

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

“IETF 6TiSCH Ağlar İçin Q-Öğrenme Algoritmasından Esinlenilmiş Amaç Fonksiyonu Optimizasyonu” isimli bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılmıştır.

Çalışmam süresince danışmanlığımı üstlenen değerli hocam Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ'e ilgi, destek ve tecrübelerini esirgemediğimle benimle paylaştığı ve her zaman daha iyisinin yapılabileceği düsturunu daima rehber edinmemi sağladığı için teşekkürlerimi sunarım. Yine her soruma sabırla cevap veren değerli arkadaşlarım Hakan AYDIN ve Burak AYDIN'a teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Eğitimim boyunca manevi olarak daima destekçim olan sevgili eşime, kızıma, anneme, babama, kardeşlerime ve dostlarıma bana gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı şükranlarımı sunarım.

Tayfun BEKAR

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum IETF 6TiSCH AĞLAR İÇİN Q-ÖĞRENME ALGORİTMASINDAN ESİNLENİLMİŞ AMAÇ FONKSİYONU OPTİMİZASYONU başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ'ün 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. 13/06/2023

Tayfun BEKAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	3
1.2. Problemin Tanımı.....	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
3. IETF 6TiSCH AĞLAR İÇİN PROTOKOL YİĞİNİ.....	9
3.1. IEEE 802.15.4 Standartı.....	9
3.2. IEEE 802.15.4e (TSCH).....	10
3.3. 6LoWPAN.....	11
3.4. 6TiSCH Mimarisi	13
3.5. RPL	14
3.6. Amaç Fonksiyonları	17
3.6.1. Amaç Fonksiyonu-0 (OF-0).....	18
3.6.2. Minimum Dereceli Histeresiz Amaç Fonksiyonu (MRHOF)	18
4. PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME	21
4.1. Q-Öğrenme Algoritması.....	21
5. YAPILAN ÇALIŞMA	24
5.1. Önerilen Algoritma	24
5.2. Contiki İşletim Sistemi.....	28
5.3. Cooja Benzetim Ortamı.....	29
5.4. Test Ortamı Özellikleri	30
5.5. Başarım Ölçütleri	31
5.5.1. Paket İletim Oranı (PDR).....	32

5.5.2. Ortalama Paket Gecikmesi	35
5.5.3. TSCH MAC Katmanındaki Paket Kayıpları	36
5.5.4. Ebeveyn Değiştirme Girişimi Sayısı	39
5.5.5. İletim Gerçekleşen Ebeveyn Değiştirme Sayısı	41
6. SONUÇ	43
7. EKLER	44
8. KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİş	



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

IETF 6TiSCH AĞLAR İÇİN Q-ÖĞRENME ALGORİTMASINDAN ESİNLENİLMİŞ AMAÇ FONKSİYONU OPTİMİZASYONU

Tayfun BEKAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ
2023, 52 Sayfa

Kablosuz Duyarga Ağları (KDA) çevresel izleme, ev otomasyonları, tarımsal üretim, sağlık takip, askeri gözlem, endüstriyel otomasyon, akıllı şebekeler ve akıllı şehirler gibi çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. KDA'ların internete bağlanabilirliği IETF (İnternet Mühendisliği Görev Gücü) tarafından geliştirilen protokol yığınlarıyla sağlanabilmektedir. IETF 6TiSCH protokol yığını endüstriyel uygulamalarda kullanılacak verimli, güvenli ve ölçeklenebilir nitelikleriyle düşük güçlü kablosuz duyarga ağlarını desteklemek amacıyla IPv6 internet protokolünün bir uzantısı olarak tanımlanmıştır. 6TiSCH protokolü zaman paylaşımı/kanal atlamalı ve dinamik kaynak gereksinimi olan bir mekanizmaya sahiptir. Ancak kablosuz düğümlerin sık sık yönlendirme rotası değiştirmesi kaynakların tekrar düzenlenmesi gerektirmektedir. Bu durum ek hesaplama yükünden dolayı fazla enerji tüketimine ve yüksek haberleşme maliyetine sebep olmaktadır. 6TiSCH ağların yönlendirme katmanında Düşük Güçlü ve Kayıplı Ağlar için IPv6 Yönlendirme Protokolü (RPL) kullanılır. RPL, yönlendirme kararlarını amaç fonksiyonlarına göre belirler. Bu çalışmada Q-Öğrenme algoritmasından esinlenilerek geliştirilen RPL amaç fonksiyonu optimizasyonu ile ağı oluşturan düğümlerin sık rota değiştirmesi sorununa yeni bir çözüm sunulmaktadır. Geliştirilen yöntemle, yönlendirme süreçlerinde karşılaşılan uçtan uca paket iletim süresinin yüksekliği, tampon bellekteki paket kayıplarının fazlalığı gibi gerçek zamanlı uygulama sorunları iyileştirilmektedir. Güç kaynağı, bellek ve hesaplama kapasitesi sınırlı KDA'larda önceki durumlar ve kritik öneme sahip metrikler kullanılarak daha kararlı bir ağ yapısı elde edilmekte, ağın başarımı ve güvenilirliği artırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: IoT, Kablosuz Duyarga Ağları, Makine Öğrenmesi,
Q-Öğrenme, IETF 6TiSCH Ağlar, RPL Amaç Fonksiyonları

SUMMARY

Master Thesis

Q-LEARNING ALGORITHM INSPIRED OBJECTIVE FUNCTION OPTIMIZATION FOR IETF 6TiSCH NETWORKS

Tayfun BEKAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Sedat GÖRMÜŞ
2023, 52 Pages

Wireless Sensor Networks (WSNs) are used in a wide variety of application areas such as environmental monitoring, home automation, agricultural production, health monitoring, military surveillance, industrial automation, smart grids and smart cities, and their connectivity to the Internet can be ensured by protocol stacks developed by the IETF (Internet Engineering Task Force). The IETF 6TiSCH protocol stack is defined as an extension of the IPv6 Internet protocol to support low-power wireless sensor networks with efficient, secure and scalable characteristics for industrial applications. The 6TiSCH protocol has a time-slotted/channel-hopping mechanism with dynamic resource requirements. However, the frequent path changes of wireless nodes require reorganization of resources. This leads to energy consumption and high communication cost due to the additional computational overhead. 6TiSCH networks use the IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) at the routing layer. RPL makes routing decisions based on objective functions. In this paper, we present a new solution to the problem of frequent path changes of nodes in the network by optimizing the RPL objective function inspired by the Q-Learning algorithm. The proposed method improves real-time application problems encountered in routing processes such as high end-to-end packet transmission delay and high packet losses in buffer. With the proposed algorithm, a more stable network structure is obtained by utilizing the previous states and critical metrics in the case of limited power, memory and computational capacity of the WSNs, improving the performance and reliability of the network.

Key Words: IoT, Wireless Sensor Networks, Machine Learning,
Q-Learning, IETF 6TiSCH Networks, RPL Objective Functions

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Günümüzde IoT ve KDA'ların kullanım alanları	1
Şekil 1.2. Senkron RPL ağı ve olası problemlere örnekler	5
Şekil 3.1. IEEE 802.15.4 frekans bantları	9
Şekil 3.2. Örnek TSCH çizelgesi	11
Şekil 3.3. 6LoWPAN ağlarda yönlendirme türleri	12
Şekil 3.4. İnternet protokolü ve 6TiSCH protokol yığını	13
Şekil 3.5. Üç DODAG içerek bir RPL ağı topolojisi	15
Şekil 3.6. MRHOF kullanılan bir ağda ETX ile hesaplanan Rank değerleri	19
Şekil 4.1. Pekiştirmeli Öğrenme / Q-Öğrenme modeli	22
Şekil 5.1. Contiki OS'nin genel mimari yapısı	28
Şekil 5.2. Cooja'da benzetimi yapılan bir ağ	29
Şekil 5.3. 20 Düğüm için ortalama paket iletim oranları	32
Şekil 5.4. 30 Düğüm için ortalama paket iletim oranları	33
Şekil 5.5. 40 Düğüm için ortalama paket iletim oranları	33
Şekil 5.6. 20 Düğüm için ortalama paket gecikme süreleri	35
Şekil 5.7. 30 Düğüm için ortalama paket gecikme süreleri	36
Şekil 5.8. 40 Düğüm için ortalama paket gecikme süreleri	36
Şekil 5.9. 20 Düğüm için ortalama paket kayıpları	37
Şekil 5.10. 30 Düğüm için ortalama paket kayıpları	38
Şekil 5.11. 40 Düğüm için ortalama paket kayıpları	38
Şekil 5.12. 20 Düğüm için ebeveyn değiştirme girişimleri sayısı	39
Şekil 5.13. 30 Düğüm için ebeveyn değiştirme girişimleri sayısı	40
Şekil 5.14. 40 Düğüm için ebeveyn değiştirme girişimleri sayısı	40
Şekil 5.15. 20 Düğüm için iletim gerçekleşen ebeveyn değiştirme sayısı	41
Şekil 5.16. 30 Düğüm için iletim gerçekleşen ebeveyn değiştirme sayısı	42
Şekil 5.17. 40 Düğüm için iletim gerçekleşen ebeveyn değiştirme sayısı	42

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. MSP-EXP430F5438 teknik özellikleri	30
Tablo 5.2. Cooja benzetim ortamı parametreleri	31
Tablo 5.3. Ortalama PDR ve standart sapma değerleri.....	34



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

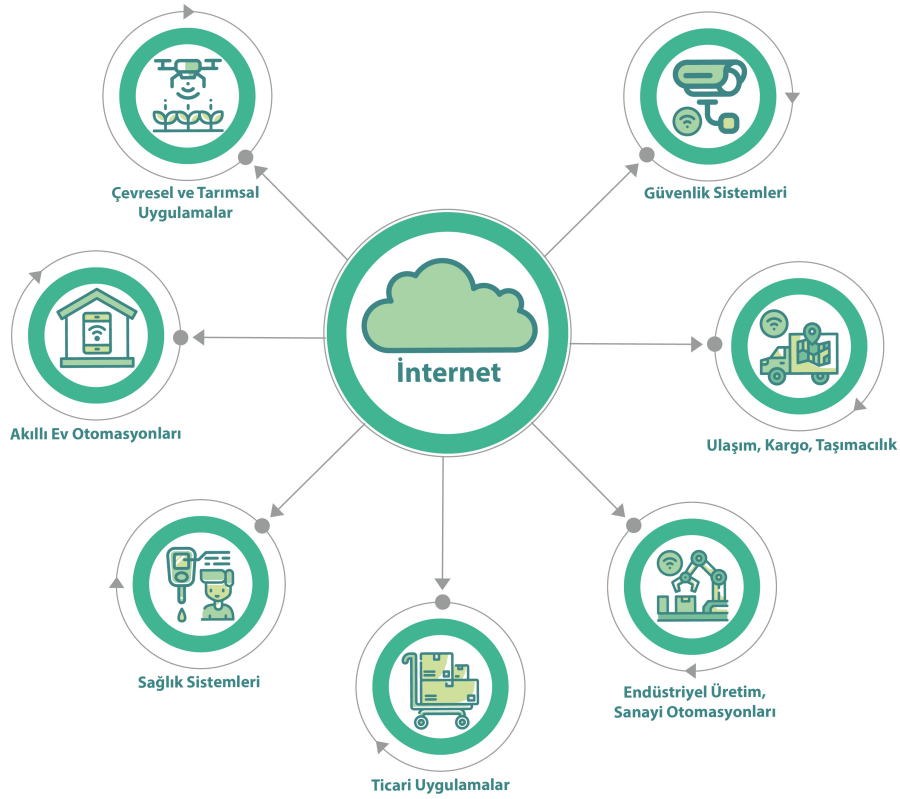
α	: Öğrenme katsayısı (0,1)
γ	: Ödül oranı (0,9)
β	: ETX değerini sınırlandıran tasarımsal çarpan (0,8)
S_t	: Q-Öğrenme yöntemine göre içinde bulunulan durum
A_t	: Bulunulan durumda yapılacak aksiyon
$Q_N(S_t, A_t)$	: İçinde bulunulan durumun Q değeri
$Q_{N+1}(S_t, A_t)$	: Hesaplanacak Q değeri
$R(S_t, A_t, S_{t+1})$	: Toplam ödül puanı
P_i	: Paketin hedef tarafından alınmasının ölçülen olasılığı
P_a	: Paketin gönderen tarafından alınmasının ölçülen olasılığı
6LoWPAN	: IPv6 Üzerinden Düşük Güçlü Kablosuz Kişisel Alan Ağı (IPv6 Over Low PowerWireless Personel Area Network)
6TiSCH	: Zaman Paylaşımlı Kanal Atlamalı MAC Üzerinden IPv6 Yönlendirme (IPv6 over TSCH)
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
CSMA/CA	: Çarpışma Algılayıcıyla Taşıyıcı Dinleyen Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
CoAP	: Sınırlı Uygulama Protokolü (Constrained Application Protocol)
Contiki-NG	: Contiki New Generation
DAG	: Yönlendirilmiş Döngüsel Graf (Directed Acyclic Graphs)
DAO	: Hedef Tanıtım Nesnesi (Destination Advertisement Object)
DAO-ACK	: Hedef Tanıtım Nesnesi Onayı (Destination Advertisement Object-Acknowledge)
DIO	: DODAG Bilgi Nesnesi (DODAG Information Object)
DIS	: DODAG Bilgi Toplama Nesnesi (DODAG Information Solicitation)
DODAG	: Hedefe Yönelik-Yönlendirilmiş Döngüsel Graf (Destination-Oriented DAG)
DV	: Uzaklık Vektörü (Distance Vector)
ETX	: Beklenen İletim Sayısı (Expected Transmission Count)
GHz	: Gigahertz

I2C	: Seri Veriyolu Haberleşme Protokolü (Inter-Integrated Circuit)
ICMPv6	: İnternet Kontrol Mesaj Protokolü Sürüm 6 (Internet Control Message Protocol Version 6)
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IETF	: İnternet Mühendisleri Görev Gücü (Internet Engineering Task Force)
ID	: Tanımlayıcı (Identifier)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IP	: İnternet Protokolü Sürüm 4
IPv6	: İnternet Protokolü Sürüm 6 (Internet Protocol Version 6)
Kbps	: Kilobit-saniye (Kilobit per second)
KB	: Kilo Bayt
KDA	: Kablosuz Duyarga Ağı
LR-WPAN	: Düşük Güçlü Kablosuz Kişisel Alan Ağı (Low-Rate Wireless Personal Area Network)
LBR	: Düşük Güçlü ve Kayıplı Sınır Yönlendirici (Low Power and Lossy Border Router)
MAC	: Ortam Erişim Kontrolü (Media Access Control)
MCU	: Mikro Denetleyici (Micro Controller Unit)
MHz	: Megahertz
MP2P	: Çok Noktadan Tek Noktaya Trafik (Multipoint to point)
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport
MRHOF	: Minimum Dereceli Histeresiz Amaç Fonksiyonu (Minimum Rank with Hysteresis Objective Function)
MTU	: Maksimum İletim Birimi (Maximum Transmission Unit)
OF	: Amaç Fonksiyonu (Objective Function)
OF-0	: Amaç Fonksiyonu Sıfır (Objective Function Zero)
OS	: İşletim Sistemi (Operation System)
P2MP	: Noktadan Çok Noktaya Trafik (Point to Multipoint Traffic)
PDR	: Paket İletim Oranı (Packet Delivery Ratio)
PC	: Güç Tüketimi (Power Consumption)
PHY	: Fiziksel Katman (Physical Layer)
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek (Random Access Memory)

RFC	: Açıklama İsteği / IETF Standartları (Request For Comments)
ROM	: Read Only Memory
ROLL	: Düşük Güçlü ve Kayıplı Ağlar Üzerinde Yönlendirme (Routing over Low Power and Lossy Links)
RPL	: Düşük Güçlü Kayıplı Ağlar İçin IPv6 Yönlendirme Protokolü (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks)
RSSI	: Alınan Sinyali Gücü (Received Signal Strength Indicator)
Rx	: Başarılı Alım Yüzdesi
SPI	: Seri Çevresel Arayüzü (Serial Peripheral Interface)
TCP	: İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol)
TCP/IP	: TCP/IP Protokol Yığını (Transmission Control Protocol and Internet Protocol Stack)
TD Learning	: Zamansal Fark Öğrenmesi (Temporal Difference Learning)
TSCH	: Zaman Paylaşım Kanal Atlama (Time Slotted Channel Hopping)
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UDGM	: Birim Disk Grafik Ortamı (Unit Disk Graph Medium)
UDP	: Kullanıcı Datagram Protokolü (User Datagram Protocol)
UART	: Evrensel Asenkron Alıcı/Verici (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
YÖK	: Yüksek Öğretim Kurumu
XMPP	: Genişletilebilir Mesajlaşma ve Varlık Protokolü (Extensible Messaging and Presence Protocol)
WPAN	: Kablosuz Kişisel Alan Ağı (Wireless Personal Area Network)
WSN	: Wireless Sensor Network

1. GENEL BİLGİLER

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) kavramı ilk olarak, 1999 yılında Kevin Ashton tarafından ortaya atılmış ve kullanılmış bir tanımlamadır. O dönemde internete bağlı cihazlar arasındaki iletişimi ifade etmek için kullanılmıştır. Ancak iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesiyle birlikte cihazlar, duyargalar, elektronik araçlar ile bilgisayarlar arasındaki bağlantılar giderek artmış ve 2000'li yılların başında IoT kavramının, bu cihazların internete bağlanabilirliğini ifade etmek için kullanılması benimsenmiştir. Günümüzde ise, IoT teknolojileri; ev otomasyonları, tarımsal üretim süreçlerinin kontrolü, sağlık takip sistemleri, endüstriyel otomasyon sistemleri, akıllı şebekeler ve akıllı şehirler gibi gündelik hayatımızın bir parçası haline almasıyla bir çok teknolojik araç-gerecin her yerden ve her zaman erişilebilen nitelikte olmasını tanımlamaktadır.



Şekil 1.1. Günümüzde IoT ve KDA'ların kullanım alanları

IoT teknolojileri; özellikle üretim tesisleri, petrol kuleleri ve elektrik şebekeleri gibi endüstriyel ortamlarda, üretim, taşımacılık, sağlık, tarım ve akıllı şebeke sistemleri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. IoT'nin, endüstriyel ekipmanın uzaktan izlenmesine ve kontrol edilmesine olanak tanıyarak verimliliği artırması hedeflenmektedir. Ayrıca IoT teknolojileriyle kestirimci bakım, optimizasyon ve otomasyon için kullanılabilecek büyük verilerin toplanması amaçlanmaktadır. Bu veriler, makine öğrenimi veya veri madenciliği yöntemleri ile işlenerek olası sorunlar önceden tespit edilebilir, önleyici bakım çalışmaları yapılabilir ve bu şekilde hem sürdürülebilirlik sağlanır hem de üretim ve işletme maliyetleri azaltılabilir.

Kablosuz Duyarga Ağları (Wireless Sensor Networks - WSN), herhangi bir ortamda meydana gelen çevresel, fiziksel, kimyasal ve elektromanyetik değişimleri izlemek ve veri toplamak için kullanılan bir kablosuz duyarga düğümleri ağıdır. KDA'lardaki her düğüm, bir veya daha fazla algılayıcı, bir mikrodenetleyici ve bir kablosuz alıcı-verici ile donatılmıştır. Düğümler, topladıkları verileri iletmek için birbirleriyle ve merkezi bir baz istasyonu ile iletişim kurar. Günümüzde KDA'lar, çevresel izleme, endüstriyel otomasyon ve askeri gözetim dahil olmak üzere çok çeşitli uygulama alanlarında etkin olarak kullanılmaktadır. IoT'nin en önemli hedeflerinden birinin her zaman ve her yerde internete bağlanabilen cihazlar, sistemler ortaya koymak olduğu göz önünde bulundurulduğunda; KDA'ların veri toplamak için kullanılabilen bir IoT teknolojisi türü olduğu ya da KDA'lar tarafından toplanan verilerin, IoT işlevselliğini etkinleştirmek için kullanıldığı söylenebilir.

1.1. Giriş

Bir ortamdan izlenmek istenen verilerin alınıp yerel olarak işlenmesi ve değerlendirilmek amacıyla bir toplama noktasına veya bir sınır yönlendiriciye, oradan da merkezi bir sunucuya veya internete iletilmesini sağlayan yazılım ile birbirleriyle radyo sinyalleri aracılığı ile haberleşen donanımların oluşturduğu sisteme Kablosuz Duyarga Ağları (KDA) adı verilir. KDA'lar küçük boyutu, uygun maliyeti ve kolayca kurulabilir yapısı nedeniyle bazı gerçek zamanlı uygulamalar için en umut verici teknolojilerden biridir (Gulyani vd., 2020). KDA'ları oluşturan donanım bileşenlerinin güç kaynağı, radyo iletişim mesafesi, işlemci gücü ve bellek kapasitesi gibi belirli kısıtları mevcut olup (Kumar vd., 2019) uygulamanın niteliklerine göre bu sınırlılıklar göz önünde bulundurularak farklı ağ topolojileri oluşturulmaktadır.

Gerçekleştirilecek uygulamanın amacına göre KDA'larda çok sayıda duyarga düğümü yer alabilir ve bu düğümlerin konumları dinamik olarak değişiklikler de gösterebilir. Çevresel ve fiziksel şartların değişimi ağı başarımını, düğümlerin yaşam sürelerini olumsuz olarak etkiler. Oldukça dinamik bir yapıya sahip olan kablosuz algılayıcı ağlarının geleneksel yaklaşımlarla programlanmış olması ağı sürekli değişkenlik gösteren durumlara uyum sağlamasını ciddi biçimde engelleyebilmekte, başarımı ve verimi düşürmektedir (Gulyani vd., 2020). Böyle bir sistemi yüksek başarımla yönetmek, ölçeklenebilir ve verimli algoritmalar gerektirir. Bu bağlamda; geleneksel programlama yöntemlerinin yerine Makine Öğrenimi tekniklerinin kullanılması; kendi performansını iyileştirmeyi öğrenebilen yapısıyla (Kumar vd., 2019), genelleştirilmiş çözümler sağlama yeteneği sayesinde, kaçınılmaz hale gelmektedir. Makine öğrenimi, sistemin çalışma süreçlerinden elde edilen deneyimle otomatik olarak kendi kendini geliştirebilen (öğrenen) ve yeniden programlanmaya ihtiyaç duymadan, deneyimlerden faydalanarak kararlar verebilen bir süreçtir (Mitchell, 1997).

Matematiksel teorisinin ortaya çıktığı 20.yüzyılın ortalarından itibaren makine öğrenimi, mevcut sistemlerin kullanıcı deneyimini sürekli olarak daha ileri seviyelere taşımaktadır. KDA'larda makine öğreniminin uygulanması ise yalnızca KDA'ların performansını iyileştirmekle kalmaz, hem ön görülemeyen süreçlerin daha iyi ve verimli bir şekilde yönetilebilmesini sağlar hem de insan müdahalesini azaltarak yeniden programlama gibi güçlükleri ortadan kaldırır.

Makine öğrenimi temelde Denetimli/Danışmanlı Öğrenme, Denetimsiz/Danışmansız Öğrenme, Yarı Denetimli Öğrenme ve Pekiştirmeli Öğrenme olarak sınıflandırılmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme yöntemleri, çevre ile etkileşime girerek sürekli olarak öğrenir ve belirli eylemleri gerçekleştirmek için bilgi toplar (Kumar vd., 2019). Topalanan bilgi istatistiksel yöntemlerle değerlendirilerek olasılık değeri en yüksek olan seçenek en iyi tercih olarak belirlenir. Q-Öğrenme tekniği, model içermeyen pekiştirmeli öğrenme yaklaşımlarından biridir (Watkins & Dayan, 1992). Yani öğrenme sürecinde herhangi bir ön bilgi (etiketli veri) gerektirmez. Bu özelliğiyle Q-Öğrenme yöntemi KDA'ların dinamik olarak değişkenlik gösteren yapısına uygun bir makine öğrenimi tekniğidir.

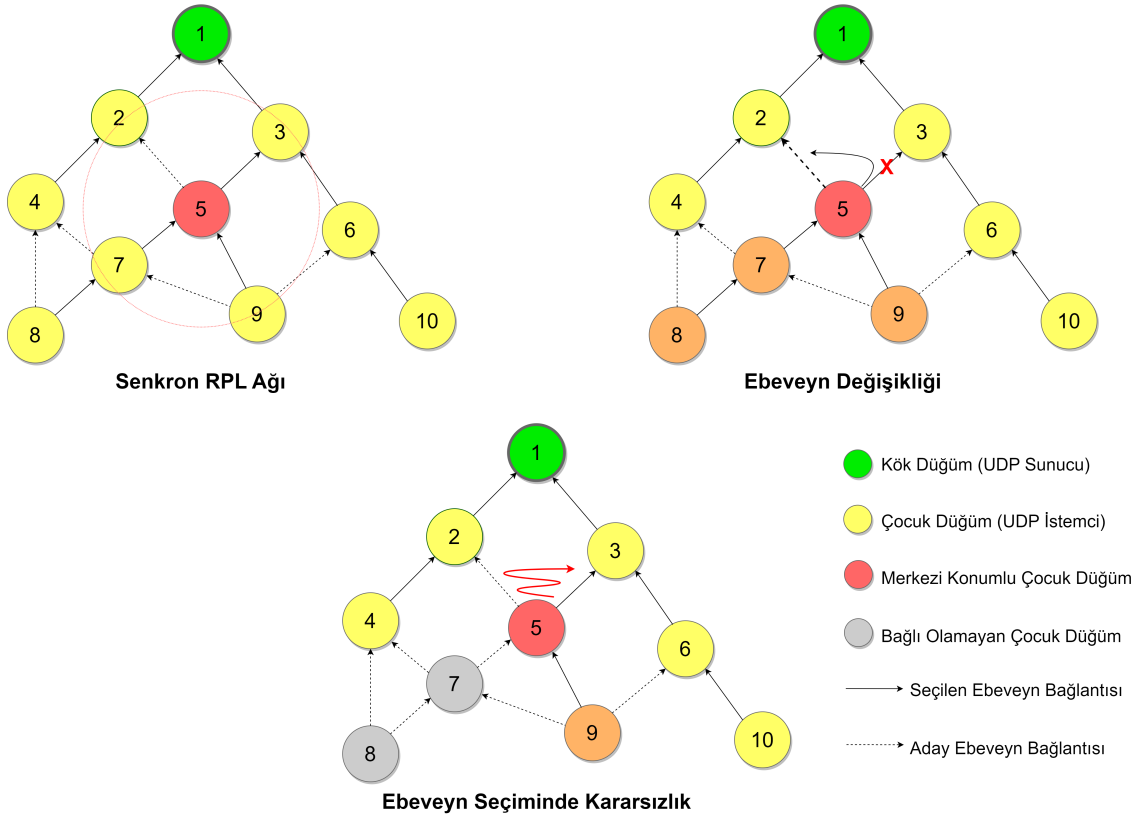
1.2. Problemin Tanımı

Endüstriyel ortamlarda kullanılan iletişim sistemlerinin en önemli sorunlarından biri gerçek zamanlı olarak ve minimum hatayla çalışabilmelerinin beklenmesidir. Çok geniş uygulama alanları olan KDA'lar askeri, tıbbi, kimyasal, tarımsal ve endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Akyildiz vd., 2002; Okay & Özdemir, 2014). KDA'ları oluşturan donanım bileşenleri, yapıları gereği belirli kısıtlara sahiptir. Bu sınırlılıklar; güç kaynağı, radyo iletişim mesafesi, işlemci gücü ve bellek kapasitesidir.

KDA'ların internete bağlanabilirliğini sağlamak amacıyla IETF (İnternet Mühendisliği Görev Gücü) tarafından geliştirilen protokol yığınları kullanılır. IETF 6TiSCH (Vilajosana vd., 2017) protokol yığını KDA'ları internete bağlamak amacıyla IPv6 internet protokolünün bir uzantısı olarak tanımlanmıştır. 6TiSCH ağlarda yönlendirme işlemleri için Düşük Güçlü ve Kayıplı Ağlar için IPv6 Yönlendirme Protokolü (RPL) kullanılmaktadır (Kushalnagar vd., 2007). RPL protokolünde bir düğümün hangü üst düğümü kullanarak iletim yapacağını belirlebilmesi için Amaç Fonksiyonu adı verilen algoritmalar bulunur. Bu algoritmalar düğümlerin atlama sayısı, enerji ölçümü, iletim kalitesi, gecikme, alınan radyo sinyali gibi çeşitli özelliklere göre karar vererek, en uygun rotanın yönlendirme için seçilmesini sağlamaktadır (Gnawali & Levis, 2012). Bu yönüyle RPL protokolünün uygulamaya veya ihtiyaca göre özelleştirilmesi konusu halen açık bir araştırma alanıdır.

Bu çalışma IETF 6TiSCH mimarisini kullanan KDA'larda standart yönlendirme protokolü olan RPL'in karar mekanizmasını makine öğrenimi teknikleriyle iyileştirmeye odaklanmaktadır. IETF 6TiSCH ağlarda bir düğümün yönlendirme rotasını değiştirmesi;

önceki üst öğeye (ebeveyne) ayrılan iletim kanallarının geri alınıp yeni ebeveynin ihtiyaç duyacağı kaynakların planlanması gibi hesaplama işlemleri gerektirmektedir. Bu durum kısıtlı güç kaynağı, sınırlı hesaplama kapasitesi ve belleği olan düğümler için yüksek maliyetli bir süreçtir. KDA düğümlerinde yönlendirme rotası belirlenirken önceki durumlar ile ağın başarımını doğrudan etkileyen metrikler kullanılarak RPL protokolünün daha tutarlı yönlendirme yapabilmesi, ebeveyn değiştirme girişimlerinin ve dolayısıyla paket kayıplarının azaltılması hedeflenmektedir.



Şekil 1.2. Senkron RPL ağı ve olası problemlere örnekler

2. LİTERATÜR TARAMASI

Deterministik olmayan sistemlerin performansını artırmak için makine öğrenmesi teknikleri sıklıkla tercih edilmektedir. Bu kapsamda, IETF 6TiSCH ağlarda standart haline gelen RPL yönlendirme protokolüne yönelik iyileştirmeler ve bu çalışmalarda hangi makine öğrenmesi yöntemlerinin nasıl kullanıldığını araştırılmıştır. Uluslararası veri tabanları IEEEExplore, Springer, Scopus, Elsevier ve Google Scholar, ulusal veri tabanları olan YÖK Ulusal Tez Merkezi ve TÜBİTAK Dergipark başta olmak üzere çevrimiçi akademik kaynaklar ile RFC kaynakları taranmıştır.

Kumar vd. 2019 yılında yayınladıkları "Machine learning algorithms for wireless sensor networks: A survey" adlı çalışmada KDA'larda karşılaşılan farklı sorunlar ve bu sorunların çözümünde uygulanan makine öğrenimi yöntemlerini derlemiş, yapılan çalışmaların hangi alanlara yoğunlaştığını istatistiksel verilerle açıklanmıştır. Bu tez çalışmasının temel motivasyon kaynaklarından biri olan makalede makine öğreniminin KDA'lar için avantajları ve dezavantajları ayrıntılı biçimde irdelenmiştir. KDA'ların enerji kısıtlılığı ile makine öğrenimi algoritmalarının yüksek hesaplama karmaşıklıkları arasında ters orantılı bir ilişki olabileceği vurgulanmış, bir çok makine öğrenimi tekniğinin performansının geçmiş verilerin analizi ve veri miktarıyla doğru orantılı olabileceği ifade edilmiştir. Öte yandan makine öğreniminin kendi performansını iyileştirmeyi öğrenebilen yapısıyla, genelleştirilmiş çözümler sağlama yeteneği ve insan müdahalesini veya yeniden programlama gibi güçlükleri de ortadan kaldıracak avantajlarının KDA'larda karşılaşılan bir çok sorunun çözümüne olumlu yönde katkı sağladığı vurgulanmıştır. Yazarlar tarafından KDA'larda uygulanan makine öğrenimi yöntemleri temel makine öğrenimi alanlarına göre sınıflandırılmış, çoğunun denetimli öğrenme algoritmaları (%67) olduğu, denetimsiz öğrenme yaklaşımları (% 18) ve pekiştirmeli öğrenme yaklaşımları (% 15) ile sınırlı sayıda çalışma gerçekleştirildiği ifade edilmektedir.

Sarao'nun 2019 yılında yayınlanan "Machine Learning and Deep Learning Techniques on Wireless Networks" adlı çalışmasında makine öğrenimi tekniklerinin, insan benzeri tahmin veya karar verme sürecini gerçekleştirebileceği ifade edilmektedir. Aynı makalede bir makine öğrenimi metodu olan pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin, KDA'larda hem paket

yönlendirme kararlarını hem de düğüm hareketliliğini kontrol etmek için kullanılabilir olduğu ve ağın bağlanabilirliğini önemli ölçüde geliştirdiği ifade edilmektedir.

Ancillotti vd. 2017 yılında yayınladıkları çalışmada, RPL tabanlı KDA'larda, yönlendirme protokolünde kullanılan bağlantı kalitesi metriğinin tahmininde Q-öğrenme algoritmasından faydalanmaktadır. Yazarlar RL-Probe adı verdikleri teknikle, önceliklerine ve komşuluk durumlarına göre kümelenen düğümler üzerinden örneklenen RSSI değerlerini ve ETX metriğini kullanarak bağlantılardaki ani değişimleri tespit etmektedirler. RL-Probe, bağlantı kalitesi hakkında güncel bilgileri korumak için hem eşzamanlı hem de eşzamansız izleme mekanizmalarını birleştirmekte ve ardından yönlendirme değişikliklerini, ağı kesintiye uğratmadan hesaplama ek yükünü de en aza indirgeyerek ve enerji tüketimini azaltarak bağlantı kalitesini iyileştirmektedir.

Farag ve Stefanovič, "Congestion-Aware Routing in Dynamic IoT Networks: A Reinforcement Learning Approach" adlı çalışmalarıyla, düğüm tıkanıklığını azaltmak ve RPL ağlarının yönlendirme performansını iyileştirmek için pekiştirmeli öğrenme tabanlı yönlendirme yaklaşımını önermektedir. Her düğüm, bileşik bir geri bildirim işlevine dayalı olarak tercih edilen ebeveyni seçmek için Q-Öğrenme tekniğini benimser. Düğümlerin oluşturduğu Q-tablosu, her düğümdeki yönlendirme tablosuna karşılık gelir ve eylem ise tercih edilen ebeveynin seçimini temsil eder. Öğrenme hedefi, tıkanıklık seviyesi ve bağlantı kalitesi gibi ağ dinamiklerine göre en uygun ebeveyn seçim politikasını bulmaktır. Yazarlar çalışmalarını, fiziksel katmanda IEEE 802.15.4 ve bağlantı katmanında CSMA/CA kanal erişim mekanizmasını kullanan 30 düğümlük ağlar için MATLAB benzetim ortamında gerçekleştirmektedir.

Kuwelkar ve Virani (2021), yaptıkları çalışmada bulanık mantık temelli bir amaç fonksiyonu tanıtmaktadır. RPL-FZ adı verdikleri amaç fonksiyonu; beklenen iletim sayısı (Expected Transmission Count - ETX), atlama sayısı (hop count) ve düğümlerin artık enerji seviyelerini incelemekte ve geliştirdikleri bulanık mantık algoritmasıyla karma bir metrik oluşturmaktadır. Oluşturulan bulanık kuralların değerlendirilmesi, yüksek kalite ve doğruluk puanına sahip komşunun bulanık komşu alt kümelerindeki üyeliğini verir. Kalite puanı daha yüksek olan komşu, tercih edilen ebeveyn olarak seçilmektedir. Araştırmacılar, önerdikleri yöntemi Cooja benzetim ortamında gerçek zamanlı Contiki işletim sistemiyle çalışan ve CSMA/CA kanal erişim mekanizmasını kullanan Tmote Sky düğümlerde test etmiş, yöntemin başarımını standart amaç fonksiyonları olan OF-0 ve

MRHOF ile karşılaştırmıştır. 70, 90 ve 100 düğümün bulunduğu ağlarda önerdikleri yöntemin, OF-0 ve MRHOF tabanlı ağlara kıyasla Paket İletim Oranı (PDR), güç tüketimi, ağ ömrü ve ağ gecikmesi açısından daha iyi performans gösterdiğini ifade etmektedirler.

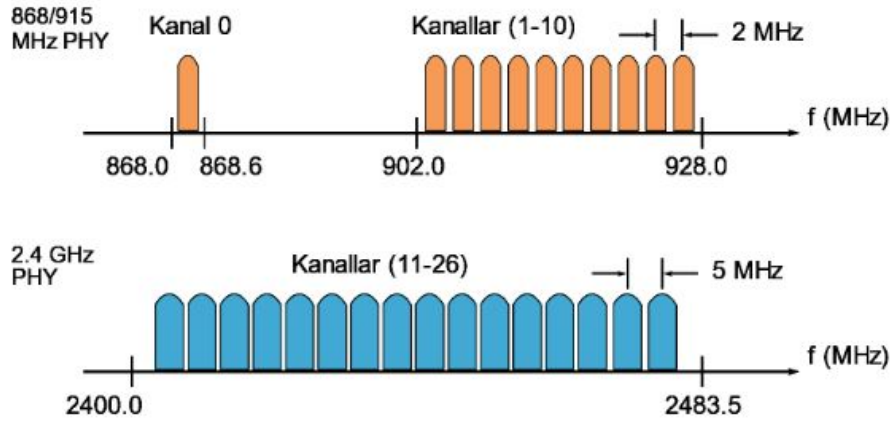
Aydın vd.'nin 2022 yılında yayınladığı çalışmada ise IETF 6TiSCH ağlarda RPL temelli yönlendirme için iki farklı amaç fonksiyonu optimizasyonu önerilmektedir. Her iki yöntemin de temel amacı ebeveyn değiştirme sürecinde oluşacak ek kaynak ayırma maliyetini minimize etme çabasıdır. Bunu sağlamak için düğümlerin ebeveyn değiştirme eşik değeri dinamik olarak ayarlanmakta, yüksek başarımlı yollara sahip düğümlerin ebeveyn olarak tercih edilmesi ve bu kararın sürekliliği sağlanmaya çalışılmaktadır. Birinci yöntemde yazarlar ebeveyn değiştirme eşik değerini, komşu düğüm sayısına göre güncellemektedir. İkinci yöntemde ise bu eşik değeri komşu düğüme tahsis edilmiş iletim yapılabilecek hücre sayısı göz önünde bulundurulmaktadır. Yazarlar, çalışmalarını Cooja benzetim ortamında gerçek zamanlı çalışan Contiki-NG işletim sistemi yüklü MSP-EXP430F5438 ("MSP-EXP430F5438 Board User's Guide", 2013) mikrodenetleyici tabanlı duyurga düğümlerinden oluşan 6TiSCH ağda test etmiş ve önerilen yöntemlerin başarımını RPL protokolünün varsayılan amaç fonksiyonu MRHOF ile karşılaştırmıştır. Çalışmada önerilen her iki yöntemin de paket iletim oranında, MRHOF'a nazaran önemli bir iyileşme göze çarpmaktadır. Öte yandan paket başına ortalama gecikme süresinde ve ebeveyn değiştirme sayılarında anlamlı düşüşler gözlemlendiği ifade edilmektedir.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, Aydın vd.'nin çalışması amaç fonksiyonu optimizasyonunu hedeflemektedir. Ancillotti vd. bağlantı kalitesi hakkında önceden bir kestirim yapmak, Farag ve Stefanovič ise en uygun ebeveyn seçimini gerçekleştirmek için Q-Öğrenme algoritması kullanılmıştır. Ancak Q-Öğrenme algoritmasının RPL amaç fonksiyonunu optimize etmek için kullanıldığı IETF 6TiSCH ağlar gerçekleştirilen bu çalışma, incelenen yöntemlere göre özgün bir nitelik taşımaktadır.

3. IETF 6TiSCH AĞLAR İÇİN PROTOKOL YİĞİNİ

3.1. IEEE 802.15.4 Standartı

2003 yılında ilan edilen IEEE 802.15.4 standardı, KDA'lar için düşük karmaşıklık, düşük veri hızlı bağlantı, düşük güç tüketimi ve düşük maliyeti hedeflemekteydi (Gutierrez vd., 2001). Standart, 868 MHz, 915 MHz ve 2,4 GHz Kablosuz Kişisel Alan Ağları'nın (WPAN) fiziksel ve ortam erişim kontrolü (MAC) katmanlarını tanımlar ve Düşük Güçlü Kablosuz Kişisel Alan Ağları'nda (LR-WPAN) kullanım için tasarlanmıştır. 868 MHz ve 915 MHz frekans bantları; 2,4 GHz bantlarını kullanan diğer teknolojilerden kaynaklanan parazit durumunda yardımcı olması için ayrılmıştır. 16 kanalı destekleyen 2,4 GHz bantları en çok 250 Kbps bant genişliği sağlarken, her ikisinde toplam 11 kanal desteği olan 868 MHz ve 915 MHz bantları ise sırasıyla 20 Kbps ve 40 Kbps bant genişliği sağlayabilmektedir. Dolayısıyla üç bantta toplam 27 kanal kontrol mesajları ve veri iletimi için kullanılabilir.



Şekil 3.1. IEEE 802.15.4 frekans bantları (Aydin, 2018; Gutiérrez, 2007)

IEEE 802.15.4 standartı ortam erişiminde bir çok farklı mekanizmayı destekler. Veri iletimi esnasında kullanılan ortamın paylaşımında çekişmeyi önlemek için CSMA/CA mekanizması ortamın boş olmaması durumunda üstel olarak artan bir bekleme süresi

öngörmektedir. Diğer bir yaklaşım ise IEEE 802.15.4e ile standart haline gelmiş olan zaman paylaşım ve kanal atlamalı ortam erişimi TSCH mekanizmasıdır. Bu yöntemde paylaşılan ortam tüm düğümler tarafından bilinen bir zamanlama planı içerisinde iletim yapmak isteyen düğümlere sıralı biçimde tahsis edilir. TSCH, daha kararlı ve zamana duyarlı düşük güçlü kablosuz ağların kullanılmasını sağlamak için kablosuz ortamın öngörülemezliğinin etkisini azaltmayı amaçlamaktadır.

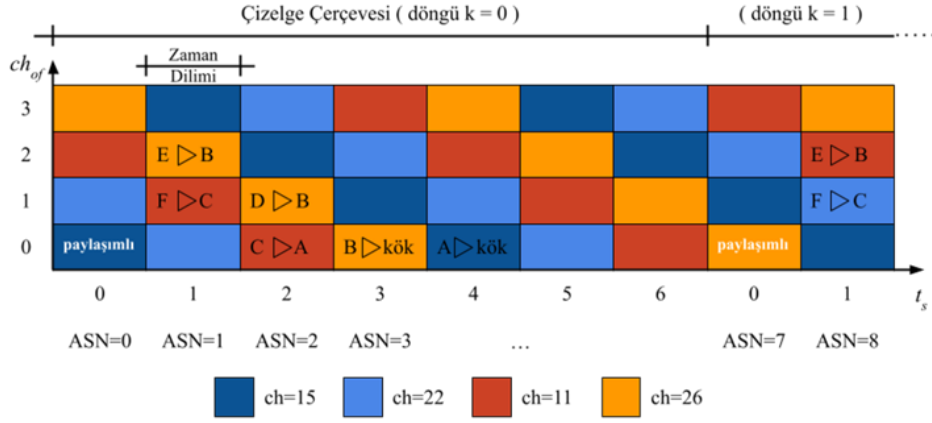
3.2. IEEE 802.15.4e (TSCH)

KDA'ların kullanılabileceği düşük gecikme süresi gerektiren tıbbi ve ticari uygulamalar, düşük enerji tüketiminin öne çıktığı çevresel ve tarımsal uygulamalar, yüksek oranda radyo dalgaları ve manyetik alanların bulunduğu endüstriyel uygulamaların gereksinimlerini karşılayabilmek ve KDA donanımlarının kritik öneme sahip uygulamaları geniş bir yelpazede desteklemesini sağlamak için Mart 2008'de IEEE 802.15.4 MAC protokollerinin geliştirilmesine başlandı ve var olan standart 2012 yılında IEEE 802.15.4e olarak genişletildi (IEEE.Std.802.15.4e, 2012). Bu standardın gözden geçirilmiş son versiyonu ise IEEE 802.15.4e Çalışma Grubu tarafından 2015 yılında yayınlandı (Raya & Salam, 2019).

IEEE 802.15.4e (TSCH) daha kararlı ve zamana duyarlı düşük güçlü kablosuz ağların kullanılmasını sağlamak için kablosuz ortamın öngörülemezliğinin etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Bir çizelge çerçevesinde iletim yapılması düğümlerin ne zaman radyolarını açmaları gerektiğini bilmelerine ve dolayısıyla düğümlerin enerjilerini tasarruflu kullanmalarına olanak sağladığı gibi endüstriyel uygulamalar için kritik öneme sahip gerçek zamanlı çalışmayı da garanti eder.

Bağlantı katmanında MAC davranış modlarından biri olan Zaman Paylaşım / Kanal Atlamalı (Time Slotted / Channel Hopping - TSCH) ortam erişimiyle paylaşılan ve tahsis edilmiş hücreler aynı zaman diliminde farklı kanal ofsetleri kullanılarak iletim gerçekleştirilebilir. Kanal atlama mekanizması radyo gürültüsünün yüksek olduğu ortamlarda girişime karşı güvenliği sağlar. Ayrıca frekans atlamalı ortam erişimi, mevcut kaynakların verimli bir şekilde kullanmasına olanak sağlar.

TSCH protokolü, düğümler arasında iletilen paketlere (Veri ve ACK onay paketleri) zaman bilgisi ekleyerek komşu düğümlerin veri alış-verişi esnasında birbirlerine yeniden



Şekil 3.2. Örnek TSCH çizelgesi

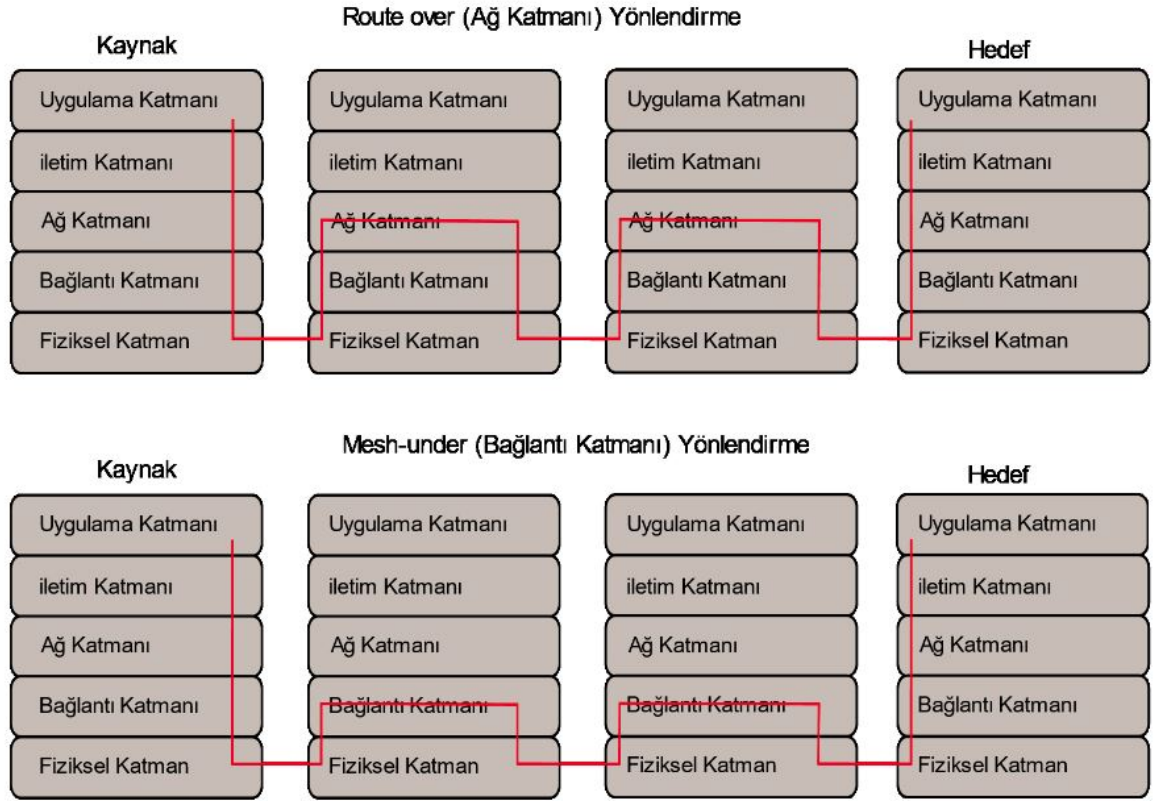
senkronize olabilmelerini sağlar. Düğümler arasındaki senkronizasyon işaretçi tabanlı (Beacon) gerçekleştirilebileceği gibi alınan veri paketleri için gönderilen ACK onay paketleri üzerinden de gerçekleştirilebilir. TSCH protokolü çizelgeleme işlemini gerçekleştirmez. Bu işlem 6TiSCH ağlarda 6Top ara katmanı tarafından gerçekleştirilmektedir. 6Top ara katmanının temel işlevi TSCH çizelgesinin oluşturulması ve çizelgedeki her bir hücrenin performansına göre güncellenmesini sağlamaktır. Bu yapı, çizelgenin herbir hücreni tahsis edilmiş (allocated) veya paylaşımlı (shared) olarak nitelendirir. Ek olarak 6Top; üst katmanlar için yararlı olabilecek bağlantı bilgilerini toplar ve beklendiği gibi davranmazlarsa hücrelerin performansını izleyerek merkezi veya dağıtık olarak yeniden çizelgelemenin yapılmasını sağlar (Aydın, 2018).

3.3. 6LoWPAN

İnternet Mühendisliği Görev Gücü (IETF) tarafından oluşturulan ve bağlantı katmanında IEEE 802.15.4e standardı üzerine inşa edilen 6LoWPAN protokol yığını ile Düşük Güçlü Kişisel Kablosuz Alan Ağları'nın (LR-WPAN) IPv6 mimarisi ile uyumlu hale getirilmesi sağlanmıştır. Standarta ve yığın yapısına getirilen bu özelliklerle düşük güçlü kablosuz duyarga ağları internet protokolü ile iletişim kurabilir hale getirilmiş oldu. Bu standart, LR-WPAN'ların düşük veri hızı, düşük güç tüketimi, enerji verimliliği gibi özellikleri dikkate alınarak geliştirilmiş, bu özelliklere uyum sağlamak için veri aktarımının sıklığı ve veri miktarında azalma, azaltılmış çerçeve yükü ve görev döngüsü gibi katı güç tasarrufu mekanizmaları benimsemektedir (Gozuacik & Oktug, 2015).

IEEE 802.15.4 standardı TCP/IP mimarisinde fiziksel katmanı, IEEE 802.15.4e TSCH MAC katmanını ve üzerinde bulunan 6Top bağlantı katmanını gerçeklerken; 6LoWPAN adaptasyon katmanı da bu iki katman ile ağ katmanı arasında bir ara yüz görevi üstlenmektedir. 6LoWPAN adaptasyon katmanı, IETF tarafından önerilen bir standarttır ve iletim ek yükünü azaltmak için başlık sıkıştırması, IPv6'nın asgari seviyede Maksimum İletim Birimi (MTU) gereksinimini desteklemek için parçalama, ikinci katman iletim ve çok sekmeli atlama üzerinden IPv6 datagramı desteği sağlar (Montenegro vd., 2007).

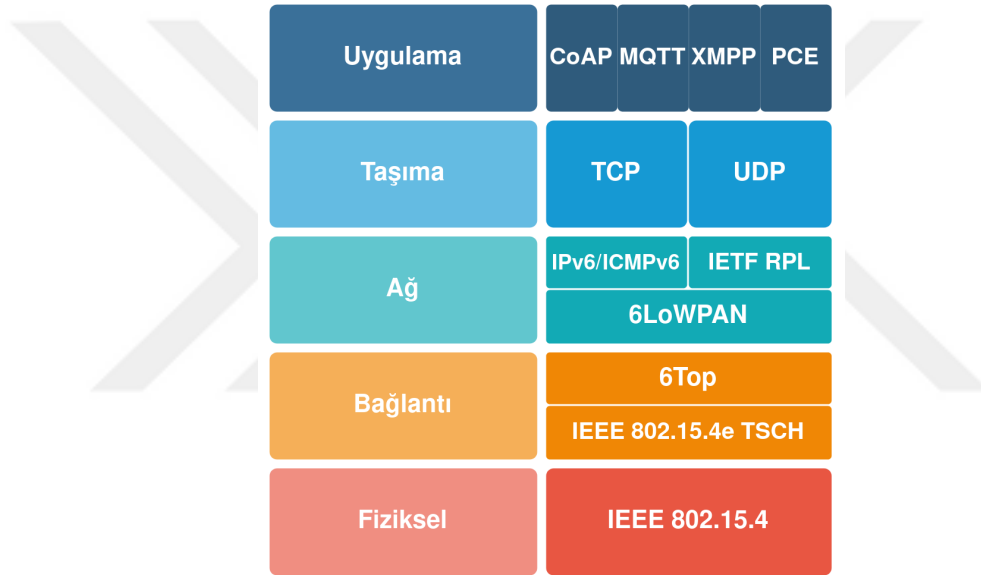
6LoWPAN için bir başka önemli konu ise, bağlantı katmanındaki alt prtokollerin yönlendirme süreçlerini nasıl bilgilendirdiği ve ağ içinde datagram iletiminin hangi katmanda gerçekleştiğidir. Geleneksel olarak IP yönlendirmesi, ağ katmanında ve alt katmanların durumundan büyük ölçüde bağımsız bir şekilde gerçekleşir. Ancak 6LoWPAN, bağlantı ve ağ katmanları arasında bir adaptasyon görevi üstlendiğinden, her iki katmanda da yönlendirmeyi destekleyebilir. Şekil 3.3, Ağ Katmanı (Route Over) ve Bağlantı Katmanı (Mesh Under) yönlendirmeyi TCP/IP protokol yığını üzerinde modellemektedir.



Şekil 3.3. 6LoWPAN ağlarda yönlendirme türleri (Aydin, 2018)

3.4. 6TiSCH Mimarisi

6TiSCH mimarisi; zaman paylaşımli ve kanal atlamalı (TSCH) ortam erişim protokolüyle IPv6 adreslemeyi birleştiren düşük güçlü, kablosuz endüstriyel kontrol ağları için bir dizi standart ve özellikler bütünüdür. IETF tarafından Endüstriyel Nesnelerin İnterneti cihazları için verimli, güvenli ve ölçeklenebilir düşük güçlü kablosuz ağları desteklemek amacıyla IPv6 internet protokolünün bir uzantısı olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.4 TCP/IP mimarisinde 6TiSCH protokol yığınının katmanlarını açıklamaktadır.



Şekil 3.4. İnternet Protokolü ve 6TiSCH protokol yığını

6TiSCH ağların temel özellikleri şöyle sıralanabilir:

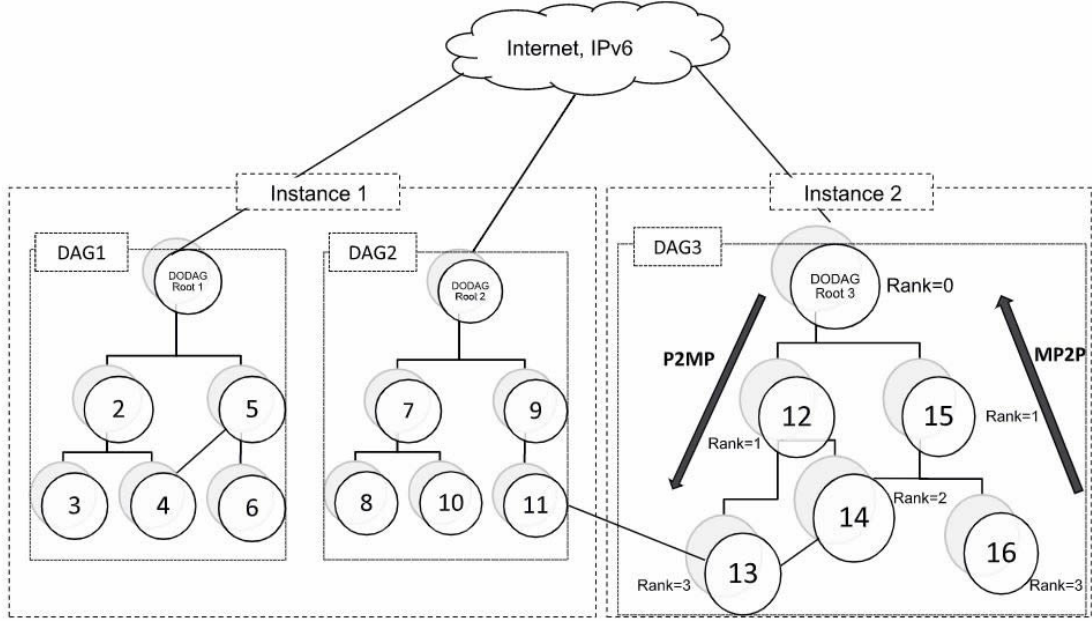
1. IPv6 Adresleme: 6TiSCH, ağdaki düğümleri tanımlamak için IPv6 adreslerini kullanır.
2. Zaman Paylaşımli Kanal Atlama (TSCH): 6TiSCH ağlarında kullanılan temel MAC protokolüdür. Veri iletimi için sabit zaman aralıkları tahsis ederek deterministik ve çarpışmasız bir iletişim ortamı sağlar.
3. Planlama: 6TiSCH ağları, bir düğümün ne zaman ve ne sıklıkta veri iletebileceğini veya alacağını belirlemek için çizelgelemeyi kullanır.

4. Güvenlik: 6TiSCH ağları, veri iletiminin güvenliğini ve gizliliğini sağlamak için şifreleme, kimlik doğrulama ve anahtar yönetimi dahil olmak üzere çeşitli güvenlik mekanizmaları kullanır.
5. RPL Yönlendirme Protokolü: RPL, düşük güçlü ve kayıplı ağlar için tasarlanmış bir mesafe vektörü yönlendirme protokolüdür. Düğümler arasında verimli ve ölçeklenebilir veri yönlendirme sağlamak için 6TiSCH ağlarında kullanılır.
6. CoAP Protokolü: IoT cihazları için tasarlanmış düşük karmaşıklığa sahip bir uygulama katmanı protokolüdür. 6TiSCH ağları CoAP protokolünü destekler.

3.5. RPL

6TiSCH tabanlı ağlar, yönlendirme işlemlerinin gerçekleştirildiği ağ katmanında Düşük Güç ve Kayıplı Ağlar için IPv6 Yönlendirme Protokolü (RPL) (Brandt vd., 2012; Kushalnagar vd., 2007; Winter vd., 2012)'ı kullanmaktadır. RPL, IETF'nin ROLL (Routing over Low Power and Lossy Links) ismini verdiği çalışma grubu tarafından 6TiSCH ağları için geliştirilmiştir. RPL, bir mesafe vektörü ve kaynak yönlendirme protokolüdür (Brandt vd., 2012; Winter vd., 2012). Protokolün temel işlevi kablosuz düğümler ile internet bulutu arasındaki veri trafiğinin yönlendirilmesini sağlamaktır (Gozuacik & Oktug, 2015). Düğümlerin periyodik olarak gerçekleştirdiği ölçümleri ve alt segmentteki düğümlerden gelen paketleri bir toplama noktasına (6TiSCH ağlarda root olarak adlandırılır.) ve tersi yönde merkezi noktadan ağda bulunan uç düğümlere doğru noktadan çok noktaya trafiğin aktığı ağaç yapısındaki ağları hedefler. Ayrıca RPL protokolü, noktadan noktaya trafiği de desteklemektedir. RPL'in en önemli özelliği; yönlendirme yapılacak düğümlerin enerji seviyesi, ağdaki konumu, bant genişliği gibi ağın başarımını doğrudan etkileyecek olan faktörleri göz önünde bulundurarak bir rota tayin edebilmesi ve çok sınırlı kaynaklara sahip olan düşük güçlü ve kayıplı ağlar için özel bir yönlendirme çözümü sunmasıdır. Dolayısıyla RPL yönlendirme kararları verirken iki temel özelliği hesaba katar:

- Kökten uca doğru veri hızı doğal olarak düşüktür (250 Kbps'den daha az)
- İletişim, düşük veri çıkışı ile sonuçlanan yüksek hata oranlarına (BER) eğilimlidir.



Şekil 3.5. Üç DODAG içeren bir RPL ağı topolojisi (Gaddour & Koubâa, 2012)

RPL'in, mantıksal topolojisi Yönlendirilmiş Döngüsel Graf (DAG) kavramına dayanmaktadır. DAG, ağdaki düğümler arasında varsayılan rotaları belirten ağaç benzeri bir yapı tanımlar. Bununla birlikte, bir DAG yapısı, yalnızca bir ebeveyn düğüme izin verilen klasik ağaç yapılarının aksine, bir düğüm DAG'daki birden çok ebeveyn düğümlerle ilişkilendirilebileceğinden dolayı tipik bir mantıksal ağaç topolojisinden daha fazlasıdır. Ayrıca; RPL, düğümleri en popüler hedef düğümlerin (root düğümler) veya internete varsayılan bir yol sağlayan düğümlerin (ağ geçitleri) DAG'ların kökleri olacak şekilde planlandığı Hedefe Yönelik - Yönlendirilmiş Döngüsel Graflar (DODAG) olarak düzenlenmesini sağlar (Gaddour & Koubâa, 2012; Winter vd., 2012). Bir ağ, RPLInstanceID (DODAG kökü tarafından başlatılan ve DODAG'ın parçası olduğu RPL örneğinin kimliğini gösteren 8 bitlik başlık verisi) adı verilen benzersiz bir kimlikle tanımlanan ve bir RPL örneğini oluşturan bir veya birkaç DODAG'dan oluşabilir. Ağda aynı anda birden çok RPL örneği de çalıştırılabilir. Ancak bu örnekler mantıksal olarak birbirlerinden bağımsızdır. Dolayısıyla bir düğüm birden çok RPL örneğine katılabilir, ancak her örnekte yalnızca bir DODAG'a ait olmaları gerekmektedir. Bu yüzden RPL protokolünün hem örgü hem de hiyerarşik ağaç topolojilerini birleştirebildiği ifade edilebilir. Şekil 3.5 böyle bir topolojinin gerçekleştiği bir RPL ağını görselleştirmektedir.

RPL protokolüyle inşa edilmiş bir ağda görevleri bakımından üç farklı düğüm tanımlanabilir (Gaddour & Koubâa, 2012):

- **Düşük Güçlü ve Kayıplı Sınır Yönlendiriciler (LBR):** Ağdaki bir toplama noktasını temsil eder. Bir DAG oluşturma yeteneğine sahip bir DODAG'ın kökünü ifade eder. LBR ayrıca internet veya başka bir ağ arasında ağ geçidi görevini üstlenebilir.
- **Yönlendiriciler (Routers):** Veri trafiği üretebilen ve bağlı alt düğümlerden gelen trafiği iletebilen düğümlerdir. Bu yönlendiriciler, yeni bir DAG oluşturma yeteneğine sahip değildir. Ancak mevcut bir DAG ile ilişkilendirebilir.
- **İstemciler (Hosts):** Veri trafiği oluşturabilen ancak üzerinden trafik akışının gerçekleşmediği uç düğümleri ifade eder.

RPL, ağın kendi kendine organize olabilmesi ve her düğümün yönlendirme tablolarını oluşturabilmesi için dört farklı kontrol mesajı kullanır (Brandt vd., 2012; Winter vd., 2012). Bunlar yeni bir ICMPv6 kontrol mesajı türü olarak belirtilir:

- **DODAG Bilgi Toplama Mesajı (DIS):** Bir RPL düğümünden bir DODAG Bilgi Nesnesi (DIO) istemek için kullanılır. DIS mesajı, bitişik DODAG'lardaki komşu düğümleri araştırmak için kullanılabilir.
- **DODAG Bilgi Nesnesi (DIO):** DODAG kökü tarafından yeni bir DAG oluşturmak için kullanılır. DODAG yapısı aracılığıyla noktadan çok noktaya yayın biçiminde gönderilir.
- **Hedef Tanıtım Nesnesi (DAO):** Uç düğümden köke doğru yol boyunca ziyaret edilen düğümleri kaydetmek ve yukarı yönlü yol bilgilerini yaymak için kullanılır. Bu mesaj, yönlendirme tablolarını kendi çocuklarının adres bilgileriyle doldurmak ve adreslerini ebeveynlerine bildirmek için DODAG kökü dışındaki her düğüm tarafından gönderilir.
- **Hedef Tanıtımı Alındı Nesnesi (DAO-ACK):** DAO mesajına yanıt olarak bir DAO alıcısı veya DODAG kökü tarafından tek noktaya yayın biçiminde gönderilir.

RPL protokolü, ağın oluşturulmasında temel öge olan kök düğümün DIO mesajlarını ağa yaymasıyla başlatılır. Mesajı alan alt düğümler DIO mesajını kullanarak ağdaki konum bilgilerini yani kök düğüme olan uzaklıklarını hesaplar. Hesaplama kullanılan tipik amaç

fonksiyonu DIO mesajının geldiği ebeveyn düğümün sıralama değerine bağlantı kalitesini ifade eden bir değer daha ekler ve bu değer hesaplamayı yapan düğümün sıralama değeri olarak belirlenir. Sıralama derecesini hesaplayan düğüm, yayınlayacağı DIO mesajlarına bunu ekler. DIO mesajını alan düğüm kök düğüme doğru yönlendirme yolunu belirlemiş olur. DIO mesajına cevap olarak, alt düğüm DAO mesajı oluşturur ve bu mesajı yönlendirici düğüme iletir. DIO mesajlarının sıklığı Trickle Timer olarak adlandırılan bir algoritmayla değişken periyotlarda belirlenir. Bu periyotlar ağı kararlı olduğu durumda maksimum değere çekilir ve kontrol mesajlarının sıklığı azaltılmış olur (Aydin, 2018). Ağı ilk yapılandırması başladığında veya yeniden yapılandırılmasının gerektiği değişiklik durumlarında DIO mesajlarının sık aralıklarla gönderilmesi için zamanlayıcı algoritmasının çalışma periyotları düşürülür.

RPL ağında yönlendirme tablosunu oluşturmaya başlayan bir düğüm, varsayılan yönlendiriciye ek olarak farklı düğümleri de yönlendirici aday olarak tabloya ekleyebilir. Bu şekilde RPL ağında bulunan düğümler, tercih edilen ebeveyn yönlendirme yeteneğini kaybettiği durumlarda kullanılabilecek aday ebeveyn ve kardeşlerin bir listesini de saklamış olur.

3.6. Amaç Fonksiyonları

RPL protokolünde yönlendirme ve iletim yolunun belirlenebilmesi için Amaç Fonksiyonu (Objective Function-OF) adı verilen bir algoritma kullanılmaktadır. Ağ topolojisinin inşası esnasında, her yönlendirici düğüm, DODAG köküne giden kararlı bir ebeveyn kümesi tanımlar ve kendisini amaç fonksiyonuna göre tercih edilen bir üst ögeyle ilişkilendirir. Amaç fonksiyonunun temel görevi, düğümlerin ya da bağlantıların atlama sayısı, enerji ölçümü, iletim kalitesi, gecikme, alınan radyo sinyalinin kalitesi gibi çeşitli özelliklerine göre karar verip en uygun rotanın yönlendirme için seçilmesini ve yönlendirme kısıtlamaları oluşturarak (Gnawali & Levis, 2012) optimizasyonu sağlamaktır. RPL, bir ağdaki tüm düğümlerin ortak bir amaç fonksiyonu kullanmasını gerektirir. Dolayısıyla amaç fonksiyonunun optimizasyonu ağı başarımını doğrudan etkileyen faktörlerin önünde gelir.

En iyi yönlendirme yapısı oluşturulurken Sıralama Değeri (Rank) adı verilen 16 bitlik bir tamsayıyla düğümlerin ağdaki konumları göreceli olarak tanımlanır ve DODAG kökünden aşağıya doğru bu değer kesinlikle artar. Dolayısıyla en küçük sıralama değeri DODAG köküne

ait olmak zorundadır. Rank, kökten uzaklığa göre değişir ve paket gecikmesi, atlama sayısı ve bağlantı maliyeti gibi parametreler bu değeri etkiler. Yönlendirme kararları bu parametrelere dayalı amaç fonksiyonları yardımıyla belirlenir. Literatürde yaygın olarak tercih edilen iki farklı amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Her iki amaç fonksiyonu da en iyi ebeveyn seçimini yapmak için belirli metrikleri kullanır. En iyi ebeveyn seçildikten sonra her düğüm, seçilen ebeveynin DIO mesajıyla bildirdiği sıralama değerine göre kendi sıralamasını hesaplayacak ve aşağı yönde DIO mesajlarıyla yayınlayacaktır.

3.6.1. Amaç Fonksiyonu-0 (OF-0)

Amaç Fonksiyonu-0 (Winter vd., 2012) ilk önerilen yöntem olup yönlendirici düğüm ile kök arasındaki atlama mesafesine bakarak yönlendirme kararlarını vermektedir. OF-0, düğümler arasındaki bağlantının kalitesine ya da başka bir yönlendirme metriğine bakılmaksızın kaynaktan hedefe giden en az atlamanın olduğu, en kısa yolu tercih edecektir. Yönlendirme kararları için Amaç Fonksiyonu-0 kullanıldığında bir düğümün Rank değeri Denklem 3.1 ile hesaplanır. Denklemde S (Step of rank: min=1 - max=9) çarpanı DODAG köküne giden yol boyunca atlama mesafesini (sıra artışını) belirleyen skaler bir değerdir. OF-0'da *MinHopRankIncrease* 256 olarak tanımlanmıştır (Thubert, 2012).

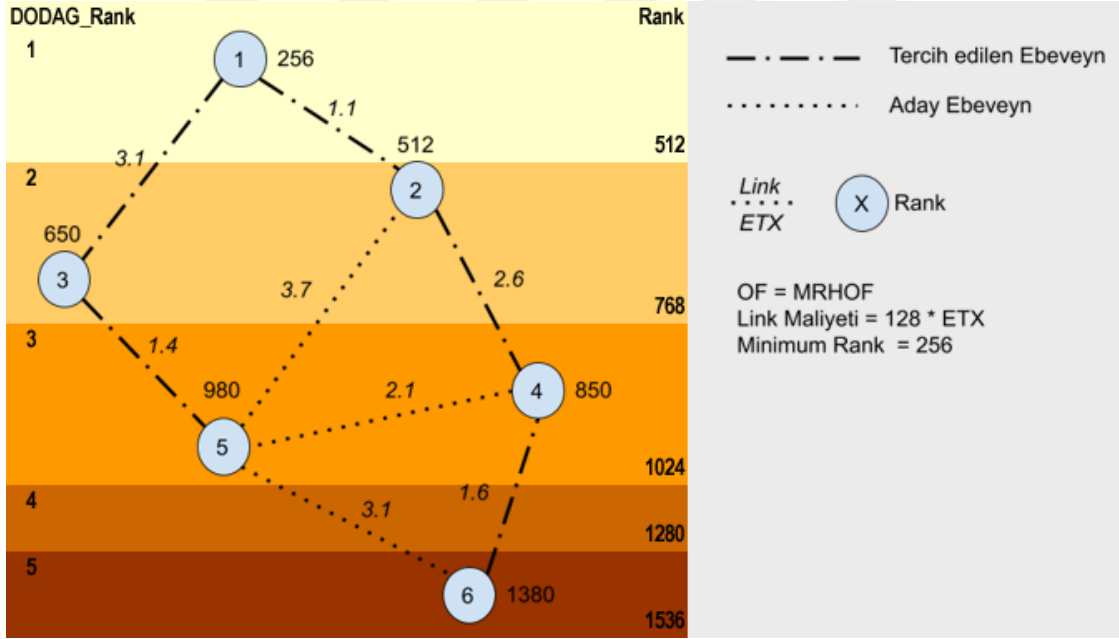
$$Rank_{node} = Rank_{parent} + S \times MinHopRankIncrease \quad (3.1)$$

3.6.2. Minimum Dereceli Histeresiz Amaç Fonksiyonu (MRHOF)

Amaç Fonksiyonu-1 (OF-1) ya da daha çok tercih edilen isimlendirmeyeyle Minimum Dereceli Histeresiz Amaç Fonksiyonu (MRHOF) (Gnawali & Levis, 2012) ise düğümler arasındaki bağlantı kalitesine (ETX), atlama sayısına, enerji seviyelerine veya gecikme süresine göre rota tercihi yapabilmektedir. Standart MRHOF, Metric Container'ın sağladığı atlama sayısı, enerji seviyesi ve gecikme süresi ölçütlerini kullanmaz ve ebeveyn tercihini yalnızca ETX metriğine göre hesaplar. Bağlantı kalitesi ya da beklenen iletim sayısı (ETX), bir paketi başarılı bir şekilde iletmek için bir düğümün bir hedefe yapmayı beklediği iletimlerin sayısı (Vasseur vd., 2012) olarak tanımlanır.

$$ETX = \frac{1}{P_i \times P_a} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de P_i bir paketin hedef düğüm tarafından alınmasının ölçülen olasılığını, P_a ise onay paketinin gönderen tarafından başarıyla alınmasının hesaplanan olasılığını ifade etmektedir. Bir rotanın ETX değeri yol boyunca yer alan her bağlantının ETX’lerinin toplamıdır. İyi bir bağlantı, paketi ilk denemede teslim edebilmelidir. İdeal olarak, düşük bir ETX değeri, iyi ve güvenilir bir bağlantı anlamına gelir. Ancak, gönderilen paket ile alınan onay mesajı göz önünde bulundurulduğunda atlama mesafeleri arasındaki fark değerlendirilmez. Kontrol paketlerinin atlama mesafeleri genellikle daha düşük olduğundan, tek başına ETX metriği bir bağlantının gerçekten ne kadar meşgul olduğu ile ilgili güvenilir bir bilgi sunamaz (Durukan Odabaşı, 2013).



Şekil 3.6. MRHOF kullanılan bir ağda ETX ile hesaplanan Rank değerleri (Gözüaçık, 2015)

$$Rank_{node} = Rank_{parent} + ETX \times MinHopRankIncrease \quad (3.3)$$

Bir çocuk düğüm ile bir root düğüm arasındaki yolun Rank değeri, yol boyunca her bir bağlantının ETX'lerinin toplamıdır. Bu değer Denklem (3.3) ile hesaplanır. MRHOF amaç fonksiyonunda *MinHopRankIncrease* çarpanı 128 olarak tanımlanmıştır.



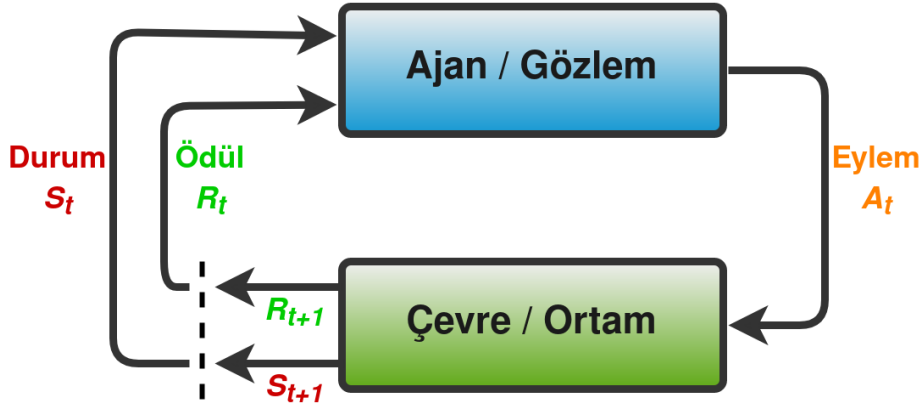
4. PEKİŞTİRMELİ ÖĞRENME

Pekiştirmeli Öğrenme yöntemleri ne öğrenilecek veriye ne de verinin önceden sınıflandırılmış etiket bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. Bu özelliğinden dolayı pekiştirmeli öğrenme teknikleri Danışmanlı Öğrenme ve Danışmansız Öğrenme yöntemlerinden farklı olarak, canlıların öğrenme yöntemine oldukça benzemektedir. Gerçek hayattan bir örnekle açıklanacak olursa; yırtıcıların bulunduğu bir ortamda saklanmak hayatta kalmayı veya zarar görmemeyi sağlarken, beslenmek için avlanmaya çalışmak ciddi kayıplara sebep olabilir. Ancak yırtıcıların olmadığı bir ortamda saklanmak ve avlanmamak, elde edilebilecek bir besinin kaybedilmesine neden olacağından, kötü bir karar olacaktır. Hangi durumda hangi kararın doğru olduğu kimse tarafından öğretilmese dahi, yaşanan ortamın ödülleri veya cezaları ile dolaylı olarak öğrenilebilir (Abacı, 2020, Ocak 5). Dolayısıyla Pekiştirmeli Öğrenme yöntemi, öğrenme işlemi için sadece kurallar ve ödüllere ihtiyaç duymaktadır. Yöntem, verilen kurallar çerçevesinde durum uzayını keşfederek her durum için elde edeceği en büyük ödülün kazanılmasını sağlayan hareketi öğrenmeye çalışmaktadır.

4.1. Q-Öğrenme Algoritması

İlk olarak Christopher J.C.H. Watkins and Peter Dayan tarafından 1992 yılında literatüre kazandırılan Q-Öğrenme yöntemi (Watkins & Dayan, 1992), 2013 yılında DeepMind Technologies adlı şirketin kurucuları tarafından yayınlanan “Playing atari with deep reinforcement learning” (Mnih vd., 2013) makalesi ile oldukça popüler hale gelen bir pekiştirmeli öğrenme yöntemidir.

Algoritmanın matematiksel temelleri 1988 yılında Richard Sutton tarafından “Learning to Predict by the Methods of Temporal Differences” (Sutton, 1988) makalesinde önerilen Zamansal Fark Öğrenmesi (Temporal Difference Learning) yöntemine dayanmaktadır. Zamansal Fark Öğrenmesi’nin özel bir hali olan Q-Öğrenme algoritması; kendi yarattığı, kısmen eksik geçmiş tecrübelerini kullanarak, gelecekteki davranışları tahmin etmeyi amaçlamaktadır (Abacı, 2020, Ocak 6).



Şekil 4.1. Pekiştirmeli Öğrenme / Q-Öğrenme modeli

Q-Öğrenme algoritmasının matematiksel ifadesi; deterministik sistemler için Bellman'ın en iyi çözüm eşitliğine (Bellman, 1957) dayanmaktadır. Şöyle ki; S_t şu anki durumu, A_t bulunulan durumda yapılacak aksiyonu, S_{t+1} sonraki durumu, A_{t+1} ise sonraki durumda yapılabilecek aksiyonu ifade etmek üzere;

$$Q(S_t, A_t) = R(S_t, A_t, S_{t+1}) + \gamma \max_{A_{t+1}} Q(S_{t+1}, A_{t+1}) \quad (4.1)$$

yazılır.

Yani şu anki durumdan sonraki duruma geçiş ile elde edilebilecek ödüle $R(S_t, A_t, S_{t+1})$, sonraki durum uzayının en büyük ödül değeri $\max_{A_{t+1}} Q(S_{t+1}, A_{t+1})$, γ oranında eklenerek şu an içinde bulunulan durumun en iyi değeri $Q(S_t, A_t)$ elde edilir. Denklem (4.1) Q-Öğrenme algoritmasının temelini oluşturur. Buradan hareketle Q-Öğrenme denklemi;

$$Q_{N+1}(S_t, A_t) = Q_N(S_t, A_t) + \alpha(N) [R(S_t, A_t, S_{t+1}) + \gamma \max_{A_{t+1}} (Q(S_{t+1}, A_{t+1})) - Q_N(S_t, A_t)] \quad (4.2)$$

şeklinde olur.

Denklem (4.2) adım adım incelenecek olursa;

$Q_{N+1}(S_t, A_t)$: hesaplanmak istenen yeni Q değerini,

$Q_N(S_t, A_t)$: bir önceki durumdaki Q değerini,

$\alpha(N)$: öğrenme katsayısını ($0 < \alpha(N) < 1$),

$R(S_t, A_t, S_{t+1})$: řu an elde edilen ödöl değerini,

$\gamma \max_{A_{t+1}}(Q(S_{t+1}, A_{t+1}))$: sonraki adım ile elde edilebilecek en iyi Q değerini ifade etmektedir.



5. YAPILAN ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında 6TiSCH mimarisinde çalışan KDA'ların paket iletim süreçlerinde kullanılan Düşük Güç ve Kayıplı Ağları için IPv6 Yönlendirme Protokolü (RPL) ve bu protokolün karar mekanizmasını oluşturan amaç fonksiyonlarının yapıları incelenerek yönlendirme protokolünün temel sorunları ele alınmıştır. Pekiştirmeli makine öğrenimi yöntemlerinden biri olan Q-Öğrenme algoritmasından esinlenilerek gerçek zamanlı çalışması beklenen endüstriyel uygulamalara yönelik tasarlanmış KDA'ların yönlendirme süreçlerinde karşılaşılan sık ebeveyn değiştirme, uçtan uca gecikme, tampon bellekteki paket kayıpları gibi kritik öneme sahip sorunlara yönelik yeni bir yaklaşım ortaya koyulmaktadır.

IETF 6TiSCH ağlarda, kararlı bir ağ yapısı oluşturmak için çocuk düğümlerin ebeveyn düğümlerine olan bağlantılarını devam ettirme eğiliminde olmaları beklenir. Ebeveyn yoğun trafik yüküne maruz kalabilir veya fiziksel/çevresel etkenlerden dolayı çocuk düğümün, ebeveynini değiştirmesi gerekebilir. 6TiSCH ağlarda bir düğümün ebeveynini değiştirmesi, TSCH çizelgesinde iletişim için tahsis edilmiş olan hücrelerin geri alınıp seçilecek olan ebeveyn ile yeni iletişim hücrelerinin belirlenmesini gerektirir. Ağ genelinde sık ebeveyn değişimi, yüksek oranda paket kayıplarına, uçtan uca paket iletim süresinde artışa ve hesaplama ek yükünden dolayı enerji tüketiminde artışa neden olacaktır.

5.1. Önerilen Algoritma

RPL protokolü, ağın oluşturulmasında temel öge olan kök düğümün DIO mesajlarını ağa yaymasıyla başlatılır. Mesajı alan alt düğümler DIO mesajını kullanarak ağdaki konum bilgilerini yani kök düğüme olan uzaklıklarını hesaplar. Hesaplama kullanılan tipik amaç fonksiyonu DIO mesajının geldiği ebeveyn düğümün sıralama değerine bağlantı kalitesini ifade eden bir değer daha ekler ve bu değer hesaplamayı yapan düğümün sıralama değeri olarak belirlenir. Ağa dahil olan her düğüm bir yönlendirme tablosu oluşturmak zorundadır. Yönlendirme tablosunda komşu düğümlere olan görece uzaklığı ve bağlantı kalitesi gibi bilgilere yer verilir. DAO mesajı, uç düğümlerden köke doğru yol boyunca ziyaret edilen düğümleri kaydetmek ve yukarı yönlü yol bilgilerini yaymak için kullanılır.

Bu mesaj, yönlendirme tablolarını kendi çocuklarının adres bilgileriyle doldurmak ve adreslerini ebeveynlerine bildirmek için DODAG kökü dışındaki her düğüm tarafından gönderilir. Ağda yayılan bu kontrol mesajları ile düğümler yönlendirme tablolarını oluşturur.

Daha kararlı bir ağ yapısı oluşturmak istendiğinde hedef, düğümlerin ebeveyn seçtikleri üst öğelerle olan bağlantılarını devam ettirme eğiliminde olmalarını sağlamak gerekir. Tabii olarak bu durum, bağlı olunan ebeveynin yoğun trafik yüküne veya farklı fiziksel/çevresel etkenlerden dolayı radyo sinyali zayıflaması gibi durumlara maruz kalınması halinde değişmek zorundadır. Bir ebeveyn değişiklik girişimi, düğümlere ciddi bir hesaplama ek yükü de getirmektedir. Çünkü, bir düğümün ebeveynini değiştirmesi, TSCH ve 6Top katmanlarında iletişim için tahsis edilmiş olan hücrelerin geri alınıp yeni seçilecek olan ebeveyn ile yeni iletişim hücrelerinin belirlenmesini (yeniden çizelgeleme) gerektirecektir. Bu durum ise hem hesaplama kaynaklı güç tüketimine hem de zorunlu olarak radyonun daha uzun süre açık kalmasından kaynaklı yüksek güç tüketimine sebep olacaktır. Ağın geneli düşünüldüğünde ise sık ebeveyn değişimi, yüksek oranda paket kayıplarına ve paket iletim sürelerinde artışa neden olacaktır.

RPL'da ebeveyn değişimi yapılırken tercih edilen düğümün sıralama değeri (Rank) ile aday düğümün sıralama değerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Karşılaştırma yapılmadan önce, birbirine yakın olan Rank değerlerine sahip ebeveyn adayları arasında sürekli değişim olmaması için aday düğümün Rank'ına pozitif bir tamsayı (eşik değeri) (PARENT_SWITCH_THRESHOLD) eklenir. Bu eşik değeri MRHOF'da (Vasseur vd., 2012) 96 (0.75 ETX), RFC 6719'da (Gnawali & Levis, 2012) 192 (1.5 ETX), RFC 8180'de (Vilajosana vd., 2017) 640 (5 ETX) olarak tanımlanmıştır. Eşik değerini sabit tutmak ebeveyn değiştirme ihtiyacında değişiklik gerçekleşmezse ya da bağlantı kalitesindeki düzensizliklerden dolayı sık gerçekleşirse ağın başarımı ve güvenilirliğini düşürür. Bu noktada eşik değerinin ağdaki değişiklikleri öngörerek dinamik olarak güncellenebilmesi, ağın daha kararlı davranmasını sağlayacak ve performansı artıracaktır.

Önerilen yöntemde her bir düğüm, radyo iletişim sınırları içindeki tüm komşu düğümleri içeren bir komşu listesi ($q_List[]$) tutmaktadır. Bu liste, Q-Öğrenme (Mitchell, 1997) yöntemindeki Q-Tablosu'na karşılık gelir. Her düğüm kendi Q-Tablosunda komşu düğümlerinin kimliğini (nb_ID) ve komşularını periyodik biçimde yoklayarak elde ettiği beklenen iletim sayısı (nb_etx), alınan sinyal kalitesi (nb_rssi) ve tampon bellek doluluk

oranı (*nb_buffer*) bilgilerinin kombinasyonu olan bir ölçüm değeri (ödül) tutar (Denklem (5.1)). Oluşturulan bu ölçüm, düğümün ebeveyn değiştirme kararı verebilmesi için güncelleme fonksiyonu (ajan) tarafından kullanılır. Her düğüm, Q-tablosuna eklediği komşularına ilk eşik değeri olarak 128 (1 ETX) atar. Böyle bir tasarımsal parametre belirlenmesinin iki sebebi bulunmaktadır: Birincisi düğümler senkronize olurken ebeveyn seçiminde kararsızlığı ortadan kaldırmak, ikincisi senkronize olmuş bir ağda komşu listesine yeni eklenen düğümün tercih edilebilir olmasını sağlamaktır. Sonraki döngülerde komşu düğümlerden elde edilen bilgilerle bu ödül değeri dinamik olarak güncellenir.

$$R(y) = \beta \times ETX(x, y) - BUF(y) + RSSI(y) \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de $R(y)$ ödül puanı, $ETX(x, y)$ x ile y arasındaki bağlantı kalitesi, $BUF(y)$ y 'nin tampon bellek doluluk oranı, $RSSI(y)$ y 'nin alınan sinyal kalitesi değerlerini gösterir. β çarpanı ETX değerinin etkisini sınırlandırmak için kullanılır.

$$Q'_x(y) = Q_x(y) + \alpha \times \left[R(y) + \gamma \times \max Q'_x(y) - Q_x(y) \right] \quad (5.2)$$

Denklem (5.2), Denklem (4.2)'de matematiksel ifadesine yer verilen Q-Öğrenme yönteminden esinlenilerek oluşturulan durum güncelleme (ajan) fonksiyonudur.

Algoritmaya göre komşuluk listesinde bulunan bir düğümün ödül puanı yükseldikçe tercih edilen ebeveyn olma olasılığı da artar. Dolayısıyla her yeni periyotta en yüksek ödüle sahip olan düğüm, tercih edilen ebeveyn olarak kalır. Her bir düğüm 15 saniyelik periyotlarda komşu düğümlerinin durumları hakkın da bilgi edinmek amacıyla *flag* değişkenini *true* durumuna getirmektedir. Bu şekilde komşulara ait ETX, bellek doluluk oranı ve RSSI bilgileri toplanır ve komşuluk listesindeki puanlar, güncelleme algoritmasına göre güncellenir. Ardından *flag* değişkeni *false* yapılır.

Düğümün ebeveyn değiştirmesi için aday komşu ile var olan ebeveyn arasında en az ajanın hesapladığı eşik değeri kadar fark olması durumunda ebeveyn değiştirme girişimi gerçekleşebilir. Böylece standart MRHOF'da olduğu gibi çocuk düğümün yalnızca

beklenen iletim sayısını dikkate alarak gerçekleştirmek istediği ebeveyn değiştirme süreci ortadan kaldırılmış olur. Artık düğüm, bağlantı kalitesi yanında aday ebeveynin RSSI ve tampon bellek doluluk oranını da dikkate almak zorundadır. Yine de ebeveyn değişimi söz konusu ise tercih edilen üst düğümün bellek doluluk oranının düşük olması ve ayrıca radyo sinyali alım kalitesinin de iyi durumda olması garanti altına alınmış olmaktadır. Çözüm, ağdaki düğümlerin keyfi olarak ebeveyn değişimlerini ortadan kaldırdığı gibi paket iletim oranında azalma, yoğun trafik ve zayıf RSSI durumlarında eşik değerini azaltarak daha kolay ebeveyn değişikliği yapılabilmesine de olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla daha dengeli ve kararlı bir yönlendirme ağacının oluşmasını temin etmektedir.

Algoritma 1 Q-Öğrenme Yönteminden Esinlenilmiş Amaç Fonksiyonu Algoritması

Input: *parent_1, parent_2*

```

1: Arrays : Q_List[ ], QnewList[ ]
2: Reward  $\leftarrow 1 \times ETX$ , qMax  $\leftarrow 0$ 
3:  $\alpha \leftarrow 0, 1, \gamma \leftarrow 0, 9, \beta \leftarrow 0, 8$ 
4: if flag == 1 then
5:   while nb_list  $\neq$  NULL do
6:     nb_ID  $\leftarrow$  new_neighbor
7:     nb_buffer  $\leftarrow$  new_buffer
8:     nb_etx  $\leftarrow$  new_etx
9:     nb_rssi  $\leftarrow$  new_rssi
10:    Reward  $\leftarrow \beta \times nb\_etx - nb\_buf + nb\_rssi$  ▷ (Denklem (5.1))
11:    Q_List[nb_ID]  $\leftarrow$  Reward
12:    for i  $\leftarrow$  1 to number_of_neighbors do
13:      if q_List[i]  $\neq$  NULL && qMax < q_List[i] then
14:        qMax  $\leftarrow$  q_List[i]
15:      QnewList[pref_fered_ID]  $\leftarrow$ 
        QnewList[pref_fered_ID] +  $\alpha \times [Q\_List[pref_fered\_ID] +$ 
         $\gamma \times qMax - QnewList[pref_fered\_ID]]$  ▷ (Denklem (5.2))
16:      flag  $\leftarrow$  0
17: if parent1_cost < parent2_cost + QnewList[pref_fered_ID] &&
    parent1_cost > parent2_cost - QnewList[pref_fered_ID] then
18:   return pref_fered_parent
return parent1_cost < parent2_cost ? parent_1 : parent_2

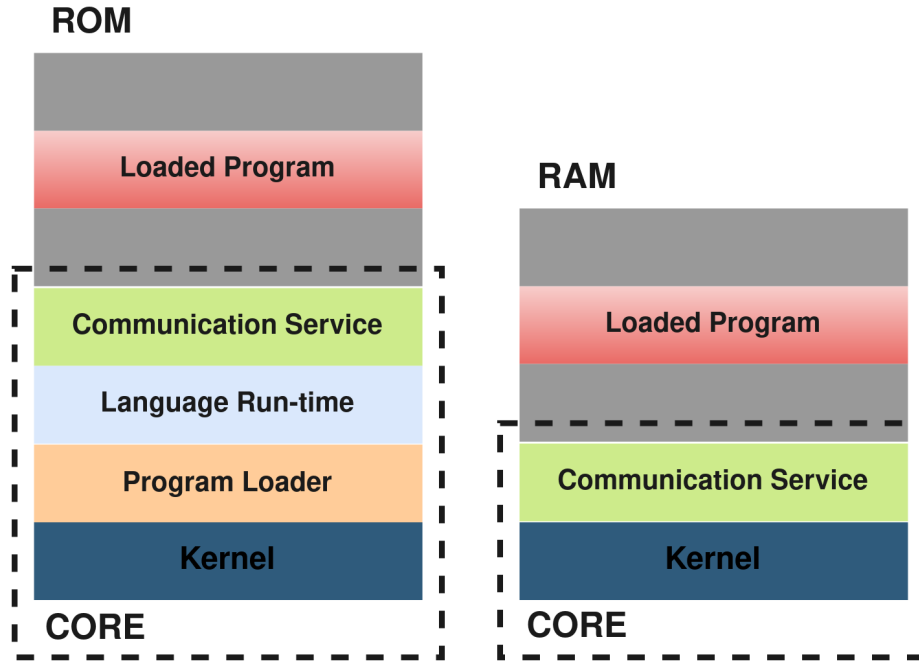
```

Önerilen yöntem 6TiSCH ağ mimarisi üzerinde Contiki (Kurniawan, 2018) işletim sisteminin ağ katmanında, RPL protokolüne yönelik olarak geliştirilmektedir. Algoritmanın başarımlı testleri, işletim sisteminin bir bileşeni olan Cooja (Osterlind vd., 2006) benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Önerilen amaç fonksiyonunun performansı gerçek

zamanlı çalışan MSP-EXP430F5438 mikrodnetleyici tabanlı duyarga düğümlelerinden oluşan ağ topolojilerinde analiz edilmiştir.

5.2. Contiki İşletim Sistemi

Contiki İşletim Sistemi (Contiki OS), 2002 yılında İsveç Bilgisayar Bilimleri Enstitüsü'nde Adam Dunkels tarafından geliştirilmeye başlanmış, mikrodnetleyiciler gibi küçük, kaynakları kısıtlı cihazlarda çalışacak şekilde tasarlanmış bir KDA platformudur. İşletim sistemi C programla dili ile yazılmıştır. Çok geniş donanım desteği sağlaması ve platform bağımsız olması, Contiki'nin yaygın kullanımına katkıda bulunmuştur. İlk yayınlanan Contiki versiyonları 2 KB RAM ve 40 KB ROM belleğe sahip gömülü donanımlar üzerinde rahatlıkla çalışabilmektedir.



Şekil 5.1. Contiki OS'nin genel mimari yapısı (Kurniawan, 2018)

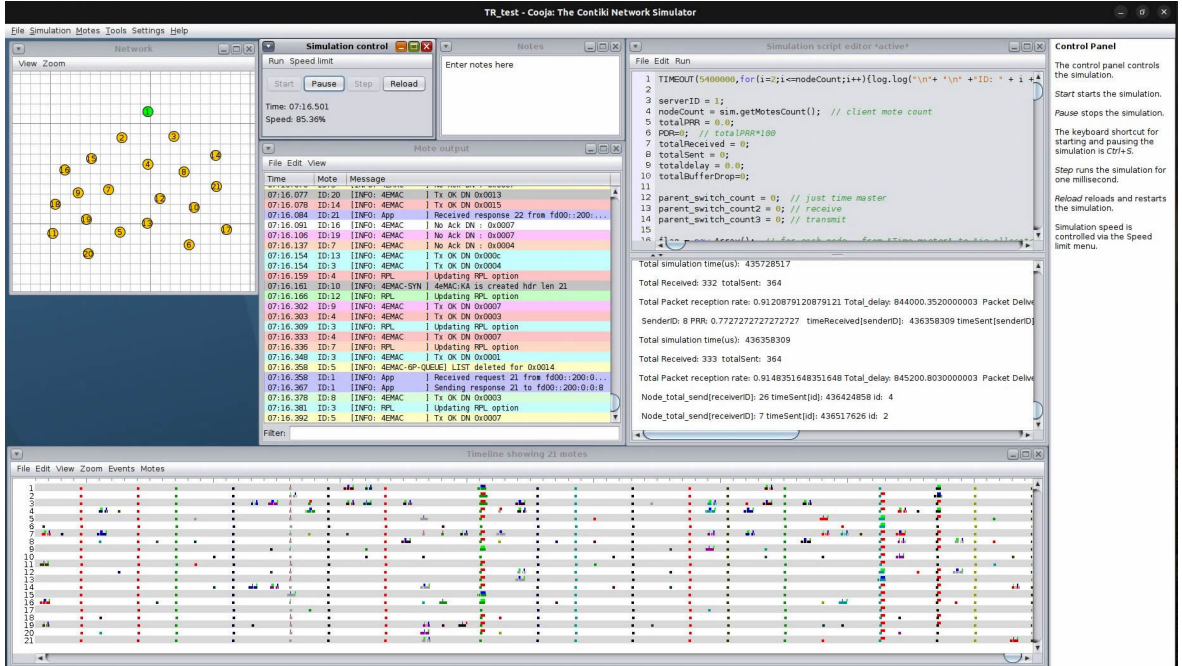
Contiki OS'nin en önemli özelliklerinden biri, çok iş parçacıklı ve olay güdümlü programlamayı birleştiren (Protothreads) yapısıyla sistem kaynaklarının verimli kullanımına ve ağ olaylarının verimli bir şekilde yönetilmesine izin veren mimarisidir. Bu mimari, genellikle sınırlı kaynaklara sahip olan ve gelen verilere yüksek oranda duyarlı olması gereken KDA doanımlarında kullanım için idealdir. Contiki'nin bir diğer önemli özelliği ise, TCP/IP, IPv6 ve 6LoWPAN ve 6TiSCH dahil olmak üzere çoklu ağ protokollerini yeni versiyonu olan

Contiki-NG ile destekliyor olmasıdır. Bu destek, KDA cihazlarının mevcut internet ağlarına bağlanmasını kolaylaştırır ve farklı protokoller kullanılması durumunda bile bir çok donanım arasında iletişime izin verir.

Contiki OS ve güncel versiyonu Contiki-NG açık kaynaklı bir yazılım olup devam eden geliştirme süreçlerine katkıda bulunan şirketler ve aktif bir geliştiriciler topluluğuna sahiptir. Bu, yeni teknolojiler ortaya çıktıkça işletim sisteminin güncel kalmasını sağlamaya yardımcı olmaktadır.

5.3. Cooja Benzetim Ortamı

Cooja, İsveç Bilgisayar Bilimleri Enstitüsü tarafından Java programlama dili ile geliştirilen kablosuz sensör ağları için bir benzetim ortamıdır. Kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarının performansını, davranışını gözlemlemek ve değerlendirmek için esnek, ölçeklenebilir bir benzetim ortamı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Çeşitli ağ protokollerini (IEEE 802.15.4 - 15.4e, TSCH, 6TiSCH, IPv6, RPL, CoAP vb..) ve teknolojilerini destekler. Farklı boyut ve karmaşıklıkta ağları simüle etmek için kullanılabilir.



Şekil 5.2. Cooja'da benzetimi yapılan bir ağ

Cooja, Contiki işletim sistemi üzerine kuruludur ve işletim sisteminin bir aracı olarak sunulur. Cooja da Contiki gibi açık kaynaklı bir yazılımdır ve ücretsiz olarak kullanılabilir. Cooja benzetim ortamının, Contiki OS ile tam uyumluluğu, özelleştirilebilir ve ölçeklenebilir yapısı, onu çok yönlü bir araç haline getirmektedir. Gerçek dünyada duyurga düğümlerinin eş zamanlı çalışmaya başlaması ve haberleşmeyi sürdürebilmesi olanaksızdır. Bu durumun işlemci hızı, iletişim protokolleri, elektromanyetik girişim, güç dalgalanmaları gibi bir çok nedeni olabilir. Cooja'daki rastgele çekirdek değeri modu (random seed) ile benzetimi gerçekleştirilen ağ senaryosunda her düğümün başlatılması 0-1000 ms arasında gelişigüzel geciktirilebilir. Bu özellik Cooja'nın gerçekçi bir ağ yaklaşımı sergilemesini, dolayısıyla benzetim ortamında tasarlanan ağın fiziksel dünyada ne kadar verimli olabileceğinin gözlemlenmesini sağlar.

5.4. Test Ortamı Özellikleri

Önerilen yöntemin performas analizleri 20, 30 ve 40 UDP istemci düğüm ile 1 UDP sunucu düğümün bulunduğu farklı ağ senaryolarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetimlerde kullanılan MSP-EXP430F5438 mikrodenetleyici tabanlı duyurga düğümlerinin teknik detayları Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1. MSP-EXP430F5438 teknik özellikleri

Özellikler	Değer
Mimari	16-bit RISC
MCU Hızı	25 MHz
ROM	256 kB
RAM	16 kB
Haberleşme	UART / SPI / I2C
Çalışma Gerilimi	1,8 V - 3,6 V

Önerilen yöntemin başarımının test edilmesi ve performans karşılaştırması için RFC 6719'da önerilen standart RPL MRHOF amaç fonksiyonu ve Aydın vd.'nin yayınladıkları komşu sayılarına göre optimize edilmiş RPL OF-SR1 algoritması koşulmuştur. Her bir ağ senaryosu için radyo sinyali alım oranı %60, %70, %80 ve %90 olacak şekilde değiştirilerek üç amaç fonksiyonu 5'er defa çalıştırılmış ve elde edilen 5 verinin aritmetik ortalamaları

hesaplanıp tablo ve grafikler oluşturulmuştur. Rx değeri herbir düğümün kapsama alanında başarılı biçimde iletim yapabileceği radyo sinyal seviyesini ifade etmektedir. Düğümlerin güç kaynağının zayıflaması bu Rx değerini doğrudan azaltacağından dolayı benzetimlerden daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için bu değer değiştirilerek testler yapılmıştır. Rx için %100 oranı pratikte kabul edilebilir olmadığından benzetimi yapılmamıştır. Benzetim ortamı test ölçütleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Tüm benzetimler Ek Şekil 1, Ek Şekil 2 ve Ek Şekil 3’te yer alan sırasıyla 20, 30 ve 40 düğüm içeren aynı fiziksel ağ topolojilerinde ve aynı süreler boyunca çalıştırılmıştır.

Tablo 5.2. Cooja benzetim ortamı test parametreleri

Parametreler	Değer
MAC Modeli	6TiSCH
Radyo Sinyali Yayılım Modu	Cooja UDGM
Düğüm Sayısı	1 UDP Sunucu, 20, 30 ve 40 UDP İstemci
Rx (%)	60, 70, 80, 90
Amaç Fonksiyonu	RPL-TOF, RPL-OF-SR1, MRHOF
Taşıma Katmanı Protokolü	UDP
TSCH Zaman Dilimi Çerçeve Uzunluğu	21
TSCH Zaman Dilimi Aralığı	15 ms
Paylaşımlı Zaman Dilimi Sayısı	6
Maksimum İletim Mesafesi	50 m
Paket Gönderim Sıklığı	15 saniye
Benzetim Süresi	90 dakika

5.5. Başarım Ölçütleri

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler beş farklı başarım ölçütü göz önünde bulundurularak karşılaştırılmış ve grafikleri oluşturulmuştur. Bu başarım ölçütleri;

- Paket İletim Oranı
- Ortalama Paket Gecikmesi
- TSCH MAC Katmanında Gerçekleşen Paket Kayıpları
- Ebeveyn Değiştirme Girişimi Sayısı
- İletim Gerçekleşen Ebeveyn Değiştirme Sayısı

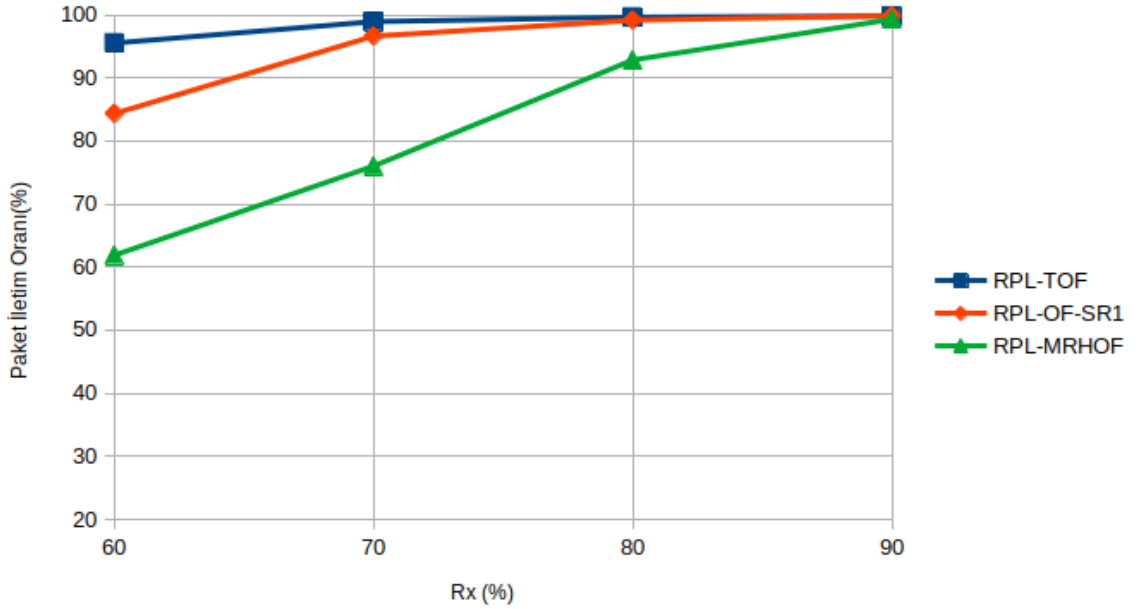
şeklindedir.

5.5.1. Paket İletim Oranı (PDR)

PDR, KDA'larda iletilen veri paketlerinin başarıyla alıcıya ulaşma oranını ifade eden bir ölçüt olup, ağın güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Belirli bir süre boyunca bir düğüm tarafından hedefe gönderilen paket sayısı $P_{iletilen}$ ve aynı zaman diliminde hedef düğüm tarafından başarıyla alınan paketlerin sayısı $P_{alınan}$ ile gösterilirse düğümün PDR'ı Deklem 5.3'teki gibi hesaplanır. Burada alınan paket sayısı, iletilen paketlerin hedef düğüme başarıyla ulaşan kısmını göstermektedir ve hedeften kaynağa gönderilen ACK onayları ile belirlenir.

$$PDR = \frac{\sum P_{alınan}}{\sum P_{iletilen}} \times 100 \quad (5.3)$$

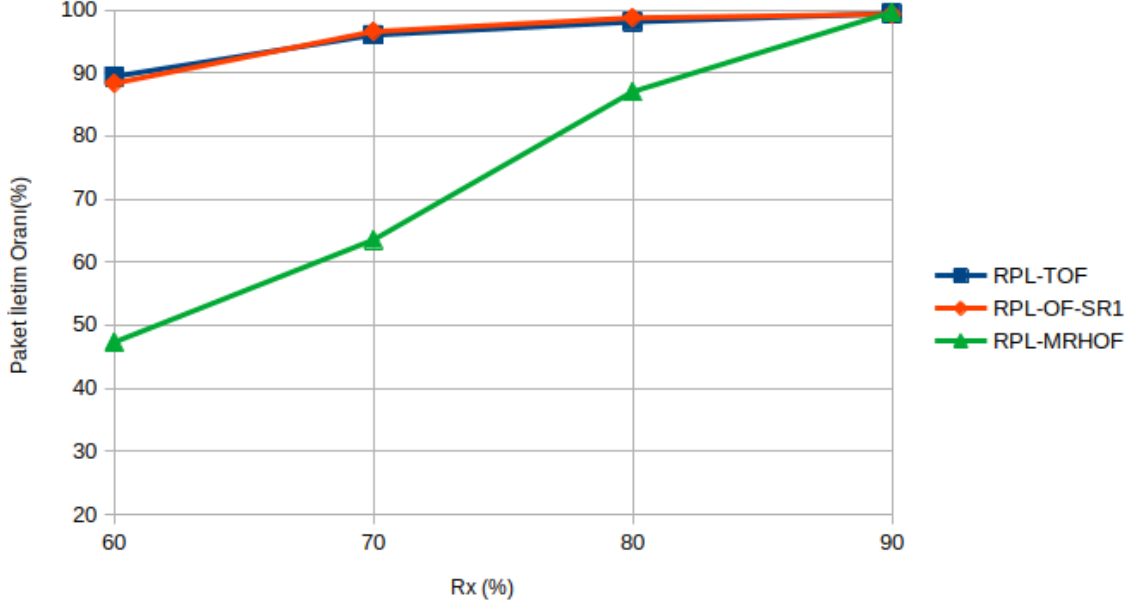
Benzetimde her bir düğüm için PDR değerleri ayrı ayrı hesaplanmış, tüm ağın başarımını ortaya koymak için düğümlerin PDR değerlerinin aritmetik ortalaması göz önünde bulundurulmuştur. Yüksek PDR oranı daha güvenilir ve daha yüksek performanslı bir ağ iletişiminin gerçekleştiğine işaret eder.



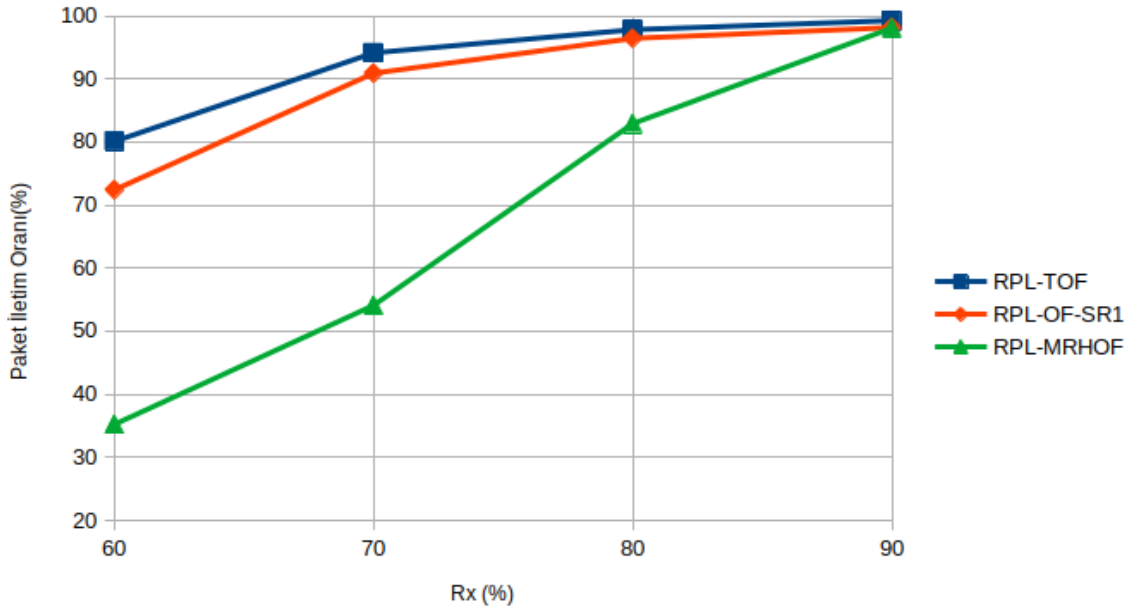
Şekil 5.3. 20 Düğüm için ortalama paket iletim oranları

Şekil 5.3'te 20 düğümün bulunduğu, fiziksel topolojisi Ek Şekil 1'de verilen ağ ortamı koşullarında elde edilen ortalama paket iletim oranları gösterilmektedir. Radyo sinyali alım

yüzdesi %60, %70, %80 ve %90 olarak belirlenmiş ve 3 amaç fonksiyonu çalıştırılmıştır. Önerilen amaç fonksiyonu (RPL-TOF), Rx %60, %70 ve %80 olduğu durumlarda diğer iki yöntemle göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Öte yandan alım yüzdesi %90 iken her üç yöntem de birbirine yakın PDR değerleri elde edebilmektedir.



Şekil 5.4. 30 Düğüm için ortalama paket iletim oranları



Şekil 5.5. 40 Düğüm için ortalama paket iletim oranları

Şekil 5.4'te 30 düğümün bulunduğu, fiziksel topolojisi Ek Şekil 2'de verilen ağ ortamı koşularak elde edilen ortalama paket iletim oranları gösterilmektedir. RPL-TOF ve Aydın vd.'nin önerdiği RPL-OF-SR1 amaç fonksiyonlarının PDR değerleri birbirine yakın ölçülmektedir. MRHOF'un başarımı ise düğüm sayısının artışından olumsuz etkilenmiştir. Özellikle Rx değerinin %80'in altına düştüğü durumlarda MRHOF güvenilir yönlendirme karar mekanizması sunmamaktadır.

Şekil 5.5'te 40 düğümün bulunduğu fiziksel topolojisi Ek Şekil 3'te verilen ağ ortamı koşularak elde edilen ortalama paket iletim oranları gösterilmektedir. Ağı oluşturan tüm düğümlerin senkronize olma süresi uzadığından ve yüksek trafik yoğunluğundan dolayı her üç amaç fonksiyonunun da başarımı düşmüş olmakla beraber önerilen yöntemin Rx %60 ve %70 iken MRHOF'a göre yaklaşık %45 daha iyi paket iletim oranına ulaşması kaydadeğer bir sonuçtur. Yine RPL-TOF'un OF-SR1'e göre en kötü senaryoda (Rx %60 iken) yaklaşık %8 daha iyi PDR değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 5.3. Ortalama PDR ve standart sapma değerleri

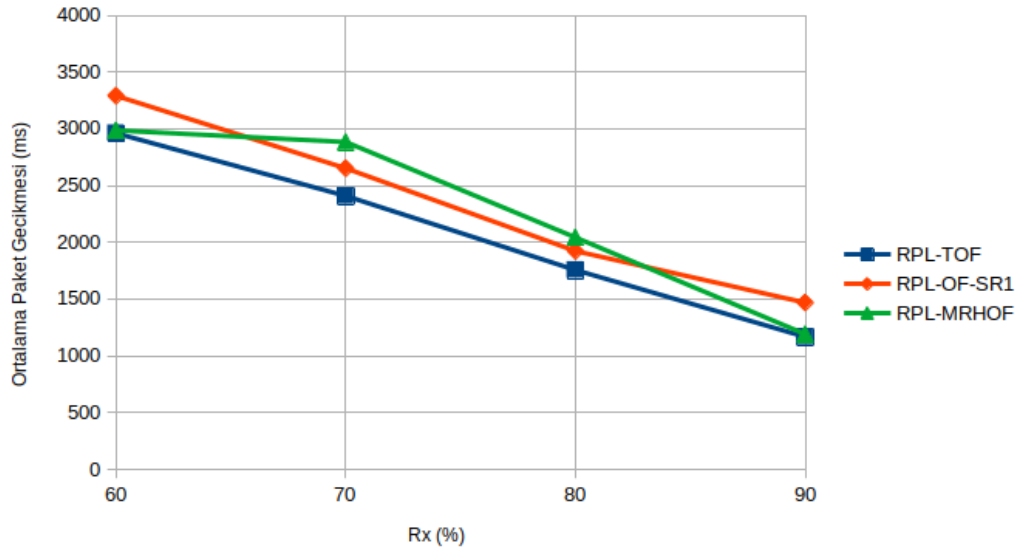
Rx %	20 Düğüm						30 Düğüm						40 Düğüm					
	RPL-TOF		OF-SR1		MRHOF		RPL-TOF		OF-SR1		MRHOF		RPL-TOF		OF-SR1		MRHOF	
	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S	PDR	St. S
60	95,5	2,16	84,3	2,69	61,9	7,04	89,4	2,56	88,3	7,35	47,3	8,00	80,1	4,56	72,4	5,65	35,2	5,47
70	98,9	0,67	96,6	2,72	76,0	9,06	96,0	1,00	96,6	2,81	63,5	7,30	94,1	2,64	90,9	1,82	54,1	9,46
80	99,6	0,41	99,1	1,08	92,8	3,73	98,1	1,15	98,7	0,98	87,0	6,04	97,8	0,73	96,4	3,22	82,9	2,46
90	99,8	0,25	99,8	0,04	99,3	0,82	99,4	0,41	99,3	0,43	99,6	0,31	99,2	0,38	98,1	1,23	98,1	1,13

Yöntemin başarısının daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilmesini sağlamak amacıyla Tablo 5.3'te tüm benzetimlerde elde edilen PDR değerlerinin aritmetik ortalamaları ve standart sapmaları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. İstatistiksel olarak aritmetik ortalama veri setinin merkezi eğilimini, standart sapma ise verilerin merkezi dağılımını ölçmek amacıyla kullanılır. Dolayısıyla aritmetik ortalama veri setinin genel bir temsili olarak nitelendirilebilir. Ancak bazı durumlarda aykırı değerlerin varlığı aritmetik ortalamayı yanıltıcı kılabilir. Standart sapma, verilerin ortalamadan ne kadar uzaklaştığının bir ölçüsü olup sıfıra yaklaşan standart sapma değerleri veri setinin ortalama civarında daha sıkı bir şekilde gruplandığını ispatlar ve elde edilen verilerin tutarlılığını açıkça ortaya koyar. Bu bağlamda önerilen algoritmanın benzetimleriyle elde edilen aritmetik ortalama değerlerinin diğer yöntemlere göre daha başarılı olması ve standart sapmaların ise daha düşük hesaplanması yöntemin başarılı ve kararlı çalıştığının kanıtıdır.

5.5.2. Ortalama Paket Gecikmesi

Bir veri paketinin bir gönderici düğümden alıcı düğüme ulaştığı süre (T_{Giden}) ile alıcının onay paketinin göndericiye ulaştığı sürenin (T_{Onay}) farkının, alınan onay paketi sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Yani onay paketinin alındığı zamandan gönderilen paketin çıkış zamanı çıkartılarak elde edilen gecikme süresi onay paketlerinin sayısına bölünerek ortalama paket gecikmesi hesaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ortalama paket gecikmesi hesaplanırken hedefe (burada root düğüme) ulaştığı garanti edilmeyen paketler hesaplamaaya dahil edilmemektedir. Dolayısıyla hedefe ulaştığı bilinen paketlerin değerlendiriliyor olması ağın performansı hakkında daha doğru fikir vermektedir.

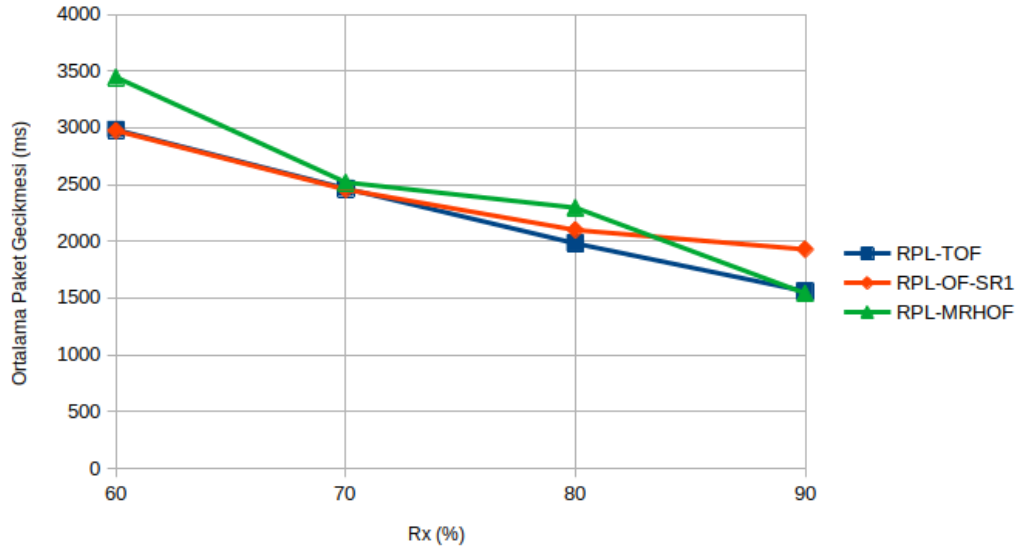
$$OrtalamaPaketGecikmesi = \frac{\sum (T_{Onay} - T_{Giden})}{\sum P_{Alinan}} \quad (5.4)$$



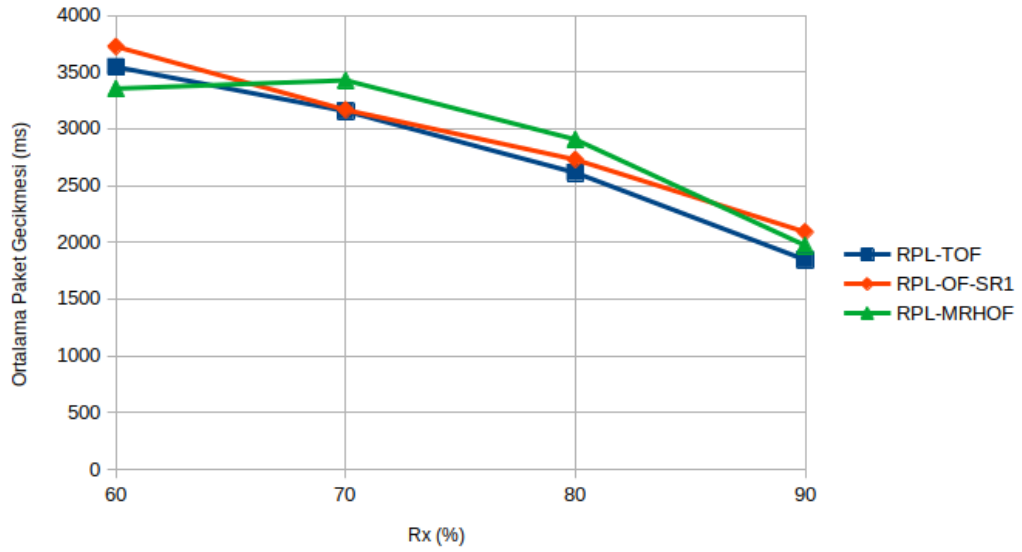
Şekil 5.6. 20 Düğüm için ortalama paket gecikme süreleri

Şekil 5.6’da 20 düğüm bulunan ağın 90 dakika süreyle koştugu benzetim sonunda elde edilen ortalama paket gecikme süreleri radyo sinyali seviyeleri %60, %70, %80 ve %90 olacak şekilde değiştirilerek test edilmiştir. Şekil 5.7’de 30 düğüm, 5.8’de ise 40 düğümden oluşan ağ senaryolarının ortalama paket gecikme süreleri gösterilmektedir. Her üç grafikten de anlaşılacağı gibi önerilen RPL-TOF amaç fonksiyonu diğer yöntemlere göre daha düşük

paket gecikme süreleriyle dikkat çekmektedir. Ayrıca önerilen amaç fonksiyonunun en kötü sinyal alım seviyesinde dahi 20 düğümlük ve 30 düğümlük ağlarda 3 saniye civarında, 40 düğümlük ağda ise 3,5 saniye civarında ortalama paket gecikmesine sahiptir. Her ne kadar MRHOF amaç fonksiyonunun benzer paket gecikme sürelerine sahip olduğu gözlenirse de Ek Tablo 1’de verilen tüm benzetim sonuçlarına bakıldığında gönderilen ve alınan paket sayılarının RPL-TOF’a göre 2 kattan daha az olduğu görülecektir.



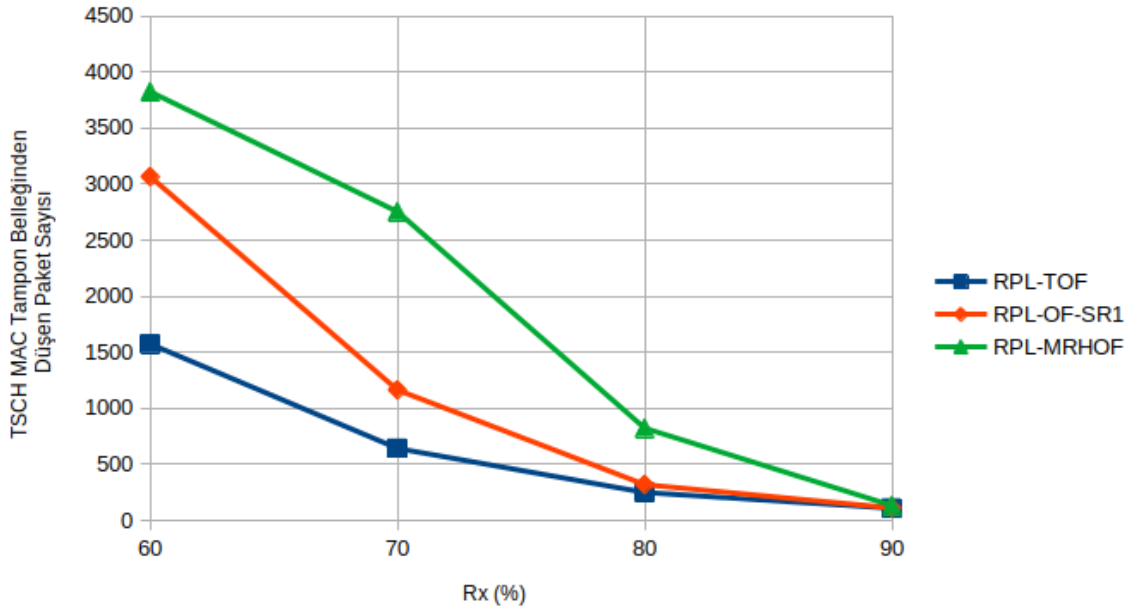
Şekil 5.7. 30 Düğüm için ortalama paket gecikme süreleri



Şekil 5.8. 40 Düğüm için ortalama paket gecikme süreleri

5.5.3. TSCH MAC Katmanındaki Paket Kayıpları

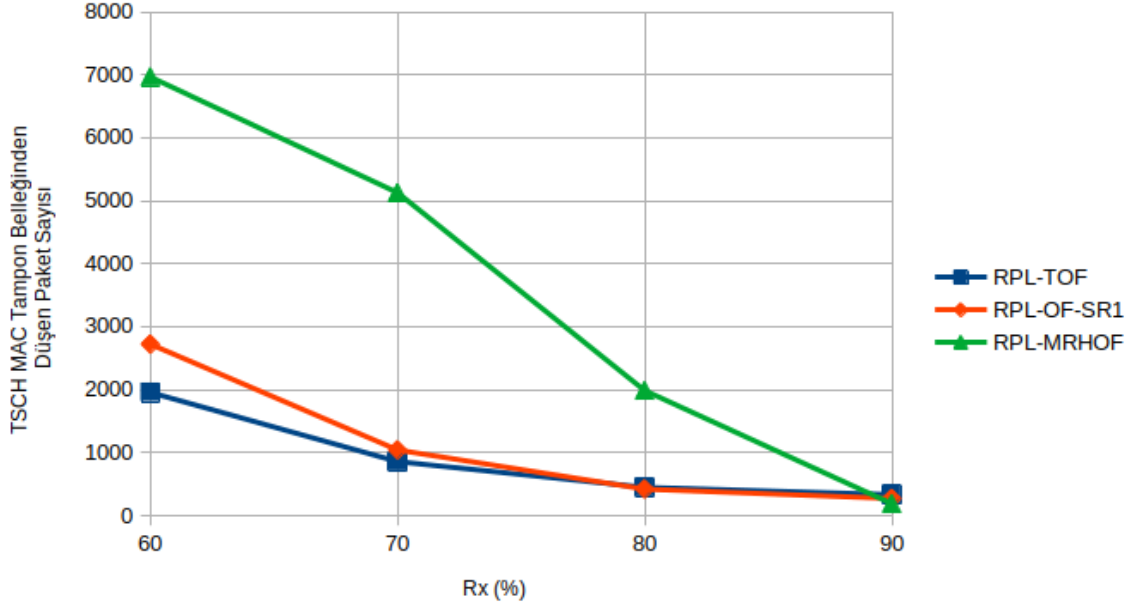
Algoritmanın başarımını değerlendirmek için analiz edilen bir başka ölçüt ise paket kayıplarıdır. KDA'larda kuyruğa alınan paketlerin düşürülmesi sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. KDA'yı oluşturan düğümlerin ebeveyn ve dolayısıyla rota değiştirmesi çocuk düğümlerden gelen ve iletmek için kuyruklanan paketlerin düşürülmesine neden olacaktır. Kök düğüme yakın merkezi konumlu düğümlerde rota değişikliği söz konusu olduğunda 6Top katmanı tarafından yeniden çizelgeleme yapılana ve yeni ebeveyn tayin edilene kadar geçen sürede hızla tampon belleklerinin dolması ve gelen yeni paketlerin kuyruğa alınamaması durumu gerçekleşir. Bu bağlamda yapılan benzetimlerde TSCH MAC katmanında gerçekleşen paket kayıpları düşen her bir paket için üretilen log mesajları analiz edilerek sayılmış ve karşılaştırma yapılmıştır.



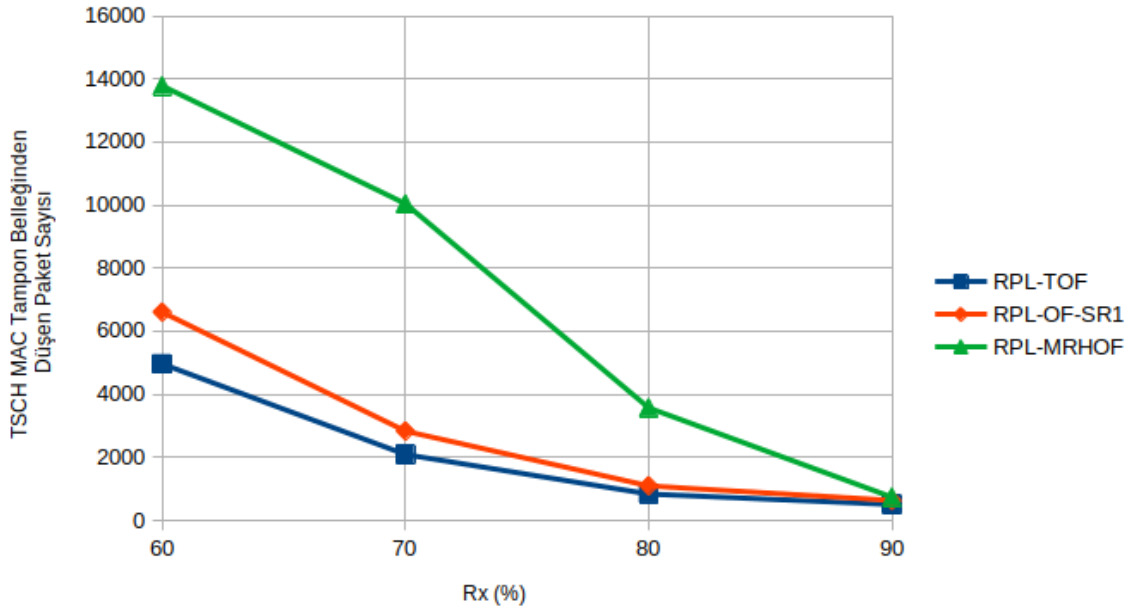
Şekil 5.9. 20 Düğüm için ortalama paket kayıpları

Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de sırasıyla 20, 30 ve 40 düğümden oluşan ağ senaryolarında RPL-TOF, RPL-SR ve standart MRHOF amaç fonksiyonlarının çalıştırılmasıyla elde edilen ortalama paket kayıplarının farklı radyo alım seviyelerindeki değerleri gösterilmektedir. Önerilen yöntemin paket kayıpları incelendiğinde diğer iki yönteme göre çok daha verimli olduğu açıktır. Öyle ki önerilen yöntem 20 istemcinin bulunduğu ağda MRHOF'a göre Rx %60 iken 2,5 kat, Rx %70 iken 4,3 kat daha az,

OF-SR1'e göre ise Rx %60 iken 2 kat, Rx %70 iken 1,8 kat daha iyi sonuç vermektedir. 30 ve 40 düğümün bulunduğu ağlarda iletim trafiği daha yüksek olduğundan paket kayıpları da doğru orantılı olarak artmaktadır. 30 düğümlü ağ için en kötü iletim senaryosunda (Rx %60 iken) RPL-TOF, MRHOF'a göre 3,5 kat, OF-SR1'e göre 1,3 kat daha başarılı olmuştur.



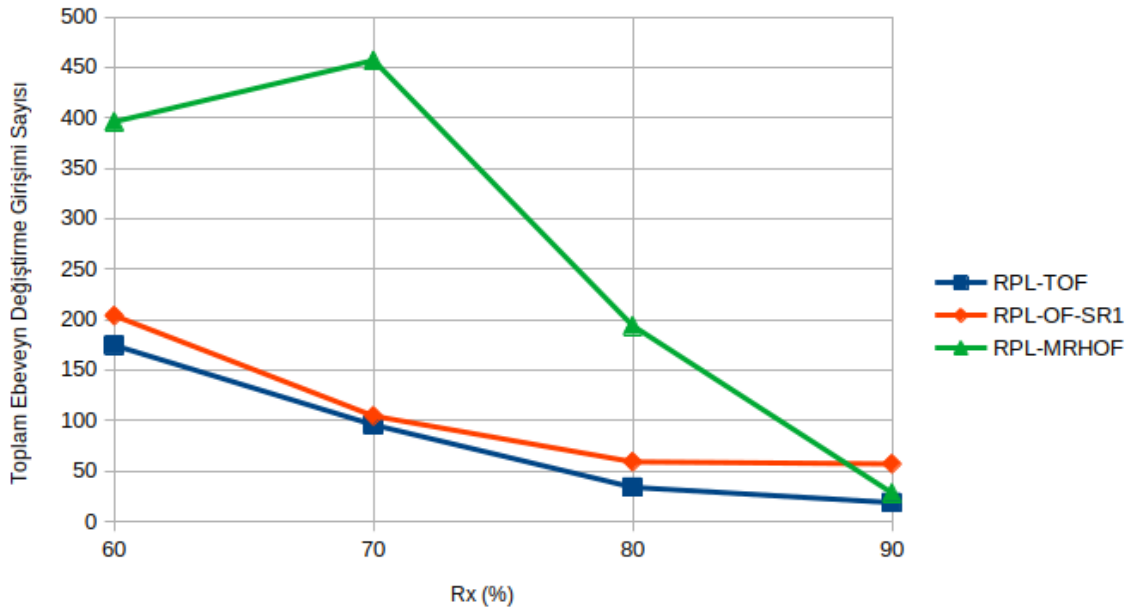
Şekil 5.10. 30 Düğüm için ortalama paket kayıpları



Şekil 5.11. 40 Düğüm için ortalama paket kayıpları

5.5.4. Ebeveyn Değiştirme Girişimi Sayısı

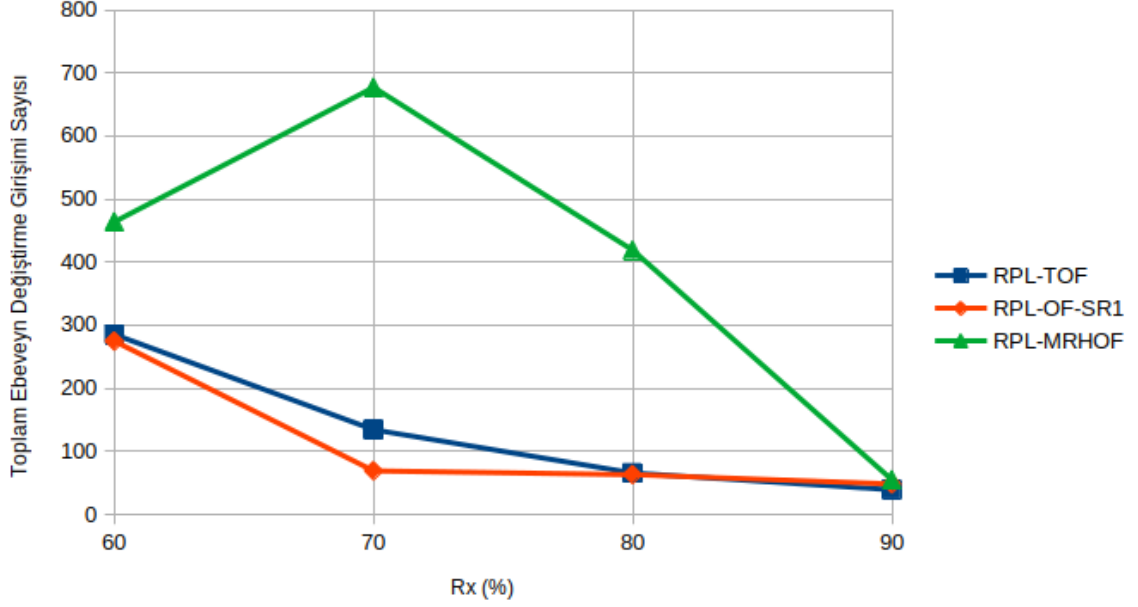
Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 sırasıyla 20, 30 ve 40 düğümden oluşan ağ senaryolarında önerilen amaç fonksiyonu RPL-TOF, OF-SR1 ve standart MRHOF'un Cooja benzetim ortamında 90 dakika boyunca çalıştırılmasıyla elde edilen tüm ebeveyn değiştirme girişimi sayılarını göstermektedir. Bir KDA'da düğümlerin ebeveyn değiştirme girişiminde bulunması, iletmek için kuyruğa aldığı ancak uygun ebeveyn bağlantısına henüz sahip olmadığından kaybolacak paket sayısının artacağı anlamına gelmektedir. Ebeveyn değiştirme girişimi düğümün yeni bir ebeveyn düğüm ile senkron olabilmesi için radyosunu daha fazla açık tutması, dolayısıyla daha fazla enerji harcaması demektir. Diğer taraftan ebeveyn değiştiren düğüm yeni TSCH çizelgesi oluşturmak için daha fazla hesaplama kaynağı kullanmak zorunda kalacaktır. Sıralanan gerekçeler göz önünde bulundurulduğunda düğümlerin rastgele ebeveyn değiştirmesi ağın başarımını olumsuz yönde etkileyen öncelikli problemlerden biridir.



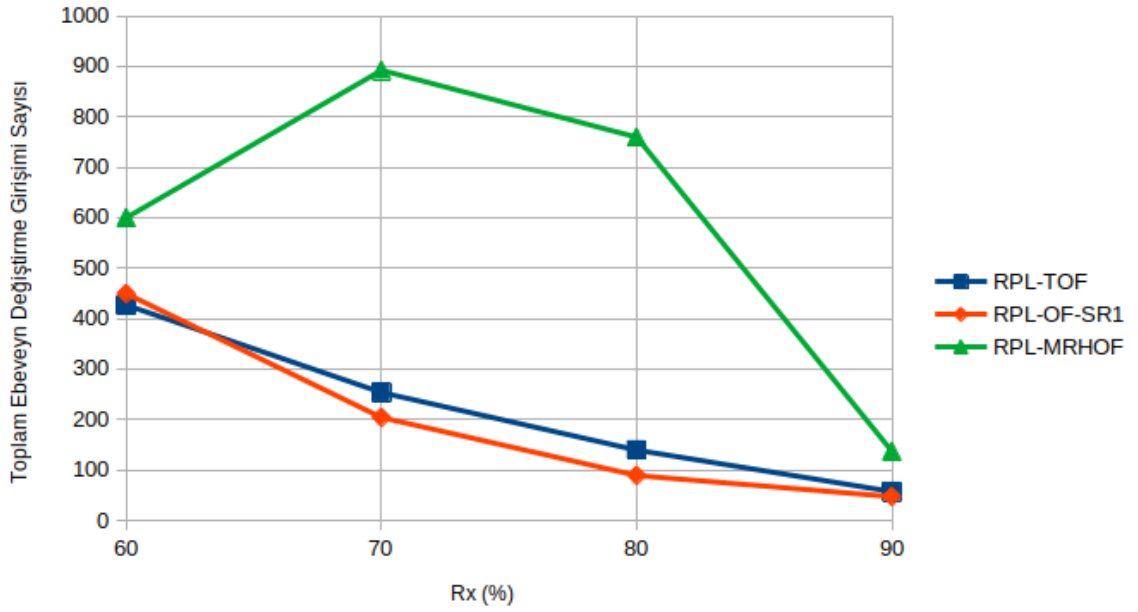
Şekil 5.12. 20 Düğüm için ebeveyn değiştirme girişimleri sayısı

Önerilen amaç fonksiyonu RPL-TOF ve OF-SR1 ortalama ebeveyn değiştirme girişimleri bakımından 20, 30 ve 40 düğümün bulunduğu ağ senaryolarındatutarlı ve benzer sonuçlar vermektedir. MRHOF amaç fonksiyonu kullanılan RPL ağlarında ise düğüm sayısı arttıkça ebeveyn değiştirme girişimlerinde orantısız değişimler gözlenmektedir.

30 ve 40 düğüm bulunan ağlarda MRHOF amaç fonksiyonu kullanıldığında karşılaşılan tutarsızlıkların ise ağdaki düğümlerin tamamının benzetim süresi içinde daimi olarak senkronize olamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu tespit gönderilen ve alınan toplam paket sayılarındaki düşüklüğü de açıklamaktadır.



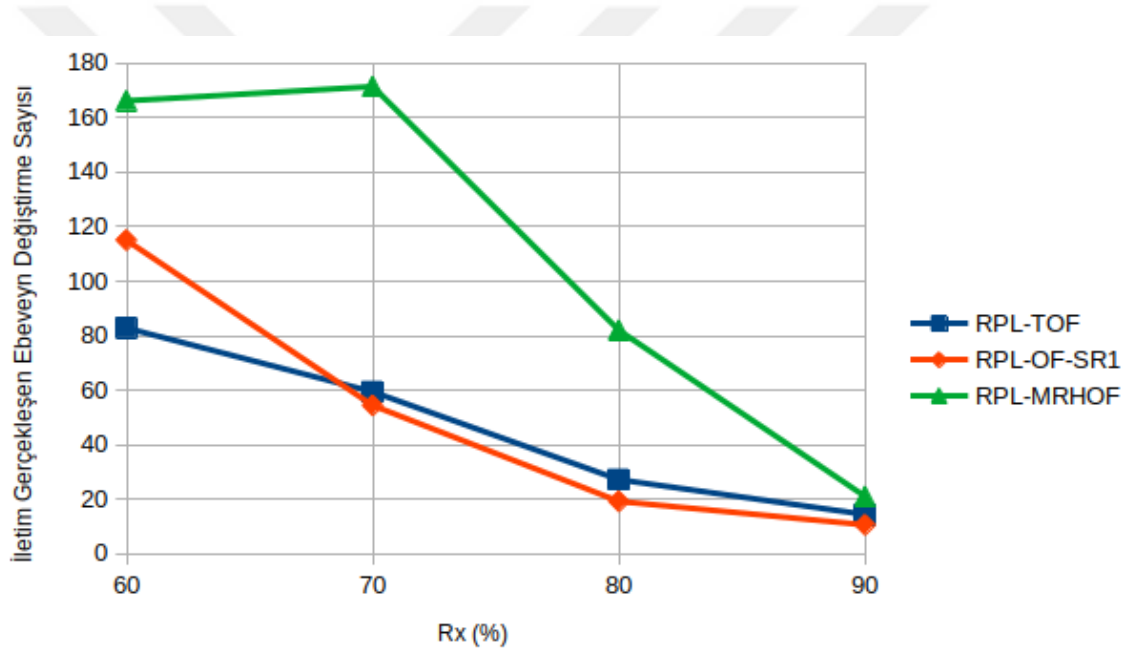
Şekil 5.13. 30 Düğüm için ebeveyn değiştirme girişimleri sayısı



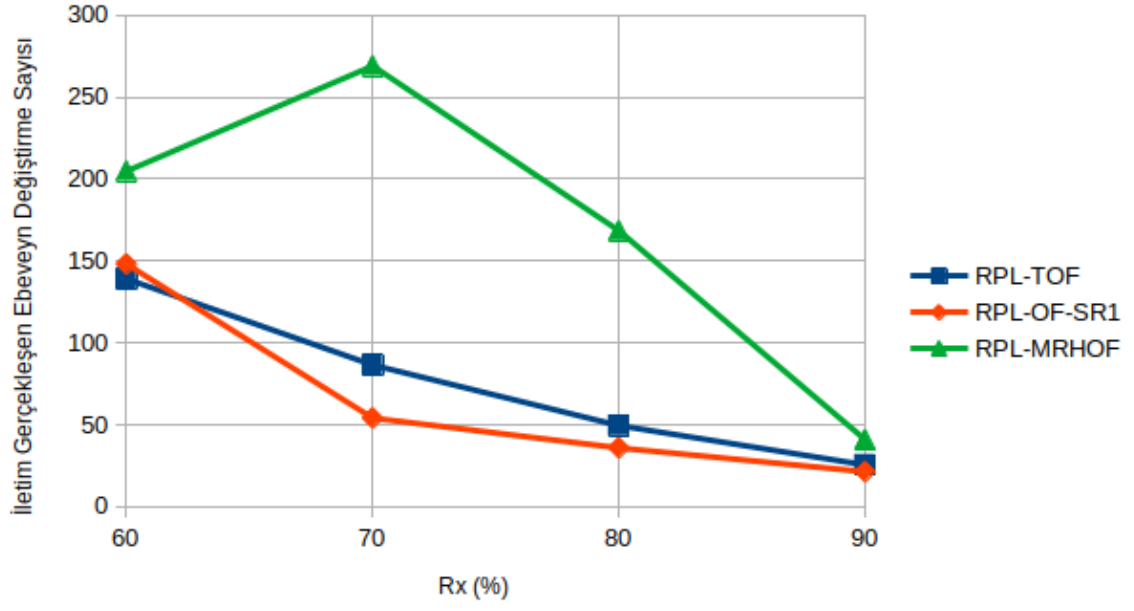
Şekil 5.14. 40 Düğüm için ebeveyn değiştirme girişimleri sayısı

5.5.5. İletim Gerçekleşen Ebeveyn Değiştirme Sayısı

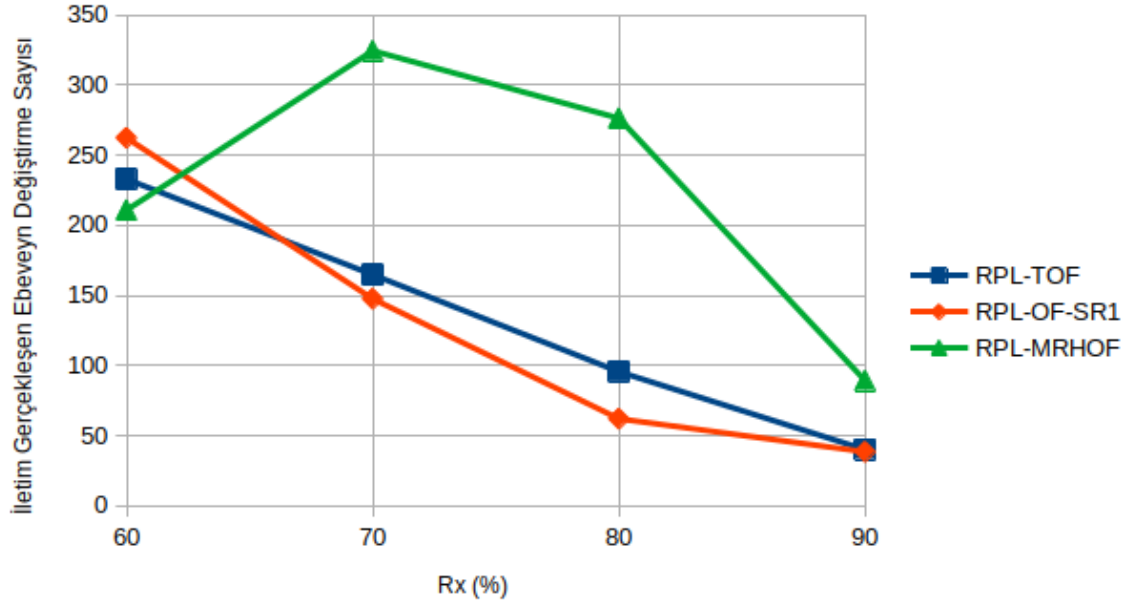
Bölüm 5.5.4'te yapılan analize ek olarak; Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de test edilen ağ senaryolarında önerilen amaç fonksiyonunun, OF-SR1 ve MRHOF'un ebeveyn değiştirme sonrasında başarılı iletim gerçekleştirip gerçekleştirmediği de incelenmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla önerilen algoritmanın kullanıldığı ağlarda gereksiz ebeveyn değişikliğinin önlenildiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu bağlamda önerilen amaç fonksiyonu RPL-TOF'un koşulduğu ağlarda Rx değerlerine göre üstel azalan bir kararlılığın söz konusu olduğu vurgulanabilir.



Şekil 5.15. 20 Düğüm için iletim gerçekleşen ebeveyn değiştirme sayısı



Şekil 5.16. 30 Düğüm için iletim gerçekleşen ebeveyn değiştirme sayısı



Şekil 5.17. 40 Düğüm için iletim gerçekleşen ebeveyn değiştirme sayısı

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında IETF 6TiSCH ağlarda RPL protokolüne özgü Q-Öğrenme algoritmasından esinlenilmiş amaç fonksiyonu RPL-TOF tanıtılmıştır. Benzetimi yapılan ağ topolojilerinde ortalama paket gecikmesi ve paket kayıpları azaltılmış, ağın daha dengeli bir yönlendirme topolojisi oluşturması sağlanmıştır. Önerilen algoritmanın çalıştırıldığı ağlarda karşılaştırma yapılan diğer amaç fonksiyonlarına göre daha yüksek miktarda paket iletimi sağladığı gözlenmiştir. Bu durum RPL-TOF amaç fonksiyonu kullanıldığında diğer yöntemlere göre düğümlerin daha kısa sürede senkronize olması ve ebeveyn değiştirme sayısının önemli ölçüde azaltılmış olmasından kaynaklanmaktadır.

Sunulan çözüm ile güç, bellek ve hesaplama kapasitesi sınırlı olan ve 6TiSCH protokol yığınıyla çalışan KDA'larda yönlendirme rotası belirlenirken önceki durumlar ile ağın başarımını doğrudan etkileyen metrikler kullanılarak RPL protokolünün daha tutarlı yönlendirme yapabilmesi sağlanmış, dolayısıyla daha kararlı bir ağ yapısı elde edilerek ağın başarımı artırılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan KDA'lardan beklenen düşük gecikmeli iletişim ve düşük paket kaybı gibi nitelikler için RPL-TOF'un uygun bir çözüm olacağı ve önerilen algoritmanın KDA uygulamalarında makine öğrenimi yöntemlerinin kullanılabilirliği noktasında literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Gelecekte bu çalışmanın devamı olarak önerilen yöntemin KDA'lar için kritik öneme sahip diğer bir parametre olan güç tüketim hesaplamalarının yapılması, yöntemin ağı oluşturan düğümlerin güç tasarrufuna ne derecede katkı sunabileceğinin araştırılması planlanmaktadır.

7. EKLER

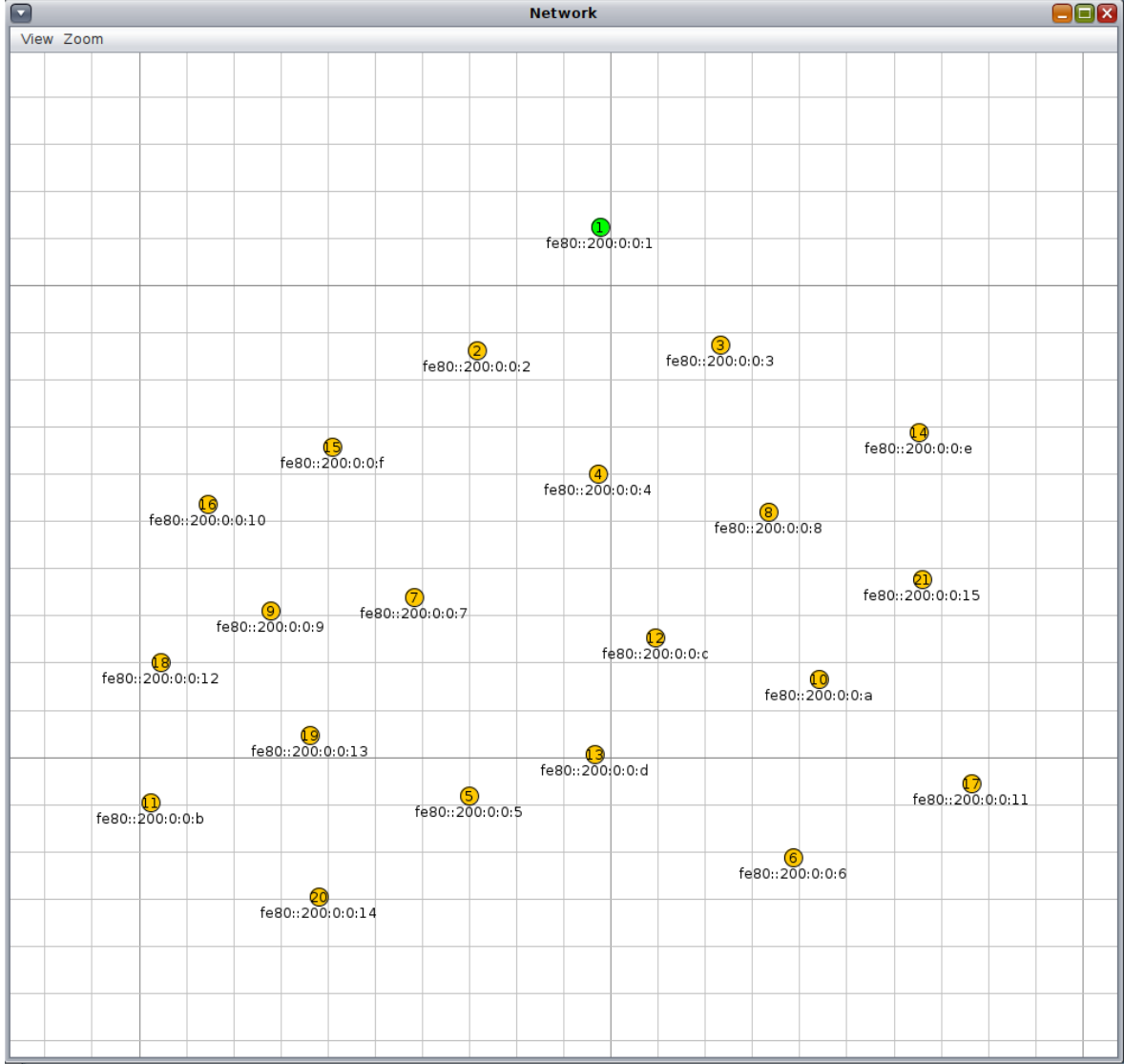
Ek Tablo 1. Benzetim sonuçları

20 Düğüm Bulunan Ağ İçin Benzetim Sonuçları								
Amaç Fonksiyonu	Rx (%)	Toplam Alınan Paket Sayısı	Toplam Gönderilen Paket Sayısı	Paket İletim Oranı (PDR)	Standart Sapma (PDR)	Ebeveyn Değiştirme Denemeleri	Ortalama Paket Gecikmesi (ms)	Toplam Paket Kayıpları (TSCH MAC Katmanı)
RPL-TOF	60	6136	6422	95,5	2,16	174	2960	1572
	70	6650	6724	98,9	0,67	96	2408	642
	80	6704	6729	99,6	0,41	34	1756	249
	90	6819	6833	99,8	0,25	19	1167	109
RPL-OF-SRI	60	4964	5889	84,3	2,69	204	3290	3065
	70	6416	6641	96,6	2,72	104	2652	1163
	80	6667	6725	99,1	1,08	59	1923	319
	90	6710	6721	99,8	0,04	57	1468	111
MRHOF	60	2541	4092	61,9	7,04	396	2986	3822
	70	3842	5027	76,0	9,06	457	2883	2753
	80	6106	6571	92,8	3,73	194	2043	822
	90	6667	6715	99,3	0,82	28	1191	132

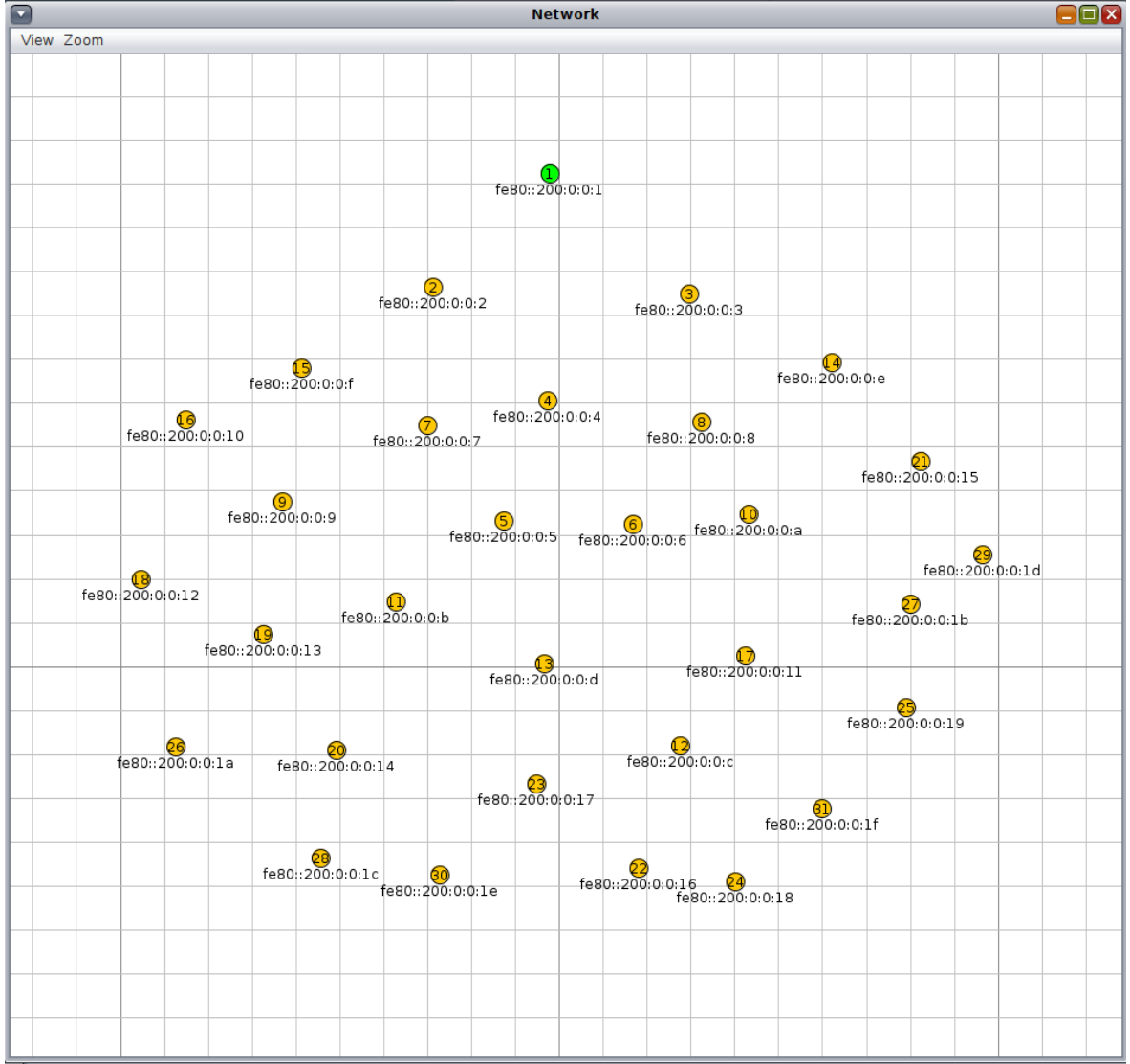
30 İstemci Düğüm Bulunan Ağ İçin Benzetim Sonuçları								
Amaç Fonksiyonu	Rx (%)	Toplam Alınan Paket Sayısı	Toplam Gönderilen Paket Sayısı	Paket İletim Oranı (PDR)	Standart Sapma (PDR)	Ebeveyn Değiştirme Denemeleri	Ortalama Paket Gecikmesi (ms)	Toplam Paket Kayıpları (TSCH MAC Katmanı)
RPL-TOF	60	8653	9679	89,4	2,56	285	2982	1955
	70	9557	9955	96,0	1,0	134	2464	856
	80	9704	9894	98,1	1,15	66	1981	449
	90	9921	9980	99,4	0,41	39	1560	333
RPL-OF-SRI	60	8075	9047	88,3	7,35	275	2973	2720
	70	9415	9743	96,6	2,81	69	2456	1040
	80	9783	9910	98,7	0,98	63	2099	421
	90	9884	9953	99,3	0,43	48	1833	271
MRHOF	60	2602	5491	47,3	8,0	464	3444	6963
	70	4107	6425	63,5	7,3	677	2519	5126
	80	7316	8368	87,0	6,04	419	2296	1984
	90	9865	9902	99,6	0,31	55	1541	188

40 İstemci Düğüm Bulunan Ağ İçin Benzetim Sonuçları								
Amaç Fonksiyonu	Rx (%)	Toplam Alınan Paket Sayısı	Toplam Gönderilen Paket Sayısı	Paket İletim Oranı (PDR)	Standart Sapma (PDR)	Ebeveyn Değiştirme Denemeleri	Ortalama Paket Gecikmesi (ms)	Toplam Paket Kayıpları (TSCH MAC Katmanı)
RPL-TOF	60	10107	12616	80,1	4,56	427	3544	4959
	70	12408	13184	94,1	2,64	253	3154	2089
	80	12896	13186	97,8	0,73	139	2613	838
	90	13157	13259	99,2	0,38	57	1846	504
RPL-OF-SR	60	8603	11879	72,4	5,65	449	3723	6602
	70	11254	12376	90,9	1,82	204	3166	2829
	80	12698	13168	96,4	3,22	89	2728	1094
	90	13017	13264	98,1	1,23	47	2091	632
MRHOF	60	2655	7556	35,2	5,47	600	3354	13776
	70	4908	8933	54,1	9,46	892	3427	10041
	80	9754	11759	82,9	2,46	759	2905	3568
	90	13011	13268	98,1	1,13	137	1973	737

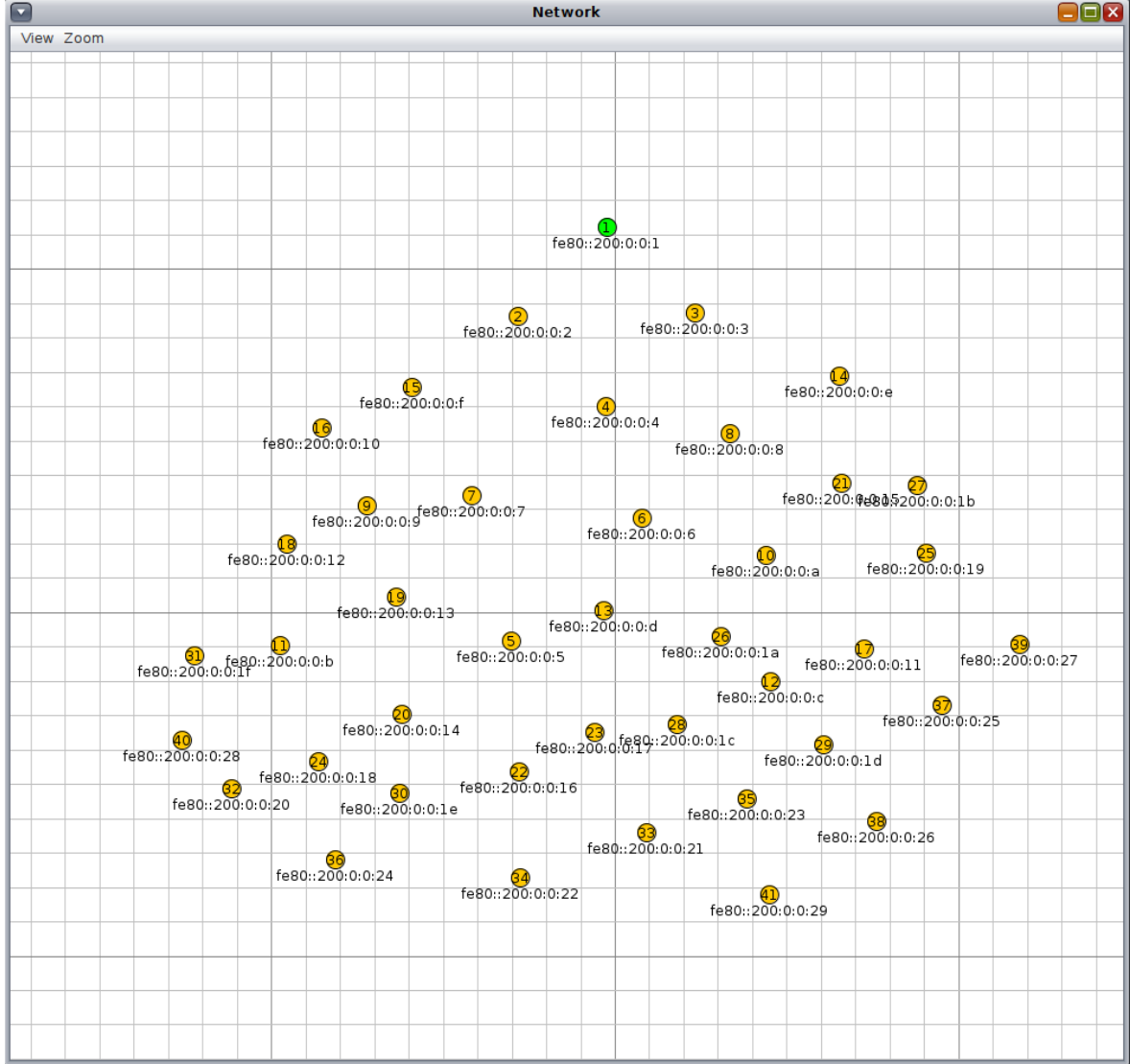
Ek Şekil 1. 20 UDP istemci düğüm bulunan KDA'nın fiziksel topolojisi



Ek Şekil 2. 30 UDP istemci düğüm bulunan KDA'nın fiziksel topolojisi



Ek Şekil 3. 40 UDP istemci düğüm bulunan KDA'nın fiziksel topolojisi



8. KAYNAKLAR

- Abacı, B. (2020, Ocak 5). *Pekiştirmeli öğrenme*. <https://imlab.io/2020/01/05/reinforcement-learning/> adresinden alınmıştır.
- Abacı, B. (2020, Ocak 6). *Q-öğrenme*. <https://imlab.io/2020/01/05/q-learning/> adresinden alınmıştır.
- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8), 102–114.
- Ancillotti, E., Vallati, C., Bruno, R., & Mingozzi, E. (2017). A reinforcement learning-based link quality estimation strategy for rpl and its impact on topology management. *Computer Communications*, 112, 1–13.
- Aydin, H. (2018). *Ietf 6tisch protokolü için dağıtık kullanıcı kimlik doğrulama mekanizması* (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.
- Aydın, B., Görmüş, S., Aydın, H., & Külcü, S. (2022). A new routing objective function for ietf 6tisch protocol. *2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1–4.
- Bellman, R. (1957). A markovian decision process. *Journal of mathematics and mechanics*, 679–684.
- Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J., & Alexander, R. (2012). Rfc 6550: Rpl: Ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks.

- Durukan Odabaşı, Ş. (2013). *Kablosuz mesh ağlar ve kablosuz mesh ağ uygulamaları* (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Farag, H., & Stefanovič, Č. (2021). Congestion-aware routing in dynamic iot networks: A reinforcement learning approach. *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–6.
- Gaddour, O., & Koubâa, A. (2012). Rpl in a nutshell: A survey. *Computer Networks*, 56(14), 3163–3178.
- Gnawali, O., & Levis, P. (2012). Rfc 6719: The minimum rank with hysteresis objective function.
- Gozuacik, N., & Oktug, S. (2015). Parent-aware routing for iot networks. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 15th International Conference, NEW2AN 2015, and 8th Conference, ruSMART 2015, St. Petersburg, Russia, August 26-28, 2015, Proceedings 15*, 23–33.
- Gözüaçık, N. (2015). *Parent-aware routing algorithm for rpl in iot networks* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Gulyani, V., Dhiman, T., & Bhushan, B. (2020). Introducing machine learning to wireless sensor networks: Requirements and applications. In *Deep learning strategies for security enhancement in wireless sensor networks* (Pages 1–22). IGI Global.
- Gutierrez, J. A., Naeve, M., Callaway, E., Bourgeois, M., Mitter, V., & Heile, B. (2001). Ieee 802.15. 4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks. *IEEE network*, 15(5), 12–19.

- Gutiérrez, J. A. (2007). On the use of ieee std. 802.15. 4 to enable wireless sensor networks in building automation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 14, 295–301.
- IEEE.Std.802.15.4e. (2012). Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans) amendment 1: Mac sub-layer.
- Kumar, D. P., Amgoth, T., & Annavarapu, C. S. R. (2019). Machine learning algorithms for wireless sensor networks: A survey. *Information Fusion*, 49, 1–25.
- Kurniawan, A. (2018). *Practical contiki-ng: Programming for wireless sensor networks*. Apress.
- Kushalnagar, N., Montenegro, G., & Schumacher, C. (2007). Ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans): Overview, assumptions, problem statement, and goals.
- Kuwelkar, S., & Virani, H. (2021). Design of an efficient rpl objective function for internet of things applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6), 228–35.
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning* (Volume 1). McGraw-hill New York.
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., & Riedmiller, M. (2013). Playing atari with deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1312.5602*.

Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J., & Culler, D. (2007). Rfc 4944: Transmission of ipv6 packets over ieee 802.15. 4 networks.

Msp-exp430f5438 board user's guide. (2013). Texas Instruments, <https://www.ti.com/lit/ug/slau263i/slau263i.pdf> adresinden alınmıştır.

Okay, F. Y., & Özdemir, S. (2014). Kablosuz algılayıcı ağlarda ortam erişim protokolleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1).

Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N., & Voigt, T. (2006). Cross-level sensor network simulation with cooja. *Proceedings. 31st IEEE conference on local computer networks*, 641–648.

Rayes, A., & Salam, S. (2019). *Internet of things from hype to reality*. Springer.

Sarao, P. (2019). Machine learning and deep learning techniques on wireless networks. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(3), 311–320.

Sutton, R. S. (1988). Learning to predict by the methods of temporal differences. *Machine learning*, 3, 9–44.

Thubert, P. (2012). Rfc 6552: *Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (rpl)* (Teknik Rapor).

Vasseur, J.-P., Kim, M., Pister, K., Dejean, N., & Barthel, D. (2012). Rfc 6551: *Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks* (Teknik Rapor).

Vilajosana, X., Pister, K., & Watteyne, T. (2017). Rfc8180: Minimal ipv6 over the tsch mode of ieee 802.15.4e (6tisch) configuration.

Watkins, C. J., & Dayan, P. (1992). Q-learning. *Machine learning*, 8, 279–292.

Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J.-P., & Alexander, R. (2012). *Rfc 6550: Rpl:ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks* (Teknik Rapor).



ÖZGEÇMİŞ

Tayfun BEKAR, Ortaöğrenimini Gümüşhane Mareşal Fevzi Çakmak Anadolu Öğretmen Lisesi'nde 1999 yılında tamamlamış, 1999 – 2003 yılları arasında Atatürk Üniversitesi'nde Matematik Öğretmenliği okumuştur. 2011 – 2015 yıllarında Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü bitirmiş, 2019 yılında aynı bölümde Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı'nda mühendis olarak çalışmaya başlayan Bekar, halen bu göreve devam etmektedir.

