

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ • BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

IoT Ağlar İçin Akıllı Anten Tabanlı Çizelgeleme Algoritmalarının İncelenmesi

Analysis of Smart Antenna Based Scheduling Algorithms for IoT Networks

DOKTORA TEZİ SAVUNMASI

Sercan KÜLCÜ

Doktora Öğrencisi

Danışman

Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ

Eylül 2022 • Trabzon

Bugün Neleri Konuşacağız?

01

Giriş, Motivasyon ve Problem Tanımı

IoT ağlarında kaynak kısıtları

02

Akıllı ve Yönlü Antenler

Kavramsal arka plan ve 6TiSCH protokol yığıtı

03

Anahtarlanabilir Anten ile Dağıtık Çizelgeleme

Bölüm 4

04

Döner Yönlü Anten ile Dağıtık Çizelgeleme

Bölüm 5

05

Döner Yönlü Anten ile Merkezi Çizelgeleme

Bölüm 6

06

Genel Değerlendirme, Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Katkıların özeti

Nesnelerin İnterneti ve Kaynak Kısıtı

IETF 6TiSCH protokol yığıtı, zaman dilimi ve frekans kanalı kaynaklarını planlı biçimde kullanarak **güvenilir, kararlı ve düşük güçlü** kablosuz IoT ağları oluşturmayı hedefler.

- 2.4 GHz ISM bandı; Wi-Fi, Bluetooth ve diğer IEEE 802.15.4 ağlarıyla paylaşılıyor
→ frekans kaynağı kısıtlı
- Yoğun düğümlü, yüksek trafikli ağlarda zaman dilimi kaynağı da kısıtlı kalıyor
- Tüm yönlü (omni-directional) antenler, uzamsal boyutu değerlendirmeden kaynakları paylaşıyor

ÇÖZÜM FİKRİ

Uzamsal Ayrım (Spatial Reuse)

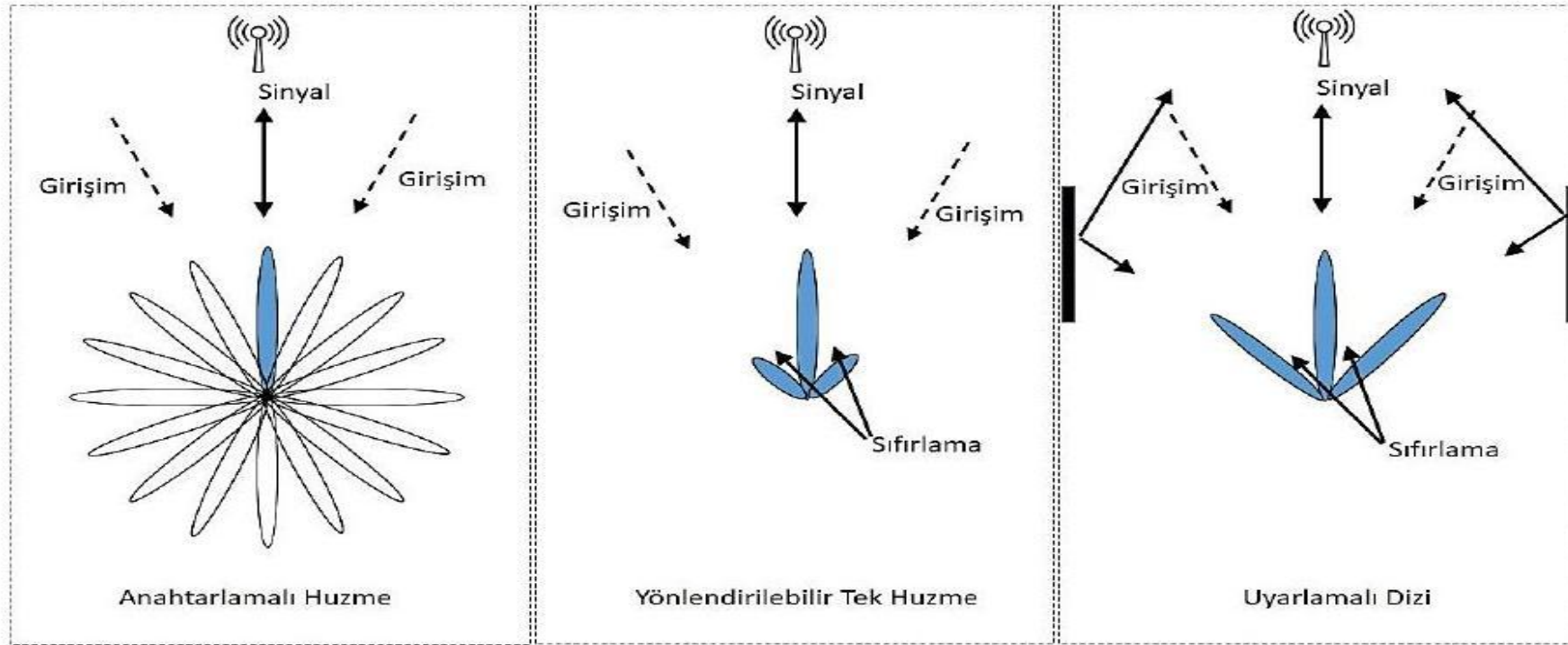
Kapsama alanı değiştirilebilen Akıllı / yönlü antenler kullanılırsa, çizelgelemeye üçüncü bir boyut — uzam (space) — eklenir.

Zaman × **Frekans** × **Uzam**

- Daha yüksek paket iletim oranı
- Daha düşük uçtan uca gecikme
- Daha düşük enerji tüketimi

Akıllı ve Yönlü Anten Türleri

Tüm yönlü antenler her yönden gelen sinyale (ve girişime) maruz kalır. Akıllı/yönlü antenler enerjiyi bir yöne odaklayarak SINR değerini artırır ve girişim kaynaklarına doğru "sıfırlama" (nulling) uygulayabilir.



Şekil: Anahtarlama Huzme · Yönlendirilebilir Tek Huzme (Döner Yönlü) · Uyarlamalı Dizi

Tezin Amacı ve Literatüre Katkıları

Amaç: IETF 6TiSCH ağları için düşük karmaşıklıkta Akıllı/yönlü anten tabanlı, uzamsal boyutu da değerlendiren bir kaynak planlama (çizelgeleme) mekanizması geliştirmek.

1

Komşu Tanıma Mekanizması

Düğümelerin, ağa senkronize olmadan önce birbirlerini tanınmasına imkân veren özgün bir yöntem.

2

En İyi Anten Yönü Tespiti

Komşu düğümler arasında maksimum sinyal gücünü sağlayan anten yönünün bulunması için yeni bir yöntem.

3

İki Hibrit Çizelgeleme Algoritması

Kontrol ve veri paketlerinin sağlıklı iletimi için: (i) dağıtık + özerk, (ii) merkezi + özerk çizelgeleme.

4

COOJA Simülatörüne Anten Modelleri

Anahtarlanabilir huzme ve Döner yönlü anten modellerinin açık kaynak COOJA simülatörüne kazandırılması.

Tezin Yapısı

Genel Bilgiler &
Literatür Taraması

Anahtarlanabilir Anten +
Dağıtık Çizelgeleme

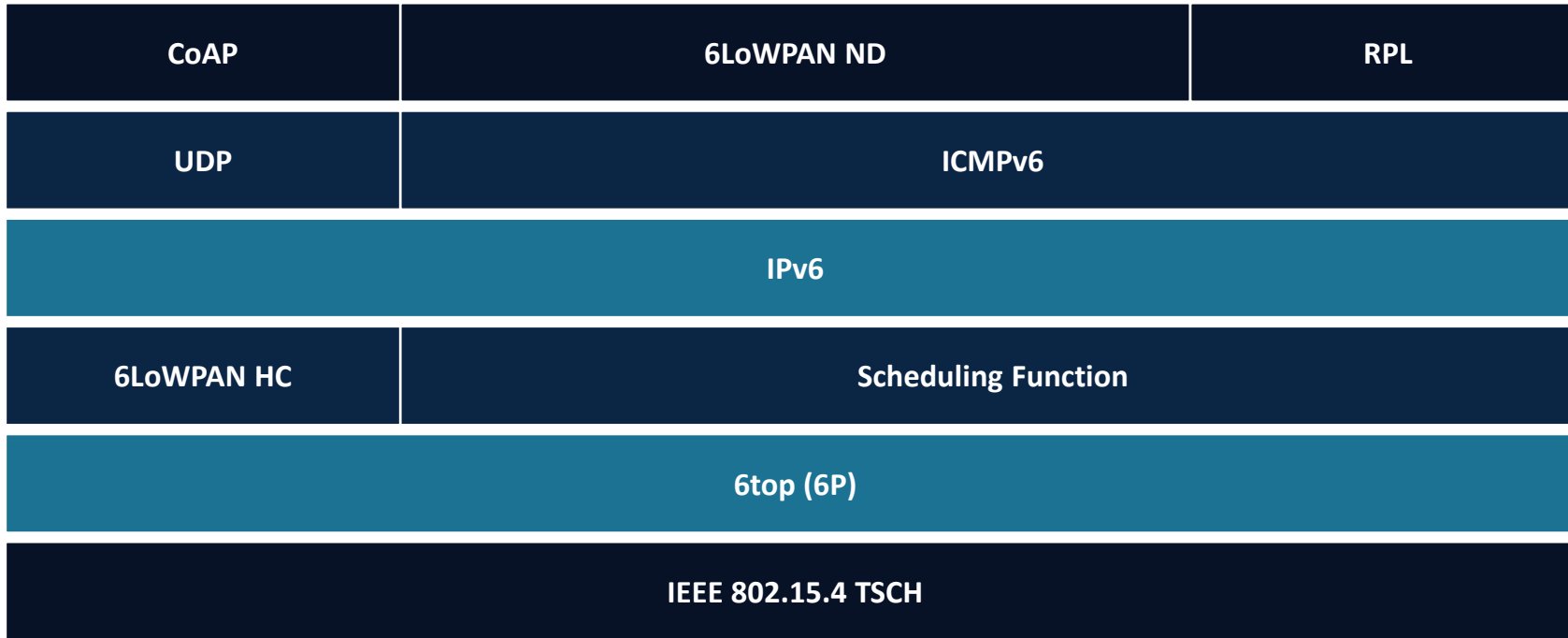
Döner Yönlü Anten +
Merkezi Çizelgeleme



Sunumun geri kalanı, doğrudan tezin özgün katkılarının yer aldığı 4, 5 ve 6. bölümlere odaklanacaktır (altın renkli).

6TiSCH Protokol Yığıtı

IEEE 802.15.4 TSCH MAC katmanı üzerinde; yönlendirme (RPL), sıkıştırma (6LoWPAN) ve çizelgeleme fonksiyonunu üst katmanlarla bütünleştiren 6top (6P) alt katmanı yer alır.



Bu tez, Çizelgeleme Fonksiyonu'na (Scheduling Function) uzamsal boyut kazandırır

6TiSCH'te Çizelgeleme Yaklaşımları



Özerk

Autonomous

Her düğüm, kendi ID/adresine dayalı bir hash fonksiyonu ile hücrelerini bağımsız olarak belirler. Sinyalleşme gerektirmez, ölçeklenebilir.



Dağıtık

Distributed

Komşu düğümler arasında 6P protokolü ile anlık müzakere edilerek hücre tahsisi yapılır. Trafiğe duyarlıdır.



Merkezi

Centralized

Ağ genelindeki topoloji bilgisine sahip bir düğüm (PCE), tüm çizelgeyi hesaplayıp dağıtır. Optimum ama ölçeklenebilirliği sınırlı.

Bu tez, her üç yaklaşımı da farklı bölümlerde — özerk çizelgelemeyi temel alarak — hibrit biçimde kullanır.

Geliştirilen İki Anten Modeli

● Anahtarlanabilir Huzme Anten

Switchable Beam Antenna

- Önceden belirlenmiş sabit ışıma örüntülerinden biri seçilir
- Düşük donanım karmaşıklığı
- Bölüm 4'te dağıtık çizelgeleme ile birlikte kullanılır

● Döner Yönlü Anten

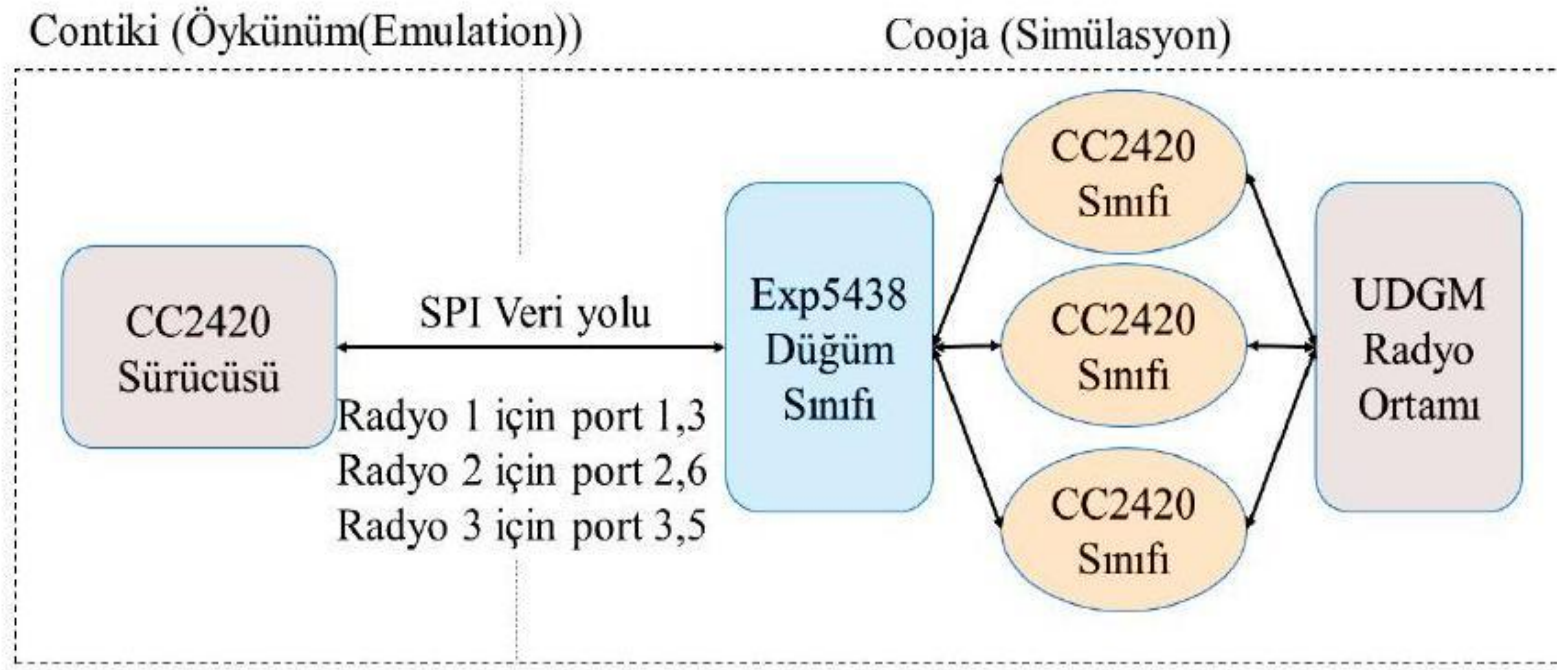
Steerable Directional Antenna

- Huzme hedefe doğru yönlendirilir, girişim kaynaklarına "sıfırlama" uygulanır
- Daha yüksek SINR ve menzil
- Bölüm 5 ve 6'da dağıtık ile merkezi çizelgeleme ile kullanılır

Her iki model de açık kaynaklı COOJA ağ simülatörüne eklenerek Contiki OS üzerinde test edilmiştir.

Simülasyon Altyapısı: COOJA + Contiki

Platform: TI EXP430F5438 (MSP430F5437 MCU + CC2420 radyo). Cooja'nın radyo modülü, birden fazla sanal anten arayüzünü SPI portları üzerinden yönetecek şekilde genişletilmiştir.



BÖLÜM 4

Anahtarlanabilir Anten ile Dağıtık Çizelgeleme

SF-DA: Yönlü Anten Tabanlı Çizelgeleme Fonksiyonu

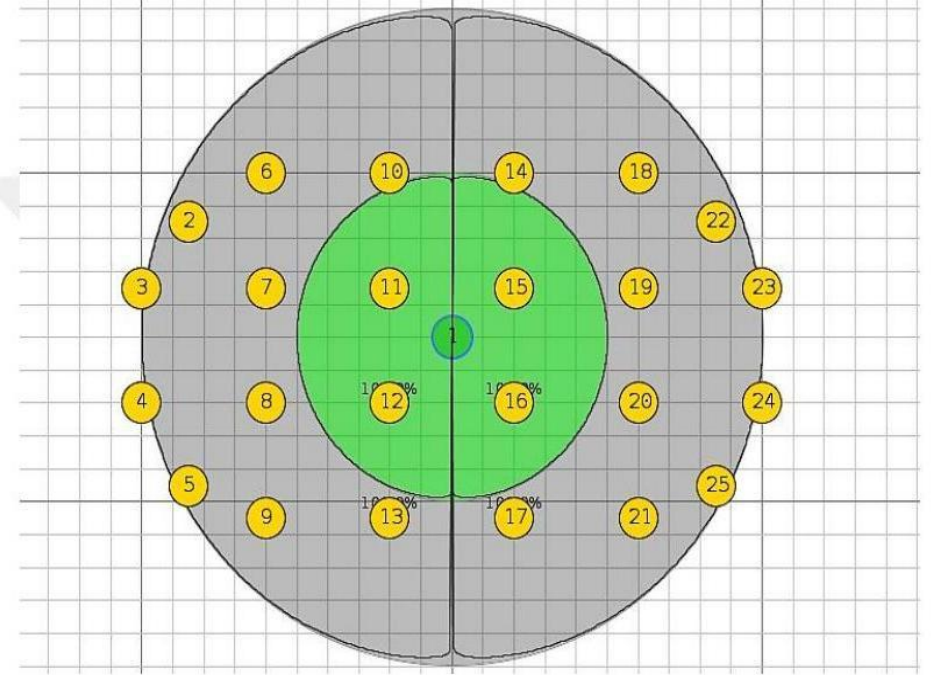
- Paylaşımlı hücrelerde tüm antenler aktif, adanmış hücrelerde tek anten aktif
- 6TiSCH Minimal Configuration ve Orchestra ile karşılaştırma

Uzam-Zaman Tabanlı Dağıtık Çizelgeleme

Paylaşımlı (shared) hücrelerde: tüm anten yönleri aktif edilir → tüm komşularla haberleşme garantisi

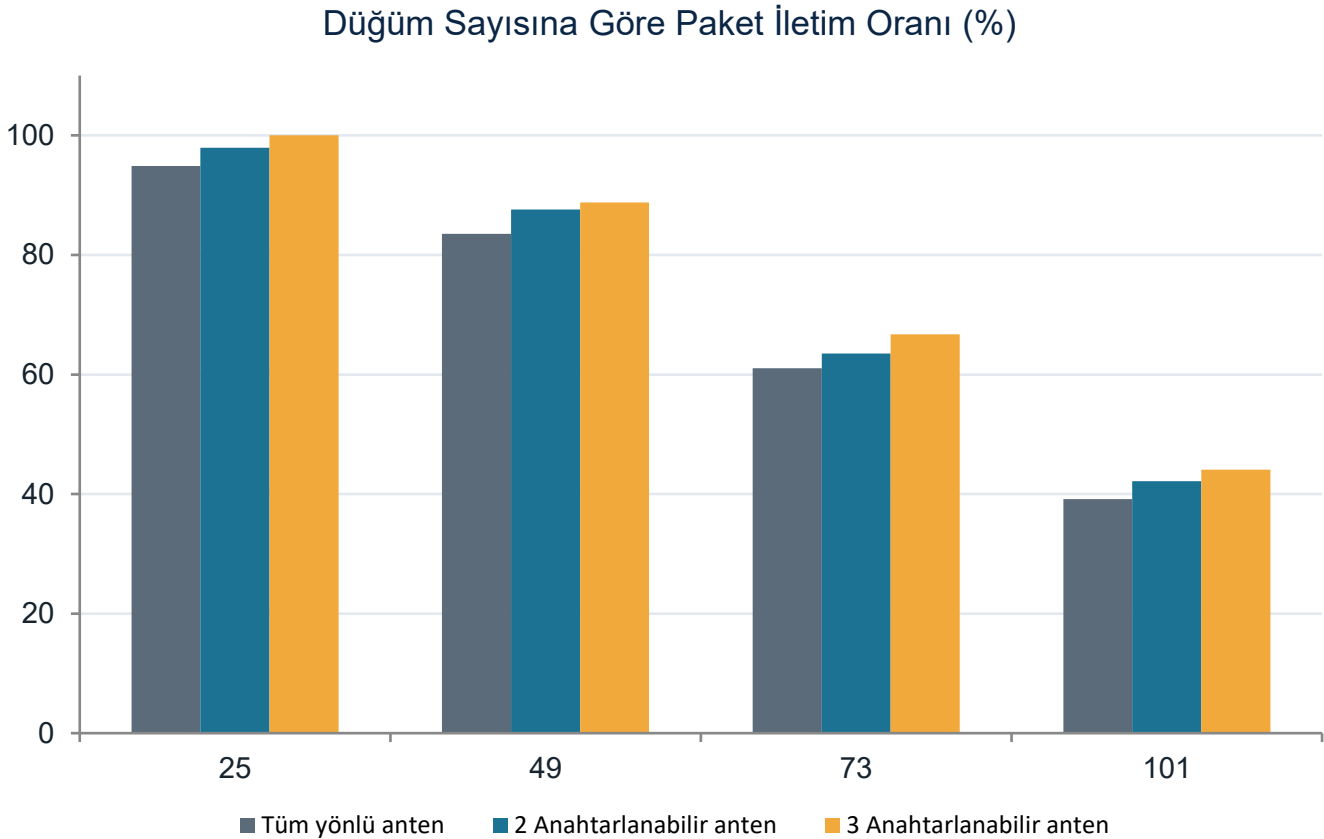
Adanmış (dedicated) hücrelerde: yalnızca doğru yöndeki anten aktif edilir → girişim ve çarpışma azalır

Sonuç: paylaşımlı hücrede çarpışma oranı önemli ölçüde düşer, ağ kararlılığı artar



Şekil 18. 25 düğümden oluşan örnek ağ yapısı (yeşil: kapsama alanı)

Paket İletim Oranı: Anten Sayısına Göre



~%10

PDR iyileşmesi
(yönlü antenle)

~%50

Gecikme
azalması

~%60

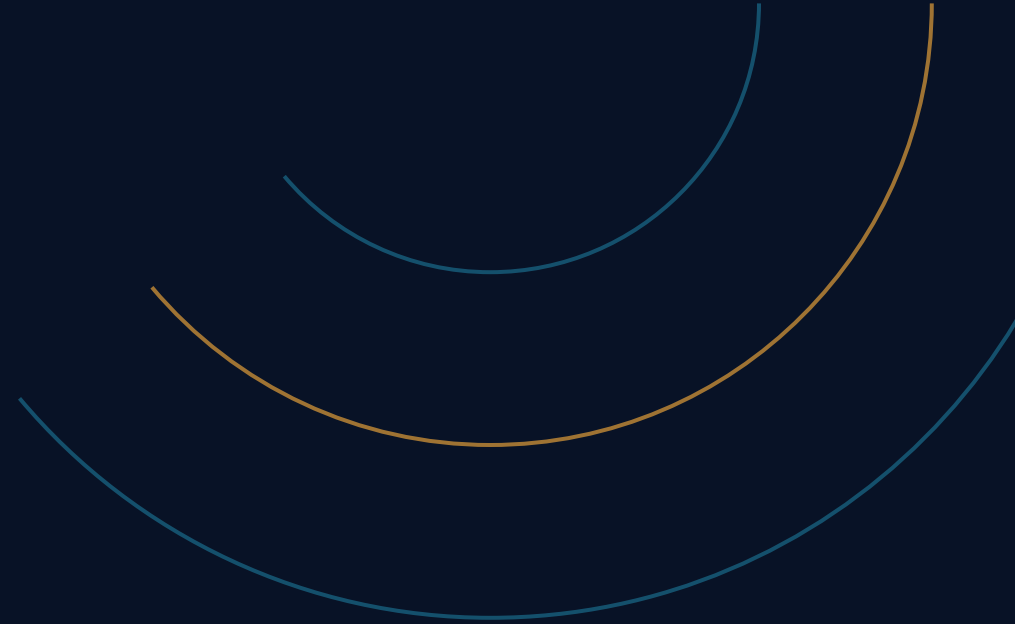
Enerji tüketimi
azalması (25 düğüm)

BÖLÜM 5

Döner Yönlü Anten ile Dağıtık Çizelgeleme

Dar kapsama alanının getirdiği yeni zorlukların çözümü

- Sorun: dar huzme → uzun senkronizasyon süresi, geç ağ oluşumu
- Sorun: tümegönderim (broadcast) kontrol paketleri tüm komşulara ulaşamıyor



Özerk Çizelgeleme ile Desteklenen Hibrit Yaklaşım

Sahte İşaretçi Paketi

Düğümün, ağı senkronize olmadan önce komşularını tanımasına imkân tanıyan yeni bir mekanizma.

Özerk Hücrelerden Kontrol İletimi

Tümeğönderim paketleri, özerk çizelgelenmiş hücrelerden art arda gönderilerek tüm komşulara ulaştırılır.

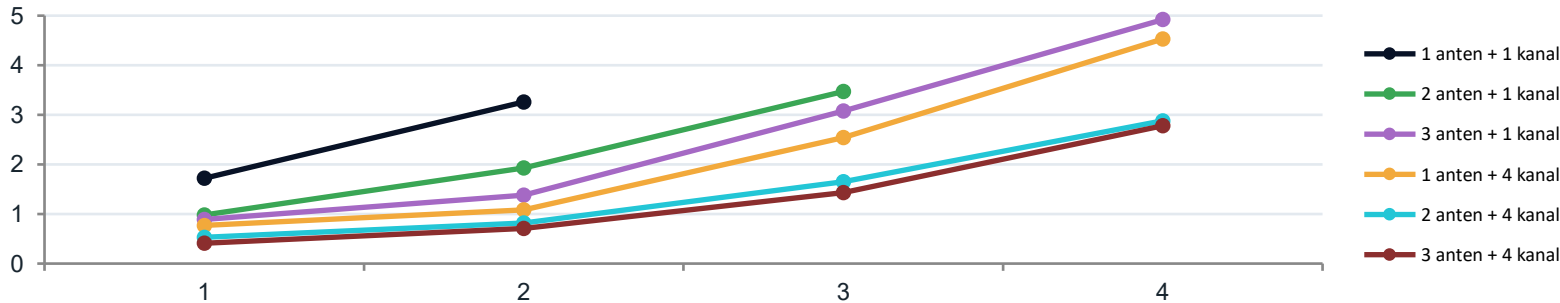
En İyi Yayın Gücü / Yön Değişimi

Düğüm çiftleri arasında maksimum sinyal gücünü veren anten yönünün zamanla izlenmesi ve güncellenmesi.

Ölçeklenebilir Senkronizasyon

Özerk çizelgeleme, ağ yoğunluğundan bağımsız, ölçeklenebilir bir senkronizasyon süresi sağlar.

Ortalama Ağ Gecikmesi (sn)



Değerler Şekil 26'dan okunmuştur

Sonuç

Tüm yönlü antene kıyasla ağ performans metriklerinde belirgin iyileşme; özerk çizelgeleme senkronizasyon sorununu ölçeklenebilir biçimde çözer.

BÖLÜM 6

Döner Yönlü Anten ile Merkezi Çizelgeleme

TASA algoritmasının uyarlanması ve çift yönlü çizelgeleme

- Merkezi bir düğüm (PCE), ağ topolojisine göre tüm çizelgeyi hesaplar
- Veri paketinin kaynaktan toplayıcıya izlediği yol dikkate alınır



TASA Uyarlaması ve Çift Yönlü Çizelgeleme

1

Bağlılık / Girişim / Çakışma Matrisleri

Döner yönlü antenin yön bilgisi kullanılarak ağın çizge (graph) temsili çıkarılır.

2

TASA Algoritmasının Uyarlanması

Zaman/frekans/anten-yönü birleşik olarak atanarak çakışmasız bir çizelge üretilir.

3

Yol Tabanlı Çizelge Üretimi

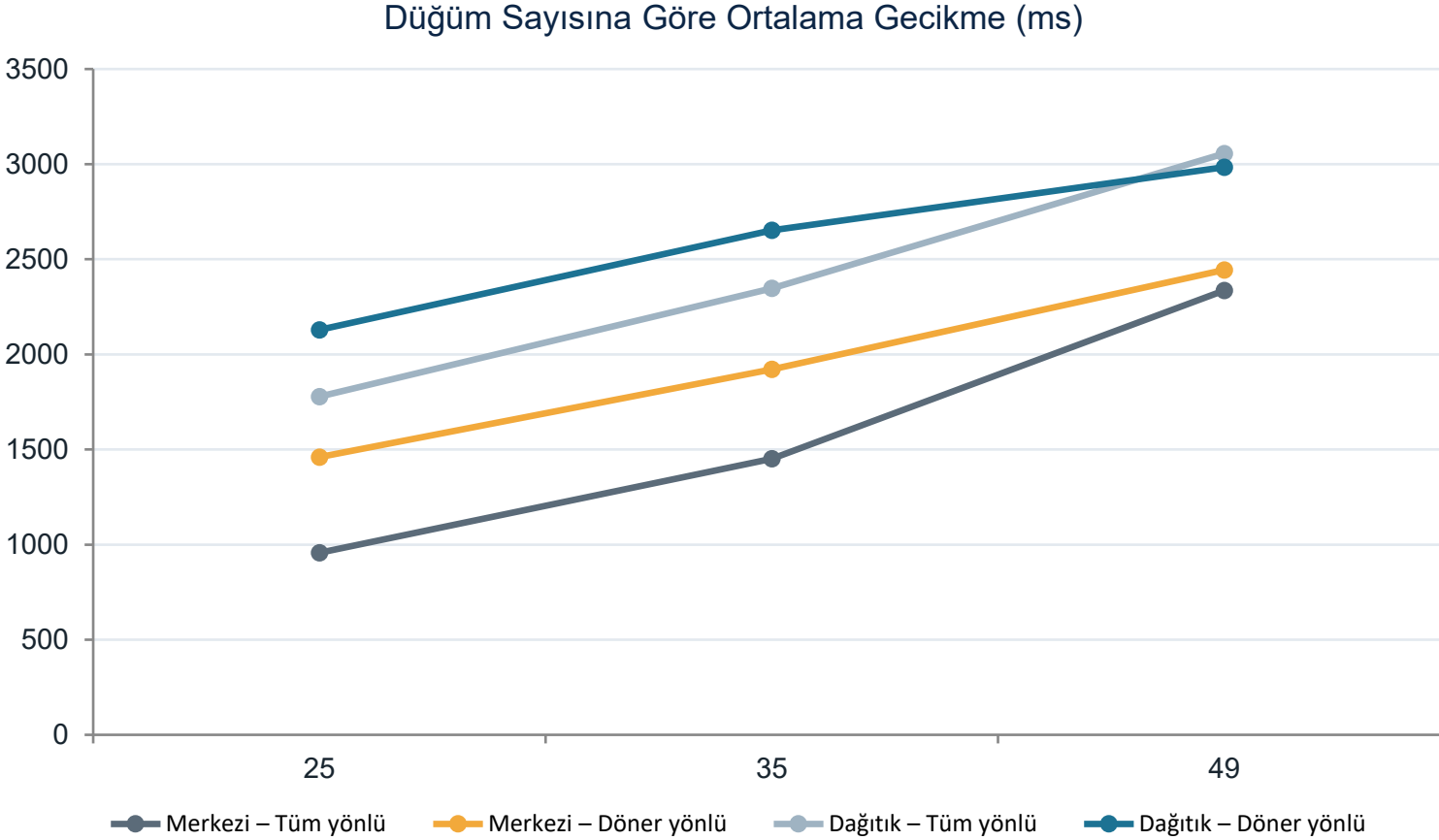
Paketin kaynaktan toplayıcıya izlediği çoklu-atlama yol dikkate alınarak hücreler sıralı biçimde tahsis edilir.

4

Çift Yönlü Merkezi Çizelgeleme

Yukarı ve aşağı yönlü trafik aynı anda planlanarak uçtan uca gecikme azaltılır.

Merkezi ve Dağıtık Çizelgeleme Karşılaştırması



Gözlem

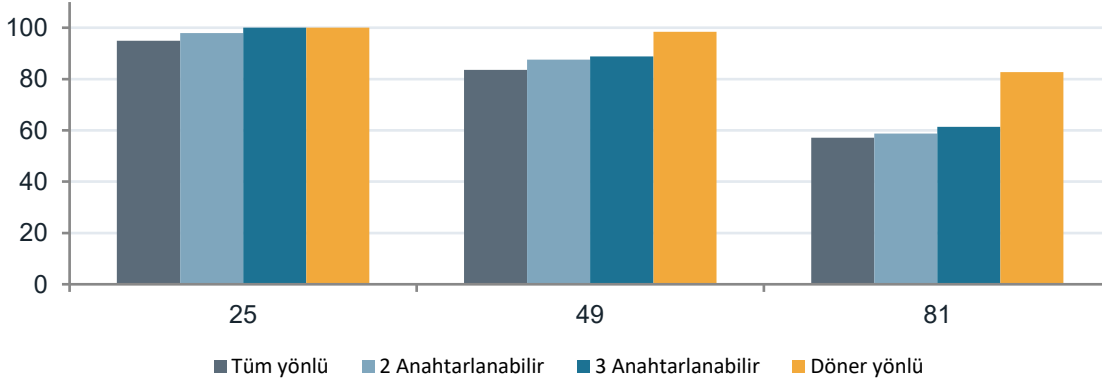
Merkezi çizelgeleme, dağıtık çizelgelemeye kıyasla daha düşük uçtan uca gecikme ve enerji tüketimi sağlar.

Ancak merkezi çözüm ölçeklenebilir değildir
→ küçük, yoğunluğu az ve statik ağlarda uygundur.

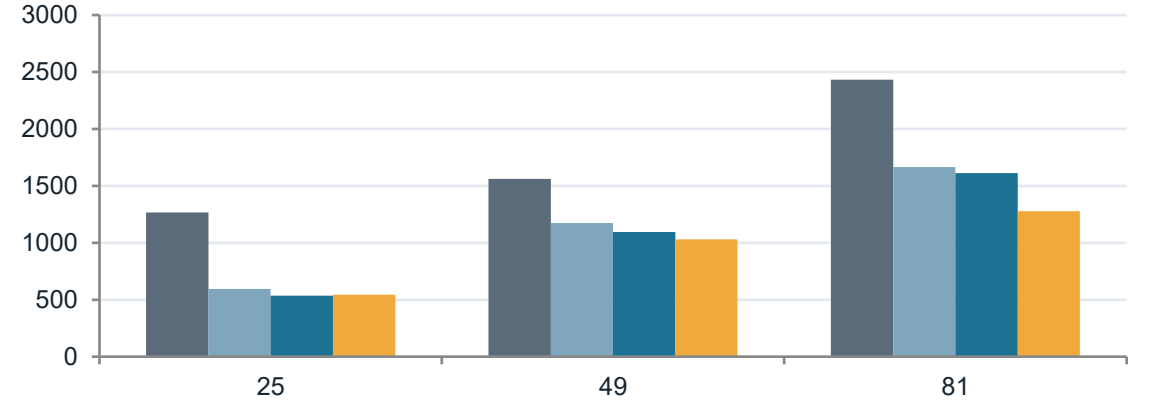
Algoritma, döner yönlü anten ile uyarlanmış TASA algoritmasına karşı doğrulanmıştır.

Anten Modellerinin Genel Karşılaştırması

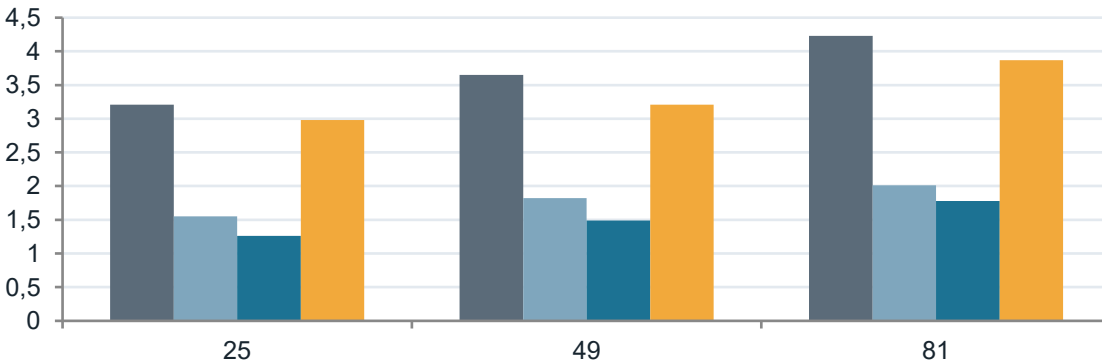
Paket İletim Oranı (%)



Uçtan Uca Gecikme (ms)



Enerji Tüketimi (mWh)



Genel Bulgu

Akıllı/yönlü antenler, zaman ve frekans boyutlarına ilave olarak uzamsal boyutu kullanarak; tüm yönlü antenlere göre her üç ölçütte de (PDR, gecikme, enerji) üstün performans sergilemiştir. Yoğun ağlarda (81 düğüm) fark en belirgin haldedir.

Sonuç ve Değerlendirme



Anahtarlanabilir Anten (Böl.4)

Paylaşımlı hücrede çarpışma/girişimi azaltarak ağ kararlılığını artırdı; kısıtlı frekans kaynağında PDR, enerji ve gecikmeyi iyileştirdi.



Döner Yönlü Anten (Böl.5)

Hibrit özerk+dağıtık çözüm, senkronizasyon süresi sorununu ölçeklenebilir biçimde çözdü; tüm yönlü antene göre performans arttı.



Merkezi Çizelgeleme (Böl.6)

Yol tabanlı ve çift yönlü çizelgeleme ile dağıtık çözüme kıyasla daha düşük gecikme/enerji elde edildi; ölçeklenebilirlik küçük ağlarla sınırlı.

Genel Sonuç:

Akıllı/yönlü antene sahip düğümler, bant genişliği kaynaklarını zaman-frekans-uzam boyutlarında planladığında, geleneksel tüm yönlü yöntemlere göre üstün ağ performansı sergiler.

Gelecek Çalışmalar ve Yayınlar

GELECEK ÇALIŞMALAR

- 1 Simülasyon sonuçlarının gerçek donanım test ortamında (testbed) doğrulanması
- 2 2.4 GHz bandını paylaşan diğer teknolojilerle yüksek girişim ortamında performans analizi
- 3 Makine öğrenmesi ile en iyi anten yönü ve hücre seçimi algoritmalarının geliştirilmesi
- 4 Çok yollu (multipath) iletişimin yönlendirilebilir anten çözümleriyle entegrasyonu

YAYINLAR

IEEE Access (2021)

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

TJEECS (2019)

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.

Bu tez, 118E289 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.



Teşekkür Ederim

Sorularınızı memnuniyetle yanıtlarım

Sercan KÜLCÜ • Danışman: Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi • Fen Bilimleri Enstitüsü • Bilgisayar Mühendisliği