KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

IOT AĞLAR İÇİN AKILLI ANTEN TABANLI ÇİZELGELEME ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Sercan KÜLCÜ

EYLÜL 2022
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

IOT AĞLAR İÇİN AKILLI ANTEN TABANLI ÇİZELGELEME ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

Sercan KÜLCÜ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 08 /2022
Tezin Savunma Tarihi : 22 / 09 /2022

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

IETF 6TiSCH protokol yığıtı, zaman dilimi ve frekans kanalı kaynaklarının çizelgeleme yöntemi ile planlı bir şekilde kullanılmasını sağlayarak güvenilir, kararlı ve enerji tüketimi düşük ağlar oluşturmayı amaçlar. Frekans kaynakları, diğer kablosuz teknolojiler (Wi-Fi, Bluetooth, diğer IEEE 802.15.4) ile aynı frekans bandının paylaşıldığı durumlarda oldukça sınırlı olabilmektedir. Benzer şekilde büyük ve düğümlerin yoğun olarak yerleştirildiği, veri trafiğinin yüksek olduğu ağlarda zaman dilimi kaynakları da kısıtlı olarak kullanılabilmektedir. Bu çalışmada; IETF 6TiSCH, iki tür Akıllı anten modeli (Anahtarlanabilir huzme, Döner yönlü) ile entegre edilerek uzamsal ayrımdan yararlanan bir ağ çözümü oluşturulmuştur. Zaman dilimi ve frekans kanalı kaynakları, planlı olarak ve kapsama alanı değiştirilebilir antenlerin özellikleri dikkate alınarak kullanıldığında geleneksel yöntemlere göre veri iletim oranı, uçtan uca gecikme ve ortalama enerji tüketimi ağ performansı metriklerinde iyileşme elde edilmiştir.

Bu uzun yolculukta bana inanan, bilgi ve tecrübesinden sürekli faydalandığım, ve öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum değerli hocam Sayın Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ'e bana verdiği cesaret ve desteğinden dolayı sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışma sürecim boyunca değerli vakitlerini bana ayıran, görüş ve düşünceleriyle beni yönlendiren tez izleme komitesi üyeleri hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa ULUTAŞ ve Sayın Doç. Dr. Gökçe HACIOĞLU'na, çalışmalarıma destek veren Sayın Dr. Yichao JIN'e en içten dileklerimle teşekkür ederim. Tez çalışması sırasında gerçekleştirilen 118E289 numaralı 1001 projesi ile maddi olarak beni destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecim boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta eşim olmak üzere sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sercan KÜLCÜ
Trabzon 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “IoT Ağlar İçin Akıllı Anten Tabanlı Çizelgeleme Algoritmalarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda 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. 22/09/2022

Sercan KÜLCÜ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XII
SEMBOLLER DİZİNİ XIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Problem Tanımı 3
1.3. Motivasyon 5
1.4. Amaç ve Sunulan Katkılar 7
1.5. Tezin Yapısı 12
2. LİTERATÜR TARAMASI 14
2.1. 6TiSCH Protokol Yığıtı 14
2.1.1. Çizelgeleme 17
2.1.1.1. Özerk Çizelgeleme 18
2.1.1.2. Dağıtık Çizelgeleme 19
2.1.1.3. Merkezi Çizelgeleme 21
2.1.2. Yönlendirme 24
2.2. Akıllı Antenler 26
3. GELİŞTİRİLEN ANTEN MODELLERİ 33
3.1. Anahtarlanabilir Anten Modeli 34
3.2. Döner Yönlü Anten Modeli 38
4. ANAHTARLANABİLİR ANTEN İLE DAĞITIK ÇİZELGELEME 41
4.1. Önerilen Algoritma 41
4.2. Örnek Bir Ağ Yapısı ve Oluşturulan Çizelge 45
4.3. Test Sonuçları 48

4.3.1. 6TiSCH Minimal Configuration 51
4.3.2. Orchestra Çizelgeleme Algoritması 52
4.3.3. Uzam Zaman Tabanlı Çizelgeleme 53
5. DÖNER YÖNLÜ ANTEN İLE DAĞITIK ÇİZELGELEME 60
5.1. Senkronizasyon Süresinin İyileştirilmesi 62
5.2. Sahte İşaretçi Paket Tanımlanması 66
5.3. Kontrol Paketlerinin Özerk Çizelgelenmiş Hücrelerden İletilmesi 67
5.4. Düğümler Arası En İyi Yayın Gücü Değerinin Değişimi 69
5.5. Kaynak Kullanım Analizi 70
5.6. Test Sonuçları 72
6. DÖNER YÖNLÜ ANTEN İLE MERKEZİ ÇİZELGELEME 81
6.1. TASA Algoritmasının Uyarlanması 81
6.1.1. Algoritma Çalışma Mantığı 85
6.1.2. Örnek Algoritma Çıktısı 90
6.1.3. Çizelgeleyici ile Düğümler Arası İletişim 91
6.1.4. Test Sonuçları 95
6.2. TASA Algoritmasının Yol Tabanlı Çizelge Üretmesi 102
6.3. Çift Yönlü Merkezi Çizelgeleme 110
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 126
8. KAYNAKLAR 128
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

IOT AĞLAR İÇİN AKILLI ANTEN TABANLI ÇİZELGELEME ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

Sercan KÜLCÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ
2022, 139 Sayfa

IETF 6TiSCH protokol yığıtı, zaman dilimi ve frekans kanalı kaynaklarını planlı bir şekilde kullanarak; güvenilir, kararlı ve düşük güç harcayan ağlar oluşturmayı amaçlar. Bu amaca ulaşabilmek için; 6TiSCH çizelgeleme fonksiyonunun, zaman dilimi ve frekans kanalı kaynaklarını radyo donanımları arasında en uygun şekilde dağıtması gerekir. Frekans kanalı kaynakları, antenlerin kapsama alanı içerisinde kullanılan diğer kablosuz teknolojiler (Wi-Fi, Bluetooth, diğer IEEE 802.15.4) ile beraber aynı frekans bandının paylaşıldığı durumlarda oldukça sınırlı olmaktadır. Benzer şekilde çok sayıda düğümden oluşan ve düğümlerin yoğun olarak yerleştirildiği, veri trafiğinin yüksek olduğu ağlarda zaman dilimi kaynakları da kısıtlı olabilmektedir. Bu durumda ağın performansını arttırmak için kapsama alanı değiştirilebilir antenlerin kullanılması çizelgelemeye uzamsal bir boyut kazandırarak kaynakların daha etkin kullanımını sağlar. Bu çalışmada; düşük karmaşıklıktaki Akıllı ve yönlü anten türlerinden iki tanesi (Anahtarlanabilir huzme anten ve Döner yönlü anten) IETF 6TiSCH protokol yığıtı ile uyumlandırılmış, ve uzamsal ayrımdan (spatial seperation) yararlanan bir ağ çözümü oluşturulmuştur. Literatüre katkı olarak; düğümlerin ağa senkronize olmadan birbirlerini tanımasına imkan veren komşu tanıma mekanizması, komşu düğümler ile maksimum yayın gücü elde edilen en iyi anten yön bilgisinin bulunmasını sağlayan bir yöntem ve kontrol ve veri paketlerinin sağlıklı bir şekilde gönderimi için iki adet hibrit çizelgeleme algoritması (dağıtık ve özerk, merkezi ve özerk) önerilmiştir. Akıllı ve yönlü antenlere sahip 6TiSCH düğümleri, bant genişliği kaynaklarını, zaman ve frekans boyutlarına ilave olarak uzamsal boyutta planlayarak, veri iletim oranı, harcanan enerji ve yaşanan uçtan-uca gecikme süresi ağ performansı ölçütleri bakımından geleneksel yöntemlere göre daha üstün performans sergilemişlerdir.

Anahtar Kelimeler: 6TiSCH, Akıllı antenler, Kablosuz duyarga ağları, Nesnelerin interneti

PhD. Thesis

SUMMARY

ANALYSIS OF SMART ANTENNA BASED SCHEDULING ALGORITHMS FOR IOT NETWORKS

Sercan KÜLCÜ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Sedat GÖRMÜŞ
2022, 139 Pages

IETF 6TiSCH protocol stack aims to create reliable, deterministic, and low-power wireless networks by using time slot and frequency channel resources in a planned way. To achieve this goal; the 6TiSCH scheduling function must distribute radio resources effectively among the wireless nodes. Frequency channel resources may be limited when the same frequency band is shared with other wireless technologies (i.e., Wi-Fi, Bluetooth, and other IEEE 802.15.4 networks) used within the same coverage area of the antennas. Similarly, time slot resources are also limited in dense networks consisting of many nodes, or when they have high data traffic. In this case, the use of antennas which can change their coverage area to increase the performance of the network, adds a spatial dimension to the scheduling and provides more efficient use of limited resources. In this study; two of the low complexity smart and directional antenna types (Switchable beam antenna and Steerable directional antenna) are integrated with the IETF 6TiSCH protocol, with the aim of creating a solution with higher spatial reuse. As a contribution to the literature; a novel neighbor discovery mechanism that allows nodes to discover each other before synchronization to the network, a method that provides the best antenna direction with neighbor nodes to obtain maximum signal strength, and two hybrid scheduling algorithms (distributed and autonomous, centralized and autonomous) for healthy transmission of control and data packets are proposed. 6TiSCH nodes equipped with smart and directional antennas improved the network performance metrics by scheduling bandwidth resources not only in the time and frequency domain but also in the spatial domain compared to traditional methods in terms of packet delivery ratio, energy consumption and end-to-end latency.

Key Words: 6TiSCH, Smart antennas, Wireless sensor networks, Internet of things

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 2.4 GHz bandını kullanan BLE, 802.15.4, ve Wi-Fi kanalları 9
Şekil 2. 6TiSCH protokol yığıt mimarisi 14
Şekil 3. Örnek bir TSCH çizelgesi 15
Şekil 4. AMUS algoritması çizelge oluşturma aşamaları 23
Şekil 5. AMUS algoritması ek kaynak tahsisi 23
Şekil 6. RPL topoloji ve kontrol paketleri 25
Şekil 7. Örnek bir ağda Tüm yönlü ve Akıllı anten hop sayılarının karşılaştırılması 28
Şekil 8. Akıllı ve Yönlü anten türleri 29
Şekil 9. Farklı anten tipleri için ışıma örüntüleri [118]. 30
Şekil 10. SPIDA anten ışıma örüntüsü [119]. 31
Şekil 11. SPIDA anten menzil grafiği [107]. 31
Şekil 12. FBPA antenin 4 farklı yüzünün ışıma örüntüleri [120] 32
Şekil 13. Çoklu anten mimari tasarımı 34
Şekil 14. Farklı anten sayısına göre Anahtarlanabilir anten ışıma örüntüleri 36
Şekil 15. Geleneksel ve önerilen yöntem ile oluşan iki çizelgenin karşılaştırılması 36
Şekil 16. Döner yönlü anten ışıma örüntüsü 38
Şekil 17. Döner yönlü anten kapsama alanı 39
Şekil 18. 25 düğümden oluşan örnek bir ağ yapısı 46
Şekil 19. Anahtarlanabilir anten ile oluşturulan örnek bir çizelge 48
Şekil 20. 6TiSCH Minimal Configuration test sonuçları 51
Şekil 21. Orchestra çizelgeleme test sonuçları 52
Şekil 22. Paylaşımlı hücre yaşanan çarpışma oranları 53
Şekil 23. 100% Başarılı paket alma olasılığı durumunda paket iletim oranları 54
Şekil 24. 90% Başarılı paket alma olasılığı durumunda paket iletim oranları 55
Şekil 25. 80% Başarılı paket alma olasılığı durumunda paket iletim oranları 55
Şekil 26. Ağda yaşanan ortalama gecikme süresi 56
Şekil 27. Ortalama enerji tüketim grafiği 57
Şekil 28. Düğüm sayısı ve anten konfigürasyonuna göre senkronizasyon süreleri 65
Şekil 29. Düğüm sayısı ve frekans kaynağına göre senkronizasyon süreleri 66

Şekil 30. Sahte işaretçi mesaj paketinin iletilmesi 67
Şekil 31. Tüme gönderim paketlerin özerk çizelgelenerek tek yere olarak gönderilmesi... 69
Şekil 32. Düğüm çiftlerinin zamanla yayın gücü değişimleri 70
Şekil 33. Senkronizasyon süreleri karşılaştırma grafiği 72
Şekil 34. Ağın oluşma (formation) süreleri karşılaştırma grafiği..... 73
Şekil 35. Başarılı alım olasılığına bağlı olarak ağ gecikme süresinin değişimi 74
Şekil 36. Veri trafiği ve Frekans sayısına bağlı olarak gecikme süresi 75
Şekil 37. Başarılı alım olasılığına bağlı olarak düğümlerin ortalama enerji tüketimi..... 76
Şekil 38. Veri trafiğine bağlı olarak düğümlerin ortalama enerji tüketimi 77
Şekil 39. Başarılı alım olasılığına bağlı olarak düğümlerin paket iletim oranları..... 78
Şekil 40. Veri trafiğine bağlı olarak düğümlerin paket iletim oranları 79
Şekil 41. Ağın yapısı ve ağ elemanlarının yerleşimi..... 81
Şekil 42. 20 düğümden oluşan örnek ağ yapısı 85
Şekil 43. Farklı anten tiplerine göre oluşan çizge yapısı..... 86
Şekil 44. Örnek bir algoritma çıktısı 87
Şekil 45. Bağlılık (Connectivity) matrisi (Tüm yöne anten, Döner anten) 87
Şekil 46. Girişim (Interference) matris (Tüm yöne anten, Döner anten) 88
Şekil 47. Çakışma (Conflict) matrisi (Tüm yöne anten, Döner anten)..... 88
Şekil 48. Yön matrisi (Döner anten)..... 89
Şekil 49. Tüm yönlü anten çözümüne göre oluşturulan çizelge..... 89
Şekil 50. Döner yönlü anten çözümüne göre oluşturulan çizelge 90
Şekil 51. Özerk hücreler tahsis edildikten sonra oluşan çizelge..... 94
Şekil 52. Merkezi çizelgeleme sonrası oluşan örnek çizelge 95
Şekil 53. Düğüm sayısına bağlı yaşanan ortalama gecikme süreleri..... 97
Şekil 54. Düğüm sayısına bağlı gecikme süreleri karşılaştırma grafiği 98
Şekil 55. Düğüm sayısına bağlı ortalama enerji tüketimi grafiği..... 99
Şekil 56. Düğüm sayısına bağlı paket iletim oranları grafiği..... 100
Şekil 57. Alım olasılığına bağlı paket iletim oranları grafiği..... 101
Şekil 58. Merkezi çizelgeleme ile oluşturulan farklı çizelgeler 103
Şekil 59. Optimize edilmemiş TASA algoritmasının çıktısı..... 107
Şekil 60. Optimize edilmiş TASA algoritmasının çıktısı..... 107
Şekil 61. Optimize edilmemiş TASA algoritmasının çıktısı (gecikmeler)..... 108
Şekil 62. Optimize edilmiş TASA algoritmasının çıktısı (gecikmeler)..... 109

Şekil 63. Düğüm sayısına bağlı yaşanan gecikme süreleri 110
Şekil 64. Düğümler arası mesaj paketi trafiği 111
Şekil 65. Örnek bir ağ yapısı 116
Şekil 66. Örnek bir çift yönlü ve sıralı çizelgeleme çıktısı 117
Şekil 67. Düğüm sayısı ve çizelgelemeye bağlı gecikme süreleri 119
Şekil 68. Frekans kaynağı sayısına göre yaşanan gecikme süreleri 120
Şekil 69. Düğüm sayısına bağlı ortalama enerji tüketimi grafiği 121
Şekil 70. Düğüm sayısına bağlı paket ilerim oranları 123
Şekil 71. Alım olasılığına bağlı paket ilerim oranları 124

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Yönlü antenler için geliştirilen ortam erişim protokolleri..... 10
Tablo 2. Anahtarlanabilir anten testleri konfigürasyon ayarları..... 50
Tablo 3. Düğüm sayısına göre paket iletim oranı, gecikme süresi ve enerji tüketimi..... 58
Tablo 4. Anahtarlanabilir anten ve Döner yönlü anten karşılaştırması 80
Tablo 5. Anten tipi ve frekans sayısına bağlı olarak oluşan çizelge uzunlukları 90
Tablo 6. Merkezi çizelgeleme algoritması testleri konfigürasyon ayarları 118
Tablo 7. Anten konfigürasyonu ve çizelgeleme yöntemine bağlı gecikme süreleri (ms) . 125

SEMBOLLER DİZİNİ

6LowPAN	Düşük güçlü Kablosuz Kişisel Bölge Ağları (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)
6TiSCH	IPv6 Over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e
6top	6TiSCH Operation Sublayer Protocol
ACK	Alındı Damgası (Acknowledgement)
ASN	Mutlak Hücre Sayısı (Absolute Slot Number)
CoAP	Kısıtlı Uygulama Protokolü (Constrained Application Protocol)
CSMA	Taşıyıcı-Algılama Çoklu Erişim (Carrier-Sense Multiple Access)
CTS	Clear To Send Sinyali
DAG	Yönlü Dögüsüz Çizge (Directed Acyclic Graph)
DAO	Hedef Duyuru Nesnesi (Destination Advertisement Object)
DIO	DODAG Bilgi Nesnesi (DODAG Information Object)
DIS	DODAG Bilgi Talep Etme (DODAG Information Solicitation)
DODAG	Hedef Tabanlı Yönlü Döngüsüz Çizge (Destination Oriented Directed Acyclic Graph)
EB	Gelişmiş İşaretçi (Enhanced Beacon)
ICMPv6	IPv6 için İnternet Kontrol Mesajı Protokolü (Internet Control Message Protocol)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical & Electronic Engineers)
IETF	İnternet Mühendisliği Görev Gücü (Internet Engineering Task Force)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IPv6	İnternet Protokol Sürüm 6 (Internet Protocol Version 6)
LLN	Düşük-Güçlü Kayıplı Ağlar (Low-Power and Lossy Networks)
MAC	Ortam Erişim Kontrolü (Medium Access Control)
OF	Amaç Fonksiyonu (Objective Function)
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RPL	Düşük Güçlü ve Kayıplı Ağları için IPv6 Yönlendirme Protokolü (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks)
RTS	Request To Send Sinyali

Rx	Alım (Receive)
SF	Çizelgeleme Fonksiyonu (Scheduling Function)
SIR	Sinyal Girişim Oranı (Signal-to-Interference Ratio)
SINR	Sinyal Girişim ve Gürültü Oranı (Signal-to-Interference and Noise Ratio)
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
TSCH	Zaman Dilimli Kanal Atlamalı (Time Slotted Channel Hopping)
Tx	Gönderim (Transmit)
UDP	Kullanıcı Veri Bloğu Protokolü (User Datagram Protocol)
WSN	Kablosuz Duyarga Ağları (Wireless Sensor Network)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kablosuz bağlantı, kablolu iletişimin zorluklarından kaynaklanan problemleri en aza indirmek için, radyo frekans iletişim ortamı üzerinden verilerin kablosuz olarak iletildiği esnek bir iletişim sistemidir. Son yıllarda kablosuz ağ teknolojileri üzerine çalışmalar ve gelişmeler hızla devam etmektedir. Kablolu sistemlerin fiziksel bağımlılıkları, enerji ihtiyaçlarının fazla olması ve donanım yapılarının fiziksel olarak büyük olması gibi kısıtlamalarına karşın, kablosuz ağ teknolojisi pratik, düşük maliyetli, ve verimli çalışabilen sistemler geliştirmeyi mümkün kılar [1].

Günlük hayatımızda kullandığımız birçok cihaz hali hazırda internete erişebilmektedir. Bu yeni nesil internet yapılanmasının genel anlamda kabul edilen adı Nesnelerin İnterneti (IoT) olarak karşımıza çıkar. Nesnelerin İnterneti (IoT), son zamanlarda teknolojide yükselen bir trend olmuş, ve benzeri görülmemiş bir bilgi devrimi başlatarak akademinin, toplumun ve endüstrinin dikkatini çekmiştir [2]. Bahsi geçen nesne kavramı oldukça geniş bir anlama sahiptir ve her türlü izleme cihazı, algılayıcı, veya erişim düzeneği nesne olarak nitelendirilebilir. Nesnelerden oluşturulan bu ağda, fiziksel ortamdan gelen veriler, yapılan değerlendirmelerin sonucunda bilgi olarak operatörlere veya ilgili kişilere iletilir ya da verinin sistemler yardımıyla işlenerek bir davranışta bulunması sağlanır. Bu tür cihazların düşük güç harcayarak haberleşmesi ve kararlı olarak internet omurgasına bağlanması önemlidir.

IoT teknolojileri sayesinde internet üzerinden haberleşilebilen küçük cihazlar insan yaşamının birçok alanına girmeye devam etmekte ve toplumun yaşam standartlarını yükseltmek için temel teknolojilerden bir tanesi olarak görülmektedir. Bu toplum yapısı literatürde Akıllı toplum (Smart society), Akıllı topluluk (Smart community) gibi kavramlar ile tanımlanmaktadır [3]. Ancak, Nesnelerin İnternetini gerçekleştirecek alt yapı için gerekli teknolojilerin oluşturulması için ciddi engellerin aşılması ve küçük cihazları kararlı ve güvenli bir şekilde internetin bir parçası haline getirecek çözümlerin üretilmesi gerekmektedir [4,5].

Son yıllarda Akıllı şehir, Akıllı ev, Akıllı şebeke, Endüstriyel internet (Endüstri 4.0) gibi kavramları sıkça duymaktayız [6]. Enerji sayaçları, şehir içi park sistemleri, endüstriyel

otomasyon, doğal afetleri (örneğin; orman yangını) tespit sistemleri gibi uygulamalarda kullanılan bu cihazların en önemli performans kıstaslarından bir tanesi düşük güç tüketimidir [7]. Coğrafi koşullar, kablolama maliyeti gibi nedenlerden dolayı duyargalardan oluşan bir ağın uzun süre pille çalışabilmesi arzu edilmektedir. Duyarga modüllerinin en fazla enerji tüketen modülleri ise kablosuz iletişimi mümkün kılan radyo donanımlarıdır [8]. Bu nedenle; radyoların enerji tüketimlerini azaltmak için tasarlanan ortam erişim protokollerinin radyo arayüzlerini mümkün olduğunca az kullanması gerekmektedir. Bu yaklaşım, enerji tasarrufu anlamında olumlu etki göstermesine karşın; ağdaki paket kayıplarını ve gecikmeleri arttırır. Buna ek olarak girişimlerden kaynaklanan paket kayıpları ve düşük radyo gönderim güçleri de düşünüldüğünde, bu tür ağların görev kritik uygulamalarda kullanılabilmeleri için ek yöntemlere gereksinim duyulur [9].

Nesnelerin İnterneti için ortaya konulan senaryoların birçoğu kablosuz olarak haberleşebilen küçük cihazları ve gezgin ağları içermektedir. Bu tür cihazların fiziksel olarak müdahale edilmeden uzun süre kullanılabilmesi için düşük güç harcayarak haberleşmesi ve kararlı olarak internet omurgasına bağlanması gerekmektedir. Bu nedenle yakın zamanda düşük güçlü kablosuz duyargaların internetle uyumlu hale getirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır [10]. Örneğin; 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) [11] çalışma grubu düşük güçlü ve küçük cihazları internetin bir parçası olması adına çeşitli çözümler ortaya koymuştur. Bu çözümlerden en önemlileri IPv6 paketlerinin IEEE 802.15.4 radyosundan gönderilebilmesi için başlık sıkıştırma ve paketlerin parçalama ve birleştirme (fragmentation) işlemlerini gerçekleştirmesidir. Aynı zamanda, IETF ROLL (Routing Over Low power and Lossy networks) [12] çalışma grubu düşük güçlü kablosuz duyarga ağları için RPL yönlendirme protokolünü ortaya koymuştur. IETF 6TiSCH (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e) çalışma grubu ise geliştirilen internet protokollerini ucuz, küçük ve düşük güçlü cihazların üzerinde kablolu haberleşme kararlılığıyla haberleştirecek protokoller ortaya koymak üzere oluşturulmuştur [13, 14]. Yakın zamanda yapılan çalışmalar, IETF 6TiSCH protokolünün potansiyel olarak birçok Nesnelerin İnterneti ağları için uyumlu olduğunu göstermiştir. Dinamik kaynak ayrımı ve çizelgeleme sayesinde düğümler yüksek kararlılık ve düşük gecikmeyle birbirleriyle haberleşebilmektedirler. Yapılan çalışmalar ayrıca ağdaki kaynakların frekans ve zaman anlamında uygun çizelgelenmesiyle ağın kapasitesinin de ciddi oranda arttırılabileceğini ortaya koymaktadır [14, 15].

6TiSCH ağlarda ağın performansını arttırmak için sisteme ek anten arayüzlerinin eklenmesi [16], farklı frekans bantları için farklı zaman dilimi uzunlukları kullanmak [17] gibi çözümler vardır. Geçmişteki yönlü anten üzerine yapılan çalışmalar, sisteme ekstra anten maliyeti getirmemek ve standart bir çözüm oluşturmak adına radyonun yayın yönünün uygun olarak ayarlanmasıyla kablosuz ağ kapasitesini ve ağın kapsama alanını önemli derecede arttırılabileceğini göstermiştir. Ancak, günümüzde ortaya konulan çalışmalarda hem 6TiSCH protokolü gibi zaman ve frekans boyutunda çizelgeleme yapan hem de yönlü ve akıllı anten teknolojisinden faydalanarak ağın kararlılığını arttıran bir çözüm geliştirilmemiştir. Yaptığımız testler sonucunda, ağın yüksek kayıp olan noktalarında, sadece frekans ve zaman boyutunda çizelgelemenin yetersiz kaldığı ve yayın yönü de değiştirilebilen antenlerden faydalanma ihtiyacı görülmüştür [9]. Akıllı antenler frekans ve zaman boyutlarıyla gerçekleşen kaynak kullanımının uzamsal boyuta da yayılmasını mümkün kılar. Bu sayede düğümler istenmeyen girişimleri gerçeklenen akıllı algoritmalar yardımıyla engelleyebilir ve diğer yayın yapan duyargaların girişimine maruz kalmadan sağlıklı bir şekilde komşularıyla haberleşebilirler [18].

1.2. Problem Tanımı

Kablosuz duyarga ağları günümüzde oldukça popüler olan ve birçok alanda (tarım, askeri, sağlık vb.) uygulanabilen bir teknolojidir. Günümüzde kablosuz sistemler üzerindeki gelişmeler düşük maliyete sahip, enerji tüketimi az olan, ve çok işlevli algılama cihazlarının üretilmesine olanak vermiş ve bu aygıtlar kullanılarak birçok duyarga ağı oluşturulmuştur. Kablosuz duyarga ağları kullanılarak ortamla etkileşimli olarak bilgi toplanabilmekte, bu bilgi merkezi bir yapıda değerlendirilebilmekte ve gerektiğinde bilgiye dayalı olarak ağın yapısı ve davranışı üzerine değişiklikler yapılabilmektedir. Kablosuz duyarga ağları kullanımı beraberinde aşağıda verilen sorunları da beraberinde getirmiştir.

Duyarga ağını oluşturan her bir düğüm/cihaz sınırlı donanım kapasitesine sahiptir. Örneğin; UC Berkeley tarafından açık kaynak platform olarak tasarlanan Telosb cihazı, IEEE 802.15.4 uyumlu radyo ve 250 kbps bant genişliği, 8 Mhz TI MSP430 mikrodenetleyici ve 10 kB bellek miktarına sahiptir [19]. Ağı oluşturan düğümler sahip oldukları donanım kısıtlarından dolayı tüm ağ hakkında bilgi edinerek optimum kararlar almak yerine sadece komşularından elde ettiği bilgiyi kullanarak optimal olmayan davranış sergilerler. Bu durum genellikle algılayıcı ağlarındaki iletişimin, yüksek sayıda çarpışmalara

ve ağda tıkanıklıklara yol açmasına sebep vermektedir, aynı zamanda ağda verilerin iletilmesi için gerekli gecikme süresini arttırarak, düğümlerin enerji verimliliğini düşürmektedir [20]. Contiki işletim sistemi ve 6TiSCH standardı kablosuz duyarga ağları için geliştirilmiş çözümlerdir. Bu iki teknoloji, düşük donanımlı cihazlar üzerinde çalışabilecek şekilde tasarlanmışlardır [21].

Çoğu uygulamada, sensör düğümleri erişilmesi zor yerlere (dağlık bölge, terör bölgesi vb.) kurulmaktadır. Bu yüzden, düğümlerin bakımı oldukça maliyetli ve zordur. Ağın ömrü düğümlerin ömrü ile, düğümlerin ömrü ise sahip oldukları pilin ömrüyle belirlenir. Bu nedenle minimum düzeyde enerji tüketimi bu tür ağlar için hayati önem taşımaktadır. Enerji tüketiminin azaltılması için 3 yöntem mevcuttur. (1) Akıllı anten kullanılarak daha az enerji tüketilerek daha uzak noktalara gönderim yapılması, verilerin daha az atlama ile toplayıcı düğüme iletilebilmesini sağlar ve düğümler tarafından tüketilen enerji miktarını azaltırken aynı zamanda ağın bant genişliğini arttırır. (2) Çizelgeleme yapılarak radyo arayüzlerinin sadece belirli zaman aralıklarında aktif edilmesi sağlanarak ağda yaşanan çarpışmalar azaltılarak, ve mesaj paketleri tekrarlanmadan iletilmesi sağlanarak düğümlerin ortalama enerji tüketimi azaltılır. (3) Akıllı çizelgeleme algoritmaları sayesinde ağ içi yaşanan gecikmeler azaltılabilir, kontrol paketlerinin daha sağlıklı iletimi sağlanarak ağın güvenilirliği ve kararlılığı arttırılarak düğümlerin ağdan kopma ve sonrasında ağa tekrar katılması gibi olumsuz durumlar azaltılarak ağın enerji tüketimi azaltılır.

Sensör düğümleri, radyolarının iletim mesafelerinin düşük olması nedeniyle verileri toplayıcı (sink) düğüme direkt olarak gönderemezler, toplayıcı düğüme daha yakın olan komşu düğüm (röle) üzerinden gönderirler. Sensör düğümlerin doğru yönlendirme yapabilmeleri, ve internete bağlanabilmeleri için her birine IPv6 adresi atanabilmeli ve yönlendirmelerin bu formatı desteklemesi gerekmektedir. IEEE 802.15.4 standardı tek seferde maksimum 127 byte'lık verilerin gönderimine izin verirken, IPv6 formatı 1380 byte'lık mesajlaşmayı desteklemektedir, bu uyumsuzluğun çözülmesi için fiziksel (PHY) katmanda mesajların parçalanmasına ve sonrasında birleştirilmesine ihtiyaç duyulur. 6TiSCH, 6LOWPAN ve RPL protokolleri bu tür sorunlara çözüm getirmektedir [12, 14, 15].

IEEE 802.15.4 TSCH ortam erişim katmanı 2.4 Ghz bandında 16 farklı frekans kanalından haberleşmeye izin vermektedir. Frekans atlama (channel hopping) özelliği ile her bir yayın bu 16 kanal değişken sırada kullanılarak yapılmaktadır. Böylece ağdaki çarpışmalar azaltılmakta, ve girişimlerden daha az etkilenme sağlanmaktadır. Simülasyon ortamında yapılan testler neticesinde 16 farklı frekans kanalının yeterli olduğu görülürken,

gerçek hayatta tüm frekans kanalları verimli olarak kullanılamamaktadır. Çünkü; çoğu kanal aynı frekans bandını kullanan Wi-Fi, Bluetooth ve diğer IEEE 802.15.4 yayınları ile çakışmaktadır ve bu nedenle zaman ve frekans boyutlarında yapılan çizelgeleme, büyük ölçekli ve yoğun ağlar için yetersiz kalmaktadır [18].

Ucuz ve küçük boyutlu sensör düğümleri kullanılarak oluşturulan duyarga ağları binlerce düğümden oluşabilir. Ölçeklenebilirliği sağlamak ve bu çok sayıda düğümden oluşan ağları yönetmek önemli bir sorun teşkil etmektedir. 6TiSCH protokolü sunduğu çizelgeleme yeteneği ile dağıtık algoritma geliştirmeye izin vermektedir. Uygulamanın ihtiyaçlarına göre çizelgeleme değişken uzunlukta zaman dilimlerinden (timeslot) oluşabilmektedir. Ağa yeni katılan düğümler komşularıyla ilk iletişimlerini kurmak için paylaşımlı (shared) hücreleri kullanırlar. Düğümler paylaşımlı hücrelerde radyolarını aynı zaman diliminde ve belirlenmiş bir frekans üzerinden aktif etmek zorundadırlar. Bu sayede düğümler komşularıyla işbirliği gerektirmeden birbirlerini tanıyabilmekte ve çizelgeleme için bilgi alışverişinde bulunabilmektedir [22], ancak paylaşımlı hücrelerde girişim ve çarpışmaların sık yaşanması ağın güvenilirliğinin ve kararlılığının düşük olmasına yol açmaktadır.

1.3. Motivasyon

IETF 6TiSCH çalışma grubunun amacı; kablosuz iletişim kurabilen cihazlardan oluşan, kablolu iletişim seviyesinde kararlılığa ve kestirilebilir/düşük haberleşme gecikmesine sahip, enerji tüketimi düşük olan ve IPv6 protokolüyle uyumlu kablosuz duyarga ağlarını gerçeklemektir. IETF 6TiSCH teknolojisi aynı hedefe yönelik olarak geliştirilen WirelessHART [23] protokolünü IPv6 [24] protokolüyle ve IEEE 802.15.4 [25] fiziksel katmanıyla birleştirmeyi hedeflemektedir. WirelessHART protokolü yüksek kararlılığa sahip düşük enerjili kablosuz ağların zaman paylaşımlı kanal atlamalı (TSCH) ortam erişimi protokolüyle mümkün olabildiğini kanıtlamıştır [26]. IETF 6TiSCH protokolü, kanal atlamalı ve zaman paylaşımlı 802.15.4e ortam erişim protokolüyle IPv6 tabanlı 6LoWPAN ve RPL protokol parçalarını birleştirerek, kanal atlamalı ve zaman paylaşımlı ortam erişim protokolünün yüksek kararlılık özeliklerini Nesnelerin İnterneti uygulamalarına getirmeyi hedeflemektedir [27]. Dinamik kaynak ayrımı ve çizelgeleme sayesinde düğümler yüksek kararlılık ve düşük gecikmeyle birbiriyle haberleşebilmektedirler [28]. Ancak, günümüzde ortaya konulan çalışmalarda akıllı ve

yönlü anten teknolojisinden faydalanarak ağın performansını arttırma fikri henüz işlenmemiştir. Akıllı antenler sayesinde frekans ve zaman boyutlarında gerçekleşen kaynak kullanımının uzamsal (spatial) boyuta da yayılması mümkün olmaktadır. Ayrıca, mevcut radyo görev döngüsü (RDC) mekanizmaları, birden fazla olası anten yönünü dikkate almadıkları için yönlü antenlerle uyumlu olarak çalışmamaktadır [29].

Kablosuz duyarga ağlarında akıllı anten kullanımı enerji verimliliğini arttırmak için önerilen yöntemler arasındadır [30]. Önerilen yöntemler genellikle yönlü antenler ile ortam erişim protokolünü bütünleştirmeyi amaçlamaktadır, ve ortam erişim katmanı yönlü antenlerin kontrolünden sorumludur [31]. Özelikle, 6TiSCH gibi zaman paylaşımlı ve frekans atlamalı sistemler için yayın yönünün seçimi akıllı algoritmaları gerekli kılmaktadır. Ağdaki komşu düğümlerin gönderim yönleri uygun olarak ayarlandığında aynı frekans bandında dahi uzamsal ayrım kullanılarak eşzamanlı veri transferi başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu şekilde özelikle frekans bantlarının kısıtlı olduğu senaryolarda ağın kapasitesi arttırılabilir.

IEEE 802.15.4 standardı düşük güçlü, düşük maliyetli ağlarda sık kullanılan bir teknoloji olması dolayısıyla [32], gerçek hayatta kullanılırken bağlantı problemleri yaşanır. Düşük güçlü olmasından dolayı çevresinde bulunan ve aynı lisansız iletişim bandını paylaşan Wi-Fi gibi ağlardan olumsuz yönde etkilenirler ve paket kayıpları yaşarlar [33]. Ayrıca, yansıma, sönümlenme veya çevredeki duvar, metal eşya gibi maddeler yüzünden bağlantı kalitesi zaman içerisinde değişiklik gösterebilmektedir, dolayısıyla önerilen çözümün kendisini zaman içerisinde değişen ortam koşullarına adapte edebilmesi beklenir [34].

Nesnelerin interneti ağlarında bahsedilen bu sorunların üstesinden gelmek için elektronik olarak dönebilen parazit dizi antenler (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator (ESPAR)) kullanılabilir [35]. ESPAR antenler ışıma yönünü elektronik olarak ayarlayarak, yayın yapılacağında ışıma yönünü ve ışıma kapsama alanını daraltarak, girişim ve çarpışmaların daha az yaşanmasını sağlar [36]. Aynı zamanda, Akıllı antenler daha yüksek anten kazancı sağlayarak, istenen yönde daha uzak mesafeye yayın yapabilir, dolayısıyla tüm yönlü antenlere kıyasla bağlantı kalitesini önemli ölçüde artırabilirler.

Elektronik olarak dönebilen antenler avantajları yanı sıra, daha karmaşık protokol ve algoritmalara ihtiyaç duyarlar. Standart ve geleneksel ortama erişim mekanizmaları, yönlü antenler ile kullanılmak için uygun değillerdir [37]. Ağın performansı antenin ayarlanacağı yön bilgisine bağlı olduğu için, yayın yapılacağı sırada anten için en uygun yön bilgisinin

hesaplanabilmesi gerekir. İki düğüm birbirleri ile antenlerini doğru bir şekilde yönlendirdiklerinde anten kazancından dolayı yüksek sinyal gücü elde edebilirken, yanlış yönlendirme sonucunda ise bağlantı kalitesini düşüreceklerdir [38].

1.4. Amaç ve Sunulan Katkılar

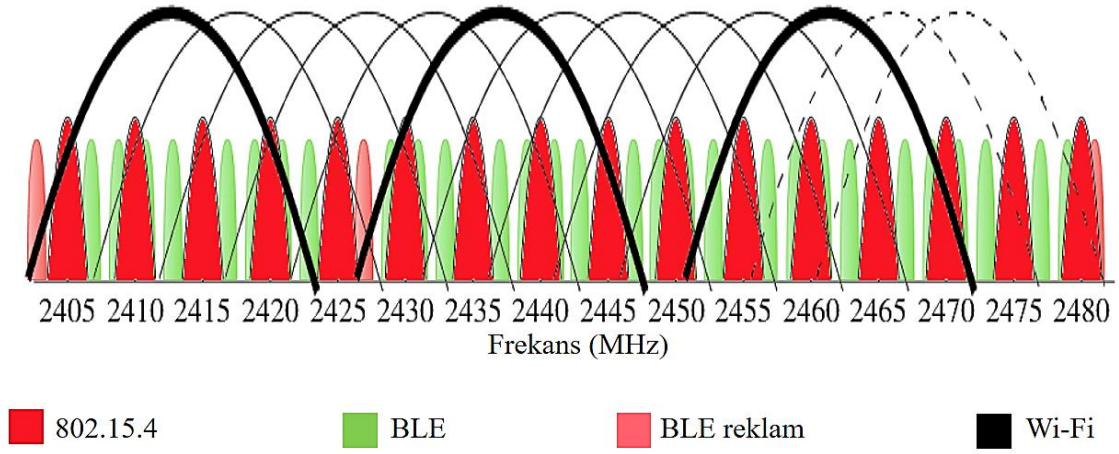
Son zamanlarda Akıllı şebeke, Akıllı sağlık, Akıllı şehirler gibi kavramların hayatımıza girmesi ile beraber hem endüstriden hem de akademiden küçük cihazların iletişimine duyulan ilgi artmıştır. Dolayısıyla, araştırma ve standardizasyon kuruluşları düşük güçlü cihazlardan oluşan ağlar için çalışmalarına öncelik vermiştir. Bu ağlarda yer alan cihazların gelecekte milyarlarca olacağı tahmin edilmektedir. Bu sayıda cihazın ve bu cihazların bağlı oldukları ağların sağlıklı çalışabilmeleri için internet erişimine sahip olmaları ve internet üzerinden etkin bir şekilde ulaşılabilir olmaları önem arz etmektedir [39, 40]. Bu nedenle her bir cihaza global IPv6 adresleri atanabilmesi gerekmektedir. Küçük aygıtları IPv6 teknolojisini kullanarak internete bağlama fikri, Nesnelerin İnterneti (IoT) olarak tanımlanmaktadır. Bu tür ağların gelecekteki İnternet'in büyük bir parçası olması beklenmektedir. Bu nedenle, gelecek nesil IoT ağlarının ortaya koyduğu zorlukları ele almak için araştırma toplulukları tarafından yeni ve özgün yöntemler oluşturulması gerekmektedir.

Gelecekteki kablosuz ağların, aynı veya bitişik frekans kanallarında çalışan farklı teknoloji kategorilerine ait düğümleri kapsaması öngörülmektedir. Kullanıcı başına veriye olan talep arttıkça, bu artan talebe cevap verebilmek için gereken kaynak kullanımı da artacaktır. Bu nedenle, gelecekte düşük güçlü kablosuz IoT ağları, yüksek yoğunluklu ağ senaryolarının ortaya çıkardığı zorluklarla başa çıkmak için kaynak yönetimini mümkün olduğunca iyi bir şekilde yapmak zorunda kalacaklardır [41]. Artan ortak ve bitişik frekans kanalı etkileşimi, radyo arayüz tasarımı için yeni yaklaşımlar gerektirecektir. Bu tür zorlukların üstesinden gelmek ve kaynak yönetimine ekstra bir boyut kazandırmak için, tüm çevresine yayın yapan tüm yönlü (omni-directional) antenler yerine alansal (sectoral) ya da yönlendirilebilir anten teknolojilerinden faydalanmak gerekecektir. Bu nedenle, yeni nesil kablosuz IoT ağlarının başarılı bir şekilde konuşlandırılması için Uzam Bölüşümlü Çoklu Erişim (Space Division Multiple Access) ortam erişim mekanizmasını mümkün kılan düşük maliyetli radyo arayüzlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir [42].

Tüm yönlü antenler, tüm yönlerden gelen yayınlara maruz kaldıklarından dolayı zaman/frekans alanında (time/frequency domain) dikgen çoklu erişim (orthogonal multiple

access) kullanıldığında, NOMA[43] gibi dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access) yöntemi kullanılmadığında paylaşılan kablosuz ortamın etkin olarak kullanılmasını sınırlarlar. Akıllı antenler ise, yaydıkları enerjiyi belli bir yöne odaklayabilirler ve aynı iletim gücü ile daha uzun iletim mesafesine ulaşabilirler. Bu sayede uzamsal ayrım kullanımını artırabilir ve ağdaki çarpışma miktarını düşürebilirler. Bu durum ortak kanal girişimini en aza indirerek ağ kapasitesini arttırır [44]. Böyle bir çözüm, ortak kanal girişiminin neden olduğu yeniden iletimlerin azalması nedeniyle kablosuz nesnelerin interneti ağının ömrünü uzatabilir [45]. Bu nedenle, akıllı ve yönlü anten tabanlı olarak tasarlanacak yeni protokoller ve uygulamalar ağın kapasitesini, kullanım ömrünü ve uçtan uca gecikme süresi performans ölçütlerini iyileştirilebilirler [46]. Düğümler tarafından kullanılan Anahtarlanabilir anten yönlerinin sayısının en aza indirilmesi veya Yönlendirilebilir antenin kapsama alanının daraltılması, komşu düğümlerin olmadığı yönlerde gereksiz iletimleri ve dinlemeleri önlerken, alınan sinyal gücünü en üst düzeye çıkararak bağlantı kalitesini iyileştirmek için kullanılabilir.

2012 yılında, kablosuz endüstriyel uygulamaların zorlu güvenilirlik gereksinimlerini karşılamak için IEEE tarafından 802.15.4e zaman dilimli kanal atlamalı (TSCH) ortam erişim kontrol protokolü önerilmiştir. TSCH, ağ içinde yaşanan gecikmelere bir üst sınır getirilmesi ve ağ içinde karşılaşılan parazitlere ve girişimlere karşı dayanıklılık sunar. IETF, TSCH'nin yüksek güvenilirlik özelliklerini IPv6 destekli düşük güç ve kayıplı ağlara (LLN) getirmek için 6TiSCH [47] çalışma grubunu oluşturmuştur. 2.4 GHz ISM bandını kullanan kablosuz IoT ağları, bu bandı Wi-Fi ve Bluetooth gibi diğer teknolojiler ile paylaşmaktadır. [48] 'te vurgulandığı gibi, IEEE 802.15.4'ün sadece dört kanalı (15, 20, 25, 26) Wi-Fi kanalları ile örtüşmemektedir. Şekil 1'de 2.4 GHz bandında bulunan BLE, 802.15.4 ve Wi-Fi kanalları gösterilmektedir [49]. Wi-Fi istasyonlarından minimum girişimle etkilenen güvenilir bir 6TiSCH ağı oluşturmak için, 6TiSCH kaynak atama mekanizmalarının örtüşmeyen bu kanallardan mümkün olduğunca sık yararlanmaları önemlidir. Ancak, bu 6TiSCH protokolünün frekans çeşitliliği avantajlarını önemli ölçüde sınırlandırır. Bu kısıtlamaya karşılık, akıllı anten arayüzleri kullanılarak ortam erişim katmanı kaynak atama mekanizmalarına ilave bir serbestlik boyutu (dimension of freedom) sağlanır.



Şekil 1. 2.4 GHz bandını kullanan BLE, 802.15.4, ve Wi-Fi kanalları

Bu çalışmanın ana hedefi, IETF 6TiSCH ağları için akıllı ve yönlü anten tabanlı kaynak planlama mekanizmasının geliştirilmesidir. Karma bir ortam erişim mekanizmasını mümkün kılmak için düşük karmaşıklıkta Anahtarlanabilir huzme anten ya da Döner yönlü anten çözümünden yararlanılır. Bu yeni yaklaşımda, zaman dilimi ve frekans kanalı bant genişliği kaynakları uzamsal (spatial) boyut dikkate alınarak tahsis edilir, ve 6TiSCH ağı daha yüksek paket iletim oranı, daha düşük ortalama enerji tüketimi ve daha düşük uçtan uca gecikme süresi ile oluşturulur. Tez kapsamında, çevresindeki girişimlerden (interference) daha az etkilenen, dolayısıyla daha yüksek bant genişliğine imkan sağlayan, düşük gecikmeli, uzun ömürlü, IPv6 standardına uyumlu, kendi kendini onarabilen bir kablosuz duyarga ağı çözümü amaçlanmıştır.

Bu doğrultuda, kullanılan akıllı anten teknolojilerinin 6TiSCH standardı ile uyumlu çalışan ağlara uygulanabilmesi için gerekli ortam erişim (MAC) ve fiziksel (PHY) katman gibi yazılım parçaları gerçeklenmiştir. Var olan açık kaynak kodlu ve geliştirilmesine devam edilen COOJA ağ simülatörüne Anahtarlanabilir huzme ve Döner yönlü olmak üzere iki adet anten modeli eklenerek kullanım alanı genişletilmiştir. Ağın spektral verimliliğini arttıran ve veri trafiğini yönetmek amacı ile zaman ve frekans kaynaklarını, anten konfigürasyonu ve düğümlerin birbirlerine olan görece yönlerini dikkate alarak çizelgeleme yapabilen merkezi ve dağıtık çizelgeleme algoritmaları tasarlanmıştır.

Kablosuz algılayıcı ağlarında yönlü anten kullanımına yönelik yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Tüm yönlü antenler ile yönlü antenleri işbirliği içerisinde kullanan yöntemler antenlerin farklı karakteristik özelliklere sahip olması nedeniyle sorun

yaşamaktadır. Çizelgeleme yapılmadan ortama rastgele erişilen yöntemler kararlı bir ağ ve maksimum gecikme süresi garanti edememektedir. Standart bir çözüm kullanmayan çalışmalar ise daha uzun çerçeve veya daha çok zaman dilimi kullanmalarından dolayı ağın performansını düşürmektedirler. Bu alanda yapılan ilgili çalışmalar aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 1. Yönlü antenler için geliştirilen ortam erişim protokolleri

Çalışma	Özet
Schandy vd. [29]	SPIDA adını verdikleri 6 adet anahtarlamalı antene sahip sistem ile denemeler yapmışlardır. Ortam erişim katmanı olarak senkron olmayan ContikiMAC [50] kullanılmıştır. En iyi anten seçimini yapmak için RSSI verisini kullanmışlardır. Sinyal gücünü maksimize etmek ve kullanılacak anten sayısını minimize etmek üzere 2 farklı yaklaşım uygulamışlardır. Birden fazla anten aynı anda kullanıldığında zaman dilimi süresi uzamakta ve gönderim tüm yönlü antene göre uzun sürmektedir.
Voigt vd. [51]	Yönlü anten teknolojisi LoRa ağına uygulanmıştır. Değerlendirmeler SPIDA anten modelini entegre ettikleri LoRaSim üzerinde yapılmıştır. 4dBi ve 8dBi kazanca sahip antenlerle 4 adete kadar birbirinin girişim alanında bulunan ağlar üzerinde testler koşulmuştur. Yönlü antenin girişim engelleme yeteneği sayesinde ağın performans ölçütlerinin iyileştiği görülmüştür.
Varshney vd. [52]	802.15.4 ağında toplu paket transferleri için maksimum bant genişliği elde etmek amacıyla yönlendirilebilir antenlerden faydalanılmıştır. Senkronizasyona ihtiyaç duymayan, farklı frekans kanalları kullanmayan ve RSSI değerlerine göre anten konfigürasyonlarını belirleyen bir ortam erişim katmanı tasarlanmıştır. Çalışmada, 214 kbit/s bant genişliği elde edilmiştir.
Nur vd. [53]	DCD-MAC adını verdikleri protokol ile yeni bir çerçeve yapısı tanımlanmıştır. Bir zaman dilimi senkronizasyon, tahsis etme ve veri transferi olarak 3 parçaya bölünmüştür. Sadece ata ve çocuk düğüm arasında senkronizasyon sağlanmaktadır. Çarpışma yaşanmasını

Tablo 1'in devamı

	engellemek için DRTS ve DCTS paketleri gönderilmektedir. Tüm yönlü anten ile yönlü anten işbirliği içerisinde kullanılmıştır.
Zhang vd. [54]	Zaman çerçevesi 3 kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda komşu tanıma, ikinci kısımda kaynak tahsisi ve son kısımda veri transferi yapılmaktadır. Komşu tanıma aşamasında farklı yönlerden gönderim ve dinleme yapılmaktadır. Düğümler hücre tahsisi için üç yollu anlaşma yapmaktadır. Kontrol paketlerinin gönderim maliyeti fazladır.
Jakllari vd. [55]	PMAC adını verdikleri mekanizma ile [54]'dekine benzer bir çerçeve yapısı kullanılmıştır. Komşu tanıma aşamasında tüm yönlü antenden faydalanılmıştır. Veri transferi kısmında kanala erişim için yine tüm yönlü antenlerden RTS ve CTS paketleri gönderilmektedir.
Huang vd. [56]	DBTMA/DA adını verdikleri yöntemle kanalın dolu olduğunu belirtmek için meşgul tonu tanımlanmıştır. RTS/CTS ve veri paketleri yönlü anten üzerinden gönderilmektedir. Veri transferi ve meşgul tonu için iki farklı kanal kullanılmaktadır. Farklı kanallardan veri iletişimine izin vermemektedir.
Korakis vd. [57]	CDR-MAC adını verdikleri protokol ile sıra halinde tüm yönlere RTS paketi gönderilmektedir. RTS paketini alan düğümler CTS ile bu pakete cevap vermektedir. ACK paketi alındıktan sonra veri transferi yapılmaktadır. Tüm antenlerin sıra ile kullanılması performansı kötü etkilemektedir.

Bu çalışmanın literatüre sunduğu katkılar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Anahtarlanabilir huzme anten ve Döner yönlü anten olmak üzere iki tür anten modeli geliştirilmiş ve Cooja simülatörüne entegre edilmiştir. Anten konfigürasyonu (anten sayısı, huzme genişliği) bilgilerinin senaryodan okunduktan sonra cihaz yazılımına aktarılması için Contiki işletim sisteminde yapılması gereken değişiklikler detaylı olarak anlatılmıştır.
- IETF 6TiSCH ağlar için düşük karmaşıklıkta Anahtarlanabilir anten kullanılarak anten yönünü dikkate alan dağıtık bir kaynak planlama mekanizması geliştirilmiştir. Düğümlerin komşuları ile sağlıklı haberleşebilmesi adına en iyi anten bilgisinin

tutulduğu bir komşuluk listesi ve bu listenin yönetimi adına bir mekanizma tanıtılmıştır.

- Geliştirilen anahtarlanabilir anten modeli tüm yönlü antenler için geliştirilmiş iki adet özerk çizelgeleme algoritması (Minimal configuration, Orchestra) ile test edilmiş ve performansı tüm yönlü anten ile karşılaştırılmıştır.
- Döner yönlü antene sahip sistemler için komşu düğümlerin daha hızlı keşfedilmesini sağlayan özerk bir çizelgeleme algoritması sunulmuştur. Özerk hücrelerin tahsis edilme işlemi detaylı bir şekilde verilmiştir.
- Düğümlerin birbirleri ile en iyi şekilde haberleşmesini sağlayan RSSI tabanlı en iyi yön bulma algoritması tanıtılmıştır. Elde edilen RSSI değerlerinin zaman içerisinde değişimi gösterilmiş ve incelenmiştir.
- 6TiSCH ağların ölçeklenebilirliğini arttırmak için; paylaşımlı kanalda yaşanan çarpışmaları azaltmaya ve tümegönderim paketlerin sağlıklı iletilmesine yönelik bir mekanizma geliştirilmiştir. Geliştirilen mekanizmanın sisteme getirdiği ek maliyet hesaplanmıştır.
- Bilinen bir merkezi çizelgeleme algoritması (TASA) anten yönlerini de dikkate alacak şekilde değiştirilmiştir ve algoritmanın performansı tüm yönlü anten kullanılmasına göre karşılaştırılmıştır. Aynı algoritma uçtan uca gecikmeyi minimize edecek şekilde geliştirilmiş ve performans sonuçları incelenmiştir.
- Anten yönlerini ve düğümlerin trafik ihtiyacını dikkate alan, bir paketin kaynak düğümden toplayıcı düğüme kadar minimum gecikme ile iletilmesine olanak sağlayan ve merkezi düğümün ürettiği cevap paketinin yine minimum gecikme ile kaynak düğüme iletilmesini sağlayan merkezi bir çizelgeleme algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritmanın performansı iki tür anten modeli için dağıtık çizelgeleme ile karşılaştırılmıştır.

1.5. Tezin Yapısı

Tezin ilerleyen kısımları şu şekildedir: Bölüm 2'de 6TiSCH protokolü ve literatürde bulunan farklı çizelgeleme yaklaşımları üzerine yapılan çalışmalar verilmiştir. Ayrıca, modellemesi yapılan Akıllı anten türleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ve geliştirilen antenlere ait ışıma örüntüleri sunulmuştur. Bölüm 3'te geliştirilen Anahtarlanabilir anten ve Döner yönlü anten modelleri tanıtılmıştır, işletim sistemi ve simülasyon aracı üzerinde

yapılan değişiklikler verilmiştir. Bölüm 4'te geliştirilen Anahtarlanabilir anten modeli, 6TiSCH Minimal Configuration ve Orchestra algoritması ile kıyaslanarak doğrulaması yapılmıştır. Dağıtık bir çizelgeleme algoritması ile beraber kullanılarak anten modelinin performansı geleneksel tüm yönlü anten ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 5'te geliştirilen Döner yönlü anten modeli dağıtık bir çizelgeleme algoritması ile beraber kullanıldığında ortaya çıkan problemler ve bu problemleri ortadan kaldırmaya yönelik önerilen çözüm yöntemleri verilmiştir. Tanımlanan yeni kontrol paketi ve özerk çizelgeleme algoritması hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 6'da ise Döner yönlü anten modeline uyumlu, paketin ilerleyeceği yol boyunca sıralı çizelgeleme yapan, çift yönlü bir merkezi çizelgeleme algoritması sunulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler Bölüm 7'de verilmiştir. Çalışma süresince faydalanılan kaynaklar Bölüm 8'de yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. 6TiSCH Protokol Yığıtı

IETF 6TiSCH çalışma grubu nesnelerin interneti için eksiksiz bir protokol yığıt çözümü tanımlar [13]. Ağın ayağa kalkması, çizelgeleme ile ağdaki düğümlerin radyo ortamına erişiminin düzenlenmesi, ve gerekli parametrelerin düğümler arasında dağıtılması gibi konularda çözümler üretir. Aynı zamanda, IETF tarafından üretilmiş, yönlendirme, protokol başlıklarının sıkıştırılması, uygulama katmanı veri iletişimi, ve güvenlik gibi konularda geliştirilmiş standartlar hakkında öneriler sunar. Şekil 2, 6TiSCH ağları için önerilen protokol yığıtının katmanlarını göstermektedir. IEEE 802.15.4 TSCH MAC katmanının üstünde yer alan UDP, IPv6, RPL, ve 6LoWPAN gibi yüksek katman IETF standartlarından oluşur. 6top katmanı TSCH MAC katmanı ile üst katmanları entegre eder. Çizelge ve bağlantı istatistikleri gibi TSCH kaynaklarına bir arayüz sağlar ve ayrıca düğümlerin 6top Protokolünü (6P) kullanarak çizelgeleme isteklerinin nasıl iletilmesi gerektiğini tanımlar [58].

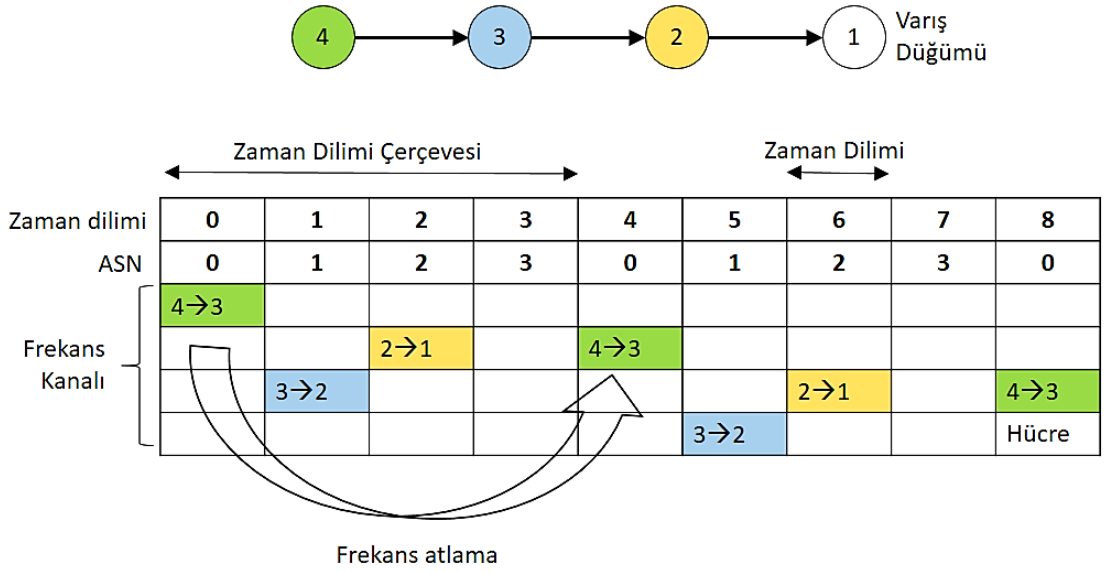
<table>
<tr><td>COAP</td><td colspan="2">6LoWPAN ND</td><td>RPL</td></tr>
<tr><td>UDP</td><td colspan="3">ICMPv6</td></tr>
<tr><td colspan="4">IPv6</td></tr>
<tr><td>6LoWPAN HC</td><td colspan="3">Scheduling Function</td></tr>
<tr><td colspan="4">6top (6P)</td></tr>
<tr><td colspan="4">IEEE 802.15.4 TSCH</td></tr>
</table>

Şekil 2. 6TiSCH protokol yığıt mimarisi

Enerji verimliliği, her IoT protokol çözümü için temel bir tasarım hedefidir. 6TiSCH, enerji tasarrufuna önem veren bir protokoldür ve gelecekteki IoT ağları için güvenilir ve düşük güç tüketimine imkan veren protokoller arasında yer alır [59]. 6TiSCH ağındaki tüm düğümler, birbirleriyle iletişim kurabilmek için ağa dahil olma aşamasında ağa senkronize olurlar. Bu yaklaşım, düğümlerin boşta dinleme (idle listening) sırasında enerji tüketimini

en aza indirecek şekilde radyolarını kısa bir süre boyunca açık tutmalarını sağlar. Dış parazit ve çoklu yol zayıflamasının (multi path fading) iletişim üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için ardışık yayınlar farklı frekans kanalları üzerinden yapılır (channel hopping) [60].

TSCH ortam erişim mekanizması 2015 yılında IEEE 802.15.4 standardı ile entegre edilmiştir. Aynı zamanda, IETF 6TiSCH [13] çalışma grubu tarafından ortam erişim katmanı olarak önerilmiştir. TSCH kısıtlı enerji kaynağına sahip cihazlar için düğümlerin birbirine senkronize olarak ve farklı frekans kanallarını kullanarak haberleşilebilmesini sağlar. TSCH, düğümlerin sadece ihtiyaç duyulan zamanlarda aktif edilerek, gerekli olmayan zamanlarda uyku moduna alınarak 99%'dan daha yüksek paket iletim oranına ulaşabilmelerini sağlar [61]. Şekil 3'te basit bir ağ topolojisi, ve zamanın yatay olarak zaman dilimlerine ve dikey olarak frekans kanallarına ayrıldığı basit bir çizelgeyi göstermektedir. Her bir kare, zaman dilimi ve frekans kanalı bilgisine sahip hücreleri göstermektedir. Hücreler bir mesaj paketinin ve isteğe bağlı olarak paketin alındığına dair onay paketinin iletilmesine izin verir. Bir hücre, örneğin tümegönderim (broadcast) yayınlar için birden fazla düğüm arasında paylaşılabilir veya çekişmesiz iletişim sağlayacak şekilde bazı düğümlere adanmış olarak tahsis edilebilir. Çizelge aksini gerektirmediği takdirde düğümler uyku modunda olduğundan dolayı düşük miktarda enerji tüketirler [58].



Şekil 3. Örnek bir TSCH çizelgesi

Akıp giden zaman, çerçevelere (slotframe) bölünmüştür. Her bir çerçeve zaman dilimlerinden (timeslot) oluşur. Bir çerçeve içerisinde rastgeleliği sağlamak amacıyla asal sayıda (31, 101 gibi) zaman dilimi bulunur. Bir çerçeve bittiğinde diğer çerçeve başlar. Her bir çerçeve değiştiğinde kullanılan frekans kanalı (1)'de verilen formüle göre değiştirilir (frequency hopping). Bu nedenle istenmeyen bir frekans karıştırılması durumu yaşandığında bir sonraki çerçevede aynı durum tekrar etmez. Çizelgede bulunan her bir zaman dilimi ve frekans kanalı ikilisine hücre denir [14].

$$ch = hopSeq[(ASN + ch_{offset}) \% hopSeqLen] \quad (1)$$

Formülde; ch frekans kanalını gösterir. hopSeq IEEE 802.15.4'te tanımlı frekans atlama sıra listesini, hopSeqLen parametresi ise listenin uzunluğunu (kullanılabilir frekans kaynağı sayısını) belirtir. ASN parametresi ağın çalışmaya başlamasından itibaren geçen zaman dilimi sayısını tutar. Her bir zaman diliminde değeri 1 artırılır. Dolayısıyla frekans değeri ASN değerine bağlı olarak sürekli değişir.

Çerçeve içerisinde bir hücre paylaşımlı hücre (shared cell) olarak tanımlanır. Paylaşımlı hücre çerçeve içerisinde herhangi bir zaman dilimi ofseti ve frekans kanalı ofseti ile tanımlanabilir. Paylaşımlı hücre bilgileri EB paketleri ile diğer düğümlere dağıtılır. Bu zaman diliminde düğümler gerektiğinde gönderim moduna geçerek gönderim yaparlar, gönderecek mesaj paketi olmadığında ise dinleme yaparlar. Paylaşımlı hücrede tüm düğümler aynı frekans üzerinden haberleşir. Dolayısıyla aynı zaman diliminde yapılan tüm yayınlar ve dinlemeler aynı frekans kanalını kullanır. Her bir düğüm için hangi zaman diliminde ve hangi frekans kanalında gönderim/dinleme yapacağı bir çizelgede tutulur. Mesaj trafiği fazla olan düğümlere çizelgede daha fazla yer ayrılır. Kök düğüme yaklaştıkça oluşan tıkanıklık (congestion) bu sayede aşılmaktadır. Her bir veri paketi gönderiminden sonra karşı taraftan onay (acknowledgement) beklenir, dolayısıyla mesaj paketinin karşı tarafa düzgün bir şekilde iletildiğinden emin olunur [14].

Sürekli olarak her bir zaman diliminin ve frekans kanalının istatistikleri tutulur. Başarısız sayılan hücreler için zaman dilimi ya da frekans değişikliğine gidilir. IEEE 802.15.4 standardına uygun olarak 16 adet frekans üzerinden haberleşilir. Farklı frekans kaynağına sahip olmak, düğümlerin kapsama alanındaki yayınlardan etkilenmeden paralel mesajlaşmalar yapmasına olanak sağlamaktadır [21].

Ağın yapısını oluşturmak ve korumak için kontrol mesaj paketleri (EB ve RPL mesajları) kullanılır. Tümegönderim mesaj paketlerinin gönderilmesi için paylaşımlı hücreler tanımlanmıştır. Tüm düğümler paylaşımlı hücrelerde aynı zaman diliminde aynı frekans kanalı üzerinden dinleme veya iletim yaparlar. Ağa katılmak isteyen bir düğüm, komşu düğümleri ile tahsis edilmiş kaynakları olmadığı için ilk başta sadece paylaşımlı hücreler üzerinden haberleşebilir [27, 47].

6TiSCH ağının tam fonksiyonel olarak çalışabilmesi için 2 aşamayı tamamlaması gerekir. 1. Aşama, Gelişmiş İşaretçi (Enhanced Beacon(EB)) paket gönderimleri yapılarak ağda bulunan tüm düğümlerin birbirleri ile senkronize olmasıdır. Bir düğüm EB paketi aldıktan sonra paket içerisinde bulunan bilgilerden minimum çizelgeyi öğrenir ve bu bilgileri kullanarak ağa senkronize olur. 2. Aşamada ise RPL protokolü aracılığıyla ağda yer alan tüm düğümlerin bulunduğu bir ağaç yapısı oluşturulur [62]. Sonuçta oluşan ağaç yapısına hedefe yönlendirilmiş yönlü döngüsüz çizge (Destination Oriented Directed Acyclic Graph) denir. Bu nedenle düğümler arasında DODAG Information Object (DIO) adı verilen mesajlaşmalar yapılır. Bir düğüm DIO mesaj paketini aldıktan sonra komşuları arasından en iyisini seçer ve tüm düğümler en iyi komşusunu ata olarak seçtikten sonra ağ, ağaç veri yapısı şeklinde gösterilebilir hale gelir [14].

2.1.1. Çizelgeleme

Son zamanlarda 6TiSCH protokolü için birçok merkezi ve dağıtık kaynak atama algoritması önerilmiştir [21]. Tüm düğümlerin ata düğüm seçerek ağın bir ağaç yapısında oluşmasına kadar geçen sürede düğümler birbirleriyle haberleşebilmek için her bir düğüm için ortak olan RFC8180 [63]'de tanımlı minimal çizelgeleme kullanırlar. Bu minimum çizelge bir adet paylaşımlı hücreden oluşur ve tüm ağ trafiği, gerekli hücreler tahsis edilene kadar aynı frekans kanalını kullanan bu hücreler üzerinden taşınır [63]. Düğümler gönderim ve alım yapmak için paylaşımlı hücreyi kullanırlar. Bu hücre; ortak konfigürasyon parametrelerinin paylaşılması, ağa erişim sağlanması, düğümler için gerekli olan dinamik parametrelerin dağıtılması ve ağ oluşum sürecinde gerekli olan mesaj paketlerinin trafiği için kullanılır. Ağ içi senkronizasyonun sağlanması için her bir düğüm atasını Zaman kaynağı komşusu (Time source neighbor) olarak referans amaçlı seçer ve saatini sürekli bu komşusuna göre düzeltir [14].

6TiSCH ağlar için literatürde birçok çizelgeleme yaklaşımı bulunmaktadır ve bu yaklaşımların büyük bir kısmı ağ oluşumunu tamamladıktan sonra kaynakların yönetilmesine odaklıdır. Dolayısıyla, ağ senkronize olduktan ve oluşumunu tamamladıktan sonra çalışmaya başlarlar. Çizelgeleme için 2 ayrı yapı tanımlanmıştır. (1) 6TiSCH Operation Sublayer (6top) Protocol (6P) iki düğümün kaynak ataması yapabilmeleri için karşılıklı işbirliği yaptıkları protokoldür [64]. Çizelgeleme fonksiyonu (Scheduling Function (SF)), uygulama ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde belirli kurallara uyarak kaynak ataması yapmak için kullanılan fonksiyondur. Birlikte çalışabilirlik amacıyla tüm düğümlerin uymak zorunda oldukları çizelgeleme fonksiyonu ise Minimal Scheduling Function (MSF) [65]'dir.

Çizelgeleme algoritmaları; Özerk, Dağıtık ve Merkezi olmak üzere 3 kısımda incelenebilir. 6TiSCH protokolü çizelgeleme konusunda bir altyapı sağlamasına rağmen çizelgelemenin nasıl oluşturulacağına dair bir çözüm önerisi sunmamaktadır. Bu nedenle literatürde birçok merkezi ve dağıtık çizelgeleme algoritması önerilmiştir. Merkezi algoritmalar kontrol mesajların yarattığı ekstra maliyet (overhead) ve ölçeklenebilir olmamaları nedeniyle dezavantaj yaşarken, tüm ağ bilgisini elinde bulundurarak çizelgeleme yaparlar, bu nedenle optimal sonuç üretirler. Dağıtık algoritmalar ise tam tersine hem ölçeklenebilirdir hem de kontrol mesaj trafiğini çok fazla arttırmazlar, ancak sınırlı bilgi ile oluşturulan çizelgeleme sonucunda optimal olmayan bir çözüm sunabilirler. Özerk çizelgelemede ise düğümler birbirleriyle işbirliği yapmadan daha önceden belirlenen kurallara göre hücre tahsisi yaparlar. Dolayısıyla ağda yaşanan değişikliklere ya da düğümlerin farklı ihtiyaçlarına cevap veremezler.

2.1.1.1. Özerk Çizelgeleme

Literatürde, 6TiSCH ağlar için zaman ve frekans kaynaklarının komşu düğümlerin birbirleriyle iletişim kurmasını gerektirmeden özerk olarak tahsis edilmesini sağlayan çizelgeleme yaklaşımları bulunmaktadır. Bu çizelgeleme algoritmalarının en büyük dezavantajı, gecikme ve güvenilirlik gibi endüstriyel gereksinimleri karşılarken ağ boyutu veya heterojen trafik gibi değişen koşullara uyum sağlayamamalarıdır. Benzer şekilde, hücrelerin uzamsal olarak yeniden kullanımı veya çerçeve boyutunu optimize etme gibi teknikler, komşu hücrelerle iletişim ve işbirliği gerektirdiği için kullanılamaz [66].

Bu yaklaşımın en önemli örneği Orchestra[67], her bir düğümün ne komşuları ile ne de merkezi bir varlık ile herhangi bir görüşme/anlaşma olmadan kendi kaynak atamasını

yaptığı özerk bir çizelgeleme mekanizmasıdır. Komşu düğümler, düğümlerin MAC adreslerine bağlı olarak bir özüt fonksiyonuna (hash function) göre birbirleri arasındaki kaynakları çizelgeler. Orchestra çizelgeleme fonksiyonunun dezavantajı, her bir düğümün farklı bant genişliği gereksinimlerine ihtiyaç duyacağını göz ardı etmesidir [68]. Toplayıcı düğüme yakın düğümlerin trafik ihtiyacı fazla olduğu için ağın bağlantı kapasitesinin altında çalışmasına neden olur [69].

Bir diğer özerk çizelgeleme algoritması ALICE [70] kabul edilebilir. Bu iki yaklaşımda, EB, RPL ve veri paketi tipleri için 3 farklı çizelge oluşturulmaktadır. Orchestra çizelgeleme fonksiyonu, 3 farklı çizelge için aynı frekans kanalını kullanırken, ALICE her bir çizelge için farklı frekans kanalı kullanmaktadır. Orchestra'da hücreler düğüm bazlı tahsis edilirken, ALICE trafik yönünü dikkate alarak kaynak ve hedef düğümün ID'lerini birlikte kullanarak hücre tahsisi yapar. Dolayısıyla Orchestra'ya kıyasla daha yüksek bant genişliğine izin verir.

Escalator [71], düğümlerin sıra (rank) bilgisini de algoritmaya ekleyerek Orchestra'nın trafik sınırlamalarını ele almıştır. Kararlı ve kısa gecikme süreleri elde etmek için, hücreleri tahsis ederken düğümlerin ID ve sıra bilgilerini kullanır. Düğüm bir RPL DAO mesaj paketi aldığında çocuk düğümden trafik alabilmek için bir RX, ve çocuk düğümden gelen trafiği ata düğümüne iletebilmek için bir TX hücresi tahsis eder (RPL DAO mesajları, aşağı yönlendirmeye izin vermek için bir düğümden kök düğüme doğru gönderilir). Bu sayede alınan bir mesaj paketi tampon bellekte kısa bir süre bekletilerek en yakın zaman diliminde gönderilir.

2.1.1.2. Dağıtık Çizelgeleme

Dağıtık çizelgeleme algoritmaları dinamik yapıda ağlar için uygundur, düğümler zaman çizelgelerini komşu düğümler ile paylaşırlar ve kendileri için en uygun çizelgeyi oluştururlar. Ölçeklenebilir (scalable) yapıdadırlar. Her bir düğüm çizelgesini oluştururken; ürettiği trafik miktarına göre öncelik verebilir (DeTAS [72]), komşu düğümlerin ağaç üzerinde konumlarını dikkate alabilir (DIS_TSCH [73]), ACK mesajı gönderilmeden bir yaklaşım seçilebilir (DiSCA [74]), komşu seçiminde her bir komşunun yoğunluk durumuna bakabilir (Distributed cell selection [75]), ihtiyaç duyulan bant genişliği (CFDS [76]) ya da kök düğüme görece uzaklıkları dikkate alabilir (Wave [77]), veya kaynak atamalarını yaprak

düğümlerden kök düğüme iletim gecikmesini minimum olacak şekilde sıralı olarak gerçekleştirebilir (DeAMON [78]).

Bu yaklaşımların en eski ve dikkat çeken örneği On-the-Fly Bandwidth Reservation (OTF) [28]'dir. 6TiSCH çalışma grubu tarafından Scheduling Function Zero (SF0) için temel alınmıştır. SF0 daha sonrasında Minimal Scheduling Function (MSF) olmuştur. Her bir komşu düğüm için kaç adet hücrenin tahsis edilmesi gerektiğine karar veren bir bant genişliği tahmin algoritması tanımlar. MSF'de, hücreler komşu düğümler tarafından kullanılmayan hücreler arasından rastgele seçilir. Bu nedenle, komşu olmayan düğümlerin aynı zaman diliminde aynı frekans kanalını kullanabilmeleri nedeniyle ağda çarpışmalar yaşanabilmektedir [47]. Bu durumda, çarpışmaya neden olan hücreler tespit edilir ve uygun bir mekanizma ile hücreler yer değiştirir. Yanlış frekans kanalı seçiminden kaynaklanan çarpışmaların önlenmesi, özellikle sınırlı frekans kaynağı havuzuna sahip ağlarda zor bir problem haline gelebilir.

Completely Fair Distributed Scheduler (CFDS) [79] uçtan uca çizelgeleme yapan karmaşık bir algoritmadır. Topoloji ve trafik değişikliklerinin geçici olup olmadığına bakar ve çizelgede sık sık değişiklik yapar. Katı gereksinimlerin olduğu ağlarda kullanılmaya uygundur.

Tahsis edilecek hücrelere karar verirken, dağıtık çizelgeleyicilerin önemli bir kısmı hücreleri rastgele seçer. Bu basit strateji, ağ performans metrikleri açısından optimal olmayan performansa neden olabilir. LLSF [80] daha kısa bir gecikme için OTF çözümünü optimize eder ve hücreleri toplayıcı (sink) düğüme doğru sıralı bir şekilde tahsis eder. Hücrelerin rastgele seçilmesi girişim mesafesinde bulunan iki düğümün aynı hücreyi seçmesi durumunda çarpışmaların yaşanmasına neden olur. Kararlı bir gecikmeye ihtiyaç duyulan ağlarda bu yöntem tek başına yeterli olmayacağı için ekstra fonksiyonlara ihtiyaç duyulur. Örneğin; hücrelerin performans metrikleri tutularak kötü performans gösteren hücrelerin değiştirilmesi gibi [81]. DeBraS [82] algoritmasında ise düğümler çizelgelerini komşularıyla paylaşarak çarpışma ve girişimlerin önüne geçmeyi sağlamıştır. LOST [81] algoritmasında ise düğümler komşu düğümlerinin birbirleriyle yaptıkları anlaşmaları dinleyerek (overhearing) çizelge oluşturur. Wave [83] ise komşu düğümlerin çizelge bilgilerine ek olarak hücreleri toplayıcı düğüme kadar sıralı tahsis eden bir algoritma önermiştir.

Tahsis edilecek hücre sayısı genellikle düğümlerin tampon bellek miktarı ya da hücre kullanımı gibi istatistiklere bakılarak gereksinimi karşılayacak şekilde belirlenir. ReSF [84]

ve DeAMON [78] gibi bazı çözümler yaşanan kayıpları da düşünerek ETX değerini göz önünde bulundururlar. Bazı çözümler ise değişken trafik miktarı ve link kalitesini de göz önüne alarak overprovision hücreler de tahsis edebilir [85, 86]. LDSF [87] ise kötü senaryo durumunu ele alarak tüm olası tekrar gönderimler (retransmissions) için de hücreler tahsis eder. EMSF [88] Poisson dağılımını kullanarak gereksinim duyulan hücre sayısını belirler, Local Voting [89] komşu düğümler arasında adaletli bir kaynak planlaması yapmaya çalışır, PID-Based Scheduling [90] ise eşik değeri tabanlı (threshold-based) bir yaklaşımla yeni hücrelerin tahsis edilmesini ya da kullanılmayan hücrelerin geri bırakılmasını sağlar.

Zaman dilimi çerçevesi kısa olduğunda tahsis edilecek hücre sayısı az olur. Bu durum komşu düğümlerin aynı zaman dilimlerini alma olasılığını dolayısıyla girişim ve çarpışma olasılığını arttırır. DeTAS [72], toplayıcı düğümün trafik ihtiyaçlarına göre optimal bir çerçeve uzunluğu seçmesini ve bunu tüm ağa bildirmesini sağlar.

E-SF0 [75], LOST [81], ve DeBRAS [82] algoritmaları ise komşularıyla çizelge yoğunluklarını paylaşır. Bu sayede komşuları hakkında daha fazla bilgiye sahip olarak hücre seçme işlemlerini daha akıllıca yaparlar.

2.1.1.3. Merkezi Çizelgeleme

Dağıtık ve özerk çizelgeleme fonksiyonlarına alternatif bir diğer çizelgeleme yöntemi merkezi çizelgeleme yöntemidir. Merkezi çizelgeleme algoritması ağ içerisinde yüksek miktarda trafik yaratması nedeniyle büyük ve yoğun ağlarda kullanımı mümkün olmamaktadır. Genellikle durağan ağlar için uygundur, bir düğüm tüm ağ ile ilgili bilgiyi toplar (ağın yapısı, bant genişliği vb.) ve tüm düğümler için uygun bir zaman çizelgesi oluşturur. Çizelge oluşturulurken öncelikle ağdaki tüm düğümlerin birbirlerine olan konumlarına göre bir ağaç yapısı oluşturulur. Birbirleri ile komşu dolayısıyla çakışan bağlantılar (link) ayrı zaman dilimlerine atanır ve çakışma olmayan (conflict free) bir çizge oluşturulur. Son adımda çizge boyama (graph coloring) algoritmaları ile frekans kaynakları ataması yapılır. Ağı kontrol amaçlı ek mesajların oluşturulması en büyük dezavantajıdır [21].

Bu yöntemde; merkezi bir çizelgeleyici düğüm ağın dışında konumlandırılır. Merkezi çizelgeleyici, kök düğüm aracılığıyla diğer tüm ağa bağlı düğümlerden komşuluk bilgilerini toplar ve çizelgelemeyi ağ hakkında tüm bilgiyi elde ettikten sonra oluşturur. Merkezi çizelgeleme algoritmaları dağıtık (distributed) çizelgeleme algoritmalarına kıyasla frekans kaynaklarını verimli kullanma ve daha kısa bir çizelge oluşturma bakımından daha üstün

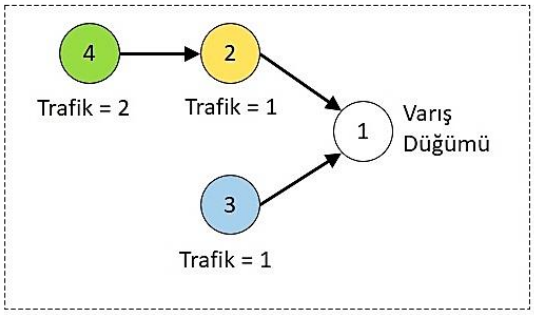
performans gösterirler. Merkezi çizelgeleme algoritmaları ağın tamamı hakkında bilgi toplar ve dağıtık çizelgeleme algoritmalarının aksine sadece kendisinin ve komşularının bilgilerine göre karar almazlar. Merkezi çizelgeleme algoritmalarının tamamı ağ hakkında yeterli bilgiye sahip olduklarından dolayı beklenmeyen durumlar oluşmadıkça, her bir düğümün toplayıcı düğüme mesaj iletmesine izin veren ve frekans çakışmaları yaşanmayacak şekilde çizelge oluşturabilir [21, 91].

Çizelge oluşturulurken; düğümlerin trafik ihtiyacı öncelik olarak belirlenebilir (TASA [91]), yol maliyeti hesaplanarak göz önüne alınabilir (A queue-based scheduling algorithm [92]), buluşsal yöntem algoritmalarından faydalanılabilir (A heuristic resource scheduling [93]), kaynak kullanımına göre dinamik bir algoritma oluşturulabilir (Linkset slot based protocol [94]), tüm ağ küçük ağaçlar şeklinde düşünülerek senkronizasyona gerek duyulmadan bir yaklaşım uygulanabilir (TMCP [95]). AMUS algoritması düşük gecikme olacak şekilde çizelge oluştururken, savunmasız (vulnerable) linkler için ekstra kaynak ayrımı yapar [96]. DCLS iki yönlü trafiğin olduğu durumlar için geliştirilmiş bir algoritmadır. Atanan zaman dilimi ve frekans kaynakları hem yapraklardan düğüme, hem de gerektiğinde kök düğümden yaprak düğümlere iletilen mesajlar için kullanılabilmektedir [97]. CONCISE algoritmasında ise gelen mesajlar işlemden geçirildikten (in-network data aggregation) sonra mümkünse birleştirilerek iletilirler [98].

Merkezi algoritmalar arasında en bilinen örnek TASA algoritması, ağ topolojisi ve her bir düğümün trafik yükünü dikkate alarak zaman/frekans boyutunda bir çizelge oluşturur. TASA her bir aşamada çakışma yaratmayacak şekilde bağlantıları (link) düğümlerin tampon belleklerinin doluluk oranlarını dikkate alarak bulur ve çizelgelenecek zaman dilimine atar. Sonrasında çizge boyama yöntemi ile girişimde bulunan bağlantıları farklı frekans kaynaklarına atar. Çizelge oluştururken aynı anda hem düşük gecikme hem de düşük görev döngüsü (duty cycle) performans metrikleri elde etmeyi amaçlar. En büyük dezavantajı hata durumlarını ele almaması, ekstra kaynak tahsisi yapmaması ve ağda herhangi bir değişiklik olduğunda çizelgeyi baştan oluşturmasıdır.

Adaptive MUlti-hop Scheduling method (AMUS) [96] çizelgeleme algoritması ise düğümlerin gönderdikleri mesaj paketlerinin düşük gecikmeyle kök düğüme ulaşmasına öncelik verir ve sıralı bir şekilde çizelgeleme yapar. Savunmasız linkler için paket kaybolmaları ya da girişim durumlarını göz önünde bulundurarak ekstra kaynak ayrımı yapar. Çarpışma ve girişimleri, röle (relay) düğümler üzerinde artan trafik miktarını ve kaynak düğümden kök düğüme kadar giden yolu dikkate alarak çizelgeleme yapar. Şekil

4’te görüldüğü gibi SS (Scheduling sequence) ve MSS (Multihop scheduling sequence) dizilerini oluşturarak çizelgeleme yapar [96]. SS matrisi her bir düğümün ürettiği veri miktarına bağlı olarak ihtiyaç duyduğu trafik miktarını tutar. MSS ise her bir veri paketinin toplayıcı düğüme iletilene kadar izleyeceği yolu göz önünde bulundurularak ihtiyaç duyulan trafik miktarını tutar.



$$SS\ (\text{Çizelgeleme sırası}) = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Düğüm ID} \\ \text{Trafik} \end{matrix}$$

$$MSS\ (\text{Çoklu Atlama SS}) = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{TX ID} \\ \text{RX ID} \\ \text{Trafik} \end{matrix}$$

Zaman dilimi	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Kanal ofset	4→2	4→2	2→1	2→1	2→1				
	3→1								

Şekil 4. AMUS algoritması çizelge oluşturma aşamaları

Şekil 5’te ise AMUS algoritmasının ek kaynak tahsisini nasıl yaptığını gösteren çizelge örneği verilmiştir. Kırmızı renk ile gösterilen hücreler beklenmedik bir durum oluştuğunda kullanılabilecek ek kaynakları göstermektedir.

Zaman Dilimi	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Kanal ofset	2→1	4→2	2→1	4→2	2→1	4→2	2→1	4→2	2→1
	3→1	3→1		3→1		3→1		3→1	

A → B trafiğe göre tahsis edilen hücreler

A → B savunmasız linkler için tahsis edilen ek hücreler

Şekil 5. AMUS algoritması ek kaynak tahsisi

Multichannel optimized delay time slot assignment (MODESA) [99] algoritması ise düğümlerin tampon belleklerinin doluluk oranına göre bir önceliklendirme yaparak çizelge üretir. Her bir iterasyonda tüm düğümleri önceliklerine göre sıralar ve önceliği yüksek olandan başlayarak ata düğümü (parent) ile boşta arayüzü olan düğümleri bir listeye ekler. Radyo kaynakları birden fazla arayüze (interface) sahip olabilir. TASA algoritmasına benzer şekilde girişimde bulunan düğümlerin listesine sahiptir ve listeye atadığı gönderim yapacak düğümlere girişim oluşturmayacak şekilde frekans ataması yapar. Frekans seçiminde Round-robin ya da en az kullanılan frekans kaynağını seçme gibi yöntemler kullanılır. Frekans kaynağı ataması her seferinde sıfırdan başlatıldığında ilk frekans kaynağı çok kullanılmış olur. Bu durumun önüne geçmek için frekans atamasına bir önceki iterasyonda kalınan değerden döngüsel olarak devam edilebilir ya da ağ genelinde en az kullanılan frekans kaynağı seçilebilir.

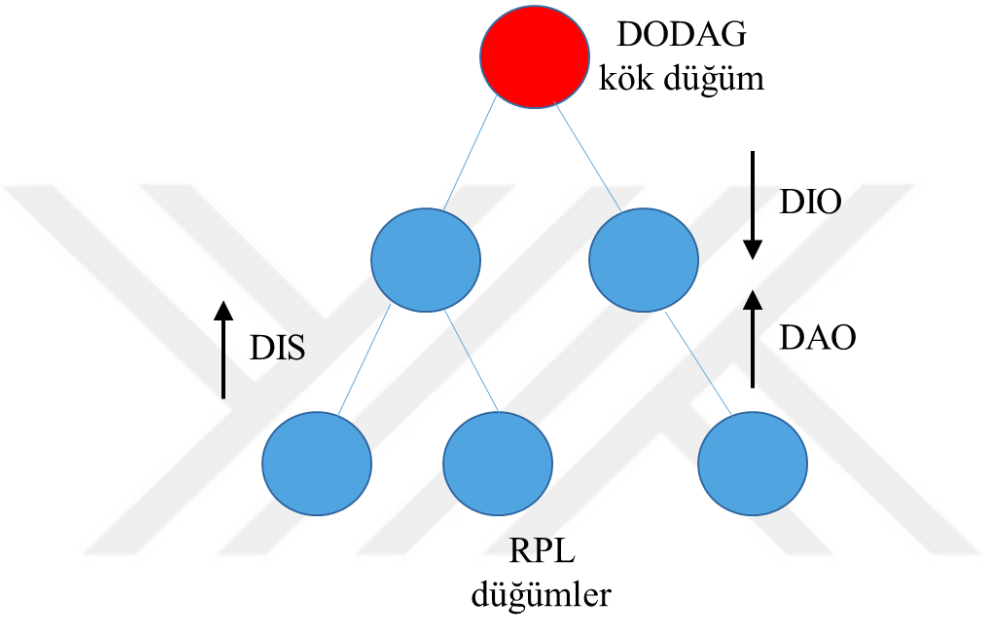
Multi-channel multi-sink data gathering algorithm (MUSIKA) [100], MODESA algoritmasının geliştirilmiş halidir. Birden çok sayıda kök düğümün olduğu senaryoları destekler. Kök düğümün birden fazla olması; veri toplama işleminin daha güvenilir olmasını sağlar, kök düğüme yakın düğümlerin ortalama enerji tüketimini azaltır ve her bir kök düğümün farklı bir işleve sahip olmasına olanak tanır. Önceliklendirme aşamasında tampon bellekte bekleyen mesajların tipini göz önünde bulundurur.

Centralized Link Scheduling (CLS) [101], ağda bir değişiklik olduğunda ya da bir düğümün ekstra kaynak ihtiyacı olması durumunda tüm çizelgeyi yeniden oluşturmak yerine var olan çizelge üzerinde değişiklik yapmaktadır. Ağa yeni bir düğüm katıldığında gerekli kaynakları ilgili düğümlere tahsis eder, ata düğüm değiştiğinde ya da düğüm ağdan ayrıldığında kullanılmayan kaynakları ilerde kullanmak üzere işaretler. Dinamik ağlar üzerinde kullanmak avantajlıdır.

2.1.2. Yönlendirme

RPL, IPv6 tabanlı düşük güçlü ve kayıplı ağlar (LLN) için proaktif bir yönlendirme protokolüdür. RPL protokolü, Şekil 6'da verildiği üzere Hedef Tabanlı Yönlü Döngüsüz Çizge (DODAG) yapısında bir ağ topolojisi oluşturur. Düğümlerin kısıtlı miktarda bulunan belleği dikkate alınmaz ise, bir DODAG yapısı sınırsız sayıda düğümden oluşan bir ağı destekler. Tipik olarak, DODAG kök düğümü, ağdaki diğer düğümleri dış dünyaya (internet veya başka bir ağ) bağlayan ve toplanan verilerin yönetimi için kullanılan IPv6 sınır

yönlendiricisine (BR) karşılık gelir. Her düğüm, bir Amaç Fonksiyonu (MRHOF gibi) kullanarak kök düğümden uzaklığını belirten sayısal bir değer (rank) hesaplar. Düğüm kök düğüme ne kadar yakınsa, sıra değeri de o kadar küçük olur. Bir düğüm, başka bir düğüme iletmek üzere aldığı paketi daha düşük sıra değerine sahip bir komşu düğümüne iletir. Ağda yer alan her bir düğümün atanmış sıra değeri vardır ve bu değer kök düğümden uzaklaştıkça artar [102].



Şekil 6. RPL topoloji ve kontrol paketleri

Şekil 6'da RPL kontrol paketleri ve iletim yönleri verilmiştir. DODAG yapısının kurulması ve bakımı DODAG Bilgi Nesnesi (DIO) kontrol paketleri ile sağlanmaktadır. Ağ içinde mesaj paketi trafiğini arttırmamak için RPL mesajları bir bekletme zamanlayıcısı kullanılarak yayınlanır. DIO paketleri, paketin kök düğüme olan yolun maliyetini hesaplamak için kullanılan metrikler gibi bilgileri içerir. Başlangıçta yalnızca DODAG kök düğümü, RPL topolojisinin etkin bir parçasıdır. DIO mesajları ile, DODAG-ID ve düğümün sıra bilgisi gibi konfigürasyon parametreleri periyodik olarak diğer düğümler tarafından da yayınlanır. Bir düğüm farklı kaynaklardan birden fazla DIO paketi alabilir, ancak paket aldığı kaynak düğümlerden bir tanesini tercih ederek (örneğin; sıra değerlerini karşılaştırarak) ata düğümü olarak seçer ve seçilen bu düğüm DODAG köküne ulaşmak için mesaj paketlerini ileten röle düğüm görevi görür. RPL ayrıca, bir düğümün aşağı doğru

rotaların oluşturulması için Hedef duyuru nesnesi (DAO) mesaj paketi tanımlar. Örneğin; bağlantı durumlarında oluşan bir durum nedeniyle düğüm ata düğümünü değiştirmek istediğinde yeni bir aşağı doğru bağlantı yolu yapılandırmak için yeni tercih edilen düğüme bir DAO mesaj paketi gönderir. Paketin sağlıklı bir şekilde iletildiğinden emin olmak için ata düğüm tarafından alt düğüme bir DAO-ACK paketi gönderilir.

2.2. Akıllı Antenler

Akıllı antenler, değişen giriş sinyaline tepki olarak ışıma örüntülerini değiştirebilen ve böylece yüksek performans ve verimlilik sağlayabilen cihazlardır. Akıllı antenler, maksimum sinyal gücü yönünü algılayabilirler ve anten ışınını elektronik olarak istenilen yöne yönlendirebilirler. Bu bakımından geleneksel tüm yönlü antenlere kıyasla daha verimli ve akıllı çalışırlar [103]. Bu sistemler birçok avantajı nedeniyle popüler hale gelmiştir. Avantajlardan bir tanesi, sistemin sinyal-girişim oranını (SIR) iyileştirmesidir. Gürültüden farklı olarak diğer yayınlayıcılardan yayınlanan sinyallerin bir sonucu olarak ortaya çıkan girişim büyük genliği nedeniyle sorun yaratır. Akıllı antenler, sinyali belirli bir kullanıcı yönünde yönlendirerek çalıştığından, SIR'yi artırarak girişimleri engeller [104].

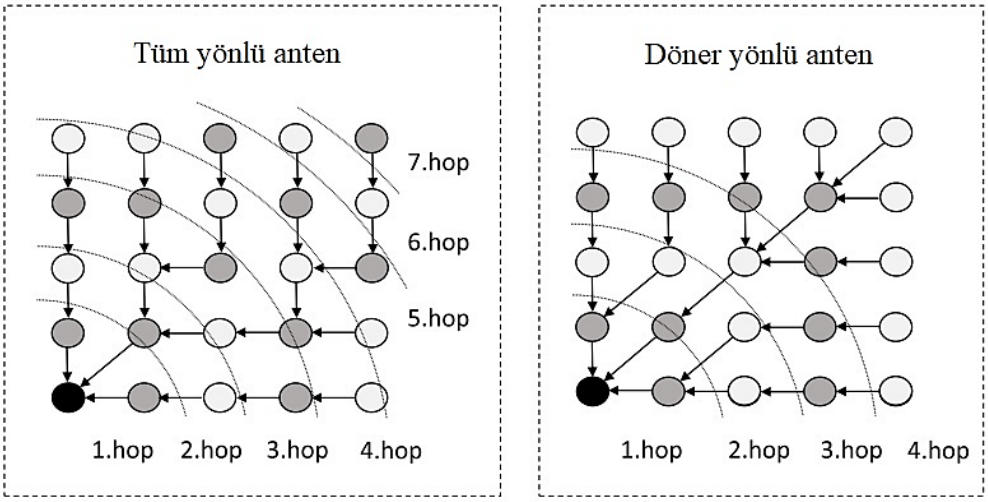
Ağda bulunan komşu düğümler aynı anda yayın yaptıklarında girişime neden olurlar; bu nedenle eşzamanlı olarak yapılan yayınlar kablosuz ağların kapasitesini sınırlar. Gupta ve Kumar, tüm yönlü antenler kullanılırken bir kablosuz ağın performansının düğüm yoğunluğu ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermişlerdir. Düğüm başına elde edilebilir verim, düğümlerin rastgele (random) olarak konumlandırıldıkları ağlarda $\Theta\,(1/\sqrt{n\,\log n}\,)$ ve isteğe göre (arbitrary) konumlandırıldıkları ağlarda $\Theta\,(1/\sqrt{n})$ ile sınırlıdır (upper bound). n değişkeni ağdaki düğüm sayısını gösterir [105]. Kablosuz bir ağın kapasitesi yönlü anten kullanılarak $2\pi/\sqrt{\alpha\beta}$ katsayısı kadar geliştirilebilir [106], burada α ve β sırasıyla verici ve alıcı antenlerinin huzme açıklıklarıdır (beamwidth).

Radyo iletişiminin ve fabrikasyon tekniklerinin hızlı gelişimi, daha küçük ve daha akıllı antenlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Akıllı antenler kabaca anahtarlamalı huzme (switched beam), evre kaydırmalı anten dizisi (phased array) ve huzme oluşturma (beam forming) grupları altında sınıflandırılabilir [45, 37]. Mottola vd. bir prototip geliştirerek kablosuz duyarga ağları üzerinde elektronik anahtarlamalı yönlü (ESD) antenleri incelemiştir. Bu çalışmada yönlü antenin tüm yönlü anten tabanlı bir çözüme kıyasla önemli

performans kazanımları sağladığı gösterilmiştir [107]. Voigt vd. her bir anten için alınan paketin RSSI değerine bakılarak komşu düğümü ile iletişim için en iyi anteni seçen etkili bir mekanizma önermiştir [108]. Ayrıca, doğru anten yönünü seçmek için alınan paketin RSSI bilgisini kullanmak, görüş hattına sahip bir kablosuz ağda yüksek performanslı bir çözüm oluşturabilir, ancak bu gözlem, [109] 'te tartışıldığı gibi görüş hattı olmadığında geçerli olmayabilir.

Kablosuz duyarga ağlarında geleneksel olarak kullanılan tüm yönlü antenler, radyo yayınlarını tüm yönlere eşit güç kullanarak yapmaktadırlar. Tüm yönlü antenler, küçük, ucuz ve kolay kullanılabilir olmalarına karşın uzamsal olarak ayrım yapamadıklarından dolayı her yönden gelen yayınlardan etkilenirler ve çok miktarda girişime maruz kalırlar [110]. Yönlü antenlerin tek başına ya da tüm yönlü antenle beraber kullanıldığında performans kriterlerinin çok miktarda iyileştiği görülmektedir [111]. Yönlü antenler genel olarak belirtilen yöne spesifik olarak daha güçlü yayın yaparlar, ya da belirli bir yönden gelen güçlü yayınları alıp zayıf yayınları göz ardı edebilirler [112]. Akıllı anten kullanıldığında belirli bir yöne odaklanarak girişim ve çarpışmalar azaltılır, anten alıcısı tarafında kazanç (gain) arttırılır ve daha yüksek güvenlik sağlanır [113].

Şekil 7’de görüldüğü üzere daha geniş bir kapsama alanı sağlandığı için hedefe ulaşmak için geçilmesi gereken yönlendirici sayısı azaltılır, sinyal daha az atlama ile hedefe ulaştırılır [107]. Kablosuz duyarga ağlarında kullanılabilen Akıllı antenler genellikle anahtarlamalı huzme (switched beam) ya da uyarlamalı anten dizisi (adaptive array systems) olmak üzere iki gruba ayrılır, yüksek işlem kapasitesi gerektiren antenlerin kullanılması uygun değildir [114]. İlk gruba giren antenler az karmaşık olduklarından dolayı, küçük cihazların oluşturduğu kablosuz duyarga ağlarında kullanımı daha anlamlıdır. Nilsson, SPIDA [115] adını verdiği elektronik anahtarlamalı bir anten geliştirmiş, ve etkinliğini yaptığı testler ile göstermiştir. Öström vd. SPIDA prototipini kullanarak saha testlerini yapmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir [116]. Mottola vd. aynı anteni, Tmote Sky platformuna entegre ederek ve Contiki işletim sistemini kullanarak hem simülasyon ortamı hem de gerçek hayatta tüm yönlü anten kullanılması durumuna göre karşılaştırma yapmışlardır [107].



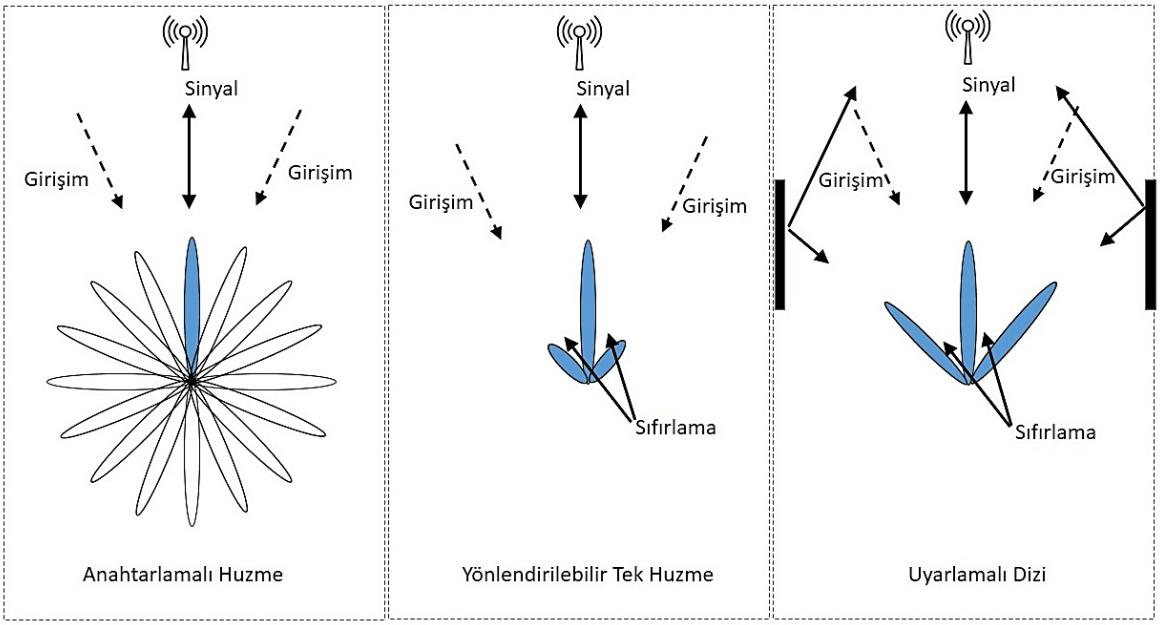
Şekil 7. Örnek bir ağda Tüm yönlü ve Akıllı anten hop sayılarının karşılaştırılması

Yönlü antenlerin avantajları yanında getirdiği bazı dezavantajlar vardır. Bir düğüm çalışmaya başladığında komşularını tanıması gerekir, bu nedenle iki düğümün antenlerinin belirli bir zaman aralığında birbirlerine yönlendirilmesi gerekir. Aynı zaman diliminde antenlerin birbirlerine karşı bakmaları için bu düğümlerin ya senkronize olarak hareket etmeleri ya da belirli zaman aralıklarında her yöne yayın yapıp tüm yönlerden dinleme yapmaları gerekir. Literatürde bu sorun için iki tür yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşım, yönlü antenleri tüm yönlü anten ile beraber kullanmaktır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı yönlü antenin tüm yönlü antene kıyasla daha uzaktaki düğümlerle haberleşebilme imkanının olmasıdır. Ayrıca; Yönlü antenin sağlıklı olarak haberleşebildiği bir düğümle tüm yönlü antene sahip bir düğüm haberleşemeyebilir. Bu durum iki antenin farklı sayıda komşu düğüm bulmasına neden olur. İkinci yaklaşım ise 360 derece kapsama alanına sahip olacak şekilde ve çok sayıda yönlü antenin beraber kullanılmasıdır. Bu antenlerin aynı anda aktif edilmeleri sonucu tüm yönlü anten gibi davranış sergilemeleri sağlanır. Bu yöntemin dezavantajı ise birden çok antenin senkron olarak eşzamanlı kontrol edilmesi ve yönetim karmaşıklığıdır [41].

Çizelgeleme yapılmadığı durumlarda, antenler ortama rastgele erişirler. Dolayısıyla antenlerin sürekli dinleme modunda olmaları gerekir, ya da tüm antenler aynı zamanda ihtiyaç duymadıkları zamanlarda bile radyolarını belirli zaman aralıklarında aktif etmeleri gerekir. Rastgele erişim kullanıldığında ve bir antene birden fazla düğüm aynı anda yayın yapmak istediğinde, hedef düğüme öncelikle istek (request to send) mesajı gönderilir, hedef

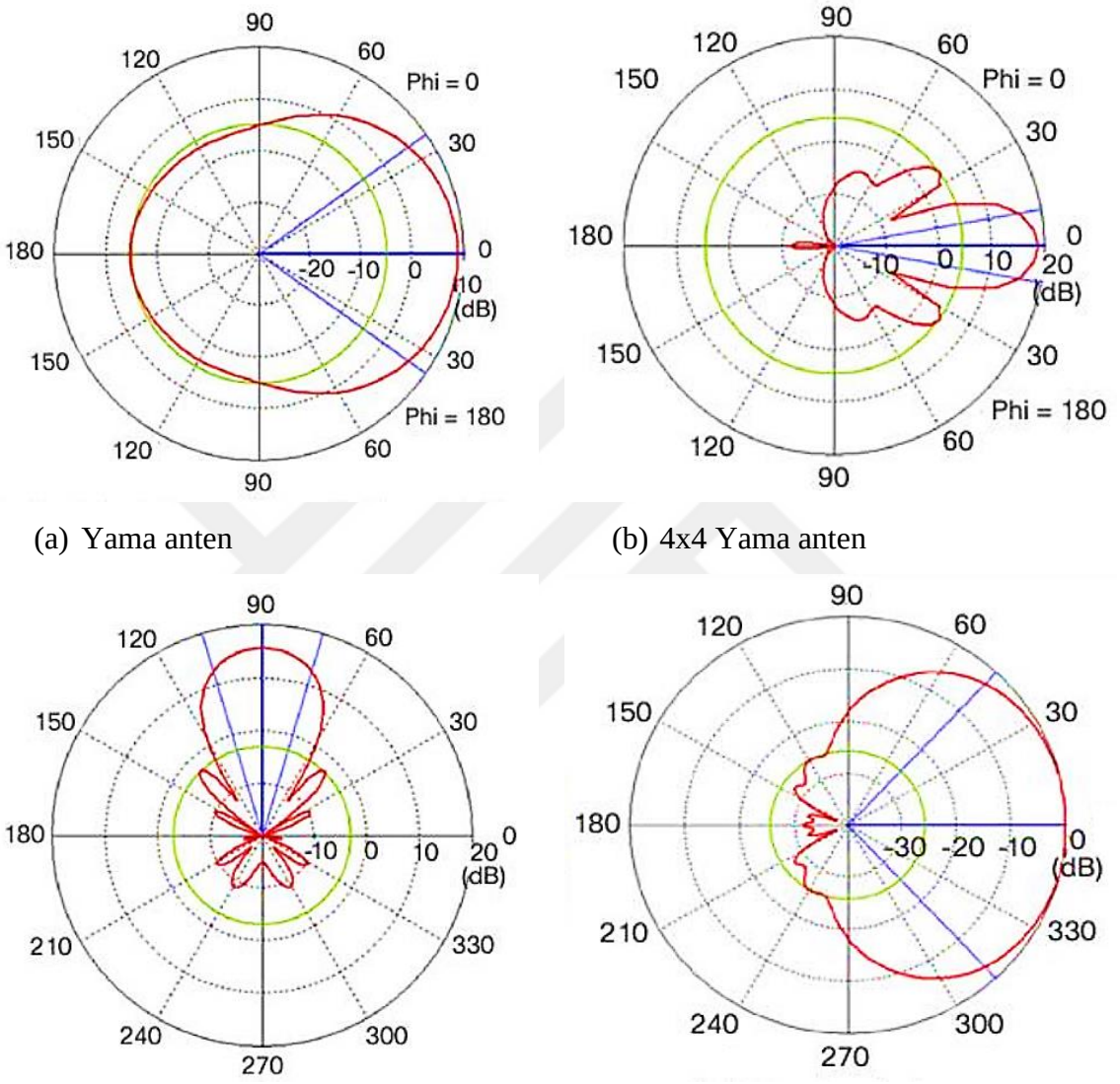
düğüm eğer müsait ise bu isteğe olumlu cevap (clear to send) verir. Bunun üzerine iki düğüm arasında veri transferi başlar. Bu yöntemin dezavantajı ise fazla miktarda kontrol mesajının gönderilmesi ve çizelgeleme yapılmadığı için haberleşmelerin aynı frekans üzerinden yapılması gerektiğinden dolayı paralel haberleşmelere izin vermemesidir [117].

Simülasyon ortamında yönlü anten modellemesi yapılırken en önemli konu ışıma örüntüsünün (radiation pattern) belirlenmesidir. İki antenin birbiri ile haberleşip haberleşememesine ya da alıcı tarafında gelen sinyalin gücünün hesaplanmasına ışıma örüntüsüne göre karar verilir. Sinyal gücünün hesaplanabilmesi için kaynak düğüm ve hedef düğüm arasındaki mesafe, birbirlerine olan göreli açı, ve iki düğümün antenlerinin yönelim açıları bilinmelidir. Akıllı ve yönlü anten tipleri Şekil 8'de görüldüğü üzere 3 ana grup altında toplanabilir. Bunlar; anahtarlamalı huzme, yönlendirilebilir tek huzme ve uyarlamalı dizi şeklindedir. Bu çalışmada iki tip (switched beam, steerable single beam) anten modellemesi yapılmıştır. Anahtarlamalı huzme modelinde önceden belirlenmiş ışıma örüntülerinden bir tanesi seçilirken, döner yönlü anten modelinde ışın hedefe doğru yönlendirilir ve girişim kaynakları tarafına doğru sıfırlama işlemi (nulling capability) yapılır. Bu sayede SINR değeri maksimize edilir. Antenin bir adet güçlü ana huzme (main lobe), yan ve arka taraftan düşük güçlü yan huzme (sidelobe) ve arka huzme (backlobe)'leri olur. Yan huzme ve arka huzmeler modelin gerçekçilik derecesine göre ihmal edilebilir [45].



Şekil 8. Akıllı ve Yönlü anten türleri

Her bir farklı anten tipi için farklı ışıma örüntüleri elde edilir. Şekil 9'da değişik anten tipleri için (Yama anten, Yagi anten, Alansal anten) Cisco firmasının hazırladığı ışıma örüntüleri verilmiştir [118].



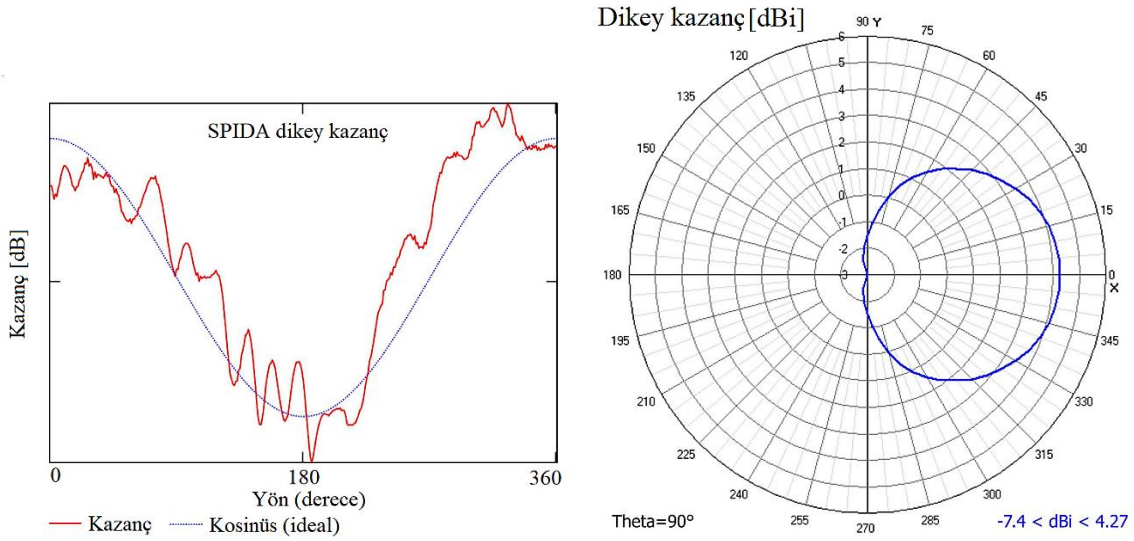
(a) Yama anten (b) 4x4 Yama anten

(c) Yagi anten (d) Alansal anten

Şekil 9. Farklı anten tipleri için ışıma örüntüleri [118].

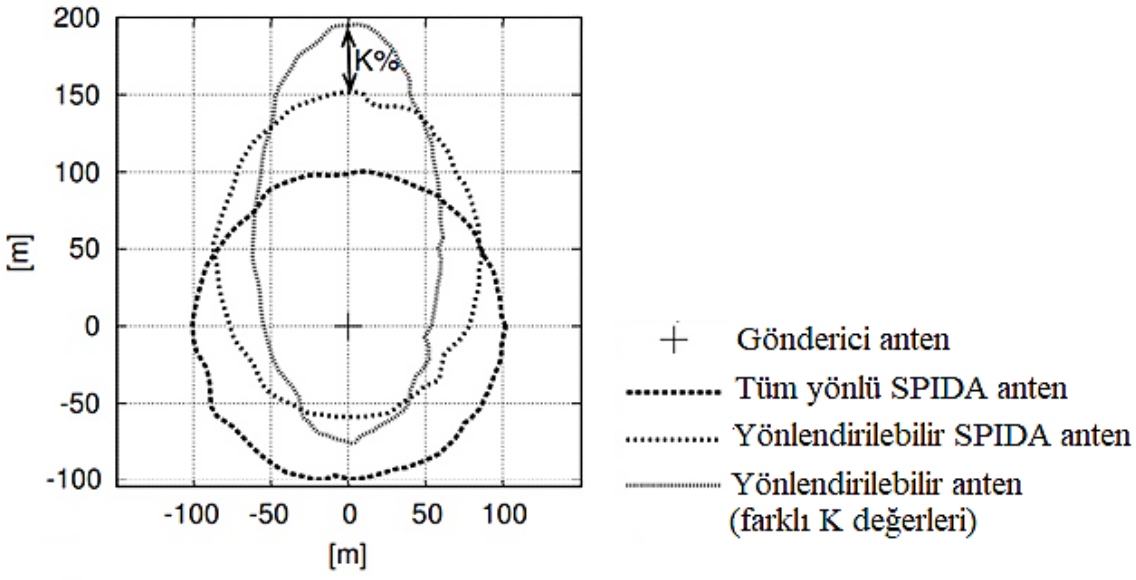
Nilsson kablosuz duyarga ağları için anten tasarımı üzerine çalışmış ve en uygun anten tipi olarak Electronically Switched Parasitic Element Antenna (ESPAR)'yı seçmiştir. SPIDA adı verilen bir anten geliştirilmiştir. Simülasyon ve gerçek hayatta yapılan testler sonrası elde edilen ışıma örüntüsü Şekil 10'da verilmiştir [119]. Anahtarlanabilir huzme anten, iki veya daha fazla antenden oluşan en basit akıllı anten türüdür. Anten elemanlarının

sayısına ve düzenine bağlı olarak, belirli sayıda huzme içeren sabit bir ışıma örüntüsüne sahiptir. Performansı artırmak ve verimliliği maksimuma çıkarmak için en güçlü sinyal gücü yönünde bir veya daha fazla anten elemanını aktif ederek çalışır.



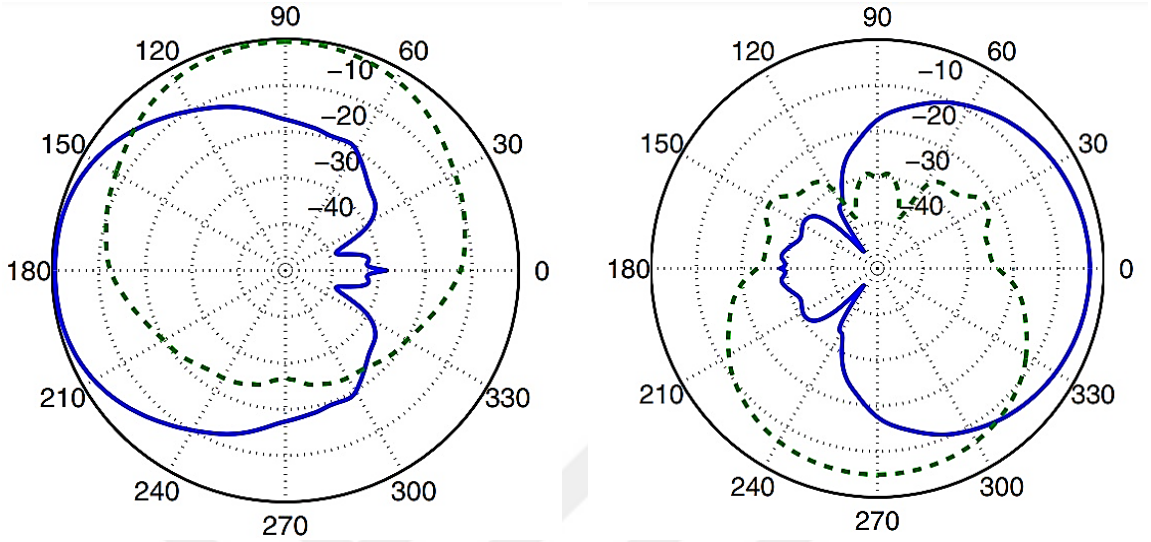
Şekil 10. SPIDA anten ışıma örüntüsü [119].

Mottola vd. SPIDA anten ile testler yapmış, ve ana yayın huzmesinin şeklini değiştirerek tüm yönlü antene kıyasla anten menzilini Şekil 11'de görüldüğü üzere 2 katı mesafeye kadar arttırmıştır [107].



Şekil 11. SPIDA anten menzil grafiği [107].

Giorgetti vd. kablosuz ağlarda kullanılmak için Four-Beam Patch Antenna (FBPA) geliştirmiştir [120]. Geliştirilen bu antene ait ışıma örüntüsü Şekil 12'de verilmiştir.



(a) Yama 1 (düz), Yama 2 (kesikli) (b) Yama 3 (düz), Yama 4 (kesikli)

Şekil 12. FBPA antenin 4 farklı yüzünün ışıma örüntüleri [120].

ESPAR antenler ışın yönlendirme konusunda sıklıkla kullanılan popüler yapılardır, ve kablosuz algılayıcı ağlara kolayca entegre edilebildikleri birçok çalışmada gösterilmiştir [121]. 1 adet aktif yayın yapan anten elemanının çevresinde farklı bağlantı noktalarına bağlanmış pasif elemanlar bulunur ve bu bağlantı noktaları farklı kombinasyonlarda aktif edilerek ışıma örüntüsünün değiştirilmesi sağlanır. Aynı zamanda iç mekanlarda 2.4 Ghz ISM bandında yer bulma sistemlerinde kullanılabilirler [122]. Düşük maliyetli ve verimli enerji tüketen düğümler, sinyal geliş açısı (direction of arrival (DoA)) tahmin etme yeteneğini kullanarak ağın bağlılık, kapsama alanı ve enerji tüketimi performans ölçütlerini yükseltebilirler [123]. DoA tahmin etme fonksiyonu RSS temelli [124,125] ve PPCC temelli [126] olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

ESPAR antenler parça parça (discrete) atlama açılarıyla (45 derece [124], 60 derece [121]) toplamda 360 derece tarama yapabilirler. Ayrıca istenen yönde farklı kazanç değerleri (7.5 dBi [126], 8 dBi [121], 10dBi [122]) elde edebilirler.

3. GELİŞTİRİLEN ANTEN MODELLERİ

Bir IoT donanımını gerçekçi bir şekilde emüle edebilen bir simülasyon aracının kullanılması, geliştirme ve hata ayıklama aşamalarında birçok avantaj sunar. Gerçek hayatta uygulanması zor olan senaryoların koşulmasına imkan tanır. Örneğin; farklı sayıda düğüm içeren farklı ağ topolojileri kurmak ya da farklı yayın ortamları (radio medium) için performansını değerlendirmek gibi.

Contiki açık kaynak kodlu ve C programlama dilinde yazılmış bir işletim sistemidir. Kablosuz ağlarda özellikle küçük cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem gereksinimleri 8/16 Mhz mikroişlemciler ve 32/64 kbyte salt okunur belleğe sahip cihazlarda kullanılacak kadar düşüktür. Ayrıca geliştiricileri tarafından Cooja adında bir ağ simülatörü geliştirilmiştir. Bu ağ simülatörü sanal makinaya benzer şekilde düğümleri bilgisayar ortamında gerçekçi olarak emüle etmektedir. Aynı zamanda yazılımsal olarak kendi isteklerimize göre cihazlar tasarlamamıza, ve yazılan kodun modifiye edilmesine gerek kalmadan gerçekte var olan cihazlara yüklenmesine izin vermektedir.

Cooja, radyo iletişim ortamını simüle eden Java tabanlı bir ağ simülatörüdür. Birçok platformu (TelosB/SkyMote, Zolertia Z1, Wismote, ESB, MicaZ, exp5438 gibi) sanal makine yaklaşımıyla emüle ederek gerçekçi bir test ortamı sunmaktadır. Ağ topolojisini, düğümler arasında gönderilen/alınan paketleri, düğümlerin seri çıkışlarını ve radyo olaylarını (alım, gönderim, çarpışma, kullanılan frekans gibi) bir zaman çizelgesi şeklinde görselleştirilmesine izin veren grafik kullanıcı arayüzüne sahiptir. Ayrıca, simülasyonları otomatik ve hızlı bir şekilde koşturmak için grafik kullanıcı arayüzünün devre dışı bırakılarak, kapsamlı bir şekilde hazırlanabilen betiklerin kullanılmasına izin verir. Rastgele tohum (random seed) değeri değiştirilerek aynı senaryo çalıştırılırken farklı rastgele sayılar üretilmesini sağlar. Varsayılan olarak, yalnızca sabit ışınım modellerine sahip tüm yönlü antenleri destekler.

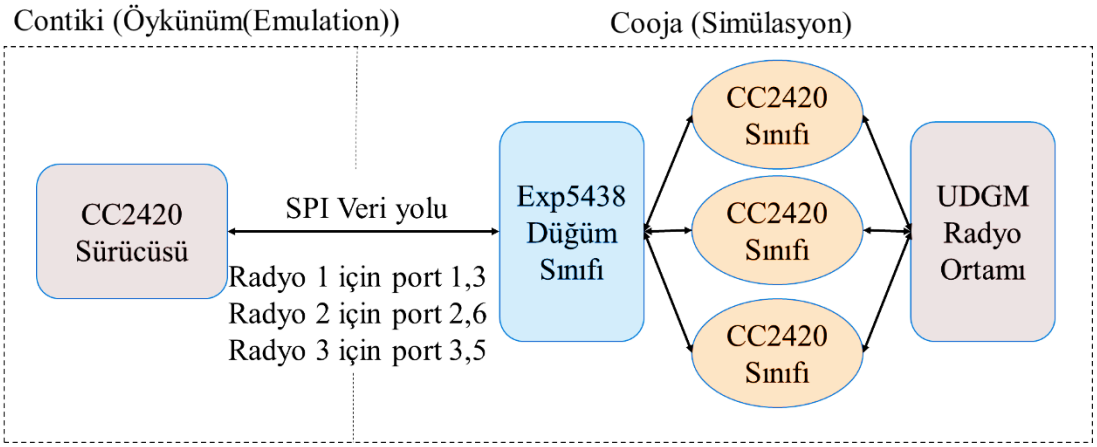
Contiki ve Cooja yazılımları bir düğüm üzerinde sadece bir adet ve tüm yönlü anteni destekleyecek şekilde geliştirilmiştir [127]. Yönlü anten modellemesi için literatürde sadece Rege'nin yaptığı çalışma bulunmaktadır. Çalışmada düğümlerin üzerinde bir adet anten olduğu varsayılmıştır, ve antenin yönü yazılımsal olarak arayüz üzerinden elle değiştirilerek yapılmıştır [128]. Düğümün üzerine birden fazla anten atayabilmek için ise Piyare vd. bir

çalışma yapmıştır. Bu çalışmada düğüm üzerine ortamı dinlemek için Wake-up radyo eklenmiş ve cc2420 radyosunu aktif etmek için kullanılmıştır [129].

3.1. Anahtarlanabilir Anten Modeli

Anahtarlanabilir anten modeli geliştirmek ve test etmek amacıyla, Contiki işletim sistemi ve entegre olduğu Cooja simülatörü, önerilen uzam zaman 6TiSCH çizelgeleme mekanizmasının uygulanmasını ve test edilmesini sağlamak için kapsamlı bir şekilde değiştirilmiştir. Bu değişiklikler sonrasında Cooja simülatörü, yönlü anten modelini kullanabilen düğümlerin veri paketlerini istenen anten üzerinden ve istenen yönde iletme ve alma yeteneğine kavuşmuştur.

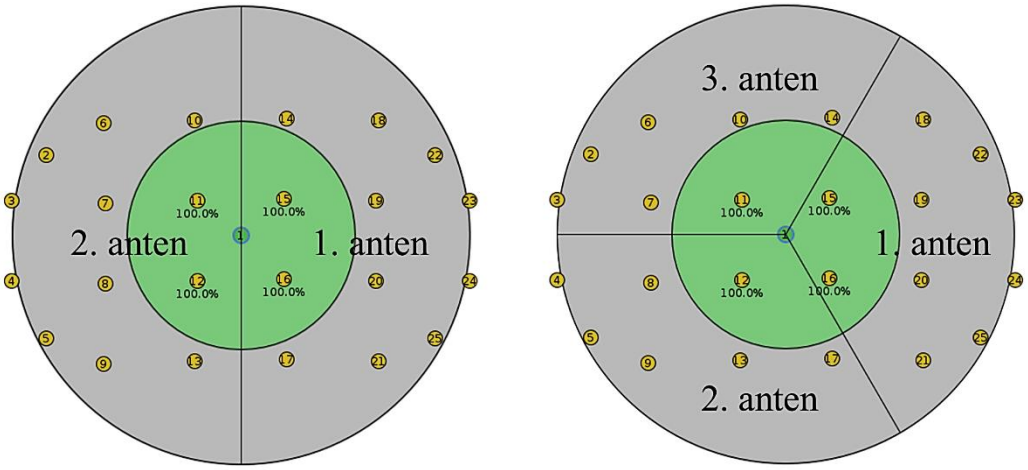
Bu çalışmada, önerilen çizelgeleme fonksiyonunun değerlendirilmesi için platform olarak TI EXP430F5438 seçilmiştir. Bu platform, düşük güçlü bir cc2420 radyo ve bir adet TI MSP430f5437 MCU içermektedir. Var olan cc2420 fiziksel katman modülünün, sonradan eklenen radyo arayüzlerini kontrol edebilmesi için cihaz yazılımı (Contiki OS) modifiye edilmiştir. Bu radyo arayüzleri, Anahtarlanabilir huzme yönlü antenlerin davranışını taklit etmek için kullanılır. Emüle edilen donanım ile Cooja radyo modülleri arasındaki iletişim, Serial peripheral interface (SPI) iletişim protokolü kullanılarak I/O portları üzerinden kurulur. Cooja simülatör tarafında ihtiyaç duyulan ikincil ve üçüncül radyo arayüzleri için ek SPI portları Şekil 13'te gösterildiği gibi atanmıştır. Eklenen yeni arayüzler, yarı çift yollu veri aktarımını destekler ve düğümün herhangi bir arayüz üzerinden sinyal alması durumunda oluşan kesmeleri ele alır.



Şekil 13. Çoklu anten mimari tasarımı

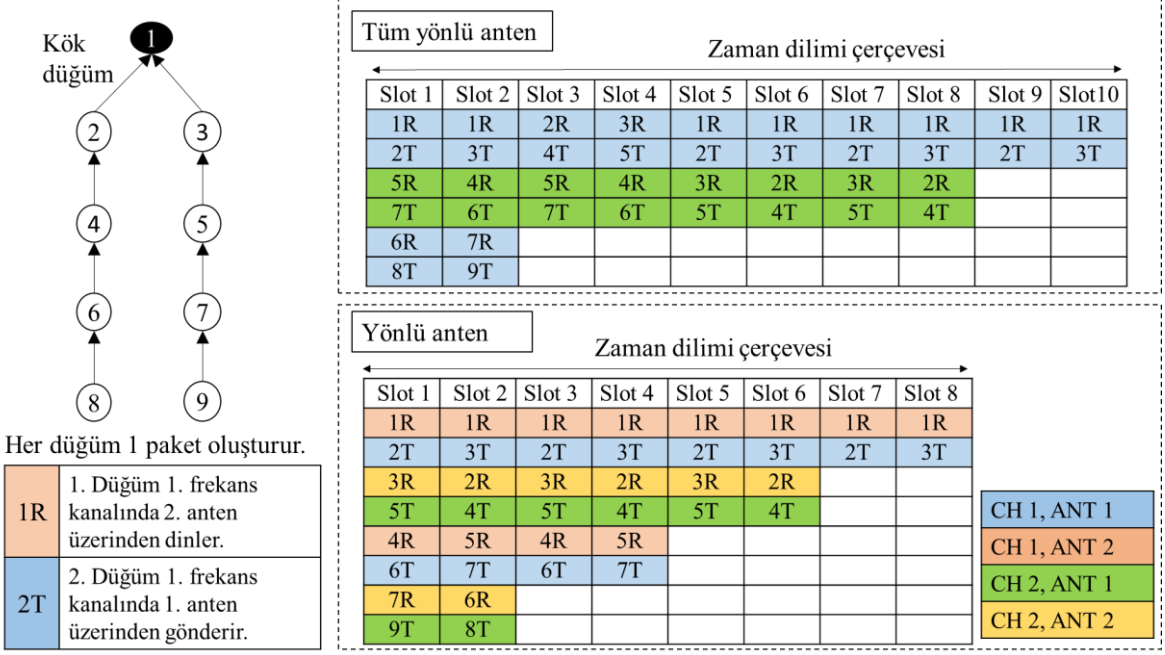
Uygulama sırasında Cooja simülatörünün başlıca Radyo (Radio), Radyo ortamı (Radio Medium) ve Emüle edilmiş donanım modülleri (MspSim) modifiye edilmiştir. Simülasyonda bulunan Radio sınıfına, antenin yönünü ve huzme aralığını temsil eden Direction adı verilen ilave bir arayüz eklenmiştir. Cooja varsayılan olarak tek bir donanım platformu üzerinde sadece bir adet ve tüm yönlü anten desteği vermektedir. Bu nedenle EXP430F5438 platform sınıfı güncellenmiş ve radyo nesnesi liste olarak tutularak istenilen sayıda radyonun platforma eklenmesine imkan sağlanmıştır. Düğümler üzerinde bulunan radyo sayısını senaryo dosyasından okurlar ve bu sayede nasıl davranacaklarına karar verirler. Sinyal gücü modellemesi için COOJA simülatöründe tanımlı, iki düğüm arasındaki mesafeyle lineer olarak ters orantılı bir model kullanılmıştır ve paketlerin alınıp/alınmamasına hedef düğümün seçilen antenin huzme aralığı (beamwidth) içerisinde kalıp kalmamasına bakılarak karar verilmiştir. Cihaz yazılımı ile simülasyon tarafındaki radyo modüllerinin birbirleri ile haberleşmeleri ve bu radyoların aynı radyo ortamında modellenmeleri için oluşturulan mimari tasarım Şekil 13'te verilmiştir. Gerçek hayatta, yönlü antenler bir RF anahtar vasıtasıyla radyoya bağlanmaktadır.

Çalışmalarda Cooja simülatörünün Unit Disk Graph Medium (UDGM) radyo ortamı kullanılmıştır. Bu radyo ortamı modelinde düğümler sabit yarıçaplı daireler içerisinde haberleşir ya da girişimde bulunurlar, yayın gücü değeri ise mesafe ile ters orantılı olarak (Free space path loss model) hesaplanır [104]. Radyo ortamı, her cihazın varsayılan olarak yalnızca bir anten ile donatıldığını varsayar. Bu nedenle modül, çok yönlü antenleri desteklemek üzere ve yayın gücünü hesaplarken antenlerin yönelim bilgisini de hesaba katacak şekilde değiştirilmiştir. Cooja'nın mevcut UDGM uygulaması iki mesafe parametresini dikkate alarak çalışır. İletim mesafesi parametresi, iki düğümün iletişim aralığı içinde olup olmadığına karar vermek için kullanılırken, Girişim mesafesi parametresi bir düğümün diğer düğümlerle etkileşime girdiği alanı tanımlamak için kullanılır. İki düğümün birbirlerine olan göreli açıları (bearing) ise, düğümlerin bulunduğu koordinatlar kullanılarak hesaplanır. Şekil 14'te verilen grafiklerde bulunan yeşil alanlar başarılı iletişimin yapılacağı sınırları, gri alanlar ise, ilgili düğümün girişim bölgesini temsil eder. Şekillerden anlaşılacağı üzere, yönlü antenler aktif olduklarında daha az bir girişim bölgesi oluştururlar.



Şekil 14. Farklı anten sayısına göre Anahtarlanabilir anten ışıma örüntüleri

Şekil 15'te düğümlerin sahip olduğu anten tipi dikkate alınarak oluşturulan iki adet çizelge verilmiştir. Yapılan çizelgeleme, zaman ve frekans boyutu yanında anten seçimini de içermektedir. Çizelgelemeler sol tarafta yer alan ağ topolojisi için oluşturulmuştur. Anahtarlanabilir anten için verilen çizelge oluşturulurken, her bir düğümün 2 adet anahtarlanabilir antene sahip olduğu ve her bir antenin 180 derece kapsama alanına sahip olduğu varsayılmıştır. 2 anten toplamda 360 derece kapsama alanına sahiptir.



Slot 1	Slot 2	Slot 3	Slot 4	Slot 5	Slot 6	Slot 7	Slot 8	Slot 9	Slot10
1R	1R	2R	3R	1R	1R	1R	1R	1R	1R
2T	3T	4T	5T	2T	3T	2T	3T	2T	3T
5R	4R	5R	4R	3R	2R	3R	2R		
7T	6T	7T	6T	5T	4T	5T	4T		
6R	7R								
8T	9T								

Slot 1	Slot 2	Slot 3	Slot 4	Slot 5	Slot 6	Slot 7	Slot 8
1R	1R	1R	1R	1R	1R	1R	1R
2T	3T	2T	3T	2T	3T	2T	3T
3R	2R	3R	2R	3R	2R		
5T	4T	5T	4T	5T	4T		
4R	5R	4R	5R				
6T	7T	6T	7T				
7R	6R						
9T	8T						

Şekil 15. Geleneksel ve önerilen yöntem ile oluşan iki çizelgenin karşılaştırılması

Topolojide 9 adet düğüm bulunmaktadır. 1 numaralı düğüm RPL kök düğüm olarak atanmıştır, ve aynı zamanda mesaj paketlerin toplandığı toplayıcı düğümdür. Mevcut frekans kanallarının sayısı, çizelgelemenin karmaşık olmaması ve çizelgenin kolay anlaşılması için 2 olarak belirlenmiştir. Yeterli uzam zaman mesafesine sahip düğüm çiftleri, eşzamanlı olarak aynı zaman dilimi ve frekans kanalını kullanarak iletişim kurabilmektedir. Yönlü antenler tarafından yaratılan ekstra uzamsal boyut, iletişim için mevcut olan frekans kanalı sayısı sınırlı olduğunda (örneğin, 868 MHz bandının Avrupa'da kullanılabilecek frekans kanalı sınırlıdır) kaynakları en optimal düzeyde dağıtmak için kullanılabilir. Şekil 15'te görüldüğü gibi, ağdaki düğümler tüm yönlü anten ile donatıldıklarında, her bir veri paketinin kök düğüme iletilmesi için minimum 10 zaman dilimi büyüklüğünde bir çizelgeye ihtiyaç duyulur. Öte yandan, ikinci çizelgelemede yönlü anten avantajlarından faydalanılır ve aynı sayıda paket sadece 8 zaman dilimi kullanılarak kök düğüme iletilir. Bunun nedeni, yönlü antenlerle sahip düğümlerle oluşturulmuş bir ağda daha çok paralel iletişimin sağlanabilmesidir.

Farklı renklerle gösterilmiş kutulara hücre (cell) denilmektedir ve her biri bir zaman, frekans, ve anten bilgisini tutmaktadır. Hücreler görüldüğü üzere 4 farklı renk ile ifade edilmiştir. Mavi ve kırmızı renkler iletişim için birinci antenin kullanıldığını, yeşil ve turuncu renkler ise iletişim için ikinci antenin kullanıldığını göstermektedir. Mavi ve yeşil renk CH1 frekans kaynağını kullanırken, kırmızı ve turuncu renkler iletişim için CH2 frekans kaynağının kullanıldığını gösterir. Tüm yönlü antene sahip olunması durumunda sadece 1 antene sahip olunduğu için mavi ve yeşil renkli hücreler kullanılabilmektedir. 1R 1 numaralı düğümün dinleme (receive) durumunda olduğunu, 2T ise 2 numaralı düğümün gönderim (transmit) modunda olduğunu belirtir. Çizelgelemeler karşılaştırıldığında yönlü antenlerin kaynakları daha verimli kullandığı görülmektedir.

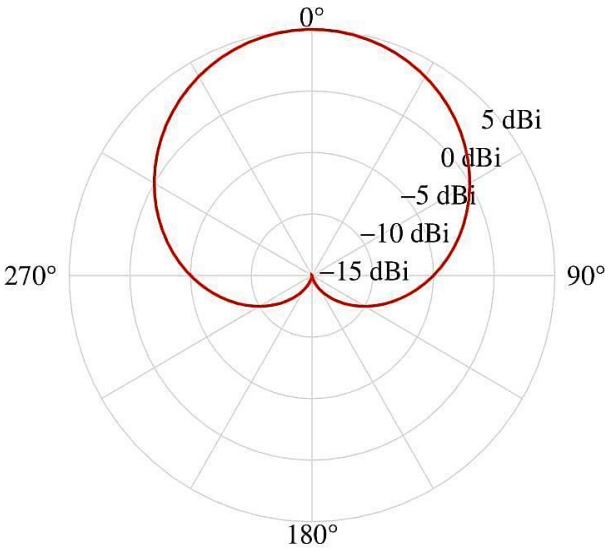
Önerilen sistemde, paylaşımlı hücrelerde yapılan tümegönderim (broadcast) yayınların etkin bir şekilde yapılmasını sağlamak için tüm antenlerin aktif edilerek gönderim yapması sağlanır. Tek noktaya yayın mesajları (unicast) ise, ağ içindeki girişimi azaltmak için sadece hedef düğüme bakan anten aracılığıyla gönderilir. Hedef düğümün bulunduğu yöne bakan doğru anteni seçmek için, Gelişmiş işaretçi (Enhanced Beacon) paketlerinin alındığı aktif anten bilgisi kullanılır. Her bir mesaj paketi alındıktan sonra, komşu düğümler için tutulan komşuluk tablosu yeni değerler ile güncellenir. Bu adımı takip eden çizelgelemeden sorumlu fonksiyon, zaman dilimi, frekans kanalı ve anten ofseti üçlüsü ile

temsil edilen kaynakları tahsis eder. Aktif edilecek anten bilgisi, ortam erişim katmanının kuyruğunda gönderilecek bir paket olduğunda, radyo fiziksel katmanına iletilir.

3.2. Döner Yönlü Anten Modeli

Döner yönlü anten modeli için gerçekçi bir sinyal gücü modellemesi yapılmıştır. Döner yönlü anten modeli için geliştirilen radyo ortamı, var olan radyo ortamına kıyasla iki düğüm arasındaki mesafeye ek olarak, antenlerin ışıma örüntüsü ve antenlerin birbirlerine olan göreli açılarını da dikkate almaktadır. Döner yönlü anten modeli için, yön ve yayın genişliği değerlerinin dikkate alınabilmesi için cihaz yazılımı üzerinde 2 adet yazmaç (register) tanımlanmıştır. İki düğümün birbirlerine olan göreli açıları (bearing), düğümlerin bulunduğu koordinatlar kullanılarak hesaplanır. İki düğümün birbirlerini direkt görmesi durumunda maksimum yayın gücü elde edilmektedir.

Anten ışıma örüntüsünü modellemek için (2)'de formülü verilen grafik kullanılmıştır. Şekil 16'da verilen şekilde Döner yönlü anten modeli için (3)'te verilen formül kullanılarak gerçekçi bir ışıma örüntüsü modellenmiştir. Simülasyon ortamında antenin baktığı yönde 5dBi kazanç öngörülmüş ve ters yönde -15dBi'lik bir sınırlama getirilmiştir. Bu sayede, döner yönlü anten, tüm yönlü antene kıyasla, istenilen yönde daha uzun bir gönderim mesafesine sahip olurken, istenmeyen yönlerden gelecek girişimlere karşı kendisini korumaktadır.



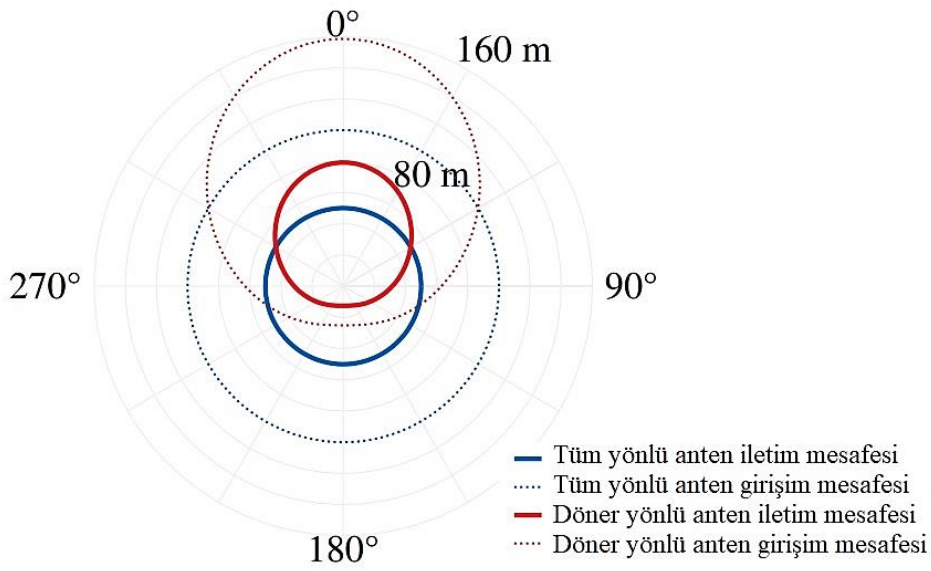
Şekil 16. Döner yönlü anten ışıma örüntüsü

$$y = 1 + \ cos(x) \tag{2}$$

$$G(\theta)[dB] = \ 10\ (1 + cos(\theta)) - 15 \tag{3}$$

Formülde; G anten kazancını göstermektedir. θ açısı gönderici ve alıcı antenlerin birbirlerine olan görece açı farkını gösterir. 10 ve 15 değerleri Şekil 16'da verilen ışıma örüntüsünü elde etmek için seçilmiştir.

Şekil 17'de geliştirilen Döner yönlü anten modelinin kapsama alanı verilmiştir. COOJA simülatörü varsayılan olarak tüm yönlü anten için 50 metrelik bir iletim mesafesi kullanmaktadır. RSS hesaplamasında (4)'de verilen log-normal yol kaybı modeli [130] kullanılmıştır. Formüle göre, 5 dBi'lik kazanç 30 metre mesafeye kadar uzağa iletim imkanı sağlarken, -15 dBi'lik bir kayıp istenmeyen yönlerden 40 metre mesafeye yakın bir korunma sağlamaktadır. Şekillerden anlaşılacağı üzere, yönlü antenler aktif olduklarında daha az bir girişim bölgesi oluştururlar. Bu sayede, uzam-zaman ayrımı avantajını kullanılarak farklı yayınların aynı zaman diliminde ve aynı frekans kanalını kullanarak çizelgelenebilmesine olanak sağlanır.



Şekil 17. Döner yönlü anten kapsama alanı

$$RSS = P_{TX} + P_{PL} - 10\,K\left(\frac{d12}{d0}\right) + G_T(\theta 12) + G_R(\theta 21) \quad (4)$$

Formülde; P_{TX} gönderim gücünü göstermektedir, değeri 0 dBm alınmıştır. P_{PL} yol kaybını göstermektedir, değeri -40 dBm alınmıştır. K yol kaybı katsayısını belirtmektedir, değeri dış ortam düşünülerek 2.5 alınmıştır. d_{12} iki düğüm arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. d_0 referans uzaklığı göstermektedir, değeri 1 m olarak alınmıştır. $G_T(\theta 12)$ 2 numaralı düğümün anteninin 1 numaralı düğümün antenine görece açısına göre elde edilen anten kazancını ifade etmektedir. $G_R(\theta 21)$ ise 1 numaralı düğümün anteninin 2 numaralı düğümün antenine görece açısına göre hesaplanan anten kazancını belirtir.

4. ANAHTARLANABİLİR ANTEN İLE DAĞITIK ÇİZELGELEME

4.1. Önerilen Algoritma

Bu bölümde, önerilen anten modeli kullanılarak sadece zaman ve frekansı değil, aynı zamanda yön bilgisini de dikkate alan uzam-zaman çizelgeleme yaklaşımı tanıtılmaktadır. Standart 6TiSCH çözümünde, doğru kaynak yönetimi yapabilmek için hücre istatistikleri düzenli olarak güncellenir. Bu çalışmada önerilen yönlü anten çözümü için ise, istatistikler hücre bazlı yerine anten bazlı olarak tutulur. Böylece her bir antenin farklı frekans kanallarındaki davranışı tespit edilir. Bunun nedeni, farklı yönlere bakan yönlü antenlerin aynı kanal veya komşu kanallarda dış etkenlere bağlı olarak farklı kanal karakteristikleri ile karşılaşabilecek olmasıdır. Sonuç olarak, ağın ortasındaki düğümler, bant genişliği kaynaklarını çizelgelerken ekstra bir serbestlik boyutundan yararlanabilir. Bu ekstra boyut sayesinde kaynak tahsisi, anten, zaman dilimi ve frekans kanalı tarafından sağlanan en iyi kombinasyona bakılarak yapılır.

Algoritma 1'de uzam-zaman dağıtık çizelgeleme algoritmasının davranışı verilmiştir, ve doğru antenin aktif edilme işlemini göstermektedir. Bu durumda, antenin seçimi hedef düğümün yönüne, hücre tipine ve paket tipine (broadcast, unicast) bağlıdır.

Algoritma 1 Uzam-zaman dağıtık çizelgeleme davranışı

```
1: for each slot ∈ slotframe do
2:     ret ← get scheduled packet(slot)
3:     if ret = UNSCHEDULED then
4:         wait for the next slot
5:     else if ret = SCHEDULED then
6:         if slot_type = SHARED then
7:             if content_buffer = ∅ then
8:                 pkt ← listen from all antennas
9:                 if pkt ≠ ∅ then
10:                    process pkt
11:                    update neighbour list(dst, ant)
```

```
12:                         end if
13:                     else
14:                         transmit pkt over all antennas
15:                     end if
16:                 end if
17:                 if slot_type = TRANSMIT then
18:                     if content_buffer = ∅ then
19:                         wait for the next slot
20:                     else
21:                         if pkt.dst = BROADCAST then
22:                             transmit pkt over all antennas
23:                         else
24:                             offset ← get antenna(pkt.dst)
25:                             transmit pkt over antenna[offset]
26:                         end if
27:                     end if
28:                 end if
29:                 if slot_type = RECEIVE then
30:                     offset ← get antenna(pkt.dst)
31:                     pkt ← listen from antenna[offset]
32:                 end if
33:             end if
34:             update cell statistics
35: end for
```

Verilen algoritma her bir zaman diliminde tahsis edilmiş hücre olup olmadığını sorgular. İlgili zaman dilimi için tahsis edilmiş bir hücre yoksa hiçbir iş yapmadan, bir sonraki zaman dilimini bekler. Tahsis edilen hücre paylaşımlı ise ve tampon belleğinde bekleyen bir paket varsa, bu paket tüm antenler üzerinden gönderilir. Eğer tampon bellek boş ise dinleme yapılır. Paylaşımlı hücrede bir paket alınması durumunda paketi gönderen düğüm tutulan komşu listesinde aranır ve seçili anten bilgisi güncellenir. Düğümlerin komşu sayısı donanım kısıtlarından dolayı 8 olarak sınırlandırılmıştır. Bu nedenle algoritma karmaşıklığı komşu düğüm sayısına bağlı olarak artmamakta ve Θ (1) olmaktadır. Tek

noktaya gönderim yapılacağında ise ilgili düğüm için tutulan anten bilgisi komşuluk listesinden alınır. Benzer şekilde komşu sayısının sınırlı olması nedeni ile algoritma karmaşıklığı artmamaktadır.

Algoritma 2'de uzam-zaman dağıtık çizelgeleme fonksiyonunun hücre tahsis etme algoritması verilmiştir, ve önerilen çözüm için genel olarak kaynak atama işlemini gösterir. Algoritma verilen eşik değerine ulaşıncaya kadar hücre tahsis etmeye çalışır. Hücre seçimi sırasında uygun hücre bulmak için çerçeve uzunluğunu dikkate alarak rastgele sayılar üretir. Çizelgelenmemiş bir zaman dilimi bulduğunda rastgele bir frekans kaynağı arar. Uygun zaman dilimi ve frekans kaynağı bulduğunda komşularının anten yönlerini dikkate alarak çarpışma olup/olmayacağını kontrol eder. Bu adımlardan başarıyla geçen bir hücre bulunduğunda ilgili hücreyi tahsis eder.

Algoritma 2 Uzam zaman dağıtık çizelgeleme hücre tahsisi

```
Input: dst                          ▷ keeps destination node
Input: cell_type                    ▷ cell can be Receive or Transmit
Output: available_cell              ▷ cell contains slot, channel and antenna offsets
cell ← ∅                            ▷ initialize available cell
p_cell_list ←set of scheduled cells of parent
n_cell_list ← set of scheduled cells of 1-hop neighbors
while threshold not reached do      ▷ until a cell found or a threshold value reached
    cell.slot ← random() % SLOTFRAME_LENGTH   ▷ find a random slot offset
    if cell.slot ≠ ∀p_cell_list.slot then     ▷ parent does not use this slot
        while threshold not reached do
            cell.channel ← random() % MAX_AVAIL_CHAN  ▷ find a random channel
            if cell.channel nox exist in failed_channel_list then
                found_a_cell ← true
                for each c ∈ n_cell_list do
                    if cell.slot = c.slot & cell.channel = c.channel then
        ▷ if two antennas face each other, when one is in RX mode the other can not be in TX mode
                        if dst.antenna = c.antenna & cell_type ≠ c.type then
                            found_a_cell ← false
            ▷ if two cells are scheduled for the same mode, they should not face each other
                        else if cell_type = c.type & dst.antenna ≠ c.antenna
                            found_a_cell ← false
                        end if
                    end if
```

```
19:                                 end for
20:                                 if found a cell then
21:                                         return available_cell
22:                                 end if
23:                         end if
24:                 end while
25:         end if
26: end while
27: return null
```

Algoritmanın uygun bir hücre bulunmadığında sonsuz döngüye girmesini önlemek için bir eşik değeri tanımlanmıştır. Uygun bir hücre bulmak için öncelikle rastgele bir zaman dilimi değeri seçilir. İkinci aşamada seçilen zaman dilimi için uygun bir frekans kanalı aranır. Bulunan zaman dilimi ve frekans kanal değeri, varolan çizelgede çakışma oluşturup oluşturulmadığına bakılır. Eşik değeri dikkate alınmadığında, çerçeve uzunluğu m, frekans kanal sayısı n, ve tahsis edilmiş hücre sayısı t olsun. Algoritma karmaşıklığımız Θ (m*n*t) olmaktadır. Uygun hücre tahsis algoritması sadece trafik ihtiyacına bağlı olarak ek hücre tahsis etmek gerektiğinde çağrılır, dolayısıyla hücre tahsis işlemi gerekmediğinde çalışmamaktadır, sisteme ek bir yük getirmemektedir.

Ağdaki düğümler çalışmaya başladıklarında komşularını tanımaları gerekmektedir. Tüm yönlü antenler, herhangi bir mesaj paketini her yöne aynı güç ile gönderebilir ve aynı şekilde her yönden gelen mesaj paketlerini alabilirler. Bu nedenle tüm yönlü antene sahip düğümler komşularını ek bir işlem yapmaya gerek kalmadan bulabilirler. Yönlü antenler ise mesaj paketini sadece belirtilen yönde yayarlar ve sadece belirli bir yönden dinleme yapabilirler. Dolayısıyla iki komşu düğümün haberleşebilmesi için antenlerin aynı anda birbirlerine bakacak şekilde konfigüre edilmeleri gerekir. Bu nedenle, geliştirilen sistem 6TiSCH protokolünde belirtilmiş paylaşımlı hücrede (shared cell) tüm yönlü antene sahip gibi davranmalıdır. Bu durum ortam erişim katmanında göz önüne alınarak ve gerektiğinde sahip olunan tüm antenler aktif edilerek sağlanır.

6TiSCH çizelgeleme yapan fonksiyonun temel amacı bant genişliği kaynaklarını verimli olarak kullanmaktır. Dağıtık bir 6TiSCH çizelgeleme yapan bir düğüm kaynak atama işlemi sırasında komşularının çizelge bilgisini toplar. Bu adım, komşu düğümlerde çakışmayan hücreleri bularak ağ performansını iyileştirmeyi amaçlar. Bu sayede, zaman ve

frekans boyutlarında dikgen (orthogonal) kaynak tahsisi mümkün olur. Dağıtık çizelgeleme işlevleri genellikle aşağıda verilen kaynak yönetimi işlevlerini gerçekleştirir:

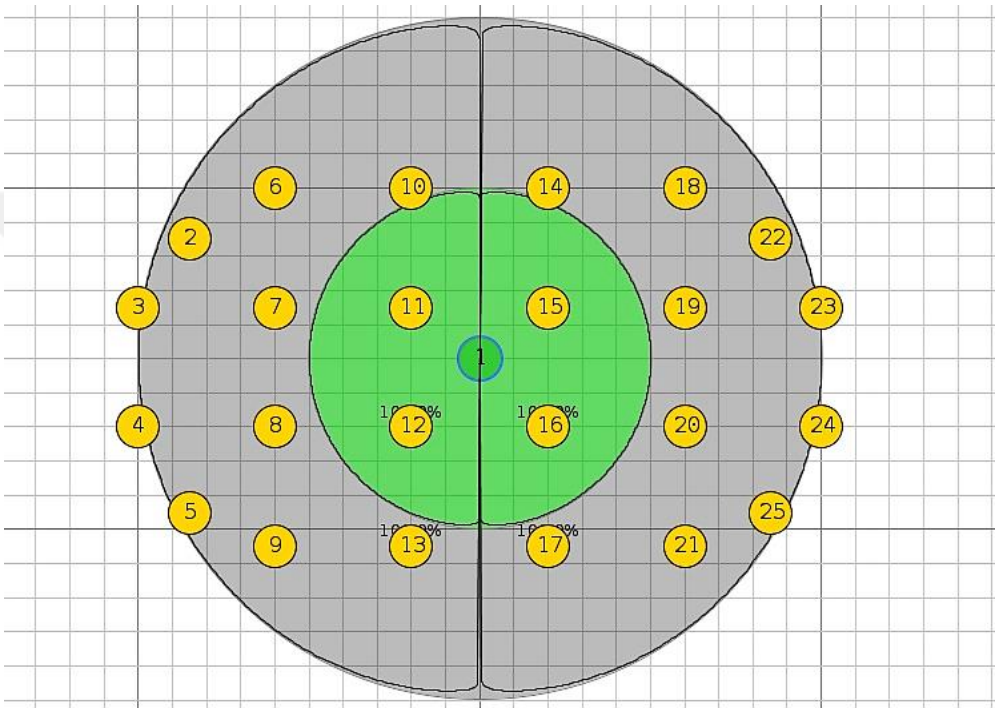
(1) Veri trafiği hakkında istatistiksel bilgiler kullanılarak (buffer occupancy) komşu düğüme bir gönderme/dinleme hücresi ekleme. (2) Komşu düğüme gönderilecek mesajların bulunduğu kuyruk boyutu (queue size) dikkate alınarak mevcut çizelgelenmiş hücrelerden bir gönderme/dinleme hücresini çıkarma. (3) Tahsis edilmiş bir hücreyi başka bir hücre ile değiştirme.

Bir kaynak düğüm MAC tampon belleğine eklenen her bir içerik için, çizelgelenmiş hücrelerin istatistiklerini hesaplayan fonksiyonları çağırır. Mevcut olan hücreler ile bir hedefe yönelik trafik ihtiyacı karşılanamıyorsa o hedef için yeni hücreler tahsis edilir. Yeni hücreler eklemek için hedef düğümden istekte bulunulur. Hedef düğüme liste halinde müsait olan hücreler ve ihtiyaç duyulan hücre sayısı gönderilir. Hedef düğümün yeterli kaynağa sahip olması durumunda olumlu bir geri bildirim alınır. Eğer az kullanılan ya da ihtiyaç duyulmayan bir hücre varsa, ilgili 6P komutu [46] kullanılarak çizelgeden kaldırılır. Bir hedefe doğru çizelgelenmiş belirli bir hücre zayıf bir performans gösterdiğinde, 6Top protokolünün ilgili komutu ile, düşük performans gösteren hücrenin frekans kanalı değiştirilir.

4.2. Örnek Bir Ağ Yapısı ve Oluşturulan Çizelge

Şekil 18'de 25 düğümden oluşan ve düğümlerin üzerinde 2 adet anahtarlanabilir antene sahip olduğu örnek bir ağ yapısı görülmektedir. Standart bir kablosuz duyarga ağ uygulamasında tüm sensörlerden gelen veriler toplayıcı (sink) düğümde toplanır. Düğümler iki tür işlem gerçekleştirirler. Birinci işlem, her bir düğümün üzerinde bulunan sensörlerden topladıkları veriyi anlamlandırarak bir mesaj paketi oluşturmasıdır. İkinci işlem ise, alınan mesaj paketlerini kök düğüme doğru yönlendirilmesidir. Örneğin; 3 numaralı düğümden gelen veri, 7 ve 11 numaralı düğümlerden geçerek 1 numaralı düğüme ulaşır, aynı şekilde 24 numaralı düğümden gelen paket, sırasıyla 20 ve 16 numaralı düğümlerden geçerek 1 numaralı düğüme ulaşır. Ağın performansını arttırmak için bu iletişimler mümkün olduğunca paralel yapılmaya çalışılmalıdır, aynı anda birçok düğüm mesaj paketini diğer bir düğüme iletebilmelidir. Paralel iletişimi arttırmak amacıyla düğümler farklı frekanslarda haberleşmeye çalışırlar. IEEE 802.15.4 standardı bu amaçla 2.4 Ghz bandında 16 frekans kaynağı ayırmıştır. Teorik olarak 16 frekans etkin olarak kullanıldığında aşağıda verilen

senaryoda maksimum seviyede iletişim sağlanabilmektedir, ancak; çevremizdeki diğer kablosuz duyarga ağları, zigbee ağları, bluetooth yayınları v.b. aynı frekans aralıklarını kullanan yayın kaynakları olduğunda 16 adet frekansın etkin kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu amaçla TSCH (örneğin; 6TiSCH) mekanizması, yönlü anten ile beraber kullanılmasına izin verecek şekilde değiştirilerek girişimin fazla olduğu senaryolarda maksimum verimi elde etmek mümkün olabilecektir.

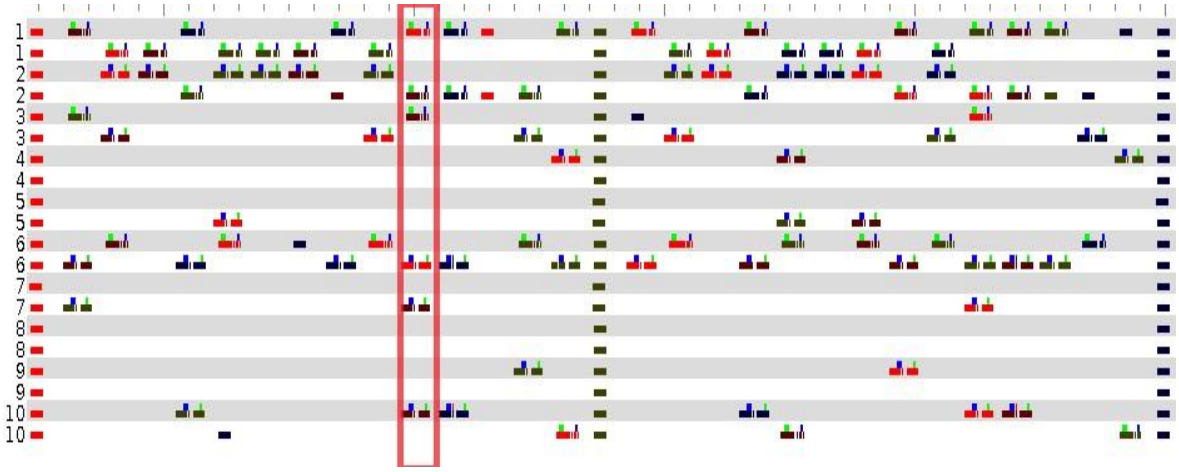


Şekil 18. 25 düğümden oluşan örnek bir ağ yapısı

Yukarıda verilen şekilde, yeşil alan 1 numaralı düğümün kapsama alanını göstermektedir. 11, 12, 15 ve 16 numaralı düğümler 1 numaralı düğüm ile aynı frekans kanalını kullandıklarında sağlıklı olarak haberleşebilirler, gri alanda kalan düğümler ise 1 numaralı düğüm yayın yaptığında bu yayını alırlar ancak anlamlandıramazlar, dolayısıyla girişime maruz kalmış olurlar ve aynı anda aynı frekans kanalında başka bir düğümden gelen mesaj paketlerini de alamazlar. Bu nedenle sağlıklı iletişim için sahip olunan zaman dilimi ve frekans kaynağı çeşitliliği önemlidir. Tüm yöne antenler kullanıldığında, aynı anda aynı frekans üzerinden haberleşmek komşu düğümler için mümkün değildir. Yönlü anten kullanıldığında ise, örneğin; 1 numaralı düğüm 15 numaralı düğüme paket gönderirken sadece aynı yönde bulunan düğümler bu yayından etkilenir, diğer yönde kalan düğümler

yapılan yayından etkilenmezler. 15 numaralı düğüm 1 numaralı düğüme doğru yayın yaparken, 7 numaralı düğüm 11 numaralı düğüme yayın yapabilir. Bu sayede frekans kaynakları kısıtlı olsa dahi paralel haberleşme mümkün kılınır.

Şekil 19'da 10 düğümden oluşan bir senaryo için oluşturulmuş örnek bir çizelge verilmiştir. Renkli görülen alanlarda düğümler radyolarını aktif hale getirmişler ve dinleme/gönderim yapmaktadırlar. Yeşil kareler veri alımını, mavi kareler ise veri gönderimini ifade etmektedir. Sol tarafta bulunan sayılar düğümlerin tanımlayıcı bilgilerini göstermektedir. Düğümler iki adet anahtarlanabilir antene sahip olduğunu varsayarsak; ilk satır 1 numaralı düğümün birinci antenini, ikinci satır 1 numaralı düğümün ikinci antenini, üçüncü satır 2 numaralı düğümün birinci antenini göstermektedir. Simülasyon ortamında birinci antenler sağ tarafa, ikinci antenler sol tarafa bakacak şekilde konfigüre edilmiştir. Kırmızı çerçeve içerisine alınmış alanda görüldüğü üzere 3 adet paralel haberleşme yapılmaktadır. 1 ve 6 numaralı düğümler kendi arasında farklı bir kanaldan, 2 ve 7 numaralı düğüm çifti ile 3 ve 10 numaralı düğüm çifti aynı frekans kanalı üzerinden haberleşmektedir. Eğer yönlü anten yerine tüm yönlü (omni-directional) anten kullanılsaydı bu düğüm çiftleri aynı anda aynı frekanstan haberleşmeleri mümkün olmayacaktı, ve ağda mesaj paketlerinin iletilmesinde gecikme yaşanacaktı. Ayrıca, çizelgeleme algoritması kullanılsa bile düğümler ağa dahil olma, ağdan çıkma gibi nedenlerden dolayı belirli zaman aralıklarında paylaşımlı hücreler (shared cell) üzerinden aynı frekans kanalında haberleşmeleri gerekir. Şekil 19'da verilen zaman aralığında 3 kere tüm düğümler aynı frekans üzerinden radyolarını aktif etmişlerdir. Paylaşımlı hücre kullanımında yeterli frekans kaynağı olsa bile sadece tek frekans üzerinden haberleşilir. Dolayısıyla, yönlü anten kullanımının paylaşımlı hücrelerde sağladığı fayda, kontrol mesaj paketlerinin iletilmesi, ağın dengelenmesi, komşuların birbirlerini tanıması ve çizelgelemenin oluşturulması bakımından da hayati önem taşımaktadır.



Şekil 19. Anahtarlanabilir anten ile oluşturulan örnek bir çizelge

Literatürde bulunan çizelgeleme algoritmaları düğümler için zaman dilimi ve frekans ataması yaparak iki boyutlu bir çizelge oluşturmaktadırlar. Anten yönlerinin de dikkate alınması durumunda çizelgeleme algoritmaları, zaman dilimi ve frekans kaynaklarının daha etkin kullanılabilmesini sağlar.

4.3. Test Sonuçları

Bu çalışmada, testler sırasında kullanılan her bir düğüm, testin koşullarına göre iki veya üç adet Anahtarlamalı huzme yönlü anten ile donatılmıştır. Düğümler arasındaki iletişim yarı çift yönlüdür, yani düğümler aynı anda gönderim ve dinleme yapamazlar. Ancak; düğümler aynı mesaj paketini üzerinde bulunan tüm antenleri aktif ederek tümegönderim (broadcast) yayın trafik örüntüsünü gerçekleştirebilirler. Bu bölümde yer alan sonuçlar anahtarlamalı huzme yönlü anten modeline göre yapılan test sonuçlarını kapsamaktadır. Testler düğümlerin 2 ve 3 adet anahtarlanabilir antene sahip olmaları durumunda, farklı paket üretim frekanslarında, farklı ağ yoğunluklarında ve farklı kullanılabilir frekans kaynağı sayılarında performanslarını karşılaştırmaktadır. Bu test sonuçları tüm yönlü antene sahip olma durumuna göre, paket kayıp oranları, ve ortalama enerji tüketimi bakımından karşılaştırılmış ve beklendiği gibi olumlu sonuçlar alınmıştır.

Geliştirilen akıllı anten modeli, ilk olarak 6TiSCH Minimal Configuration ve Orchestra kaynak çizelgeleme çözümleri ile sırasıyla tüm yönlü antene sahip olması, iki adet yönlü antene sahip olması ve üç adet yönlü antene sahip olması durumları için test edilmiştir. Sonrasında, önerilen 6TiSCH tabanlı yönlü anten bazlı çizelgeleme mekanizması (SF-DA),

hem tüm yönlü hem de akıllı anten modelleri için test edilmiştir. Geliştirilen mekanizmaları değerlendirmek ve anlamlı bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamak için 25 düğümden oluşan ve 200 m x 150 m alanı kapsayan ızgara tipi (grid) ağ topolojisi oluşturulmuştur. Bu düğümlerden bir tanesi (düğüm 1), ağın merkezinde yer alan RPL [131] kökü olarak yapılandırılmış ve düğümler yatayda x ve y eksenlerinde birbirlerinden eşit uzaklıkta mesafelere yerleştirilmiştir. Dolayısıyla trafiğin bir noktada toplanması sağlanarak, toplayıcı düğüme doğru kaynak kullanımı artan (convergecast) bir senaryo değerlendirilmiştir. Önerilen çözümün performansını daha iyi değerlendirebilmek adına düğümlerin ürettiği trafik arttırılarak kullanılan zaman dilimi çerçevesinin yoğun bir şekilde kullanımı sağlanmıştır. Bu sayede daha büyük bir senaryoda düğümlerin nasıl davranacağı ve önerilen çözümün performansı hakkında bilgi edinilmiştir. Düğümlerin komşu sayısı anten kapsama alanı ve düğümlerin arasındaki mesafe ile ilgilidir. Cihaz donanım kısıtları nedeni ile gerçek hayatta da düğümler belli sayıda komşu edinebilmektedir. Dolayısıyla daha büyük bir senaryo kullanılsa bile düğümlerin hareketsiz olması ve birbirlerine eşit mesafede yerleştirilmeleri nedeniyle komşu sayıları sabit olmakta ve ağın ölçeklenebilir olması sağlanmaktadır.

Değerlendirme için paket alım oranı (PRR), enerji tüketimi ve uçtan uca gecikme süreleri kullanılmıştır. PRR, test süresi boyunca başarıyla alınan paketlerin toplam iletilen paketlere oranı olarak hesaplanır. Uçtan uca gecikme süresi ise, bir paketin kaynak düğümden iletilmesi ile kök düğüm tarafından alımı arasında geçen süre olarak ölçülür. Tüm testler için ayrıntılı konfigürasyon ayarları Tablo 2'de verilmiştir. Testler simülasyon aracında bulunan rastgele tohum (random seed) değeri değiştirilerek 10 kere koşulmuş ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Anahtarlanabilir anten testleri konfigürasyon ayarları

Parametre	Değer
Minimum geri çekilme katsayısı	1
Maksimum geri çekilme katsayısı	7
Geri çekilme artırımı	2
Tekrar gönderim sayısı	5
Çerçeve büyüklüğü	127 byte
Tampon bellek boyu	5
Zaman dilimi uzunluğu	15 ms
Çerçeve uzunluğu	15
İletim mesafesi	50 m
Girişim mesafesi	100 m
Düğümler arası mesafe	40 m
Test süresi	2 saat

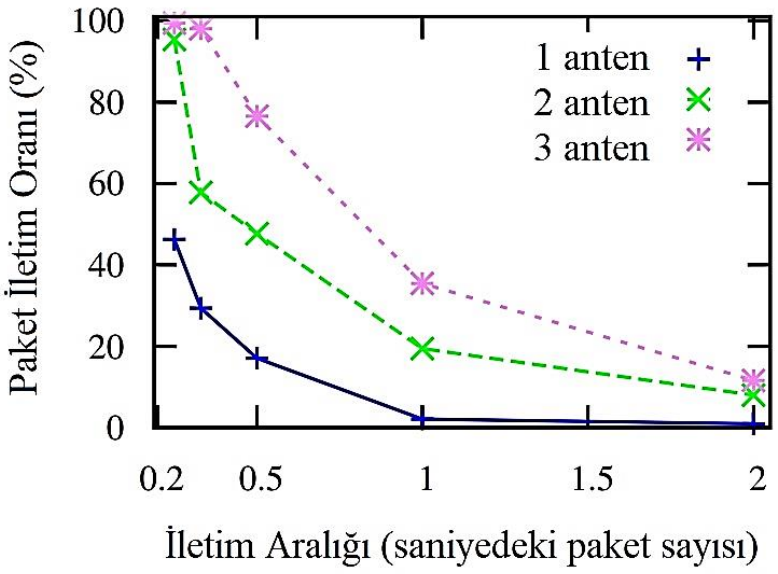
Simülasyon kapsamında test yazılımı, düğümlerin periyodik olarak “Merhaba” mesajlarını kök düğüme gönderdiği bir veri toplama uygulamasına dayanmaktadır. Bu senaryo, kök düğüm çevresinde tıkanıklığa neden olan bir durum (converge-cast) oluşturur. SF-DA algoritmasının paket iletim oranı ağ trafiği artırılarak analiz edilmiştir. Kaynak düğümlerin paket oluşturma frekansı arttığında, ağ içerisinde doymuş bir trafik oluşur. Bu durumda, dağıtık çizelgeleme algoritmaları tarafından yapılan yanlış frekans kanalı atamalarından kaynaklanan çarpışmaların baskın hale gelmesi beklenir. Öte yandan, ağda yaşanan gecikme süresinin, yönlendirilecek paketlerin iletimden önce tamponlanmak zorunda kalınacağından ağ trafiği ile doğru orantılı olarak artması beklenir.

6TiSCH Minimal Configuration ve Orchestra kaynak çizelgeleme mekanizmaları iletişim kurmak amacıyla sadece paylaşımlı (shared) hücreleri kullanır, bu nedenle ağ içinde yaşanan çarpışmaların yüksek olması beklenir. Sonuç olarak, paketlerin çoğu çarpışmadan dolayı düşer ve Şekil 20 ve Şekil 21’de görüldüğü gibi düşük bir paket iletim oranı elde edilmesine yol açar. Bu testlerin asıl amacı, yönlü anten iletişimine sahip olmanın paylaşımlı kanal üzerindeki etkisini vurgulamaktır. Bu yaklaşımın paylaşımlı kanal üzerinde olan girişimi önemli ölçüde azaltması beklenir. Burada, yayın yapan düğüm hedef tarafına doğru

anteni kullanarak iletir. Önerilen dağıtık 6TiSCH yönlü anten tabanlı çizelgeleme mekanizması komşu tablosunda bulunan bilgileri kullanarak hem doğru anten üzerinden dinleyebilir hem de doğru anten üzerinden gönderim yapabilir. Bu durum önerilen yaklaşımı ağ içi girişime karşı dayanıklı kılar.

4.3.1. 6TiSCH Minimal Configuration

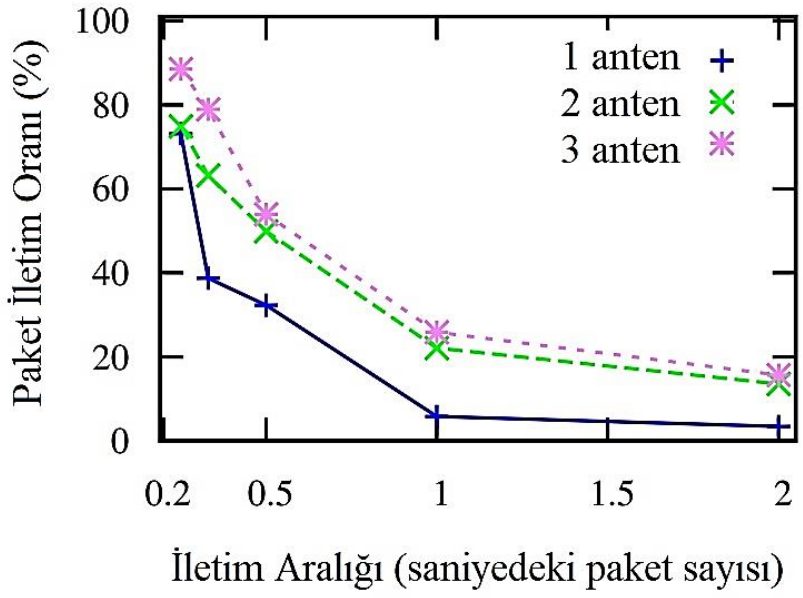
Minimal konfigürasyon testlerinde, üç zaman dilimi (time slot)'nden oluşan bir zaman dilimi çerçevesi (slotframe) oluşturulmuştur. İlk zaman dilimi paylaşımlı hücre olarak yapılandırılmış ve düğümlerin tümü, [63] 'de belirtildiği gibi aynı frekans kanalını kullanarak aynı zaman diliminde birbirleriyle haberleşmektedir. Şekil 20'de verilen sonuçlar incelendiğinde, yönlü antenlerin, aynı trafik gereksinimleri için tüm yönlü anten kullanılan senaryolara kıyasla paket alım oranını önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Sahip olunan antenlerin sayısı arttıkça, paket iletim oranı artmaktadır. Bunun nedeni antenlerin huzme açıklığı daraldıkça uzamsal ayrımın artmasıdır. Ortalama paket iletim oranının veri trafiği hızına bağlı olarak senaryo şartlarına göre 2-3 kat arttığı söylenebilir.



Şekil 20. 6TiSCH Minimal Configuration test sonuçları

4.3.2. Orchestra Çizelgeleme Algoritması

Orchestra çizelgeleme fonksiyonu ile yapılan testlerde; TSCH işaretçi (beacon) mesaj paketlerini göndermek için tanımlanan çerçevenin uzunluğu 31, RPL mesajlarını göndermek için tanımlanan çerçevenin uzunluğu 13 ve veri paketlerini göndermek için tanımlanan çerçevenin uzunluğu 5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Normal şartlarda veri paketlerinin gönderildiği çerçevenin uzunluğunun ağda yaşanan çarpışmaların az olması için ağı oluşturan düğüm sayısından büyük olması beklenir. Ancak, bu parametre değerleri, bahsedilen çizelgeleme fonksiyonlarının kısıtlı kaynaklara sahip olduklarında ve ağır yük altındayken karşılaştırmak için seçilmiştir. Farklı çerçevelerdeki hücrelerin üst üste binmesi durumunda, en yüksek öncelikli çerçevedeki hücre öncelik kazanır. TSCH işaretçi mesajlarının gönderildiği çerçeve en yüksek önceliğe sahipken, veri paketlerinin gönderildiği uygulama çerçevesi ise en düşük önceliğe sahiptir.



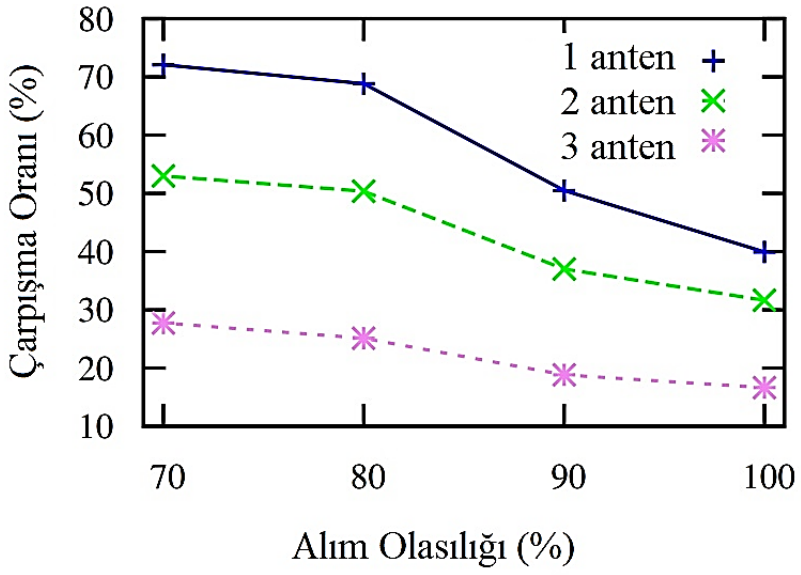
Şekil 21. Orchestra çizelgeleme test sonuçları

Şekil 21'de verilen sonuçlar 6TiSCH Minimal Configuration çizelgeleme fonksiyonu test sonuçlarına benzer sonuç vermiştir. Yönlü antenlerin kullanımı, ağ trafiğinin yüksek olduğu zamanlarda ağ performansını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Her iki test sonucu dikkate alındığında 6TiSCH ağ performansının akıllı ve yönlü antenlerle geliştirilebileceği gözlenmiştir. Her bir çizelgeleme yaklaşımı için performans sonuçları ayrı ayrı verilmiştir, çünkü bu bölümdeki asıl amaç farklı yaklaşımların birbirlerine göre olan

performansları değil, her bir yaklaşımın farklı anten konfigürasyonları için kendi içinde performanslarını karşılaştırmaktır.

4.3.3. Uzam Zaman Tabanlı Çizelgeleme

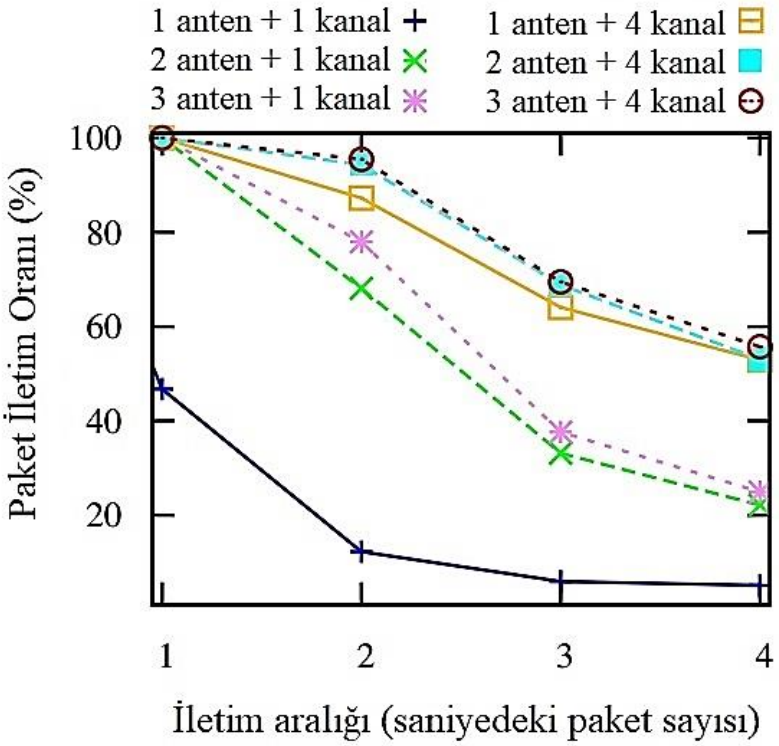
Uzam-zaman tabanlı çizelgeleme testlerinde, 15 zaman diliminden oluşan bir adet çerçeve oluşturulmuş ve ilk zaman dilimi paylaşımlı hücre olarak ayarlanmıştır. Testler, farklı veri üretim frekanslarına ve mevcut bir IEEE 802.15.4 frekans kanalı alt grubuna dahil farklı frekans kaynağı sayılarına göre gerçekleştirilmiştir. Çok sayıda kullanılabilir frekans kanalına sahip olmak avantajlı bir durumdur ve ağ performansını iyileştirir. Ancak, 802.15.4 kanallarının çoğu Wi-Fi girişimlerinden ya da dış etkenlerden etkilenir, dolayısıyla 6TiSCH için kullanılabilecek kanal sayısı sınırlanmaktadır. Ayrıca, özellikle Şekil 22'de vurgulandığı gibi paylaşımlı kanalda iletişim için önemli bir ağ içi girişim olabilir. Bu bölümde verilen test sonuçları için, tüm yönlü antene sahip ve standart 6TiSCH Scheduling function (SF0) çizelgeleme fonksiyonu kullanan düğümlerin oluşturduğu senaryo baz olarak alınmıştır ve farklı anten konfigürasyonuna sahip düğümlerin oluşturduğu senaryoların test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 22. Paylaşımlı hücre yaşanan çarpışma oranları

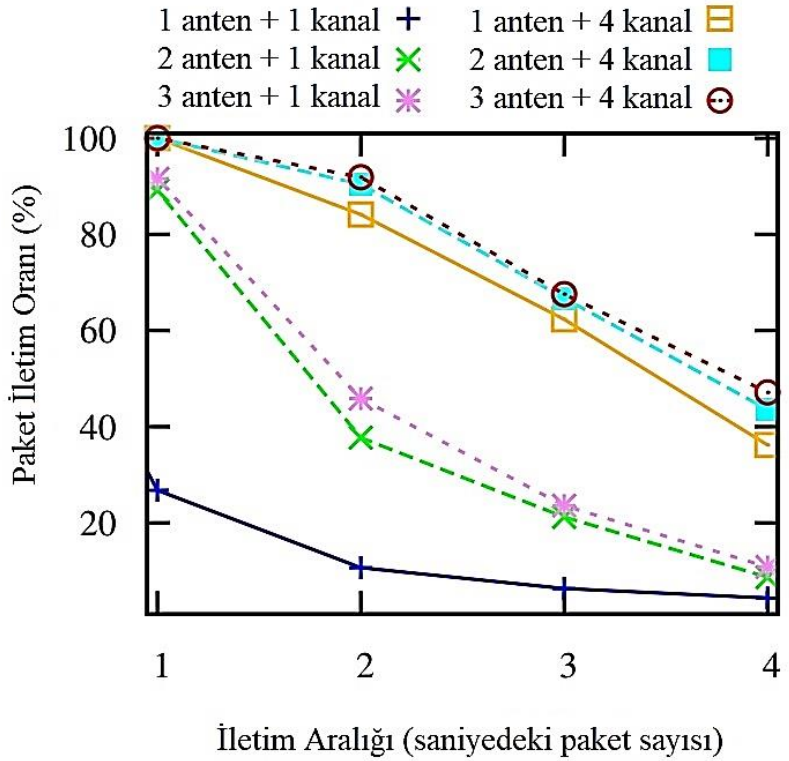
Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25'de alıcı tarafında sırasıyla 100%, 90% ve 80% başarılı alma olasılıklarına göre elde edilen veri iletim oranları verilmiştir. Başarılı alma olasılığı

iletişim halinde bulunan düğümlerin arasındaki mesafeye ters orantılı olarak (Free space path loss model [104]) değişmektedir. Grafiklerdeki genel eğilime bakıldığında, 6TiSCH ağında yönlü anten kullanmanın, değerlendirilen ağ senaryosu için paket iletim oranı performans artışını 100%'e kadar getirebileceğini göstermektedir. Beklenildiği gibi, kullanılabilir frekans kanallarının sayısı sınırlı olduğunda, yönlü antenlerin sağladığı ekstra uzamsal boyut paket iletim oranlarında önemli bir gelişme sağlamıştır. Simülasyonlarda SF-DA performansı, Şekil 23'te gösterildiği gibi yönlü anten sayısı ile doğru orantılı olarak artmıştır.

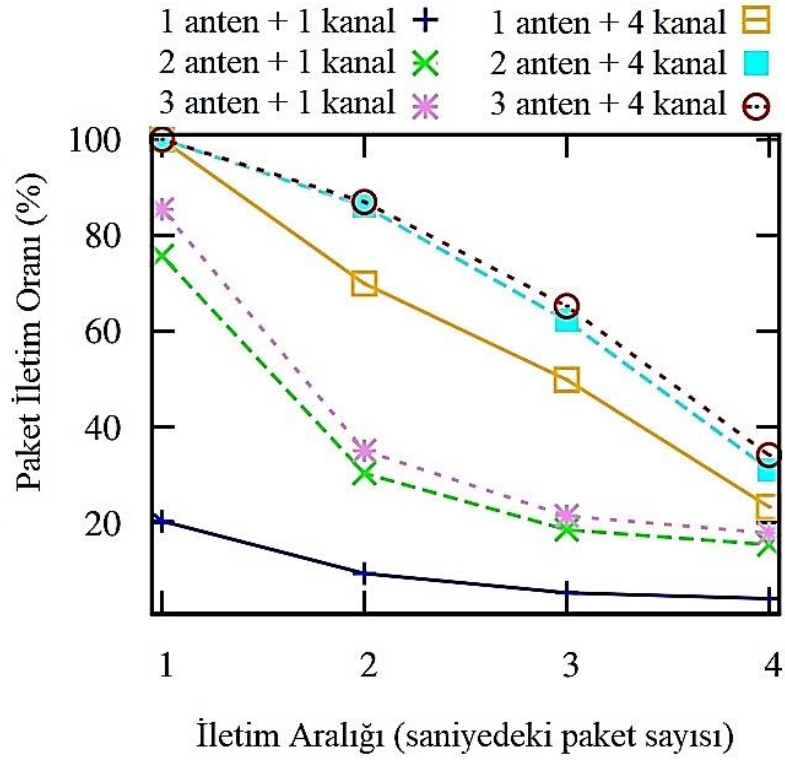


Şekil 23. 100% Başarılı paket alma olasılığı durumunda paket iletim oranları

Şekil 24 ve Şekil 25'e göre kanal kalitesi bozuldukça, yönlü antenlerin ağ performansı üzerindeki etkisinin belirginleştiği görülmektedir. Bunun nedeni, paket kayıplarından ve düşmelerinden kaynaklanan yeniden iletimlerin ağ trafiğini arttırması ve dolayısıyla yaşanan çarpışmaların artmasına neden olmasıdır.



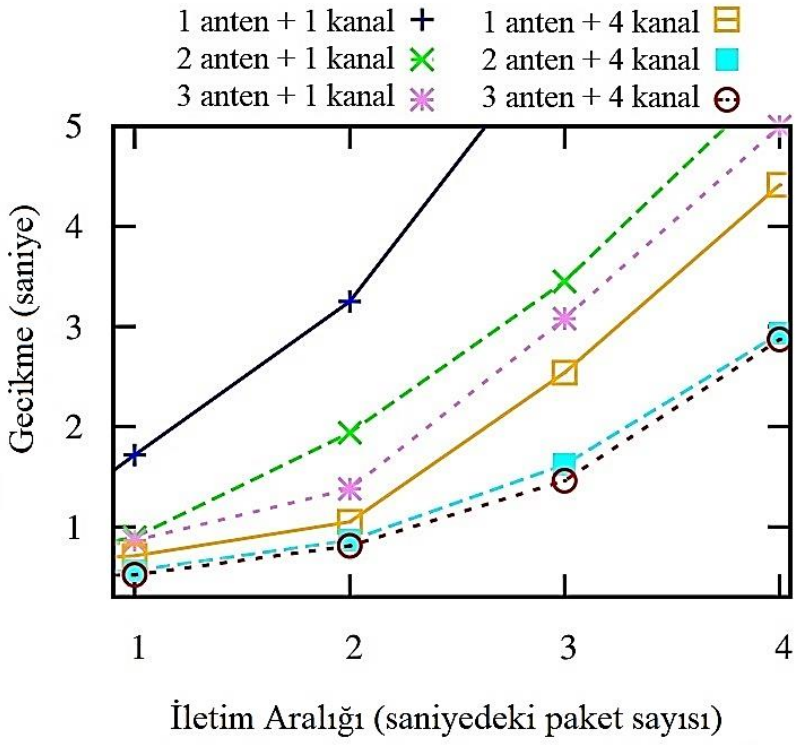
Şekil 24. 90% Başarılı paket alma olasılığı durumunda paket iletim oranları



Şekil 25. 80% Başarılı paket alma olasılığı durumunda paket iletim oranları

Önemli bir diğer nokta ise kullanılabilir frekans kanalları sayısı 4'ten büyük olduğunda, yönlü anten kullanmak, değerlendirilen ağ topolojisi için önemli bir performans artışı sağlamamaktadır. Bu nedenle, yönlü antenlerin, düşük girişimin olduğu ve düğüm yoğunluğunun az olduğu ağlarda kullanılması gerekli olmayabilir. Fakat, sınırlı sayıda frekans kaynağına sahip olan ve trafik yoğunluğunun fazla olduğu ağlarda önerilen çizelgeleme fonksiyonu ağ performansını önemli ölçüde arttırmaktadır.

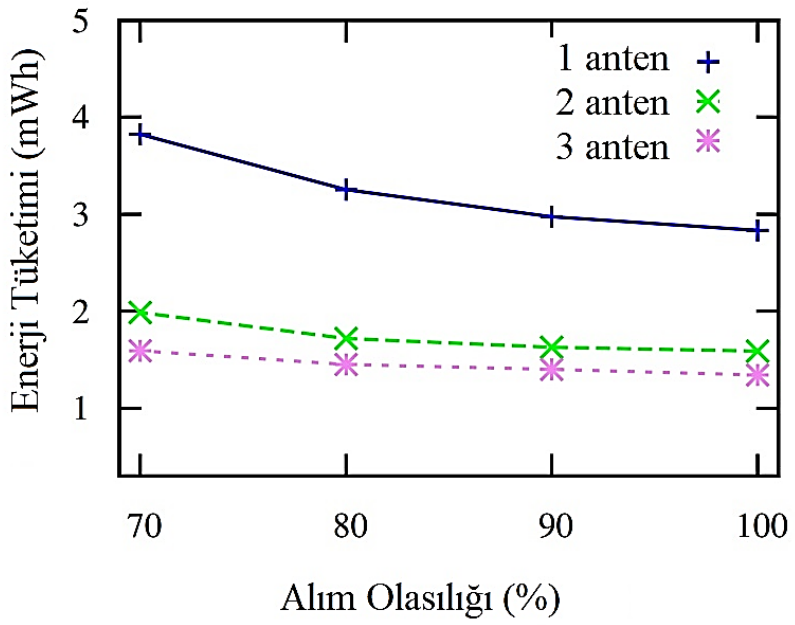
Önerilen çözüm ayrıca, değerlendirilen ağın ortalama gecikme sürelerinin verildiği Şekil 26'da görüldüğü gibi gecikme sürelerini kısaltır.



Şekil 26. Ağda yaşanan ortalama gecikme süresi

Yönlü anten kullanan bir radyonun yayın sırasında ihtiyaç duyduğu enerji, antenin huzme açıklığına orantılı olduğu varsayılmıştır [104]. Bu nedenle, 180 derece huzme açıklığına sahip bir yönlü anten, aynı mesafeye yayın yapabilmek için tüm yönlü antene kıyasla 2 kat daha az enerji harcar. Bir düğümün ortalama enerji tüketimi hesaplanırken, mikrodenetleyicinin aktif ve uyku modlarında kullandığı enerji ve radyo tarafından alma ve gönderme modlarında tüketilen enerji dikkate alınır. MSP430F5438 mikrodenetleyicisi aktif modda 2.5 mA, düşük güç modunda 0.5 µA, cc2420 radyo çipi ise gönderim modunda 17.4

mA ve dinleme modunda 18.8 mA tüketmektedir [132]. Yönlü antenin kullanılması, Şekil 27'de görüldüğü gibi ortalama enerji tüketiminde önemli tasarruf sağlar. Enerji tasarrufu zayıf iletişim kanallarında daha belirgin hale gelir. Bunun nedeni, artan iletimlerden kaynaklanan çarpışmaların, yönlü antenlere sahip düğümlerden oluşan ağlarda daha az yaşanmasıdır.



Şekil 27. Ortalama enerji tüketim grafiği

Ağda bulunan düğüm sayısı performansı etkileyen bir diğer önemli faktördür. Bu nedenle, paket iletim oranı, gecikme süresi ve enerji tüketimi ile ilgili testler farklı ağ büyüklükleri için tekrar koşulmuştur. Bu testlerde düğümler yatayda x ve y eksenlerinde 40 metre mesafeyle yerleştirilmiş, kullanılabilir frekans kanalı sayısı 4 olarak ve bağlantının başarılı alım oranı 100% olarak ayarlanmıştır. Her bir düğümün saniyede 1 paket oluşturduğu varsayılmıştır. Diğer parametreler ise Tablo 2'de verildiği şekilde kullanılmıştır.

Koşulan testlerin performans sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Ağdaki düğümlerin sayısı arttıkça, paketlerin hedefe ulaşmak için daha fazla atlama yaparak daha uzun mesafe katetmesinden dolayı paket iletim oranı azalır. Bu sebeple ağdaki gecikme süresi ve ağın ortalama enerji tüketimi, ağdaki artan düğüm sayısı ile birlikte doğru orantılı olarak artmaktadır. Değerlendirilen senaryoların paket iletim oranı performansı, yönlü anten kullanıldığında tüm yönlü antenlere kıyasla yaklaşık 5% ile 10%'luk bir iyileşme sağlar.

Ortalama ağ gecikmesinde ise yaklaşık 50% düşüş yaşanmıştır. Benzer eğilim, 3 yönlü anten kullanan düğümlerin enerji tüketimi için de gözlenmektedir. Bu sonuçlar, bir IoT ağının önemli performans ölçümlerinin, düşük karmaşıklıkta anahtarlanabilir bir yönlü anten sistemi kullanılarak önemli ölçüde geliştirilebileceğini göstermektedir.

Tablo 3. Düğüm sayısına göre paket iletim oranı, gecikme süresi ve enerji tüketimi

Düğüm Sayısı		25	49	73	101
Tüm yönlü anten	Paket iletim oranı (%)	94.87	83.55	61.04	39.13
	Gecikme (ms)	1267	1560	2254	3145
	Enerji tüketimi (mWh)	3.21	3.65	4.09	5.08
2 yönlü anten	Paket iletim oranı (%)	97.94	87.61	63.49	42.17
	Gecikme (ms)	595	1174	1594	2324
	Enerji tüketimi (mWh)	1.55	1.82	1.89	2.31
3 yönlü anten	Paket iletim oranı (%)	100	88.77	66.74	44.06
	Gecikme (ms)	536	1094	1544	1793
	Enerji tüketimi (mWh)	1.26	1.49	1.65	1.77

Bu çalışmadaki sonuçlar, anahtarlanabilir yönlü anten kullanmanın, özellikle sınırlı frekans kanallarına sahip senaryolar için 6TiSCH ağlarının performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, 6TiSCH ağını yapılandırmak için bir veya daha fazla paylaşımlı kanal kullanılır. Bu paylaşımlı kanallar üzerinden yönlü antenler kullanılarak

iletilen tek noktaya yayın trafiği diğer performans metriklerinin yanısıra ağın daha dayanıklı olması avantajına sahiptir.

Bu çalışmada, 6TiSCH ağları için yönlü anten tabanlı çizelgeleme fonksiyonu (SF-DA) önerilmiş ve geleneksel tüm yönlü antenler kullanılarak koşulan çizelgeleme fonksiyonu ile olan performansı karşılaştırılmıştır. 6TiSCH Minimal Configuration, Orchestra ve SF-DA çizelgeleme algoritmaları için performans değerlendirmeleri, basit bir RF anahtarlamalı akıllı anten sisteminin kullanılması ile ağ performansının artabileceğini ve uçtan uca gecikme süresi ile enerji tüketimini azaltabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, 6TiSCH protokolünün performansının, akıllı antenlerden elde edilen anten yönü bilgisinin kullanılarak çizelgeleme kararları alındığında önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Enerji tüketimi ve ağ gecikme süresi ölçüm deneylerinin sonuçları da benzer bir eğilim göstermektedir. Bu umut verici sonuçlar, yönlü iletişimin sağladığı ekstra serbestlik boyutunun yüksek performans ve daha güvenilir IoT çözümlerine yol açacağını göstermektedir.

5. DÖNER YÖNLÜ ANTEN İLE DAĞITIK ÇİZELGELEME

Nesnelerin interneti ağları genellikle düşük güçlü cihazlardan oluşur. Bu cihazlar, doğal çevreyi gözlem, doğal afetleri ortaya çıkarma, akıllı ölçüm, hayvan/eşya takibi gibi uygulama alanlarında kullanılırlar. Maliyeti düşürmek adına bu tür uygulamalarda sınırlı iletişim mesafesine, enerji kaynağına ve işlem yapma kabiliyetine sahip cihazlar kullanılır. Dolayısıyla, bu tür uygulamalarda düğümler iletişim mesafesi kısıtlarından dolayı topladıkları verileri yine başka düğümleri kullanarak karar vermesi için bir merkez düğüme iletirler. Ağda birçok algılayıcı düğüm olması nedeniyle düğümler aynı anda paralel olarak haberleşmek durumunda kalırlar, bu ise maruz kalınan girişim ve çarpışmalardan dolayı paketlerin düşmesine dolayısıyla tekrar gönderilmesine ve daha fazla enerji tüketimine neden olarak ağın performansının kötü olmasına yol açar. Akıllı bir çizelge fonksiyonu ile düğümler çizelgelendiğinde ise, çarpışma ve girişim oluşmasına imkan vermeyen çizelgeleme fonksiyonları, aynı anda aynı frekansta yapılan veri transferlerini de kısıtlar. Dolayısıyla üstün performanslı bir ağ çözümünün mümkün olduğunca paralel veri transferlerine izin vermesi gerekir, bu ise ancak zaman ve frekans çeşitliliğine ilave olarak yönlü antenlerin kullanılması ile beraber oluşan uzam çeşitliliği ile mümkündür.

Yönlü ve akıllı antenlerin kullanımı, geleneksel kablosuz ağların performansını artırmak için kullanılmaya başlanan yeni bir yöntemdir. Yönlü anten tabanlı sistemler, istenilen yönde daha uzun mesafeye iletim kabiliyeti sunarken, aynı zamanda istenmeyen yönlerden gelen girişimlere karşı kendilerini korurlar. Bu nedenle Akıllı ve yönlü antenler ağın kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, yönlü antenler tüm yönlü antenlere kıyasla daha karmaşık algoritmalara ihtiyaç duyarlar ve özellikle düşük güçlü ağlarda ek mekanizma tasarlanmadan kolayca kullanılamazlar. Her bir komşu düğüm için yayın yapılacağında en uygun yön bilgisinin hesaplanabilmesi gerekir. İki düğümün birbirlerine olan göreli açıları alınan paketin yayın gücünün hesaplanması açısından önemlidir. İki düğümün birbirlerini direkt görmesi durumunda anten kazancı yüksek olacağından maksimum yayın gücü elde edilir.

Döner yönlü anten kullanıldığında ağın senkronize olma süresini uzatan 3 temel faktör vardır. (1) EB mesaj paketlerinin çarpışma ve girişimlerden dolayı hedef düğüm tarafından alınamaması (2) Frekans atlama özelliğinden dolayı hedef düğümün farklı frekans

kanalından dinleme yapması ve mesaj paketini alamaması (3) Yönlü antenlerin kapsama alanının dar olmasından dolayı her yönden paket alamamaları.

Kablosuz algılayıcı ağlarında bulunan düğümler genellikle ağ ve komşu düğümleri hakkında ön bilgiye sahip olmadan konuşlandırılırlar. Dolayısıyla, bir düğüm ayağa kalktığında öncelikli olarak komşularını tanımaya çalışır. Yönlü antenlerin kullanımı, geleneksel tüm yönlü antenlerle basit bir şekilde yapılan komşu tanıma işlemini zorlaştırır ve karmaşık bir işleme dönüştürür [133]. Komşu tanıma işlemi ağın oluşumu açısından en öncelikli süreç olmakla beraber, enerji tüketimi açısından bu sürenin kısaltılması son derece önemlidir. Yönlü antenlerin kullanımı ağın oluşumu aşamasında iki önemli zorluğu beraberinde getirir. (1) Düğümler birbirleriyle iletişim kuracaklarında antenlerini hangi yöne yönlendireceğini hesap etmek zorundalardır. (2) Yönlü antenin kapsama alanının dar olması nedeniyle, tüm yönlü antenlerle tek seferde yapılabilen işlerin, antenin tüm çevresini kapsayacak şekilde tekrarlanması gereklidir.

Döner yönlü antenlerin avantajlarından yararlanabilmek için radyo katmanında paketin hangi yönden alındığı bilgisi ortam erişim katmanına iletilmeli, ortam erişim katmanında bu bilgi, hedef düğüm hakkında diğer bilgiler ile beraber işlenmeli/saklanmalı ve hedef düğüm için en uygun yön bilgisine karar verilmeli ve sonrasında hedef ile iletişim kurulacağında en iyi yön bilgisi tekrar radyo katmanına aktarılmalıdır. Bu nedenle var olan radyo ve ortam erişim katmanlarının tekrar tasarlanması gereklidir. Dolayısıyla, her bir hedeften alınan her bir paket için yayın gücü (RSSI) değeri ve antenin o andaki baktığı yön bilgisi birlikte dikkate alınarak en iyi açı bilgisi elde edilmelidir. Voigt vd. en iyi yön bilgisinin tayin edilmesinde RSSI bilgisinin LQI verisinden daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [108].

Bu çalışmada, komşuların tanınma mekanizması için Sahte işaretçi (False Beacon) adında yeni bir mesaj paket formatı tanımlanmıştır. Bu tanımlanan mesaj paketi sayesinde düğümler ağa senkronize olmayı beklemeden komşuları ile haberleşebilmekte ve ağa senkronize olmadan komşularının yönlerini ve ID bilgilerini elde etmektedirler. Düğümler ağa senkronize olduklarında gönderecekleri tümegönderim mesajları ise rastgele yönlere göndermek yerine komşularından bir tanesinin yönüne veya en çok komşusunu kapsayacak şekilde göndererek ağın daha hızlı senkronize olmasını sağlarlar. Ayrıca, tüm yönlü antene sahip sistemlerde tek seferde halledilebilen işlemler, döner yönlü antenli sistemlerde komşuların tümünü kapsayacak şekilde tekrar edilmesi gerekir. Bunun için komşular kendi aralarında özerk olarak tahsis ettikleri kaynakları kullanarak bu işlemlerin daha sağlıklı ve

hızlı bir şekilde yapılmasını sağlarlar. Bu çalışmanın en temel amacı yönlü antenler kullanıldığında ağın bağlantı kalitesinde yaşanan değişimleri detaylı incelemek ve yönlü antenlerin sağlayacağı avantajların ağ performansına etkilerini gözlemektir.

5.1. Senkronizasyon Süresinin İyileştirilmesi

Ağın oluşma süresini kısaltmak için EB ve RPL paketlerinin çizelgelenmesi önem teşkil etmektedir. Yaşanacak gecikme süresi için maksimum bir süre garanti edebilmek adına literatürde çalışmalar yapılmıştır [21, 134]. Tüm yönlü antene sahip sistemler bile yoğun ve büyük ağlarda paylaşımlı kanalda yaşanan çarpışma ve girişimlerden dolayı uzun ağ oluşma sürelerine sahip olabilirler [135].

Kontrol paketlerinin çizelgelenmesi için en sık kullanılan fonksiyon 6TiSCH Minimal Configuration fonksiyonudur [63]. Ancak, 1 adet paylaşımlı hücrenin kontrol paketlerinin gönderilmesi için yetmediği durumlarda ağın performansını arttırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; Vallati vd. ağın özelliklerini dikkate alan ve dinamik olarak daha fazla paylaşımlı hücrenin kullanılabildiği bir çözüm önermiştir [136]. Ancak; paylaşımlı hücrelerin kullanımı konusunda düğümler birbirleri ile işbirliği yapamazlar, dolayısıyla döner yönlü anten sistemlerinde antenler farklı yönlere baktıklarından, paylaşımlı kanalların çoğaltılması yönlü anten kullanan ağlarda beklenen faydayı sağlamamaktadır. Guglielmo vd. ise yaptıkları çalışmada paylaşımlı hücrede çarpışmaları azaltmak için düğümlerin komşu sayılarına bağlı olarak EB mesajı çizelgeleme yapabildikleri bir çözüm sunmuştur [137], bu çözümde de komşusu az olan düğümlerin döner yönlü anten kullanımından dolayı düşük olan haberleşebilme ihtimalleri daha da düşmekte ve daha kötü performans değerlerine neden olmaktadır. Vogli vd. ise, paylaşımlı hücrede tek bir frekans kanalı kullanmak yerine daha fazla frekans kanalı kullanılmasına yönelik olarak rastgele dikey doldurma (Random Vertical filling (RV)) ve rastgele yatay doldurma (Random Horizontal filling (RH)) adını verdikleri 2 farklı çözüm önermiştir. RV yönteminde sadece tek bir zaman diliminde düğümler farklı frekanslardan haberleşebilirken, RH yönteminde tek bir frekans kanalı ve tüm zaman dilimleri kullanılabilmektedir [138]. Vucinic vd. ise her bir farklı paket tipi için farklı gönderim olasılıkları tanımlayarak farklı tipteki mesaj paketlerinin farklı sıklıklarla gönderilmesini önermiştir [67]. Fanucchi vd. ise ağın oluşumu için gerekli mesaj paketlerinin gönderilmesine yönelik olarak ek paylaşımlı hücrelerin tahsis edilmesini önermiştir [139]. Yapılan çalışmalarda ek paylaşımlı hücre tahsis etme yerine, ek atanmış

(dedicated) hücre tahsis edilmesinin daha uygun olacağı değerlendirilmiştir, ve uygulanmıştır.

Yönlü antenler tüm yönlü antenlere kıyasla daha küçük huzme açıklığına sahiptir. Dolayısıyla yayın yapılacağında yayının hangi yöne yapılacağını kestirmek zorundalardır, ve bu kararın radyo katmanında alınması mümkün değildir. Dolayısıyla, radyo katmanında herhangi bir paket alındığında paketin alındığı anda antenin baktığı yön bilgisinin, RSSI verisi ile beraber üst katmanlar ile paylaşılması gerekir. Her bir hedef düğüm için paketlerin alındığı yön bilgisi ve RSSI değeri üst katmanlarda işlenir. Her bir hedef için maksimum RSSI değerinin elde edildiği yön bilgisi protokol yığıtında MAC katmanının komşuluk tablosunda saklanır. Böylece 6TiSCH protokolü, kaynakları daha doğru bir şekilde dağıtırken çelişkili olmayan bir şekilde çizelgeleme yapabilir. RDC katmanında yayın yapılacağında, anten kendisine bildirilen yöne ayarlanır ve gönderme işlemi yapılır. Benzer şekilde dinleme yapılacağında, radyo kendisine aktarılan yöne antenini ayarlar ve dinleme yapar [140].

Döner yönlü antene sahip sistemlerde; paylaşımlı kanalda haberleşme yapılırken anten yönü rastgele değiştirilerek aynı düğümlerin farklı açılardan paket alabilmesi ve farklı RSSI değerleri ölçülmesi sağlanır. Ölçülen RSSI değeri o hedef için daha önceden alınmış RSSI değerleri ile karşılaştırılarak o ana kadarki en uygun açı belirlenir ve bu bilgi adanmış kanallarda gönderim yapılırken kullanılır. Her bir komşu düğüm ile sağlıklı haberleşebilmek için en yüksek yayın gücü elde edilmesini sağlayan yön bilgisinin belirlenmesinde kullanılan komşu tanıma algoritması Algoritma 3'te verilmiştir.

Komşu tanıma algoritması sadece bir veri paketi alındığında çağrılır. Paket içerisinden gönderen düğümün bilgisi alınır ve komşuluk listesinde olup/olmadığı kontrol edilir. Komşuluk listesinde bulunamazsa listeye eklenir. Bu işlem bir kereye mahsus yapılır. Eğer paket daha iyi bir yayın gücü ile alındıysa, komşuluk listesinde ilgili düğüm için tutulan yayın gücü ve anten yönü bilgileri güncellenir. Düğümlerin komşu sayısı donanım kısıtlarından dolayı 8 olarak sınırlandırılmıştır. Bu nedenle algoritma karmaşıklığı komşu düğüm sayısına bağlı olarak artmamakta ve Θ (1) olmaktadır.

Algoritma 3 Komşu tanıma algoritması	
Input: packet	▷ last received message packet
1: id ← extract_id (packet)	▷ extract transmitter id
2: n ← get_neighbor (id, list)	▷ search for transmitter

```
3: if n is null then                                   ▷ neighbor is not in the list
4:     n ← create_neighbor (id, current_dir, current_rssi)
5:     insert_into_the_list (n)                        ▷ add neighbor to list
6: else if current_rssi > n.rssi then                  ▷ if a better signal is received
7:     n.dir ← current_dir                             ▷ update direction
8:     n.rssi ← current_rssi                           ▷ update signal strength
9: endif
```

EB paketleri gönderilirken paylaşımlı kanalda anten yayın yönünü sadece rastgele bir yön seçmek yerine, Algoritma 4'te verildiği gibi sanal komşu listesinden yararlanılarak seçilen komşu düğümün yönüne doğru yayın yapılır. Yayın yapılırken ağa yeni katılan bir düğümün tanınmasına imkan vermek için ise P = (1 / (komşu sayısı + 1)) olasılığında rastgele bir yön de seçilebilir. Benzer şekilde antenden dinleme yapılırken anten yönünü rastgele bir yön seçmek yerine sanal komşuluk listesinden yararlanır. Bu durum iki düğümün başarılı bir şekilde haberleşme olasılığını arttırır.

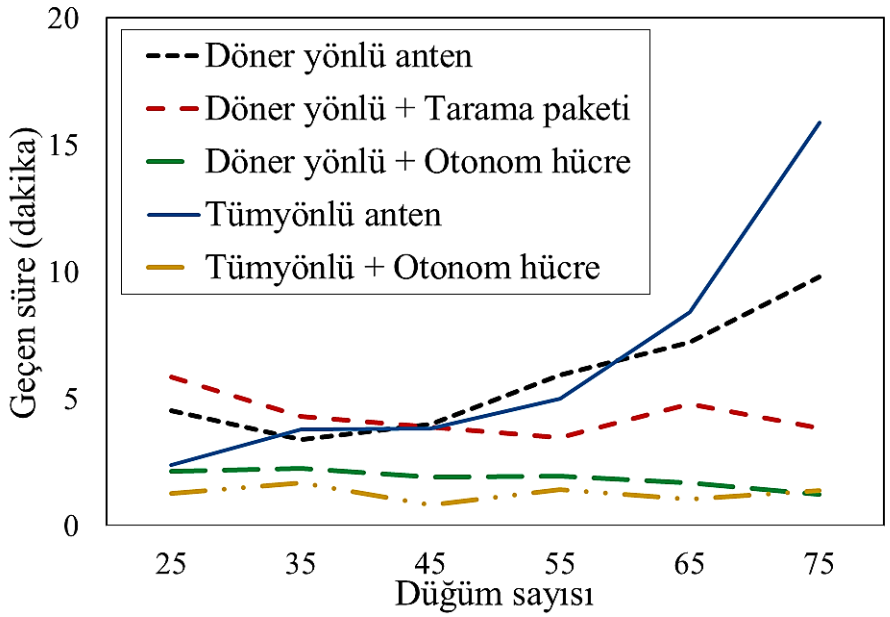
Algoritma zaman dilimli çerçevesinde paylaşımlı bir hücreye gelindiğinde anten yönünü belirlemek amacıyla çağrılır. Öncelikle komşu sayısına bağlı olarak rastgele bir sayı üretilir. Bu değere bağlı olarak anten rastgele bir yöne ya da komşu listesinde bulunan bir düğüm için belirlenen yöne doğru yönlendirilir. Komşuluk listesine direkt erişildiği için algoritma karmaşıklığı Θ (1) olmaktadır.

Algoritma 4 Paylaşımlı hücrede yön seçme algoritması

```
1: i ← random (list_size)      ▷ generate a number between 0 and number of neighbors
2: if i is 0 then                                      ▷ return a random direction
3:     return random (2π)
4: else                                                ▷ return direction of selected neighbor
5:     return list[i].dir
```

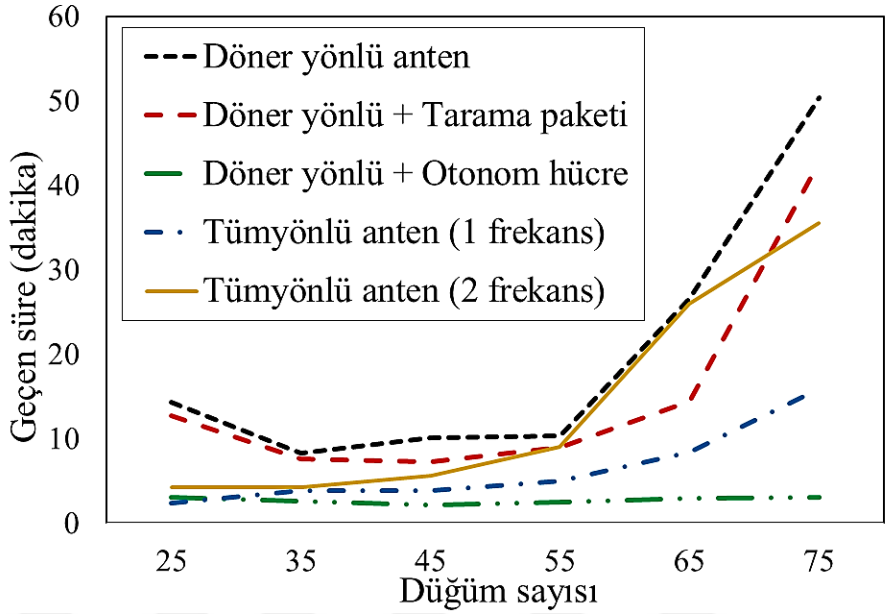
Şekil 28'de kullanılabilir frekans kanalı kaynağının 1 olması durumunda farklı ağ büyüklükleri ve farklı anten konfigürasyonlarına göre elde edilen senkronizasyon süreleri karşılaştırma grafiği verilmiştir. Tüm yönlü antene sahip düğümler ağ yoğunluğunun düşük olduğu senaryolarda daha iyi sonuç verirken, ağda bulunan düğüm sayısı arttıkça döner yönlü antene kıyasla daha kötü performans göstermiştir. Bunun nedeni olarak ağın

yoğunluğu arttıkça tüm yönlü antenlerin girişim ve çarpışmalara yönlü antenlere kıyasla daha fazla maruz kalması ve dolayısıyla yaşanan paket kayıplarının artması gösterilebilir. Döner yönlü antenler için ise ağda bulunan düğüm sayısı az olduğunda antenin kapsama alanına giren düğüm sayısı çok az olmaktadır ve bu durum yüksek senkronizasyon süresine neden olmaktadır. Bu nedenle, Döner yönlü antene sahip düğümler için senkronizasyon süresi ağ yoğunluğu arttıkça önce iyileşmiş, sonrasında ise çarpışma ve girişimlerin artması mesaj paketi alma olasılığını azaltmış ve senkronizasyon süresini kötü etkilemiştir.



Şekil 28. Düğüm sayısı ve anten konfigürasyonuna göre senkronizasyon süreleri

Şekil 29'da verilen karşılaştırma grafiğinde kullanılabilir frekans kaynağı sayısı 1 ve 2 olduğunda döner yönlü anten için paylaşımlı hücrede rastgele yöne gönderim ya da komşuluk listesinden seçilen bir düğümün yönüne gönderim yapılması durumunda elde edilen senkronizasyon süreleri verilmiştir. Düğümlerin kullanabildiği frekans kaynağı çeşitliliği arttırılınca ağın senkronize olma süresinin de beklendiği gibi uzadığı görülmektedir. Ayağa kalkan düğüm EB mesaj paketi almak için sırayla her bir frekans kanalını dinlemesi gerekir, dolayısıyla bu durum düğümlerin ağa senkronize olma süresini artırır. Tarama paketlerinin kullanılması durumunda düğümler daha erken birbirlerini keşfedebildikleri için ağ yoğunluğuna bağlı olarak değişmekle beraber yaklaşık 25% iyileşme elde edildiği görülmektedir. Otonom (özerk) hücrelerin kullanılması ise en iyi senkronizasyon süresini veren yöntem olmuştur.

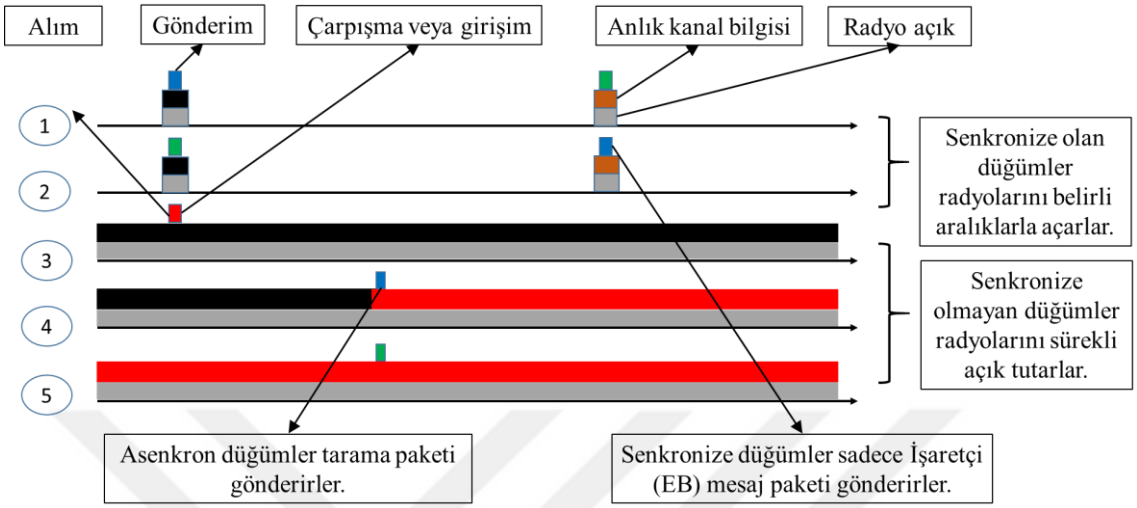


Şekil 29. Düğüm sayısı ve frekans kaynağına göre senkronizasyon süreleri

5.2. Sahte İşaretçi Paket Tanımlanması

Bu bölümde ağın senkronize olma süresini kısaltmak için Sahte İşaretçi (False Beacon) mesaj paketi tanımlanmıştır. Ağa senkronize olan düğümler EB paketi yaymaya başlarken, senkronize olmayan düğümler Sahte İşaretçi olarak tanımlanan paketi, EB paketi yerine aynı sıklıkla yayınlarlar. Senkronize olmayan düğümlerin herhangi bir çizelgelemeye uymadıklarından ve radyolarını sürekli açık tuttuklarından dolayı bu mesaj paketini alma olasılıkları EB paketi alma olasılığına göre çok daha yüksektir. Sahte işaretçi paketini alan düğüm, paket içerisinden gönderen düğümün MAC adresi bilgisini çıkartır ve anlık anteninin baktığı açı ve ölçülen RSSI değeri ile birlikte kendisine ait sanal komşu listesi oluşturur. Bir düğüm EB paketi alıp, başarılı bir şekilde ağa senkronize olduktan sonra Sahte İşaretçi paketini yayınlamayı durdurur ve sadece belirlenen aralıklarla EB paketi yaymaya başlar. EB paketlerini gönderirken ise anten yayın yönünü rastgele bir yön seçmek yerine, sanal komşu listesinden yararlanır. Komşuluk listesinden rastgele bir komşusunu seçip, seçtiği komşunun yönüne doğru yayın yapar, aynı durum dinleme yaparken de geçerlidir. Rastgele bir yönden dinleme yerine sanal komşuluk listesinden bir komşusunun yönünde dinleme yapar, bu durum iki düğümün haberleşme olasılığını arttırır. Senkronize olmayan düğümler, frekans atlama (channel hopping) zamanlarında ve Sahte İşaretçi mesajı

gönderecekleri zamanlarda yönlerini rastgele olarak değiştirirler. Geliştirilen mekanizma Şekil 30'da görsel olarak verilmiştir.



Şekil 30. Sahte işaretçi mesaj paketinin iletilmesi

5.3. Kontrol Paketlerinin Özerk Çizelgelenmiş Hücrelerden İletilmesi

Ağın kontrolünün sağlanması için düğümler paylaşımlı hücrelerde kontrol paketlerini tümegönderim (broadcast) olarak yayarlar. Bu paketler zaman dilim çerçevesinde ilk zaman diliminde alınır/gönderilir. Bu zaman diliminde tüm düğümler aynı frekans kanalını kullanırlar. Tüm yönlü antenler kullanıldığında, paylaşımlı hücrede tüm düğümler başarılı gönderme/alma yapabilirler. Ancak; döner yönlü antenler kullanıldığında paylaşımlı hücrede bir düğüm tüm komşularını kapsayacak şekilde bir yöne yayın yapması veya tüm komşuları tarafından dinleme yapması kapsama alanının dar olmasından dolayı mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bir tümegönderim mesaj paketi gönderileceğinde tüm komşulara iletim yapılabilmesi için antenin yönü değiştirilerek 1'den fazla kez yayın yapılması gerekir. Bu durum ise herhangi iki komşu düğümün aynı zamanlarda birbirlerine doğru bakmalarını, dolayısıyla aralarında bir işbirliğini gerektirir. Paylaşımlı hücrede ise düğümlerin böyle bir işbirliğine göre davranmaları tanımlı ve mümkün değildir. Tüm düğümlerin paylaşımlı hücrede aynı anda aynı frekansı kullanmalarının temel nedeni bu durumdur. Paylaşımlı kanalın kullanım senaryosu özel durumlar için değiştirilemeyeceğinden, tümegönderim mesajların gönderimi için bu çalışmada yeni bir mekanizma tanımlanmıştır.

Düğümler, belirli periyotlarla EB paketi, ağın durumuna göre farklı sıklıklarda RPL paketleri ve sensörlerden aldığı veriler doğrultusunda belli aralıklarla veri (DATA) mesajları üretirler. Bu mesajlar ilgili gönderim zaman dilimi gelene kadar gönderilmek üzere bir tampon bellekte tutulur. Döner anten kullanan düğümler, bu tampon belleğe bir tümegönderim mesaj paketi ekleyeceklerinde, bu mesajı komşu sayısı kadar çoğaltarak her bir komşusu için tutulan tampon belleklere ekler.

Yapılan çalışmada veri (DATA) paketleri SF0 çizelgeleme fonksiyonuna göre tahsis edilmiş hücrelerden gönderilmektedir. SF0 çizelgeleme fonksiyonu sadece ata (parent) ve çocuk (child) düğümler için kaynak ataması yapmaktadır. Tampon belleğe eklenen mesajlar, SF0 tarafından kaynak ataması yapılmış ise bu hücrelerden gönderilir. Ata ve çocuk olmayan diğer komşular için ise ayrı bir kaynak tahsisi yapılması gerekir. SF0 kaynak tahsisi yapılırken düğümler ile işbirliği yapabilmek için 6top protokolüne uygun olarak haberleşilir. Bahsedilen düğümler için yönetimi kolaylaştırmak ve SF0 maliyetini artırmamak için özerk bir çizelgeleme fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu çizelgeleme fonksiyonu Gönderim zaman dilimi seçilirken kullanılan formül (5)'te verilmiştir. Alım zaman dilimi seçme formülü (6)'da verilmiştir. Frekans kaynağı seçme ise (7)'ye göre yapılmaktadır. Aşağıda verilen formüllere göre düğümler, aralarında haberleşme ve işbirliğine ihtiyaç duymadan kaynak tahsisi yapmaktadır. Her bir düğüm kendisinin ve komşusunun tanımlayıcı bilgisini kullanarak gönderim zaman dilimi (transmit slot) ve alım zaman dilimi (receive slot) belirler ve MAC ID değerlerine bağlı olarak kullanılacak frekans kaynağı seçimini yapar.

$$t_{TX}(k) = mod\big((ID_k + 1) * 7 + (ID_o + 1) * 13\big), L_{oto}) \quad (5)$$

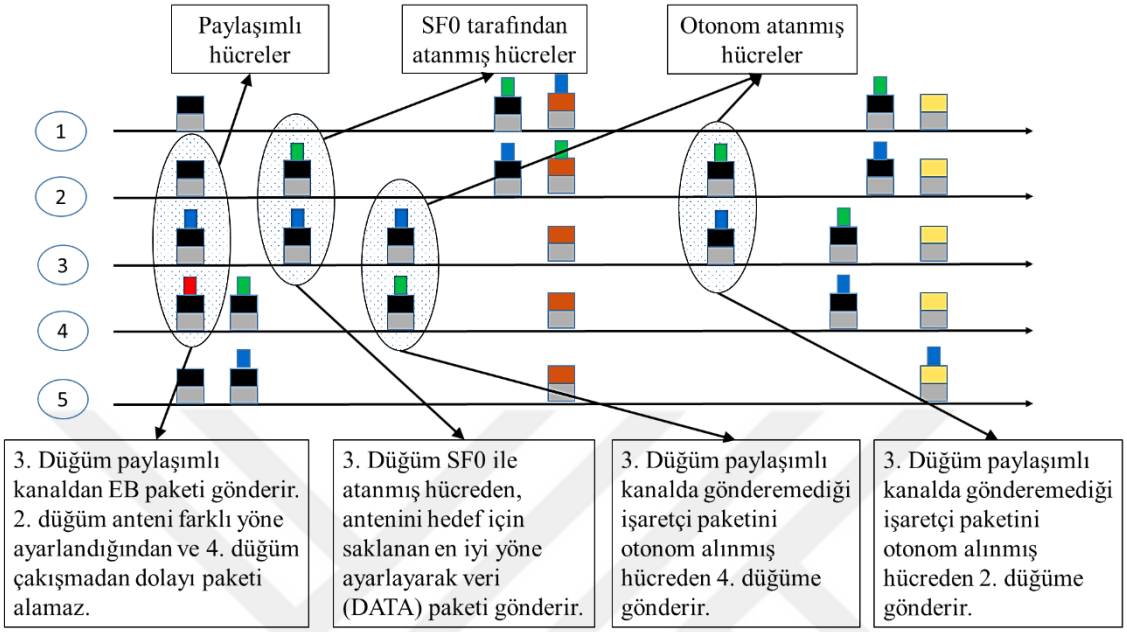
$$t_{RX}(k) = mod\big((ID_o + 1) * 7 + (ID_k + 1) * 13\big), L_{oto}) \quad (6)$$

$$f_{TX}(k) = f_{RX}(k) = mod((ID_o + ID_k), L_{fas}) \quad (7)$$

Formüllerde; ID_k = Komşu düğümün tanımlayıcı bilgisini ifade eder, MAC adresinden elde edilir. ID_o = Düğümün kendi tanımlayıcı bilgisini ifade eder, MAC adresinden elde edilir. L_{oto} = Otonom (özerk) zaman dilimi çerçevesinin uzunluğunu gösterir, testlerde değeri 251 olarak alınmıştır. L_{fas} = Frekans atlama sırası (frequency hopping sequence) boyunu ifade eder, senaryoya bağlı olarak 1-16 arası değerler alabilir.

Düğümler her bir komşu düğümü için tampon belleklerine eklediği tümegönderim mesajları; eğer SF0 tarafından kaynak tahsis edilmişse bu hücrelerden, eğer SF0 tarafından

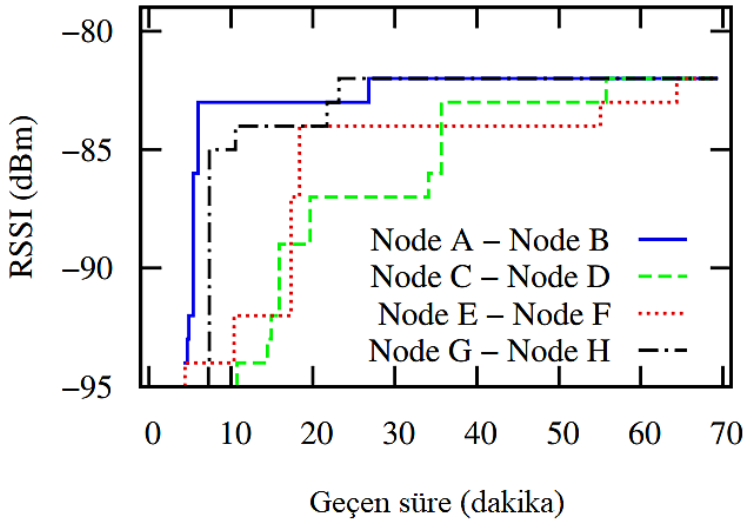
kaynak tahsis edilmemişse özerk çizelgeleme fonksiyonuyla tahsis edilmiş hücrelerden gönderir. Önerilen mekanizma Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31. Tüme gönderim paketlerin özerk çizelgelenerek tek yere olarak gönderilmesi

5.4. Düğümler Arası En İyi Yayın Gücü Değerinin Değişimi

Düğümler arası RSSI değeri değişimleri, düğüm çiftinin arasındaki mesafe ve aralarındaki görece açıya göre değişmektedir. Senaryoda bulunan düğümler statik olduğundan dolayı yer değiştirmemektedir, dolayısıyla RSSI değeri değişimi antenlerin birbirlerine olan görece açılarına göre değişmektedir. Düğümler ayağa kalktıktan sonra komşularını ilk kez paylaşımlı hücreden aldıkları paket sayesinde keşfederler, ve paylaşımlı hücrede antenler rastgele yönlere ayarlandığı için tespit edilen ilk RSSI değeri her bir düğüm çifti için farklı olmaktadır. Antenin algılama eğişi -95 dbm olduğu için, elde edilen değerler bu değerden yüksek olur. Düğümler arasında 40 metre mesafe bulunmasından dolayı ve antenlerin birbirlerini direkt görmesi durumunda geliştirilen döner yönlü anten modeline göre en yüksek -82 dbm RSSI değeri elde edilebilmektedir. Seçilen 4 adet düğüm çifti için RSSI değişimlerini gösteren grafik aşağıda bulunan Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 32. Düğüm çiftlerinin zamanla yayın gücü değişimleri

Şekil 32'de yer alan grafiğe göre farklı düğüm çiftleri için RSSI değişiminin farklı olduğu görülmektedir. Zamanla ağda paket alınıp/gönderildikçe daha iyi yayın gücü değerleri elde edilmiştir.

5.5. Kaynak Kullanım Analizi

Şekil 7'de görüldüğü gibi, düğümler yönlendirilebilir antenlerle donatıldığında aynı senaryo için tüm yönlü antene kıyasla ağ daha az atlama ile oluşturulabilir. Daha az atlamalı olarak RPL kök düğümü ile bağlantı kurulması, bant genişliği kaynaklarının daha etkin kullanılmasına yol açar, ve bu durum iletişim için daha az hücreye ihtiyaç duyulması anlamına gelir.

Her bir düğümün periyodik olarak aynı sıklıkta veri paketleri ürettiği ve bu paketleri RPL kök düğümüne ilettiği bir senaryo ele alındığında, her düğümün (8)'de verilen denklem doğrultusunda bu aktarımlar için bir dizi Tx hücresi tahsis etmesi gerekir.

$$C = \lceil D_t \, L_s / \, I_t \rceil \tag{8}$$

Formülde; D_t zaman dilimi süresini gösterir (10 ms, 15 ms gibi değerler alır), L_s veri paketlerinin iletimi için kullanılan çerçevenin uzunluğudur, I_t veri üretme aralığıdır. C, oluşturulan veri trafiğini karşılayabilmek amacıyla her bir düğüm için gerekli hücre sayısını

gösteren maliyeti gösterir. Herhangi bir atlama seviyesindeki tüm düğümlerin ihtiyaç duyduğu toplam Tx hücresi sayısı (9)'da verilmiştir.

$$C_{h(x)} = N_{h(x)}C$$
$$C_{h(x-1)} = C_{h(x)} + N_{h(x-1)}C \quad (9)$$

Formülde; $C_{h(x)}$, x atlama seviyesindeki düğümler için gerekli Tx hücrelerinin toplam sayısıdır, $N_{h(x)}$, x atlama seviyesindeki düğümlerin sayısıdır. Bu nedenle, tüm ağ için tahsis edilen Tx hücrelerinin toplam sayısı (10)'da verildiği gibi bulunabilir.

$$C_s = \sum_{i=1}^{x} C_{h(i)} \quad (10)$$

Ağda yaprak düğümler hariç diğer düğümler röle görevi gördüğünden, Tx ve Rx hücrelerinin toplam sayısı orantılı olmalıdır. Standart paylaşılan hücrelere ek olarak, senkronizasyon sürecini hızlandırmak için tümegönderim mesajların gönderilmesi amacıyla kullanılan ve özerk olarak tahsis edilmiş hücrelerden yararlanır. Düğüm başına özerk olarak tahsis edilen ekstra hücre sayısı (11)'de verilmiştir.

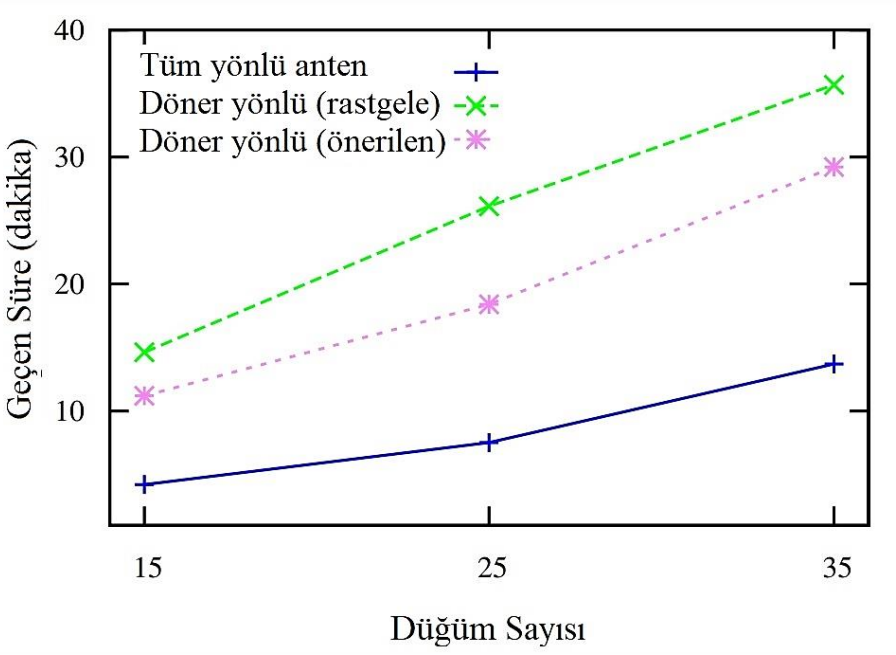
$$C_a = \frac{2N_n\, L_s}{L_a} \quad (11)$$

Formülde; N_n, 1-atlamalı komşuların sayısıdır, L_s, veri trafiği için kullanılan zaman dilimi çerçevesi uzunluğudur ve L_a, özerk çizelgelenen hücrelerin bulunduğu çerçevenin uzunluğudur. Standart 6TiSCH çizelgeleyici tarafından tahsis edilen hücrelere göre ekstra hücrelerin getirdiği maliyet (12) kullanılarak hesaplanabilir. Yönlendirilebilir anten çözümü için gereken hücre sayısı, C_s ve C_a'nın toplamı olarak hesaplanırken. tüm yönlü anten çözümü C_a hücrelerini kullanmaz.

$$C_t = \begin{cases} C_s & tümyöne\ anten \\ C_s + C_a & döner\ yönlü\ anten \end{cases} \quad (12)$$

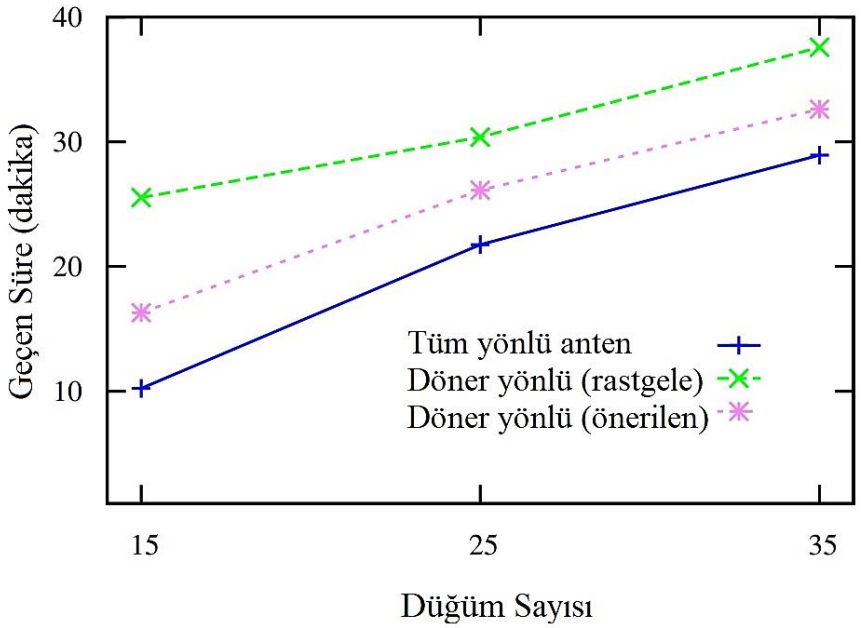
5.6. Test Sonuçları

6TiSCH protokol yığıt çözümü düğümlerin senkronize olmasını gerektirir. Düğümlerin ağa senkronize olmaları için komşularından en az bir tanesinden EB paketi alması gerekmektedir. EB paketleri ise sadece ağa katılmış yani senkronize olmuş düğümler tarafından yayınlanır. Dolayısıyla, ağ büyüklüğü arttıkça ağın senkronize olma süresi artar. Ayrıca, döner yönlü anten kullanıldığında antenin kapsama alanının darlığı nedeniyle EB paketlerinin alınma olasılığı azalır, bu nedenle ağa katılım süresi de senkronizasyon süresine paralel olarak artar. Testler sırasında 15, 25 ve 35 düğümden oluşan senaryolar oluşturulmuştur. Tüm düğümler senaryoya ağın dışında kalmayacak şekilde rastgele yerleştirilmiştir. Kullanılabilir frekans kanal sayısı 1 olarak alınmıştır. Test sonuçları dikkate alınarak senaryoda bulunan düğüm sayısının yeterli olduğu görülmüştür. Testler simülasyon aracında bulunan rastgele tohum (random seed) değeri değiştirilerek 10 kere koşulmuş ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 33'te görüldüğü üzere ağa katılım süresi ağın büyüklüğü ve döner yönlü anten kullanılmasına göre artmıştır. Ancak; önerilen yöntem tüm yönlü antene kıyasla kötü bir performans sergilemesine karşılık, temel alınan rastgele yönlere mesaj gönderilmesi mekanizmasına kıyasla 40% kadar bir iyileştirme sağlamıştır.



Şekil 33. Senkronizasyon süreleri karşılaştırma grafiği

Düğümler ağa senkronize olduktan sonra RPL mesaj paketleri aracılığıyla komşularını tanır, ata ve çocuklarını seçerler. Bir düğüm ürettiği verinin kök düğüme iletilmesi için hangi düğüme gönderim yapacağına karar verir ve her bir düğüm veri trafiği ihtiyacına göre SF0 çizelgeleme fonksiyonu aracılığıyla 6top protokolünü kullanarak gerekli kaynakların tahsis edilmesini sağlar. Ağın ayağa kalktıktan sonra ağdaki tüm düğümlerin tanınması ve kaynaklarının tahsis edilmesine kadar geçen süreye ağın oluşma süresi denir. Bu süre senkronizasyon süresine benzer şekilde ağ büyüklüğü ve döner yönlü anten kullanılmasına göre artması beklenir. Şekil 34'te verildiği gibi önerilen yöntem temel alınan rastgele gönderim yöntemine göre 25% kadar bir iyileşme sağlamıştır.

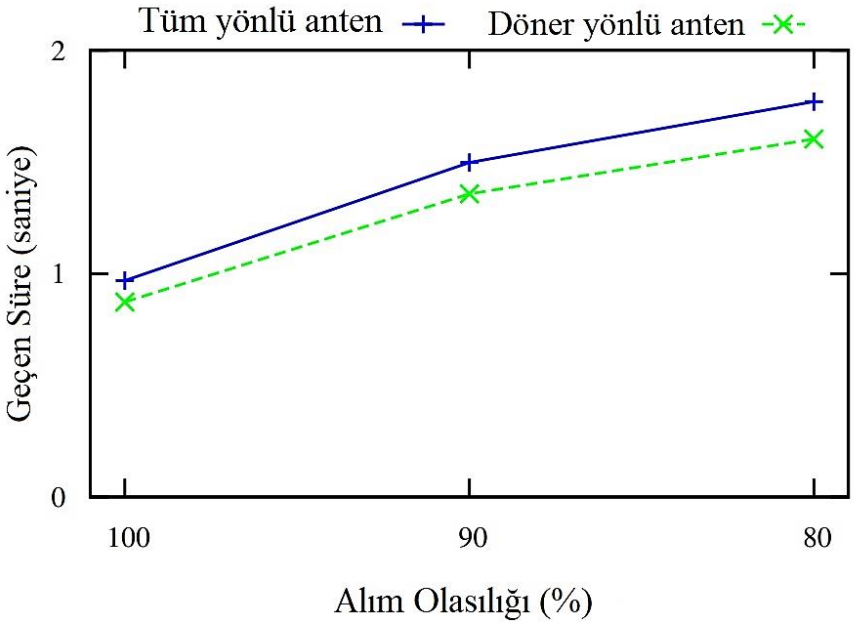


Şekil 34. Ağın oluşma (formation) süreleri karşılaştırma grafiği

Paket iletim oranı, uçtan uca gecikme ve enerji tüketimi testleri için 81 (9x9) düğümden oluşan bir senaryo oluşturulmuştur. RPL kök düğümü görevi gören toplayıcı düğüm ağın ortasında olacak şekilde tüm düğümler birbirine eşit mesefede (40 m) yerleştirilmiştir. Kullanılabilir frekans kanal sayısı aksi belirtilmediği sürece 1 olarak alınmıştır. Test sonuç grafikleri incelendiğinde 81 düğümden oluşan senaryo performans metriklerini ölçmek için yeterli görülmüştür. Düğümler eşit mesafede ızgara yapısında yerleştirildiği için ağın büyümesi düğümlerin komşu sayılarını arttırmamaktadır. Testler

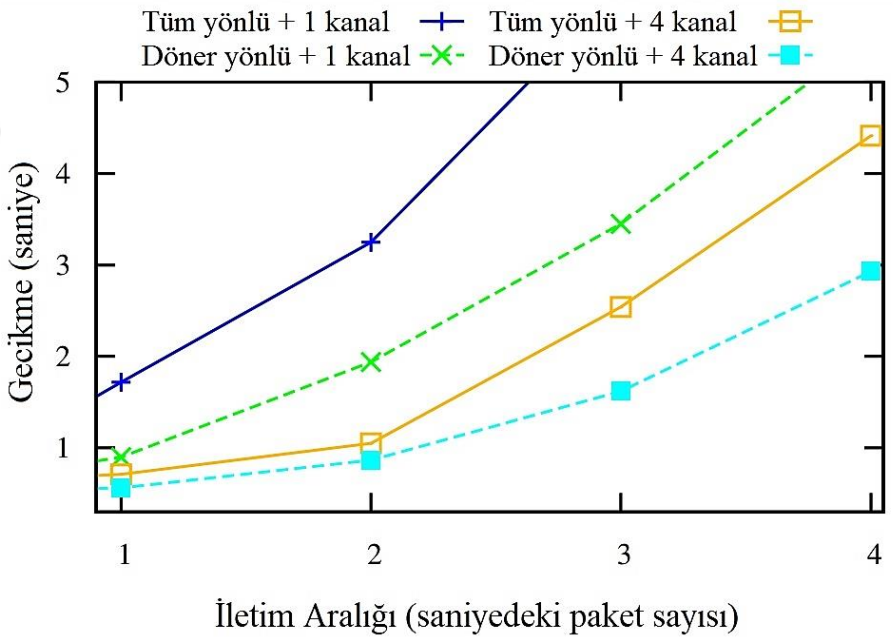
simülasyon aracında bulunan rastgele tohum (random seed) değeri değiştirilerek 10 kere koşulmuş ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

Ağın performansını belirleyen ölçümlerden bir tanesi de ağ içerisinde yaşanan uçtan uca gecikme süresidir. Gecikme süresi, veri paketinin kaynak düğümden gönderilmesi ile kök düğüme ulaşana kadar geçen süre olarak tanımlanır. Şekil 35'te başarılı alım olasılığına bağlı olarak veri paketlerin ortalama gecikme süresi verilmiştir. Cooja simülatör yazılımı içerisinde başarılı alım olasılığı değeri tanımlanmıştır. Simülatör yazılımı bir düğümün mesaj paketi alıp almayacağına ortam koşullarını (etraftaki sinyaller, düğümlerin uzaklığı, frekansı ve antenlerin yönleri) dikkate alarak karar verir. Başarılı alım olasılığı 100% olarak ayarlandığında koşullara uygun tüm paketler ilgili düğüm tarafından alınır. Bu değer 90% olarak ayarlandığında ise ortam koşullarına uygun paketlerden sadece 90%'ı hedef düğüm tarafından alınabilir. Dolayısıyla, bahsedilen olasılık değeri düştükçe düğümler aynı paketleri tekrar göndermek durumunda kalırlar, bu durum ise gecikmenin artmasına neden olur. Yaprak düğümlerin ürettiği mesaj paketleri ise ağın merkezinde yer alan düğümlerin ürettiği mesaj paketlerine göre daha uzun mesafe katederler, örneğin 25 düğümden oluşan bir senaryoda, yaprak düğümlerin mesaj paketleri 3 düğüm üzerinden geçerek gelirler, kök düğümün komşularının mesaj paketlerine kıyasla 4 kat daha fazla maliyet oluştururlar. Şekil 35'te görüldüğü üzere Döner yönlü anten, tüm yönlü antene kıyasla az bir iyileştirme sağlamaktadır. Ancak; bu grafiği yorumlarken Döner yönlü antenin başarılı paket alım oranının yüksek olması da göz önünde bulundurulmalıdır.



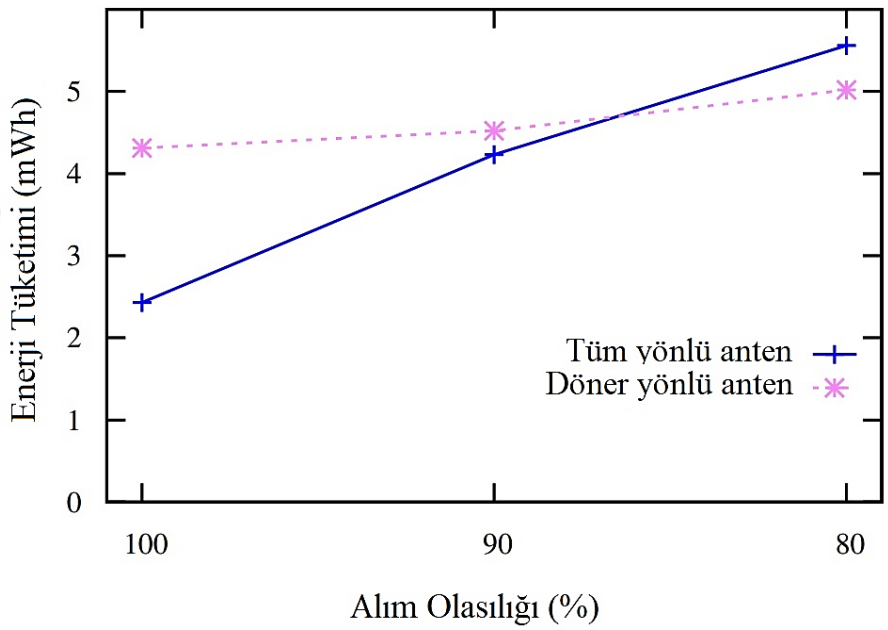
Şekil 35. Başarılı alım olasılığına bağlı olarak ağ gecikme süresinin değişimi

Şekil 36'da ise her iki anten konfigürasyonu için veri trafiği ve kullanılabilir frekans sayısına bağlı olarak elde edilen gecikme süreleri verilmiştir. Veri gönderim aralığı arttıkça paketlerin tampon bellekte bekleme süreleri artmakta, bu durum da yaşanan gecikmenin artmasına neden olmaktadır. 4 frekans kanalının kullanılması durumunda ise ağda yaşanan girişim ve çarpışmaların azalması gecikme süresinin azalmasına neden olmaktadır. Döner yönlü anten, tüm yönlü antene kıyasla daha az hop atlamalı bir ağ oluşturduğu için daha iyi performans göstermiştir. Tüm yönlü anten 1 adet frekans kanalı ile kullanıldığında iletim aralığından diğer konfigürasyonlara göre daha fazla etkilenmektedir. Bu durum kullanabildiği kaynakların kısıtlı olmasından kaynaklanmaktadır. Gecikme sürelerinin iletim aralığına paralel olarak artmamasının nedeni ise paket iletim oranının da düşmesinden kaynaklanmaktadır. Gecikme süresi başarılı bir şekilde iletilen paketlere göre hesaplanmaktadır. Dolayısıyla toplayıcı düğüme ulaşamayan paketler gecikme süresinin hesaplanmasına katılmazlar.



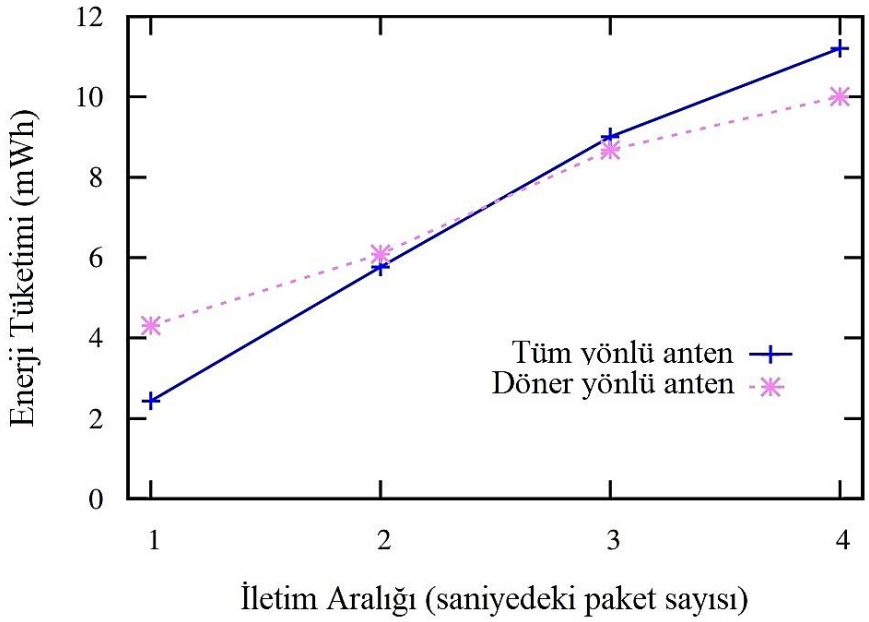
Şekil 36. Veri trafiği ve Frekans sayısına bağlı olarak gecikme süresi

Ağ çözümleri incelenirken değerlendirilen performans ölçütlerinden önemli bir tanesi ise düğümlerin ortalama enerji tüketimleridir. Şekil 37'de başarılı alım olasılığına bağlı olarak düğümlerin enerji tüketimleri verilmiştir. Döner anten için önerilen çözümde, tümegönderim yayınlanan mesajların kopyalanarak tek yöne (unicast) olarak gönderilmesi, düğümler için bir aşırı yük (overhead) oluşturmaktadır. Bu aşırı yük nedeni ile başarılı alım olasılığı 100% iken döner yönlü anten, tüm yönlü antene kıyasla daha fazla enerji tüketilmesine neden olmaktadır. Başarılı alım olasılığı azaldıkça yani radyo ortamı kalitesi azaldıkça döner yönlü anten enerji tüketimi açısından daha iyi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Özerk çizelgelemenin getirdiği dezavantaj komşu sayısıyla orantılıdır. Düğümlerin ortalama komşu sayısı artmadan, veri trafiği arttırılarak ya da senaryoda bulunan düğüm sayısı arttırılarak kaynak kullanımı arttırıldığında, özerk çizelgelemenin getirdiği ek maliyet oransal olarak azalmaktadır.



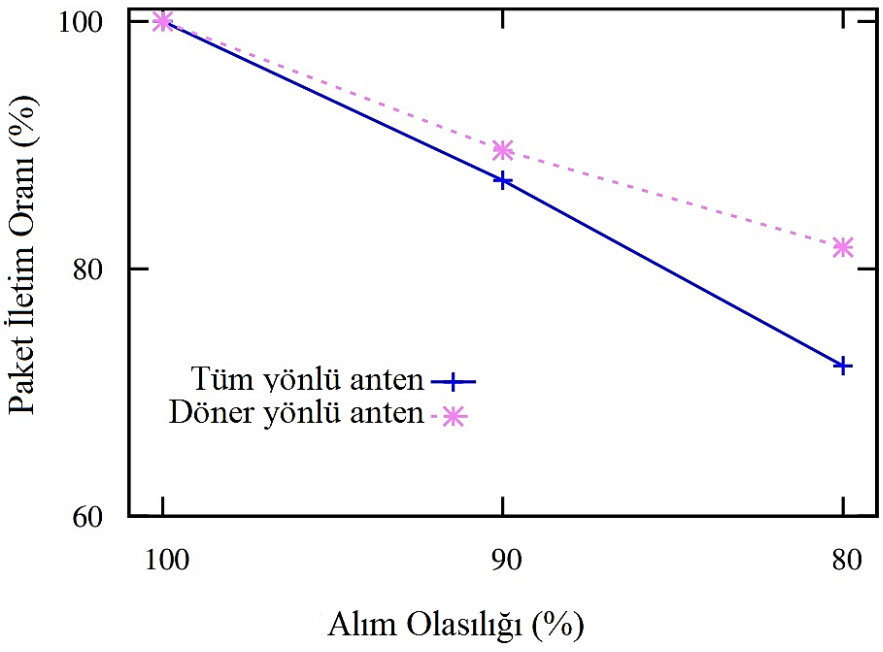
Şekil 37. Başarılı alım olasılığına bağlı olarak düğümlerin ortalama enerji tüketimi

Veri trafiğine bağlı olarak düğümlerin ortalama enerji tüketimi ise Şekil 38'de verilmiştir. Başarılı alım oranı grafiğine benzer şekilde veri trafiği az olduğunda tüm yönlü anten enerji tüketimi açısından daha iyi bir çözüm iken, veri trafiği arttıkça döner yönlü anten çözümü daha iyi performans göstermiştir. Döner yönlü anten, tüm yönlü antene kıyasla daha uzağa iletim yapılabilmesine olanak sağlar, bu durum ise yaprak düğümlerin paketlerinin daha az maliyetle daha az düğüm üzerinden geçerek kök düğüme ulaşmasını sağlar. Dolayısıyla daha uzağa gönderim yapabilmek, ağ içerisinde tahsis edilen kaynakların daha verimli kullanılmasına neden olmuştur. Enerji tüketimi grafiği değerlendirilirken, döner yönlü antenin paket iletim oranının daha yüksek olması da göz önünde bulundurulmalıdır.



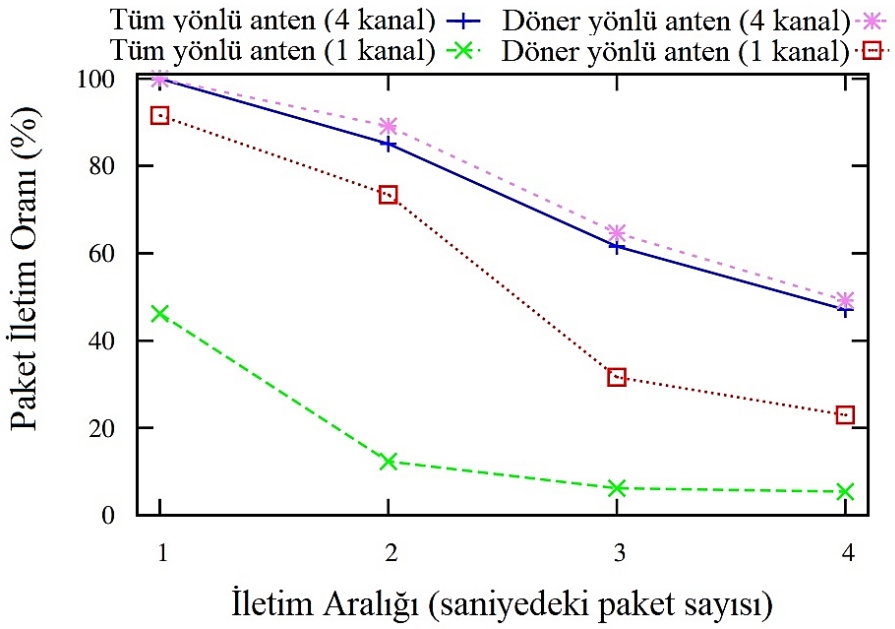
Şekil 38. Veri trafiğine bağlı olarak düğümlerin ortalama enerji tüketimi

Şekil 39'da Başarılı alım olasılığına bağlı olarak ağda bulunan düğümlerin ortalama paket iletim oranları verilmiştir. Başarılı alım olasılığı düştükçe tekrar gönderilen paketlerin sayısı artar, yeterli kaynak bulunamadığı durumlarda tampon belleklerin dolması nedeniyle paketler düşer. Simülatör paketlerin hedef düğüme ulaşıp ulaşamamasına başarılı alım olasılığına ek olarak düğümler arası mesafeyi de dikkate almaktadır. Birbirine yakın yerleştirilen düğümler başarılı alım olasılığından uzak yerleştirilen düğümlere göre daha az etkilenmektedir. Kullanılan senaryoda düğümler 40 metre mesafe ile yerleştirildiklerinden dolayı tüm yönlü antene sahip düğümler başarılı alım olasılığı parametresinden 0.8 (40/50, 50 metre simülatörde tanımlanan maksimum iletim mesafesidir) oranında etkilenmektedirler. Döner yönlü anten iletim mesafesi antenlerin yönlerine bağlı olarak 80 metreye kadar çıkabilmektedir, dolayısıyla döner yönlü antenlere sahip düğümler bu parametreden tüm yönlü antene sahip düğümler kadar etkilenmemektedir. Paketlerin alım olasılığına bağlı olarak hedef düğüme ulaşamadan kaybolması ağın paket iletim oranını düşürür. Ayrıca, Döner yönlü antenler kullanıldığında paketler daha az düğüm üzerinden geçerek hedefe ulaşma imkanı olduğundan kötü ortam şartlarına tüm yönlü antene kıyasla daha iyi bir şekilde adapte olabilmekte ve ortam şartları kötüleştikçe tüm yönlü antene kıyasla daha iyi sonuç üretmektedir. 5% ile 10% arasında elde edilen paket iletim oranındaki iyileşme aynı zamanda daha az enerji tüketilerek elde edilmiştir.



Şekil 39. Başarılı alım olasılığına bağlı olarak düğümlerin paket iletim oranları

Şekil 40'ta düğümlerin sahip olduğu anten tipi, farklı frekans kanalı sayısı ve veri gönderim sıklığına bağlı olarak ağ içi paket iletim oranları verilmiştir. Frekans kanal sayısı 1 olduğunda, yani frekans kaynağı kısıtlı olduğunda, döner yönlü antenin getirdiği uzamsal ayrım sonuçları pozitif yönde etkilemektedir. 4 farklı frekans kaynağına sahip olunduğunda ise döner yönlü anten ile tüm yönlü anten arasında çok fazla bir fark olmamasına karşın, frekans kaynağı kısıtlandığında performans iyileşmesi artmaktadır. 4 frekans kaynağı kullanıldığında tüm yönlü anten ve döner yönlü anten performans açısından birbirine yakın sonuç üretmektedir. Bu durum frekans kaynağı sayısının yeterli kaynak çeşitliliğini sağlamasından dolayıdır. Kanal sayısının arttıkça döner yönlü antenin getirdiği avantaj azaldığı için testlerde maksimum 4 frekans kaynağı sayısı yeterli görülmüştür.



Şekil 40. Veri trafiğine bağlı olarak düğümlerin paket iletim oranları

Anahtarlanabilir anten ve Döner yönlü anten performanslarının karşılaştırılması için 25, 49 ve 81 düğümden oluşan ağlarda testler koşulmuştur. Bu testlerde düğümler yatayda x ve y eksenlerinde 40 metre mesafeyle yerleştirilmiş, kullanılabilir frekans kanalı sayısı 4 olarak ve başarılı alım oranı 100% olarak ayarlanmıştır. Her bir düğümün saniyede 1 paket oluşturduğu varsayılmıştır. Diğer parametreler ise Tablo 2'de verildiği şekilde kullanılmıştır. Koşulan testlerin performans sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Anahtarlanabilir anten ve Döner yönlü anten karşılaştırması

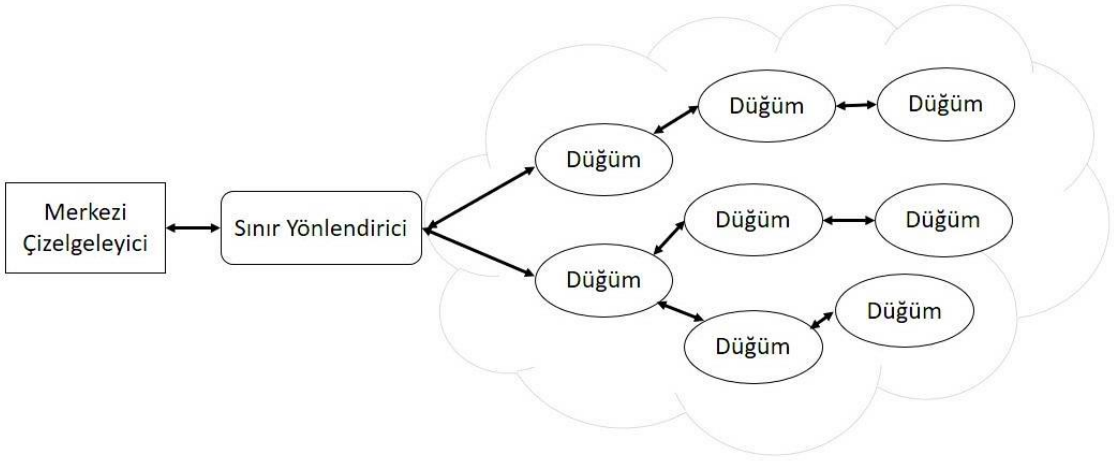
Düğüm Sayısı		25	49	81
Tüm yönlü anten	Paket iletim oranı (%)	94.87	83.55	57.12
	Gecikme (ms)	1267	1560	2433
	Enerji tüketimi (mWh)	3.21	3.65	4.23
2 adet Anahtarlanabilir anten	Paket iletim oranı (%)	97.94	87.61	58.73
	Gecikme (ms)	595	1174	1665
	Enerji tüketimi (mWh)	1.55	1.82	2.01
3 adet Anahtarlanabilir anten	Paket iletim oranı (%)	100	88.77	61.34
	Gecikme (ms)	536	1094	1613
	Enerji tüketimi (mWh)	1.26	1.49	1.78
Döner yönlü anten	Paket iletim oranı (%)	100	98.44	82.64
	Gecikme (ms)	544	1031	1278
	Enerji tüketimi (mWh)	2.98	3.21	3.87

Enerji tüketimi bakımından Anahtarlanabilir anten Döner yönlü anten modeline kıyasla çok daha az enerji tüketmektedir, bunun nedeni Döner yönlü anten modelinin, Tüm yönlü anten ile aynı miktarda güç harcadığı ve daha uzak mesafelere iletim yapabildiği varsayımından kaynaklanmaktadır. Anahtarlanabilir anten modelinin enerji tüketimi ise huzme genişliği ile ters orantılı olacak şekilde modellenmiştir, dolayısıyla tüm antenler aktif edilmediğinde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Paket iletim oranlarında Döner yönlü anten Anahtarlanabilir anten'e göre daha iyi sonuç vermiştir. Bunun nedeni ise Döner yönlü anten modelininn tüm yönlü anten kadar enerji tüketerek daha uzak mesafelere gönderim yapmasından dolayısıyla veri paketlerinin daha az düğüm üzerinden geçerek toplayıcı düğüme ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Uçtan uca gecikme sürelerinde ise paket iletim oranına kıyasla daha az bir iyileşme gözlenmiştir. Bu durum ise kullanılan dağıtık çizelgeleme algoritmasının hücreleri rastgele tahsis etmesi ve Döner yönlü anten kullanımının gerektirdiği ek hücre tahsisleri ile açıklanabilir.

6. DÖNER YÖNLÜ ANTEN İLE MERKEZİ ÇİZELGELEME

Merkezi çizelgelemede, düğümler belirli zaman aralıklarında ağ yapısı hakkında elde ettikleri ata düğüm (parent) ve komşu düğüm bilgilerini, tespit ettikleri yön bilgisi ile beraber merkezi çizelgeleyiciye gönderir. Düğümlerin komşularını ve birbirlerine olan açılarını daha hızlı bulabilmeleri için Sahte işaretçi paketlerinden yararlanılmıştır. Düğümlerin komşularını tanımaları ve uygun bir ata (parent) düğüm seçmeleri için RPL protokolü kullanılmıştır. Düğümler merkezi çizelgeleyiciden kendilerine ait olan kaynak ataması bilgileri gelene kadar, özerk çizelgeleme algoritmasına göre kaynak tahsisi yaparlar, ve kendi aralarında haberleşebilmek için bu kaynakları kullanırlar.

Şekil 41'de görüldüğü üzere merkezi çizelgeleyici (centralized scheduler) ağın dışında yer almaktadır ve sadece sınır yönlendiricisine (border router) bağlıdır. Sınır yönlendiricisi ağda bulunan düğümler ile kablosuz olarak radyoları üzerinden haberleşebilmekte ve aldığı paketleri çizelgeleyiciye yönlendirmektedir.



Şekil 41. Ağın yapısı ve ağ elemanlarının yerleşimi

6.1. TASA Algoritmasının Uyarlanması

TASA çizelgeleme algoritması Algoritma 5'te sunulmuştur. Algoritmanın çizelge üretebilmesi için öncelikle ağ yapısını (topoloji) bilmesi gerekir. Tüm düğümlerden ata düğüm ve komşu düğümlerinin listesini aldıktan sonra; (1) Düğümlerin komşu listelerine

bakılarak bağlılık matrisi (connectivity matrix) oluşturulur. (2) Bağlılık matrisine tüm düğümlerin 2-hop komşuları eklenerek girişim matrisi (interference matrix) oluşturulur. (3) Girişim matrisinde bulunan düğümlerin 1-hop komşuları eklenerek çakışma matrisi (conflict matrix) oluşturulur. (4) Düğümlerin komşu listesi ile beraber gönderdikleri yön bilgileri dikkate alınarak boyama aşamasında kullanılmak üzere yön matrisi (direction matrix) oluşturulur. (5) Düğümlerin kendi trafik miktarına, çocuk düğümlerin trafik miktarları eklenerek trafik matrisi (q matrix) oluşturulur.

Algoritma 5 Tasa algoritması [91]

Input: G ▷ G: Graph
Input: P ▷ P: PHY Connectivity Graph
Input: q ▷ q: $q_i(k)$ vector
Input: Q ▷ Q: Qi(k) vector
Input: n_{ch} ▷nch: number of available channels
1: **procedure** SCHEDULING (G, P, q, Q, n_{ch})
2: k ← 0 ▷ slot initial value
3: pattern ← [] ▷ time/frequency pattern initial value
4: **while** q_0 (k) ≠ Q do ▷ The procedure is run until a pattern that allows to delivery to the PAN Coordinator all the packets generated in one slotframe, is built
5: DCFL(k) ← MATCHING (G, q, Q, n_0, k)
▷ Building the Interference Conflict graph for DCFL(k)
6: I(k) ← FINDINTERFGRAPH (DCFL(k), P)
7: colored ← COLORING(I(k), Q)
8: selected ← []
9: **for** n ← 1 to n_{ch} **do**
10: selected ← GETFIRST(colored)
11: **end for**
▷ Updating q, Q according to links scheduled at k
12: UPDATE(q, Q, selected)
13: pattern ← pattern + [(k, selected)]
14: k ← k +1
15: **end while**

16: **return** pattern ▷ returning time/frequency pattern
17: **end procedure**

Çizelgeleme algoritması her bir düğümün trafik miktarı (q değeri) 0 oluncaya kadar yani tampon bellekleri boşalana kadar çalışır. Bir düğüm çizelgelemenin herhangi bir adımında TX hücresi aldıysa trafik miktarı 1 azaltılır, eğer RX hücresi aldıysa trafik miktarı 1 artırılır. Çizelgelemenin her bir iterasyonunda iki temel prosedür; uyumlama (matching) ve boyama (coloring) uygulanır.

Uyumlama aşamasında düğümler trafik ihtiyacı fazla olandan az olana doğru sıralanarak bir listeye atılır. Aşamanın her bir adımında listenin başında bulunan düğüm alınarak iletim yapabilecek düğümler listesine eklenir. Daha sonra bağlantı matrisine bakılarak iletim yapabilecek düğümlerin çakışma yaratacağı düğümler listeden çıkarılır. Listedeki tüm düğümler kontrol edildikten sonra aynı zaman diliminde gönderim yapabilecek düğümler tespit edilmiş olur. Dolayısıyla yeni oluşturulan listede en fazla ağda bulunan düğüm sayısının yarısı kadar düğüm bulunabilir.

Boyama aşamasında ise uyumlama aşamasında oluşturulan listede bulunan düğümlere sırasıyla sıfırdan başlayarak her bir frekans kaynağı için diğer düğümlerle girişim yaratıp yaratmadığına bakılır. Yeterli frekans kaynağı olmaması durumunda uyumlama aşamasında bulunan bazı bağlantılar listeden çıkarılır. Listede kalan düğümler çizelgelenerek algoritmada bir sonraki adıma geçilir.

Düğümlerin trafik ihtiyacı m, ağda bulunan düğüm sayısı n, kullanılabilir frekans sayısı t olsun. Algoritmanın her bir adımında en az bir düğüm iletim modunda çizelgeleneceği için uyumlama aşamasında kontrol edilen düğüm sayısı azalacaktır. Dolayısıyla uyumlama fonksiyonunun algoritma karmaşıklığı her bir adımda Θ (n) olacaktır. Çakışma yaratan düğümlerin bulunması bağlantı matrisiyle karşılaştırma gerektirdiğinden algoritma karmaşıklığı Θ (n*n) olur. Boyama aşamasında iletim yapacak düğümler listesindeki tüm düğümlere frekans listesinden sırayla frekans atanarak karşılaştırılacağı için algoritma karmaşıklığı her bir adımda Θ (n*t) olacaktır. Toplam algoritma karmaşıklığı ise Θ (m*n + m*n*n + m*n*t) olur. Frekans kaynağı sayısı düğüm sayısından az olduğu varsayılırsa algoritma karmaşıklığı Θ (m*n*n) olarak sadeleştirilebilir.

TASA algoritmasının anten yönünü dikkate alarak (Direction aware) çizelge oluşturması için; boyama aşamasında frekans çakışmasına bakılırken düğümlerin birbirlerine olan yönleri ve antenin ayarlandığı yön bilgisi de dikkate alınır. Dolayısıyla,

uyumlandırılmış TASA algoritması orijinal algoritmaya kıyasla sınırlı frekans kaynağı olması durumunda daha fazla bağlantı çizelgeleyebilir, daha az zaman dilimi (timeslot) kullanarak çizelge oluşturabilir. Uyarlanmış TASA algoritması Algoritma 6'da sunulmuştur.

Algoritma 6 Uyarlanmış TASA algoritması (DATASA)

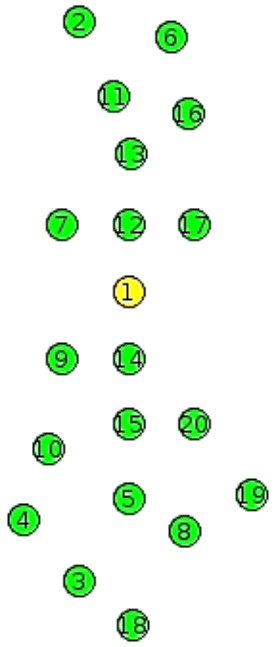
Input: T ▷ network topology
Input: C ▷ connectivity matrix
Input: I ▷ interference matrix
Input: D ▷ direction matrix
Input: q ▷ keeps traffic load for each node
Input: n_{ch} ▷ number of available frequency channels
Output: S ▷ built schedule

```
1: procedure SCHEDULE (T, C, q, n)
2:     i ← 0                                   ▷ keeps the current slot id
3:     S ← []                                  ▷ schedule is initially empty
4:     SCHEDULE_AUTONOMOUS_SLOTS (S, C)
5:     while ∀q≠0 do                           ▷ until all packets are sent
           ▷ get conflict free links as sorted according to nodes' traffic load
6:         cfl ← MATCHING(S,T,C,I,q)
           ▷ get interference free links as assigned to different colors
7:         ifl ← COLORING(T,C,D,cfl)
8:         temp ← []                           ▷ temporary schedule at current slot
9:         for n ← 1 to n_ch do
10:            temp ← SELECT_UNSCHEDULED(ifl)
11:        end for
12:        UPDATE(q, temp)                     ▷ update nodes' traffic loads
13:        INSERT(S, temp)                     ▷ insert temp to the schedule
14:        INCREMENT(i)                        ▷ go to next slot
15:    end while
16:    return S                                ▷ return schedule
17: end procedure
```

TASA algoritmasına ek olarak bir kereye mahsus olmak üzere özerk hücrelerin tahsis edilme işlemi vardır. Her bir düğüm için komşu sayısı kadar özerk hücre tahsisi yapılır, dolayısıyla algoritma karmaşıklığı Θ (n*n) olur. Boyama aşamasında ise TASA algoritmasına ek olarak girişim kontrolü yapılırken yön matrisi de dikkate alınır, ancak bu işlem algoritma karmaşıklığını arttırmamaktadır. Uyarlanmış TASA algoritmasının karmaşıklığı Θ (n*n + m*n + m*n*n + m*n*t) olur. Frekans kaynağı sayısı düğüm sayısından az olduğu varsayılırsa algoritma karmaşıklığı Θ (m*n*n) olarak sadeleştirilebilir.

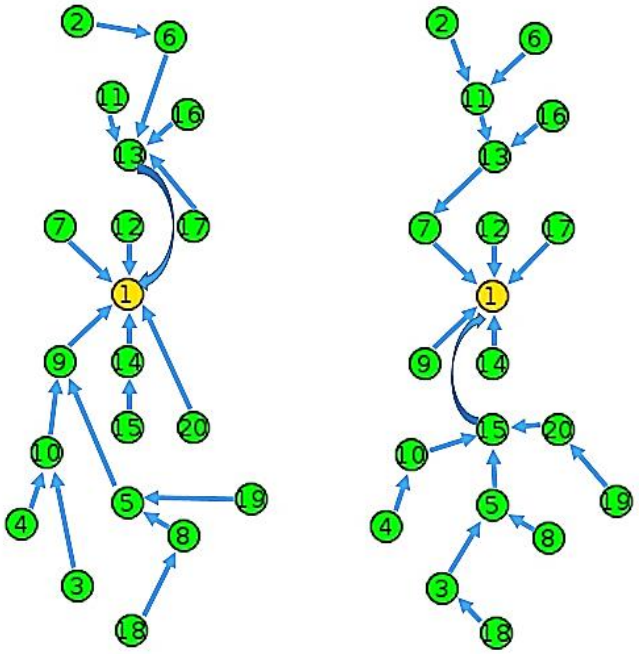
6.1.1. Algoritma Çalışma Mantığı

Algoritmanın çalışma mantığı, Şekil 42'de verilen 20 düğümden oluşan senaryo dikkate alınarak anlatılmıştır. 1 numaralı sarı renkli düğüm sınır yönlendiricisi ve RPL kök düğümü görevi görmektedir, diğer düğümler mesaj paketi üreten kaynak düğümlerdir. Mesaj paketleri 1 numaralı düğümde toplanmaktadır.



Şekil 42. 20 düğümden oluşan örnek ağ yapısı

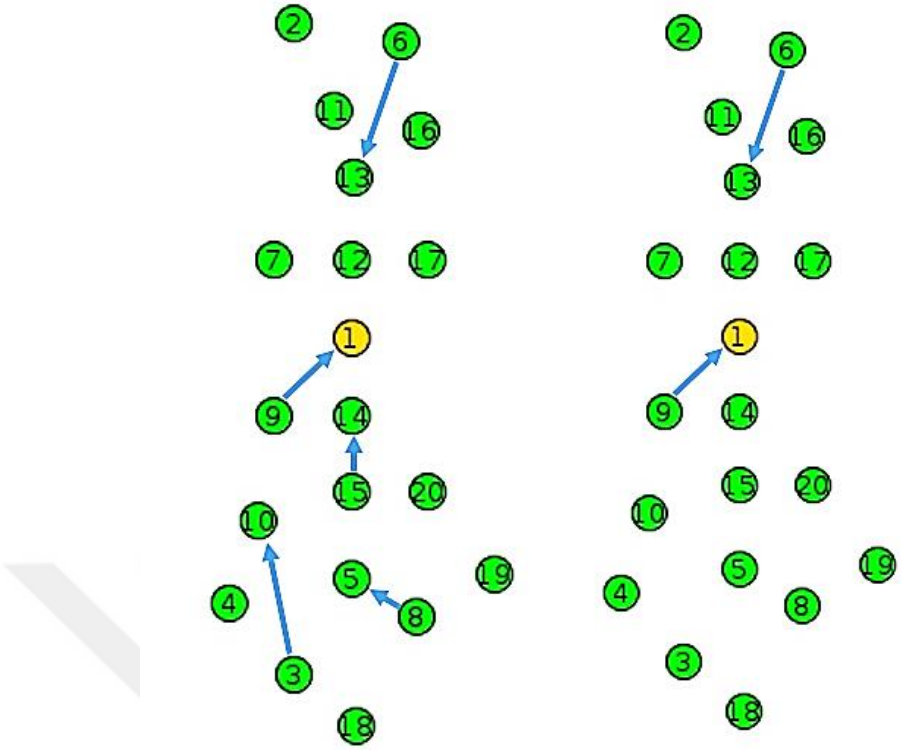
Şekil 43'de verilen örnek senaryoya bağlı olarak düğümlerin Döner yönlü antene sahip olduğunda oluşan ağ yapısı çizge olarak Şekil 43 (a)'da verilmiştir. Düğümlerin tüm yönlü antene sahip olması durumunda oluşan ağ yapısı ise çizge olarak Şekil 43 (b)'de verilmiştir.



(a) Döner yönlü anten (b) Tüm yönlü anten

Şekil 43. Farklı anten tiplerine göre oluşan çizge yapısı

Şekil 44 (a)'da çizelge oluşturulurken uyumlama aşamasında bulunan bağlantılar gösterilmiştir. Şekil 44 (b)'de ise boyama aşaması sonrasında kalan bağlantılar gösterilmiştir. Kullanılabilir frekans kaynağı sayısı 1 alındığı için tüm bağlantılar çizelgeye eklenememiştir. Aşağıdaki şekil, örnek olarak algoritmanın ilk zaman dilimi için ürettiği çıktıyı göstermektedir. Düğümlerin trafik ihtiyacı 1 birim olarak alınmıştır. Ağ yapısının farklı oluşması ya da düğümlerin trafik ihtiyaçlarının farklı olması durumunda algoritma çıktısı farklı olmaktadır.



(a) Eşleştirme aşaması (b) Boyama aşaması

Şekil 44. Örnek bir algoritma çıktısı

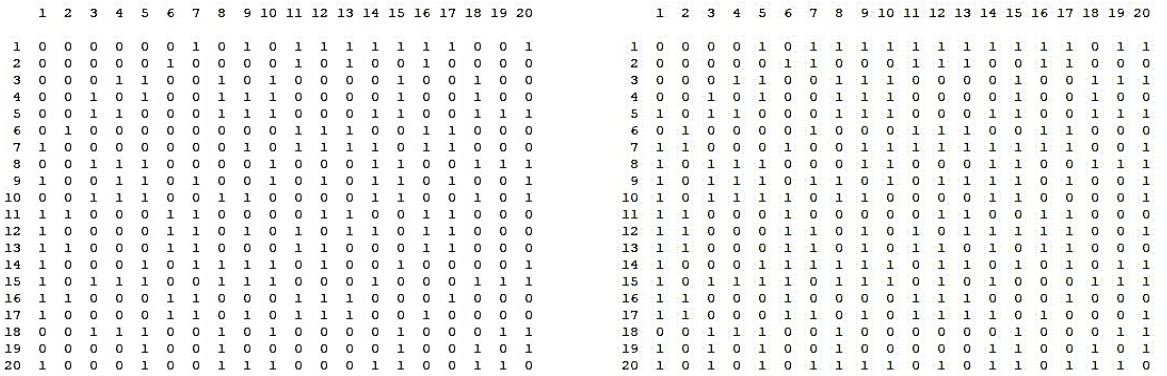
Örnek senaryo ile ilgili merkezi çizelgeleme algoritmasının oluşturduğu bağlılık matrisi Şekil 45'te verilmiştir. Sol tarafta yer alan matris tüm yönlü antene sahip düğümlerin oluşturduğu ağa, sağ tarafta bulunan matris ise döner yönlü antene sahip düğümlerin bulunduğu ağa aittir. Matriste görülen 0 rakamı, ilgili satır ve sütuna denk gelen iki düğüm arasında bağ olmadığını, 1 rakamı ise ilgili satır ve sütunda yer alan iki düğümün bağlı olduğunu, birbirleri ile direkt olarak haberleşebildiklerini göstermektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
15	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
9	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
11	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0
13	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
15	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
18	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
20	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0

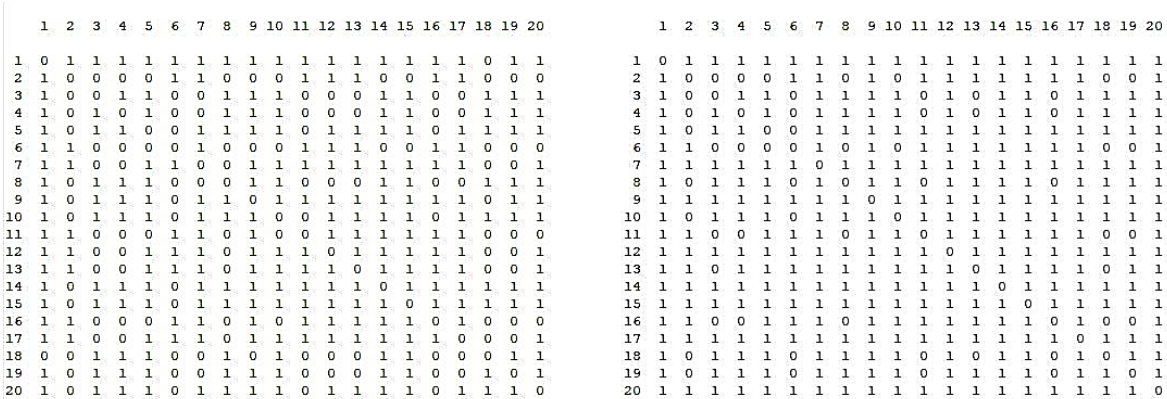
Şekil 45. Bağlılık (Connectivity) matrisi (Tüm yöne anten, Döner anten)

Şekil 45'de verilen bağlılık matrisi kullanılarak Şekil 46'da sunulan girişim matrisi oluşturulmuştur. Herhangi bir düğüm 1-hop komşularının yani arasında bağ olduğu düğümlerin 1-hop komşuları bu matriste 1 ile gösterilmektedir. Bir düğümün 2-hop komşularının yaptığı yayınlardan etkilendiği için bu matris oluşturulmaktadır.



Şekil 46. Girişim (Interference) matris (Tüm yöne anten, Döner anten)

Şekil 46'da verilen girişim matrisi kullanılarak Şekil 47'de sunulan çakışma matrisi oluşturulmuştur. Herhangi bir düğüm 1-hop komşularının yani arasında bağ olduğu düğümlerin 2-hop komşuları bu matriste 1 ile gösterilmektedir.



Şekil 47. Çakışma (Conflict) matrisi (Tüm yöne anten, Döner anten)

Şekil 48'de Döner yönlü antene sahip düğümlerin birbirlerini hangi açılar ile tespit ettiklerini gösteren matris yer almaktadır. Bu matris uyumlandırılan TASA algoritmasının boyama aşamasında kullanılmaktadır.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	180	0	180	0	0	300	300	60	60	0	300	0	0	60
2	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	75	0	90	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	225	315	0	0	315	0	255	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0
4	0	0	15	0	345	0	0	0	0	315	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0
5	0	0	135	180	0	0	0	30	240	240	0	0	0	270	270	0	0	90	0	330
6	0	180	0	0	0	0	0	0	0	0	105	0	120	0	0	45	0	0	0	0
7	60	0	0	0	0	0	0	0	150	0	0	0	330	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	135	0	195	0	0	0	0	225	0	0	0	0	240	0	0	120	315	225
9	330	0	0	0	90	0	285	0	0	105	0	255	0	15	45	0	0	0	0	0
10	0	0	75	135	30	0	0	45	285	0	0	0	0	285	0	0	0	0	0	0
11	0	240	0	0	0	285	0	0	0	0	0	90	75	0	0	45	75	0	0	0
12	105	0	0	0	0	0	240	0	90	0	255	0	270	60	0	330	345	0	0	0
13	105	270	0	0	0	240	120	0	0	0	255	90	0	0	0	330	60	0	0	0
14	300	0	0	0	105	0	240	0	225	135	0	285	0	0	90	0	330	0	0	345
15	270	0	0	150	105	0	0	60	225	180	0	0	0	270	0	0	0	0	0	15
16	0	225	0	0	0	285	0	0	0	0	215	120	150	0	0	0	90	0	0	0
17	150	0	0	0	0	0	180	0	0	0	255	180	210	150	0	270	0	0	0	0
18	0	0	210	240	255	0	0	285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	210	0	0	165	0	0	0	0	0	0	165	0	0	0	0	240
20	240	0	0	0	135	0	0	105	240	210	0	0	0	255	180	0	0	0	45	0

Şekil 48. Yön matrisi (Döner anten)

Şekil 49'da tüm yönlü antene sahip düğümlerin oluşturduğu ağda merkezi çizelgeleme algoritmasının çıktısı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm veri paketlerinin toplayıcı düğüme gönderilmesi için minimum 32 zaman dilimine sahip bir çizelge gerekmektedir. T harfi gönderim, R harfi dinleme modunu belirtmektedir. Maksimum kullanılabilir frekans kaynağı sayısı 1 alınmıştır, dolayısıyla gönderici düğümlerin tamamı aynı frekansta gönderim yapmaktadırlar.

Düğüm timeslot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	R	R		R		R		R		R		R		R			R		R	R			R		R		R	R	R	R	R	R
2	T																															
3				R			T				T																					
4		T																														
5					T		R		T		R	R				T								T								
6						T																										
7		T	R	T			R	T			R	T			R					T	R											T
8												T																				
9																											T					
10		R																T								T						
11	R				T	R			T				T																			
12																												T				
13			T		R		T		R		T		R		T	R					T								T			
14																																
15	T				R	T			R	T			R	T		R	T	R	T			R	T	R	T	R				T		
16																T																
17																															T	
18				T																												
19			T																													
20			R										T									T										

Şekil 49. Tüm yönlü anten çözümüne göre oluşturulan çizelge

Şekil 50'de döner yönlü antene sahip düğümlerin oluşturduğu ağda merkezi çizelgeleme algoritmasının çıktısı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm veri paketlerinin toplayıcı düğüme gönderilmesi için minimum 25 zaman dilimine sahip bir çizelge yeterli olmaktadır.

Düğüm timeslot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	R	R	R	R	R		R	R	R	R	R	R	R			R		R	R	R		R	R	R	R							
2										T																						
3								T																								
4									T																							
5		T			R	T		R	R		T								T												
6						T																										
7									T																							
8																					T											
9																									T							
10																							T									
11			T			R						T																				
12		T	R		T				R		T	R							T													
13				T						R			T																			
14															T																	
15	T	R	T			R	T		R	T	R	T			R	T	R	T	R	T	R	T	R	T								
16	T			R			T						R	T																		
17	R			T			R	T					T	R									T									
18					T																											
19														T																		
20									T					R			T															

Şekil 50. Döner yönlü anten çözümüne göre oluşturulan çizelge

6.1.2. Örnek Algoritma Çıktısı

81 düğümden oluşan ızgara (grid) yapısında bir senaryo için, kontrol paketleri dikkate alınmayıp sadece veri paketlerinin toplayıcı düğüme iletilmesi için gerekli çizelge uzunlukları Tablo 5'te verilmiştir. Düğümler arası mesafe kısaldığında düğümlerin sahip olduğu komşu sayısı artmakta, dolayısıyla girişimde bulunan düğüm sayısı artmaktadır. Bu nedenle çizelgede paralel iletişimler azalmakta ve daha uzun bir çizelge oluşturulmasına neden olmaktadır.

Tablo 5. Anten tipi ve frekans sayısına bağlı olarak oluşan çizelge uzunlukları

Anten Tipi	Düğümler Arası Mesafe	Frekans Kanal Sayısı	Çizelge Uzunluğu
Tüm yönlü	30m	1	173
Tüm yönlü	30m	2	94
Tüm yönlü	30m	3	89

Tablo 5'in devamı

Tüm yönlü	40m	1	146
Tüm yönlü	40m	2	80
Tüm yönlü	40m	3	80
Döner yönlü	30m	1	131
Döner yönlü	30m	2	80
Döner yönlü	30m	3	80
Döner yönlü	40m	1	113
Döner yönlü	40m	2	80
Döner yönlü	40m	3	80

Tablo 5'te görüldüğü üzere kullanılabilen frekans kanal sayısı arttırıldığında çizelge uzunluğu beklenildiği gibi her iki anten tipi için de kısalmaktadır. Döner yönlü anten çözümünün tüm yönlü anten çözümüne göre iki avantajı vardır. Birinci avantajı; döner yönlü anten daha uzak mesafeye yayın yapabildiği için daha az atlama (hop) sayısına sahip bir ağ oluşturur. İkinci avantajı ise düğümler döner yönlü antene sahip olduklarında, merkezi çizelgeleme algoritması frekans kanallarını daha etkin bir şekilde kullanır.

6.1.3. Çizelgeleyici ile Düğümler Arası İletişim

Düğümler belli aralıklarla ata düğüm (parent) ve komşularını, tespit ettikleri yön bilgisi ile beraber merkezi çizelgeleyiciye gönderir. Düğümlerin komşularını ve birbirlerine olan açılarını daha hızlı bulabilmeleri için Sahte İşaretçi mesaj paketleri düğümler ağa senkronize oluncaya kadar gönderilmiştir. Düğümlerin komşularını tanımaları ve uygun bir ata (parent) düğüm seçmeleri için RPL protokolü olduğu haliyle kullanılmıştır. Düğümler merkezi çizelgeleyiciden kendilerine ait olan kaynak ataması bilgilerini alana kadar, birbirleri ile haberleşebilmek için her bir komşusu ile karşılıklı olarak birer adet TX ve RX özerk hücre tahsisi yaparlar.

Düğümler belli aralıklarla, ya da yeni bir komşu tespit ettiğinde, ata düğümünü değiştirdiğinde, ya da ek kaynak ihtiyacı duyduğunda; ata düğüm (parent) ve komşularını (ID bilgisi), tespit ettikleri yön bilgisi ile beraber trafik miktarını da içerecek şekilde paket olarak merkezi çizelgeleyiciye gönderir. İstemci iletişim algoritması gönderim ve alım fonksiyonları olarak Algoritma 7'de verilmiştir.

Algoritma 7 İstemci iletişim algoritması

```
1: procedure RECEIVE
2:     if new message received then
3:         if OK_MSG then
4:             set ok_msg_received
5:         end if
6:         if SCHEDULE_MSG then
7:             unschedule_old_slots()
8:             dst, type, ch, sl ← parse_msg()
9:             schedule(dst, type, ch, sl)
10:        end if
11:    end if
12: end procedure
14: procedure SEND                                   ▷ called periodically
15:    buf_occ← calculate_buffer_occupancy()
16:    if buf_occ < 30 then
17:        INCREMENT(traffic)
18:    else if buf_occ > 70 then
19:        DECREMENT(traffic)
20:    end if
21:    if check_topology() then
22:        set topology_changed
23:    end if
24:    if expired TOPOLOGY_UPDATE_PERIOD then
25:        set topology_changed
26:    end if
27:    if topology_changed then
28:        msg ← create_msg(parent, traffic, neighbors)
29:        send_TOPOLOGY_msg(msg)
30:    else if ok_msg_received then
31:        send_DATA_msg(msg)
32:    end if
33: end procedure
```

Merkezi çizelgeleme algoritması kendisine topoloji bilgi paketleri geldikçe bağlılık matrisini günceller. Tüm düğümlerden komşuluk listelerini aldıktan sonra girişim ve çakışma matrislerini oluşturur. Düğüm ve ata ilişkilerine bakarak, ağın yapısını bir ağaç veri yapısı şeklinde tutar. Ağın yapısı, düğümlerin trafik ihtiyacı ve çakışma matrisine bakarak çizelgeleme yapar. Çizelge içerisinde düğümün ihtiyaç duyduğu bilgiler liste halinde gönderilir (zaman dilimi, frekans kanalı, gönderim/dinleme modu, hedef düğüm tanımlayıcısı). Sunucu iletişim algoritması Algoritma 8'de verilmiştir.

Algoritma 8 Sunucu iletişim algoritması

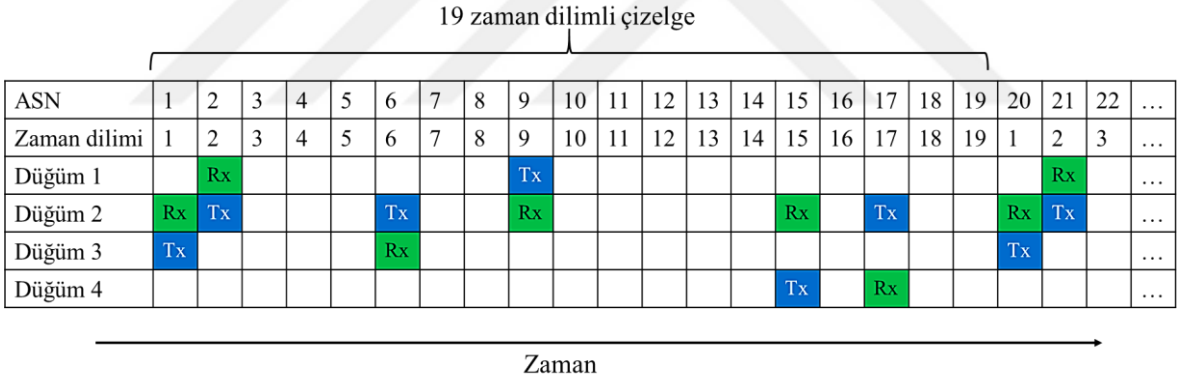
```
1: procedure RECEIVE
2:     if new message received then
3:         if DATA_MSG then
4:             write_to_log()
5:         end if
6:         if TOPOLOGY MSG then
7:             parent, traffic, nbrs ← parse_msg())
8:             for each neighbor do
9:                 if exist_link(list, node, neighbor) then
10:                    S ← calculate_auto_slots()
11:                    link ← new_link(node, neighbor)
12:                    update_q_matrix(node)
13:                    append_list(link)
14:                end if
15:            end for
16:            connect_to_tree(node, parent, T)
17:            if not exist DISCONNECTED node then
18:                create_connectivity_matrix(C, list)
19:                create_interference_matrix(I, list)
20:                create_direction_matrix(D, list)
21:                call_TASA(T, C, I, D, q, nch)
22:                send_schedule(node)
23:            end if
24:        end if
```

25: **end if**

26: **end procedure**

Merkezi çizelgeleme algoritması ağaç yapısını tamamladıktan sonra bir çizelge oluşturup (düğümlerin ID bilgisine göre hesapladığı özerk hücreleri dikkate alarak), her bir düğüm için kendisine ait olan çizelgeyi düğüme iletir. Düğümlerden mesaj paketi alındıkça bağlılık matrisinde bir değişiklik olmuyorsa, performans açısından tekrar bir çizelgeleme yapılmaz ve dolayısıyla tekrar bir çizelge üretilmediği için düğümlere bildirim yapılmaz. Bağlılık matrisinde ya da ağaç yapısında bir değişim olduğunda (ata düğüm değiştirme gibi) sıfırdan bir çizelge oluşturulur.

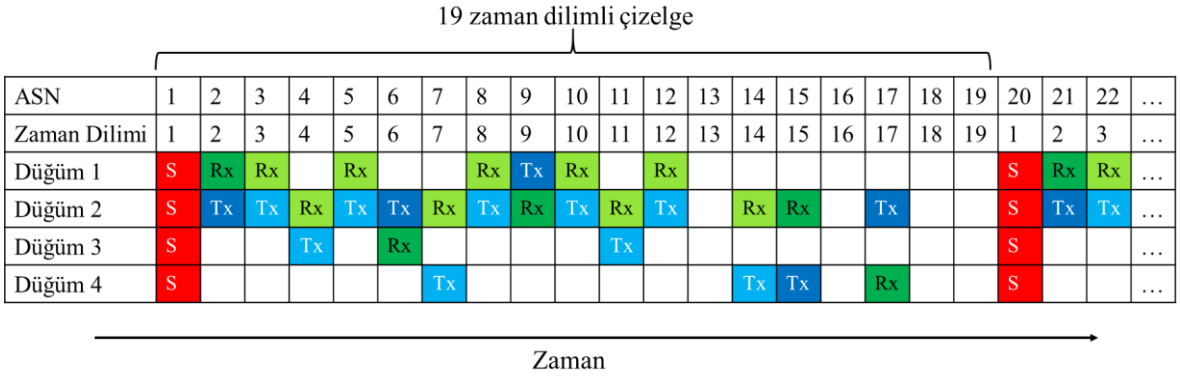
4 düğümden oluşan örnek bir senaryo için düğümlerin birbirleriyle haberleşebilmesini sağlayan hücrelerin özerk olarak tahsis edilmesinden sonra oluşan 19 zaman diliminden oluşan örnek bir çizelge Şekil 51'de verilmiştir. Çerçeve uzunluğu, düğümlerin ID bilgileri ve komşuluk durumlarına göre çizelge değişmektedir. Özerk olarak alınan hücreler çizelgeye ilk eklenen kaynaklardır.



ASN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	…
Zaman dilimi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1	2	3	…
Düğüm 1		Rx							Tx												Rx		…
Düğüm 2	Rx	Tx				Tx			Rx						Rx		Tx			Rx	Tx		…
Düğüm 3	Tx					Rx														Tx			…
Düğüm 4															Tx		Rx						…

Şekil 51. Özerk hücreler tahsis edildikten sonra oluşan çizelge

Merkezi çizelgeleme algoritmasının ise veri trafiğini yönetmek amacıyla ve özerk alınan hücreleri dikkate alarak oluşturduğu çizelge Şekil 52'de verilmiştir. Bir önceki adımda alınan özerk hücreler işaretlendiği için çizelgeleyici tahsis edilmiş hücreleri kullanmadan trafik ihtiyacına göre çizelgeye yeni hücreler ekler.



Şekil 52. Merkezi çizelgeleme sonrası oluşan örnek çizelge

6.1.4. Test Sonuçları

Testlerde, ağda yer alan her bir düğümün birim zamanda sabit miktarda veri ürettiği ve trafik oluşturduğu varsayılmıştır. Buna ek olarak, her bir düğüm çocuklarının kendisine ilettiği mesaj paketlerini, kendi ata düğümüne iletmekle sorumludur. Dolayısıyla her bir düğümün trafik miktarı kendisi ile çocuklarının toplam trafiği kadardır. Bu nedenle kök düğüme yakın olan düğümler çizelgede daha fazla hücreye ihtiyaç duyarlar, dolayısıyla geliştirilen algoritma bu durumu dikkate alarak çizelgeleme yapar.

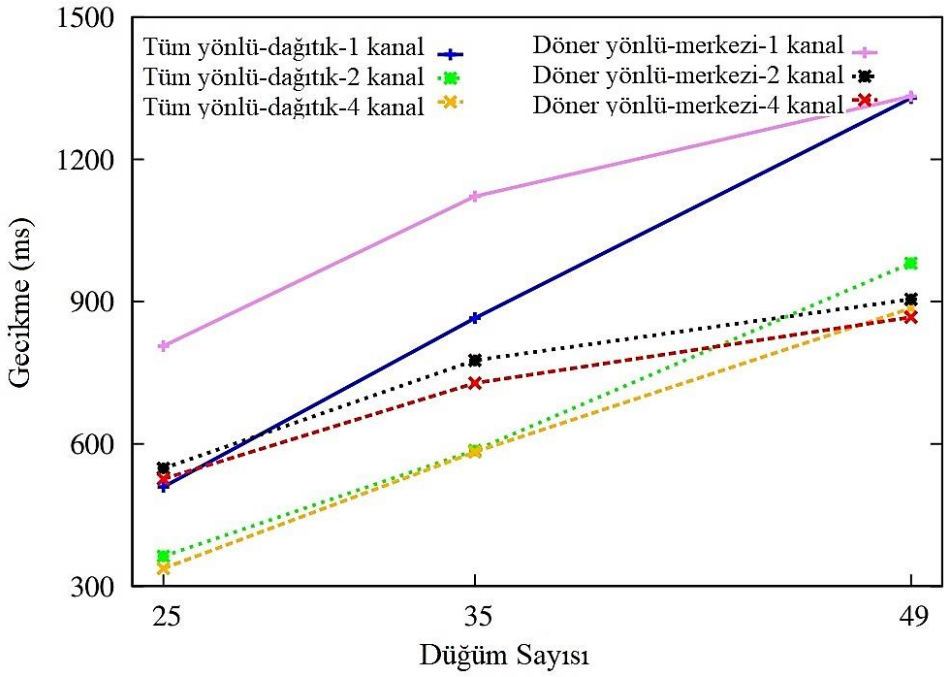
Bir düğüm yayın yaptığında girişim mesafesinde (Interference range) bulunan tüm düğümler bu yayından etkilenirler. Dolayısıyla girişim olmaması için aynı zaman diliminde programlanmış olan gönderim (TX) ve dinleme (RX) modunda olan düğümlerin farklı frekans kanallarını kullanmaları gerekir. Testlerde kullanılan senaryolarda düğümler birbirlerine sabit mesafe aralıklarıyla yerleştirilmişlerdir. Dolayısıyla bir düğüm yayın yaptığında bu yayın 1-hop uzaklıktaki düğümler (direkt komşular) tarafından alınır. 2-hop uzaklıktaki düğümler de bu yayın nedeniyle girişime uğramaktadır.

Bir düğüm aynı anda sadece bir durumda (Tx ya da Rx) bulunabilir ve sadece bir düğümden yayın alabilir. Örneğin; herhangi bir düğüm, herhangi bir zaman diliminde Tx modunda programlanmış ise diğer düğümlerden yayın almak için programlanamaz. Aynı zamanda yayın yapıldığında girişim alanında bulunan düğümler aynı kanalda Rx modunda programlanamaz.

Testler için 25, 35 ve 49 düğümden oluşan senaryolar oluşturulmuştur. RPL kök düğümü ve sınır yönlendiricisi görevi gören toplayıcı düğüm senaryonun ortasına yerleştirilmiştir. Tüm düğümler birbirlerine eşit mesafede yer alacak şekilde

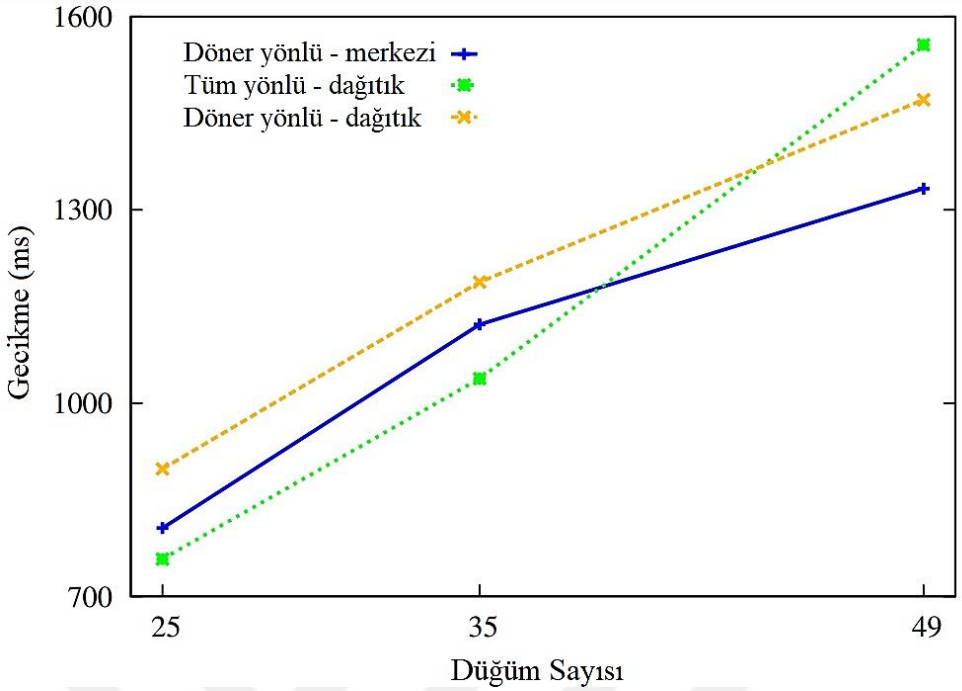
konumlandırılmıştır. Aksi belirtilmedikçe düğümler saniyede bir paket üretmekte, ve 1 adet frekans kaynağı kullanabilmektedir. Testler simülasyon aracında bulunan rastgele tohum (random seed) değeri değiştirilerek 10 kere koşulmuş ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Merkezi çizelgeleme ölçeklenebilir bir yaklaşım olmadığından dolayı düğüm sayısı arttıkça kontrol paketlerinin sisteme getirdiği yük daha fazla oranda artmaktadır. 81 düğüm ile yapılan testlerde düğümlerin senkronizasyonu kaybetmesi ve ağdan çıkması gibi yaşanan sorunlardan dolayı sonuçlar anlamsızlaşmaya başladığı için senaryodaki düğüm sayısı 25, 35 ve 49 ile sınırlı tutulmuştur.

Şekil 53'te anten konfigürasyonu, kullanılabilir frekans sayısı ve çizelgeleme türüne göre elde edilen gecikme süreleri verilmiştir. Tüm yönlü anten kullanılması durumunda mevcut ek bir kaynak ihtiyacı duyulmadığından, döner yönlü antene kıyasla daha kısa bir çizelge üretilmektedir. Gecikme süresini etkileyen en önemli faktör çizelge boyudur. Düğüm kendisine ait bir hücreyi kullandıktan sonra aynı hücreyi tekrar kullanabilmek için çizelge boyu kadar süre geçmesini bekler. Senaryodaki düğüm sayısı arttıkça döner yönlü anten performansı tüm yönlü antenin performansına yaklaştığı görülmektedir. Bu durumun nedeni özerk çizelgelemenin getirdiği ek maliyetin komşu sayısıyla sınırlı olmasıdır. Ağda bulunan düğüm sayısı arttıkça özerk alınan hücrelerin getirdiği ek maliyet oransal olarak azalmaktadır. Kullanılabilir frekans kaynağı sayısının artması paralel iletişimleri arttırdığından dolayı çizelge süresini kısaltmaktadır, dolayısıyla daha düşük gecikme süreleri elde etmeyi sağlamaktadır. Gecikme süresini belirleyen bir başka faktör hücrelerin sıralı olarak tahsis edilmesidir. Düğümler bir RX hücre ile paket aldığında en yakın zamanda TX hücresi ile bu paketi iletmesi gerekir. Dağıtık çizelgeleme algoritması gerekli kaynakları rastgele aldığı için gecikme süresi bakımından merkezi çizelgeleme algoritmasına göre kötü performans sergilemektedir.



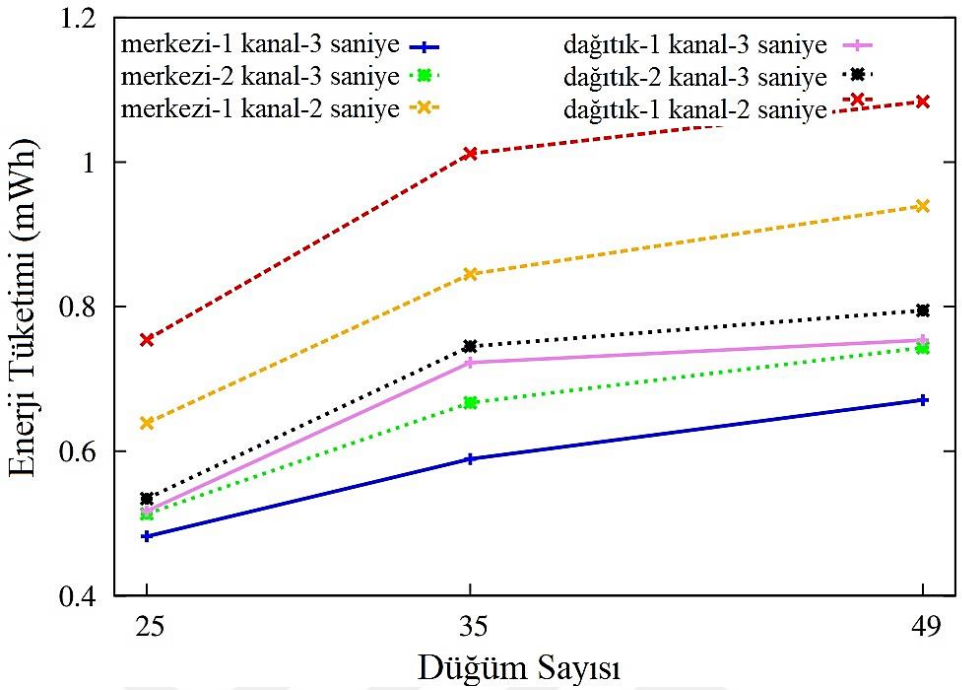
Şekil 53. Düğüm sayısına bağlı yaşanan ortalama gecikme süreleri

Şekil 54'te artan düğüm sayısına göre anten konfigürasyonu ve çizelgeleme türüne göre elde edilen gecikme süreleri verilmiştir. Senaryoda bulunan düğüm sayısının artması veri trafiği için gerekli olan kaynak ihtiyacını arttırmaktadır, dolayısıyla daha uzun bir çizelgeye ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm yönlü anten konfigürasyonu düğüm sayısı az iken daha iyi performans gösterirken, düğüm sayısı arttıkça daha kötü performans sergilemiştir. Bu durumun nedeni, tüm yönlü antene sahip ağlarda, düğüm sayısı arttıkça ihtiyaç duyulan kaynak miktarının daha fazla artması ile açıklanabilir. Döner yönlü anten daha uzağa iletim yapabilme özelliği sayesinde ağ büyüklüğü arttıkça tüm yöne antene kıyasla zaman dilimi kaynaklarına olan ihtiyacı daha az oranda artar. Benzer şekilde merkezi çizelgeleme algoritması gerekli kaynakları daha optimum kullandığından dolayı gecikme süresi bakımından dağıtık çizelgeleme algoritmasına göre daha iyi performans sergilemektedir.



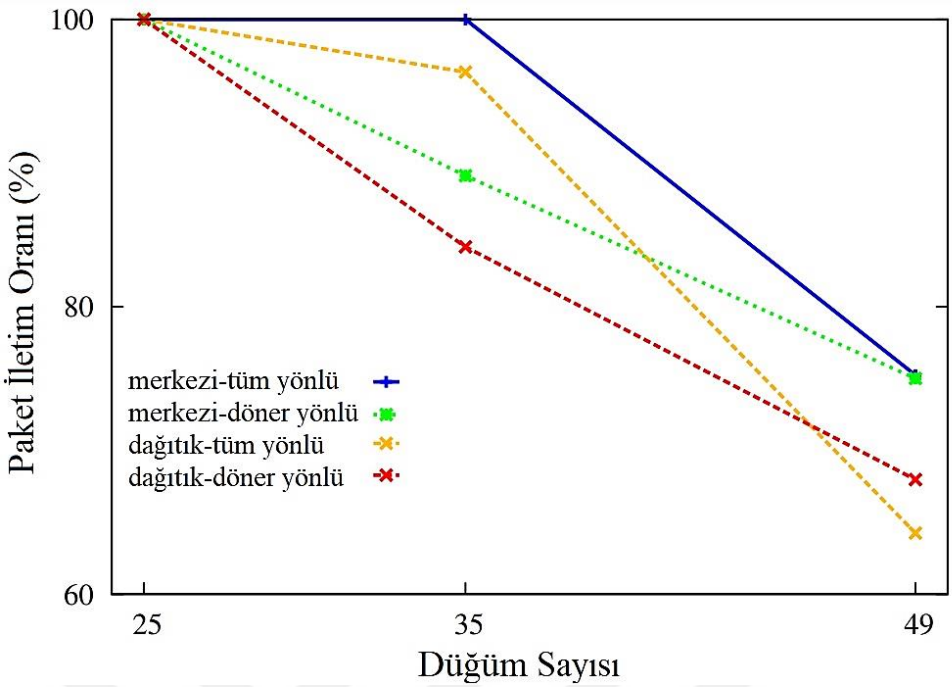
Şekil 54. Düğüm sayısına bağlı gecikme süreleri karşılaştırma grafiği

Şekil 55'de farklı veri gönderim aralıkları, frekans kaynağı sayısı ve çizelgeleme türüne göre elde edilen ortalama enerji tüketimleri verilmiştir. Senaryoda bulunan düğüm sayısının artması veri trafiği için gerekli olan kaynak kullanımını arttırmakta, dolayısıyla enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Veri gönderim sıklığı arttıkça beklenen şekilde enerji tüketimi artmıştır. Kullanılabilir frekans kaynağı miktarının artması daha kısa çizelge üretilmesine neden olmakta, daha kısa çizelge oluşması ise ağın güvenilirliğini arttırırken aynı zamanda enerji tüketimini arttıran bir faktördür. Merkezi çizelgeleme algoritması gerekli kaynakları daha optimum kullandığından dolayı enerji tüketimi bakımından dağıtık çizelgeleme algoritmasına göre daha iyi performans sergilemektedir. Dağıtık çizelgelemede sabit bir çerçeve boyutu belirlenmektedir. Düğümün trafik ihtiyacını karşılamaya yönelik tahsis edilen hücre sayısı küsüratlı olamayacağı için dağıtık çizelgeleme merkezi çizelgelemeye kıyasla daha fazla hücre kullanır. Merkezi çizelgelemede çerçeve uzunluğu sabit değildir ve tamamen trafik ihtiyaçlarına göre belirlenir. Aynı zamanda dağıtık çizelgeleme belirli bir çerçeve boyutu içerisinde kaynak tahsisini yapar ve zaman içerisinde düğümün tampon bellek durumuna göre ek kaynak kullanabilir. Merkezi çizelgeleme ise düğümün trafik ihtiyacını göz önünde bulundurarak bir defaya mahsus hücre tahsisi yapar, daha sonrasında ek kaynak tahsisi yapmaz.



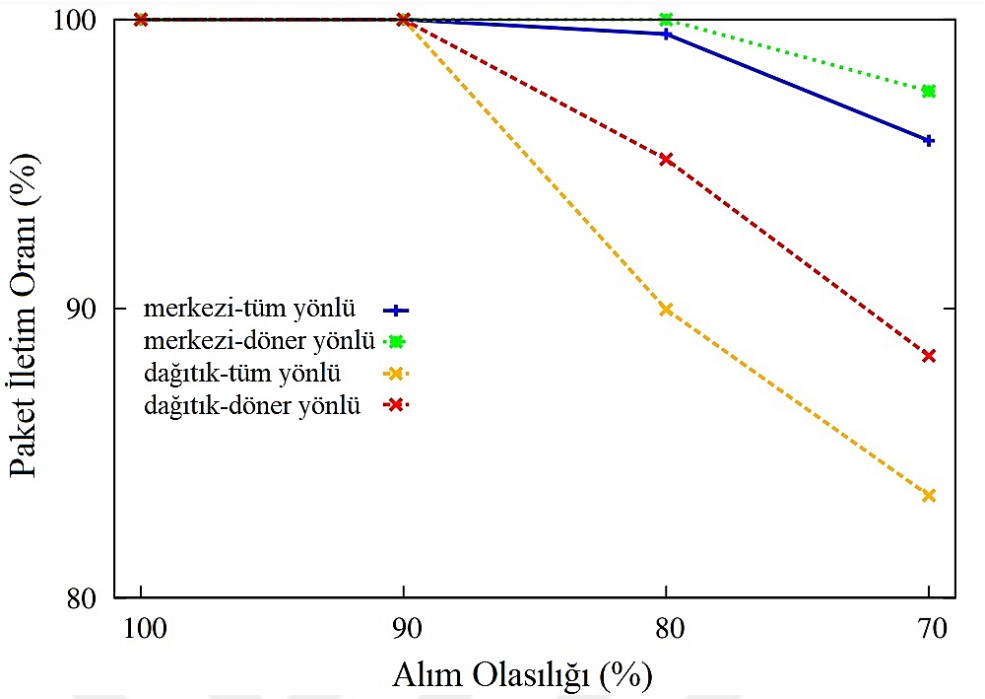
Şekil 55. Düğüm sayısına bağlı ortalama enerji tüketimi grafiği

Şekil 56'da artan düğüm sayısına bağlı olarak farklı anten konfigürasyonları ve çizelgeleme türüne göre elde edilen paket iletim oranları verilmiştir. Düğümlerin saniyede bir adet veri ürettiği varsayılmıştır. Senaryoda bulunan düğüm sayısının artması veri trafiğini arttırdığından dolayı kaynak ihtiyacını arttırmaktadır. Dolayısıyla yeterli kaynak bulunamaması durumunda paket iletim oranı azalmaktadır. Düğüm sayısının az olması durumunda tüm yönlü antene sahip düğümler daha iyi performans sergilerken, düğüm sayısı arttıkça döner yönlü antene sahip düğümlerin paket iletim oranı tüm yönlü antene sahip düğümlere göre daha iyi olmuştur. Tüm yönlü antene sahip düğümler, senaryo büyüdükçe daha çok kaynak ihtiyacı duymaktadırlar. Tüm yönlü anten merkezi çizelgeleme ile kullanıldığında hem kaynakları optimal kullanır hem de döner yönlü anten kullanmanın getirdiği özerk hücrelerin ek maliyetine katlanmadığından küçük ağlarda daha iyi performans sergilemektedir. Düğüm sayısı arttıkça zaman dilimi kaynaklarına döner yönlü antene kıyasla daha fazla oranda ihtiyaç duymaktadır. Ancak; merkezi çizelgelemenin ölçeklenebilir olmaması nedeniyle önerilen yöntem büyük ağlara uygulanamamaktadır.



Şekil 56. Düğüm sayısına bağlı paket iletim oranları grafiği

Şekil 57'de ortam kalitesini simülasyon ortamında benzetmek için kullanılan alım olasılığı (Receive probability)'na bağlı olarak farklı anten konfigürasyonları ve çizelgeleme türüne göre elde edilen paket iletim oranları verilmiştir. Bu testlerde tüm konfigürasyonların 100% başarı oranına eriştiğini göstermek ve paket iletim oranının alım olasılığına bağlı olarak değişimini daha iyi göstermek adına düğümlerin iki saniyede bir adet veri paketi ürettiği varsayılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere alım olasılığı düştükçe paket geri gönderimleri artmaktadır, bu durum veri trafiğini arttırdığından dolayı düğümlerin daha fazla kaynak ihtiyacı duymasına neden olur. Yeterli kaynak bulunamaması durumunda ise paket iletim oranı azalması beklenmektedir. Grafikte görüldüğü üzere alım olasılığı düştükçe paket iletim oranı da düşmektedir. Dağıtık çizelgeleme yöntemi iki tür anten konfigürasyonunda da alım olasılığından daha fazla etkilenmektedir. Merkezi çizelgeleme algoritmaları daha kısa bir çizelge oluşturduğundan dolayı veri üretim aralığında daha fazla hücre kullanabilmektedir dolayısıyla dağıtık çözümlere oranla daha iyi bir performans sergilemektedir. Merkezi çizelgeleme yöntemi iki tür anten konfigürasyonu için yakın performans göstermektedir. Döner yönlü antenin getirdiği zaman dilimi kaynaklarını verimli kullanma avantajı özerk hücre kullanımının getirdiği ek maliyet sebebiyle azalmaktadır.



Şekil 57. Alım olasılığına bağlı paket iletim oranları grafiği

Bu bölümde; döner yönlü anten kullanmanın ağın performans ölçütlerine katkısını ölçmek adına literatürde bilinen TASA algoritmasından faydalanılmıştır. TASA algoritması, döner yönlü anten sistemine uyarlanarak gecikme, enerji tüketimi ve paket iletim oranları ölçütlerine göre performansı karşılaştırılmıştır. Uyarlanmış TASA algoritması çizelgeye kontrol paketlerinin gönderimine ilişkin özerk hücreler ekleyerek sisteme ek maliyet getirmiştir. Alım olasılığı düşürülerek paket iletim oranı değişimine bakılan testlerde Uyarlanmış TASA algoritması %1 gibi az bir oranda daha iyi performans gösterirken, düğüm sayısı arttırılarak yapılan testlerde TASA algoritması az bir oranda daha iyi performans sergilemiştir.

Ayrıca; Döner yönlü anten sisteminin performans metriklerine etkisini göstermek amacıyla iki tür anten konfigürasyonu hem merkezi hem de dağıtık çizelgeleme algoritmalarıyla test edilmiştir. Dağıtık çizelgeleme olarak literatürde bulunan SF0 algoritması kullanılmıştır. Merkezi çizelgeleme yöntemi iki tür anten konfigürasyonu için tüm performans ölçütlerine göre dağıtık çizelgelemeye kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

6.2. TASA Algoritmasının Yol Tabanlı Çizelge Üretmesi

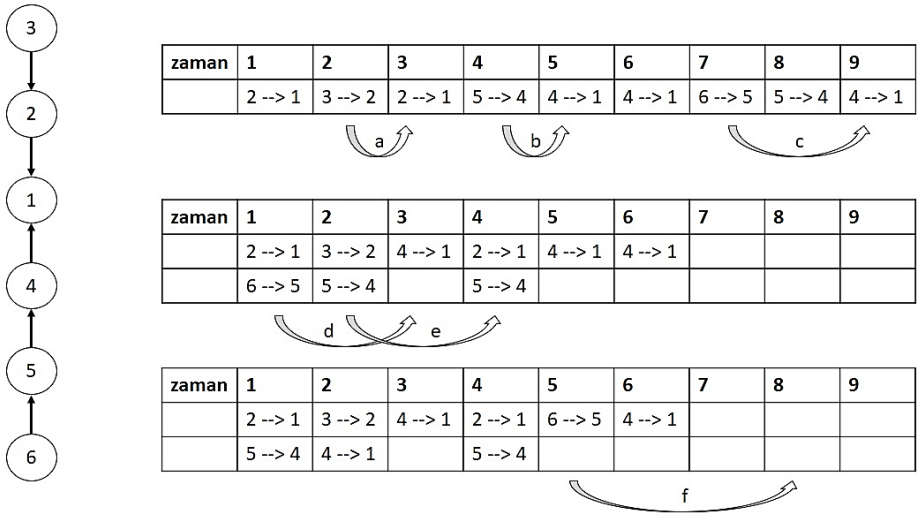
Endüstriyel uygulamalarda kullanılan kablosuz algılayıcı ağlarının en önemli performans ölçütleri olarak düşük uçtan uca gecikme ve yüksek güvenilirlik sayılabilir. Yüksek güvenilirlik sağlamak için 6TiSCH protokolü, düğümlerin yapacakları gönderimleri birbirleriyle uyumlu olarak ve belirli bir çizelgeye uyularak yapılmasını sağlar. Akıllı antenler ise düğümlerin daha uzun mesafelere gönderim yapmalarına izin vererek yaşanan uçtan uca gecikmeyi azaltır ve dar kapsama alanına sahip olmaları nedeniyle aynı zamanda ağın güvenilirliğini artırırlar. Ayrıca, merkezi çizelgeleme algoritmaları, tüm ağ hakkında bilgiye sahip olduklarından, dağıtık yaklaşımlara kıyasla daha verimli bir çizelge oluşturabilirler. Bu çalışmada, TASA algoritması düşük uçtan uca gecikme sağlaması açısından geliştirilmiştir.

Bu çalışmada merkezi çizelgeleme algoritması çizelgeleme yaparken düğüm tabanlı bir yaklaşım izlemek yerine veri paketinin kaynak düğümden çıkmasından toplayıcı düğüme iletilmesine kadar izlenecek yol dikkate alınarak, hücreler sıralı olarak tahsis edilerek çizelgelenir. Bir zaman diliminde veri alan bir düğüm işaretlenir, ve şartlar uygun olduğunda bu düğüme öncelik tanınarak bir sonraki zaman diliminde öncelikli olarak çizelgelenmesi sağlanır. Bu yöntem sayesinde veri paketinin mümkün olan en kısa gecikme süresi ile toplayıcı düğüme ulaşması sağlanır. Ağ içi yaşanan gecikmeyi azaltmak için 2 adet önemli husus vardır. (1) tüm düğümlerin ihtiyacına yönelik olarak gereken hücre atamalarının yapılabilmesi için gereken çizelgenin uzunluğunun minimum olması (2) bir veri paketi iletilmeye başlandıktan sonra kaynak düğüm ile toplayıcı düğüm arasında bulunan yönlendirici düğümlerin tampon belleklerinde bekletilmeden bir sonraki hedef düğüme iletilmesidir.

(1) Numaralı maddeyi sağlamak için mümkün olduğunca paralel iletişime izin verilmesi gerekir. Dolayısıyla aynı anda birden çok kaynak düğüm sensörlerinden okudukları veriyi paketleyip ata düğümlerine gönderebilir. Yaprak düğümler ağın dışında, toplayıcı düğüme uzak konumda bulunmaları sebebiyle ağı oluşturan düğümlerin çoğunluğunu oluştururlar. Benzer şekilde ata düğümler toplayıcı ve aynı zamanda RPL kök düğüme çocuk düğümlerinden daha yakındırlar, dolayısıyla her bir düğüm sadece bir tane ata düğüme sahip iken genellikle birden fazla çocuk düğüme sahip olurlar. Ağın merkezine yaklaştıkça düğümlerin çocuk ve torun düğümleri sayısında da artış gözlenir. Veri trafiğinin

toplayıcı düğüm etrafında yüksek olmasından dolayı bu durum, ata düğümlerin çocuklarından aldıkları veri paketlerini bir süre tampon bellekte tutmalarına neden olur.

Şekil 58'de sol tarafta verilen ağ yapısı için 3 farklı duruma göre üretilen çizelgeler verilmiştir. İlk çizelge paralel iletişime izin verilmediğinden 9 zaman diliminden oluşan uzun bir çizelgedir. Ancak, 3, 5, ve 6 numaralı düğümlerden çıkan veri paketleri hiçbir gecikme yaşanmadan toplayıcı düğüme iletilmektedir. Verilen ikinci çizelgede ise paralel iletişimden yararlanılmış ve 6 zaman diliminden oluşan daha kısa bir çizelge elde edilmiştir. Ancak; e harfi ile verilen ok üzerinde görüldüğü gibi 3 numaralı düğümden çıkan veri paketi bir süre 2 numaralı düğümün tampon belleğinde beklemiştir. Üçüncü çizelgede ise f harfi ile verilen ok üzerinde gösterildiği gibi 6 numaralı düğümden çıkan veri paketi zaman dilimi çerçevesinde 5 numaralı düğümün daha önceden yer almasından dolayı gönderimi bir sonraki çerçeveye kalmış, ve bu durum da mesajın daha fazla gecikmesine neden olmuştur.



Şekil 58. Merkezi çizelgeleme ile oluşturulan farklı çizelgeler

Bu çalışmada merkezi çizelgeleme algoritması geliştirilirken 2 durum göz önüne alınmıştır. (1) paralel iletişime izin vererek daha kısa bir çizelge oluşturmak (2) çizelgeleme yapılırken düğüm bazlı değil, veri paketinin ilerleyeceği yol baz alınarak, aynı çerçeve içerisinde tüm mesajların iletilmesi sağlanarak yaşanacak gecikmenin azaltılması.

Algoritma 9'da TASA algoritmasının döner yönlü anten sistemine uyarlanmış ve gecikmenin azaltılmasına yönelik iyileştirilmiş merkezi çizelgeleme algoritması verilmiştir.

Algoritma, 2 kısımdan oluşmaktadır. İlk aşamada düğümlerin döner yönlü antene sahip olmasından dolayı komşularıyla haberleşebilmeleri için ihtiyaç duydukları özerk alınan hücreler çizelgeye eklenir. İkinci aşamada ise düğümlerin trafik ihtiyacı göz önünde bulundurularak, uçtan uca iletimde yaşanan gecikme minimum olacak şekilde gerekli hücreler çizelgeye eklenir.

Algoritma 9 Merkezi çizelgeleme algoritması

Input: T ▷ network topology
Input: C ▷ connectivity matrix
Input: I ▷ interference matrix
Input: D ▷ direction matrix
Input: q ▷ keeps traffic load for each node
Input: n_{ch} ▷ number of available frequency channels
Input: L ▷ timeslot length
Output: S ▷ built schedule
i ← 0 ▷ keeps the current slot id
S ← [] ▷ schedule is initially empty
for each node in T **do**
    for each neighbor in C **do**
        tx_slot,ch ← HASH(node, neighbor) ▷ calculate autonom slot ids
        rx_slot,ch ← HASH(neighbor, node)
        ▷ allocate autonom slots
        S ← SCHEDULE CELL (node, neighbor, tx_slot, ch, TX)
        S ← SCHEDULE CELL (node, neighbor, rx_slot, ch, RX)
        for each 2-hop neighbor in I **do** ▷ mark all interfered slots
            if INTERFERE (node, neighbor, D) **then**
                ▷ mark this slot not to be used later
                S ← SCHEDULE CELL (node, neighbor, tx_slot, ch, INT)
            end if
        end for
    end for
end for

```
16: t ← 1                                   ▷ start from the beginning of slotframe
17: while ∀q ≠ 0 do                         ▷ until all traffic is scheduled
18:     list ← MATCHING(T, C.q, S, t)       ▷ find nodes who can transmit
19:     list ← SORTING(list, q)             ▷ sort nodes w.r.t. traffic load and priority
20:     list ← COLORING(list, D)            ▷ color interfering nodes a different color
21:     temp ← []                           ▷ temporary schedule at current slot
22:     for n ← 1 to n_ch do
23:         temp ← SELECT_UNSCHEDULED(list)
            ▷ give high priority to the receiver node to be selected in next slot
24:         PRIORITIZE(receiver)
25:     end for
26:     UPDATE(q, temp)                     ▷ update nodes' traffic load
27:     INSERT(S, temp)                     ▷ insert temp to schedule
28:     INCREMENT(t)                        ▷ go to next slot
29: end while
30: return S                                ▷ return the schedule
```

Algoritma hücreleri tahsis ederken bir veri paketi kaynak düğümden toplayıcı düğüme ulaşıncaya kadar çizelgelenir, dolayısıyla veri paketinin iletimi bir sonraki zaman dilimi çerçevesine kalmaz. Algoritma ilk aşamada öncelikle boş olan çizelgeyi ağda bulunan tüm düğümler ve her bir düğümün tüm komşularıyla haberleşmesini sağlamak için gerekli olan özerk tahsis edilen hücreler ile doldurur. Oluşacak girişimin önüne geçmek için düğümlerin birbirleriyle olan yönlerinin bulunduğu listeyi dikkate alarak girişim olan hücreleri daha sonradan kullanılmasını önlemek amacıyla işaretler.

İkinci aşamada ise düğümlerin trafik ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak tüm veri paketlerinin bir zaman çerçevesi içerisinde gönderilmesini sağlayacak şekilde, önceki aşamada tahsis edilmiş hücrelerle çakışmayacak şekilde gereken hücreleri tahsis eder. Bu amaçla, zaman dilimi çerçevesinin başından başlayarak her bir adımda;

(1) Gönderim yapabilecek düğümlerin bir listesi çıkarılır. Bu liste oluşturulurken ilk seçilen düğüm olarak; trafik miktarı en fazla olan ve varsa bir önceki zaman diliminde veri paketi almış düğüm seçilir. Bir düğüm seçildiğinde komşuları listeden çıkarılarak arama yapmaya devam edilir.

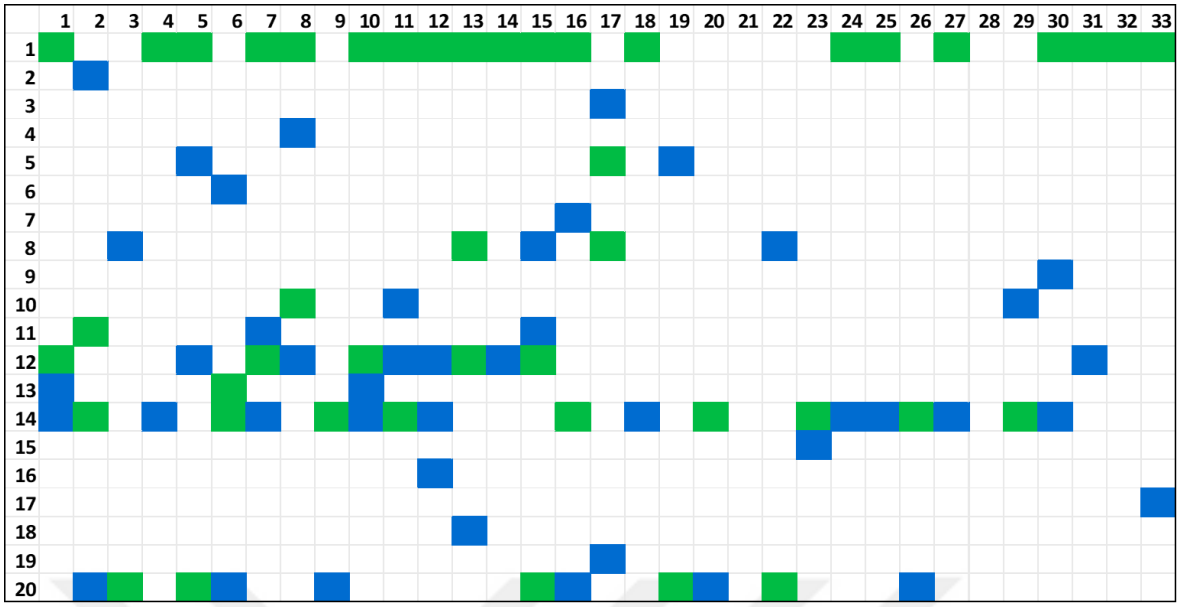
(2) Bir önceki aşamada oluşturulan liste, bir önceki zaman diliminde RX hücresi atanmış düğümlerin gönderimlerine öncelik vererek ve düğümlerin trafik ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurarak bir sıralama işlemine tabi tutulur.

(3) Elde edilen listeden frekans kaynağı miktarına göre düğümler sırasıyla çizelgelenir. Yön bilgisi dikkate alınarak girişimde bulunmayan düğümler aynı frekans kaynağına atanır. Çizelgeye dahil edilen düğümün önceliği geri alınır ve dinleme modunda çizelgelenmiş düğümlerin öncelikleri güncellenir.

Algoritma ilk aşamasında ağda bulunan her bir düğüm için komşuluk listesinde bulunan tüm düğümler ile kontrol paketlerinin gönderileceği hücreleri tahsis eder. Daha sonran 2-hop komşuları için girişim oluşan hücreleri belirler. Ağda bulunan düğüm sayısı n olsun. Herhangi bir düğümün 1-hop ve 2-hop komşu sayısı n kadar olabileceğinden algoritma karmaşıklığı Θ (n*n*n) olmaktadır. İkinci aşama TASA algoritması ile benzer uyumlama ve boyama aşamaları vardır. Önceliklendirme işlemi karmaşıklığı frekans kanal sayısı kadar olduğu için algoritma karmaşıklığını arttırmamaktadır. Dolayısıyla algoritma karmaşıklığı Θ (m*n*n + m*n*t) olur. Ağda bulunan düğüm sayısı frekans kanalı sayısından fazla ise algoritma karmaşıklığı Θ (m*n*n) olarak sadeleştirilebilir.

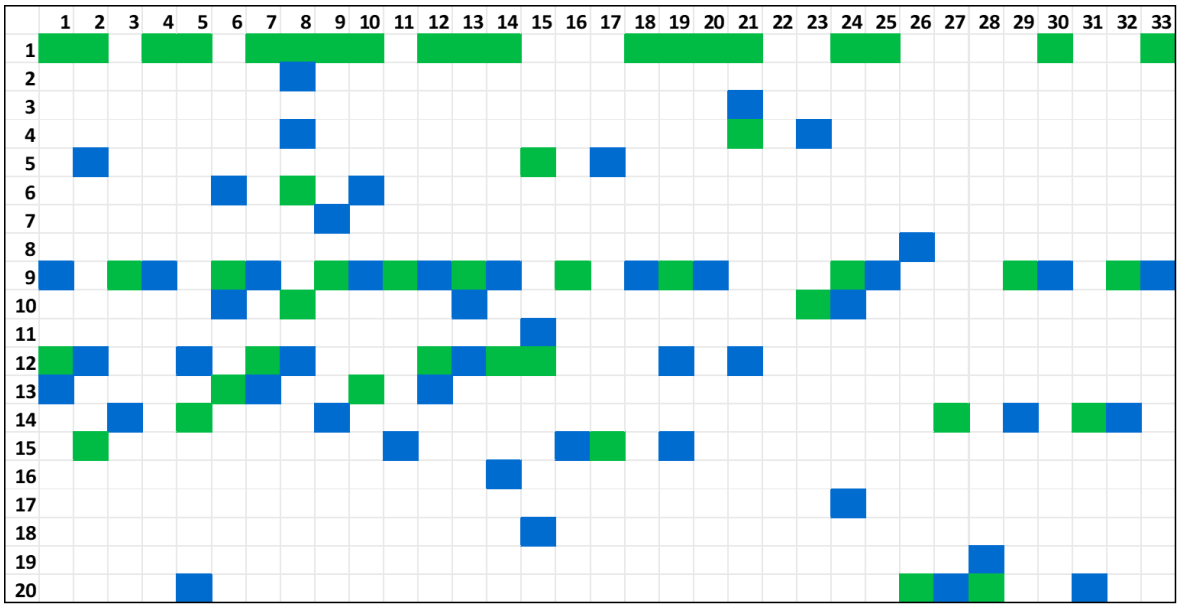
Kablosuz duyarga ağları düşük güçlü ve kayıpların çok olduğu ağlardır. Kullandıkları frekans bandı nedeniyle de iç ve dış girişimlere sıklıkla maruz kalırlar. Bu nedenle çizelgeleme yapılırken düğümlerin paket kaybı yaşanması durumu göz önüne alınarak ek kaynak tahsis etmeleri bir çözüm olarak düşünülebilir. Ancak; ekstra kaynakların alınması ağ için 2 tür sorun oluşturur. (1) ileriye dönük olarak ihtiyaç duyulması halinde kullanılacak olan bu hücreler, başka düğümlerin iletmek istedikleri veri paketlerinin gecikmesine neden olur (2) gerekmedikçe kullanılan her kaynak ağın kapasitesinin düşmesine neden olur.

Şekil 59'da TASA algoritmasının Döner yönlü anten sistemine uyarlanması sonucu oluşan çizelge görülmektedir. Çizelge 20 düğümden oluşan ve düğümlerin senaryoya rastgele yerleştirildiği bir senaryo için üretilmiştir. Ağ içerisinde kullanılabilir frekans kaynağı sayısı 1 olarak alınmıştır. Her bir düğümün saniyede bir paket ürettiği varsayılmıştır. Ağda bulunan tüm düğümlerin ürettiği verilerin toplayıcı düğüme ulaşması için 33 zaman diliminden oluşan bir çerçeve gerekmiştir. Çizelgede satırlar her bir düğümü belirtirken, sütunlar ise zaman dilimini ifade eder. Mavi renkli kutucuklar gönderim yapıldığını, yeşil kutucuklar ise alım yapıldığını gösterir. 1 numaralı düğüm toplayıcı düğüm olduğu için sadece alım yapmaktadır ve yeşil renkli hücrelere sahiptir.



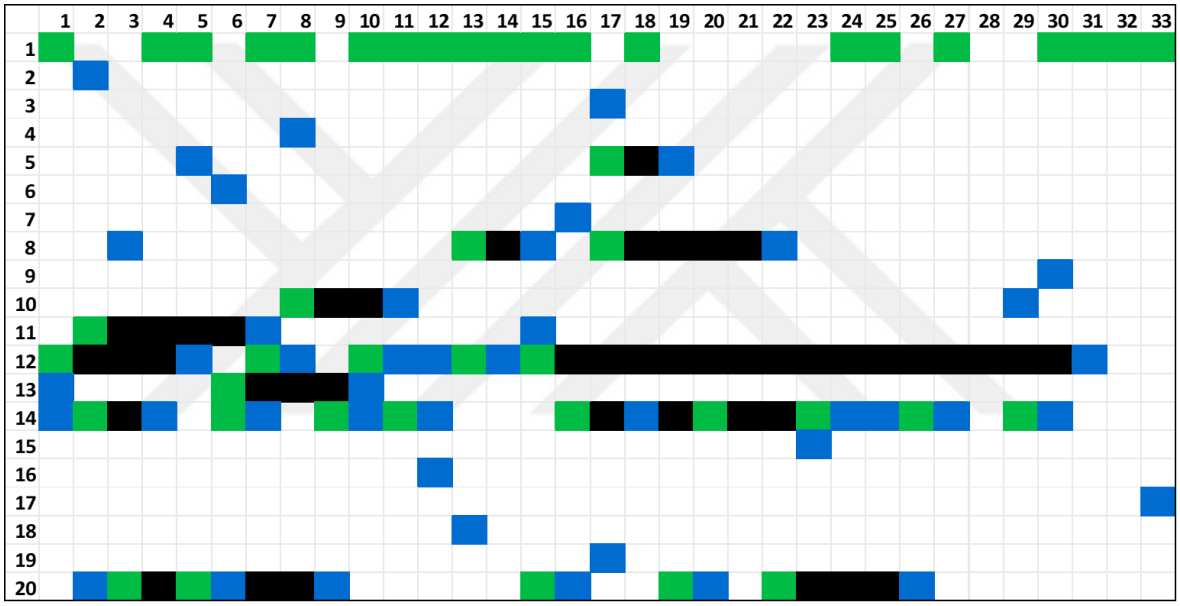
Şekil 59. Optimize edilmemiş TASA algoritmasının çıktısı

Şekil 60'ta ise TASA algoritmasının minimum gecikme sağlayacak şekilde optimize edilerek kullanılması sonucu oluşan çizelge verilmiştir. İyileştirmeye çalışılan özellik yeşil kutucuktan sonra gelen mavi kutucuk arasında geçen sürenin olabildiğince kısa olmasını sağlamaktır. Şekil 59'da verilen çizelge ile karşılaştırıldığında bu sürelerin kısaldığı görülmektedir. Özerk hücrelerin varlığı ve komşuların durumları dikkate alındığında yeşil ve mavi kutucuklar arasındaki süre sıfır olamamaktadır.



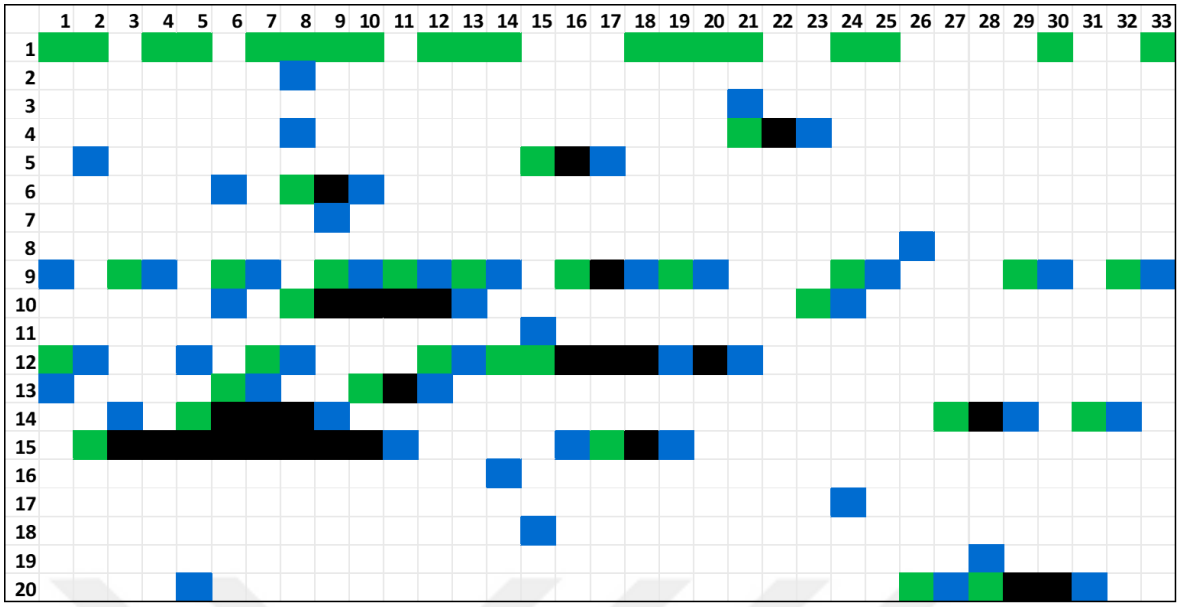
Şekil 60. Optimize edilmiş TASA algoritmasının çıktısı

Şekil 61'de optimize edilmemiş TASA algoritması sonucu oluşturulan çizelgede yaşanan gecikmeler siyah renkli olarak gösterilmiştir. Ağ içi yaşanan gecikme çerçeve uzunluğu ve veri paketlerinin röle düğümlerin tampon belleklerinde beklediği sürelerden etkilenmektedir. Bu kısımda odaklanılan nokta paketlerin tampon bellekte geçirdikleri süreyi göstermektir. Yaprak düğümler sadece kendi ürettikleri veri paketlerini ilettiklerinden dolayı tampon belleklerinde başka düğümlerden gelen veri paketleri bulunmaz, dolayısıyla yaşanan ağ gecikmesine etkileri olmamaktadır. 11, 12, 14 numaralı düğümler gibi üzerinden fazla trafik geçen düğümlerin doğru çizelgelenmesi düşük ağ gecikmesi elde etmek bakımından önemlidir.



Şekil 61. Optimize edilmemiş TASA algoritmasının çıktısı (gecikmeler)

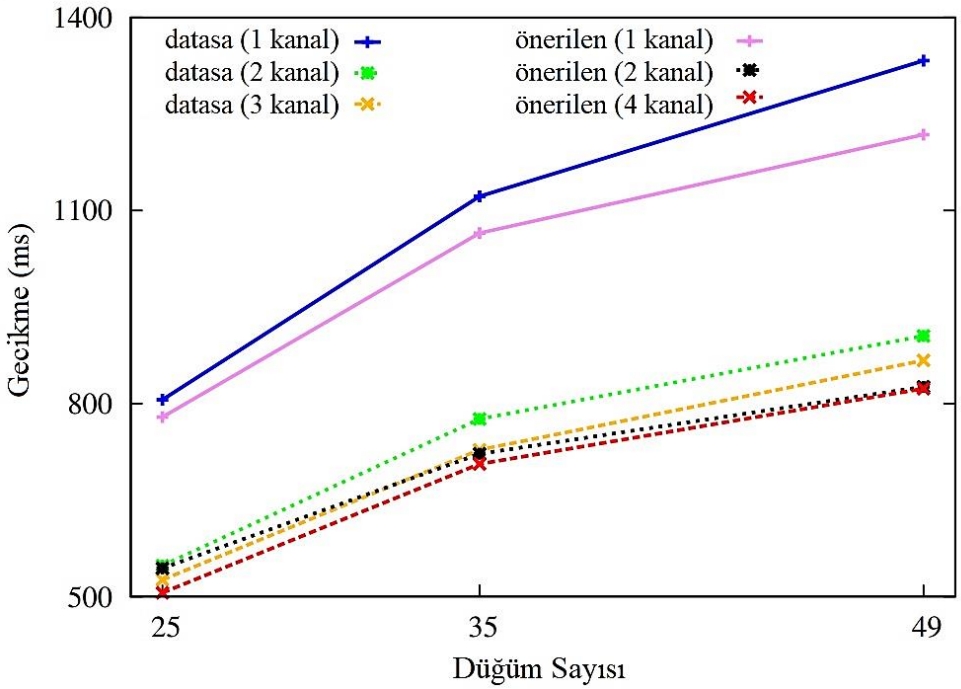
Şekil 62'de ise uçtan uca gecikme süresinin iyileştirildiği TASA algoritmasının çıktısına göre yaşanan gecikmeler gösterilmiştir. Siyah olan hücrelere bakıldığında Şekil 61'de 44 adet siyah hücre varken, Şekil 62'de siyah hücre sayısının 32'ye düştüğü görülmektedir. TASA algoritması düğüm bazlı çizelgeleme yapan ve sadece düğümlerin o andaki trafik miktarlarını göz önüne alan aç gözlü bir algoritmadır. Algoritma herhangi bir adımında iletim yapacak düğümleri belirlerken öncelik olarak trafik miktarı yerine bir önceki adımda alım yapmış olan düğümlere öncelik vermesi durumunda şekilde görüldüğü gibi daha az bir gecikme elde edecek şekilde çizelge üretir.



Şekil 62. Optimize edilmiş TASA algoritmasının çıktısı (gecikmeler)

Şekil 63'te senaryoda bulunan düğüm sayısının artmasına bağlı olarak, Uyarlanmış TASA algoritması (Datasa) ortam erişim katmanı gecikmesi iyileştirilmiş versiyonu ile farklı sayıda kullanılabilir frekans kaynağı olması durumuna göre elde edilen gecikme süreleri verilmiştir. Çizelgelemenin düğüm bazlı yerine paketlerin izlediği yol tabanlı oluşturulması yaşanan gecikme sürelerinde 10-15% arasında bir iyileştirme sağlamıştır.

Düğümler bir veri paketi oluşturduklarında bu veri paketini iletişim ortamına iletilebilmek için ilgili TX hücresinin gelmesini bekler. Veri paketinin düğümün kendi tampon belleğinde geçirdiği bu süre çizelgenin uzunluğu ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla ortam erişim katmanında yaşanan gecikme süresinde sağlanan bu iyileşmenin toplam ağ gecikme süresine etkisi sınırlı olmuştur. Frekans kaynağı sayısının arttırılması çizelge uzunluğunu kısalttığı için toplam ağ gecikme süresine etkisi daha belirgin olmaktadır. Düğüm sayısının artması veri trafiğini arttırdığı için daha uzun bir çizelge oluşmasını, dolayısıyla daha yüksek bir gecikme yaşanmasına neden olmaktadır. Kısıtlı frekans kaynağına sahip olunduğunda önerilen algoritmanın performans iyileştirmesinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir.



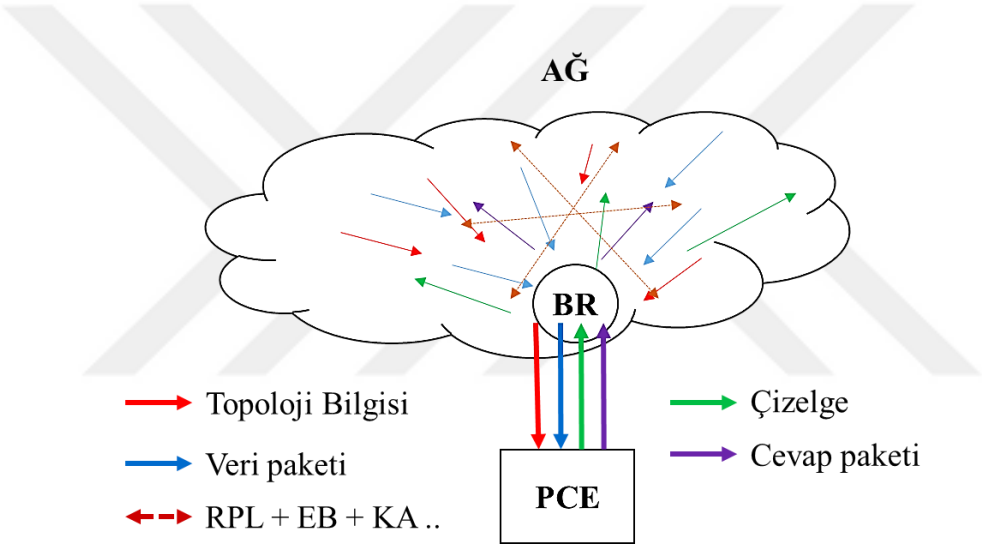
Şekil 63. Düğüm sayısına bağlı yaşanan gecikme süreleri

Sonuç olarak; Döner yönlü antenler kapsama alanının dar olması nedeniyle çarpışma ve girişime daha az maruz kalırlar. Özerk tahsis edilen hücreler sayesinde kontrol mesajları için ek bir mekanizma oluşturulur. Özerk tahsis edilmiş hücreler çarpışma ve girişime daha az maruz kalırlar. Bu durum ağdaki kontrol mesajlarının daha sağlıklı iletilmesine neden olur. Merkezi çizelgeleme algoritması kullanıldığında ağda bir değişiklik olduğunda yeniden çizelge oluşturulup tüm düğümlere dağıtılması ağın büyüklüğü, maksimum atlama (hop) sayısı, düğümlerin komşu sayıları gibi parametrelere göre değişmekle beraber görece olarak uzun bir zaman almaktadır. Bu zaman içerisinde düğümlerin tampon bellekleri dolmakta ve veri kaybı yaşanmasına neden olmaktadır. Merkezi çizelgelemenin, az düğümden oluşan ve durgun ağlarda, frekans kaynağının kısıtlı olduğu ve ağ içi yaşanan gecikmenin önemli olduğu durumlarda kullanılması uygundur.

6.3. Çift Yönlü Merkezi Çizelgeleme

Merkezi çizelgeyi Şekil 64'te görüldüğü üzere ağın dışında yer alan yol hesaplama elemanı (Path Computation Element) oluşturur. Ağda bulunan düğümler PCE ile sınır yönlendiricisi (Border Router) aracılığıyla haberleşir. Sınır yönlendirici, ağ ile dışarısı

arasındaki ağ geçididir ve ayrıca ağda RPL kök düğüm görevi görür. Her bir düğüm komşularını, seçtikleri ata düğümü ve bu düğümler ile hangi açıdan haberleştiği bilgisini periyodik olarak ya da bir değişiklik olduğunda olay tabanlı olarak BR'ye iletirler. PCE tarafından üretilen çizelge ise BR'den ilgili düğümlere iletilir. Düğümler çizelgeyi aldıktan sonra veri paketi göndermeye başlarlar, ve PCE tarafından oluşturulan cevap paketi tahsis edilmiş hücrelerden ilgili düğüme geri gönderilir. Ayrıca, 6TiSCH ağında gönderilmesi gereken EB, RPL, KA paketleri düğümler ve komşuları arasında gönderilmeye devam eder. Merkezi çizelgeleyici, ağ hakkında gerekli tüm bilgileri aldıktan sonra en uygun çizelgeyi oluşturur ve ardından tüm ağa dağıtır. Bu nedenle, diğer çizelgeleme mekanizmalarından daha kompakt ve verimli bir çizelge üretir.



Şekil 64. Düğümler arası mesaj paketi trafiği

Çizelgeleyici, düğümlerin birbirine göreli açılarını ve her bir düğüm tarafından oluşturulan trafik miktarını dikkate alarak yön ve trafiğe duyarlı çizelge oluşturur. Çift yönlü çizelge, sıralı bir algoritma ile oluşturulur, hücreler, uçtan uca gecikmeyi azaltmak için kaynak düğüm tarafından oluşturulan paket toplayıcı düğüme ulaşana kadar yol boyunca sıralarına göre (yaprak düğümlerden başlayarak) birer birer tahsis edilir ve ardından PCE tarafından oluşturulan cevap, aynı yolu izleyerek kaynak düğüme geri iletilir. Her bir düğüm ile komşuları arasında ek provizyon hücreleri tahsis edilir ve gerektiğinde kontrol paketleri diğer zamanlarda ise veri mesaj paketleri bu hücreler kullanılarak iletilir. Yüksek bant genişliği elde etmek için mümkün olduğunca paralel iletimlere izin verilir ve topoloji ve trafik değişiklikleri göz önünde bulundurulur.

Algoritma 10'da PCE tarafından alınan paketin ayrıştırılması algoritması verilmiştir. Mesaj içerisinde düğümün ata düğüm tanımlayıcısı, komşu listesi, trafik ihtiyacı ve komşuları ile olan yön bilgileri bulunur. P listesinde her bir düğümün ata düğümü tutulur. T listesi ise her bir düğümün trafik ihtiyacı miktarını tutar. D iki boyutlu bir matristir ve her bir düğüm için tüm komşularıyla olan yön bilgisini tutar. C iki boyutlu matris ise çizelgeleme aşamasında kullanılmak üzere bir düğümün 1-hop uzaklığındaki komşularını gösterir. C matrisine yeni bir eleman ekleneceğinde düğümlerin kontrol paketlerini alma/gönderme işlemlerinde kullanılmak üzere ek provizyon hücreleri tahsis edilir. C ve D matrisleri kullanılarak düğümlerin I (interference) girişim matrisi oluşturulur. Tüm düğümlerden ağ yapısı hakkında bilgi alındıktan sonra çizelge oluşturulur.

Algoritma 10 PCE tarafından mesaj paketinin ayrıştırılması

Input: pkt ▷ received message packet
Output: rsp ▷ response for target node
1: id, N, t, p ← parse(pkt)
2: P[id] ← p ▷ P keeps parent matrix
3: T[id] ← t ▷ T keeps traffic matrix
4: **for each** n in N **do** ▷ N keeps node's neighbors
5: D[id][n.id] ← n.dir ▷ D keeps direction matrix
6: C[id][n.id] ← true ▷ C keeps connection matrix
7: **if** n is inserted into C first time **then**
8: type ← ONE_TO_ONE
9: allocate_cell (id,n.id,type,0) ▷ TX slot for id, RX slot for n.id
10: allocate_cell (n.id,id,type,0) ▷ 0 refers to first slot
11: **end if**
12: I[id] ← build_int_matrix (id, C, D) ▷ I keeps interference matrix
13: **if** each node has a parent **then**
14: s← schedule(id)
15: **return** s
16: **end if**
17: **end for**

Paket ayrıştırma algoritması merkezi çizelgeleyici tarafından bir paket alındığında çalıştırılmaktadır. Çizelgeleme yapma fonksiyonu ise sadece ağ yapısında bir değişiklik olduğunda çalıştırılır. Algoritma paketi gönderen düğümün her bir komşusu için girişim matrisini oluşturur. Bir düğümün n adet komşusu olabilir, ve her bir komşusun benzer şekilde n adet komşusu olabilir. Dolayısıyla algoritma karmaşıklığı Θ (n*n) olmaktadır.

Algoritma 11'de verilen algoritma öncelikle düğümleri toplayıcı düğümden uzaklıklarına göre sıralar ve kök düğüme en uzak düğümlerden çizelgeleme oluşturmaya başlar. Düğümlerin trafik ihtiyaçları sıfırlanana kadar sırasıyla çizelgeleme yapar. Algoritma, gecikmeyi en aza indirerek trafiği toplayıcı düğüme ulaşana kadar her düğüm için hücreleri sırayla tahsis eder ve ardından yanıt aynı yolu izleyerek kaynak düğüme geri iletilir. Kaynak düğümden toplayıcı düğüme ulaşıncaya kadar izlenen yol bir yığıt veri yapısında saklanır, böylece cevabın aynı yoldan geri dönmesi mümkün olur.

Algoritma 11 Merkezi çizelgeleme algoritması

```
Input: id                                              ▷ node id
Output: s                                              ▷ schedule of node
1: list ← sort(P)                                      ▷ sort nodes w.r.t their rank
2: while ∀T ≠ 0 do                                     ▷ until all traffic scheduled
3:     for each n in list do
4:         if T[n] ≠ 0 then
5:             src ← list[n]
6:             dst ← P[list[n]]
7:             i ← 0                                   ▷ seach from beginning
8:             type ← PATH
9:             while dst ≠ ∅ do                        ▷ until dst is sink
10:                i ← allocate(src, dst, type, i)
11:                push(src, dst)                      ▷ save the path
12:                src ← dst                           ▷update source for next link
13:                dst ← P[dst]                        ▷update destination for next link
14:            end while
15:            while src,dst ← pop() do                ▷reverse path
16:                i ← allocate(dst, src, type, i)
```

```
17:                 end while
18:                 decrement T[n]
19:             end if
20:         end for
21: end while
```

Düğümler sadece bir adet radyo kaynağına sahiptir, dolayısıyla aynı anda gönderim ya da dinleme yapabilirler. C bağlılık matrisi bu durumu kontrol etmek amacıyla kullanılır. Bir düğüm gönderim yapacağında aynı yöne doğru hiçbir komşusunun gönderim yapmak üzere çizelgelenmemesi gerekir, bu durum I girişim matrisi kullanılarak kontrol edilir. Kullanılabilir frekans kaynağı sayısı ise mümkün olduğunca paralel iletişime izin vermek için kullanılır. Merkezi çizelgelemenin kaynak tahsis algoritması Algoritma 12'de verilmiştir.

Algoritma 12 Hücre tahsis etme algoritması

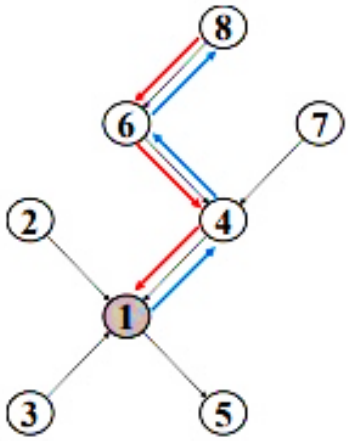
```
Input: src                                          ▷ source node
Input: dst                                          ▷ destination node
Input: type                                         ▷ ONE-TO-ONE or PATH
Input: start                                        ▷ where to start searching
Output: cell                                        ▷ first available cell
1: cell ← null
2: for sl ← start to MAX_SLOTS do
3:     if src or dst is scheduled for sl then
4:         continue                                 ▷ try next slot
5:     end if
6:     for ch ← 1 to MAX_CHANNELS do
7:         list ← get scheduled cells for (sl,ch)
8:         if src or dst interfere with list then
9:             continue                             ▷ try next channel
10:        else
11:            ch ← hash(src, dst)
12:            cell ← create(sl, src, dst, ch, type)
```

```
13:                 insert cell to S                ▷ S keeps the schedule
14:                 return cell
15:             end if
16:         end for                                 ▷ try next slot
17: end for
```

Hücre tahsis algoritması verilen zaman diliminden başlayarak çerçeve boyunca kaynak ve hedef düğüm için çakışma yaratmayacak bir hücre bulmak için taranır. Uygun bir zaman dilimi bulunduğunda girişime neden olmamak için kullanılmayan bir frekans kanalı aranır. Çerçeve uzunluğu m, frekans kanal sayısı n olsun. Hücre tahsis etme algoritma karmaşıklığı Θ (m*n) olmaktadır.

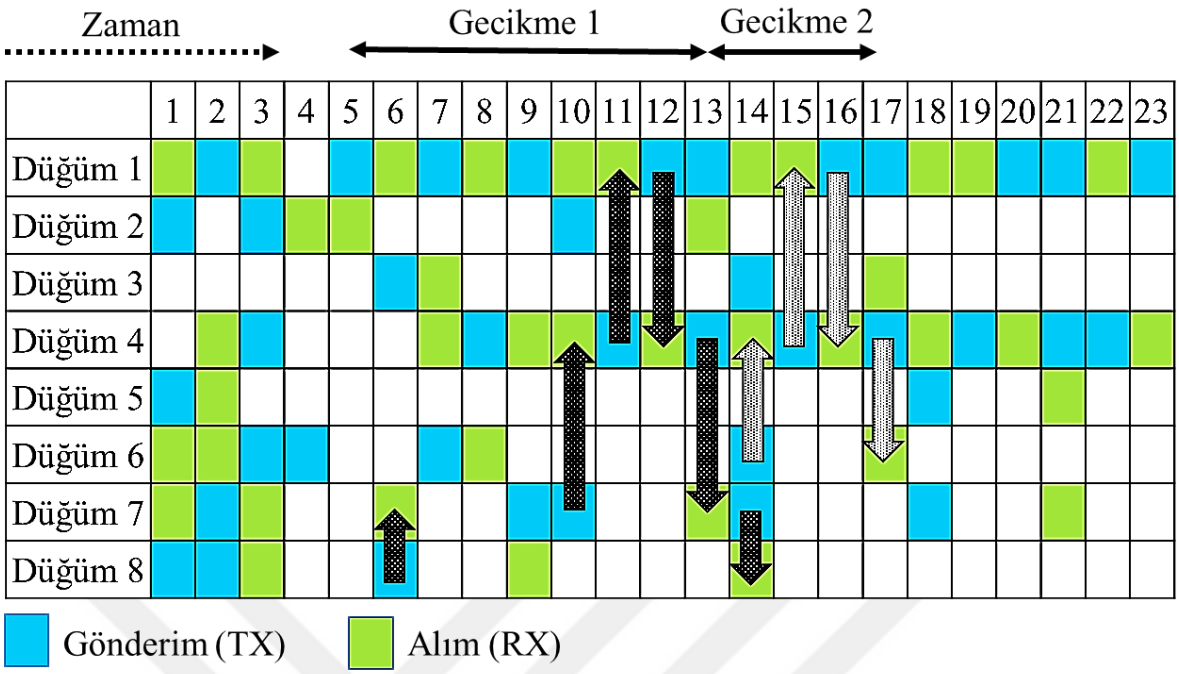
Merkezi çizelgele algoritması tüm düğümlerin trafik ihtiyacı karşılanana kadar, ağda bulunan tüm düğümler için veri paketinin kaynak düğümden toplayıcı düğüme iletilmesine kadar hücre tahsisi yapar. Toplam trafik ihtiyacı k, düğümün toplayıcı düğüme uzaklığı l olsun. Algoritma karmaşıklığı Θ (m*n*k*l) olur. Önerilen algoritmanın karmaşıklığı TASA algoritmasına göre büyüktür. Bunun nedeni, TASA algoritması aç gözlü bir algoritmadır ve çerçeveyi adım adım oluşturarak çalışır. Önerilen algoritma ise daha iyi bir çizelgeleme yapmak adına her seferinde çerçevenin başından itibaren uygun bir hücre arar. Çizelgeleme algoritması sadece ağ yapısı değiştiğinde tekrar çalıştırıldığından ve oluşturulan çizelgenin düğümlere iletilmesi algoritma çalışma zamanına kıyasla çok daha uzun sürdüğü için algoritma karmaşıklığının kabul edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmiştir.

Algoritmanın doğruluğunu test etmek amacıyla Şekil 65'te verilen 8 düğümden oluşan örnek bir senaryo oluşturulmuştur. 1 numaralı düğüm sınır yönlendiricisi temsil etmekte, diğer düğümler ise kaynak düğümleri göstermektedir. Kırmızı çizgi 8 numaralı düğümden çıkan paketin izlediği yolu gösterirken, mavi çizgi ise PCE tarafından verilen cevabın 8 numaralı düğüme iletilmesini göstermektedir.



Şekil 65. Örnek bir ağ yapısı

Verilen senaryo için çizelgeleyici tarafından oluşturulan örnek çizelge Şekil 66'da verilmiştir. Zaman soldan sağa doğru akmaktadır. "Gecikme 1" 8 numaralı düğümün oluşturduğu mesaj paketinin kök düğüme ulaşıp, cevabın tekrar kendisine dönmesi için geçen süreyi göstermektedir. "Gecikme 2" ise 6 numaralı düğümün oluşturduğu mesaj paketinin kök düğüme ulaşıp, cevabın tekrar kendisine dönmesi için geçen süreyi göstermektedir. Siyah ve gri oklar mesaj paketi iletilirken hangi hücrelerin kullanıldığını göstermektedir. Mavi renkli düğümler gönderim yapıldığını, yeşil renkli düğümler ise alım yapılan hücreleri göstermektedir.



Şekil 66. Örnek bir çift yönlü ve sıralı çizelgeleme çıktısı

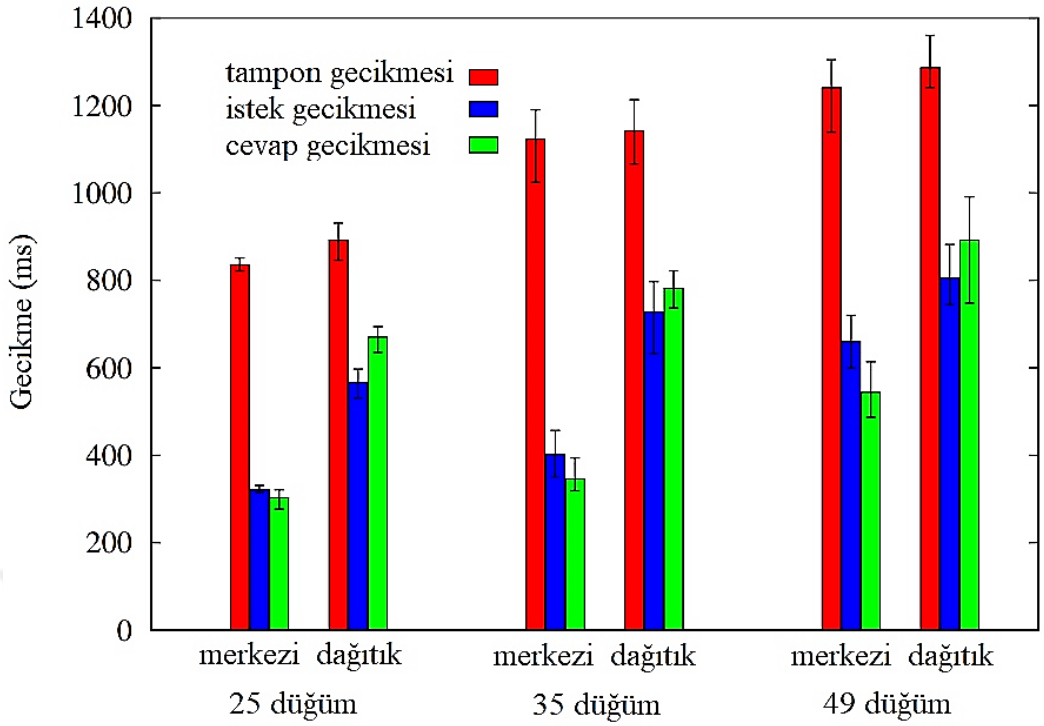
Bu bölümde testler 25, 35, ve 49 düğümden oluşan ağlar üzerinde koşulmuştur. Her bir düğüm yatay düzlemde x ve y eksenlerinde birbirlerinden eşit mesafe uzaklıkta (40 m) yerleştirilmiştir. RPL kök görevi gören toplayıcı düğüm ağın ortasında yer almaktadır. Her düğümün veri iletmek için bir adet ata düğüme ve birden fazla paket aldığı çocuk düğümü vardır. Düğümlerin yerleşimi ve antenlerin kapsama alanlarına göre düğümlerin 3 ile 8 adet arasında komşuları olmaktadır. Tüm veri paketleri, sadece tek bir yönde ve toplayıcı düğüme (sınır yönlendiricisi) doğru iletilir. Düğümler, senaryoya bağlı olarak bir adet döner yönlü antene sahip olabilir. Toplayıcı düğüm ise 3 farklı örüntüye sahip Anahtarlanabilir huzme antene sahiptir. Testlerde kullanılan parametreler Tablo 6'da verilmiştir. Test sonuçları dikkate alınarak senaryoda bulunan düğüm sayısının yeterli olduğu görülmüştür. Testler simülasyon aracında bulunan rastgele tohum (random seed) değeri değiştirilerek 10 kere koşulmuş ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Kullanılabilir frekans kaynağı sayısı aksi belirtilmedikçe 1 olarak alınmıştır.

Tablo 6. Merkezi çizelgeleme algoritması testleri konfigürasyon ayarları

Parametreler	Değerler
Çerçeve uzunluğu (dağıtık)	101
Çerçeve uzunluğu (merkezi)	Senaryoya bağlı
Zaman dilimi uzunluğu	15 ms
Paylaşımlı hücre sayısı	2
İletim mesafesi (tüm yönlü)	50 m
İletim mesafesi (tüm yönlü)	100 m
İletim mesafesi (akıllı anten)	15 m – 80 m
Düğümler arası mesafe	40 m

Önerilen çözüm kullanıldığında, Şekil 67'de verilen grafikte görüldüğü üzere dağıtık çizelgeleme yaklaşımına kıyasla daha düşük gecikme sonuçları elde etmiştir. Uçtan uca gecikme 3 kısımda ele alınabilir. (1) Tampon bellek gecikmesi, mesaj paketi oluşturulduktan sonra ilgili TX hücresi gelene kadar geçen süreyi gösterir. Tampon bellekte gönderilmeyi bekleyen başka paketler varsa, son oluşturulan paket bir sonraki TX hücresini bekler. (2) Veri gönderilme gecikmesi, oluşturulan mesaj paketinin TX hücresinden iletilmesinden kök düğüne ulaşmasına kadar geçen süreyi gösterir. Mesaj paketi röle düğümler üzerinden aktarılarak iletildiği için paket bir süre röle düğümlerinin tampon belleklerinde bekler ve gecikme uzun sürebilir. (3) Yanıt gecikmesi ise, PCE'nin yanıt paketinin ilgili düğüme iletilmesine kadar geçen süreyi gösterir.

Tampon bellek gecikmesi, zaman dilimi çerçevesinin uzunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Ağ büyüdükçe, merkezi çizelgeleyici tarafından oluşturulan çizelge büyür ve dolayısıyla tampon bellek gecikmesi orantılı olarak artar. Testlerde dağıtık çizelgeleme için çerçeve uzunluğu 101 olarak alınırken, merkezi çizelgeleyici, senaryoya bağlı olarak uzunlukları 113 ile 173 arasında olan çizelgeler oluşturmuştur.



Şekil 67. Düğüm sayısı ve çizelgelemeye bağlı gecikme süreleri

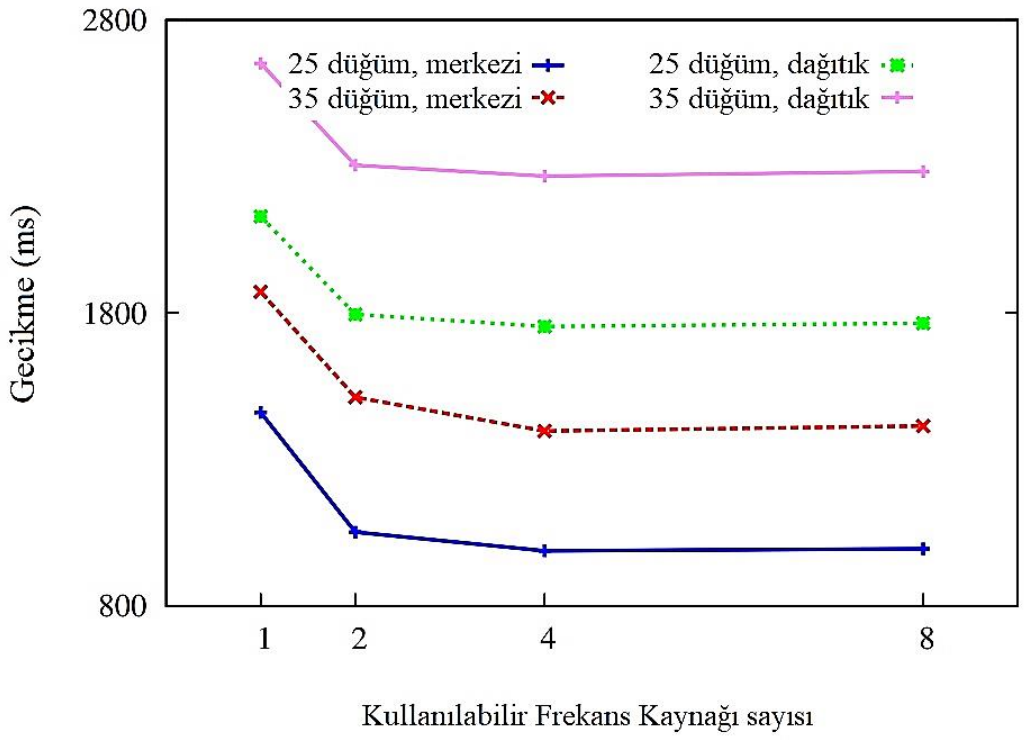
Merkezi çizelgeleme kullanılması durumunda, yanıt gecikmesi, istek gecikmesinden daha kısadır. Özerk olarak tahsis edilen hücreler, ilk olarak çizelgelendikleri için çerçevenin başında yer alırlar, dolayısıyla dönüş yolunda çerçevenin sonuna doğru gelindikçe ihtiyaç duyulan boş hücreler daha kolay bulunabilir. Ancak bu durum hücrelerin rastgele alındığı dağıtık çizelgeleme için geçerli değildir. Dağıtık çizelgelemenin en önemli dezavantajı, hücreleri rastgele seçtiği için düşük uçtan uca gecikme süresi elde edilememesidir. Hücrelerin rastgele seçilmesi çizelgenin çarpışmasız olmadığı ve düşük gecikme için optimize edilmediği anlamına gelir. Grafikte görüldüğü üzere ve beklenilen şekilde ağ büyüdükçe atlama sayısı (hop count) arttığından, daha uzun istek ve yanıt gecikmeleri elde edilir.

Bununla birlikte, akıllı anten tabanlı çözümler, ağın kararlılığını artırmak için komşu düğümler arasında kontrol paketleri iletmek/almak için sisteme ek yük getiren özerk olarak çizelgelenmiş hücreleri kullanır. Bu nedenle, çerçeveye özerk hücrelerin de dahil edilmesi daha uzun çizelge üretilmesine neden olur. Bu durum tampon bellek gecikmesinin yüksek olmasına neden olur. Öte yandan, özerk hücreler tampon bellekte kontrol paketi olmadığında veri paketlerinin gönderilmesine izin verir, bu durum yapılan yol tabanlı sıralı hücre

alınmasını bozduğu için istek/yanıt paketlerinin MAC katmanı gecikmelerinin beklenenden uzun ve değişken olmasına neden olmaktadır. Ancak; bu olumsuz duruma rağmen grafik incelendiğinde merkezi çizelgelemenin dağıtık çizelgelemeye göre daha kararlı olduğu söylenebilir.

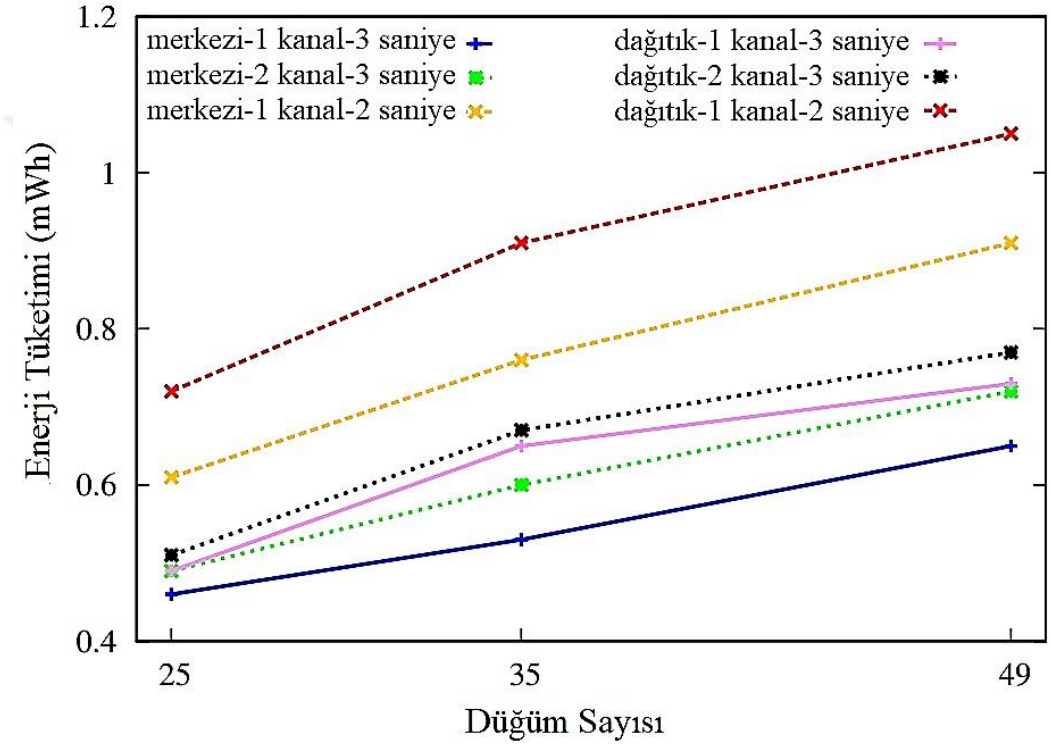
Dağıtık çizelgeleme, hücreleri yol boyunca değil, rastgele olarak tahsis ettiğinden, gecikme süreleri bakımından merkezi çizelgelemeye göre daha fazla standart sapmaya sahiptir. Değişken ve daha uzun gecikmelerin bir başka nedeni de, hücreler rastgele tahsis edildiğinden, bir paketin bir sonraki çerçevede gönderilmesi için beklenmesidir.

Şekil 68, Döner yönlü antene sahip olunduğunda merkezi ve dağıtık çizelgeleme yaklaşımları için farklı sayıda kullanılabilir frekans kanalı ve ağ büyüklüğü bakımından yaşanan uçtan uca gecikmeyi göstermektedir. Kullanılabilir frekans kanallarının sayısının arttırılması, daha kısa çizelgelerin oluşturulmasına izin verir ve yaşanacak girişimi/çarpışmayı azaltır. Dolayısıyla daha düşük gecikme süreleri elde edilir. Ancak frekans kanal sayısı 2'den fazla ise, akıllı ve yönlü antenler uzamsal ayrımdan yararlandığından, geleneksel anten kullanan çözümlerde olduğu ölçüde fayda sağlamamaktadır.



Şekil 68. Frekans kaynağı sayısına göre yaşanan gecikme süreleri

Şekil 69, Döner yönlü antene sahip olunduğunda farklı kullanılabilir frekans kaynağı sayısı, veri gönderim aralıkları ve ağ büyüklüğüne göre her bir düğüm tarafından tüketilen ortalama enerjiyi göstermektedir. Ortalama enerji tüketimi, radyonun ON, TX ve RX modlarında geçirdiği süre dikkate alınarak hesaplanmıştır. Görev döngüsü, önemli ölçüde ağ trafiği yüküne ve ağ topolojisine bağlıdır. Ayrıca çarpışma ve girişimler tüketilen enerji miktarını olumsuz yönde etkiler. Test sonuçlarına göre merkezi çözümün, dağıtık çizelgelemeye karşı 20%'ye varan enerji tasarrufu sağladığı görülmektedir.



Şekil 69. Düğüm sayısına bağlı ortalama enerji tüketimi grafiği

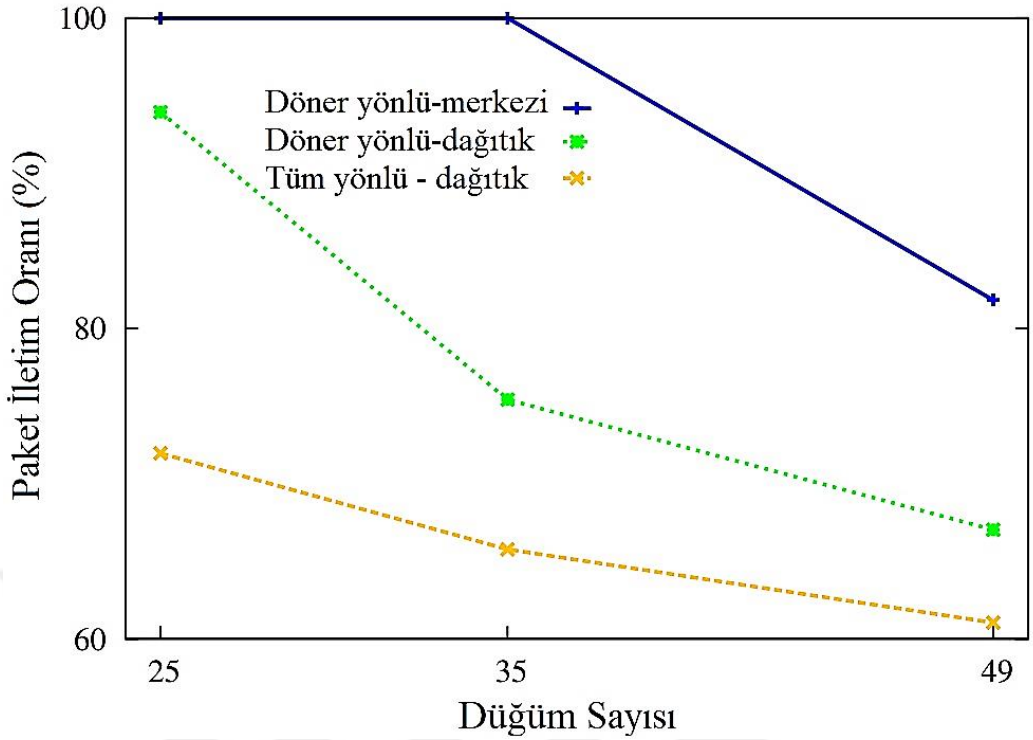
Frekans kanallarının sayısı arttıkça daha kısa bir çizelge oluşturmak mümkündür. Daha kısa bir çizelge, bant genişliğini artırır ve ağı hataya karşı daha dayanıklı hale getirir, ancak aynı zamanda düğümlerin daha fazla enerji tüketmesine neden olur. Merkezi çizelgeleyici, farklı sayıda mevcut kanala sahip farklı anten konfigürasyonları için farklı uzunluklarda çizelgeler oluşturur. Benzer şekilde, kullanılabilir frekans kanallarının sayısı arttığında, aynı anda daha fazla bağlantı çizelgelenebilir, bu nedenle, beklendiği gibi, her iki çizelgeleme türü için çerçeve uzunluğu kısalır. Öte yandan, akıllı yönlü bir antene sahip olmak, yeterli frekans kaynağı olmadığı durumlarda çizelgeleyicinin daha fazla paralel

iletim planlamasına olanak tanır. Ek olarak, akıllı yönlü anten, daha uzun iletim aralığına sahip olduğu için ağdaki atlama miktarını (hop count) düşürmeye izin verir.

Dağıtık çizelgeleme çözümünde hücreler rastgele alındığı için, oluşturulan çizelge çarpışma ve girişimlere açıktır. Bu durum, tekrar gönderimler nedeniyle ağda daha fazla enerji tüketimine neden olur. Ek olarak, zaman içinde trafiğe bağlı olarak ek hücre alımları ya da çakışma girişimler nedeniyle tahsis edilen hücrelerin değiştirilmesi gerekebilir.

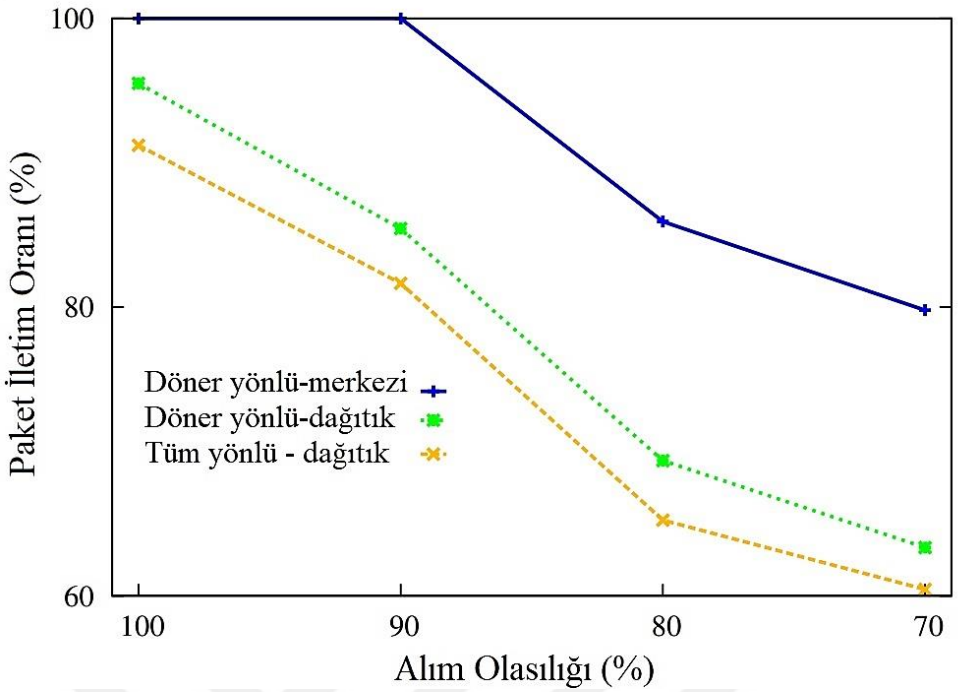
Veri iletim aralığı azaldıkça beklendiği gibi tahsis edilen TX ve RX slotları daha fazla kullanılmakta ve bu da daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Tampon bellekte bekleyen paket olmadığında, düğüm bir TX hücresi olsa dahi iletim yapmaz. RX hücrelerinde ise veri iletilmesi ihtimaline karşı düğümler radyolarını açarlar. Bu durum enerji tüketimini arttırır.

Şekil 70'te artan düğüm sayısına bağlı olarak farklı anten konfigürasyonları ve çizelgeleme türüne göre elde edilen paket iletim oranları verilmiştir. Düğümlerin iki saniyede bir adet veri ürettiği varsayılmıştır. Senaryoda bulunan düğüm sayısının artması veri trafiğini arttırdığından dolayı kaynak ihtiyacını arttırmaktadır. Dolayısıyla yeterli kaynak bulunamaması durumunda paket iletim oranı azalmaktadır. Döner yönlü antene sahip düğümlerin daha az kaynak tüketmeleri nedeniyle paket iletim oranı tüm yönlü antene sahip düğümlere göre daha yüksektir. Tüm yönlü antene sahip düğümler, senaryo büyüdükçe daha çok kaynak ihtiyacı duymaktadırlar.



Şekil 70. Düğüm sayısına bağlı paket ilerim oranları

Şekil 71'de değişen alım olasılığı (Receive probability) değerlerine bağlı olarak farklı anten konfigürasyonları ve çizelgeleme türüne göre elde edilen paket iletim oranları verilmiştir. Düğümlerin üç saniyede bir adet veri paketi ürettiği varsayılmıştır. Alım olasılığı düştükçe paket geri gönderimleri artmaktadır, bu durum veri trafiğini arttırdığından dolayı düğümlerin daha fazla kaynak ihtiyacı duymasına neden olur. Yeterli kaynak bulunamaması durumunda ise paket iletim oranı azalmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere ve beklenildiği gibi alım olasılığı düştükçe paket iletim oranı da düşmektedir. Merkezi çizelgeleme algoritması daha kısa bir çizelge oluşturduğundan dolayı veri üretim aralığında daha fazla hücre kullanabilmektedir dolayısıyla dağıtık çözümlere oranla daha iyi bir performans sergilemektedir.



Şekil 71. Alım olasılığına bağlı paket ilerim oranları

Bu bölümde; önerilen merkezi çizelgeleme algoritması dağıtık çizelgeleme ile döner yöblü anten konfigürasyonuna göre performans açısından karşılaştırılmıştır. Paket ilerim oranı, enerji tüketimi ve uçtan uca gecikme performans ölçütlerine göre merkezi çizelgeleme algoritmasının daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ancak; merkezi çizelgeleme ölçeklenebilir olmadığından testler 25, 35 ve 49 düğümden oluşan ağlar üzerinde koşulmuştur. Ağ topolojisi hakkında bilgi paketlerinin toplayıcı düğüme belirli zaman aralıklarında gönderilmesi ve oluşan çizelgenin ağdaki tüm düğümlere dağıtılması ağ içi trafiği arttırmaktadır. Bu nedenle merkezi çizelgelemenin durağan ve küçük ağlarda uygulanabilir olduğu gözlenmiştir.

Tablo 7'de farklı büyüklükteki ağlar için merkezi ve dağıtık çizelgeleme algoritmaları iki tür anten konfigürasyonu için ağ içi yaşanan gecikme süreleri bakımından karşılaştırılmıştır. En düşük gecikmeyi veren yöntem tüm yönlü antenlerin merkezi çizelgelenmesi sonucu elde edilmiştir. Ağ büyüklüğü arrtıkça tüm yönlü antenler döner yönlü antenlere göre performans açısından daha kötü etkilendiği görülmektedir. Bu durum döner yönlü antenlerin sahip olduğu özerk çizelgelemenin sisteme getirdiği ek yükten kaynaklanmaktadır, düğüm sayısı arttıkça bu ek yükün sisteme maliyeti oransal olarak azalmaktadır. Dağıtık çizelgelemede benzer şekilde 25 ve 35 düğümden oluşan ağlar için

koşulan testlerde döner yönlü antene göre daha iyi performans sergilemiştir, ancak 49 düğümden oluşan senaryoda döner yönlü antenden daha uzun bir gecikme yaşanmıştır. Dağıtık çizelgeleme algoritması hücreleri tahsis ederken rastgele hücreler seçtiği için merkezi çizelgelemeye göre daha kötü performans sergilemektedir. Bu bölümde önerilen algoritma çift yönlü bir çizelgeleme yapmaktadır, dolayısıyla bir önceki bölümde geliştirilen tek yönlü çizelge üreten TASA algoritmasına göre yüksek gecikme süreleri elde edilmiştir. Ancak; gecikme sürelerinin ağ büyüklüğüne ve anten konfigürasyonuna göre değişimi benzerlik göstermektedir.

Tablo 7. Anten konfigürasyonu ve çizelgeleme yöntemine bağlı gecikme süreleri (ms)

Düğüm sayısı	Merkezi çizelgeleme		Dağıtık çizelgeleme	
	Tüm yönlü	Döner yönlü	Tüm yönlü	Döner yönlü
25	957	1460	1778	2129
35	1452	1922	2347	2652
49	2336	2444	3056	2984

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında öncelikle Anahtarlanabilir anten modeli gerçekleştirilerek, IETF 6TiSCH protokolü ile entegre edilmiş ve uzamsal ayrımdan faydalanan dağıtık çizelgeleme fonksiyonu kullanan bir çözüm oluşturulmuştur. Paylaşımlı hücrelerde tüm antenler aktif edilerek, adanmış hücrelerde ise sadece doğru antenin aktif edilerek kullanıldığı bir çözüm sunulmuştur. Anahtarlanabilir antenin paylaşımlı hücrede yaşanan çarpışma ve girişimleri önemli ölçüde azaltarak ağın kararlılığını arttırdığı görülmüştür. Kapsama alanının darlığı nedeniyle sınırlı frekans kaynağı kullanılabilen durumlarda paket iletim oranı, enerji tüketimi ve uçtan uça gecikme metriklerini iyileştirdiği görülmüştür.

İkinci aşamada Döner yönlü anten modeli gerçekleştirilmiştir. Antenin kapsama alanının darlığı nedeniyle ortaya çıkan düğümlerin senkronize olma süresinin uzaması, ağın daha geç oluşması ve tümegönderim paket olarak gönderilmesi gereken kontrol mesaj paketlerinin tüm komşulara aynı anda dağıtılamaması gibi sorunların çözümüne ilişkin dağıtık çizelgeleme fonksiyonuna ek olarak özerk bir çizelgelemenin kullanıldığı hibrit bir çözüm önerilmiştir. Yapılan testler sonrasında tüm yönlü antene sahip ağlara kıyasla ağ performans metriklerinde iyileşme elde edilmiştir. Özerk çizelgeleme, tüm yönlü antene sahip olunsa bile yaşanabilecek senkronizasyon süresi sorununa ağ yoğunluğundan etkilenmeyen ölçeklenebilir bir çözüm olmuştur. Sahte işaretçi mesaj paketinin kullanılması ise düğümlerin komşularını ağa senkronize olmadan tanımasına imkan vermiştir.

Son aşamada ise; çift yönlü çizelgeleme yapabilen ve veri paketinin kaynaktan toplayıcı düğüme iletilene kadar izlediği yolu dikkate alarak çizelgeleme yapan merkezi bir çizelgeleme algoritması geliştirilmiştir. Algoritma döner yönlü anten modeli ile uyarlanmış TASA algoritması ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yapılan testler sonrasında dağıtık çizelgelemeye kıyasla daha düşük uçtan uca gecikme ve enerji tüketimi gözlenmiştir. Ancak; merkezi çizelgeleme çözümünün ölçeklenebilir olmamasından dolayı yoğunluğu az ve düğümlerin statik olduğu küçük ağlarda kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak; Akıllı ve yönlü antene sahip düğümler, bant genişliği kaynaklarını zaman ve frekans boyutlarında yönlü antenin getirdiği uzamsal (spatial) boyut avantajını kullanarak planladığında, geleneksel tüm yönlü antenlerin kullanıldığı yöntemlere göre başarılı paket iletim oranı, ortalama harcanan enerji miktarı ve yaşanan uçtan uca gecikme süresi bakımından daha üstün performans sergilemişlerdir.

Gelecekteki çalışmaların bir parçası olarak, simülasyon sonuçları gerçek yaşam koşulları altında Anahtarlanabilir ve Döner yönlü anten çözümleriyle entegre düğümlerden oluşan bir test ortamı kullanılarak doğrulanacaktır. Aynı zamanda, 2.4 Ghz frekans bandının paylaşıldığı diğer teknolojiler ile beraber yüksek girişim yaşanan bir ortamda önerilen çözümün performansı incelenecektir.

Ayrıca; makine öğrenimi algoritmalarından yararlanılarak her bir hedef için en iyi yönün bulunması ve dağıtık çizelgelemede hücre seçimi konularında algoritmalar geliştirilecektir. Çok yollu iletişimin yönlendirilebilir anten çözümleriyle entegrasyonu araştırılacaktır.

8. KAYNAKLAR

1. Gungor, V. C., ve Hancke, G. P., Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches, IEEE Transactions on industrial electronics, 56, 10, (2009) 4258-4265.

2. Koohang, A., Sargent, C. S., Nord, J. H., ve Paliszkiewicz, J., Internet of Things (IoT): From awareness to continued use, International Journal of Information Management, 62, (2022) 102442.

3. Li, X., Lu, R., Liang, X., Shen, X., Chen, J., ve Lin, X., Smart community: an internet of things application, IEEE Communications Magazine, 49, (2011) 11.

4. Suriyachai, P., Roedig, U., ve Scott, A., A survey of MAC protocols for mission-critical applications in wireless sensor networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14, 2, (2012) 240-264.

5. Mahmood, M. A., Seah, W. K., ve Welch, I., Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead, Computer Networks, 79, (2015) 166-187.

6. Qu, Z., Xu, H., Zhao, X., Tang, H., Wang, J. ve Li, B., An Energy-Efficient Dynamic Clustering Protocol for Event Monitoring in Large-Scale WSN, IEEE Sensors Journal, 21, 20, (2021) 23614-23625.

7. Liang, T., Lin, Y., Shi, L., Li, J., Zhang, Y. ve Qian, Y., Distributed vehicle tracking in wireless sensor network: A fully decentralized multiagent reinforcement learning approach, IEEE Sensors Letters, 5, 1, (2020) 1-4.

8. Schandy, J., Steinfeld, L. ve Silveira, F., Average power consumption breakdown of wireless sensor network nodes using IPv6 over LLNs, In International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'15), Haziran 2015, Fortaleza, Brazilya, Bildiriler kitabı: 242–247.

9. Görmüş, S. ve Külcü, S., Enabling space time division multiple access in IETF 6TiSCH protocol, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 27, 6, (2019) 4151-4166.

10. Mainetti, L., Patrono, L., ve Vilei, A., Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey, In 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Eylül 2011, Split, Hırvatistan, Bildiriler kitabı: 1-6.

11. Shelby Z, Bormann C., 6LoWPAN: The wireless embedded Internet, John Wiley & Sons, 2011.

12. Accettura, N., Grieco, L. A., Boggia, G., ve Camarda, P., Performance analysis of the RPL routing protocol, In 2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Nisan 2011, Beijing, Çin, Bildiriler kitabı: 767-772.

13. Dujovne, D., Watteyne, T., Vilajosana, X., ve Thubert, P., 6TiSCH: deterministic IP-enabled industrial internet (of things), IEEE Communications Magazine, 52, 12, (2014) 36-41.

14. Vilajosana, X., Watteyne, T., Chang, T., Vučinić, M., Duquennoy, S. ve Thubert, P., Ietf 6tisch: A tutorial, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22, 1, (2019) 595-615.

15. Karaagac, A., Haxhibeqiri, J., Moerman, I. ve Hoebeke, J., Time-critical communication in 6TiSCH networks, In IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Nisan 2018, Barcelona, İspanya, Bildiriler kitabı: 161-166.

16. Rady, M., Lampin, Q., Barthel, D., ve Watteyne, T., g6TiSCH: Generalized 6TiSCH for Agile Multi-PHY Wireless Networking, IEEE Access, 9, (2021) 84465-84479.

17. Rady, M., Lampin, Q., Barthel, D., ve Watteyne, T., 6DYN: 6TiSCH with Heterogeneous Slot Durations, Sensors, 21, 5, (2021) 1611.

18. Kulcu, S., Gormus, S. ve Jin, Y., Integration of Steerable Smart Antennas to IETF 6TiSCH Protocol for High Reliability Wireless IoT Networks, IEEE Access, 9, (2021) 147780-147790.

19. https://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf, Telosb Düğüm Özellikleri Sayfası, 01 Şubat 2022

20. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., ve Zorzi, M., Internet of things for smart cities, IEEE Internet of Things journal, 1, 1, (2014) 22-32.

21. Vilajosana, X., Watteyne, T., Vučinić, M., Chang, T. ve Pister, K.S., 6TiSCH: Industrial performance for IPv6 Internet-of-Things networks, Proceedings of the IEEE, 107, 6, (2019) 1153-1165.

22. Hermeto, RT., Gallais, A., ve Theoleyre, F., Scheduling for ieee802.15.4-tsch and slow channel hopping mac in low power industrial wireless networks: A survey, Computer Communications, (2017), 84-105.

23. Song, J., Han, S., Mok, A., Chen, D., Lucas, M., Nixon, M., ve Pratt, W., WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control, In Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium RTAS'08, Nisan 2008, Missouri, ABD, Bildiriler kitabı: 377-386.

24. RFC 8200, Internet protocol, version 6 (IPv6) specification, IETF, California, ABD, Temmuz, 2017.

25. RFC 7554, Using IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) in the Internet of Things (IoT): Problem Statement, IETF, California, ABD, Mayıs, 2015

26. Petersen, S., ve Carlsen, S, Performance evaluation of WirelessHART for factory automation, In IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation ETFA 2009, Eylül 2009, Mallorca, İspanya, Bildiriler kitabı: 1-9.

27. Palattella, M. R., Thubert, P., Vilajosana, X., Watteyne, T., Wang, Q., ve Engel, T., 6tisch wireless industrial networks: Determinism meets ipv6, Internet of Things, (2014) 111-141. Springer, Cham.

28. Palattella, M. R., Watteyne, T., Wang, Q., Muraoka, K., Accettura, N., Dujovne, D., ve Engel, T., On-the-fly bandwidth reservation for 6TiSCH wireless industrial networks, IEEE Sensors Journal, 16, 2, (2016) 550-560.

29. Schandy, J., Olofsson, S., Gammarano, N., Steinfeld, L. ve Voigt, T., Improving sensor network performance with directional antennas: A cross-layer optimization, ACM Transactions on Sensor Networks, 17, 4, (2021) 1-21.

30. Spyropoulos, A., ve Raghavendra, C. S., Energy efficient communications in ad hoc networks using directional antennas, In Twenty-First Annual Joint Conference INFOCOM 2002, Haziran 2002, New York, ABD, Bildiriler kitabı: 220-228.

31. Ko, Y. B., Shankarkumar, V., ve Vaidya, N. H., Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks. In Nineteenth Annual Joint Conference INFOCOM 2000, Mart 2000, Tel Aviv, İsrail, Bildiriler kitabı: 13-21.

32. Palattella, M.R., Accettura, N., Vilajosana, X., Watteyne, T., Grieco, L.A., Boggia, G. ve Dohler, M., Standardized protocol stack for the internet of (important) things, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 15, 3, (2012) 1389-1406.

33. Musaloiu-E, R. and Terzis, A., Minimising the effect of WiFi interference in 802.15. 4 wireless sensor networks, International Journal of Sensor Networks, 3, 1, (2008) 43-54.

34. Gungor, V.C., Lu, B. ve Hancke, G.P., Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 57, 10, (2010) 3557-3564.

35. Santamaria, L., Ferrero, F., Staraj, R., ve Lizzi, L, Slot-based pattern reconfigurable ESPAR antenna for IoT applications, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69, 7, (2020) 3635-3644.

36. Liu, H.T., Gao, S. ve Loh, T.H., Electrically small and low cost smart antenna for wireless communication, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60, 3, (2012) 1540-1549.

37. George, R., ve Mary, T. A. J., Review on directional antenna for wireless sensor network applications, IET Communications, 14, 5, (2020) 715-722.

38. Groth, M., Rzymowski, M., Nyka, K. ve Kulas, L., ESPAR antenna-based WSN node with DoA estimation capability, IEEE Access, 8, (2020) 91435-91447.

39. Atzori, L., Iera, A., ve Morabito, G., The internet of things: A survey, Computer Networks, 54, 15, (2010) 2787-2805.

40. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista L, ve Zorzi M., Internet of things for smart cities, IEEE Internet Of Things Journal, 1, 1, (2014) 22-32.

41. Agiwal, M., Roy, A., ve Saxena, N., Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18, 3, (2016) 1617-1655.

42. López-Ardao, J. C., Rodríguez-Rubio, R. F., Suárez-González, A., Rodríguez-Pérez, M., ve Sousa-Vieira, M. E., Current trends on green wireless sensor networks, Sensors, 21, 13, (2021) 4281.

43. Baghani, M., Parsaeefard, S., Derakhshani, M., ve Saad, W., Dynamic non-orthogonal multiple access and orthogonal multiple access in 5G wireless network, IEEE Transactions on Communications, 67, 9, (2019) 6360-6373.

44. Wong, D., Chen, Q., ve Chin, F., Directional medium access control (mac) protocols in wireless ad hoc and sensor networks: A survey, Journal of Sensor and Actuator Networks, 4, 2, (2015) 67-153.

45. Dai, H.N., Ng, K.W., Li, M., ve Wu, M.Y., An overview of using directional antennas in wireless networks, International Journal of Communication Systems, 26, 4, (2013) 413-448.

46. Rault, T., Bouabdallah, A., ve Challal, Y., Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey, Computer Networks, 67 (Supplement C), (2014) 104-122.

47. Internet-Draft, 6tisch 6top scheduling function zero (sf0), IETF, California, ABD, Temmuz, 2017.

48. Soua, R., ve Minet, P., Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey, Pervasive and Mobile Computing, 16, (2015) 2-21.

49. Carhacioglu, O., Zand, P. ve Nabi, M., Time-domain cooperative coexistence of BLE and IEEE 802.15. 4 networks, In IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Ekim 2017, Montreal, Kanada, Bildiriler kitabı: 1-7.

50. Teshome, E., Deac, D., Thielemans, S., Carlier, M., Steenhaut, K., Braeken, A., ve Dobrota, V., Time Slotted Channel Hopping and ContikiMAC for IPv6 Multicast-Enabled Wireless Sensor Networks, Sensors, 21, 5, (2021) 1771.

51. Voigt, T., Bor, M., Roedig, U., ve Alonso, J., Mitigating inter-network interference in LoRa networks, arXiv preprint arXiv:1611.00688, 2016.

52. Varshney, A., Mottola, L., Carlsson, M., ve Voigt, T., Directional transmissions and receptions for high-throughput bulk forwarding in wireless sensor networks, In Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Kasım, 2015, New York, Amerika, Bildiriler kitabı: 351-364.

53. Nur, F. N., Sharmin, S., Razzaque, M., Islam, M., ve Hassan, M. M., A low duty cycle mac protocol for directional wireless sensor networks, Wireless Personal Communications, 96, 4, (2017) 5035-5059.

54. Zhang, Z., Pure directional transmission and reception algorithms in wireless ad hoc networks with directional antennas, In IEEE International Conference on Communications, Mayıs, 2005, Seoul, Güney Kore, Bildiriler kitabı: 3386-3390.

55. Jakllari, G., Luo, W., ve Krishnamurthy, S. V., An integrated neighbor discovery and MAC protocol for ad hoc networks using directional antennas, IEEE Transactions on Wireless Communications, 6, 3, (2007) 1114-1024.

56. Huang, Z., Shen, C. C., Srisathapornphat, C., ve Jaikaeo, C., A busy-tone based directional MAC protocol for ad hoc networks, In MILCOM 2002, Ekim, 2002, California, Amerika, Bildiriler kitabı: 1233-1238.

57. Korakis, T., Jakllari, G., ve Tassiulas, L., A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks, In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Haziran, 2003, Maryland, Amerika, 98-107.

58. Urke, A.R., Kure, Ø., ve Øvsthus., K., A survey of 802.15. 4 TSCH schedulers for a standardized Industrial Internet of Things, Sensors, 22, 1, (2021) 15.

59. Bektaş, M., ve Görmüş, S., An energy efficient iot protocol for healthcare at home, In 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mayıs 2018, İzmir, Türkiye, Bildiriler kitabı: 1-4.

60. Watteyne, T., Mehta, A., ve Pister, K., Reliability through frequency diversity: why channel hopping makes sense. In 6th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks, Ekim 2009, Tenerife, İspanya, Bildiriler kitabı: 116-123.

61. Duquennoy, S., Elsts, A., Al Nahas, B. ve Oikonomo, G., Tsch and 6tisch for contiki: Challenges, design and evaluation, In 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Haziran 2017, Ottowa, Kanada, Bildiriler kitabı: 11-18.

62. Kalita, A., ve Khatua, M., 6TiSCH–IPv6 Enabled Open Stack IoT Network Formation: A Review, ACM Transactions on Internet of Things, 3, 3, (2022) 1-36.

63. RFC 8180, Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) Configuration, IETF, California, ABD, May 2017.

64. RFC 8480, 6TiSCH Operation Sublayer (6top) Protocol (6P), IETF, California, ABD, Kasım 2018.

65. Vilajosana, X., Watteyne, T., Vučinić, M., Chang, T. ve Pister, K.S., 6tisch: Industrial performance for ipv6 internet-of-things networks, Proceedings of the IEEE, 107, 6, (2019) 1153-1165.

66. Righetti, F., Vallati, C., Gavioli, A., ve Anastasi, G., Performance Evaluation of Adaptive Autonomous Scheduling Functions for 6TiSCH Networks, IEEE Access, 9, (2021) 127576-127594.

67. Vučinić, M., Watteyne, T. ve Vilajosana, X.,, Broadcasting strategies in 6tisch networks, Internet Technology Letters, 1, 1, (2018) p. e15.

68. Duquennoy, S., Al Nahas, B., Landsiedel, O., ve Watteyne, T., Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled tsch, In 13th ACM conference on embedded networked sensor systems, Kasım 2015, Seoul, Güney Kore, Bildiriler kitabı: 337-350.

69. Piyare, R., Oikonomou, G., ve Elsts, A., TSCH for Long Range Low Data Rate Applications, IEEE Access, 8, (2020) 228754–228766.

70. Kim, S., Kim, H.S. ve Kim, C., Alice: Autonomous link-based cell scheduling for tsch, in 18th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Nisan 2019, Montreal, Kanada, Bildiriler kitabı: 121-132.

71. Oh, S., Hwang, D., Kim, K.H., ve Kim, K., Escalator: An Autonomous Scheduling Scheme for Convergecast in TSCH, Sensors, 18, 4, (2018) 1209.

72. Accettura, N., Palattella, M.R., Boggia, G., Grieco, L.A. ve Dohler, M.,, Decentralized Traffic Aware Scheduling for multi-hop Low power Lossy Networks in the Internet of Things, in IEEE 14th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Haziran 2013, Madrid, İspanya, Bildiriler kitabı: 1-6.

73. Hwang, R.H., Wang, C.C. ve Wang, W.B.,, A Distributed Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4e Wireless Sensor Networks, Computer Standards & Interfaces, 52, (2017) 63-70.

74. Soua, R., Minet, P. ve Livolant, E., DiSCA: A distributed scheduling for convergecast in multichannel wireless sensor networks, in 2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), Mayıs 2015, Ottawa, Kanada, Bildiriler kitabı: 156-164.

75. Duy, T.P., Dinh, T. ve Kim, Y.,, Distributed cell selection for scheduling function in 6TiSCH networks, Computer Standards & Interfaces, 53, (2017) 80-88.

76. Geletu, B.S., Mottola, L., Voigt, T. ve Österlind, F., Modeling an electronically switchable directional antenna for low-power wireless networks, in 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Nisan 2011, Chicago, ABD, Bildiriler kitabı: 163-164.

77. Soua, R., Minet, P., ve Livolant, E., Wave: a distributed scheduling algorithm for convergecast in IEEE 802.15.4e TSCH networks, Trans. Emerging Tel. Tech., 27, (2016) 557-575.

78. Aijaz, A., ve Raza, U., Deamon: a decentralized adaptive multi-hop scheduling protocol for 6Tisch wireless networks, IEEE Sensors Journal, 17, 20, (2017) 6825-6836.

79. Morell, A., Vilajosana, X., Vicario, J.L., ve Watteyne, T., Label switching over IEEE802.15.4e networks, Trans. Emerg. Telecommun. Technol., 24, (2013) 458–475.

80. Chang, T.T.C., Watteyne, T., Qin, W., ve Vilajosana, X., LLSF: Low Latency Scheduling Function for 6TiSCH Networks, In Proceedings of the 12th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Mayıs 2016, Washington, ABD, Bildiriler kitabı: 26–28.

81. Zorbas, D., Kotsiou, V., Théoleyre, F., Papadopoulos, G.Z., ve Douligeris, C., LOST: Localized blacklisting aware scheduling algorithm for IEEE 802.15.4-TSCH networks, In 2018 Wireless Days (WD), Nisan 2018, Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri, Bildiriler kitabı: 110–115.

82. Municio, E.; Latré, S., Decentralized Broadcast-based Scheduling for Dense Multi-hop TSCH Networks, In Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture, MobiArch ’16, Ekim 2016, New York, ABD, Bildiriler kitabı: 19–24.

83. Kim, K.T., ve Kim, J., An Energy Efficient Real-Time MAC Protocol, In Proceedings of the 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Ekim 2018, Jeju, Güney Kore, Bildiriler kitabı: 1180-1184.

84. Daneels, G., Spinnewyn, B., Latré, ve S., Famaey, J., ReSF: Recurrent Low-Latency Scheduling in IEEE 802.15.4e TSCH networks, Ad Hoc Netw., 69, (2018) 100–114.

85. Fafoutis, X. ve Papadopoulos, G.Z., The Trade-Offs of Cell Over-Provisioning in IEEE 802.15. 4 TSCH Networks, In International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, Eylül 2018, Cairns, Avustralya, Bildiriler kitabı: 132-137.

86. Cena, G., Scanzio, S., Seno, L., Valenzano, ve A., Zunino, C., Energy-Efficient Link Capacity Overprovisioning In Time Slotted Channel Hopping Networks, In 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS), Nisan 2020, Porto, Portekiz, Bildiriler kitabı: 1-8.

87. Kotsiou, V., Papadopoulos, G.Z., Chatzimisios, P., ve Theoleyre, F., LDSF: Low-Latency Distributed Scheduling Function for Industrial Internet of Things, IEEE Internet Things Journal, (2020) 8688-8699.

88. Hamza, T., ve Kaddoum, G., Enhanced Minimal Scheduling Function for IEEE 802.15.4e TSCH Networks, In 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Nisan 2019, Marrakesh, Fas, Bildiriler kitabı: 1–6.

89. Vergados, D.J., Kralevska, K., Jiang, Y., ve Michalas, A., Local voting: A new distributed bandwidth reservation algorithm for 6TiSCH networks, Comput. Netw., 180, (2020) 107384.

90. Domingo-Prieto, M., Chang, T., Vilajosana, X., ve Watteyne, T., Distributed PID-Based Scheduling for 6TiSCH Networks, IEEE Commun. Lett., 20, (2016) 1006–1009.

91. Palattella, M.R., Accettura, N., Dohler, M., Grieco, L.A. ve Boggia, G., Traffic Aware Scheduling Algorithm for reliable low-power multi-hop IEEE 802.15.4e networks, in IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Eylül 2012, Sydney, Avustralya, Bildiriler kitabı: 327-332.

92. Farías, Á.A. ve Dujovne, D.,, A queue-based scheduling algorithm for PCE-enabled Industrial Internet of Things networks, in 2015 Sixth Argentine Conference on Embedded Systems (CASE), Eylül 2015, Buenos Aires, Arjantina, Bildiriler kitabı: 31-36.

93. Kim, Y.G., Wang, Y., Park, B. and Choi, H.H., A heuristic resource scheduling scheme in time-constrained networks, Computers & Electrical Engineering, 54, (2016) 1-15.

94. Kim, K.T., Kim, H., Park, H. ve Kim, S.T., An industrial IoT MAC protocol based on IEEE 802.15.4e TSCH for a large-scale network, in 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Şubat 2017, Bongpyeong, Güney Kore, Bildiriler kitabı: 721-724.

95. Wu, Y., Stankovic, J. A., He, T., ve Lin, S., Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks, In 27th Conference on Computer Communications INFOCOM 2008, Nisan 2008, Phoenix, ABD, Bildiriler kitabı: 1193-1201.

96. Jin, Y., Kulkarni, P., Wilcox, J., ve Sooriyabandara, M., A centralized scheduling algorithm for IEEE 802.15. 4e TSCH based industrial low power wireless networks, In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Nisan 2016, Doha, Katar, Bildiriler kitabı: 1-6.

97. Wetterwald, P., Thubert, P., ve Vasseur, J. P., U.S. Patent No. 9,866,431. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2018.

98. Jin, Y., Raza, U., Aijaz, A., Sooriyabandara, M., ve Gormus, S., Content Centric Cross-Layer Scheduling for Industrial IoT Applications Using 6TiSCH, IEEE Access, 6, (2018) 234-244.

99. Soua, R., Minet, P., ve Livolant, E., MODESA: An optimized multichannel slot assignment for raw data convergecast in wireless sensor networks, In 2012 IEEE 31st international performance computing and communications conference (IPCCC), Aralık 2012, Texas, ABD, Bildiriler kitabı: 91-100.

100. Soua, R., Livolant, E., ve Minet, P., MUSIKA: A multichannel multi-sink data gathering algorithm in wireless sensor networks, In 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Temmuz 2013, Cagliari, İtalya, Bildiriler kitabı: 1370-1375.

101. Choi, K. H., ve Chung, S. H., A new centralized link scheduling for 6TiSCH wireless industrial networks, In Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, 2016, Petersburg, Rusya, Bildiriler kitabı: 360-371.

102. A. Kalita ve M. Khatua, Autonomous allocation and scheduling of minimal cell in 6tisch network, IEEE Internet of Things Journal, 8, 15, (2021), 12242-12250.

103. Nair, S.S. ve Ammann, M.J., Reconfigurable antenna with elevation and azimuth beam switching, IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 9, (2010) 367–370.

104. Balanis, C. A., Antenna theory: analysis and design, John wiley & sons, 2016.

105. Gupta, P., Kumar, P.R., The capacity of wireless networks, IEEE Transactions On Information Theory, 46, 2, (2000) 388-404.

106. Li, P., Zhang, C., Fang, Y., The capacity of wireless ad hoc networks using directional antennas, IEEE Transactions on Mobile Computing, 10, 10, (2011) 1374–1387.

107. Mottola, L., Voigt, T., Picco, G.P., Electronically-switched directional antennas for wireless sensor networks: A full-stack evaluation, In 2013 IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON), Haziran 2013, New Orleans, ABD, Bildiriler kitabı: 176-184.

108. Voigt, T., Mottola, L., Hewage, K., Understanding link dynamics in wireless sensor networks with dynamically steerable directional antennas, In International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN) , Şubat 2013, Ghent, Belgium, Bildiriler kitabı: 115-130.

109. Liu, X., Sheth, A., Kaminsky, M., Papagiannaki, K., Seshan, S. ve Steenkiste, P., Dirc: Increasing indoor wireless capacity using directional antennas, In 2009 ACM conference on Data communication SIGCOMM, Ağustos 2009, Barcelona, İspanya, Bildiriler kitabı: 171-182.

110. Yi, S., Pei, Y., ve Kalyanaraman, S., On the capacity improvement of ad hoc wireless networks using directional antennas, In 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Haziran 2003, Maryland, ABD, Bildiriler kitabı: 108-116.

111. Korakis, T., Jakllari, G., & Tassiulas, L. CDR-MAC: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, 7, 2, (2008) 145-155.

112. Anastasi, G., Conti, M., di Francesco, M., ve Passarella, A., Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, Ad Hoc Netw., 7, (2009) 537-568.

113. Catarinucci, L., Guglielmi, S., Patrono, L., ve Tarricone, L., Switched-beam antenna for wireless sensor network nodes, Prog. Electromagn., Res. C, 39, (2013) 193-207.

114. Rezk, M., Kim, W., Yun, Z., ve Iskander, M. F., Performance comparison of a novel hybrid smart antenna system versus the fully adaptive and switched beam antenna arrays, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 4, 1, (2005) 285-288.

115. Nilsson, M., Spida: A direction-finding antenna for wireless sensor networks, In Real-World Wireless Sensor Networks, Aralık 2010, Colombo, Sri Lanka, Bildiriler kitabı: 138-145.

116. Öström, E., Mottola, L., Nilsson, M., ve Voigt, T., Smart antennas made practical: the SPIDA way, In Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Nisan 2010, Stockholm, İsveç, Bildiriler kitabı: 438-439.

117. Kaur, T. ve Kumar, D., QoS mechanisms for MAC protocols in wireless sensor networks: a survey, IET Communications, 13, 14, (2019) 2045-2062.

118. https://www.industrialnetworking.com/pdf/Antenna-Patterns.pdf, Cisco Anten Işıma Örüntüleri, 01 Şubat 2022

119. Nilsson, M., Directional antennas for wireless sensor networks, In 9th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (Adhoc'09), Mayıs 2009, Uppsala, İsveç, Bildiriler kitabı: 176-184.

120. Giorgetti, G., Cidronali, A., Gupta, S. K., ve Manes, G., Exploiting low-cost directional antennas in 2.4 GHz IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks, In 2007 European Conference on Wireless Technologies, Ekim 2007, Munich, Almanya, Bildiriler kitabı: 217-220.

121. Joseph, M., Mathew, A.M., Nair, A.R.G. ve Soman, D., Energy efficient switched parasitic array antenna for 5g networks and iot, in 2016 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC), Kasım 2016, Loughborough, Birleşik Krallık, Bildiriler kitabı: 1–5.

122. Rzymowski, M., Woznica, P. ve Kulas, L., Single-anchor indoor localization using espar antenna, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 15, (2016) 1183-1186.

123. Viani, F., Lizzi, L., Donelli, M., Pregnolato, D., Oliveri, G. ve Massa, A., Exploitation of parasitic smart antennas in wireless sensor networks, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 24, 7, (2010) 993-1003.

124. Burtowy, M., Rzymowski, M. ve Kulas, L., Low-profile espar antenna for rss-based doa estimation in iot applications, IEEE Access, 7, (2019) 17403-17411.

125. Plotka, M., Tarkowski, M., Nyka, K. ve Kulas, L., A novel calibration method for rss-based doa estimation using espar antennas, in 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Mayıs 2018, Poznan, Polonya, Bildiriler kitabı: 65-68.

126. Rzymowski, M. ve Kulas, L., Influence of espar antenna radiation patterns shape on ppcc-based doa estimation accuracy, in 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Mayıs 2018, Poznan, Polonya, Bildiriler kitabı: 69-72.

127. Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N. ve Voigt, T., Cross-level sensor network simulation with COOJA, In 1st IEEE International Workshop on Practical Issues in Building Sensor Network Applications (SenseApp'06), Kasım 2006, Florida, ABD, Bildiriler kitabı: 641-648

128. Rege, V., Design and Implementation of an Antenna Model for the Cooja simulator, arXiv preprint arXiv:1610.06129, 2018.

129. Piyare, R., Istomin, T., ve Murphy, A. L., WaCo: A Wake-Up Radio COOJA Extension for Simulating Ultra Low Power Radios, In 14th International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN), Şubat 2017, Delft, Hollanda, Bildiriler kitabı: 48-53.

130. Andrea Goldsmith. 2005. Wireless Communications. Cambridge University Press, New York, NY.

131. RFC 6550, Rpl: Ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks, IETF, California, ABD, 2012.

132. Nasipuri, A., Li, K., ve Sappidi, U.R., Power consumption and throughput in mobile ad hoc networks using directional antennas, In Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks, Ekim 2002, Miami, ABD, Bildiriler kitabı: 620-626.

133. Vasudevan, S., Kurose, J. ve Towsley, D., On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas, in IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Mart 2005, Miami, ABD, Bildiriler kitabı: 2502–2512.

134. Guglielmo, D., D., Brienza, S., ve Anastasi, G., Ieee 802.15.4e: A survey, Computer Communications, 88, (2016) 1-24.

135. Vera-Pérez, J., Todolí-Ferrandis, D., Santonja-Climent, S., SilvestreBlanes, J., ve Sempere-Payá, V., A joining procedure and synchronization for tsch-rpl wireless sensor networks, Sensors, 18, 10, (2018).

136. Vallati, C., Brienza, S., Anastasi, G. ve Das, S.K., Improving network formation in 6tisch networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, 18, 1, (2019) 98-110.

137. De Guglielmo, D., Seghetti, A., Anastasi, G. ve Conti, M., A performance analysis of the network formation process in ieee 802.15.4e tsch wireless sensor/actuator networks, in 2014 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Haziran 2014, Funchal, Portekiz, Bildiriler kitabı: 1-6.

138. Vogli, E., Ribezzo, G., Grieco, L.A. ve Boggia, G., Fast join and synchronization schema in the ieee 802.15.4e mac, in 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Mart 2015, New Orleans, ABD, Bildiriler kitabı: 85-90.

139. Fanucchi, D., Staehle, B. ve Knorr, R., Network formation for industrial iot: Evaluation, limits and recommendations, in 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Eylül 2018, Torino, İtalya, Bildiriler kitabı: 227-234.

140. Külcü, S., & Görmüş, S., Improving Synchronization Time in 6TiSCH Networks with Smart Antennas, In 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mayıs, 2022, Safranbolu, Türkiye, Bildiriler kitabı: 1-4.

ÖZGEÇMİŞ

2006 yılında Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği bölümünden, 2010 yılında Hacettepe Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Anabilim dalından mezun oldu. 2017 yılında Doktora Yeterlilik aşamasında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalından ayrıldı, ve Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalında Doktora çalışmalarına başladı. 2005-2015 yılları arasında Ankara, SDT Savunma ve Uzay Teknolojileri A.Ş.'de Lider Yazılım Mühendisi olarak çalıştı. 2015 yılında Giresun Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen görevine devam etmektedir. Doktora çalışması esnasında TÜBİTAK destekli 118E289 numaralı projede bursiyer olarak görev almıştır. İngilizceyi iyi seviyede bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

SCI / SCI-Expanded İndeksli Dergi Yayınları

Görmüş, S., ve Külcü, S., Enabling space time division multiple access in IETF 6TiSCH protocol, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 27, 6 (2019). 4151-4166.

Kulcu, S., Gormus, S., ve Jin, Y. Integration of Steerable Smart Antennas to IETF 6TiSCH Protocol for High Reliability Wireless IoT Networks. IEEE Access, 9, (2021). 147780-147790.

Uluslararası Konferans Yayınları

Kulcu, S., Gormus, S., Akıllı Antenlere Sahip 6TiSCH Ağlarda Senkronizasyon Süresinin İyileştirilmesi, In 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Mayıs 2022, Safranbolu, Türkiye, Bildiriler kitabı: 1-4.