil 2.9. SERDP sıralı diyagramı

Şekil 2.9'da SERDP'in aşamaları arasındaki ilişki, keşif süreci boyunca cihazlar arasında gerçekleşen mesajlaşma yönü ve şekli özet olarak sıralı diyagram şeklinde gösterilmiştir. Şekilde ifade edilen k ve l parametreleri sırasıyla ($1 \leq k \leq K-1$) ve ($K \leq l \leq S-1$) olarak düşünülmelidir. Her bir aşamanın detayları incelenirken bu şekilden faydalanılabilir.

2.2.2.1. Aşama #1

STG₁'in amacı, RUE cihazlarının STG₂'de hangi slot indekslerinde aktif olacaklarını komşuluğundaki IoTD'lere bildirmek ve IoTD'lerin slot senkronizasyonunu sağlamaktır. Bu aşamada ağdaki bütün cihazlar aktif olurlar. RUE'ler gönderici durumunda ve IoTD'ler ise alıcı durumundadır. Ağdaki her bir RUE cihazı, STG₂'deki $K-1$ adet slotu temsil

edecek olan ortogonal $K-1$ adet Zadoff-Chu dizisi üretir ve uniform olarak bir diziyi seçer. Ardından, seçilen bu dizi ile oluşturulan ön işaret mesajı yayınlanır/gönderilir (broadcast). Komşu RUE'ler tarafından gönderilen ön işaret mesajlarını alan bir IoT cihazı komşu RUE'lerin STG_2 'nin hangi slotlarında aktif olacaklarını ön işaret mesajlarından çıkarır. Birinci aşama için üretilen Zadoff-Chu kök dizisi aşağıdaki gibidir:

$$x_{u_1}(n) = e^{-\frac{j\pi u_1 n(n+1)}{N_{ZC}}}, \quad 0 \leq n < N_{ZC} \quad 2.4$$

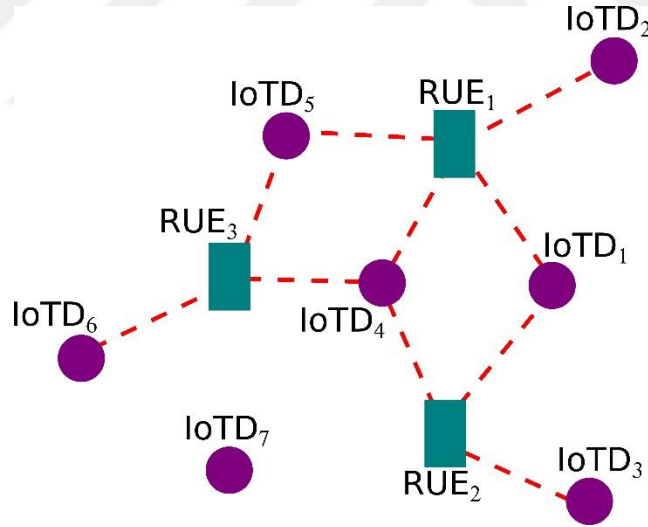
Yukarıda verilen formülde u_1 dizi kökünü, N_{ZC} dizi uzunluğunu, n ise dizideki her bir elementin indeksini ifade eder. Kök dizisini birer birim öteleyerek $N_{ZC}-1$ adet birbiriyle ortogonal dizi elde edilebilir. Ancak, pratikte bir defa ötelenerek elde edilen diziler çok yollu yayılım hataları ve yol kaybı nedeniyle alıcı tarafından algılanamayabilir. Bundan dolayı, gönderilebilecek diziler belirlenirken kök dizisini birden fazla sayıda ötelemek gerekecektir. Çevrimsel kaydırma miktarı (Cyclic Shift Interval – N_{CS}) kök dizisinin ötelenme miktarını ifade etmektedir ve bu miktar ağı ve ağdaki cihazların özelliklerine göre değişebilmektedir. LTE ağlarda N_{CS} değeri cihazların hızlarına göre kısıtlı (restricted) ve kısıtsız (unrestricted) durumlar olmak üzere iki şekilde belirlenir [114]. Amacımız STG_2 'nin slotlarını işaret eden $K-1$ adet ortogonal dizi üretmektir; $\{Seq_{u_1}^1, Seq_{u_1}^2, Seq_{u_1}^3 \dots Seq_{u_1}^{K-1}\}$. Ayrıca u_1 , N_{ZC} , N_{CS} ve K değerlerinin ağdaki bütün cihazlar tarafından bilindiği varsayılmaktadır.

STG_1 'nin sinyal gönderim yönü RUE cihazlarında IoT'lere doğrudur. Bir RUE cihazı tarafından belirlenen ve gönderilen Zadoff-Chu dizisi, RUE cihazının STG_2 'de aktif olacağı slot indeksini ifade eder. δ_0 'da LTE ön işaret format 1 ile üretilen ön işaret mesajlarının yayınlanmasından sonra RUE'ler gönderdikleri dizilerin karşılık geldiği slot indeksini kaydederekler. STG_2 'nin dizileri eşit olasılıkla seçildiği için RUE'ler 1 ve $K-1$ slotları arasında dağıtılmış olacaktır. Bundan dolayı, RUE'ler STG_2 için belirledikleri slot dışındaki slotlarda aktif olmak zorunda değildir.

Ağda ilk defa aktif olan bir IoT diğer cihazların o andaki slot indekslerini bilmediği için ağda senkron değildir. Bundan dolayı, RUE'lerin ilk slotu olan δ_0 ile denk gelene kadar keşif kanalını dinler. δ_0 'da komşu RUE cihazlarından dizileri aldıktan sonra slot senkronizasyonunu sağlar ve güç gecikme profilini hesaplayarak komşuluğundaki RUE cihazlarının STG_2 'nin hangi slot indekslerinde aktif olacaklarını tahmin etmeye çalışır.

IoTD'ler algıladıkları slot indekslerini STG_2 'de aktif olmak üzere kaydeder. IoTD cihazları δ_0 'dan sonra sürekli olarak aktif olmak zorunda değildir çünkü komşu RUE cihazlarının STG_2 'de aktif olacakları slot indekslerini artık bilirler. Eğer bir IoTD δ_0 'da bir sinyal alamazsa, komşuluğunda herhangi bir RUE cihazı olmadığı sonucuna varır ve bir sonraki periyot başlangıcına kadar pasif durumda bekler.

$NBR_{IoTD_i}^{RUE}$ parametresi $IoTD_i$ cihazının haberleşme menziline bulunan RUE'leri, $nNBR_{IoTD_i}^{RUE}$ ise komşu RUE cihazlarının sayısını ifade eder. $NBR_{RUE_j}^{IoTD}$ parametresi RUE_j cihazının haberleşme menziline bulunan IoTD'leri, $nNBR_{RUE_j}^{IoTD}$ ise komşu IoTD cihazlarının sayısını ifade eder. Örneğin, ağın bir parçasını gösteren şekil 2.10'da ifade edildiği gibi, $nNBR_{IoTD_5}^{RUE}$ değeri ikidir çünkü $IoTD_5$ 'in komşuluğunda bulunan RUE cihaz sayısı ikidir ve bunlar $NBR_{IoTD_5}^{RUE} = \{RUE_1, RUE_3\}$ cihazlarıdır. Benzer şekilde, $nNBR_{RUE_2}^{IoTD}$ değeri üçtür çünkü RUE_2 'nin haberleşme menziline bulunan IoTD sayısı üçtür ve bunlar $NBR_{RUE_2}^{IoTD} = \{IoTD_1, IoTD_3, IoTD_4\}$ cihazlarıdır.



Şekil 2.10. Örnek ağ parçası

Birinci aşamadaki mesajlaşmaya bir örnek verecek olursak, S ve K değerlerinin sırasıyla 80 ve 21 olduğunu varsayalım. Şekil 2.10'da gösterilen örnek ağ parçasına göre STG_1 'de RUE_1 , RUE_2 ve RUE_3 cihazları ön işaret gönderecektir. δ_0 'da ön işaret mesajı göndermek için belirlenen dizilerin RUE_1 , RUE_2 ve RUE_3 cihazları için sırasıyla $Seq_{u_1}^{11}$, $Seq_{u_1}^{18}$ ve $Seq_{u_1}^3$ olduğunu varsayalım. Belirlenen bu diziler, RUE_1 , RUE_2 ve RUE_3

cihazlarının STG₂'nin δ_{11} , δ_{18} ve δ_3 slotlarında aktif olacakları anlamına gelmektedir. Her bir RUE cihazı belirlediği dizi ile oluşturulan ön işaret mesajını gönderdikten sonra diziyi kaydeder. Aynı şekilde her IoTD algıladığı dizileri STG₂'de aktif olmak üzere kaydeder. Yukarıdaki örneğe göre ifade edilirse;

- IoTD₁, sırasıyla RUE₁, RUE₂ tarafından gönderilen $\{\text{Seq}_{u_1}^{11}, \text{Seq}_{u_1}^{18}\}$ dizilerini alır ve δ_{11} , δ_{18} slotlarında uyanmak üzere kaydeder,
- IoTD₂, RUE₁ tarafından gönderilen $\{\text{Seq}_{u_1}^{11}\}$ dizisini alır ve δ_{11} slotunda uyanmak üzere kaydeder,
- IoTD₃, RUE₂ tarafından gönderilen $\{\text{Seq}_{u_1}^{18}\}$ dizisini alır ve δ_{18} slotunda uyanmak üzere kaydeder,
- IoTD₄, sırasıyla RUE₃, RUE₁ ve RUE₂ tarafından gönderilen $\{\text{Seq}_{u_1}^3, \text{Seq}_{u_1}^{11}, \text{Seq}_{u_1}^{18}\}$ dizilerini alır ve δ_3 , δ_{11} , δ_{18} slotlarında uyanmak üzere kaydeder,
- IoTD₅, sırasıyla RUE₃ ve RUE₁ tarafından gönderilen $\{\text{Seq}_{u_1}^3, \text{Seq}_{u_1}^{11}\}$ dizilerini alır ve δ_3 , δ_{11} slotlarında uyanmak üzere kaydeder,
- IoTD₆, RUE₃ tarafından gönderilen $\{\text{Seq}_{u_1}^3\}$ dizisini alır ve δ_3 slotunda uyanmak üzere kaydeder,
- IoTD₇, hiçbir diziyi almaz ve kaydetmez çünkü haberleşme menziline hiçbir RUE cihazı yoktur.

2.2.2.2. Aşama #2

Birinci aşamada RUE'ler tarafından gönderilen diziler hem gönderen RUE'ler hem de IoTD'ler tarafından kaydedildiğinden, ilgili RUE ve IoTD'ler ikinci aşamada dizilerin işaret ettiği slot indekslerinde aktif olurlar. Yukarıda verilen örnek üzerinden detaylandırılacak olursa, δ_3 'te RUE₃ ve $\text{NBR}_{\text{RUE}_3}^{\text{IoTD}}$ cihazları olan IoTD₄, IoTD₅, IoTD₆ aktif olurlar. δ_{11} 'de RUE₁ ve $\text{NBR}_{\text{RUE}_1}^{\text{IoTD}}$ cihazları olan IoTD₁, IoTD₂, IoTD₄, IoTD₅ aktif olurlar. δ_{18} 'de RUE₂ ve $\text{NBR}_{\text{RUE}_2}^{\text{IoTD}}$ cihazları olan IoTD₁, IoTD₃, IoTD₄ uyanırlar.

Bu aşamanın sinyal gönderim yönü birinci aşamanın tersine olarak IoTD'lerden RUE cihazlarına doğrudur. Bu aşamada bir IoTD_i üçüncü aşamadaki slotları işaret eden S–K adet ortogonal dizi üreterek bir tanesini uniform olarak seçer. Seçilen dizi ile oluşturulan

ön işaret mesajı IoTD_i 'nin haberleşme menzilinde bulunan ve halihazırda aktif olan RUE'lere gönderilir.

Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus şudur ki; bir IoTD_i STG_2 'de aktif olduğu her slotta $S-K$ adet dizi içerisinde farklı bir dizi seçer. Eğer üçüncü aşamada yeteri kadar slot bulunmazsa $((S-K) < n\text{NBR}_{\text{IoTD}_i}^{\text{RUE}})$ IoTD_i STG_2 'de üçüncü aşama için $\min((S-K), n\text{NBR}_{\text{IoTD}_i}^{\text{RUE}})$ sayısı kadar dizi seçmelidir. Bunun anlamı IoTD_i , STG_3 'te bir slot çakışması yaşamazsa en fazla $\min((S-K), n\text{NBR}_{\text{IoTD}_i}^{\text{RUE}})$ sayısı kadar RUE keşfedebilir. STG_2 'de üretilen Zadoff-Chu kök dizisinin formülü aşağıdaki gibidir:

$$x_{u_2}(n) = e^{-\frac{j\pi u_2 n(n+1)}{N_{\text{ZC}}}}, \quad 0 \leq n < N_{\text{ZC}} \quad 2.5$$

Yukarıdaki formülde u_2 ikinci aşama için üretilen dizinin kök parametresini, N_{ZC} dizi uzunluğunu, n ise dizi element indeksini ifade eder. Bu aşamada IoTD 'ler tarafından gönderilen diziler RUE ve IoTD 'ler tarafından kaydedilir. Şekil 2.10'da verilen örnek üzerinden ifade edilecek olursa, farz edelim ki;

- δ_3 'te;
 - ✓ IoTD_4 , uyanır ve RUE₃'e Seq _{u_2} ⁴⁹ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{49} 'da uyanmak üzere kaydeder,
 - ✓ IoTD_5 , uyanır ve RUE₃'e Seq _{u_2} ³³ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{33} 'te uyanmak üzere kaydeder,
 - ✓ IoTD_6 , uyanır ve RUE₃'e Seq _{u_2} ⁶⁹ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{69} 'da uyanmak üzere kaydeder,
- δ_{11} 'de;
 - ✓ IoTD_1 , uyanır ve RUE₁'e Seq _{u_2} ²² dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{22} 'de uyanmak üzere kaydeder,
 - ✓ IoTD_2 , uyanır ve RUE₁'e Seq _{u_2} ⁷⁵ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{75} 'te uyanmak üzere kaydeder,
 - ✓ IoTD_4 , uyanır ve RUE₁'e Seq _{u_2} ³³ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{33} 'te uyanmak üzere kaydeder,
 - ✓ IoTD_5 , uyanır ve RUE₁'e Seq _{u_2} ⁵⁴ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{54} 'te uyanmak üzere kaydeder,

- δ_{18} 'de;

- ✓ IoTD_1 , uyanır ve RUE_2 'ye $\text{Seq}_{u_2}^{24}$ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{24} 'te uyanmak üzere kaydeder,

- ✓ IoTD_3 , uyanır ve RUE_2 'ye $\text{Seq}_{u_2}^{57}$ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{57} 'de uyanmak üzere kaydeder,

- ✓ IoTD_4 , uyanır ve RUE_2 'ye $\text{Seq}_{u_2}^{41}$ dizisi ile üretilen sinyali gönderir ve bu diziyi δ_{41} 'de uyanmak üzere kaydeder.

İkinci aşamanın sonunda RUE_1 'in STG_3 'te aktif olacağı slotlar $\{\delta_{22}, \delta_{33}, \delta_{54}, \delta_{75}\}$, RUE_2 'nin aktif olacağı slotlar $\{\delta_{24}, \delta_{41}, \delta_{57}\}$ ve RUE_3 'ün üçüncü aşamada aktif olacağı slotlar $\{\delta_{33}, \delta_{49}, \delta_{69}\}$ olarak belirlenmiş olur.

2.2.2.3. Aşama #3

Üçüncü aşama cihazların birbirlerini keşfettikleri son aşamadır. STG_3 'te her bir komşu RUE ve IoTD çifti için mümkün olduğunca ayrı bir slot belirlenmiş olur. RUE'ler STG_2 'de algıladığı dizilere karşılık gelen slot indekslerinde uyanırlar. IoTD 'ler ise STG_2 'de belirledikleri dizilere karşılık gelen slot indekslerinde aktif olurlar. Eğer bir RUE STG_2 'de herhangi bir sinyal algılamazsa haberleşme menziline IoTD 'lerin olmadığı sonucuna varır ve STG_3 'te aktif olmak zorunda kalmaz.

Yukarıda verilen örneğe göre, RUE_1 ve IoTD_1 δ_{22} 'de, RUE_2 ve IoTD_1 δ_{24} 'te, RUE_2 ve IoTD_4 δ_{41} 'de, RUE_3 ve IoTD_4 δ_{49} 'da, RUE_1 ve IoTD_5 δ_{54} 'de, RUE_2 ve IoTD_3 δ_{57} 'de, RUE_3 ve IoTD_6 δ_{69} 'da ve son olarak RUE_1 ve IoTD_2 δ_{75} 'de birbirlerini başarılı bir şekilde keşfetmiş olurlar. Ancak, δ_{33} 'ü işaret eden dizi hem IoTD_4 hem de IoTD_5 tarafından seçildiği için, RUE_1 ve IoTD_4 cihazları ve RUE_3 ve IoTD_5 cihazları arasındaki keşif işlemi başarısız olur.

RUE_j ve IoTD_i arasında başarılı bir cihaz keşfinin ilk şartı IoTD_i ve RUE_j cihazlarının STG_3 'ün aynı slotunda aktif olmalarıdır. İkinci koşul girişime sebep olabilecek başka bir cihazın bu slotta gönderim yapmamasıdır. RUE_j ve IoTD_i arasında girişime sebep olabilecek cihazlar IoTD_i ile aynı RUE komşularına sahip olan diğer IoTD 'lerdir ve $\text{NBR}_{\text{IoTD}_i}^{\text{IoTD}}$ olarak ifade edilir.

Şekil 2.10'da gösterilen ağ parçası üzerinden bir örnek verilecek olursa IoTD_1 için girişime sebep olabilecek cihazlar $\text{NBR}_{\text{IoTD}_1}^{\text{IoTD}} = \{\text{IoTD}_2, \text{IoTD}_3, \text{IoTD}_4, \text{IoTD}_5\}$ cihazlarıdır

çünkü $IoTD_2$, $IoTD_3$, $IoTD_4$ ve $IoTD_5$ cihazları $IoTD_1$ ile aynı RUE komşularına sahiptir (RUE_1 ve RUE_2). $IoTD_i$ için girişime sebep olabilecek cihaz sayısı ise $nNBR_{IoTD_i}^{IoTD}$ olarak ifade edilir. Yukarıdaki örneğe göre $nNBR_{IoTD_1}^{IoTD}$ değeri üçtür. Ayrıca, daha önce ifade edildiği gibi $IoTD_i$ 'nin RUE komşuları $NBR_{IoTD_i}^{RUE}$ ile ve bu komşuların sayısı $nNBR_{IoTD_i}^{RUE}$ ile ifade edilir. Örneğin $NBR_{IoTD_5}^{RUE}$ cihazları $\{RUE_1, RUE_3\}$ ve $nNBR_{IoTD_5}^{RUE}$ değeri ise ikidir.

Bir $IoTD$ 'nin haberleşme menzilineki ortalama RUE sayısı $nNBR_{avg}^{RUE}$ ile ifade edilir. Benzer şekilde bir $IoTD$ için girişime sebep olabilecek ortalama $IoTD$ sayısı $nNBR_{avg}^{IoTD}$ ile ifade edilir. Mobil bir ağda bir cihazın haberleşme menzilineki ortalama cihaz sayısının tahmin edilmesi zordur çünkü komşu cihaz sayısı zamanla değişmektedir. Bir anda bir cihazın komşuluğunda olan cihazlar bir süre sonra haberleşme menziline çıkabilir. $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoTD}$ parametrelerinin değerini tahmin etmek de zordur. Bundan dolayı, olasılık analizinde bir ön işlem olarak ağ modeli uzun bir süre simüle edilerek ortalama değerler hesaplanmaktadır. Yapılan ön işlem sadece olasılık analizinde ihtiyaç duyulan ortalama cihaz sayılarının gerçeğe uygun hesaplanabilmesi içindir ve geliştirilen yöntemin bir parçasıdır. Bu parametrelerin hesaplandığı formüller aşağıdaki gibidir:

$$nNBR_{avg}^{RUE} = \frac{\sum_{h=0}^{H-1} \sum_{i=0}^{nIoTD-1} nNBR_{IoTD_i}^{RUE}}{nIoTD \times H} \quad 2.6$$

$$nNBR_{avg}^{IoTD} = \frac{\sum_{h=0}^{H-1} \sum_{i=0}^{nIoTD-1} nNBR_{IoTD_i}^{IoTD}}{nIoTD \times H} \quad 2.7$$

Yukarıdaki formüllerde kullanılan H parametresi simülasyonun çalıştırılacağı periyot sayısıdır. Bu yöntemle her bir $IoTD$ 'nin haberleşme menzilineki toplam RUE ve girişime sebep olabilecek toplam $IoTD$ cihazı sayısı hesaplanır ve toplanır. Simülasyon sonunda ise elde edilen toplam $nNBR_{IoTD_i}^{RUE}$ ve $nNBR_{IoTD_i}^{IoTD}$ sayıları $nIoTD \times H$ ile bölünerek ortalama değerler elde edilir. H parametresi ne kadar yüksek bir değer olursa elde edilen ortalama cihaz sayıları da o kadar gerçekçi değerler olur. Bu yöntem dinamik ağlarda kullanılan bir yöntemdir. Ancak bazı çalışmalar ortalama komşu cihaz sayısını sabit kabul ederek ve farklı komşu sayılarını simülasyonlarda deneyerek yöntemlerini önermişlerdir [65, 115].

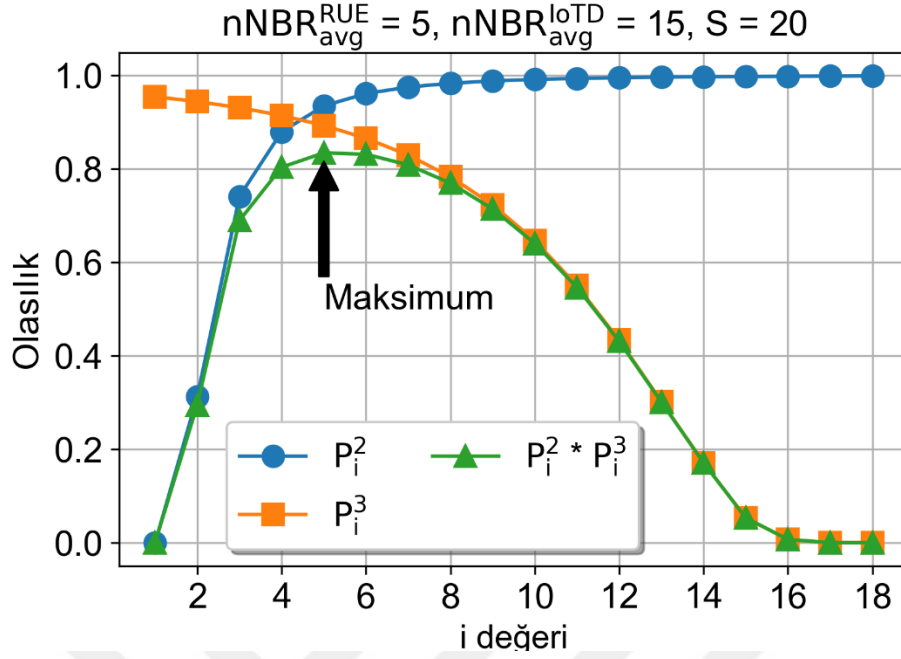
İlerideki kısımda yapılacak hesaplamalar $nNBR_{IoT D_i}^{RUE}$ ve $nNBR_{IoT D_i}^{IoT D}$ değerleri dikkate alınarak yapılacaktır. Bu çalışmada yapılan hesaplamalar bir IoT D cihazını ve bu cihazın haberleşme menzilineki cihazları dikkate alarak geliştirilmiştir. Ancak yapılan hesaplamaları formülleştirilebilmek için tek bir IoT D dikkate alınmıştır. Bundan dolayı, $IoT D_{avg}$ cihazı sonraki hesaplamalarda dikkate alınan ve haberleşme menziline $nNBR_{avg}^{RUE}$ adet RUE cihazı olan ve $nNBR_{avg}^{IoT D}$ adet girişime sebep olabilecek IoT D cihazı olan merkezi cihazdır.

2.2.2.4. Aşamaların Optimum Slot Sayılarının Belirlenmesi

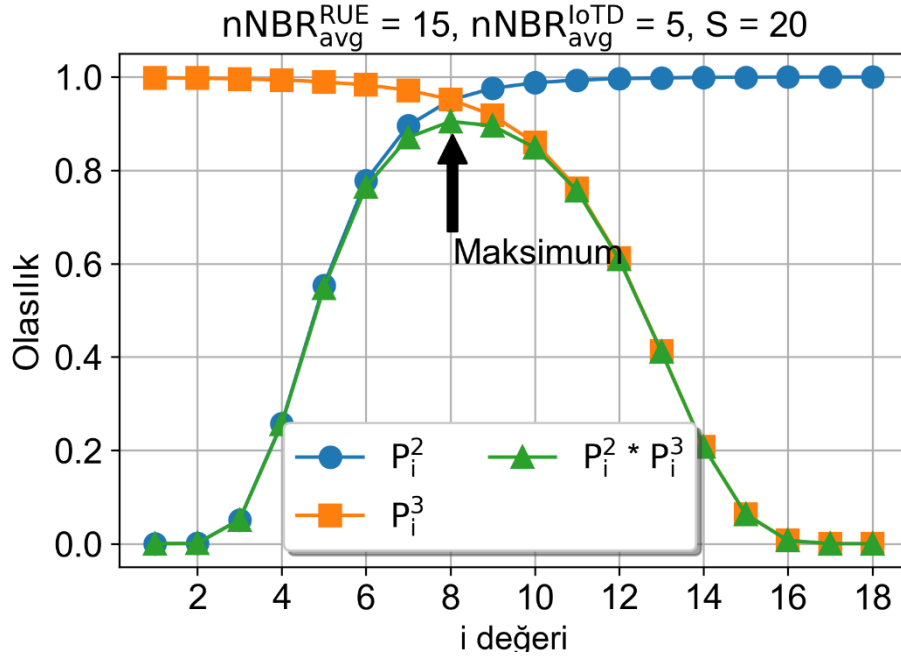
Bu çalışmada K parametresi $nSTG_2$ ve $nSTG_3$ değerlerini belirleyen önemli bir parametredir çünkü şekil 2.8’de gösterildiği gibi $nSTG_2$ ve $nSTG_3$ değerleri sırasıyla K–1 ve S–K adet slottan oluşur. STG_2 ve STG_3 slot sayılarını belirlemesinin yanında cihaz keşfi başarısı da K değerinin doğru seçilmesine bağlıdır. Eğer K çok küçük bir değer olursa, $nSTG_2$ değeri küçük $nSTG_3$ değeri büyük olacaktır. Bu durumda, STG_1 ’de RUE’ler tarafından STG_2 slot indeksleri için seçilen dizilerin aynı diziler olma olasılıkları yüksek olur. Bu ise keşif başarısını düşürür. Diğer taraftan, K değeri çok büyük bir değer olursa STG_2 ’de IoT D’ler tarafından STG_3 slot indeksleri için seçilen dizilerin aynı diziler olma olasılıkları yüksek olur ve keşif başarısı düşer. K değerinin hesaplanırken STG_2 ve STG_3 arasında bir ödünleşim olduğu söylenebilir. En ideal K değeri aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$K = 1 + \underset{i \in [1, S-2]}{argmax} (P_i^2 \times P_i^3) \quad 2.8$$

Yukarıdaki formülde i parametresi $[1, S-2]$ arasındaki değerlerden birini ifade eder. Aynı zamanda, i parametresi $nSTG_2$ değerine eşittir. P_i^2 parametresi $IoT D_{avg}$ ’nin NBR_{avg}^{RUE} komşularından en az bir tanesinin $IoT D_{avg}$ ’nin diğer komşularından farklı bir STG_2 dizisi seçme olasılığını ifade eder. P_i^3 parametresi ise $IoT D_{avg}$ ’nin STG_2 ’de RUE komşuları için seçeceği dizilerden en az bir tanesinin $NBR_{avg}^{IoT D}$ cihazları tarafından seçilmemiş olması olasılığını ifade eder. P_i^2 ve P_i^3 olasılıklarının çarpımının maksimum olduğu noktadaki i değeri STG_2 ’nin optimum slot sayısını (K–1) ifade eder.



a) $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerinin $nNBR_{avg}^{RUE}$ değerinden büyük olduğu durumdaki K değeri



b) $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerinin $nNBR_{avg}^{RUE}$ değerinden küçük olduğu durumdaki K değeri

Şekil 2.11. P_i^2 , P_i^3 ve $P_i^2 \times P_i^3$ gösterimleri

Şekil 2.11.a'da gösterildiği gibi, $nNBR_{avg}^{RUE}$ değeri 5, $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değeri 15 ve $S=20$ olduğunda, K'nın optimum değeri 6 olarak hesaplanır çünkü $i=5$ iken $P_i^2 \times P_i^3$ maksimum değerine ulaşır. Şekil 2.11.b'deki gösterimde $nNBR_{avg}^{RUE}$ değeri 15, $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değeri 5

olduğunda, K 'nın optimum değeri 9 ve $nSTG_2=8$ olarak hesaplanır çünkü $i=8$ iken $P_i^2 \times P_i^3$ maksimum değerine ulaşır.

Şekil 2.11'dan anlaşıldığı üzere, $nNBR_{avg}^{IoT D}$ değeri $nNBR_{avg}^{RUE}$ 'den büyük olduğunda STG_2 ile kıyaslandığında STG_3 'te daha fazla slot vardır ($nSTG_3 > nSTG_2$). Ancak, $nNBR_{avg}^{RUE}$ değeri $nNBR_{avg}^{IoT D}$ 'den büyük olduğunda $nSTG_3$ yine $nSTG_2$ 'den büyüktür. Bunun nedeni $nSTG_2$ sadece $nNBR_{avg}^{RUE}$ değerine bağlıyken $nSTG_3$ değeri hem $nNBR_{avg}^{RUE}$ hem de $nNBR_{avg}^{IoT D}$ değerlerine bağlıdır. P_i^2 ve P_i^3 olasılıklarının hesaplanmasında bu bağımlılık görülecektir. P_i^2 olasılığı aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$P_i^2 = 1 - \frac{nNotDiscS_i^2}{nAllS_i^2} \quad 2.9$$

Formül 2.9'daki $nAllS_i^2$ parametresi $nSTG_2$ değeri i olduğunda NBR_{avg}^{RUE} cihazlarının STG_1 'de STG_2 için seçebilecekleri dizilerin bütün olası durumlarının sayısını ifade eder. $nNotDiscS_i^2$ parametresi ise NBR_{avg}^{RUE} cihazlarının STG_2 için seçecekleri dizilerden hiçbirinin diğerlerinden farklı olmadığı durumların sayısını ifade eder. Eğer hiçbir NBR_{avg}^{RUE} cihazı diğer NBR_{avg}^{RUE} cihazlarından farklı bir dizi seçmediyse, bütün cihaz keşfi girişimleri başarısızlıkla sonuçlanır. Böylece, STG_1 'de en az bir NBR_{avg}^{RUE} cihazının diğerlerinden farklı bir dizi seçme olasılığı, NBR_{avg}^{RUE} cihazlarının hiçbirinin diğerlerinden farklı bir slot seçmemesi olasılığının 1'den çıkarılmasıyla elde edilir. Tüm durumları ifade eden $nAllS_i^2$ parametresi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$nAllS_i^2 = \sum_{a=0}^{nIP^R-1} GAlt(IP_a^R, nNBR_{avg}^{RUE}) \times SAlt(IP_a^R, i) \quad 2.10$$

Formül 2.10, NBR_{avg}^{RUE} cihazların i ($nSTG_2$) adet diziden kaç farklı grup ile kaç farklı şekilde seçim yapabileceklerini hesaplamak içindir. IP^R parametresi $nNBR_{avg}^{RUE}$ sayısının tamsayı bölümünü (Integer Partition) temsil eder. Tam sayı bölümü sayı teorisinde kullanılan ve bir tamsayıyı pozitif tam sayıların toplamı türünden gösteren bir yöntemdir [116].

Formül 2.11’de $nCIP_a^R$ parametresi IP_a^R ’nin sütun sayısını ifade eder; $nCIP_0^R=1$, $nCIP_1^R=2$, $nCIP_2^R=2$, $nCIP_3^R=3$, $nCIP_4^R=4$. $IP_{a,b}^R$ parametresi ise IP_a^R satırının b numaralı sütunundaki değeri ifade eder.

Formül 2.11’da yer alan $nRptIP_a^R$ parametresi IP_a^R kümesindeki tam sayılar içerisinde birden büyük olan ve tekrar eden değerlerin sayısıdır. $RptIP_{a,b}^R$ parametresi ise IP_a^R ’de tekrar eden değerlerin kaç defa tekrar ettiğini tutar. Yukarıdaki örneği dikkate alırsak, yalnızca IP_2^R kümesinde birden büyük olan iki değeri iki defa tekrar etmiştir. IP_2^R içerisinde birden büyük sadece bir tane tekrar eden sayı olduğu için $nRptIP_2^R = 1$, $RptIP_{2,0}^R = 2$ olarak hesaplanır. Eğer $IP_a^R = \{4, 4, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 1, 1\}$ olsaydı, birden büyük tekrar eden üç sayı (4, 3, 2) olduğu için $nRptIP_a^R = 3$ olurdu. $RptIP_{a,0}^R = 2$ ’dir çünkü dört değeri iki defa tekrar etmiştir. Aynı şekilde, üç değeri dört defa tekrar ettiği için $RptIP_{a,1}^R = 4$ ve son olarak iki değeri üç defa tekrar ettiği için $RptIP_{a,2}^R = 3$ olarak hesaplanır. Eğer IP_a^R kümesinde değeri birden büyük olan ve tekrar eden sayı yoksa, $nRptIP_a^R$ değeri sıfır ve formül 2.10’un paydasının değeri faktöriyelden dolayı bir olarak kabul edilir.

SAlt, GAlt ile hesaplanan cihaz gruplarının belirli bir sayıdaki dizilerden kaç farklı şekilde seçim yapabileceğini hesaplayan bir fonksiyondur. SAlt fonksiyonu iki parametre bekler, bunlar cihazların gruplanma alternatiflerini gösteren bir IP satırı ve $nSTG_2$ ve $nSTG_3$ gibi grupların seçebilecekleri toplam dizi sayısıdır. SAlt fonksiyonunu tanımlayan formül aşağıdaki gibidir.

$$SAlt(IP_a, i) = \prod_{b=0}^{nCIP_a-1} \binom{i-b}{1} \quad 2.12$$

Formül 2.12’de $nCIP_a$ parametresi IP_a ’nın sütun sayısını ifade ederken, $\binom{i-b}{1}$ kısmı IP_a kümesindeki grupların i adet dizi içerisinde muhtemel seçebileceği dizilerin sayısını ifade eder. Eğer $i=nSTG_2=10$ ve $IP_a^R = \{3, 1\}$ ise, üç RUE cihazının seçeceği dizi 10 adet diziden $\binom{10}{1} = 10$ farklı ihtimal ile, diğer RUE cihazının seçeceği dizi ise $\binom{9}{1} = 9$ farklı ihtimal ile seçilebilir.

$nAllS_1^2$ parametresinin değeri formül 2.10 ile hesaplanabildiği gibi $i^{nNBR_{avg}^{RUE}}$ olarak da hesaplanabilir. Ancak, IP yöntemine aşinalık olması amacıyla formül 2.10’daki şekliyle gösterilmiştir çünkü $nNotDiscS_1^2$ değerinin hesaplanmasında IP yönteminin farklı bir formu kullanılacaktır. Formül 2.10 ve $i^{nNBR_{avg}^{RUE}}$ aynı sonuçları veren farklı yöntemlerdir. Örneğin, $K = 5$ ($i = 4$) ve $nNBR_{avg}^{RUE} = 2$ olduğunda, $nAllS_1^2 = 4^2 = 16$ olarak da bulunabilir.

IP_a^R kümesi 1 tam sayısını içeriyorsa, 1 sayısının tekrar etme sıklığı kadar NBR_{avg}^{RUE} cihazı, STG_2 dizileri içerisinde diğer RUE'ler tarafından seçilmemiş bir dizi seçtiği anlamına gelir. Ancak, eğer IP_a^R kümesinde bir değeri yoksa, NBR_{avg}^{RUE} cihazların tamamının keşif girişimleri başarısız olacaktır. Örneğin, yukarıdaki örnekte, $IP_1^R = \{3, 1\}$ olduğu için, dört NBR_{avg}^{RUE} cihazından üç tanesi aynı diziyi diğer RUE ise farklı bir dizi seçmiştir. IP_1^R 'de 1 tamsayısı bir defa tekrar ettiği için STG_1 'de başarılı dizi seçen sadece tek bir RUE cihazıdır. Diğer üç cihazın keşif girişimleri başarısızlıkla sonuçlanacaktır. Bundan dolayı, birinci aşamada seçilen dizilerden dolayı tamamının başarısız olduğu keşif girişimlerinin sayısını bulabilmek için ve $nNotDiscS_i^2$ değerini hesaplayabilmek için IP kümesinde bir değerinin olmadığı kümelerle odaklanıyoruz. STG_2 için seçilen başarısız dizi seçimlerinin sayısı aşağıdaki gibidir:

$$nNotDiscS_i^2 = \sum_{a=0}^{nIPNo1^R-1} GAlt(IPNo1_a^R, nNBR_{avg}^{RUE}) \times SAlt(IPNo1_a^R, i) \quad 2.13$$

Yukarıdaki formülde geçen $IPNo1^R$ ifadesi $nNBR_{avg}^{RUE}$ sayısının tamsayı bölümü olan IP^R 'nin alt kümesidir. $IPNo1^R$, IP^R kümeleri içerisinde 1 tam sayısını içermeyen kümeleri kapsar. Yukarıdaki paragrafta açıklandığı üzere, $nNotDiscS_i^2$ değerini hesaplariken içerisinde 1 tam sayısını içermeyen kümelerle odaklanıyoruz. Şekil 2.12'de verilen aynı örnek üzerinden açıklarsak, $nNBR_{avg}^{RUE} = 4$ olduğunda, $nIP^R = 5$ ve $IP_0^R = \{4\}$, $IP_1^R = \{3, 1\}$, $IP_2^R = \{2, 2\}$, $IP_3^R = \{2, 1, 1\}$, $IP_4^R = \{1, 1, 1, 1\}$ olarak gösterilir. 1 tam sayısını içermeyen küme elemanları iki tane olduğundan $nIPNo1^R = 2$ ve $IPNo1_0^R = \{4\}$, $IPNo1_1^R = \{2, 2\}$ olarak belirlenir. $nCIPNo1_a^R$ parametresi $IPNo1_a^R$ kümesindeki toplam sütun sayısını ifade eder. Örneğin, $nCIPNo1_0^R = 1$, $nCIPNo1_1^R = 2$ 'dir. $nRptIPNo1_a^R$ parametresi ise $IPNo1_a^R$ kümesindeki birden büyük olan ve tekrar eden sayı adedidir. Örneğin, $nRptIPNo1_0^R = 0$ 'dır çünkü $IPNo1_0^R$ 'de birden büyük tekrar eden sayı yoktur. $nRptIPNo1_1^R = 1$ 'dir çünkü $IPNo1_1^R$ 'de birden büyük tekrar eden sadece tek bir sayı vardır ve ikidir. Bundan dolayı $RptIPNo1_{1,0}^R = 2$ 'dir çünkü iki değeri iki defa tekrar etmektedir.

Formül 2.13'te yer alan $GAlt$ fonksiyonu ile $IPNo1_a^R$ kümesindeki grupların i adet STG_2 dizisi içerisinde kaç farklı seçim yapabileceği hesaplanırken, $SAlt$ fonksiyonu ile bu grupların verilen dizi sınırları içerisinde kaç farklı seçim yapabileceği hesaplanır. $IPNo1$ 'in

tek bir satırı ile örnek vermek gerekirse; eğer $nSTG_2 = 15$ ve $IPNo1_a^R = \{2, 2\}$ olduğunda, oluşturulabilecek grup sayısı $\frac{\binom{4}{2}\binom{2}{2}}{2!} = 3$ olarak hesaplanır. Ayrıca, iki RUE cihazının seçeceği dizi 15 adet diziden $\binom{15}{1} = 15$ farklı ihtimal ile, diğer iki RUE cihazının seçeceği dizi ise $\binom{14}{1} = 14$ farklı ihtimal ile seçilebilir ve toplam $\binom{15}{1}\binom{14}{1} = 210$ olarak bulunur.

STG₁'de RUE'ler tarafından yapılan dizi seçimlerinin olasılık hesapları buraya kadardır. Şekil 2.11'da gösterildiği gibi STG₁'deki dizi seçimleri sadece $nNBR_{avg}^{RUE}$ sayısına bağlıyken STG₂'deki dizi seçimleri hem $nNBR_{avg}^{RUE}$ değerine hem de $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerine bağlıdır. Bundan dolayı, P_i^2 olasılığının hesaplanması daha basit iken P_i^3 olasılık hesabı daha karmaşıktır. STG₂'de IoTD'ler tarafından yapılan dizi seçimlerinin olasılık hesapları ise aşağıdaki gibidir:

$$P_i^3 = 1 - \frac{nNotDiscS_i^3}{nAllS_i^3} \quad 2.14$$

Yukarıdaki formülde $nAllS_i^3$ parametresi STG₂'de $IoTD_{avg}$ ve NBR_{avg}^{IoTD} cihazları tarafından STG₃ dizileri için yapılan bütün olası seçimlerin sayısını ifade eder. $nNotDiscS_i^3$ parametresi ise $IoTD_{avg}$ cihazının STG₃'te komşuluğunda bulunan NBR_{avg}^{RUE} cihazlarından hiçbirini keşfedemediği durumların sayısını ifade eder. $IoTD_{avg}$ cihazı STG₂'de haberleşme menziline bulunan RUE cihazı sayısı olan $nNBR_{avg}^{RUE}$ kadar farklı STG₃ dizisi seçmelidir. $IoTD_{avg}$ tarafından gerçekleştirilen keşif girişimlerinin tamamının başarısız olması için $IoTD_{avg}$ cihazının STG₃ için seçtiği dizilerin tamamı NBR_{avg}^{IoTD} cihazları tarafından seçilmiş olmalıdır.

Şekil 2.10'da gösterilen ağ parçası üzerinden örneklendirmek gerekirse, $IoTD_1$ cihazına girişimde bulunabilecek cihazların sayısı ($nNBR_{IoTD_1}^{IoTD}$) üçtür ve bu cihazlar $NBR_{IoTD_1}^{IoTD} = \{IoTD_2, IoTD_3, IoTD_4\}$ şeklindedir çünkü bu cihazlar $IoTD_1$ ile ortak RUE komşularına sahiptirler (RUE_1, RUE_2). $IoTD_1$ cihazının RUE_1 ve RUE_2 cihazlarına göndermek için $Seq_{u_2}^{28}$ ve $Seq_{u_2}^{42}$ STG₃ dizilerini seçtiğini varsayalım. Eğer $Seq_{u_2}^{28}$ ve $Seq_{u_2}^{42}$ dizilerinin ikisi de aynı zamanda $IoTD_2, IoTD_3$ veya $IoTD_4$ cihazlarının biri veya birkaçı tarafından da seçildiyse, $IoTD_1$ cihazı RUE_1 ve RUE_2 komşularını keşfedemez. Biz de formül 2.12'de belirtilen $nNotDiscS_i^3$ sayısını hesaplayabilmek için hiçbir RUE'nin keşfedilemediği durumların sayısına odaklanıyoruz. Böylece STG₃'te en az bir RUE'nin

keşfedilme olasılığını hesaplarız. $IoTD_{avg}$ ve NBR_{avg}^{RUE} cihazları tarafından yapılacak bütün seçimlerin sayısını ifade eden $nAllS_i^3$ aşağıdaki gibidir:

$$nAllS_i^3 = (S - i - 1)^{nNBR_{avg}^{RUE} + nNBR_{avg}^{IoTD}} \quad 2.15$$

İkinci aşamadaki slot sayısını ($nSTG_2$) i parametresi ifade ettiği için, STG_3 için kalan slot sayısı $nSTG_3 = (S - i - 1)$ olur. Bütün seçim ihtimalleri göz önünde bulundurulduğunda, $IoTD_{avg}$ 'nin seçebileceği $nNBR_{avg}^{RUE}$ adet dizi ve NBR_{avg}^{IoTD} cihazlarının seçebilecekleri $nNBR_{avg}^{IoTD}$ adet dizi geri kalan $(S - i - 1)$ adet diziden herhangi biri olabilir. İkinci aşamanın anlatıldığı 2.2.2.2 bölümünde, $IoTD_{avg}$ cihazının STG_2 'de her NBR_{avg}^{RUE} komşusu için farklı bir dizi belirler kuralından bahsedilmişti. Ayrıca, $nSTG_3$ slot sayısı RUE komşular için yeterli değilse ($nSTG_3 < nNBR_{avg}^{RUE}$), $IoTD_{avg}$ tarafından $\min(nNBR_{avg}^{RUE}, (S - i - 1))$ adet slot seçilebilir denilmişti. Ancak, $nAllS_i^3$ ve $nNotDisc_i^3$ değerleri hesaplanırken bu iki kural göz ardı edilmiştir çünkü bu kısımda sınırlı ve var olan değerlerle olasılık hesabı yapmaya çalışıyoruz. Bu iki kural uygulandığında STG_3 'teki slot sayısı az olduğu halde her zaman yeterli olacak ve doğru olasılık değerlerine ulaşamayacağız.

$IoTD_{avg}$ seçimlerinin tamamını seçerek girişim oluşturabilecek $nNBR_{avg}^{IoTD}$ adet cihaz vardır. $IoTD_{avg}$ cihazının bütün keşif girişimlerinin başarısız olduğu durum sayısı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} nNotDiscS_i^3 &= \sum_{a=0}^{nIP^I-1} \sum_{b=0}^{nIP^R-1} GAlt(IP_a^I, nNBR_{avg}^{IoTD}) \times GAlt(IP_b^R, nNBR_{avg}^{RUE}) \times \\ &\quad nOnesIP_b^R! \times \left(\frac{nCIP_a^I}{nOnesIP_b^R} \right) \times \\ &\quad SAlt(IP_a^I, S - i - 1 - nOnesIP_b^R) \times \\ &\quad SAlt(IP_b^R, S - i - 1) \end{aligned} \quad 2.16$$

Bu formülde yer alan IP^I ve IP^R parametreleri sırasıyla $nNBR_{avg}^{IoTD}$ ve $nNBR_{avg}^{RUE}$ sayılarının tamsayı bölümlerini, nIP^I ve nIP^R ise IP^I ve IP^R parametrelerinin toplam küme sayılarını ifade eder. Şekil 2.12'de örnekleri gösterildiği gibi, $nOnesIP_b^R$ parametresi IP_b^R satırında tekrar eden 1 değerinin sayısını ifade eder. Formülün $GAlt(IP_a^I, nNBR_{avg}^{IoTD})$ ve $GAlt(IP_b^R, nNBR_{avg}^{RUE})$ parçaları sırasıyla NBR_{avg}^{IoTD} ve NBR_{avg}^{RUE} cihazlarının

oluşturabilecekleri grup alternatiflerinin sayısını ifade eder. $Alt(IP_b^R, S - i - 1)$ kısmı ise $IoTD_{avg}$ cihazının $S-i-1$ dizi içerisinde seçebileceği dizi alternatiflerinin sayısını ifade eder çünkü üçüncü aşamada seçilebilecek slot sayısı $S-i-1$ kadardır. Örneğin, oluşturulan grup $\{2, 1\}$ ise toplamda iki farklı dizi seçilecek demektir ve toplam seçim alternatif sayısı $\binom{S-i-1}{1}\binom{S-i-2}{1}$ olarak hesaplanabilir. Ancak, daha önce bahsedildiği gibi bu aşamada özel bir kural vardır. Bütün seçimlerin başarısız olduğu durumların sayısını bulmaya çalıştığımız için, $IoTD_{avg}$ 'nin seçtiği eşsiz dizilerin ($nOnesIP_b^R$ sayısı kadar) NBR_{avg}^{IoTD} 'ler tarafından da seçilmesi gerekir.

Formül 2.16'nın amacı, $IoTD_{avg}$ cihazının hiçbir röle komşusunu keşfedemeyeceği durumların sayısını bulmaktır. Böylece, bütün durumların sayısından çıkarıldığında $IoTD_{avg}$ cihazının üçüncü aşamada en az bir röle komşusunu keşfetme olasılığı elde edilmiş olacaktır. Örneğin, $IP_b^R = \{2, 1, 1\}$ ise ($nOnesIP_b^R=2$), $IoTD_{avg}$ cihazı üçüncü aşama dizilerinden iki tanesini diğerlerinden farklı belirleyerek iki röle komşusunu başarılı bir şekilde keşfedebilir. Amacımız $IoTD_{avg}$ 'nin hiçbir röle komşusunu keşfedemediği durumları bulmak olduğundan, biz bu iki dizinin NBR_{avg}^{IoTD} grupları tarafından da seçilerek girişim oluşturacağı ve röle keşfinin tamamen başarısız olacağı durumların sayısını bulmaya çalışıyoruz. Formülün $nOnesIP_b^R! \times \left(\frac{nCIP_a^I}{nOnesIP_b^R} \right)$ kısmı $IoTD_{avg}$ tarafından belirlenen eşsiz dizi sayısı kadar dizinin NBR_{avg}^{IoTD} grupları tarafından da (yani 1 sayısı kadar) seçilmesi durumlarının sayısını gösterir. Eşsiz diziler girişimde bulunan cihazlar tarafından da seçildikten sonra geride kalan NBR_{avg}^{IoTD} grupları $S-i-1-nOnesIP_b^R$ dizi içerisinde seçim yapabilirler.

Farz edelim ki, $IoTD_{avg}$ üç RUE komşusundan ikisi için STG_3 dizilerinden $Seq_{u_2}^{23}$, diğer RUE komşusu için $Seq_{u_2}^{41}$ dizisini seçmiş olsun. Bu seçimlerle $IoTD_{avg}$ δ_{23} ve δ_{41} 'de komşu RUE'leri keşfetmeyi planlamaktadır. Ancak $Seq_{u_2}^{23}$ dizisini iki RUE komşusu için belirlediğinden bu seçim başarısızdır ve iki RUE cihazını keşfedemeyecektir. Ancak, $Seq_{u_2}^{41}$ sadece tek bir RUE için belirlendiğinden bu seçim başarılıdır. Formül 2.16 ile amacımız bu başarılı seçimi girişimde bulunabilecek $IoTD$ cihazları ile (NBR_{avg}^{IoTD}) başarısız kılacak durumların sayısını bulmak olduğundan, IP_a^I gruplarından en az birinin $Seq_{u_2}^{41}$ dizisini seçmesi gerekir. Böylece formül 2.16 ile $IoTD_{avg}$ 'nin hiçbir RUE komşusunu keşfedemediği durumların sayısı hesaplanır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde, geliştirilen imza tabanlı ve enerji verimli röle cihaz keşfi protokolünün iki farklı senaryo için sayısal bulguları irdelenmekte ve sonuçları gösterilmektedir. Ayrıca, literatürde yer alan cihaz keşfi protokollerinin sayısal bulguları SERDP'in sonuçları ile karşılaştırılmakta ve değerlendirilmektedir. İki farklı test ortamı ve parametreleri ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının analiz ve karşılaştırmaları aşağıdaki beş başlık altında yapılacaktır.

i. Slot tabanlı cihaz keşfi protokollerinin birincil amacı en az slotta aktif olarak daha fazla cihazı keşfedebilmektir. Bir cihazın bir periyotluk zaman diliminde aktif olduğu slotların sayısı ne kadar fazla olursa cihazın enerji tüketimi de o derece fazla olur. Bölüm 2.1.1'de tanımlanan görev döngüsü (DC) terimi cihazların aktif slot oranlarını ifade eden önemli bir parametredir. Bundan dolayı, SERDP ve literatürdeki çalışmaların DC oranları karşılaştırılacak ve farklı CR, nRUE, nIoTD ve S değerlerinin DC üzerindeki etkileri tartışılacaktır.

ii. Bölüm 2.1.1'de tanımlanan cihaz keşfi başarı oranı (Successful Discovery – SD) bir diğer önemli parametredir. Komşuluğunda k adet cihaz bulunan ve z adedini keşfedebilen bir düğümün SD oranı z/k 'dır. Aynı şartlarda test edilen SERDP ve diğer protokollerin SD oranları karşılaştırılacak ve yorumlanacaktır. Düşük DC oranı ile yüksek SD oranı elde eden protokoller daha başarılı kabul edildiğinden protokollerin DC ve SD oranları birlikte analiz edilecektir. Ayrıca, SERDP'in farklı haberleşme menzili, nRUE, nIoTD ve S değerlerine göre SD oranlarındaki değişimi de gösterilecektir.

iii. SERDP ve literatürdeki diğer protokoller kullanan IoTD cihazlarının bir periyottaki ortalama güç tüketim sonuçları mili vat (mW) cinsinden gösterilecek ve karşılaştırılacaktır. Cihazların farklı CR, nRUE, nIoTD ve S değerlerine göre güç tüketimindeki farklılıklar yorumlanacaktır. Bilindiği gibi bir cihazın farklı radyo durumlarındaki (sleep, switching, receiverIdle, receiverBusy, receiverReceiving, transmitterIdle, transmitterTransmitting) güç tüketimleri farklıdır. Bundan dolayı, cihazların güç tüketimleri hesaplanırken kullanılan simülasyon çerçevesinin radyo güç tüketim modeli dikkate alınacaktır.

iv. SERDP ve diğer protokolleri kullanan IoTD'lerin bir periyottaki ortalama mesaj gönderim sayıları gösterilecek ve karşılaştırılacaktır. Ayrıca, farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için elde edilen sonuçlar kıyaslanarak analiz edilecektir.

v. Önerilen özgün periyot yapısının ikinci ve üçüncü aşamalarındaki slot sayıları protokolün performansını etkileyen önemli bir konudur. SERDP'in bir periyodundaki üç aşamanın optimum slot sayılarıyla bölünmesi için önerilen olasılık analizi Formül 2.8'de gösterilmiştir. Bu formül ile belirlenen ikinci ve üçüncü aşamanın slot sayılarıyla elde edilen SD performansı farklı nSTG₂ ve nSTG₃ değerleri ile elde edilen SD oranları ile karşılaştırılacaktır. Böylece, önerilen formülün doğruluğu ispat edilecektir.

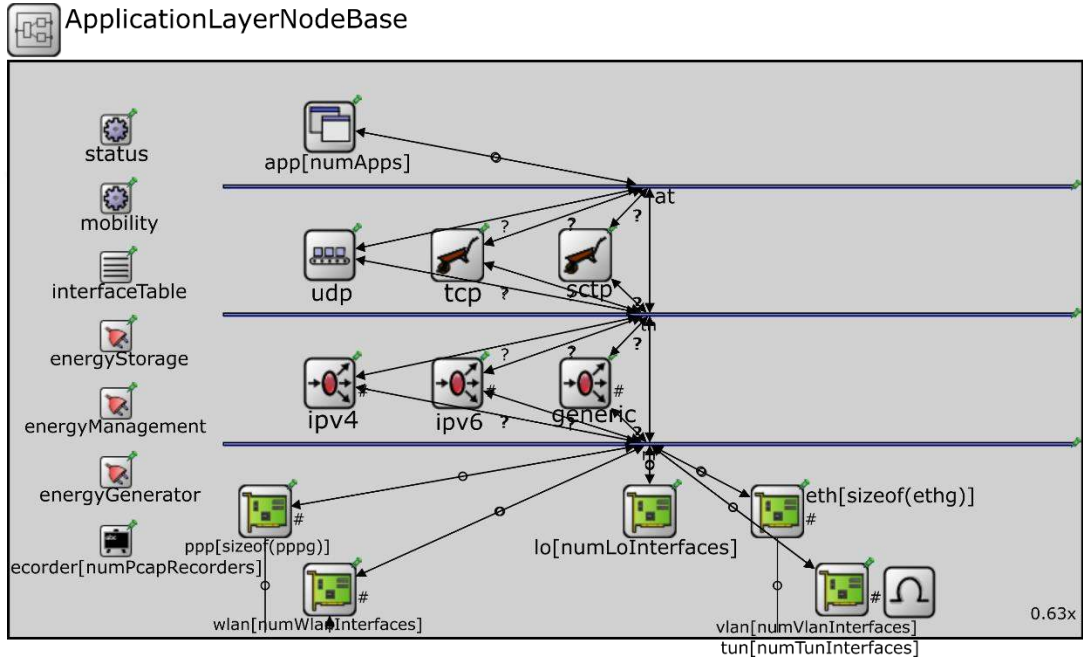
3.1. Simülasyon Ortamı

SERDP ve diğer cihaz keşfi protokollerinin sayısal bulguları ayırık olay tabanlı ve nesne yönelimli ağ simülasyon çerçevesi olan OMNeT++ ile elde edilmiştir. OMNeT++, ağ protokollerinin modellenmesinin yanında, kablolu ve kablosuz haberleşme ağlarının gerçekleşmesi, kuyruk ağların modellenmesi, çok işlemcili ve dağıtık donanım sistemlerinin modellenmesi, donanım mimarilerinin doğrulanması gibi amaçlar için de kullanılan bir ağ simülasyon ortamıdır [117]. OMNeT++ bir simülatör değildir ancak birçok sistem için simülasyon ortamları oluşturmayı sağlayan araçlar ve altyapı barındırır.

OMNeT++ ortamında basit ve bileşik modüllerin kullanılmasıyla sistemler, ağlar, cihazlar veya protokoller meydana getirilebilir. SERDP ve diğer protokollerdeki cihazlar INET [118] çerçevesi ile sunulan ApplicationLayerNodeBase [119] bileşik modülünün genişletilmesiyle üretilmiştir. Basit ve bileşik modüllerin genişletilmesiyle oluşturulan bu modülün katmanlı yapısı şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu modülü miras alarak oluşturulan cihazlar ağda IEEE 802.15.4 standardına göre oluşturulan wlan (wireless local area network) ağ ara yüzü ile haberleşirler.

Bu bölümde, SERDP ve literatürdeki beş cihaz keşfi protokolü farklı performans kriterleriyle kıyaslanacaktır. Bu çalışmalar RBTP, Hedis, Todis, SearchLight ve Disco protokolleridir. Karşılaştırma için bu protokollerin seçilmesinin nedenlerinden biri bu protokollerin de SERDP gibi slot ve periyot tabanlı zaman modelini kullanmalarıdır. Ayrıca, bu çalışmalardaki cihazlar tasarsız ağlar veya WSN'ler için önerilmiş protokoller olduğu için cihazların karakteristik yapıları ve özellikleri de SERDP ile uyumludur.

SERDP ve RBTP çalışmaları cihazların ağda senkron olduğu ağ modeli için geliştirilmiştir ancak diğer protokoller cihazların ağda asenkron olduğunu kabul etmiştir. SERDP ve RBTP dışındaki diğer çalışmalar simülasyonda asenkron olarak koşulmuş olsa da bu durum mesajların çakışması açısından bu çalışmalara avantaj sağlamıştır. Çünkü asenkron cihazlardaki periyot kaymaları cihazların farklı slotlarında aktif olmalarını ve mesajların çakışma ihtimalini azaltır.



Şekil 3.1. ApplicationLayerNodeBase bileşik modülü [119].

Literatürdeki protokoller bölüm 2.1’de detaylandırılan sistem modelinde simüle edilmiştir. Bu modele göre, ağda belirli sayıda IoTD ve RUE cihazları bulunmakta ve IoTD’lerin bu protokolleri kullanarak haberleşme menziline bulunan RUE’leri keşfetmeleri beklenmektedir. Sistem modelinde belirtilen keşif kanalı SERDP için yarı çift yönlü bir kanal olsa da bu kanal türü diğer protokoller için uygun değildir. Bundan dolayı, diğer yöntemler tam çift yönlü kanalda simüle edilmiştir. Bütün protokollerde ortak olduğu için simülasyonlarda sürekli zaman periyot ve slotlara bölünmüştür. Ayrıca, bir slotun zaman miktarını gösteren λ değeri her protokolün mesajlarını göndermesine ve almasına yetecek şekilde belirlenmiştir.

Performans metriklerinin (DC oranı, SD oranı, ortalama güç tüketimi, gönderilen ortalama mesaj sayısı) simülasyonları iki farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Birinci

senaryoda SERDP'in sayısal bulguları diğer çalışmaların sayısal bulguları ile kıyaslanırken, ikinci senaryoda SERDP'in farklı parametrelere göre performans değişimlerinin gösterimi amaçlanmıştır. Senaryo bir ve ikinin parametre değerleri aşağıdaki tablolarda sırasıyla gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Senaryo #1 parametre değerleri

Parametre	Değeri
Ağ Alanı	100m × 100m
Haberleşme Menzili	50 m
Komşu Cihaz Tespit Periyodu	100 ms
nRUE	10
nIoTD	10
S	[0,1300]
Cihaz Hızı	1 mps
Mobilite Modeli	Random Waypoint

Senaryo #1 için belirlenen ve bütün protokoller için ortak olan simülasyon parametreleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Bu senaryoda simülasyon ağ alanı 100m × 100m olarak belirlenmiş ve ağda 10 RUE ve 10 IoTD cihazı bulunmaktadır. Bu senaryodaki cihaz oranı kilometre karede 2000 cihazdır hücrel ağlar için yeterlidir. Cihazların ağ alandaki ilk konumları (x,y) $X_{\min} = 0m$, $X_{\max} = 100m$ arasından ve $Y_{\min} = 0m$, $Y_{\max} = 100m$ arasından uniform olarak belirlenir. Cihazlar ağda Random Waypoint mobilite modeline göre saniyede bir metre hızla hareket ederler. RUE ve IoTD'lerin haberleşme menzilleri eşit ve 50 metredir. Bunun yanında, Senaryo #1 simülasyonları 0 ile 1300 arasındaki farklı S değerleri için koşulmuştur.

Senaryo #1 için gerçekleştirilen simülasyonlarda, SERDP $S = \{20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280\}$ değerleri için test edilmiştir. Bu simülasyonlarda $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoTD}$ parametreleri 2.6 ve 2.7 formüllerine göre hesaplanmış ve sırasıyla 7 ve 9 değerleri elde edilmiştir. Formül 2.8'e göre, her bir S değeri için muhtemel K değerleri ve olasılıkları hesaplanmış ve en optimum K değerleri $\{7, 14, 28, 57, 117, 239, 483\}$ şeklinde belirlenmiştir.

Senaryo #2 için belirlenen simülasyon parametreleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Senaryo #2 simülasyonları $S = \{20, 40, 80\}$, $nRUE$ ve $nIoTD = \{10, 50, 100\}$ ve $CR = \{50m, 100m\}$ değerleri için koşulmuştur. Cihazların ağ alandaki ilk konumları (x,y) $X_{min} = 0m$, $X_{max} = 1000m$ arasından ve $Y_{min} = 0m$, $Y_{max} = 500m$ arasından uniform olarak belirlenir. RUE ve IoTD’ler $1000 \times 500 m^2$ alanında Random Waypoint mobilite modeline göre hareket etmektedirler.

Tablo 3.2. Senaryo #2 parametre değerleri

Parametre	Değeri
Ağ Alanı	$1000m \times 500m$
Haberleşme Menzili	$\{50 m, 100m\}$
Komşu Cihaz Tespit Periyodu	100 ms
$nRUE$	$\{10, 50, 100\}$
$nIoTD$	$\{10, 50, 100\}$
S	$\{20, 40, 80\}$
Cihaz Hızı	1 mps
Mobilite Modeli	Random Waypoint

Senaryo #2 için yapılan simülasyonlarda $CR = \{50m, 100m\}$ için $nNBR_{avg}^{RUE}$, $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerleri ve $S = \{20, 40, 80\}$ için optimum K değerleri Tablo 3.3’te gösterilmiştir. Örneğin, bu tabloya göre, ağdaki röle cihaz sayısı $nRUE = 50$, IoTD sayısı $nIoTD = 50$ ve $CR = 100m$ olduğunda, $S = \{20, 40, 80\}$ için optimum K değerleri sırasıyla 7, 14, 27 olarak gösterilmiştir.

Optimum K değerleri eşitlik 2.8’e göre hesaplanmıştır. P_t^2 olasılık değeri sadece $nNBR_{avg}^{RUE}$ parametresine bağlıken, P_t^3 değeri $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoTD}$ parametrelerine bağlıdır. Bundan dolayı, ağdaki IoTD sayısı arttığında optimum K değeri genellikle düşerken, $nNBR_{avg}^{RUE}$ arttığında optimum K değeri genellikle artar. Ancak, K parametresinin artış ve azalış değerleri $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerleriyle orantısal değildir.

Tablo 3.3 incelendiğinde CR değerindeki artış düğümlerin komşuluğunda bulunan cihaz sayısını artıracak için cihazlar arasındaki rekabeti de artırır. Örnek olarak, Tablo 3.3.a’da CR değeri 50m iken $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerleri sırasıyla 4 ve 6 olarak

hesaplanmıştır. Ancak Tablo 3.3.b’de CR değeri 100m olduğunda $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoTD}$ değerleri sırasıyla 7 ve 17 değerine çıkmıştır. Bu artış cihazlar arasındaki rekabeti artıracığından cihazların keşif performanslarını olumsuz yönde etkiler.

Tablo 3.3. $nNBR_{avg}^{RUE}$, $nNBR_{avg}^{IoTD}$, CR ve optimum K değerleri

	nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100
nRUE =	$nNBR_{avg}^{RUE} = 2$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 2$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 2$
10	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 2$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 2$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 3$
	K=10,20,40	K=10,20,40	K=9,19,38
nRUE =	$nNBR_{avg}^{RUE} = 3$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 3$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 3$
50	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 2$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 3$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 4$
	K=8,15,28	K=7,14,26	K=7,13,25
nRUE =	$nNBR_{avg}^{RUE} = 4$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 4$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 4$
100	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 2$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 4$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 6$
	K=10,19,39	K=8,17,36	K=8,16,33
a) CR = 50m.			
	nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100
nRUE =	$nNBR_{avg}^{RUE} = 3$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 3$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 3$
10	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 3$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 4$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 5$
	K=7,14,26	K=7,13,25	K=6,12,23
nRUE =	$nNBR_{avg}^{RUE} = 5$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 5$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 5$
50	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 4$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 7$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 13$
	K=8,16,31	K=7,14,27	K=6,11,22
nRUE =	$nNBR_{avg}^{RUE} = 7$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 7$	$nNBR_{avg}^{RUE} = 7$
100	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 4$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 8$	$nNBR_{avg}^{IoTD} = 17$
	K=9,17,34	K=8,15,29	K=6,11,23
b) CR = 100m.			

Simülasyonlardan en doğru sonucu almak ve simülasyon hatalarını en aza indirmek amacıyla her simülasyon seti bir simülasyon saati boyunca koşulmuştur. Bu ise her bir cihazın simülasyon boyunca ağ alanında 3600 metre yer değiştirmiş olması anlamına gelir.

S parametresi bir periyottaki slot sayısını ifade ettiği için aynı zamanda keşif gecikmesini de ifade eder.

3.2. Görev Döngüsü Oranlarının Karşılaştırılması

Görev Döngüsü (DC), sistem modelde tanımlandığı üzere cihazın bir periyot boyunca aktif olduğu slot sayısının periyottaki tüm slot sayısına bölünmesiyle elde edilir. Bu bölümde Senaryo #1 ortamında test edilen SERDP ve diğer protokollerin sayısal DC bulguları ve Senaryo #2 ortamlarında farklı S, CR, nRUE ve nIoTD parametreleri ile test edilen SERDP'in sayısal DC bulguları gösterilecek ve yorumlanacaktır.

3.2.1. Senaryo #1

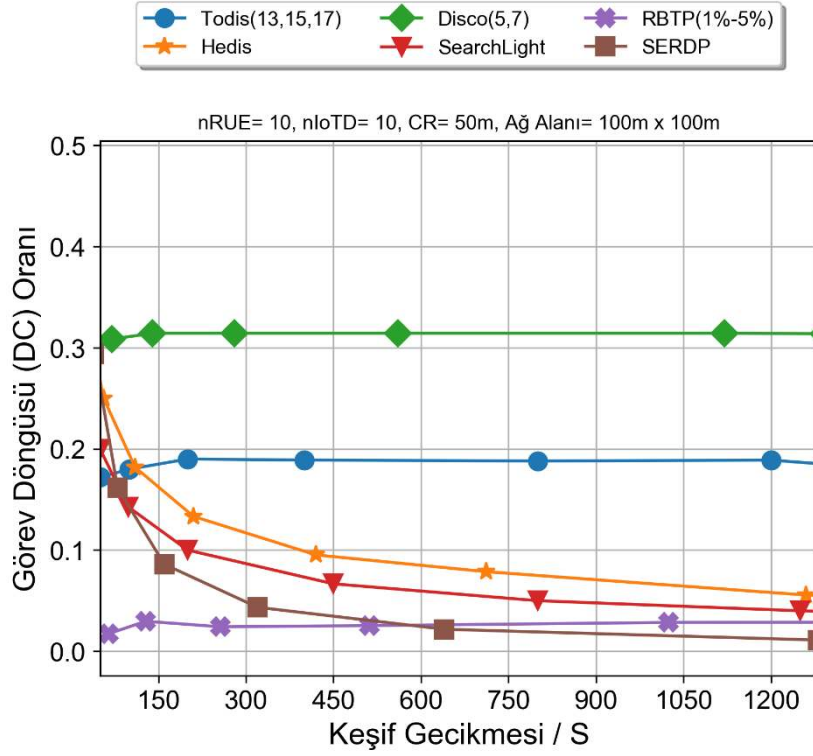
Bazı çalışmalarda DC oranı önceden belirlenebilirken, bazı protokoller bu esnekliğe sahip değildir. Örneğin, RBTP'de DC oranı önceden belirlenir ancak diğer protokollerde DC oranı protokolün kurallarına göre oluşur ve bu oran değiştirilemez. SERDP'de IoTD'nin aktif olması gereken slot sayısı IoTD tarafından belirlenebilir veya kısıtlanabilir. Ancak, eşit ve adil kıyaslama için SERDP yöntemi hiçbir kısıtlama yapılmadan (IoTD'nin haberleşme menzilineki bütün RUE'leri keşfedecek şekilde) simüle edilmiştir.

DC oranları kıyaslanırken diğer protokollerin aksine RBTP'nin DC oranı önceden belirlenmiş ve bu oran %1 ile %5 arasında uniform olarak seçilmiştir. RBTP dışındaki diğer protokollerin DC oranları protokolün kurallarına göre periyot sonunda elde edilmektedir. Disco protokolü 5 ve 7 asal sayıları ile test edilirken, Todis 13, 15 ve 17 aralarında asal sayıları ile test edilmiştir. Belirlenen bu sayılar Disco ve Todis'in DC oran performansını etkileyebilir ancak DC oranları bir sonraki bölümde elde edilen SD oranlarını da göz önünde bulundurarak değerlendirilmelidir.

SERDP için λ değeri 2 milisaniye olarak belirlenmiştir çünkü SERDP ile gönderilen sinyallerin boyutu küçüktür ve bu sinyallerin gönderiminde kanal kodlama ve kanal tahmini gerekmez. Diğer protokollerin λ değerleri farklı olsa da bu protokollerde mesaj gönderimi ve alımı için yeterli olan süre belirlenmiştir. DC oranlarının kıyaslaması yapılırken λ değeri değil, aktif olunan slot sayıları göz önünde bulundurulmuştur.

Protokollerin farklı S değerleri ile elde edilen DC oranları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Disco protokolünü kullanan cihazlar periyottaki slot indekslerinin 5 ve 7’nin katları olduğu slotlarda aktif olur. Todis protokolünde ise cihazlar aralarında asal 13, 15 ve 17 katı olan slot indekslerinde aktif olurlar. Bundan dolayı, Şekil 3.2’den görüldüğü gibi, DC oranı en fazla olan protokoller sırasıyla Disco ve Todis’tir.

Bölüm 1.4.1.3’de gösterildiği gibi, U-Connect protokolü ile cihaz keşfi deneyen cihazlar n satır ve n sütundan oluşan bir periyotta ilk $(n+1)/2$ slotta ve slot indeksi n değerinin katı olan slotlarda uyanırlar. Benzer şekilde, Hedis protokolü $n \times (n-1)$ adet slottan oluşan bir periyotta cihazların $n \times i$ ve $(n+1) \times i + 1$ ($i=0, 1, \dots, n-2$) slotlarında aktif olmalarını öngörür.



Şekil 3.2. SERDP ve diğer protokollerin farklı S değerleri için DC oranları

Disco, Todis ve RBTP protokolleri aktif slot sayılarını orantısal olarak belirlediklerinden bu protokollerin DC oranları farklı S değerleri için sabittir. Ancak, Hedis, SearchLight ve SERDP protokollerinde aktif slot sayıları S değerine orantısal olarak bağlı olmadığından, S değerinin artmasıyla bu protokollerin DC oranları azalmıştır.

Geliştirilen protokolün DC oranı Hedis, Todis, SearchLight ve Disco çalışmalarının DC oranlarından daha azdır. S değerinin 600'den büyük olduğu durumlarda ise DC oranı RBTP çalışmasının DC oranından azdır.

SERDP protokolünde, S değeri artsa da bir periyottaki aktif slot sayısı neredeyse sabittir. SERDP protokolü ile IoTD'ler gerekmeyen slotlarda aktif olmak zorunda değildirler çünkü komşu RUE'lerin periyodun hangi slotlarında aktif olacakları STG₂'de IoTD'ler tarafından belirlenmiştir. SERDP protokolünün DC oranı IoTD'nin komşuluğunda bulunan RUE cihazlarının sayısına bağlıdır. Bundan dolayı Şekil 3.2'de gösterildiği gibi SERDP diğer protokollere kıyasla daha fazla enerji verimlidir.

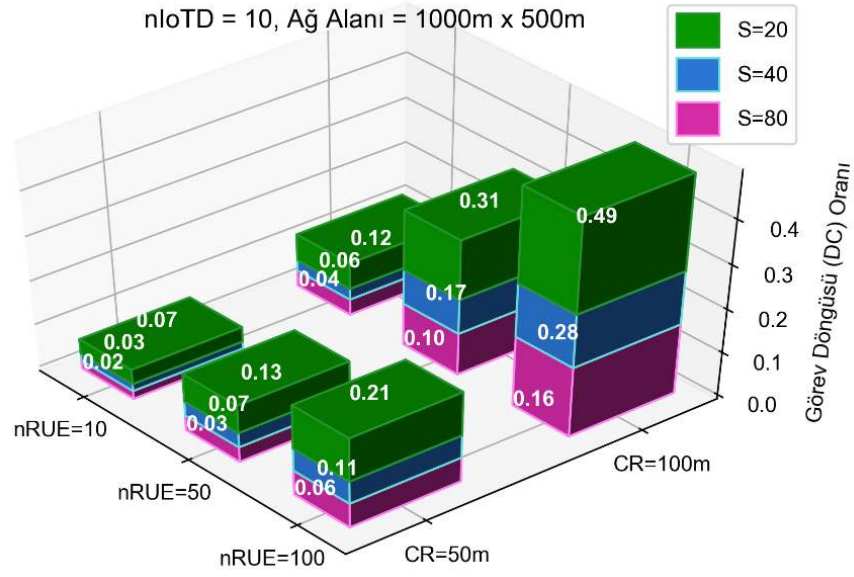
RBTP'nin DC oranı bir noktaya kadar SERDP'den düşüktür ancak DC oranı tek başına bir anlam ifade etmez. Protokollerin başarısı daha az DC değeriyle daha yüksek SD oranı yakalayabilmektir. Bundan dolayı, bir sonraki bölümde gösterilen SD performans değerlerinin DC oranlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerekir.

3.2.2. Senaryo #2

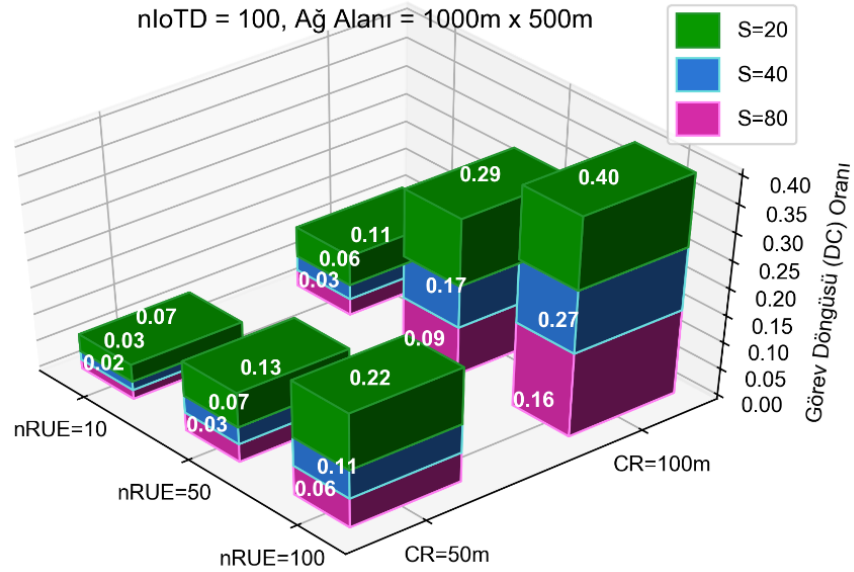
SERDP'in farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için DC oranı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Şekil 3.3.a nIoTD parametresinin 10 olduğu, Şekil 3.3.b ise nIoTD parametresinin 100 olduğu durumdaki DC oranlarını göstermektedir. Şekilden anlaşılaçağı üzere, nIoTD parametresinin farklı değerleri SERDP'in DC oranını etkilememektedir. Çünkü SERDP ile cihaz keşfi deneyen her bir IoTD haberleşme menzilinde bulunan RUE cihazlarını keşfetmeye odaklanmıştır. Ağdaki IoTD sayısının artması rekabeti artıracığı için SD oranını etkilese de IoTD'lerin DC oranını etkilememektedir. Bundan dolayı, nIoTD parametresinin 50 olduğu durumu göstermeye gerek duyulmamıştır.

Şekil 3.3'ten anlaşılaçağı üzere, S ve CR değerlerinin sabit olduğu durumlarda ağdaki RUE cihaz sayısının artması IoT cihazlarının DC oranını artırmıştır. Bölüm 2.2'de IoT cihazlarının aktif slotlarını nasıl belirlediğı detaylı olarak anlatılmıştır. Özetlemek gerekirse, birinci aşamada bütün IoTD'ler aktif duruma geçer ve komşu RUE cihazların gönderdiği sinyaller ile ikinci aşamada aktif olmaları gereken slot indekslerini algılar. İkinci ve üçüncü aşamadaki aktif slot sayısı birinci aşamada algılanan RUE cihaz sayısı ile doğru orantılıdır. Bu sebeple, nRUE parametresi IoTD'lerin DC oranını direkt olarak etkileyen tek parametredir denilebilir.

Cihazların haberleşme menzili mesafesi IoTD'lerin DC oranını dolaylı olarak etkileyen bir parametredir. DC değerinin bir IoTD'nin kapsama alanındaki RUE cihaz sayısına bağlı olduğu bir üst paragrafta açıklanmıştır. CR değeri arttıkça cihazların haberleşme menziline bulunan RUE cihaz sayısı da artacağından, DC oranı da artacaktır. CR değeri 50m ve 100m olduğu durumlardaki DC değerleri Şekil 3.3.a ve Şekil 3.3.b'de gösterilmiştir.



a) $nIoTD = 10$ olduğunda



b) $nIoTD=100$ olduğunda

Şekil 3.3. SERDP'in Farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için görev döngüsü oranı sonuçları

DC oranını dolaylı olarak etkileyen bir diğer parametre bir periyottaki slot sayısını ifade eden S parametresidir. SERDP ile gerçekleştirilen cihaz keşfi işleminde IoT cihazlarının DC oranını etkileyen tek parametre komşuluğunda bulunan RUE cihaz sayısıdır. Ancak, CR değeri komşu RUE sayısını artırdığı için CR parametresi de dolaylı olarak etkilemektedir. S parametresinin değeri artsa da komşu RUE cihaz sayısı değişmediği sürece bir periyotta aktif olunan slot sayısı sabittir. Ancak, aktif slot sayısı sabit olduğu ve S değeri arttığı için DC oranı azalacaktır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi S parametresinin değeri 20 iken DC oranı en fazla, 80 iken DC oranı en az seviyededir.

3.3. Başarılı Keşif (SD) Oranlarının Karşılaştırılması

Bir IoT cihazının SD oranı, bir periyot sonunda komşuluğunda bulunan ve bu IoT tarafından başarılı bir şekilde keşfedilmiş olan RUE cihaz sayısının IoT'nin komşuluğunda bulunan bütün RUE cihaz sayısına bölünmesiyle elde edilir. Bu bölümde Senaryo #1 ortamında test edilen SERDP ve diğer protokollerin sayısal SD bulguları ve Senaryo #2 ortamlarında farklı S , CR, $nRUE$ ve $nIoT$ parametreleri ile test edilen SERDP'in sayısal SD bulguları gösterilecek ve yorumlanacaktır.

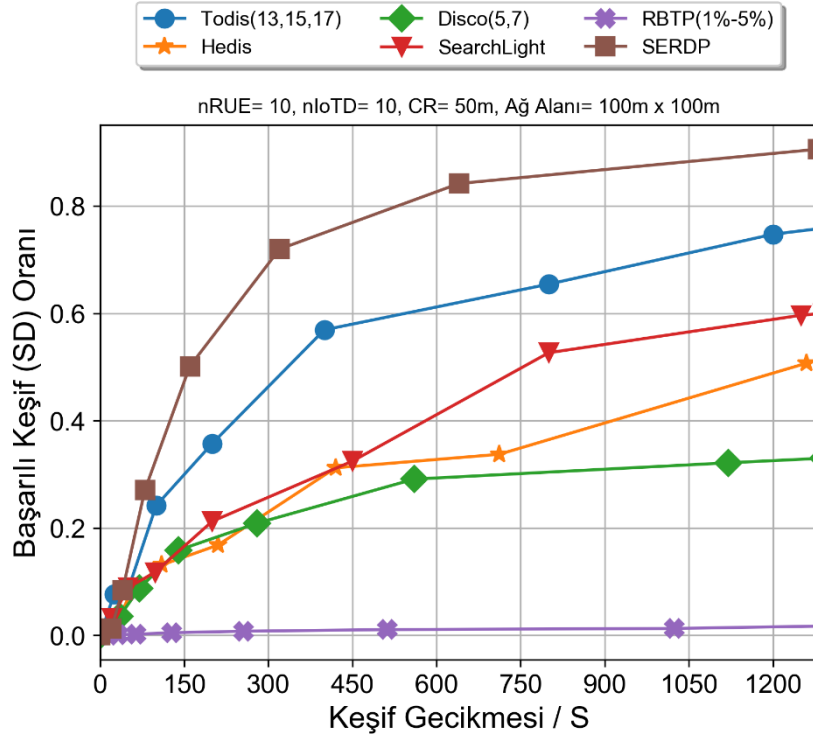
3.3.1. Senaryo #1

Protokollerin farklı keşif gecikmesi (S) değerleri için keşif başarı oranları (SD) Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Şekil 3.2'nin DC oranları da dahil olmak üzere bütün simülasyon parametreleri Şekil 3.2 için koşulan simülasyon parametreleri ile aynıdır ve Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Daha açık ifade etmek gerekirse, Şekil 3.2 ve 3.4'te gösterilen sonuçlar aynı simülasyon sonucu elde edilmiştir.

Eğer ağda sadece iki cihaz olduğu düşünülecek olsa, iki cihazın bir periyot boyunca aynı slotlarda aktif olduğu durumların sayısının en fazla olduğu çalışma RBTP olurdu. Ancak, ağda ikiden fazla cihaz olduğunda, aynı slotlarda uyanan cihazların gönderdikleri keşif mesajlarının alıcıda çakışma ihtimali yüksektir. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, asenkron çalışmaların keşif başarısı RBTP'den daha fazladır çünkü asenkron çalışmalarda periyot kaymaları aktif slotların periyotta dağılmasına neden olur ve çakışma ihtimali azalır.

RBTP’de keşif mesajlarının çakışması MAC protokolüne bırakılarak periyot boyunca cihazların maksimum sayıda ortak slotta aktif olma durumlarına odaklanılmıştır. Ancak, bu kabul iki cihazın bulunduğu bir ağ ortamı için uygun olsa da daha fazla sayıda cihazın bulunduğu ağlarda gerçekçi değildir. Eğer protokolün belirlediği bir slotta MAC protokolü kanalın meşgul olduğunu algılar ve bu slotta gönderim yapılmamasına karar verirse protokol kurallarına uyulmamış olur.

SD ve DC oranlarının sonuçları aynı simülasyon sonucunda ortaya çıktığı için Şekil 3.2 ve 3.4’ün birlikte değerlendirilerek kıyaslanması gerekir. Örneğin, Disco ve Todis için belirlenen asal sayılar bu protokollerin DC oranlarını etkileyebilir ancak Şekil 3.4’ten görüldüğü gibi Todis daha düşük DC oranı ile Disco’dan daha yüksek SD oranı elde etmiştir. Benzer şekilde, S parametresinin 600’den düşük olduğu durumlarda RBTP’nin DC oranı SERDP’e oranla daha düşük olabilir ancak aynı aralıkta SERDP’in SD oranı RBTP’den çok daha yüksektir.



Şekil 3.4. SERDP ve diğer protokollerin farklı S değerleri için SD oranları

Şekil 3.4’ten görüldüğü üzere, cihaz keşfi performansı olarak en başarılı protokol SERDP’dir. ikinci çalışma Todis’dir ancak SERDP’in DC oranı Todis’den daha düşük

olduğu halde SERDP'in SD oranı daha yüksektir. Dikkat edilirse S parametresinin değeri arttıkça protokollerin başarı oranları da artmaktadır çünkü IoT'D'ler komşuluğunda bulunan röle cihazları keşfedebilmek için daha fazla zamana sahip olurlar.

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, SERDP protokolünü kullanan IoT'D'ler daha düşük DC oranı ile daha yüksek SD oranlarına ulaştığı için SERDP protokolü diğer yöntemlerden daha başarılıdır. Diğer protokollerin en büyük eksikleri bir cihazın keşfetmek istediği komşu cihazların periyodun hangi slotlarında aktif olacağını bilememesi ve birden fazla cihaz tarafından keşif için aynı slotta gönderilen keşif mesajlarının alıcıda çakışmasıdır.

SERDP yönteminde keşif mesajı olarak imza tabanlı ortogonal dizilerin kullanılmasının nedeni, aynı slotta birden fazla cihaz tarafından gönderilen sinyallerin çakışmadan alıcı cihaz tarafından başarılı bir şekilde ayırt edilebilmesidir. Ayrıca diğer protokollerde bir IoT cihazı komşuluğunda bulunan RUE'leri keşfedebilmek için RUE'lerin aktif olmadığı birçok slotta aktif olmak zorundadır. Ancak, SERDP ile önerilen özgün periyot yapısı sayesinde cihazlar gereksiz slotlarda uyanmak zorunda kalmazlar.

3.3.2. Senaryo #2

SERDP'in farklı nRUE, nIoT'D, S ve CR değerleri için elde edilen başarılı keşif oranı sonuçları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu gösterimin amacı SERDP'in farklı cihaz sayılarında, farklı haberleşme menzili değerlerindeki değişimleri göstermektir. S parametresinin en küçük üç değer ile test edilmesi, diğer değişimlerin fark edilebilmesi içindir.

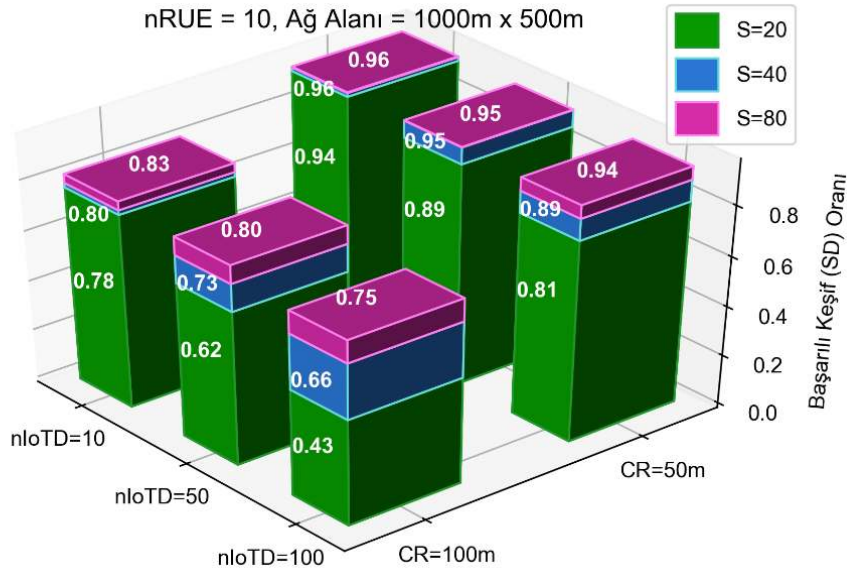
SD değerini etkileyen parametrelerden biri ağda bulunan toplam cihaz sayısıdır çünkü cihaz sayısındaki artış ağdaki rekabeti de artırır. Ağdaki röle cihaz sayısı Şekil 3.5.a'da 10, 3.5.b'de 50 ve 3.5.c'de ise 100'dür. Ağdaki cihaz sayısındaki bu artış $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoT'D}$ değerlerini de artıracak ve SD değerinin düşmesine sebep olacaktır. Şekil 3.5'ten anlaşıldığı gibi, S ve CR değerlerinin aynı olduğu ancak cihaz sayısının az olduğu senaryolarda SD oranı daha fazladır. Bu sebeple, nRUE ve nIoT'D değerlerinin 10 olduğu senaryolarda SD oranı en yüksekken nRUE ve nIoT'D değerleri 100 olduğunda SD oranı en düşük seviyededir.

Şekil 3.5 incelendiğinde CR değerindeki artışın SD oranını düşürdüğü fark edilecektir. nRUE, nIoT'D ve S parametreleri sabit iken CR değerinin 50m olduğu durumdaki SD oranı CR değerinin 100m olduğu durumdaki SD oranından fazladır. Bu

farklılığın temel nedeni CR alanının genişlemesiyle $nNBR_{avg}^{RUE}$ ve $nNBR_{avg}^{IoT}$ değerlerinin de artmasıdır. Daha açık ifade etmek gerekirse, CR değerinin artması cihazların komşuluğunda bulunan cihaz sayılarının da artmasına sebep olur. Bu durum cihazlar arasındaki rekabeti ve IoT cihazların periyodun ikinci aşamasında aynı Zadoff-Chu dizilerini seçme ihtimalini de artıracaktır.

Bir periyottaki slot sayısı da SD performansını etkilen bir diğer önemli etkidir. S değerinin yüksek olması cihazların seçebileceği Zadoff-Chu dizilerinin sayısını artıracığı için cihazların aynı diziyi seçme olasılığını azaltır. Bundan dolayı, nRUE, nIoT ve CR parametrelerinin sabit olduğu durumlarda S değeri 20 iken SD oranı en düşük, S değeri 80 iken SD oranı en yüksek değerine ulaşır.

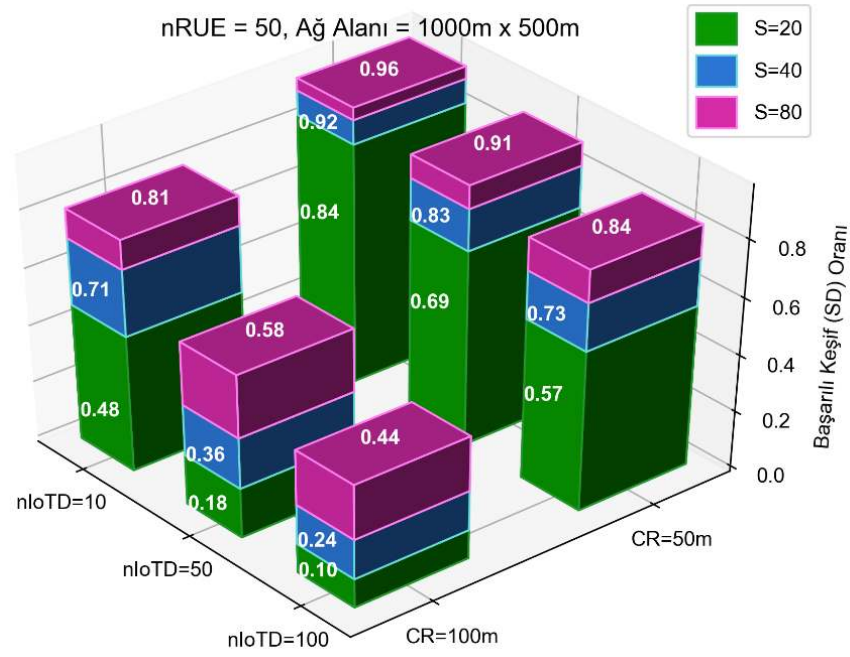
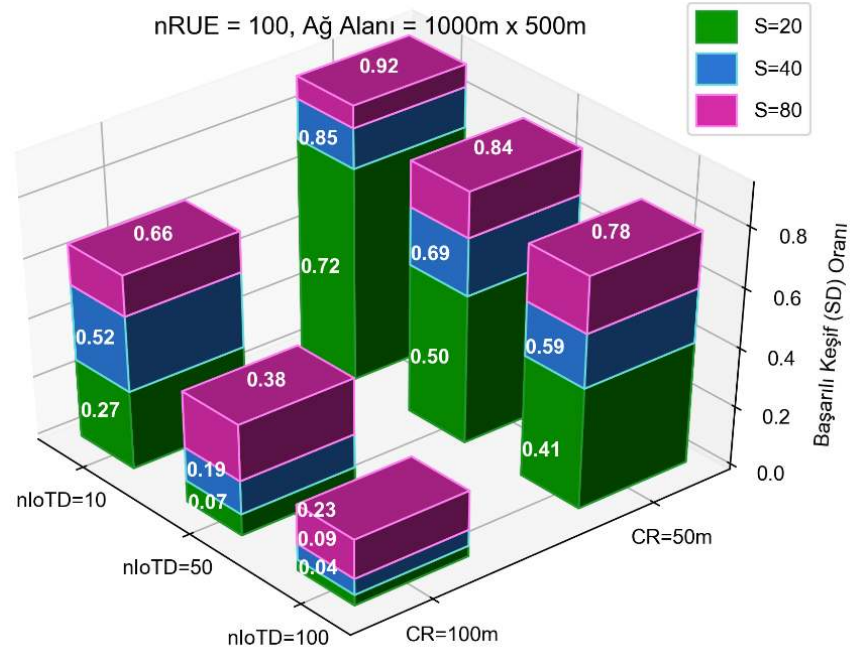
Bu simülasyonda S değerinin 20, 40 ve 80 olarak seçilmesinin nedeni diğer parametrelerin (nRUE, nIoT, CR) keşif performansı üzerindeki etkisini göstermektir. Eğer S değerleri yüksek değerler seçilirse diğer parametrelerin SD parametresi üzerindeki etkisi fark edilmeyebilir. Örneğin, S değeri 2560 olduğunda CR değeri 50 metre de olsa 100 metre de olsa SD değeri 1 olarak hesaplanır.



a) $nRUE = 10$

Şekil 3.5. SERDP'in farklı S, nRUE, nIoT ve CR değerleri için keşif oranı sonuçları

Şekil 3.5'in devamı

b) $nRUE = 50$ c) $nRUE = 100$

Tablo 3.4. StateBasedEpEnergyConsumer modelinde radyo modları ve güç tüketim miktarları

Radyo Modu	Güç Tüketim Miktarı
offPowerConsumption	0 mW
sleepPowerConsumption	1 mW
switchingPowerConsumption	1 mW
receiverIdlePowerConsumption	2 mW
receiverBusyPowerConsumption	5 mW
receiverReceivingPowerConsumption	10 mW
transmitterIdlePowerConsumption	2 mW
transmitterTransmittingPowerConsumption	100 mW

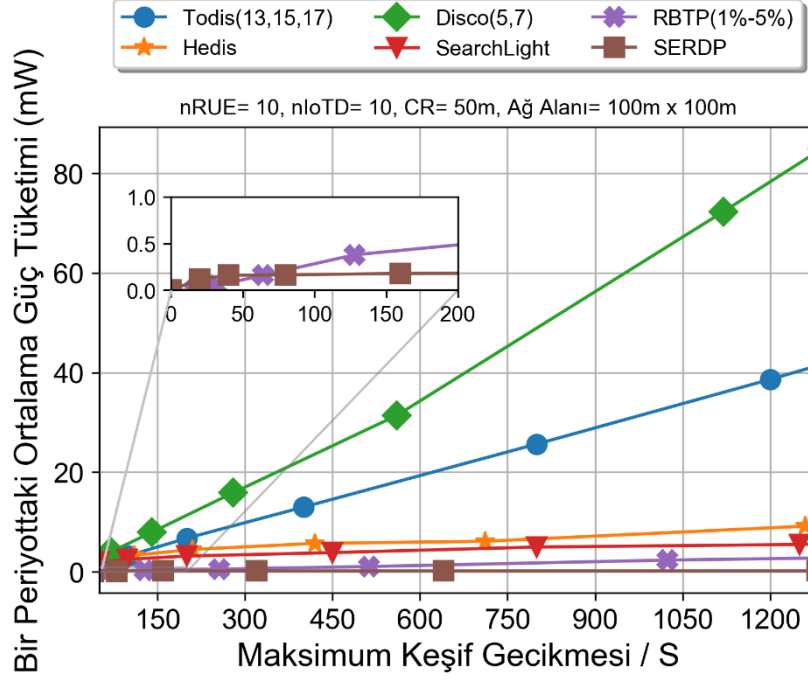
3.4. Güç Tüketim Miktarlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde Senaryo #1 ortamında test edilen SERDP ve diğer protokollerin bir periyottaki ortalama güç tüketim miktarı ve Senaryo #2 ortamlarında farklı S, CR, nRUE ve nIoTD parametreleri ile test edilen SERDP'in sayısal güç tüketim bulguları gösterilecek ve yorumlanacaktır. Cihazların güç tüketim miktarı OMNeT++ StateBasedEpEnergyConsumer [120] radyo güç tüketim modeli ile elde edilmiştir. Bu modelin radyo modlarına göre güç tüketim miktarları Tablo 3.4'te gösterildiği gibidir;

3.4.1. Senaryo #1

Bu bölümde SERDP'i ve diğer protokolleri kullanarak röle cihaz keşfi gerçekleştiren IoTD'lerin bir periyottaki ortalama güç tüketim miktarları mW cinsinden gösterilecek ve yorumlanacaktır. Ayrıca, farklı S değerleri için SERDP'in güç tüketim sonucu diğer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılacak ve değerlendirilecektir.

Daha doğru ve adil kıyaslama yapılabilmesi için bu simülasyonda SERDP'in ve diğer protokollerin DC oranları Şekil 3.2'de gösterilen DC oranları ile aynıdır. Kullanılan simülasyon parametreleri Tablo 3.1'de belirlenen Senaryo #1'in parametreleridir. Daha açık ifade etmek gerekirse, Şekil 3.2, 3.4 ve 3.6'da gösterilen sonuçlar aynı simülasyon sonucunda elde edilmiş sonuçlardır.



Şekil 3.6. Farklı S değerleri için protokollerin güç tüketim sonuçları

Şekil 3.6'dan anlaşılabileceği gibi, protokollerin güç tüketim miktarı Şekil 3.2'de sunulan DC oranı değerleriyle orantılıdır. Protokollerin artan S değerlerine göre güç tüketim miktarı Şekil 3.2'de gösterilen DC değerleriyle orantılı bir ivmeyle lineer olarak artmıştır. Örneğin, en fazla DC oranına sahip protokol olan Disco'nun güç tüketim miktarı en fazla ivmeyle artmıştır. En fazla DC oranına sahip ikinci protokol olan Todis'in güç tüketimi ise Şekil 3.6'da görüldüğü gibi en hızlı artan ikinci çalışmadır. Ancak, Todis bir periyot boyunca daha az sayıda slotta aktif olduğu için güç tüketimi Disco'dan daha azdır.

Her S değeri için DC değeri sabit olan bir diğer çalışma da RBTP'dir ancak bu protokolün bir periyottaki aktif slot sayısı Todis ve Disco'dan daha az olduğu için güç tüketim miktarı da Todis ve Disco'dan çok daha azdır. SERDP, Hedis ve SearchLight protokollerinin DC oranları artan S değerleri için azalan olduğundan, bu çalışmaların güç tüketim artış ivmesi daha düşüktür.

S değerinin 60'tan büyük olduğu senaryolarda, en az güç tüketen cihaz keşfi protokolü SERDP'dir. Şekil 3.6'dan fark edileceği gibi, S değerinin 60'tan küçük olduğu durumlarda RBTP'nin bir periyottaki güç tüketim miktarı SERDP'den daha azdır. Ancak, daha önce de ifade edildiği gibi, Şekil 3.2 ve Şekil 3.6 grafikleri SD değerlerini gösteren

Şekil 3.4 ile birlikte değerlendirilmesi gerekir çünkü Şekil 3.2 ve Şekil 3.6’da gösterilen RBTP’nin aynı DC ve güç tüketim miktarlarıyla elde ettiği keşif başarısı SERDP’in SD performansından çok daha düşüktür.

Dikkat edilirse SERDP’in DC oranı S parametresinin 600’den sonraki değerlerinde RBTP’den düşük olurken, Şekil 3.6’da SERDP’in güç tüketim miktarı S parametresi 60’tan büyük olduğu durumlarda RBTP’den daha azdır. DC oranı ve güç tüketim miktarı arasındaki bu farklılığın temel nedeni SERDP’in mesaj veri boyutunun RBTP’den çok daha az olmasıdır çünkü SERDP ile birinci ve ikinci aşamada gönderilen mesajlar bir imza/kimlik dışında herhangi bir veri içermez.

SERDP dışındaki diğer cihaz keşfi protokollerin ortak özelliği bir periyottaki aktif slot sayılarını S parametresine bağlı olarak belirlemeleridir. Bu sebeple, S parametresinin değeri arttıkça bir periyottaki aktif slot sayısı da artmaktadır. SERDP ile IoT cihazlarının bir periyottaki aktif slot sayısı ise sadece komşuluğunda bulunan RUE sayısına bağlıdır. Bu sebeple, $nNBR_{IoT_i}^{RUE}$ parametresinin değeri sabit olduğu sürece, bir IoT_i cihazı için gereken aktif slot sayısı sabittir.

3.4.2. Senaryo #2

Bu bölümde farklı nRUE, nIoT, CR ve S değerlerinin geliştirilen protokol üzerindeki güç tüketim etkisi gösterilecek ve yorumlanacaktır. SERDP’in farklı nRUE, nIoT, CR ve S değerlerine göre bir periyottaki ortalama güç tüketim miktarları mW cinsinden Tablo 3.5’te gösterilmiştir. Tablo 3.4’te gösterilen sonuçlar Tablo 3.2’de belirtilen Senaryo 2 parametreleri ile elde edilmiştir. Tablo 3.5.a, 3.5.b ve 3.5.c CR parametresinin 50 metre olduğu senaryoları gösterirken, Tablo 3.5.d, 3.5.e ve 3.5.f CR’in 100 metre olduğu senaryolardaki güç tüketim değerlerini gösterir.

Tablo 3.5’ten görüldüğü gibi, ağdaki RUE cihaz sayısının artması bir IoT cihazının haberleşme menziline bulunan ortalama RUE sayısını da artıracaktır. Bu durum IoT’lerin bir periyotta tükettiği ortalama enerji miktarını artırmıştır çünkü bir IoT cihazı komşuluğundaki RUE cihaz sayısı kadar ikinci ve üçüncü aşamalarda aktif olur.

CR değerinin artması IoT’lerin komşuluğunda bulunan RUE cihaz sayısını artırdığından dolayı IoT’lerin güç tüketim miktarını artırmıştır. Bölüm 3.2.2’de tartışıldığı gibi, CR değerinin artması $nNBR_{IoT_i}^{RUE}$ parametresini ve dolayısıyla IoT_i ’nin

bir periyotta aktif olması gereken slot sayısını da artırmıştır. Tablo 3.5'ten görüldüğü gibi, CR parametresi 100 metre iken cihazların güç tüketimi CR'nin 50 metre olduğu durumdaki güç tüketim miktarının yaklaşık olarak iki katıdır.

Tablo 3.5. SERDP'in farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için güç tüketim miktarı sonuçları

	nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100		nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100
nRUE= 10	0.0263	0.0252	0.0247	nRUE= 10	0.0472	0.0401	0.0401
nRUE= 50	0.0698	0.0721	0.0705	nRUE= 50	0.1557	0.1499	0.1365
nRUE= 100	0.1331	0.1238	0.1123	nRUE= 100	0.2618	0.2464	0.2096
<i>a) S=20 CR=50m Olduğunda</i>				<i>d) S=20, CR=100m Olduğunda</i>			
	nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100		nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100
nRUE= 10	0.0275	0.0266	0.0264	nRUE= 10	0.0493	0.0435	0.0404
nRUE= 50	0.0757	0.0750	0.0748	nRUE= 50	0.1767	0.1644	0.1619
nRUE= 100	0.1440	0.1288	0.1168	nRUE= 100	0.3082	0.2982	0.2865
<i>b) S=40, CR=50m Olduğunda</i>				<i>e) S=40, CR=100m Olduğunda</i>			
	nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100		nIoTD = 10	nIoTD = 50	nIoTD = 100
nRUE= 10	0.0296	0.0293	0.0281	nRUE= 10	0.0494	0.0438	0.0415
nRUE= 50	0.0784	0.0770	0.0758	nRUE= 50	0.1951	0.1884	0.1825
nRUE= 100	0.1556	0.1350	0.1290	nRUE= 100	0.3548	0.3459	0.3304
<i>c) S=80, CR=50m Olduğunda</i>				<i>f) S=80, CR=100m Olduğunda</i>			

nIoTD değerinin cihazların enerji tüketim miktarları üzerinde kısıtlı bir etkisi vardır. Röle cihaz keşfi amaçlayan bütün IoTD'ler birinci aşamada, periyodun ilk slotunda, aktif olurlar. Birinci aşamada, cihazlarının komşuluğunda bulunan IoTD ve RUE cihazlarının sayısına bağlı olmaksızın bütün RUE ve IoT cihazları δ_0 'da uyanırlar. İkinci aşamada ise IoTD'ler birinci aşamada algıladıkları slotlarda aktif olurlar. Bölüm 2.2.2'de detaylıca açıklandığı gibi, IoTD'ler birinci aşamada bir kere ikinci ve üçüncü aşamada ise komşuluklarında bulunan RUE sayısı kadar slotta aktif olurlar. Dolayısıyla, ağdaki IoTD sayısının cihazların güç tüketimine etkisi oldukça sınırlıdır.

S değeri arttıkça birinci ve ikinci aşamalarda cihazların aynı dizileri seçme olasılıkları azaldığından, IoT cihazları daha fazla slotta uyanır ve daha fazla güç tüketirler. Ancak, bu artış sınırlı bir artıştır. Örneğin, S=1280 olduğu durumdaki güç tüketimi S=2560

olduğu durum ile kıyaslansaydı, güç tüketim artışı oransal olarak S parametresinin 20, 40 ve 80 gibi küçük değerlerdeki kadar yüksek olmayabilirdi.

3.5. Gönderilen Ortalama Mesaj Sayısı Sonuçları

Bu bölümde IoT'D'ler tarafından bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayıları gösterilecek ve değerlendirilecektir. Senaryo #1 bölümünde SERDP ve diğer protokollerin sayısal bulguları karşılaştırılırken, Senaryo #2 bölümünde SERDP'in farklı parametrelere göre ortalama mesaj sayısı sonuçları gösterilecektir.

3.5.1. Senaryo #1

Bir simülasyon saati boyunca koşulan simülasyon sonunda IoT'D'lerin bir periyotta gönderdikleri ortalama mesaj sayıları Tablo 3.6'da farklı S değerleri için gösterilmiştir. Bu sonuçlarda SERDP ve diğer protokoller tarafından gönderilen ortalama mesaj sayıları karşılaştırılmıştır. Protokollerin DC değerleri de dahil olmak üzere bu simülasyon için belirlenen parametreler Tablo 3.1'de belirlenen simülasyon parametrelerinin değerleriyle aynıdır. Şekil 3.2, 3.4, 3.6 ve Tablo 3.6 aynı simülasyon sonucu elde edilmiş sonuçlardır.

SERDP dışındaki diğer protokollerde, bir cihaz uyandığı slotta mutlaka bir mesaj gönderdiği için bu protokollerin ortalama mesaj sayıları DC değerleriyle orantılıdır. Ancak önerilen protokolde bir IoT'D birinci aşamada herhangi bir RUE varlığından haberdar olursa STG₂ ve STG₃'te komşuluğundaki RUE sayısı kadar mesaj gönderir. Bundan dolayı, Tablo 3.6'dan anlaşılacağı üzere önerilen yöntemde IoT'D'ler tarafından bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayısı sabittir çünkü SERDP'de gönderilecek mesaj sayısı komşu RUE sayısına bağlıdır. Ancak, diğer protokollerde bir IoT'D komşuluğunda bir RUE olup olmadığıyla ilgilenmeden mesaj gönderildiği için diğer çalışmaların ortalama mesaj sayıları S değeri arttıkça artar.

RBTP'nin DC parametresi S değerine bağlı olarak protokolün çalışmasından önce belirlendiği için Tablo 3.6'da yüzde iki ve dört aktif slot sayısı ile gönderilen ortalama mesaj sayıları ayrı olarak gösterilmiştir. SERDP'in ortalama mesaj sayısı farklı S değerlerine göre yaklaşık olarak altı tanedir. RBTP'nin ortalama mesaj sayısı bir aşamaya kadar SERDP'den düşüktür ancak bölüm 3.2.1'de detaylıca açıklandığı gibi mesaj sayısı

sonuçları da bölüm 3.3.2’de temsil edilen cihaz keşfi başarı sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 3.6. IoTD’ler tarafından bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayıları

	S = 160	S = 320	S = 640	S = 1280
SERDP	6.3	6.4	6.4	6.6
RBTP (2%)	3	6	12	25
RBTP (4%)	6	12	25	51
SearchLight	18	26	36	51
Hedis	26	36	49	72
Todis	31	57	114	226
Disco	45	90	182	365

Disco ve Todis sırasıyla DC oranı en yüksek olan protokoller olduğu gibi aynı zamanda cihazların en fazla mesaj göndermek zorunda kaldıkları çalışmalardır. Hedis ve SearchLight protokollerinin DC oranları S arttıkça azalan olduğu için bu protokollerin ortalama mesaj sayıları da Disco ve Todis’e göre daha düşük bir ivmeyle artmıştır.

3.5.2. Senaryo #2

Bu bölümde farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için IoTD’lerin bir periyotta gönderdikleri ortalama mesaj sayıları gösterilecek ve yorumlanacaktır. Şekil 3.7.a, 3.7.b ve 3.7.c’de CR parametresinin 100 metre olduğu durumdaki sonuçlar gösterilirken 3.7.d, 3.7.e ve 3.7.f’de CR değerinin 50 metre olduğu durumdaki sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 3.7’deki alt şekillerde x eksenini bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayısını ifade ederken, y eksenini x ekseninde gösterilen ortalama mesaj sayısının simülasyon boyunca kaç defa tekrar ettiğini ifade etmektedir.

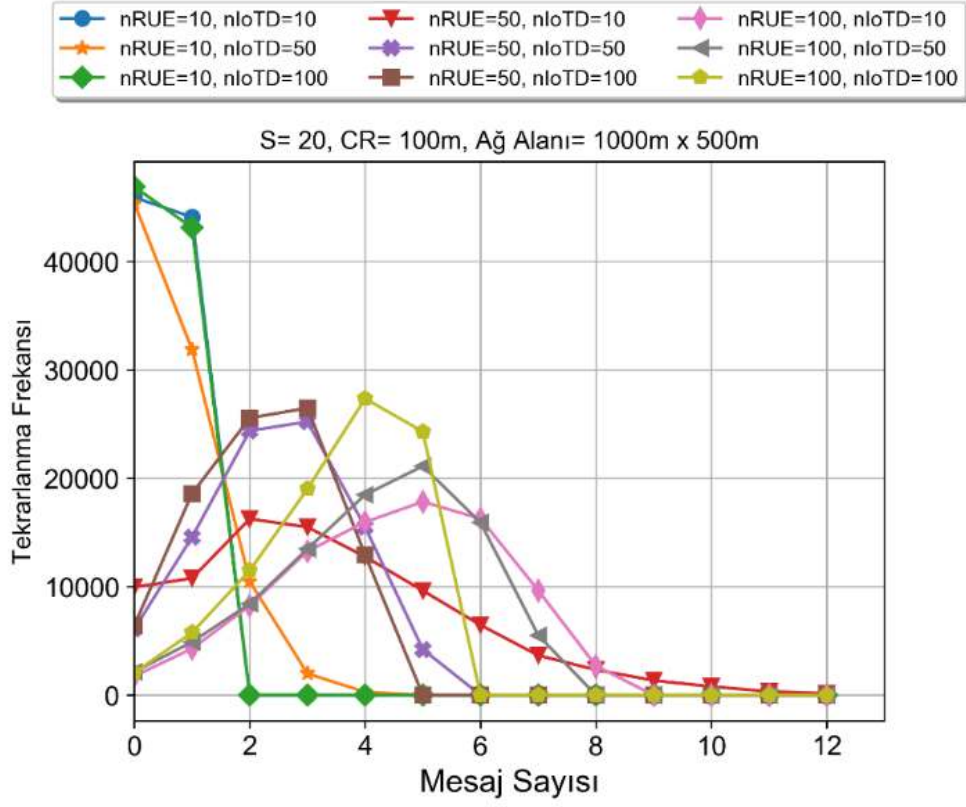
Şekil 3.7.a, 3.7.b, 3.7.c şekilleri birlikte incelendiğinde ve 3.7.d, 3.7.e, 3.7.f şekilleri birlikte incelendiğinde S parametresinin gönderilen mesaj sayısı sonucunu çok kısıtlı etkilediği görülecektir. Bu durumun temel nedeni ise SERDP ile belirlenen aktif slotların sadece IoTD’lerin komşuluğunda bulunan röle cihaz sayısına bağlı olmasındandır. Benzer

şekilde, bölüm 3.2.2 ve 3.4.2’de gösterildiği gibi DC oranı ve güç tüketim miktarı da S parametresine bağımlı değildir. Bu sebeple, farklı S değerleri için elde edilen ortalama mesaj sayısı sonuçları benzerdir.

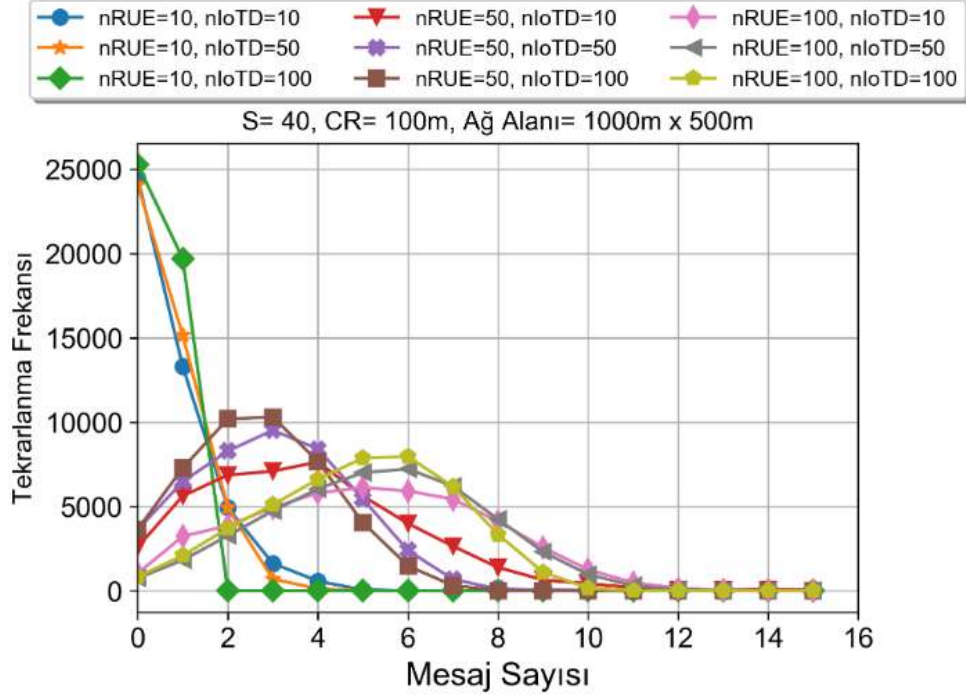
CR parametresinin değeri arttıkça IoT cihazlarının komşuluğunda bulunan röle cihaz sayısı arttığı için DC oranı ve güç tüketim miktarına benzer olarak gönderilen ortalama mesaj sayısı da artmaktadır. Şekil 3.7.a ile 3.7.d, 3.7.b ile 3.7.e ve 3.7.c ile 3.7.f kıyaslandığında CR değerinin 100 metre olduğu durumlarda gönderilen ortalama mesaj sayısı sonuçlarının CR’nin 50 metre olduğu durumlardaki sonuçlara göre fazla olduğu görülecektir.

nIoT parametresinin gönderilen ortalama mesaj sayısı üzerindeki etkisinin çok kısıtlı olduğu Şekil 3.7’den görülebilir. nRUE parametresinin sabit olduğu ve nIoT parametresinin 10, 50 ve 100 olduğu durumlarındaki ortalama mesaj sayısı sonuçları oldukça yakındır. Benzer şekilde, nIoT parametresinin ortalama mesaj sayısı sonucunda olduğu gibi DC oranı ve güç tüketim miktarı üzerindeki etkisi de bölüm 3.2.2 ve 3.4.2’den görülebilir.

nRUE parametresi gönderilen mesaj sayısını etkileyen en önemli parametredir çünkü, bölüm 2.2.2’de detaylıca açıklandığı gibi, bir periyottaki aktif slot sayısını belirleyen parametredir. Şekil 3.7’nin bütün alt şekillerinden görülebileceği gibi nRUE parametresinin fazla olduğu durumlarda gönderilen ortalama mesaj sayısı da fazladır.



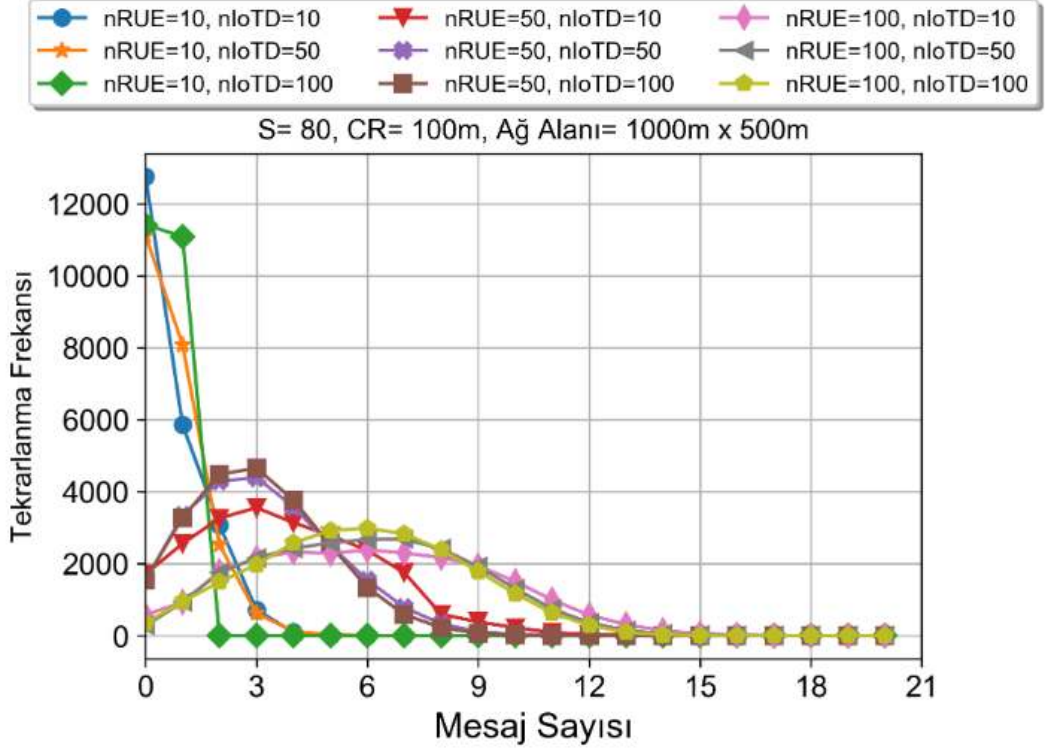
a) S=20, CR=100m olduğunda



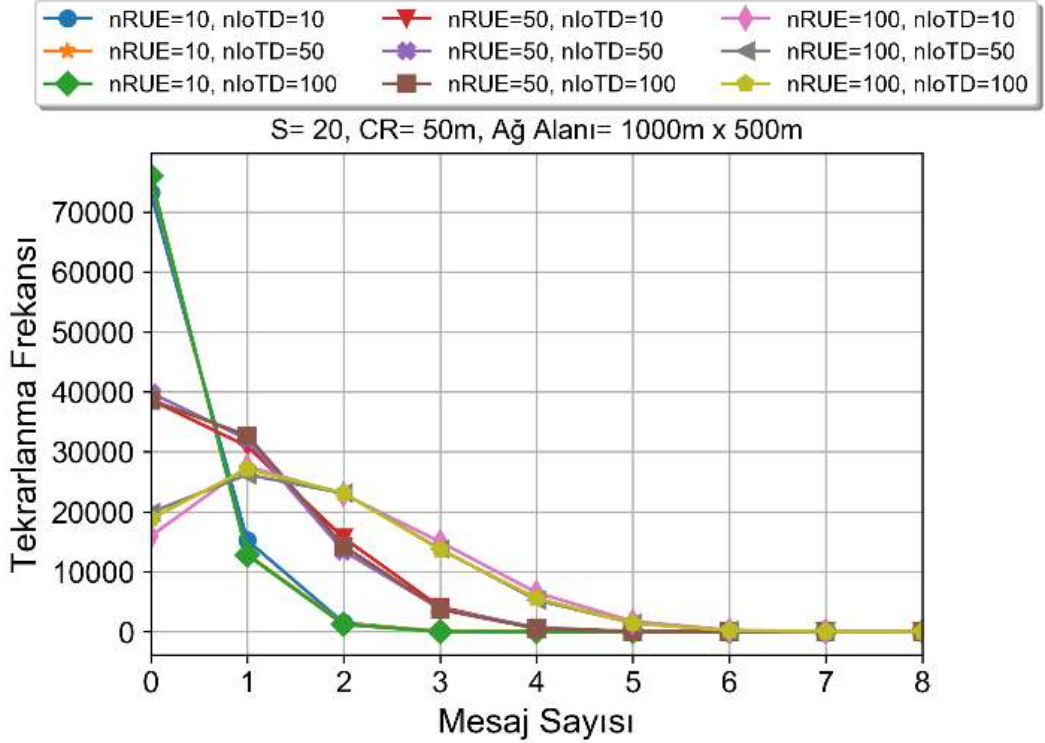
b) S=40, CR=100m olduğunda

Şekil 3.7. SERDP'in farklı S, nRUE, nIoTD ve CR değerleri için IoTD'ler tarafından bir periyotta gönderilen ortalama mesaj sayısı sonuçları

Şekil 3.7'nin devamı

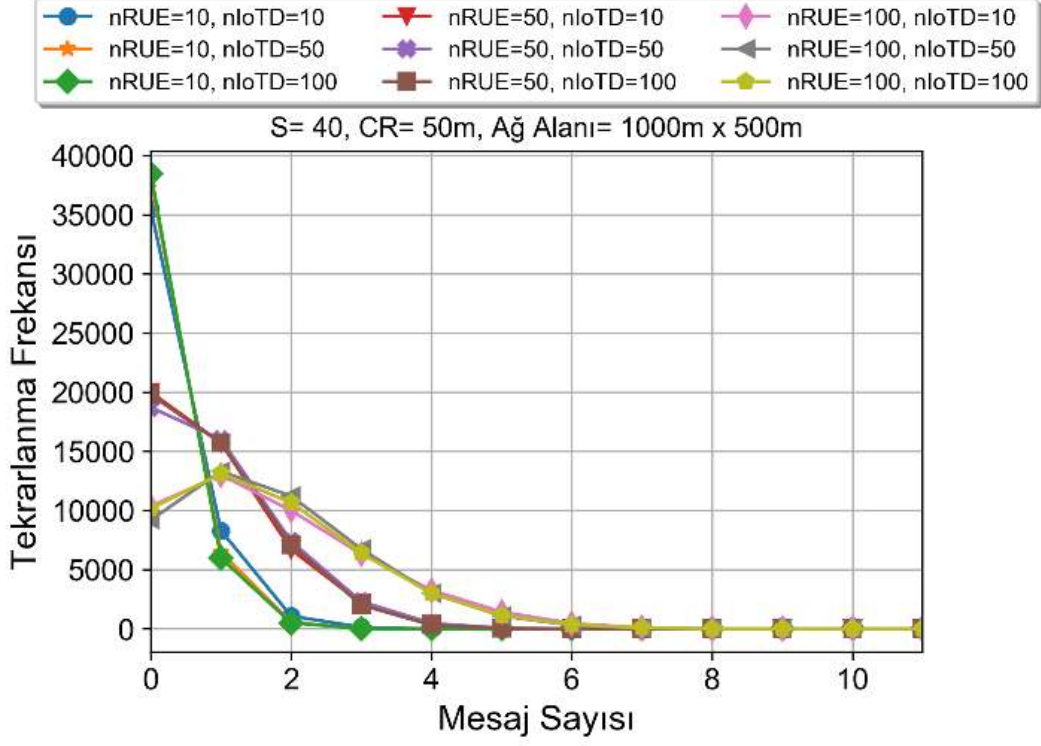


c) S=80, CR=100m olduğunda

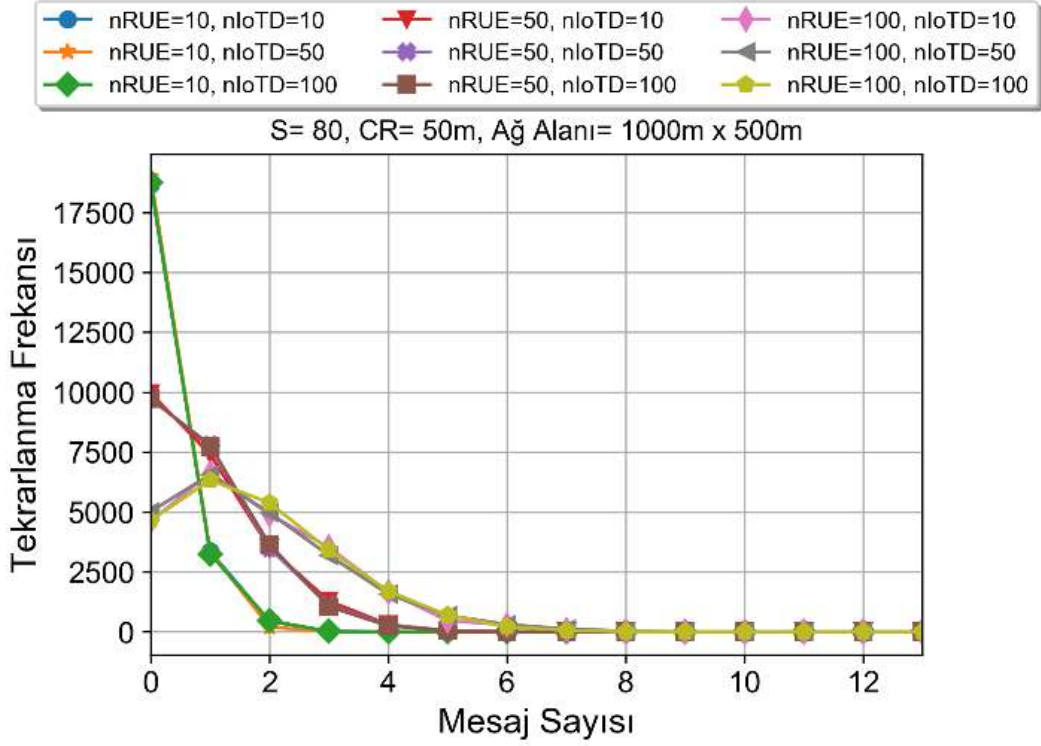


d) S=20, CR=50m olduğunda

Şekil 3.7'nin devamı



e) S=40, CR=50m olduğunda



f) S=80, CR=50m olduğunda

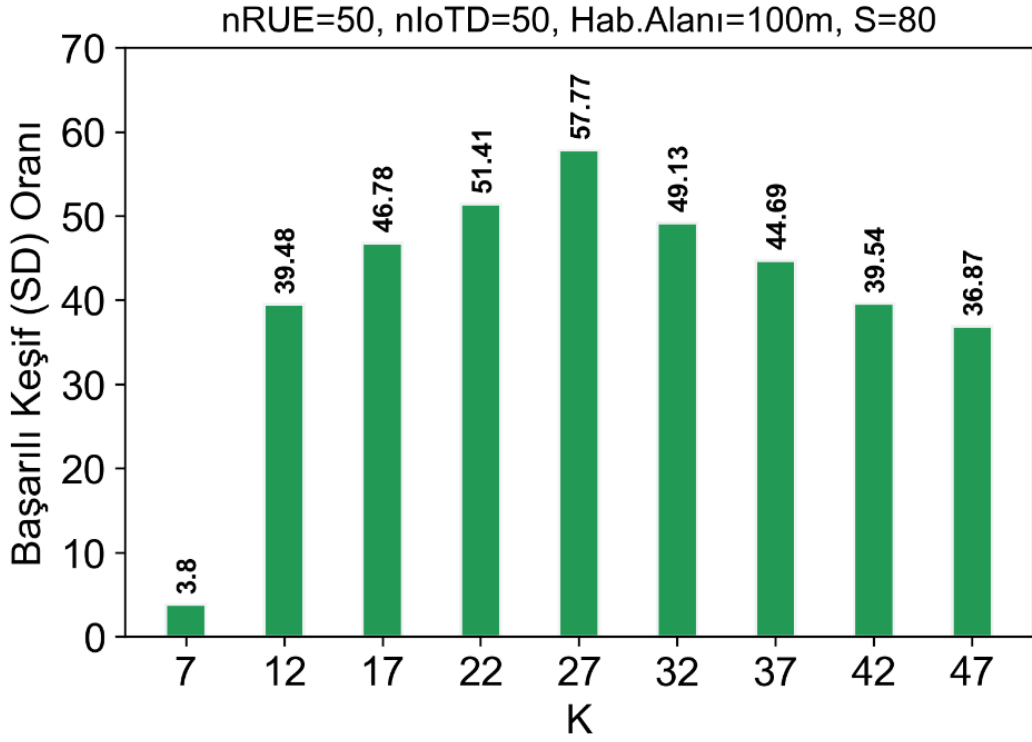
3.6. Optimum K Değeri ve Keşif Performansı

K parametresine, eşitlik 2.8’de gösterildiği gibi, $[2, S-2]$ arasındaki farklı değerlerin başarı olasılıkları karşılaştırılarak en yüksek olasılığa sahip değer atanır. Şekil 3.8’de, optimum K değerinin belirlenmesi bir örnek ile gösterilmiştir. Tablo 3.2’de belirtilen simülasyon parametreleri ile gerçekleştirilen bu örnekte, farklı K değerlerine göre SD oranları ve farklı K değerlerine göre P_1^2 , P_1^3 , $P_1^2 \times P_1^3$ değerleri sırasıyla Şekil 3.8.a ve Şekil 3.8.b’de gösterilmiştir.

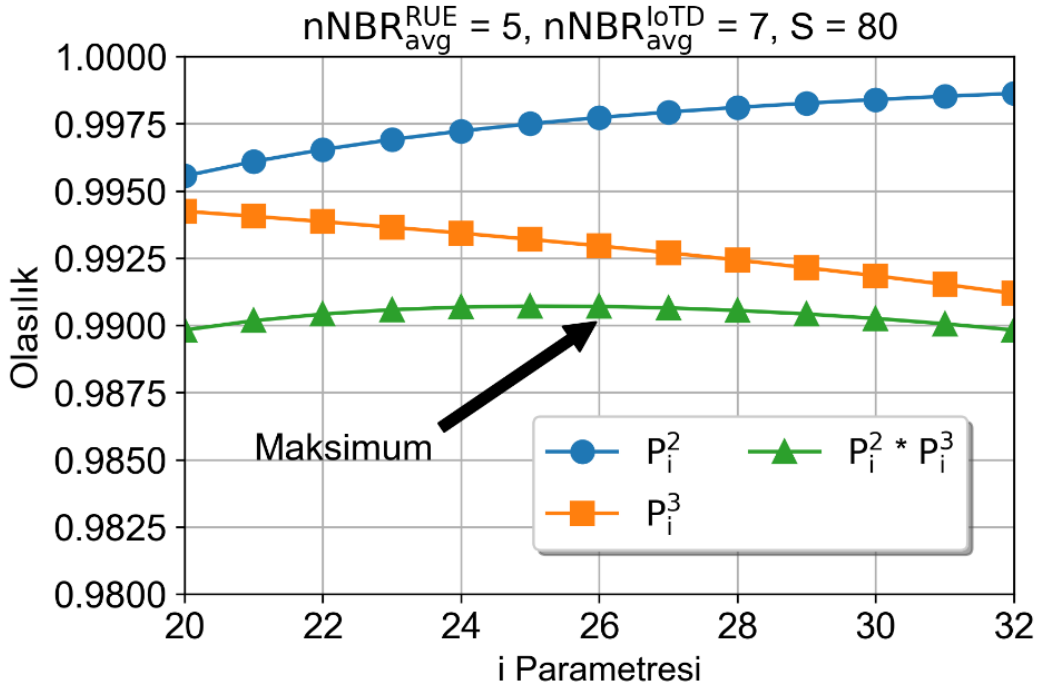
Şekil 3.8.a’ya göre $nRUE=50$, $nIoT D=50$, $CR=100$ ve $S=80$ olduğunda, K parametresinin keşif performansının maksimum olduğu değer gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda 27 olarak tespit edilmiştir. Aynı değerler için hesaplanan olasılık analizinde $P_1^2 \times P_1^3$ değerinin maksimum olduğu noktanın $i=nSTG_2=26$ noktası olduğu Şekil 3.8.b’de görülebilir. Eşitlik 2.8’de $K=i+1$ olarak belirlendiğinden olasılık analizi ile belirlenen optimum K değeri de 27 olarak bulunur.

i ($nSTG_2$) parametresinin değerinin düşük olması P_1^2 olasılığının düşük, P_1^3 olasılığının yüksek olmasına neden olur. i değeri arttıkça P_1^2 olasılık değeri artmaya P_1^3 değeri ise azalmaya başlar. $P_1^2 \times P_1^3$ değeri ise maksimum noktaya ulaştıktan sonra düşmeye başlar. Bunun nedeni ise $nSTG_3$ parametresinin azalması ve IoT D’lerin üçüncü aşamada aynı dizileri seçme olasılıklarının artmasıdır. Bu protokolde, $P_1^2 \times P_1^3$ değerinin maksimum olduğu i değeri ikinci aşamanın slot sayısına ($nSTG_2$) eşittir. Simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi, bu noktadaki SD performansı da maksimumdur. Böylece, SERDP’in bir periyodu en optimum sayıda üç aşamaya bölünmüş olacaktır.

Olasılık analizleri sonucunda elde edilen optimum K değeri ile simülasyonlar sonucunda elde edilen ve maksimum performans sağlayan K değeri örtüşmektedir. Bu sonuçlar bölüm 2.2.2.4’te geliştirilen olasılık analizlerinin doğruluğunu ve maksimum performansı sağladığını kanıtlamaktadır.



a) Farklı K değerleri için SD sonuçları



b) Farklı i değerleri için P_i^2 , P_i^3 , $P_i^2 \times P_i^3$ gösterimleri

Şekil 3.8. Farklı K değerleri için SD sonuçları ve olasılık analizi

4. SONUÇLAR

Kavram olarak ilk kez 1999 yılında ortaya atılan Nesnelerin İnterneti, birçok alanda kullanılan ve üzerinde akademik ve endüstriyel çalışmalar gerçekleştirilen devasa bir ağın paradigmasıdır. Etrafımızda gördüğümüz milyarlarca nesnenin kimliklendirilmesini, çevresini algılamasını, haberleşmesini ve internete bağlanarak bilgi paylaşmasını öngören nesnelerin interneti sisteminin problemleri için literatürde önerilmiş/geliştirilmiş birçok çalışma mevcuttur.

Devasa sayıda cihazın hangi ağ/ağlar üzerinden internete erişeceği problemlerden bir tanesidir. Bu derece fazla sayıda cihazın tek bir ağ alt yapısını kullanarak haberleşmesi zordur. Nesnelerin İnterneti cihazları bulundukları ortama, cihaz karakteristiğine ve ağdan beklentilerine göre farklı ağlar ile haberleşebilir. Kişisel bağlantı için kişisel alan ağlarını, kapalı bir ortamda yerel alan ağlarını, dış ortamda ise hücresel ağları (LTE/5G/6G) tercih edebilir. Hücresel ağlar daha geniş kapsama alanında hizmet verdiklerinden dolayı Nesnelerin İnterneti cihazları için büyük öneme sahiptir.

Hücresel ağlar için 3GPP tarafından önerilen bağlantı modelinde Nesnelerin İnterneti cihazları doğrudan baz istasyona bağlanabilecekleri gibi bir röle cihaz üzerinden dolaylı olarak da bağlanabilirler. Dolaylı bağlantı modelinde karşılaşılabilecek problemlerden ilki cihazların en az enerji ve en fazla başarı ile birbirlerini nasıl keşfedecekleri konusudur çünkü bu cihazlar batarya ile çalışan ve enerji açısından kısıtlı olan cihazlardır. Bu nedenle, Nesnelerin İnterneti cihazları ağda sürekli olarak aktif olmak yerine gerektiğinde aktif olmalı, gerekmediğinde uyku durumuna geçmelidir. Bu çalışmada dolaylı bağlantı modelinde cihaz keşfi için enerji verimli ve imza tabanlı cihaz keşfi protokolü geliştirilmiştir.

Literatürde önerilen cihaz keşfi protokolleri 3GPP'nin dolaylı bağlantı modeli için yetersizdir. Var olan protokollerin en büyük eksiklerinden biri cihazlar arasında koordinasyonun sağlanamamasıdır. Ağın senkron olduğu protokollerde bile, bir cihaz haberleşme menziline bulunan diğer cihazların ne zaman aktif olacağını bilmediği için daha fazla süre aktif kalarak komşu düğümleri aramak zorundadır. Bu durum fazla enerji tüketimine sebep olmaktadır.

Literatürdeki çalışmaların bir diğer eksikliği ise aynı anda birden fazla cihaz tarafından gönderilen paketlerin alıcı cihazda çakışmasıdır. Bu durumun temel nedeni mesajlaşma

için paket tabanlı sinyalizasyonun kullanılmasıdır. Paket tabanlı yöntemde cihaz keşfi için gerekli olan bütün bilgiler bir araya getirilir ve paket olarak gönderilir. Bu yöntemin kullanılmasının avantajlı olduğu senaryolar bulunsada mesajların alıcıda çakışması keşif işleminin tekrarlanmasına ve fazla enerji tüketimine sebep olur.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen eksikleri ortadan kaldırmak için özgün bir periyot yapısı önerilmiş ve imza tabanlı sinyalizasyon ile yeni bir cihaz keşfi protokolü geliştirilmiştir. Önerilen yeni periyot yapısı üç aşamadan oluşmakta ve her aşamanın amaca yönelik işlemleri ve görevleri bulunmaktadır. Ağda senkron olan röle cihazlar yardımıyla Nesnelerin İnterneti cihazları da ağda senkron olmakta ve her aşamada bir sonraki aşamanın aktif olma zamanlarını komşu cihazlara bildirmektedir. Böylece, cihazlar sadece gerekli zamanlarda aktif olarak en az enerji ile cihaz keşfini gerçekleştirirler.

Bir periyot slot adı verilen en küçük zaman parçalarının birleşmesinden oluşur ve her slot indekslenir. Birinci aşama, her periyodun ilk slotundan oluşur. Bu aşamanın amacı cihazlar arasındaki slot senkronizasyonunun sağlanması ve röle cihazların ikinci aşamadaki aktif slotlarının belirlenmesidir. Bu aşamada bütün röle ve Nesnelerin İnterneti cihazları aktif olurlar. Röle cihazlar ikinci aşamadaki slot sayısı kadar ortogonal Zadoff-Chu dizisi üreterek bu dizilerden bir tanesini uniform olarak seçerler. Seçilen dizi ile oluşturulan sinyaller röle cihazlar tarafından gönderilir.

Aynı slotta ve birden fazla röle cihaz tarafından gönderilen sinyaller Nesnelerin İnterneti cihazlarında çakışmaz çünkü bu sinyaller imza tabanlı ortogonal sinyallerdir. Bir kimlik/imza dışında herhangi bir veri içermez. Algılanan bu imzalar ile röle cihazların ikinci aşamada hangi slot indekslerinde aktif olacakları bilgisi elde edilmiş olur. Böylece, röle cihazlar ikinci aşamadaki slotlara dağıtılmış olur.

Röle cihazlar birinci aşamada belirledikleri ikinci aşamanın slot indekslerinde aktif olurlar. İkinci aşamanın amacı, her bir komşu röle ve Nesnelerin İnterneti cihazı için üçüncü aşamada ayrı bir slot tahsis etmektir. İkinci aşamada Nesnelerin İnterneti cihazları üçüncü aşamadaki slot sayısı kadar Zadoff-Chu dizisi üreterek bu dizilerden bir tanesini uniform olarak seçerler. Seçilen ortogonal diziler ile oluşturulan sinyaller röle cihazlara gönderilir. Bu sinyalleri alan röle cihazlar üçüncü aşamada aktif olması gereken slot indekslerini elde etmiş olurlar.

Üçüncü aşama ise cihazların birbirlerini keşfettikleri son aşamadır. Bu aşamada mümkün olduğunda her bir komşu röle Nesnelerin İnterneti cihazı için ayrı bir slot tahsis edilmiş olur. Geliştirilen protokol ile cihazlar sadece aktif olmaları gereken slotlarda

uyanarak keşif işlemini gerçekleştirirler. Böylece, en az enerji tüketimi ile daha başarılı cihaz keşfi işlemi sağlanır.

Bir periyot aşamalara bölünürken ikinci ve üçüncü aşamadaki slot sayısının optimum olması önemli bir konudur. İkinci ve üçüncü aşama slot sayıları protokolün performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Optimum değerleri belirleyebilmek için olasılık analizleri yapılmış ve en yüksek performans değerine ulaşan slot sayıları ikinci ve üçüncü aşamalara atanmıştır. Olasılık analizleri ile elde edilen değerlerin test ortamında da en yüksek performansı sağladığı ispat edilmiştir.

OMNeT++ ağ simülasyon çerçevesi ile test edilen SERDP'in sayısal bulguları RBTP, Hedis, Todis, SearchLight ve Disco protokolleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. SERDP'in görev döngü oranı, başarılı cihaz keşfi oranı, cihazların ortalama güç tüketimleri ve gönderilen ortalama mesaj sayıları sonuçları diğer protokollerin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları göstermektedir ki bu çalışma ile geliştirilen cihaz keşfi protokolü daha az görev döngüsü oranı, güç tüketimi ve mesaj sayısı ile daha başarılı sayıda röle cihaz keşfi gerçekleştirmiştir. Bundan dolayı, SERDP, karşılaştırılan diğer yöntemlerden daha başarılı olan bir cihaz keşfi protokolüdür.

5. ÖNERİLER

Nesnelerin İnterneti için önerilen yöntemlerde göz önünde bulundurulması gereken en önemli konulardan biri yöntemin minimum enerji tüketimi ile çalışmasıdır çünkü bu cihazlar enerji, kaynak ve işletim kapasitesi açısından kısıtlı cihazlardır. Minimum enerji tüketiminin sağlanması özgün donanım tasarımlarıyla olabileceği gibi haberleşme protokolleri ile de gerçekleştirilebilir. Nesnelerin İnterneti alanındaki problemlere çözüm öneren çalışmaların tamamı bu kriteri dikkate almalıdır.

Nesnelerin İnterneti, Kablosuz Duyarga Ağlar, Tasarsız Ağlar gibi sistemler için geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin birincil amacı en az güç tüketimi ve gecikme ile daha fazla cihaz keşfini başarabilmektir. Bunların dışında, protokol başarısını etkileyen ve dikkate alınması gereken birçok parametre vardır. Ağdaki cihaz sayısı, cihazların haberleşme menzili, mobilite modeli, kanal özellikleri ve gecikme bu parametrelerden bazılarıdır.

Hücresele ağlar için geliştirilen Nesnelerin İnterneti çalışmalarında cihazların ağda gezgin olması gerçekçi bir ağ ortamı için gereklidir. Ancak, cihaz keşfi protokollerinde cihazların gezgin olması cihaz keşfi işleminin belirli aralıklarla tekrarlanmasını gerektirir. Çünkü bir cihazın komşuluğunda bulunan cihazlar bir süre sonra haberleşme menzilinden çıkabilir. Bundan dolayı, mobil ağlarda komşu keşfi veya cihaz keşfi işlemleri periyodik olarak tekrarlanır. Geliştirilen cihaz keşfi protokollerinin bu durumu dikkate alması büyük önem arz eder.

CAZAC dizileri birçok bilgisayar ve haberleşme sistemleri tarafından kullanılan sabit genlikli ve sıfır otokorelasyona sahip olan karmaşık değerli kodlardır. Bu kodlar yardımıyla üretilen ortogonal sinyaller imza tabanlı ve çakışmalara karşı dayanıklı sinyallerdir. Geliştirilecek haberleşme protokollerinde kullanılabilecek bu özel dizilerin çalışma mantığı ve yapısı bilinmelidir. Ancak, bu diziler ile elde edilen sinyallerin bir imza/kimlik dışında herhangi bir veri içermediği dikkate alınmalıdır.

Gerçek bir ağ ortamında anlık olarak ağın kapsama alanına giren ve kapsama alanından çıkan cihazlar bulunması kaçınılmazdır. Bu durumda ağdaki cihaz sayısı sürekli olarak değişecektir. İkinci ve üçüncü aşamanın optimum slot sayılarıyla ayrılması için gerçekleştirilen olasılık analizleri belirli bir cihaz sayısı ile gerçekleştirilmiştir. Ancak, dinamik bir ortamda ağdaki cihaz sayıları değişeceği için optimum slot sayılarının da

zamanla değişmesi gerekebilir. Bu değerlerin güncellenmesi ağa dahil olan ve ağdan çıkan cihazlardan haberdar olan bir merkezi düğüm tarafından yapılabilir. Hücresel ağda bu güncellemeyi gerçekleştirebilecek merkezi düğüm baz istasyonudur.

3GPP'nin doğrudan ve dolaylı bağlantı modelleri birlikte düşünülerek yeni bir cihaz keşfi protokolü geliştirilebilir. Doğrudan bağlantı modeli Nesnelerin İnterneti cihazlarının direkt olarak baz istasyonu ile haberleşmesini öngörürken, dolaylı bağlantı modeli cihazların röle cihazlar ile ağa bağlanmasını dikkate alır. Bu iki modelin birlikte düşünülmesi cihaz keşfi protokolünün daha etkin olmasını sağlayacaktır. Bu durumda, doğrudan bağlantı durumundan dolaylı bağlantı durumuna geçen veya dolaylı bağlantıdan doğrudan bağlantıya geçmek isteyen cihazlar için yeni haberleşme sistemlerinin ve protokollerinin tasarlanması gerekecektir.

6. KAYNAKLAR

1. Michael, K., Connected: To everyone and everything, IEEE Technology and Society Magazine (2013) 31.
2. Itu internet reports 2005: The internet of things, <https://www.itu.int/osg/spu/-publications/internetofthings/>, accessed: 2020-02-03.
3. Turgut, Z., Nesnelerin interneti için hareketlilik yönetimi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
4. Council, N., Six technologies with potential impacts on us interests out to 2025, Disruptive Civil Technologies, 2008.
5. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. ve Ayyash, M., Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications, IEEE communications surveys & tutorials, 17, 4 (2015) 2347–2376.
6. Elarabi, T., Deep, V. ve Rai, C. K., Design and simulation of state-of-art zigbee transmitter for iot wireless devices, 2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), IEEE (2015), 297–300.
7. Braam, K., Huang, T.-C., Chen, C.-H., Montgomery, E., Vo, S. ve Beausoleil, R., Wristband vital: A wearable multi-sensor microsystem for real-time assistance via low-power bluetooth link, 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), IEEE (2015), 87–91.
8. Sathyaseelan, M. P., Chakravarthi, M. K., Sathyaseelan, A. P. ve Sudipta, S., Iot based covid de-escalation system using bluetooth low level energy, 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), IEEE (2021), 174–177.
9. Sara, J. J., Hossain, M. S., Khan, W. Z. ve Aalsalem, M. Y., Survey on internet of things and 4g, 2019 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), IEEE (2019), 1–6.
10. Liu, X., Wu, S., Guo, Y. ve Chen, C., The demand and development of internet of things for 5g: A survey, 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), IEEE (2018), 1–2.
11. Chettri, L. ve Bera, R., A comprehensive survey on internet of things (iot) toward 5g wireless systems, IEEE Internet of Things Journal, 7, 1 (2019) 16–32.
12. Alsulami, M. M. ve Akkari, N., The role of 5g wireless networks in the internet-of-things (iot), 2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS), IEEE (2018), 1–8.

13. About 3gpp, [https://https://www.3gpp.org/about-3gpp](https://www.3gpp.org/about-3gpp), accessed: 2018-08-09.
14. 3GPP TS 22.861, Feasibility study on new services and markets technology enablers for massive internet of things, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sophia Antipolis Cedex, 2016.
15. Kassab, W. ve Darabkh, K. A., A–z survey of internet of things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations, Journal of Network and Computer Applications, 163 (2020) 102663.
16. Farhan, L., Kharel, R., Kaiwartya, O., Quiroz-Castellanos, M., Alissa, A. ve Abdulsalam, M., A concise review on internet of things (iot)-problems, challenges and opportunities, 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), IEEE (2018), 1–6.
17. Gawali, S. K. ve Deshmukh, M. K., Energy autonomy in iot technologies, Energy Procedia, 156 (2019) 222–226.
18. Elmangoush, A., Coskun, H., Wahle, S. ve Magedanz, T., Design aspects for a reference m2m communication platform for smart cities, 2013 9th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT), IEEE (2013), 204–209.
19. Haroon, A., Shah, M. A., Asim, Y., Naeem, W., Kamran, M. ve Javaid, Q., Constraints in the iot: the world in 2020 and beyond, Constraints, 7, 11 (2016) 252–271.
20. Allal, I., Mongazon-Cazavet, B., Al Agha, K., Senouci, S.-M. ve Gourhant, Y., A green small cells deployment in 5gâ€”switch on/off via iot networks & energy efficient mesh backhauling, 2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops, IEEE (2017), 1–2.
21. Galluzzi, V. ve Herman, T., Survey: discovery in wireless sensor networks, International Journal of Distributed Sensor Networks, 8, 1 (2012) 271860.
22. Dutta, P. ve Culler, D., Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications, Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems (2008), 71–84.
23. Chen, L., Fan, R., Zhang, Y., Shi, S., Bian, K., Zhou, P., Gerla, M., Wang, T. ve Li, X., On heterogeneous duty cycles for neighbor discovery in wireless sensor networks, Ad Hoc Networks, 77 (2018) 54–68.
24. Bakht, M., Trower, M. ve Kravets, R. H., Searchlight: Won't you be my neighbor?, Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking (2012), 185–196.
25. Mullender, S. J. ve Vitanyi, P. M., Distributed match-making, Algorithmica, 3, 1-4 (1988) 367–391.

26. Kandhalu, A., Lakshmanan, K. ve Rajkumar, R., U-connect: a low-latency energy-efficient asynchronous neighbor discovery protocol, *Proceedings of the 9th ACM/IEEE international conference on information processing in sensor networks* (2010), 350–361.
27. Li, D. ve Sinha, P., Rbtp: Low-power mobile discovery protocol through recursive binary time partitioning, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13, 2 (2012) 263–273.
28. Wu, X., Tavildar, S., Shakkottai, S., Richardson, T., Li, J., Laroia, R. ve Jovicic, A., Flashlinq: A synchronous distributed scheduler for peer-to-peer ad hoc networks, *IEEE/ACM Transactions on networking*, 21, 4 (2013) 1215–1228.
29. Hayat, O., Ngah, R. ve Zahedi, Y., Device discovery for d2d communication in in-band cellular networks using sphere decoder like (sdl) algorithm, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 1 (2018) 74.
30. Jaffry, S., Hasan, S. F. ve Gui, X., Neighbourhood-aware out-of-network d2d discovery, *Electronics Letters*, 54, 8 (2018) 507–509.
31. Lim, C., Jang, M. ve Kim, S.-H., Trellis tone modulation multiple-access for peer discovery in d2d networks, *Sensors*, 18, 4 (2018) 1228.
32. Wang, Y., Yu, Z., Huang, J. ve Choi, C., A novel energy-efficient neighbor discovery procedure in a wireless self-organization network, *Information Sciences*, 476 (2019) 429–438.
33. Hayat, O., Ngah, R. ve Zahedi, Y., Cooperative gps and neighbors awareness based device discovery for d2d communication in in-band cellular networks, *Int J Eng Technol*, 7, 2.29 (2018) 700–703.
34. Chour, H., Nasser, Y., Artail, H., Kachouh, A. ve Al-Dubai, A., Vanet aided d2d discovery: Delay analysis and performance, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66, 9 (2017) 8059–8071.
35. Hayat, O., Ngah, R. ve Zahedi, Y., Cooperative device-to-device discovery model for multiuser and ofdma network base neighbour discovery in in-band 5g cellular networks, *Wireless Personal Communications*, 97, 3 (2017) 4681–4695.
36. Jedidi, L., Chekir, M., Louati, F., Bouraoui, R. ve Besbes, H., Cooperative d2d discovery approach for public safety based on spreading technique, 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), IEEE (2017), 190–195.
37. Nguyen, N. T., Choi, K. W., Song, L. ve Han, Z., Roommates: An unsupervised indoor peer discovery approach for lte d2d communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67, 6 (2018) 5069–5083.

38. Zhang, B., Li, Y., Jin, D. ve Han, Z., Network science approach for device discovery in mobile device-to-device communications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65, 7 (2015) 5665–5679.
39. Omnet++, <https://doc.omnetpp.org/>, accessed: 2019-04-20.
40. Chen, S., Xu, H., Liu, D., Hu, B. ve Wang, H., A vision of iot: Applications, challenges, and opportunities with china perspective, IEEE Internet of Things journal, 1, 4 (2014) 349–359.
41. Zhang, M., Sun, F. ve Cheng, X., Architecture of internet of things and its key technology integration based-on rfid, 2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design, volume 1, IEEE (2012), 294–297.
42. Castillejo, P., Martnez, J.-F., López, L. ve Rubio, G., An internet of things approach for managing smart services provided by wearable devices, International Journal of Distributed Sensor Networks, 9, 2 (2013) 190813.
43. Li, S., Da Xu, L. ve Zhao, S., The internet of things: a survey, Information Systems Frontiers, 17, 2 (2015) 243–259.
44. Jia, X., Feng, Q., Fan, T. ve Lei, Q., Rfid technology and its applications in internet of things (iot), 2012 2nd international conference on consumer electronics, communications and networks (CECNet), IEEE (2012), 1282–1285.
45. Durmaz, C., Challenger, M., Dagdeviren, O. ve Kardas, G., Modelling contiki-based iot systems, 6th symposium on languages, applications and technologies (SLATE 2017), Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik (2017).
46. Gigli, M. ve Koo, S., Internet of things: Services and applications categorization., Adv Internet of Things, 1, 2 (2011) 27–31.
47. Xiaojiang, X., Jianli, W. ve Mingdong, L., Services and key technologies of the internet of things, ZTE Communications, 8, 2 (2020) 26–29.
48. Decker, S., Melnik, S., Van Harmelen, F., Fensel, D., Klein, M., Broekstra, J., Erdmann, M. ve Horrocks, I., The semantic web: The roles of xml and rdf, IEEE Internet computing, 4, 5 (2000) 63–73.
49. Antoniou, G. ve Van Harmelen, F., Web ontology language: Owl, Handbook on ontologies, Springer (2004), 67–92.
50. Jin, J., Gubbi, J., Marusic, S. ve Palaniswami, M., An information framework for creating a smart city through internet of things, IEEE Internet of Things journal, 1, 2 (2014) 112–121.
51. Challenges in real-world edge computing architecture, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/iot-edge-computing-architecture.html>, accessed: 2019-08-15.

52. Cisco edge-to-enterprise iot analytics for electric utilities solution overview, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/big-data/solution-overview-c22-740248.html>, accessed: 2019-08-15.
53. Mukhopadhyay, S. C. ve Suryadevara, N. K., Internet of things: Challenges and opportunities, Internet of Things, Springer (2014), 1–17.
54. Ray, P. P., A survey on internet of things architectures, Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 30, 3 (2018) 291–319.
55. Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P. ve Abu-Mahfouz, A. M., A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges, IEEE access, 6 (2017) 3619–3647.
56. Wang, Y., Vasilakos, A. V., Jin, Q. ve Ma, J., Survey on mobile social networking in proximity (msnp): approaches, challenges and architecture, Wireless networks, 20, 6 (2014) 1295–1311.
57. Mosbah, A. B., Hammami, S. E., Mounsla, H., Afifi, H. ve Kamal, A. E., Enhancing device-to-device direct discovery based on predicted user density patterns, Computer Networks, 151 (2019) 245–259.
58. Sun, W., Yang, Z., Zhang, X. ve Liu, Y., Energy-efficient neighbor discovery in mobile ad hoc and wireless sensor networks: A survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16, 3 (2014) 1448–1459.
59. Liu, J., Chen, C. ve Ma, Y., Modeling neighbor discovery in bluetooth low energy networks, IEEE communications letters, 16, 9 (2012) 1439–1441.
60. Bohman, D., Frank, M., Martini, P. ve Scholz, C., Performance of symmetric neighbor discovery in bluetooth ad hoc networks, Informatik 2004–Informatik verbindet–Band 1, Beiträge der 34 Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik eV (GI).
61. Weik, M. H., Synchronous Network In Computer Science and Communications Dictionary, Springer, Boston, MA, 2001.
62. Flajolet, P., Gardy, D. ve Thimonier, L., Birthday paradox, coupon collectors, caching algorithms and self-organizing search, Discrete Applied Mathematics, 39, 3 (1992) 207–229.
63. McGlynn, M. J. ve Borbash, S. A., Birthday protocols for low energy deployment and flexible neighbor discovery in ad hoc wireless networks, Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (2001), 137–145.

64. Fang, S., Berber, S. M. ve Swain, A. K., Analysis of neighbor discovery protocols for energy distribution estimations in wireless sensor networks, 2008 IEEE International Conference on Communications, IEEE (2008), 4386–4390.
65. Vasudevan, S., Towsley, D., Goeckel, D. ve Khalili, R., Neighbor discovery in wireless networks and the coupon collector's problem, Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking (2009), 181–192.
66. Chen, L. ve Bian, K., Neighbor discovery in mobile sensing applications: A comprehensive survey, Ad Hoc Networks, 48 (2016) 38–52.
67. Nathanson, M. B., Elementary methods in number theory, volume 195, Springer Science & Business Media (2008).
68. Yang, K. W., Wang, M., Zou, K. J., Hua, M., Hu, J. J., Zhang, J., Sheng, W. ve You, X., Device discovery for multihop cellular networks with its application in lte, IEEE Wireless Communications, 21, 5 (2014) 24–34.
69. Megowan, P. J., Suvak, D. W. ve Knutson, C. D., Irda infrared communications: An overview, Counterpoint Systems Foundry, Inc, 96 (1996).
70. Chakraborty, G., Naik, K., Chakraborty, D., Shiratori, N. ve Wei, D., Analysis of the bluetooth device discovery protocol, Wireless Networks, 16, 2 (2010) 421–436.
71. Chen, B.-R., Cheng, S.-M. ve Lin, J.-J., Energy-efficient ble device discovery for internet of things, 2017 Fifth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR), IEEE (2017), 75–79.
72. Han, B., Li, J. ve Srinivasan, A., On the energy efficiency of device discovery in mobile opportunistic networks: A systematic approach, IEEE Transactions on Mobile Computing, 14, 4 (2014) 786–799.
73. Sikora, A. ve Groza, V. F., Coexistence of ieee802. 15.4 with other systems in the 2.4 ghz-ism-band, 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, volume 3, IEEE (2005), 1786–1791.
74. Lu, S., Shere, S., Liu, Y. ve Liu, Y., Device discovery and connection establishment approach using ad-hoc wi-fi for opportunistic networks, 2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), IEEE (2011), 461–466.
75. Hayat, O., Ngah, R., Hashim, S. Z. M., Dahri, M. H., Malik, R. F. ve Rahayu, Y., Device discovery in d2d communication: A survey, IEEE Access, 7 (2019) 131114–131134.
76. Yan, Y., Zhang, B. ve Li, C., Opportunistic network coding based cooperative retransmissions in d2d communications, Computer Networks, 113 (2017) 72–83.

77. Yang, X., Wang, X., Yang, R. ve Zhang, J., Full-duplex and compressed sensing based neighbor discovery for wireless ad-hoc network, 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE (2015), 1643–1647.
78. Ashraf, Q. M., Habaebi, M. H., Islam, M. R. ve Khan, S., Device discovery and configuration scheme for internet of things, 2016 International conference on intelligent systems engineering (ICISE), IEEE (2016), 38–43.
79. Albasry, H. ve Ahmed, Q. Z., Network-assisted d2d discovery method by using efficient power control strategy, 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE (2016), 1–5.
80. Madhusudhan, S., Jatadhar, P. ve Reddy, P., Performance evaluation of network-assisted device discovery for lte-based device to device communication system, Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET) www.jncet.org, 6, 8.
81. Xu, R., Li, J., Peng, L. ve Ye, Y., A neighbor discovery algorithm for full duplex ad hoc networks with directional antennas, The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), IEEE (2015), 5235–5240.
82. Pratas, N. K. ve Popovski, P., Network-assisted device-to-device (d2d) direct proximity discovery with underlay communication, 2015 IEEE global communications conference (GLOBECOM), IEEE (2015), 1–6.
83. Tang, H., Ding, Z. ve Levy, B. C., Enabling d2d communications through neighbor discovery in lte cellular networks, IEEE Transactions on Signal Processing, 62, 19 (2014) 5157–5170.
84. Kaleem, Z., Qadri, N. N., Duong, T. Q. ve Karagiannidis, G. K., Energy-efficient device discovery in d2d cellular networks for public safety scenario, IEEE Systems Journal, 13, 3 (2019) 2716–2719.
85. Jaffry, S., Zaidi, S. K., Shah, S. T., Hasan, S. F. ve Gui, X., D2d neighborhood discovery by a mobile device, ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), IEEE (2019), 1–6.
86. Sun, Y., Cao, J., Ma, M., Li, H., Niu, B. ve Li, F., Privacy-preserving device discovery and authentication scheme for d2d communication in 3gpp 5g hetnet, 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), IEEE (2019), 425–431.
87. Doppler, K., Ribeiro, C. B. ve Knecht, J., Advances in d2d communications: Energy efficient service and device discovery radio, 2011 2nd international conference on wireless communication, vehicular technology, information theory and aerospace & electronic systems technology (wireless VITAE), IEEE (2011), 1–6.

88. Benedetto, J. J., Cordwell, K. ve Magsino, M., *Cazac sequences and haarupâ€™s characterization of cyclic n-roots*, *New Trends in Applied Harmonic Analysis*, Volume 2, Springer (2019), 1–43.
89. Sesia, S., Toufik, I. ve Baker, M., *LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice*, John Wiley & Sons (2011).
90. Hayat, O., Ngah, R. ve Zahedi, Y., *Device discovery signal design for proximal devices in d2d communication*, *Wireless Personal Communications*, 108, 2 (2019) 865–878.
91. Synchronization signals (pss and sss), <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/-synchronization-signals-pss-and-sss.html>, accessed: 2018-04-11.
92. Nogu  t, D., Chandra, R. ve Mueck, M., *Tvws as an emerging application of cognitive radio*, *Orthogonal Waveforms and Filter Banks for Future Communication Systems*, Elsevier (2017), 35–51.
93. Akyildiz, I. F. ve Vuran, M. C., *Wireless sensor networks*, volume 4, John Wiley & Sons (2010).
94. Zhu, C., Leung, V. C., Yang, L. T. ve Shu, L., *Collaborative location-based sleep scheduling for wireless sensor networks integrated with mobile cloud computing*, *IEEE Transactions on Computers*, 64, 7 (2014) 1844–1856.
95. Ye, D. ve Zhang, M., *A self-adaptive sleep/wake-up scheduling approach for wireless sensor networks*, *IEEE transactions on cybernetics*, 48, 3 (2017) 979–992.
96. Mukherjee, M., Shu, L., Hu, L., Hancke, G. P. ve Zhu, C., *Sleep scheduling in industrial wireless sensor networks for toxic gas monitoring*, *IEEE Wireless Communications*, 24, 4 (2017) 106–112.
97. Gupta, H. P., Rao, S. V. ve Venkatesh, T., *Sleep scheduling for partial coverage in heterogeneous wireless sensor networks*, *2013 Fifth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, IEEE (2013), 1–10.
98. Tanenbaum, A. S. ve Wetherall D. J., *Computer networks*, Fifth Edition, Prentice Hall Press, USA, 2011.
99. Khan, S., Loo, J., Mauri, J. ve Ortiz, J., *Mobile ad hoc networks: Current status and future trends*, First Edition, CRC Press, Florida, 2011.
100. Khan, F., *LTE for 4G mobile broadband: air interface technologies and performance*, Cambridge university press (2009).
101. Gandotra, P., Jha, R. K. ve Jain, S., *A survey on device-to-device (d2d) communication: Architecture and security issues*, *Journal of Network and Computer Applications*, 78 (2017) 9–29.

102. Dahlman, E., Parkvall, S. ve Skold, J., 4G, LTE-advanced Pro and the Road to 5G, Academic Press (2016).
103. Chu, D., Polyphase codes with good periodic correlation properties (corresp.), IEEE Transactions on information theory, 18, 4 (1972) 531–532.
104. Molisch, A. F., Wireless communications, First Edition, John Wiley & Sons, 2012.
105. Radio-access-technology, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/radio-access-technology>, accessed: 2019-11-03.
106. 3GPP TS 125 402, Synchronisation in UTRAN Stage 2, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sophia Antipolis Cedex, 2017.
107. Cowley, J., Communications and networking: an introduction, Springer Science & Business Media, 2012.
108. Bai, F. ve Helmy, A., A survey of mobility models, Wireless Adhoc Networks, University of Southern California, USA, 206 (2004) 147.
109. Bettstetter, C., Hartenstein, H. ve Pérez-Costa, X., Stochastic properties of the random waypoint mobility model, Wireless Networks, 10, 5 (2004) 555–567.
110. Dahlman, E., Parkvall, S. ve Skold, J., 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband, Academic press, 2013.
111. McEliece, R. J., The theory of m-sequences, Finite Fields for Computer Scientists and Engineers, Springer (1987), 151–167.
112. Ahmadi, S., LTE-Advanced: a practical systems approach to understanding 3GPP LTE releases 10 and 11 radio access technologies, Academic Press, 2013.
113. Laya, A., Alonso, L. ve Alonso-Zarate, J., Is the random access channel of lte and lte-a suitable for m2m communications? a survey of alternatives, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16, 1 (2013) 4–16.
114. Zhang, X., LTE Optimization Engineering Handbook, John Wiley & Sons, 2018.
115. Kurkowski, S., Camp, T. ve Colagrosso, M., Manet simulation studies: the incredibles, Mobile Computing and Communications Review, 9, 4 (2005) 50–61.
116. Andrews, G. E. ve Eriksson, K., Integer partitions, Cambridge University Press, 2004.
117. Simulation manual, <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/>, accessed: 2019-05-10.
118. What is inet framework?, <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>, accessed: 2019-05-10.

119. Applicationlayernodebase, <https://doc.omnetpp.org/inet/api-current/neddoc/inet.node.base.ApplicationLayerNodeBase.html>, accessed: 2019-05-13.
120. Statebasedepenergyconsumer, <https://doc.omnetpp.org/inet/api-current/neddoc/inet.physicallayer.energyconsumer.StateBasedEpEnergyConsumer.html>, accessed: 2019-05-03.



ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Talha KAKIZ, ilköğrenimine İstanbul Genç Osman İlköğretim Okulu'nda başlamış, Malatya Cengiz Topel İlköğretim Okulunda ilköğrenimini tamamladı. Lise öğrenimini Malatya Turgut Özal Anadolu Lisesinde tamamladı. 2008 yılında öğrenime hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünden 2012'de mezun oldu. Aynı yılın sonunda, Millî Eğitim Bakanlığının YLSY burs programına hak kazanarak Gazi Üniversitesinde dil eğitimini tamamladı ve 2013 yılında İngiltere Leicester Üniversitesinde düzenlenen iki aylık pre-sessional kursunun ardından aynı kurumun İleri Bilgisayar Bilimleri Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. “Lider Seçimi, Karşılıklı Dışlama, Saat Senkronizasyonu Dağıtık Sistemler Algoritmalarının Animasyonu (Animation of Distributed Systems: Leader Election, Mutual Exclusion, Clock Synchronization)” adlı yüksek lisans tezini 2014 yılında tamamladı. 2015 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde göreve başladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Doktora tez sürecinde SCI / SCI-Expanded indeksli dergilerde 3, uluslararası konferanslarda 4 olmak üzere toplam 7 yayın yaptı. Nesnelerin interneti, şebeke (grid) bilişim, yazılım tabanlı ağlar, dağıtık hesaplama konuları ilgi alanlarını oluşturan konulardır. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam eden Muhammet Talha KAKIZ, evli bir çocuk babasıdır. Tez süresi boyunca yayınlanan eserleri aşağıda verilmiştir:

SCI / SCI-Expanded İndeksli Dergi Yayınları

Çavdar, T., ve Kakız M. T., Threshold-based negotiation framework for grid resource allocation, IET Communications, 11,14 (2017) 2236-2243.

Çavdar, T., Kakız, M. T., Günay, F. B., ve Ebrahimpour, N., SERDP: Signature-based and energy-efficient relay discovery protocol for Internet of Things in cellular networks, International Journal of Communication Systems, 34,12 (2021) e4898.

Çavdar, T., Günay, F. B., Ebrahimpour, N., ve Kakız, M. T., An Optimal Anchor Placement Method for Localization in Large-Scale Wireless Sensor Networks, Intelligent Automation & Soft Computing, (Accept).

Uluslararası Konferans Yayınları

Kakız, M. T., Öztürk E., Çavdar, T., A Novel SDN-based IoT Architecture for Big Data, International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Eylül 2017, Malatya, Bildiri Kitabı, 140-144.

Kakız, M. T., Öztürk, E., Çavdar, T., Network Slicing on 5G Mobile Networks: A Review, Research Issues and Challenges, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS17), Ekim 2017, Elâzığ, Bildiri Kitabı, 2049-2055.

Günay, F. B., Kakız M. T., Çavdar, T., Designing an Early Warning System for Avalanches Using Wireless Sensor Networks, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS17), Ekim 2017, Elâzığ, Bildiri Kitabı, 2193-2197.

Öztürk, E., Kakız M. T., Çavdar, T., The Economical Importance and Contribution of Information Technologies to Rural and Regional Development: An Empirical Analysis, 4th International Regional Development Conference (IRDC 17), Eylül 2017, Tunceli, Bildiri Kitabı, 694-699.