

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ZİGBEE ALGILAYICI AĞLARINDA  
TOPOLOJİYE BAĞLI BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bilişim Tek. Öğrt. Yasin KOÇ**

**HAZİRAN 2015  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yasin KOÇ tarafından hazırlanan

ZİGBEE ALGILAYICI AĞLARINDA TOPOLOJİYE BAĞLI  
BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26/05/2015 gün ve 1604 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Cemal KÖSE

Üye : Doç. Dr. Mustafa ULUTAŞ

Üye : Doç. Dr. Erdal KILIÇ

  
m. ulutaş  
Erdal Kiliç

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Günümüzde kablosuz sistemlerin hayatımıza en fazla entegre olduğu alanlarından birisi, şüphesiz ki algılayıcı ağlarıdır. Yaşamı kolaylaştıracak bir çok akıllı uygulamanın ve endüstriyel verimliliği artıran kablosuz bir çok uygulamanın altında, kablosuz algılayıcı ağlar, yükselen bir eğilimle tercih edilmeye devam etmektedir. Algılayıcı ağların teknoloji olarak tercih edilebilirliği noktasında, Zigbee ağlarının yeri ve önemi her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada üç farklı senaryo üzerinde Zigbee tabanlı algılayıcı ağların ağ başarımları incelenip, elde edilen sonuçlar doğrultusunda öneriler sunulmuştur.

Çalışmalarım boyunca bana değerli zamanını ayıran, verdiği fikirler ile beni yönlendiren ve bana akademik anlamda bir ufuk kazandırmış olan değerli hocam sayın Doç. Dr. Mustafa ULUTAŞ'a, çalışmalarımda desteğini esirgemeyen kıymetli hocam sayın Doç. Dr. Celal ÇEKEN'e, yaptığı katkılarla tezimin olgunlaşmasına yardım eden sayın Prof. Dr. Cemal KÖSE'ye, Doç. Dr. İsmail KAYA'ya, kardeşim Mak. Müh. Ersin KOÇ'a ve Elk. Yük. Müh. Altan SOMAY'a teşekkür ederim. Yine kıymetli mesai arkadaşım Bilişim Tek. Öğrt. Ali ALTUNBAŞ'a da verdiği tüm desteklerinden ötürü ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca sabrını ve manevi desteğini hiç esirgemeyen eşime de şükranlarımı sunarım.

Yasin KOÇ

Trabzon, 2015

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘Zigbee algılayıcı ağlarında topolojiye bağlı başarım değerlendirmeleri’’ başlıklı bu çalışmayı, baştan sona kadar danışmanım Doç.Dr. Mustafa ULUTAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, 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. 26/05/2015

Yasin KOÇ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. IEEE 802.15.4 - Zigbee Algılayıcı Ağ Teknolojisi .....	2
1.2.1. IEEE 802.15.4 Temelli Zigbee Teknolojisi Teknik Alt Yapısı .....	4
1.2.2. IEEE 802.15.4 Temelli Zigbee Ağ birimleri ve Yönlendirme .....	7
1.2.3. IEEE 802.15.4 - Zigbee Mimarisi .....	9
1.2.4. IEEE 802.15.4 - Zigbee Ağ Topolojileri .....	10
1.2.5. IEEE 802.15.4 - Zigbee Uygulama Alanları .....	12
1.3. Ağlarda Servis ve Link Kalitesi Değerlendirme Kavramları .....	12
1.4. Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Link Kalitesi Değerlendirmeleri .....	13
1.4.1. IEEE 802.15.4 - Zigbee Ağlarında Link Kalitesi İçin Beklenen Güçlükler ..	14
1.4.2. IEEE 802.15.4 - Zigbee Ağlarında Link Kalitesi Ölçekleri .....	14
1.4.3. Zigbee Ağlarında Link Kalitesi Ölçeklerinin Başarım Değerlendirmeleri ...	16
1.5. Ağ Teknolojilerinde Benzetim ve Modelleme .....	18
1.5.1. Benzetim Yöntemleri ve Benzetim Araçları .....	19
1.5.2. OPNET Modeller Benzetim Yazılımı Genel Özellikleri .....	21
1.5.3. OPNET Modeller 14.5 Uygulama Platformu .....	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA .....	25
2.1. Giriş .....	25
2.2. Senaryo-1 .....	26

2.2.1.	Senaryo-1 Ağ, İstatistik ve Benzetim Parametreleri .....	27
2.2.2.	Senaryo-1 Genel Ağ İstatistik ve Analizleri .....	28
2.2.3.	Senaryo-1 Koordinatör Düğüm İstatistik ve Analizleri .....	35
2.2.4.	Senaryo-1 Genel Değerlendirmesi .....	40
2.3.	Senaryo-2 .....	41
2.3.1.	Senaryo-2 Ağ, İstatistik ve Benzetim Parametreleri .....	43
2.3.2.	Senaryo-2 Genel Ağ İstatistik ve Analizleri .....	44
2.3.3.	Senaryo-2 Koordinatör Düğüm İstatistik ve Analizleri .....	49
2.3.4.	Senaryo-2 Genel Değerlendirmesi .....	53
2.4.	Senaryo-3 .....	53
2.4.1.	Senaryo-3 Ağ, İstatistik ve Benzetim Parametreleri .....	56
2.4.2.	Senaryo-3 Genel Ağ İstatistik ve Analizleri .....	57
2.4.3.	Senaryo-3 Koordinatör Düğüm İstatistik ve Analizleri .....	60
2.4.4.	Senaryo-3 Genel Değerlendirmesi .....	63
3.	SONUÇLAR .....	65
4.	ÖNERİLER .....	66
5.	KAYNAKLAR .....	67

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ZİGBEE ALGILAYICI AĞLARINDA TOPOLOJİYE BAĞLI  
BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ

Yasin KOÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mustafa ULUTAŞ  
2015, 70 Sayfa

Bu tezde, Zigbee tabanlı kablosuz algılayıcı ağlarının üç farklı senaryo altındaki başarımları, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her üç senaryo çalışmasında da OPNET benzetim yazılımı kullanılmıştır. İlk senaryoda yıldız topolojik yapıdaki dokuz alt kurgunun başarımları karşılaştırılmıştır. Bu senaryo ile belirlenen ebatlardaki en ideal yıldız topoloji kurgusunun 16 düğümlü yapı olduğu ortaya konmuştur. İkinci senaryoda ise bu 16 düğümlük yıldız kurgu ile yönlendirici destekli örgü ve ağaç topolojik yerleşimler incelenmiştir. Böylece aynı düğüm sayıları üzerinde her üç topolojinin de başarımları karşılaştırılmıştır. Bu senaryo sonunda örgü topolojik kurgunun daha iyi başarımlar sergilediği gözlemlenmiştir. Üçüncü senaryoda, ebatları genişletilmiş ve düğüm sayıları artırılmış bir ağda, üç farklı topolojiden esinlenerek kullanılan yönlendirme tekniklerinin etkileri incelenmiştir. Kullanılan yıldız, örgü ve ağaç yönlendirme tekniklerine göre üç kurgudan, örgü yönlendirmeli kurgunun başarımları daha iyi seviyelerde çıkmıştır. Böylece elde edilen sonuçlar ışığında, Zigbee algılayıcı ağlarının planlanmasına ve geliştirilmesine yönelik bazı öneriler ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:**Zigbee, Kablosuz algılayıcı ağ topolojileri, Opnet, Link kalitesi değerlendirmeleri, Zigbee yönlendirme.



Master Thesis

SUMMARY

PERFORMANCE EVALUATIONS OF ZIGBEE SENSOR NETWORKS  
DEPENDING ON TOPOLOGY

Yasin KOÇ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Computer Engineering  
Supervisor: Assoc.Prof. Mustafa ULUTAŞ  
2015, 70 Pages

In this thesis, Zigbee based wireless sensor networks were studied in three different scenarios comparatively. OPNET simulation software is used in each three scenarios. In first scenario, performances of 9 sub-fictions in star topologic structure were compared. It was exposed by this scenario that the most ideal star topologic fiction with determined dimensions is 16 nodular structure. In second scenario, this 16 nodular star fiction were examined with router supported mesh and tree topologic alignments. So that, performances of each three topologies were compared on same nodule numbers. In the end of this second scenario, it was observed that mesh topologic fiction has better performance. In third scenario, impacts of routing techniques inspired by each three different topologies were examined in a network with wider dimensions and more nodule numbers. It was occurred that mesh routing fiction has a better success of performance inside of three used fiction techniques as star, mesh and tree. Thus, in the light of optained results, some suggestions were introduced about planning and developing of zigbee sensor networks.

**Key Words:** Zigbee, Topologies of wireless sensor network, Opnet, Evaluations of link quality, Zigbee routing.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Örnek bir Zigbee tabanlı algılayıcı ağ örüntüsü .....	2
Şekil 1.2. Kablosuz teknolojiler içerisinde Zigbee'nin yeri .....	3
Şekil 1.3. Zigbee protokol yığın .....	7
Şekil 1.4. Örnek bir Zigbee ağ modeli .....	9
Şekil 1.5. Zigbee topolojileri .....	11
Şekil 1.6. OPNET Modeller editörlerinin hiyerarşik yapısı .....	22
Şekil 2.1. Senaryo-1 128+1 düğümlük alt kurgu .....	27
Şekil 2.2. Senaryo-1 ağ başarımlar grafiği .....	29
Şekil 2.3. Senaryo-1 MAC gecikme grafiği .....	31
Şekil 2.4. Senaryo-1 noktadan noktaya gecikme grafiği .....	32
Şekil 2.5. Senaryo-1 sıçrama sayıları grafiği .....	33
Şekil 2.6. Senaryo-1 genel ağ paket kayıp sayıları grafiği .....	34
Şekil 2.7. Senaryo-1 koordinatör düğüm BHO grafiği .....	36
Şekil 2.8. Senaryo-1 koordinatör düğüm İGO grafiği .....	37
Şekil 2.9. Senaryo-1 koordinatör düğüm sinyal seviyeleri grafiği .....	38
Şekil 2.10. Senaryo-1 koordinatör düğüm paket kayıp oranları grafiği .....	39
Şekil 2.11. Senaryo-2 yıldız topolojik kurgu .....	42
Şekil 2.12. Senaryo-2 örgü topolojik kurgu .....	42
Şekil 2.13. Senaryo-2 ağaç topolojik kurgu .....	43
Şekil 2.14. Senaryo-2 başarımlar değerleri grafiği .....	45
Şekil 2.15. Senaryo-2 MAC gecikme grafiği .....	46
Şekil 2.16. Senaryo-2 noktadan noktaya gecikme grafiği .....	47
Şekil 2.17. Senaryo-2 sıçrama sayıları grafiği .....	48
Şekil 2.18. Senaryo-2 koordinatör düğüm BHO grafiği .....	49
Şekil 2.19. Senaryo-2 koordinatör düğüm İGO grafiği .....	50
Şekil 2.20. Senaryo-2 koordinatör düğüm sinyal seviyeleri grafiği .....	51
Şekil 2.21. Senaryo-2 koordinatör düğüm paket kayıp oranları grafiği .....	52
Şekil 2.22. Senaryo-3 yıldız yönlendirmeli ağ kurgusu .....	54

Şekil 2.23. Senaryo-3 örgü yönlendirmeli ağ kurgusu .....	55
Şekil 2.24. Senaryo-3 ağaç yönlendirmeli ağ kurgusu .....	55
Şekil 2.25. Senaryo-3 genel ağ başarıım grafiği .....	57
Şekil 2.26. Senaryo-3 genel ağ gecikme grafiği .....	58
Şekil 2.27. Senaryo-3 genel ağ sıçrama sayıları grafiği .....	59
Şekil 2.28. Senaryo-3 ZKD sinyal seviyeleri grafiği .....	61
Şekil 2.29. Senaryo-3 ZKD paket kayıp oranları grafiği .....	62
Şekil 2.30. Senaryo-3 ZKD yük dağılım grafiği .....	63

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Zigbee ve bazı kablosuz teknolojilerin özelliklerinin karşılaştırılması .....	4
Tablo 2. IEEE 802.15.4 genel karakteristikleri ve modülasyon parametreleri .....	6
Tablo 3. Link kalitesi ölçeklerinin karakteristikleri .....	15
Tablo 4. Ağ benzetim yazılımları .....	20
Tablo 5. Senaryo-1 ortak ağ ve düğüm parametreleri .....	28
Tablo 6. Senaryo-1 başarıml grafiği analizleri .....	30
Tablo 7. Senaryo-1 ağ istatistik analizleri .....	35
Tablo 8. Senaryo-1 in koordinatör düğümlerine ait istatistik analizleri .....	40
Tablo 9. Senaryo-2 ortak düğüm parametreleri .....	43
Tablo 10. Senaryo-2 ağ parametreleri .....	44
Tablo 11. Senaryo-2 İzlenecek istatistikler .....	44
Tablo 12. Senaryo-2 genel ağ istatistik analizleri .....	49
Tablo 13. Koordinatör düğüm istatistik ve analizleri .....	52
Tablo 14. Senaryo-3 ortak düğüm parametreleri .....	56
Tablo 15. Senaryo-3 ağ parametreleri .....	56
Tablo 16. Senaryo-3 izlenecek istatistikler .....	57
Tablo 17. Senaryo-3 genel ağ istatistikleri analizi .....	64
Tablo 18. Senaryo-3 ZKD istatistikleri analizi .....	64

## SEMBOLLER

PAN	: Kişisel alan ağları
PHY	: Fiziksel Katman
MAC	: Ortam erişim kontrolü
ISM	: Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi bant
PN	: Sahte rastgele gürültü dizisi
FFD	: Tam fonksiyonlu cihaz
RFD	: Kısıtlı fonksiyonel cihaz
DSSS	: Doğrudan dizi yayılım spektrumu
ZKD	: Zigbee koordinatör düğüm
ZYD	: Zigbee yönlendirici düğüm
ZSD	: Zigbee son düğüm
QoS	: Servis kalitesi
LQI	: Bağlantı kalite göstergesi
LQE	: Bağlantı kalite değerlendirme
İGO	: İşaret gürültü oranı
RSSI	: Alınan işaret güç göstergesi
PRR	: Paket alım oranı
RNP	: Başarılı paket alımı öncesi gerekli gönderimler ortalaması
ETX	: Beklenen iletim sayısı
WMEWMA	: Hareketli üstel ağırlık oranları ile çerçeve değerlendirme
ARR	: Onay paketi oranı
BHO	: Bit hata oranı
BPSK	: İki evreli faz modülasyon tekniği
QPSK	: Dört evreli faz modülasyon tekniği
CSMA/CA	: Çok erişimli kanal algılama ve çarpışmadan sakınma
ASK	: Genlik modülasyonu tekniği
AODV	: Eş-eş isteğe bağlı uzaklık vektör yönlendirme

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Günümüzde kablosuz teknolojiler toplumsal yaşantıya daha çok GSM operatörlerinin entegrasyonu ile girmiş olsa da, her geçen zaman dilimi, geliştirilen yeni nesil kablosuz teknolojilerin insan yaşantısının bir parçası olmaya aday olduğunu kanıtlamaktadır.

Böylelikle donanımların ve kablosuz ağ teknolojilerinin gelişmesi sayesinde küçük kablosuz cihazların her zaman her yerde bilgiye ulaşabileceği ve aktif olarak akıllı ortamların oluşturulmasına katkıda bulunabileceği yeni bir çağın eşğine gelindi. Akıllı ortam uygulamalarından bir tanesi de özel amaçlı hazırlanan ve fiziksel olayları algılamak için algılayıcıların bağlanmasıyla kurulan algılayıcı ağlarıdır. Algılayıcı ağları güvenilirlik, esneklik, etkin-maliyet ve kurulum kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı geniş uygulama alanları bulmaya başlamıştır.[1][3]

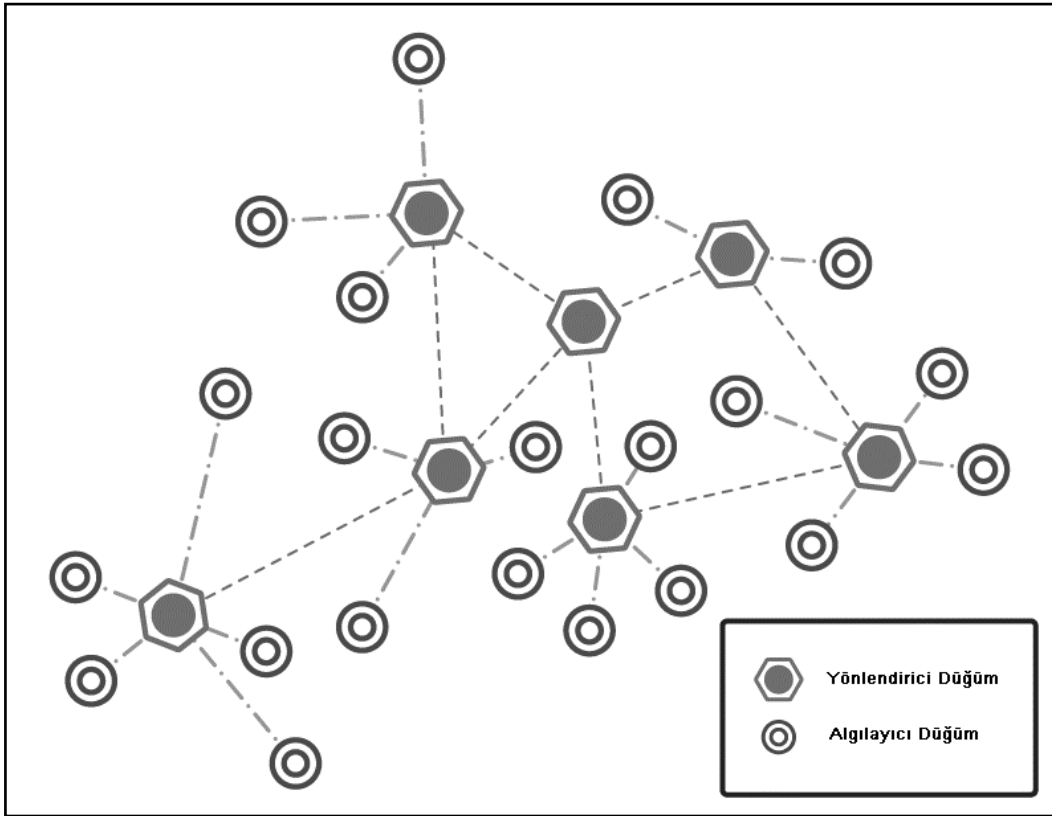
Algılayıcı ağları, nem, sıcaklık, basınç, ses, ışık ve hareketlilik gibi durumsal değişiklikleri takip edebilecek yapıdaki termik, sismik, manyetik ve görsel gibi bir çok farklı tipte algılayıcılar içerebilirler.[2]

Araştırmaların başlarında kablosuz algılayıcı ağlarının ana motivasyon noktası askeri uygulamalar olmuştur. Güvenlik üzerine yapılan ilk projeler, uygulama şekillerine karar vermişler ve çok büyük ölçülerde algılayıcı ağlarının (binlerce düğümlü, geniş coğrafik alanları kapsayan) kurulumuna öncülük etmişlerdir. Daha sonraları çevresel görüntüleme, tarımsal takip, üretim ve dağıtım işlemleri, sağlık sektörü gibi sivil konular da algılayıcı ağlarının uygulama alanları haline gelmişlerdir.[4]

Bir veya daha çok algılayıcı sistemlerde, algılayıcı ağındaki her düğüm, bir radyo alıcı-vericisi veya başka bir kablosuz iletişim cihazı, küçük bir mikroişlemci ve genellikle batarya olmak üzere bir enerji kaynağı içerir. Buna göre algılayıcı düğümü çok küçük ölçekli (birkaç cihazın bağlantıda olduğu) olabileceği gibi, büyük ölçekli (pek çok cihazın bağlantı halinde olduğu) de olabilir. Aynı şekilde algılayıcı düğümlerinin maliyetleri de çok değişkendir. Algılayıcı ağının büyüklüğüne ve karmaşıklığına bağlı olarak yüzlerce dolardan birkaç sente kadar değişiklik gösterebilir.[3]

## 1.2. IEEE 802.15.4 - Zigbee Algılayıcı Ağ Teknolojisi

Zigbee ismini, arıların çiçekten çiçeğe dolaşırken izledikleri zig-zag şeklindeki yoldan almıştır. Bu dolaşım sırasında, diğer arıların bu kaynaklara nasıl ulaşmış oldukları bilgisiyle hareket ederler. Kablosuz bağlanabilirlik için yeni bir standart olan Zigbee, IEEE tarafından duyurulan IEEE 802.15.4 standartını temel alıp, Zigbee Birlikteliği ile ilk genel standartını uygulamalarda kullanılmak üzere sağlamıştır. Zigbee Birlikteliği; *Ivensys*, *Honeywell*, *Mitsubishi Electric*, *Motorola* ve *Philips* gibi 200 kadar firmadan oluşmaktadır.[2][5]

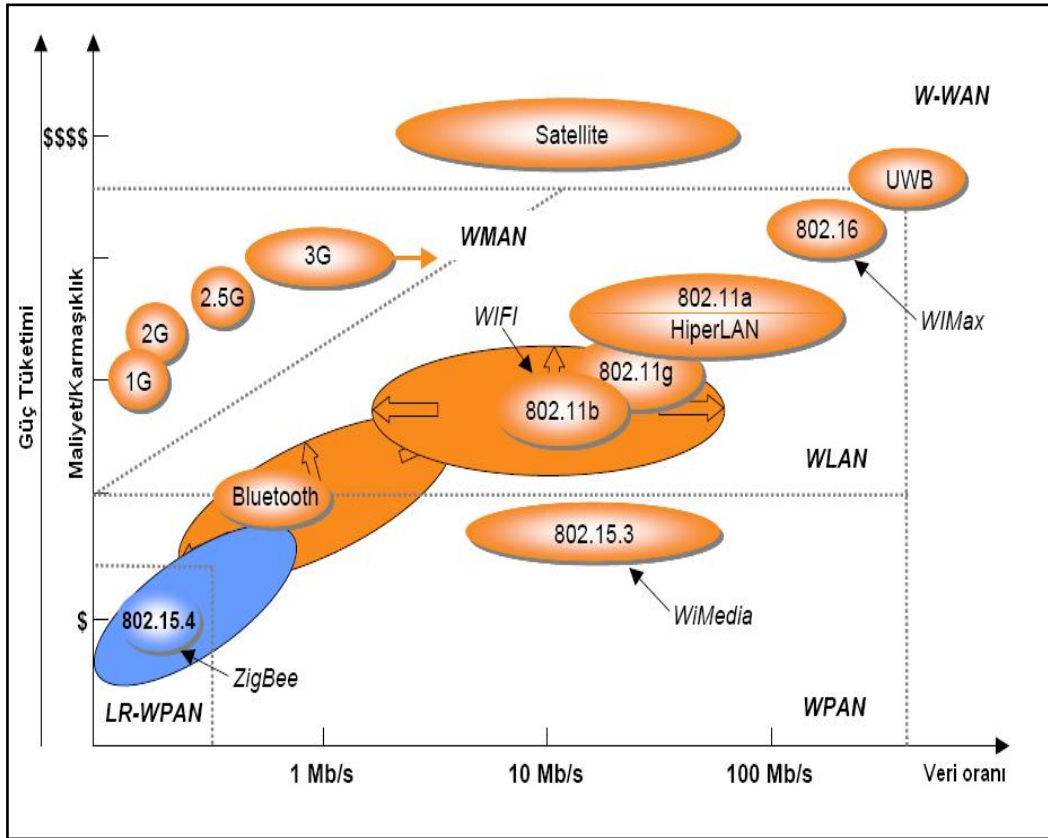


Şekil 1.1. Örnek bir Zigbee tabanlı algılayıcı ağ örüntüsü.[1]

Zigbee, PAN ağlarında kullanılan cihazlar arasında belirli miktar veri transferi için kullanılması, ağ ile yapılan ölçüm, tespit, izleme ve uygulamaların kontrol edilmesi ile ilgilenir. Fakat WiFi veya Bluetooth gibi büyük boyutlu dosya transferi için elverişli değildir.

Zigbee, WiFi veya Bluetooth'un, birden çok cihazlar arasındaki iletişim yaklaşımına benzemeyen bir biçimde, basit ağlar üzerinden daha az güç tüketimi ve maliyet oluşturacak bir biçimde çalışarak, daha az bant genişliği istekleri ile iletişim sağlayabilmektedir.

WiFi ve Bluetooth bu istekleri karşılamakta (bazılarını karşılasalar da hepsini değil) zorlanmaktaydılar. 1999'da *FireFly* çalışma grubu, bugün Zigbee olarak bilinen teknolojiyi tasarlamaya başladı. Gelişim olarak önce IEEE 802.15.4 temel alınmış ve daha sonra Zigbee Birlikteliği'nin Aralık 2004'te bu işe el atmasıyla süreç gelişmiştir. Böylece Zigbee resmen PAN ağlarından birisi haline gelmiştir.[2][7]



Şekil 1.2. Kablosuz teknolojiler içerisinde Zigbee'nin yeri.[13]

Tablo 1'de Zigbee ile diğer kablosuz ağ teknolojilerinin özelliklerine yer verilmiştir. Bir anlamda karşılaştırma yapılmıştır. Zigbee teknolojisine yakın ve belki alternatif olarak kullanılacak bu teknolojilerin, Zigbee'ye oranla daha hızlı olmalarına karşın en önemli dezavantajları olarak, güç tüketimlerinin fazla oluşu hemen göze çarpmaktadır.



Tablo 1. Zigbee ve bazı kablosuz teknolojilerin özelliklerinin karşılaştırılması.[2]

Özellik		Zigbee	
Odaklanma alanı		İzleme ve Kontrol	
Sistem Kaynağı		4-32 Kb	
Pil Ömrü (gün)		100- 1000+	
Ağ Boyutu		~ Sınırsız ( $2^{64}$ )	
Ağ veri genişliği (kb/sn)		100- 1000+	
Kapsama Alanı (metre)		1 - 100+	
Başarı alanları		Dayanıklılık, maliyet, güç tüketimi	
Özellik	GPRS/ GSM	Wi-Fi	Bluetooth
Odaklanma alanı	Geniş alan ses ve veri	Web, email, Video	Kablo yerine
Sistem Kaynağı	16 Mb+	1 Mb+	250Kb+
Pil Ömrü (gün)	1-7 Gün	0.5-5	1-7
Ağ Boyutu	16 Mb+	32	7
Ağ veri genişliği (kb/sn)	64 - 128+	11000-54000	720
Kapsama Alanı (metre)	1000+	1-100	1-10+
Başarı alanları	Ulaşılabilirlik, kalite	Hız, esneklik	Maliyet, rahatlık

### 1.2.1. IEEE 802.15.4 Temelli Zigbee Teknolojisi Teknik Alt Yapısı

Zigbee, IEEE 802.15.4 standardı tarafından tanımlanan güçlü radyo, PHY ve MAC katmanları üzerine kuruludur. Bu yüzden öncelikle IEEE 802.15.4 standardını incelemekte yarar vardır. IEEE 802.15.4-2003 standardı bir PAN'daki radyo iletişimi ile ara-bağlantılı cihazları ve esas alınan protokolü tanımlar. Standart CSMA/CA ortam erişimi mekanizmasını kullanır ve yıldız, uçtan uca gibi topolojileri destekler. Ortam erişimi çekişme (*contention*) temellidir. Bir IEEE 802.15.4 ağı en azından bir tane tam fonksiyonlu cihaza ağ yöneticisi olarak ihtiyaç duyar. Son nokta cihazları ise sistem maliyetini düşürmek için fonksiyonelliği azaltılmış cihazlar olabilmektedirler. IEEE 802.15.4, üç adet lisanssız frekans bantını tanımlamıştır. İlk bant, 2.4 GHz frekans bandını (ISM) kullanır ve 16 kanala sahiptir. İkinci bant, 902-928 MHz frekans bantını 10 kanalla kullanır. En sonuncusu ise 868-870 Mhz frekans bantını sadece bir kanal ile kullanır. Bu frekans bantlarının kapasiteleri sırasıyla 250 kb/s, 40 kb/s, 20 kb/s 'dir.[6][7][8]

IEEE 802.15.4'ün kullanılan üç tip modülasyon tekniği vardır. BPSK, ASK ve O-QPSK. QPSK, dijital veri sinyalinin fazını modüle ederken, ASK ise sinyal genliğini modüle eder. Bu iki standart DSSS ve PSSH için kullanılırlar. Bu iki enerji yayma tekniği de çok yönlü sistemlerde, başarımları artırmak için tercih edilirler.[35]

IEEE 802.15.4 standardı, Zigbee protokol kümesi için dört katman sağlar. Fiziksel katman, ortam erişim katmanı, uygulama katmanı ve ağ katmanı.

Fiziksel katman, ISM 2.4 GHz için 16 kanal, ISM 900 MHz için 10 kanal, 868 MHz için 1 kanal ve bir bağlantı kalite göstergesi (LQI) sağlar. Düğümler arası bağlantı kalitesinin karakterize edilmesi için bu kanallara ihtiyaç olduğu gibi iletişim için de gereklidirler. Bununla birlikte MAC katman, kanal üzerindeki çoklu erişim kontrolü için CSMA/CA'yı kullanır. CSMA/CA ile garantili zaman dilimlerinde gerçek zamanlı veri aktarım işlemlerinin gerçekleştirilmesi sağlanır. [32][36]

CSMA/CA'nın iki tür kullanım modu vardır. Bunlardan birincisi tarama etkin mod diğeri de tarama pasif moddur.[37]

PHY katmanda üç farklı frekans bantında radyo iletişimi yapılabilmektedir. Uygulama için bunlardan sadece birinde çalışabilmesi yeterli olmaktadır. Bunlardan 2.4 GHz (2450 MHz) PHY, bir onaltılı quasi-ortogonal modülasyon tekniği kullanır. Her bir veri sembol periyodunda dört bilgi biti, 16'lı yakın PN dizisinden birinin iletilmesi için, seçimde kullanılır. PN dizileri, bitleştirilmiş ardışık veri sembolleridir ve toparlanmış entegre dizi, O-QPSK (*offset-quadrature phase-shift keying*) kullanan taşıyıcı (*carrier*) ile modüle edilmiş durumdadır. Temelde bu modülasyon formatı, O-QPSK kodlaması olarak düşünülür ve tipik olarak bir look-up tablosu ile iletilme maliyetini azaltan kanal sembollerinin oluşumu için gerçekleştirilir. Tipik iletim mesafesi, kapalı mekanda (*indoor*) yani görüş alanında olmayan farklı ortamlar için 30 metre, görüş alanı içinde ise 80 metreden fazla olarak rapor edilmiştir. Buradaki önemli bir nokta da, uygulamalar ağ cihazları arasında ise ve büyük miktarda veri iletimini gerektiriyorsa, bit oranının sınırlayıcı bir faktör olduğudur. [2][7]

Tablo 1'de gösterilen frekans bantlarından 868 MHz Avrupa için, 902-928 MHz Kuzey Amerika için, 2.4 GHz ise dünya çapındaki uygulamalar için düşünülmüştür. Farklı frekans bantlarındaki birkaç kanal, dağılım içerisinde yeniden konumlandırmayı mümkün kılar. Bu standart, dinamik kanal seçimine izin verir, bir tarama fonksiyonu (*beacon*) aramasında desteklenen kanallar listesini sırayla, alıcı enerjisi tespiti, bağlantı kalite

göstergesi, kanal anahtarlama gibi olgularla kontrol eder. Düşük frekanslar, daha düşük yayılım kayıpları nedeniyle daha uzak mesafeleri sağlarlar. Düşük oran, daha iyi hassasiyet ve büyük kapsama alanına çevrilebilir [7] [15].

Tablo 2. IEEE 802.15.4 genel karakteristikleri ve modülasyon parametreleri.[7]

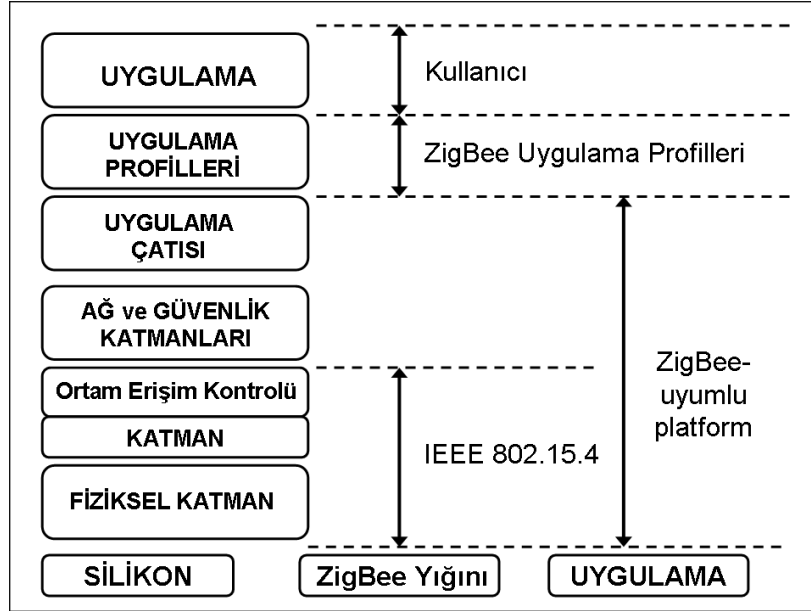
PHY (MHz)	Frekans bandı (MHz)	Yayılım parametreleri	
		Chip oranı (kchip/s)	Modülasyon
868 & 915	868-868.6	300	BPSK
	902-928	600	BPSK
2400	2400-2483	2000	O-QPSK
Veri parametreleri			
Bit oranı (kb/s)	Sembol oranı (ksymbols/s)	Semboller	
20	20	Binary	
40	40	Binary	
250	62.5	16'lı ortogonal	

Tüm bantlarda, modülasyon şeması DSSS dir. Burada 868 ve 902-928 MHz bantlarında göndericinin BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*) kullandığını belirtmek gerekir. Daha önce de belirtildiği gibi 2.4 GHz bandında gönderici O-QPSK kullanır.

PHY katman özellikleri olarak özetle radyo alıcısının aktivasyon işlemleri, enerji tespiti, bağlantı kalite göstergesi, kanal seçimi, boş kanal atanması gibi özellikler sayılabilir [6] [8] [12].

Zigbee Birlikteliği, IEEE 802.15.4'ü temel alan bir yapılanma izlediği için ilk iki katman (OSI modeline göre PHY ve MAC katmanı) pek bir değişikliğe uğramamıştır. Zigbee, IEEE 802.15.4 standartının tarama sinyali tekniğini kullanır. Yani bir düğüm komşusuna devamlı olarak kendisinin ağda var olduğunu belirten küçük paketler yollar. İki veya daha fazla düğüm bir ağ biçiminde bağlanmışsa, daha sonra diğer düğümler tarafından aralarına (birlik oluşturma için) alınabilirler. [6]

Zigbee ağındaki düğüm, pil ile beslenen veya yüksek enerji tasarrufu yapan, var olan ağları arayabilen, gerekince uygulamasından veri transferi yapabilen, verinin alınıp alınmadığını tanımlayabilen, ağ koordinatöründen veri isteyebilen, uzayan periyotlar için uykuya yatabilen bir yapıda tasarlanmıştır. Şekil 1.3'te Zigbee protokol yığını (katmanları) görülmektedir [2][9].



Şekil 1.3. Zigbee protokol yığını. [15]

### 1.2.2. IEEE 802.15.4 Temelli Zigbee Ağ Birimleri ve Yönlendirme

IEEE tarafından iki fiziksel cihaz tipi düşük sistem maliyeti için tanımlanmıştır. Bunlardan ilki, diğer cihazlarla konuşabilen, ağ koordinatörü yeteneğine sahip olan, herhangi bir topolojide fonksiyon gösterebilen FFD'dir. RFD ise koordinatör olamaz. Çok basit bir uygulaması vardır ve sadece bir ağ koordinatörü veya yönlendiricisi ile konuşabilir [2][10]

Bir Zigbee / IEEE 802.15.4 ağı, en azından bir FFD'yi ağ koordinatörü olarak gerektirir. Fakat son nokta algılama cihazları RFD olabilir ve böylece sistem maliyeti azaltılır. Zigbee ağı dinamik ağ formasyonu, adresleme, yönlendirme (*routing*), sıçrama (*hop*) ve yakınındaki komşusunu keşfetme özelliklerini destekler. Ağ adresinin büyüklüğü 16 bittir. Zigbee, 65535 adet ağ'ı (yüzlerce adet cihazı, IEEE 64 bit adres sayesinde) kabul edebilecek yeteneğe sahiptir. Ağ adresleri ağaç yapıda atanır. Zigbee, yıldız topolojinin yanı sıra örgü gibi topolojileri de desteklediği için, herhangi bir cihaz, PAN koordinatörü dışında diğer bir cihazla da iletişime geçebilir, bu yüzden ağ yüksek ölçeklenebilirlik ve esnekliğe sahiptir. Kendiliğinden formasyon ve kendini iyileştirme özellikleri Zigbee'yi ilgi çekici hale getirmiştir. Zigbee cihazları (düğümüleri) otomatik olarak ağı oluşturabilirler ve cihazların ağa katılıp ayrılması otomatik olarak ağ konfigürasyonuna yansıtılır.[10]

FFD, üç modda da çalışır. Bu durum Zigbee topolojilerinde görülmektedir. Burada FFD bir PAN içerisinde bulunur. PAN içerisinde PAN koordinatörü, koordinatör veya yönlendirici cihaz olarak hizmet verebilir [9][12]. Bir RFD ise bir takım uygulamalar için geliştirilmiştir ve bu uygulamalar da oldukça basittir. Örneğin, ışık anahtarı veya pasif bir kızılötesi algılama gibi. Bunlar büyük miktar veri göndermeye ihtiyaç duymazlar ve sadece tek bir FFD ile bir seferde ilişkilendirilebilirler. Dolayısıyla, RFD ile minimal kaynaklar ve bellek kapasitesi kullanarak algılama gerçekleştirilir. IEEE 802.15.4 MAC katmanı, bu modül tiplerinin her birini idare etmeye yetecek esnekliğe sahiptir.[2][11]

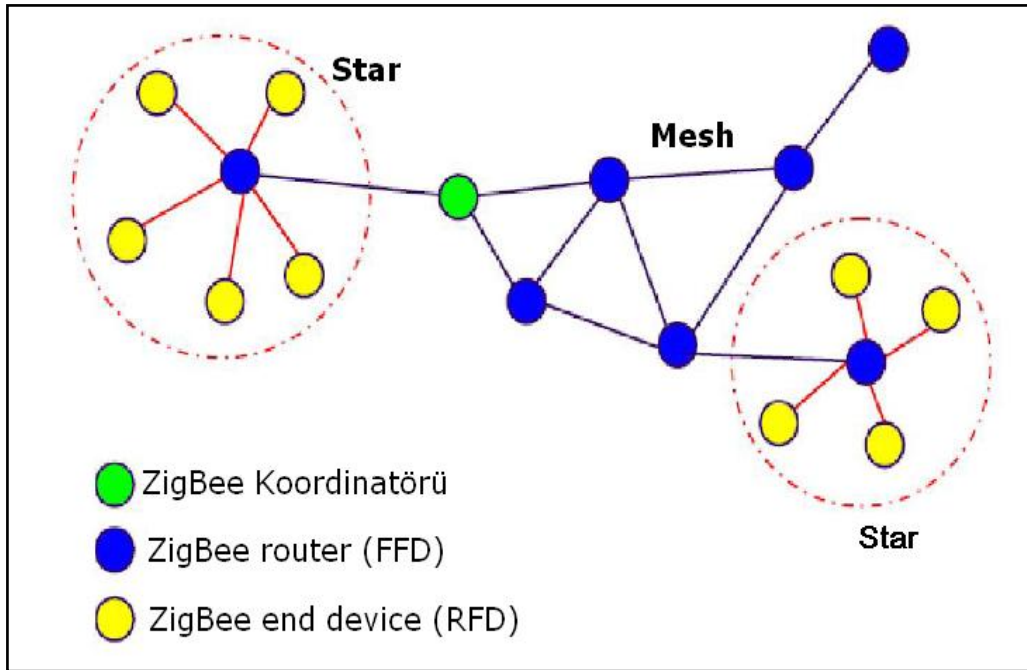
Periyodik veri, tarama sistemi kullanılarak idare edilebilir. Algılayıcı cihaz tarama için uykusundan uyanabilir, herhangi bir mesaj var mı diye kontrol edip tekrar uykusuna devam edebilir. Zigbee ağ koordinatörü bir ağ kurar, ağ tarama sinyallerini iletir, ağ düğümlerini yönetir, ağ düğüm bilgisini depolar, çiftlenilmiş (*paired*) düğümler arasında mesajları yönlendirir ve tipik olarak alıcı durumunda çalışır. Bir FFD, koordinatör olarak kullanılırsa, ağ konfigürasyonu, veri organizasyonu ve ağın kendini ayarlaması için işleme gücüne ihtiyaç duyar. FFD, cihazlardan gelen ve giden mesajları doğrudan takas etmek yerine önce depolayıp sonra iletme yöntemini daha çok kullanır. Bir koordinatör, ağdaki basit bir düğümden daha fazla güç kullanır. Bu yüzden şehir şebekesi veya bir güç kaynağından elde edilecek güce ihtiyaç duyabilir.[14]

Zigbee koordinatör ve yönlendiricileri 3 tip yönlendirme tekniğini desteklerler.[37]

Komşu yönlendirme: Radyo kapsama alanı içindeki tüm komşu düğümlerin tutulduğu tablolara dayanır. Hedef cihaz fiziksel kapsama alanı içinde ise mesajlar doğrudan iletilebilir. Ancak ZSD'ler bunu yapamazlar. ZKD ve ZYD'lerden her biri komşuluk tablolarında, bir sıçrama mesafesindeki tüm düğüm bilgilerini tutarlar. Eğer tabloların boyutu kullanıcılar tarafından sınırlandırılırsa, seçilen sayıda düğüm bilgisi tablolarda tutulur. Bir tabloya veri girişinde, komşu düğümle ilgili PAN tanımlayıcısı, ağ adresi, genişletilmiş düğüm adresi, cihaz tipi ve ilişkileri gibi bilgiler kaydedilir. Seçime bağlı olarak tarama sırası, derinliği ve ağa katılım izni gibi bilgiler de tutulabilir.[34][36]

Tablo yönlendirme: AODV algoritması, maliyetli yol ölçekleme ile yönlendirme ve yol bulma tablolarına dayalıdır. AODV yönlendirme talep algoritması ile düğümler arasındaki en uygun yol talebinin kaynak düğümden istenmesini sağlar. Tekli ve çoklu yönlendirme yeteneklerine sahip bu algoritma, kaynaklardan talep edilen farklı yollar olmadığı sürece elindeki yolları korur.[38]

Ağaç yönlendirme: Adres atama şemalarına dayalı olarak, mesajların bir ağaç yapıda üstten aşağı ve ters yönde aktarılmasını sağlar. Ağaç yönlendirmede, *Cskip* adı verilen blok adres tahsis mekanizması ile her üst cihazın kendi dalındaki çocuk düğümlerine dağıtılmak üzere bir adres alanı vardır. Bir cihazın yol belirleme kapasitesi ve yönlendirme tablosu yoksa hedef adres izlenerek, ağaç boyunca iletilmesi gereken düğüme ulaştırılır. Sadeliği ve kaynak kullanım azlığı bu yönlendirme tekniğinin en önemli avantajıdır.[34][36]



Şekil 1.4. Örnek bir Zigbee ağ modeli [15]

Şekil 1.4'te Zigbee için örnek bir ağ modeli görülmektedir. Zigbee, DSSS modülasyonunu, karışım yapılmış örgülerde, yıldız ve tüm uçtan uca topolojilerde kullanır ve böylece seçimli onay mesajları ile güvenilir bir veri teslimatı sağlar. Her bir düğüm için en az mesafe 10 metredir, fakat popüler uygulamalarda bu ek bir sıçrama mesafesi için görüş alanındaki düğüm başına 100 metreye kadar çıkar.[6][14]

### 1.2.3. IEEE 802.15.4 - Zigbee Mimarisi

Zigbee teknolojisinde üç çeşit düğüm vardır. Bunlar, koordinatör (*coordinator*), yönlendirici (*router*) ve sonlandırıcı cihaz (*end device*) olarak sıralanabilir.

Zigbee Koordinatörü (ZKD – 802.15.4) her ağda yalnızca bir tanedir. Ağı başlatır, ağ ile ilgili bilgileri depolar. Bütün aygıtlar ZKD ile iletişim halindedir. Yönlendirme (*routing*) yapabilir, diğer ağlarla köprü işlevi görür.

Zigbee Yönlendiricisi (ZYD – 802.15.4 FFD) isteğe bağlı bir bileşenlerdir. Düğümler arasında yönlendirme yapar. Ağ kapsamını artırır. Adresleme yapılıp yapılmaması işlevini yönetir.

Zigbee Sonlandırıcısı (ZSD – 802.15.4 RFD) düşük güç tüketimini optimize eder. En ucuz aygıt tipidir. Sadece koordinatör ve yönlendirici ile haberleşir. Algılayıcı (*sensör*) bu cihazda bulunur.[6]

#### 1.2.4. IEEE 802.15.4 - Zigbee Ağ Topolojileri

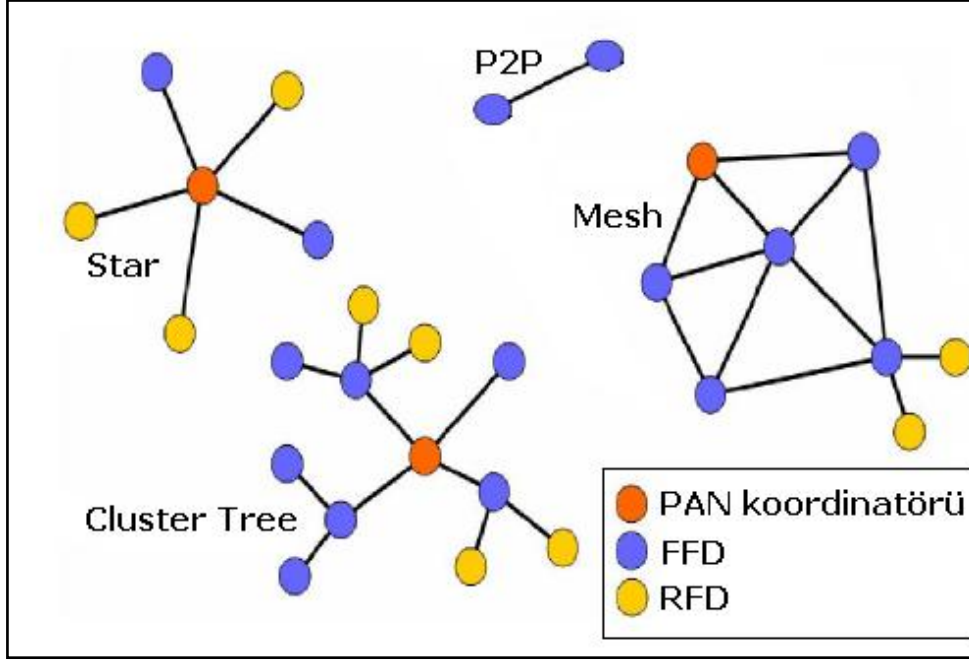
Topoloji, bir ağın ele aldığı probleme ve ağ şemasına bağlıdır. Her bir topolojinin kendine has avantaj ve dezavantajları vardır.

Zigbee teknolojisi dört temel topolojiyi kullanır: Uçtan uca (*P2P – Peer to Peer*), Yıldız (*star*), Örgü (*mesh*) ve Ağaç (*tree*). Bunlar Şekil 1.5 'te görülmektedir. [39]

Yıldız topolojide iletişim, aygıtlar ve PAN adındaki bir merkezi kontrol birimi arasında sağlanır. PAN koordinatörü genel olarak şebekeden beslenirken diğer aygıtlar çoğunlukla batarya ile çalışmaktadırlar. Bu topolojiden yararlanan uygulamalar ev otomasyonları, kişisel bilgisayar birimleri, oyuncaklar ve oyunlar olabilir.[41]

Bir FFD ilk olarak aktif edilmesinin ardından, kendi ağını kurma ve ağın koordinatörü olma özelliklerini kullanmaya başlar. Her yıldız ağ bir PAN kimliği belirlemek ve bu kimlik diğer hiçbir ağ tarafından kullanılmıyor olmak zorundadır. Bu durum her ağın bağımsız olarak çalışabilmesine olanak tanır. [6]

Örgü topoloji uçtan-ucaya topolojinin bir türevidir. Örgüde bir PAN koordinatörü vardır. Yıldız topolojiden farklı olarak burada her aygıtın menzili altındaki diğer bütün aygıtlarla iletişim kurabilmesi söz konusudur. Örgü topolojik bir ağ rastgele bir ağ olabilir. Endüstriyel kontrol ve görüntüleme, akıllı izleme sistemleri, mal ve envanter takibi gibi uygulamalar bu topolojiyle kurulan ağları kullanabilirler. Ayrıca bir de çok yönlü iletişimi destekler ve böylelikle mesajlar ağ içerisinde bir aygıttan başka aygıtlara da iletilirler. Bu da güvenliği ve çok yönlü iletişimi sağlar.[1]



Şekil 1.5. Zigbee topolojileri [1]

Ağaç topoloji şekli de uçtan-uca ağ şeklinin özel bir formudur. Burada cihazların bir kısmı FFD'dir ve istendiğinde RFD sonlandırıcı birim olarak salkıma bağlanabilir. Bütün FFD'ler koordinatör olarak çalışabilirler ve diğer cihazlarla senkronizasyonu sağlayabilirler. İçlerinden sadece bir tanesi PAN koordinatörü olmak zorundadır. [40]

PAN koordinatörü kendini ağaç yöneticisi ilan eder ve ağacın nasıl olacağına karar verir. Koordinatör, ağ kimliği olarak sıfır alır veya çoklu koordinatörlü yapılarda kullanılmayan bir PAN kimliği seçer ve komşu cihazlara işaret çerçeveleri yayar. İşareti alan cihaz ağaç yapıya katılmak isteyebilir. Eğer PAN koordinatörü cihazın katılmasına izin verirse cihazı komşuluklarına çocuk düğüm olarak ekleyecektir. Yeni katılan cihaz da koordinatörü, ana cihaz olarak komşuluklarına ekleyecektir ve diğer cihazların ağa katılması için periyodik işaret çerçeveleri göndermeye başlayacaktır. Uygulama veya ağ gereksinimleri karşılandığında PAN koordinatörü, bir cihaza ilk salkıma bitişik olarak yeni bir salkım kurmasını ve salkım başı olmasını emredebilir. Bu salkımlı ağaç yapının avantajı, yüksek mesaj gecikmelerine rağmen ağ kapsama alanını arttırılabilmesidir.[39]

Günümüzde değişen ticari uygulamalar ve gelişen ihtiyaçlar ağ topolojilerinde de yeni arayışları ortaya çıkarmıştır. Özellikle yıldız topolojinin dışında, uçtan-uca bağlantı türevleri olarak ağaç, örgü, ızgara (*grid*), doğrusal (*bus*), halka (*ring*) ve dairesel (*circular*) topolojiler kullanılmaktadır. [42]



### 1.2.5. IEEE 802.15.4 - Zigbee Uygulama Alanları

Zigbee ağ'larının kullanımı oldukça yaygın olarak bulunmaktadır. Kullanım alanları ve örnek ağ modelleri literatürde çok farklı kategorilerde ele alınmaktadır.

Ticari bina otomasyonu (süpermarket stok takibi, ortam ısısı takibi, enerji seviyesi kontrolü gibi), ev otomasyonu (yangın, ev içi ısı ve nem kontrolü gibi), ev eğlencesi (akıllı ışıklandırma, film ve müzik, ses ve görüntü sistemlerinin ayarlamaları gibi).

Hayvancılık sektörü (süt ineklerinin veriminin takip edilmesi, ağıl içindeki eksik hayvan tespiti gibi), ziraat ve tarım bitkileri koruma (bitki boyu, yaprak büyüklüğü ölçümleri gibi).

Mobil uygulamalar (*m-payment*, *m-monitoring* ve kontrolü, *m-security* ve erişim kontrolü, *m-healthcare* ve *tele-assist* gibi).[28]

Otomatik ölçüm okuma, kablosuz telemetri, kimya, boya, ilaç sektörü (kimyasal süreçlerin izlenilmesi, ürün kalite kontrolü gibi), su arıtma, atık temizleme (devasa su arıtma tesislerinde algılayıcıların her bir pompanın olduğu bölüme eklenerek kontrol odasına gerçek zamanlı ölçüm verilerinin gönderilmesi) uygulamalarında.[16]

Bütün bunların yanında, bu teknolojinin çıkış uygulamalarından biri olan askeri uygulamalar, ekolojik gözleme çalışmaları ve tıbbi izleme uygulamaları gibi çok geniş bir yelpazede Zigbee ağlarının tercih edildiği görülmektedir.[4]

### 1.3. Ağlarda Servis ve Link Kalitesi Değerlendirme Kavramları

Servis kalitesi (*Quality of Service*), ağ uygulamaları için uygulamanın kullanıcıya sağladığı hizmet kalitesi ya da kullanıcı için uygulamanın kalitesi olarak ifade edilir.

Diğer bir tanımla, QoS, çok farklı yöntem ve teknolojileri kullanarak bir ağ üzerindeki trafik akışının istikrarlı bir şekilde düzenlenmesini sağlayan teknikler bütünüdür.

Kullanıcı açısından bakıldığında QoS, uygulamanın fonksiyon ve kapasite kalitesi değil kendine sağladığı uygulamanın kullanılabilirliğidir. Uygulama açısından bakıldığında ise ağ katmanının güvenilirlik, fonksiyonellik ve katmanlar arasındaki etkileşimine dayanmaktadır. Ağ perspektifi açısından QoS, ağ kaynak kullanımının en üst düzeyde olduğu durumun sağlanmasıdır. Farklı çoklu ortam verilerinin olduğu ağ yapılarında her

bir veri için, her bir katmanda farklı algoritma ya da mekanizmalar kullanılarak, bant genişliğini en yüksek seviyeye çıkarmak QoS'in ana amacıdır. [17]

Tüm ağlar için genel anlamda servis kalitesi, bir aktarım sisteminin başarımlı ölçüsüdür. Bu bakımdan aktarım sisteminin kalitesini ve ayakta kalma gücünü yansıtır. Hizmetin ayakta kalması ve istenen her durumda ona erişilebilmesi servis kalitesinin temel elemanıdır. Herhangi bir servis kalitesi gerçekleştirimi uygulamaya alınmadan önce yapılması gereken en yararlı iş, altyapının daima ayakta kalacak şekilde düzenlenmesidir. Aktarım kalitesine karar verilmesinde etkili üç faktör bulunur. Kayıp, gecikme ve gecikme miktarıdır.[18]

#### **1.4. Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Link Kalitesi Değerlendirmeleri**

Kablosuz algılayıcı ağlarında link kalitesi kestirimi ve değerlendirmesi kavramı algılayıcı ağların tasarımındaki en temel yapı taşlarından biridir. Literatürlere henüz girmiş olan bir kaç link kalitesi değerlendirme algoritması olsa da, başarımlarının çok yüksek olduğu ifade edilemez. Özellikle üst katman ağ protokollerinin tasarımında önemli bir yere sahip olan link kalite kestirimi, yönlendirme algoritmalarının da esas aldığı temel ölçeklerdendir.

Gerçekte link kalitesi, topoloji kontrolü, yönlendirme teknikleri ve mobilite kavramları açısından ağ başarımlını etkileyen çok önemli bir faktördür.[19]

Özellikle yönlendirme algoritmaları açısından bakıldığında, kararlı bir yönlendirme hattı oluşturma anlamında ve enerji verimli, paket tekrarlarının en az olduğu bir ağ başarımlı açısından, link kalitesinin önemi çok büyüktür.[20]

Diğer kablosuz sistemlere nazaran algılayıcı ağlarında sistem ve ağ dinamikleri, ölçeklenebilirlik ve yoğunluk, düşük maliyetli ve düşük güce sahip radyo alıcılarının varlığı gibi etkenler, link kalitesi kestirimini daha da zorlaştırmaktadır. Yine deneysel çalışmaların bir sonucu olarak, çok yönlü girişim, gürültü ve bozulmalar radyo katının algılayıcı ağlardaki en büyük zafiyetlerindedir.[21]

Bir kablosuz algılayıcı ağdaki iletişimi tamamen engelleyen veya aksatan, çarpışmalar ve hatalı paket alımlarının artması, iletişim kanalına erişim güclüğü, gecikmeler, yüksek sinyal güç göstergesi (RSSI) v.b. birçok parametre link kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerdeki anormal değerler bazen bir saldırı göstergesi

de olabilir. Ancak bu gibi anormal durumlar kötü niyetli davranışlar sebebiyle meydana gelebileceği gibi daha çok doğal ağ koşulları sonucunda da oluşabilmektedir. Örneğin tıkanıklık, komşu düğümlerdeki yazılımsal veya donanımsal hatalar, çevresel şartların değişmesi ile meydana gelebilecek hatalar, link kalitesi bakımından anormal durumların oluşmasına sebep olabilir. [23]

#### **1.4.1. IEEE 802.15.4 - Zigbee Ağlarında Link Kalitesi İçin Beklenen Güçlükler**

Öncelikle, Zigbee kullanılan algılayıcı ağlarında, link kalitesi için karşılaşılabilecek güçlüklerin her uygulamaya özgü farklılıklar sergilediğini bilmek gerekir. Zigbee kullanılarak oluşturulacak bir algılayıcı ağında, uygulamanın gerektireceği link kalitesi güçlüklerinin önceden tespit edilerek bu güçlüklerle dönük tedbirlerin en baştan alınması sağlanmalıdır. Dolayısıyla Zigbee uygulama ağlarının tamamında geçerli olabilecek standart link kalitesi belirleme güçlüklerinin yanı sıra, ilgili uygulamanın getireceği ek güçlük maliyetlerini de göz ardı etmeden tasarımların gerçekleştirilmesi gerekir.[4]

Zigbee kullanılan bir çok endüstriyel uygulama açısından bakıldığında, karşılaşılan güçlükler noktasında şu başlıklar karşımıza çıkmaktadır. Güvenilirlik, gecikme, iletim mesafesi ve güç tüketimi. [16]

Diğer yandan çoklu ortam ağlarına bakıldığında ise, yukarıdaki güçlüklerle ek olarak, verilerin kapasite değerlerinin yüksek olması, akışkan bir veri zinciri gerekliliği, kanal kapasitesi ve bant genişliği ölçütlerinin de bir güçlük olarak karşılaşılabilecek link kalite zorluklarından oldukları görülmektedir.[2]

Belirtilen zorluklar, her ağ katmanının kendine özgü aşılması gereken güçlükleri olarak ta incelenebilir. Mesela iletim katmanı açısından aşırı trafik yoğunluğu, tıkanıklık, yüksek paket kayıp oranı, gecikmeler, fazla enerji harcanması gibi etkenler sıralanırken, uygulama katmanı açısından genel olarak LQA, aktif algılayıcı sayısı, algılayıcılardan gelen verinin hata oranının düşüklüğü gibi zorluklar ifade edilir. [2][17]

#### **1.4.2. IEEE 802.15.4 - Zigbee Ağlarında Link Kalitesi Ölçekleri**

Kablosuz algılayıcı ağlarında link kalitesi genel olarak iki sınıfta ele alınmaktadır. Bunlardan birincisi yazılım tabanlı ikincisi ise donanım tabanlı link kalite tespitidir.

Bunlardan donanım tabanlı yaklaşımda; hesaplama yükü olmaksızın doğrudan radyo modülünden elde edilen LQI , RSSI ve SNR bilgilerinin kullanılması söz konusudur.

Yazılım tabanlı yaklaşım ise; başarılı bir iletim öncesindeki direk veya tekrarlı olarak alınan paket ortalamalarını veya bunların oranlarını tam veya yaklaşık olarak tespit etmeye dayanır. Fakat bu ölçeklerden elde edilen bilgiler link kalite kestiriminde çok etkili değildir. Zira alınan başarılı paketlerden sadece 8 sembol değerine göre bir ölçek oluşturduklarından, link kalitesini sağlıklı belirlemede eksik kalmaktadırlar. Bu durumda radyo linki ve kayıp paket bilgileri dikkate alınmadığından, paket kayıplarına duyarsız kalınır ve iletim başarımı abartılı olarak yanlış sunulur. [19][22]

Yazılımsal olarak, alıcı yönlü bakış açısı ile başarılı bir paket alımı öncesinde, tam veya yaklaşık olarak paket alım oranına veya iletilen/yeniden iletilen paket sayılarının ortalamasına bakılarak ölçüm sonuçları sağlanır. Burada, PRR ve ARR alım oranını ifade eder. PRR alıcı tarafta, ARR ise gönderici tarafta elde edilir.

RNP ise, başarılı bir iletim öncesindeki gerekli, doğrudan veya tekrarlı iletim ortalamalarını sayar. Yazarlar RNP'yi PRR'ye nazaran link kalitesi karakterizasyonunda daha çok savunuyorlar. Bunun nedeni PRR'nin RNP'nin aksine, birim yük (*coarse-grain*) kestirimi ile kayıpların temel dağılımlarını dikkate almamasından kaynaklanmaktadır.

WMEWM, katman filtresi kestirim yaklaşımı ve paket başarı olasılıkları ile paket alım oranı ölçeğine daha yakındır. Link verimsizlik ölçeği (LI), ETX ölçeği ve dört bit (*four bit*) yaklaşım ölçeği RNP'ye benzer mantıkla çalışırlar.

Bütün bu ölçekler değerlendirildiğinde, tablo 3'e göre, link kalitesi metriklerinin PRR ve RNP tabanlı olmak üzere yazılım yönünden iki esasa dayandıkları görülmektedir.[19][24][25]

Tablo 3. Link kalitesi ölçeklerinin karakteristikleri.[19]

Ölçek	İzleme tipi	Yerleşim	Yönlendirme	Sınıf
<i>PRR</i>	Pasif	Alıcı	Tek yönlü	PRR bazlı
<i>WMEWMA</i>	Pasif	Alıcı	Tek yönlü	PRR bazlı
<i>RNP</i>	Pasif	Gönderici	Tek yönlü	RNP bazlı
<i>ETX</i>	Aktif	Alıcı	Çift yönlü	PRR bazlı
<i>four-bit</i>	Karma	Gönderici	Çift yönlü	PRR ve RNP bazlı

### 1.4.3. Zigbee Ağlarında Link Kalitesi Ölçeklerinin Başarım Değerlendirmeleri

Yapılan çalışmalardan WMEWMA metriğinin filtre tabanlı link kalite belirleyicisi olduğu görülmektedir. Çalışmalarda, WMEWMA'nın doğruluk, çeviklik, denge, bağlantı geçmişi ve kaynak kullanımı bakımından başarım karşılaştırmaları yapılmıştır.[24][25]

Bu çalışmalarda elde edilen doğruluk kavramı, link kalitesi ölçümü ve link kalitesi tahminlerindeki hatalı kareler ortalamasıdır. Çeviklik kavramı ise link kalitesi içinde hızlı bağlantı değişimlerine gösterilen sürekli tepkileri ifade eder. Denge, link kalitesi dahilinde, kısa süreli değişimlere ve dalgalanmalara karşı davranış yeteneklerini ifade eder. Bağlantı geçmişi, zaman çerçeveleri kullanarak tahmin üretmeyi açıklar. Tüm bu ölçekler dikkate alındığında, diğer filtre tabanlı link kalite belirleyicilerine göre WMEWMA metriğinin daha iyi bir belirleyici olduğu görülmüştür.[19][24]

Yapılan tüm çalışmalar, düşük güçlü WSN teknolojileri için en iyi link kalite belirleyicilerini tespit etmek üzerinedir. Bu çalışmalar göstermiştir ki PRR ve RNP ölçekleri, tüm çalışmalarda link karakterizasyonu açısından en etkili belirleyicilerdir. Bunların arasında da RNP, PRR ye göre daha iyi olan link kalite ölçeğidir. Ancak çalışmalarda, iyi kalite ve kötü kalitedeki bağlantılarda yani yüksek (>%90) ve düşük (<%50) alım oranlarında PRR ölçeği RNP ölçeğine yakın davranışlar sergilemiştir. Bununla birlikte PRR ölçeği, yukarıda da belirtildiği üzere, paket kayıplarındaki dağılımları dikkate almada eksiklikleri olduğundan link kalitesinde yanıltıcı sonuçlar çıkarmaktadır. Bu tür bağlantılarda, paket alımlarının olmadığı periyotlarda, PRR yüksek link kalitesi sergilemeye devam eder. Halbuki bu durumda RNP yüksektir ve gerçek link kalitesini de bu gösterir. Gerçek şudur ki, bir paketin iletiminin kesilmesinde, bir kaç kez tekrarlı gönderim olmadan geri teslim yapılmaz. Çalışmalarda elde edilen diğer bir sonuç olarak ta, PRR ve RNP 'nin doğrudan orantılı olmadığı sonucudur.[19]

Yapılan çalışmalarda link kalitesi ölçekleri iki ana sınıfta ele alınmaktadır:

PRR tabanlı link kalite ölçekleri ki, PRR, WMEWMA, ETX ve four-bit ölçeklerini içerir. Bunların hesaplanmalarında PRR tabanlı yaklaşım kullanılır.

RNP tabanlı link kalite ölçekleri ki, RNP ve four-bit ölçeklerini içerir. Burada da hesaplama mitlerinde RNP yaklaşımı göz önüne alınır. PRR ölçeği, gönderilen paketle <sup>(1)</sup> başarılı bir alım sonrasındaki ortalama değer alıcıda hesaplanmasıdır. Burada w, alınan paketlerin her bir çerçevesi için bir ortalama değer hesabı yapılmasını gerektirir.

$$PRR(w) = \frac{\text{Alınan paket sayısı}}{\text{Gönderilen paket sayısı}}$$

PRR'de kayıp paketlerin sayısı, paketlerin sıra numaraları kullanılarak tespit edilir. PRR, pasif izleme tabanlı bir ölçektir. Yani hat üzerindeki gönderilen ve alınan veri paketlerinin birleşimi ile elde edilen istatistiksel bir bilgidir.[19]

İkinci ölçek olan WMEWMA filtre tabanlı bir belirteçtir ve PRR yaklaşımına göre hesabı yapılırken;

$$WMEWMA(\alpha, w) = \alpha \times WMEWMA + (1 - \alpha) \times PRR \quad (2)$$

formülasyonu ile ifade edilir. Burada  $\alpha \in [1,0]$  ve geçmiş kontrol faktörüdür. Yani yeni bir link kalite değerinin önceki değerlere etkisini belirtir. Bu ölçek te pasif izleme tabanlıdır ve her bir  $w$  için alınan paket çerçevesinden sonra değer güncellemesi yapılır.

Üçüncü ölçek RNP'dir. Yukarıda da açıklandığı gibi her bir başarılı alım öncesindeki gerekli transfer sayısını ifade eder. Bu da bir pasif izleme metriğidir fakat gönderici tarafta işlev görür ki, gönderilen  $w$  çerçeve paketleri için doğrudan veya tekrarlı transferlere göre işlem sonucu üretir. [19]

$$RNP(w) = \frac{\text{Gönderilen direkt veya tekrarlı paketleri sayısı}}{\text{Başarılı alınan paketlerin sayısı}} - 1 \quad (3)$$

Burada başarılı alınan paketlerin sayısını, göndericiye gelen onay paketlerinin sayısı belirler.

Dördüncü ölçek ETX, RNP tahminli hesaplama yeteneğine sahiptir. ETX aktif izleme bazlı bir ölçektir. Bu da şu anlama gelmektedir: Her düğüm istatistiksel veriler toplama amaçlı olarak açıktan genel yayın mesajları gönderirler.

ETX asimetrik link hesabı için, göndericiden alıcıya doğru üst link kalite kestirimini  $PRR_{\text{forward}}$  adıyla alırken, tersi olarak ta alıcıdan göndericiye  $PRR_{\text{backward}}$  adlı alt link kestirim değerini kullanır. Böylece ETX bu iki parametre ile çift yönlü bir kestirim bilgisini kullanarak hesaplama yapar.

$$ETX(w) = \frac{1}{PRR_{\text{forward}} \times PRR_{\text{backward}}} \quad (4)$$

PRR<sub>forward</sub> parametresi, alıcıda temel PRR hesabı gibi, üst link kestirim değeri olarak her alınan  $w$  çerçeve yayın paketi için hesap edilir. PRR<sub>backward</sub> parametresi, göndericide alt link kalite kestirim değeri olarak alıcıya gönderilen son paket üzerinden hesap edilir.

Beşinci ölçek four-bit ölçeğidir. Bu ölçek, gönderici tarafta ele alınan, karma kestirim yaklaşımı, aktif ve pasif izlemeyi birlikte kullanan son ölçektir. [19]

### 1.5. Ağ Teknolojilerinde Benzetim ve Modelleme

Benzetim sistemi, bir sistem modelinin işlenmesidir. Model, yapılandırılmış veya deneysel olabilir. Ancak bir modelin gerçekleşmesi çok güç veya pahalı olabilmesi durumlarında sistemin test edilebilmesi ancak bir benzetim yazılımı ile mümkündür. Modelin incelenerek gerçek sistem ve alt sistem davranışlarının incelenmesi bu şekilde mümkün olabilmektedir. Genel manada benzetim sistemleri, önerilen veya gerçekte var olan bir sistemin, farklı konfigürasyon ve ilgilerine göre gerçek zamanlı ve uzun periyotlu çalışmalarının değerlendirilmesini sağlayan sistemler olarak ifade edilebilir. Mevcut bir sistemin değiştirilmesi işlemlerinden veya yeni bir sistem tasarımı öncesinde, hataya sebep olabilecek ihtimallerin karşılanıp azaltılması, öngörülemeyen darboğazların elenebilmesi ve sistem kaynaklarının alt veya üst seviyelerde kullanımlarının kaldırılarak sistem başarımının iyileştirilmesi amacı ile günümüzde benzetim sistemlerine olan ihtiyaç oldukça fazladır.[31][32]

Bir sistemin değişen koşullar altındaki davranışlarını incelemek, kontrol etmek ve geleceği hakkında varsayımlarda bulunmak amacıyla elemanları arasındaki bağlantıları kelimeler veya matematiksel terimlerle belirleyen ifadeler topluluğuna model denilmektedir.[26]

Modelleme, bir sistemin ya da sürecin matematiksel, algoritmik veya davranış karakteristiklerinin açıklanması olarak ifade edilmektedir. Benzetim ise teorik olarak ya da gerçek bir sistemin modelinin tasarımı, bu model kullanılarak sistemin işletilmesi ve sistemin davranışının izlenmesi sürecidir.[26][27]

İletişim sistemlerinin başarım analizlerini etkileyen faktörler şunlardır:

- ✓ Kullanıcı davranışları,
- ✓ İletişim ortamının doğası,
- ✓ Tolaranslar

Bu zorluklara karşı modellemede başarımlı analizi yöntemlerini iyi kullanmak gerekir. Modellemede fiziksel ve matematiksel (*analitik*) olarak iki ayrı yöntemle göre sistem analizleri gerçekleştirilir. Fiziksel model, en güvenilir ve en doğru yöntem olmasına rağmen, özellikle karmaşık iletişim sistemleri için planlama ve tasarım aşamaları gibi çeşitli konfigürasyonların denenmesinin zorunlu olduğu birçok durumda gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Analitik çözüm ise, birçok kabule dayanan ve başarımlı kriterinin analitik denklemlerle ifade edildiği bir modelleme tekniğidir.

Benzetim kavramı, gerçek sistemin modelinin tasarımı ve bu model ile amacına yönelik olarak sistemin işletilmesi, sistemin davranışının anlaşılması veya değişik stratejilerin değerlendirilebilmesi için deneyler yürütme süreci olarak tanımlanmaktadır.[27]

Modelleme ve benzetim, tasarımcılara;

- ✓ Bir sistemi gerçekleştirmeden önce sistemin çalışırılığının görülmesini,
- ✓ Kullanıcı sayısı, ağ teknolojileri ve ağ konfigürasyonu gibi parametrelerin değişiminde sistemin göstereceği davranışın tespit edilmesini ve karşılaştırmalı değerlendirme imkanı sağlar.

### 1.5.1. Benzetim Yöntemleri ve Benzetim Araçları

Bilgisayar benzetiminde, sistemin doğasına bağlı olarak iki tür olay kullanılır:

- ✓ Sürekli Olay (*continuous-event*) da, olaylar zamana bağlı olarak bir süreklilik arz eder. Zaman doğrusal olarak arttıkça, süreçler de zaman içerisinde doğrudan değişirler.
- ✓ Ayrık olay (*discrete-event*) benzetimi ise sayısal veri iletişim sistemleri ve bilgisayar ağları için, mesajların üretimi ve dağıtımı gibi durumlar gerçekleştiğinde, modüllerin çalıştırıldığı ve benzetim saatinin ilerlediği yöntem olarak kullanılır.[26][27]

Gerçek sistemlerin benzetimini yapmak için benzetim yazılım paketleri kullanılabilir. Bu paketler, iki grup halinde sınıflandırılabilir:

- ✓ Benzetim dilleri, herhangi bir yapıdaki sistemi, programlama ile modelleme özelliğine sahiptirler.



- ✓ Benzetim yazılımları, benzetim dillerine göre daha az ya da hiç program yapmaksızın özel sistemlerin benzetimi için tasarlanan bilgisayar paket programlarıdır.

İletişim ağlarının karmaşıklığı, bizi programlama sürecini basitleştiren ve rastgele olarak üretilen trafik modellerini kolaylıkla sağlayabilen bir benzetim kullanmaya zorlar. Günümüzde iletişim sistemlerinde en çok kullanılan benzetim programları tablo 4'te verilmiştir.[26]

Tablo 4. Ağ benzetim yazılımları

Ağ Benzetim Yazılımı	Üretici
OPNET Modeler	OPNET Inc.
OMNET	Açık kaynak kodlu yazılım
Network Simulator (NS)	Berkley University
Planning Workbench Suite	Bellcore
BONES	Comdisco
Network II.5, COMNET III, L_NET ve Simscript 2.5	CACI Products Co.
Net Maker	Make Systems Inc.
Object Time	BNR

Kablosuz ağlarla ilgili günümüzde öne çıkan bazı benzetim programlarından;

NS-2, kablolu ve kablosuz ağlar üzerinden TCP / IP, yönlendirme ve çoklu yayın protokollerinin benzetimi için kapsamlı destek sağlayan köklü bir ayrık olay benzetimcisidir. IEEE 802.11 veri bağı katmanı MAC protokolü ve ağ katmanı dinamik kaynak yönlendirmeleri için geliştirilmiş yönlere sahiptir.

J-Sim, java ile yazılmış bir başka nesne yönelimli, bileşen tabanlı, ayrık olaylı ağ benzetim çerçevesidir. Tak-çalıştır modeline uygun modül eklentilerine sahiptir. J-Sim bir veya daha fazla gerçek algılayıcı cihazlar dahil, ağ benzetimi ve öykünme (*emülasyon*) için yararlıdır. Bu benzetim aracı, algılayıcı ağlar için son düğüm ve koordinatör düğümler ile

algılayıcı ve kablosuz iletişim kanallarına destek sağladığı gibi sismik kanallar, güç modelleri ve enerji modelleri gibi parametrelerle de fiziksel katmana destek sağlar. [32][33]

OPNET Modeller (*Optimized Network Engineering Tools*) kavramsal olarak, iletişim ağlarının benzetimi için geliştirilmiş ticari bir platformdur. OPNET modeli, sonlu durum makinelerine dayalı süreçleri ve bu süreçlerin iletişim süreçlerindeki üst düzey modelinde belirtilen özellikleri kapsar.[33].

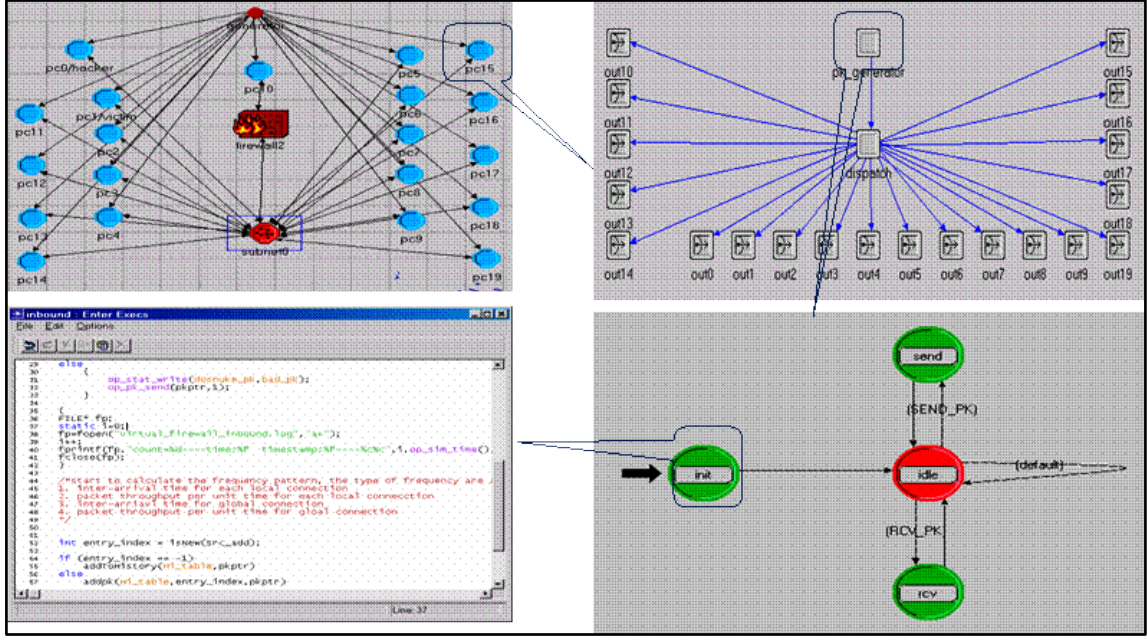
### 1.5.2. OPNET Modeller Benzetim Yazılımı Genel Özellikleri

OPNET Modeller, kablolu ve kablosuz ağların modellenerek benzetimlerinin yapılmasına olanak sağlayan bir yazılımdır. OPNET Modeller yazılımı Unix veya Windows NT \ 2000 \ XP işletim sistemlerinde çalışmaktadır. OPNET Modeller, sırayla sistemin modellenmesi, veri toplama, benzetimin yapılması ve benzetim sonuçlarının analiz edilme işlemlerini gerçekleştirmektedir. [29].

OPNET, veri ağlarını modellemek ve benzetimini yapmak için kullanılan güçlü bir hesaplama yazılımıdır. OPNET yazılımı, iletişim ağları ve dağıtık sistemlerin modellenmesini destekleyen kapsamlı bir geliştirme ortamı da sağlar. Bir modelin, davranış ve ayırık olay benzetimine dayalı analizleri ile başarımını test etmeye olanak sağlar. Grafikselsel kullanıcı arayüzü ile senaryoların yapılandırmasını ve ağ modelleri geliştirilmesini destekler. Yapılandırmaları farklı üç sınıf seviyesine sahiptir. [34]

1. Topolojilerine göre ağ yapılandırmasına destek vererek ağın topolojik olarak incelenmesini,
2. Düğüm seviyesinde çalışma desteği ile ağdaki düğüm davranışlarının tanımlanarak farklı düğümlerle iletişim kontrolünün sağlanmasını,
3. İşlem (*process*) seviyesinde çalışma ile sonlu durum makineleri ile temsil edilen işlem durumlarını ve bu durumlardan üretilen alt süreçler ve aralarındaki bağlantıların protokoller düzeyindeki incelenmesini sağlar.[32][34]

OPNET benzetim ortamı Zigbee ağlarının çeşitli bileşenlerini sağlayarak (Zigbee koordinatörü, Zigbee yönlendirici, Zigbee uç cihazı ki bu bileşenler sabit veya mobil olabilir) Zigbee tabanlı ağların benzetimini kolaylaştırır. Literatürde, OPNET tarafından sağlanan Zigbee tabanlı kablosuz ağ imkanları farklı açılardan ele alınmıştır.[35]



Şekil 1.6. OPNET Modeler editörlerinin hiyerarşik yapısı

OPNET Zigbee modeli, dört farklı süreç modelini kullanır:

1. Zigbee MAC modelidir. IEEE 802.15.4 MAC protokolünü kullanmaktadır. Model, kanal tarama, birleştirme ve hataya düşme/ kurtarma işlevlerini MAC protokolü yönlü çalışma moduna göre uygulamaktadır.
2. Zigbee Uygulama modelidir. Bu model, Zigbee oluşumunun şartnamesinde belirtilen uygulama katmandan düşük seviyede bir sürümü temsil eder. Bu model, ağa katılma, süreçleri başlatma, trafik üretme ve almanın yanında farklı benzetim raporları alınmasını sağlar.
3. Zigbee CSMA/CD modelidir. MAC katman protokolü çerçevesindeki ortam erişim kontrolleri bu modelle sağlanır.
4. Zigbee ağ modelidir. Bu da Zigbee oluşum şartnamesindeki ağ katman işlevlerini sağlar. Bu model, yönlendirme işlevlerini, ağa katılım süreçlerini, ağ oluşturma isteklerini ve tarama sinyallerinin düzenlenmesini sağlar.

Kullanıcı gerçek sisteme yakın bir ağ kurulumunu, ağ ve düğüm yapılandırma özelliklerini bu modeller sayesinde gerçekleştirebilir. Bu ilk adımdaki yapılandırmalardan sonra, topoloji seçimleri, toplanacak ağ istatistiklerine ait seçimler de tamamlandıktan sonra artık ağ benzetimi koşular. Benzetimin koşulmasından sonra, toplanan ağ istatistikleri (düğüm veya genel ağ seviyesinde olabilir) analiz edilebilir.[32][35]

### 1.5.3. OPNET Modeller 14.5 Uygulama Platformu

OPNET programının 14.5 sürümü, daha önceki sürümlerde veri ağları için sağlanan güçlü yapılandırma ve hesaplama işlevlerini bir adım daha ileri taşıyarak özellikle kablosuz ağların benzetimi konusunda da yetenekli hale getirilmiştir. Kablosuz ağları daha da özel olarak kurgulamanın yanı sıra kablosuz algılayıcı ağlara ilişkin sağladığı gelişmiş başarımlar parametreleri ve desteği ile sonraki sürümleri için de önemli bir kapı aralamıştır.

OPNET 14.5 yazılımına ait kurulum öncesi argümanlar içinde, sistemde olması istenen en önemli kurulum, Visual Studio.Net platformunun 2005 ve sonrasına ait bir sürümüdür. Bu platforma olan ihtiyaç, OPNET yazılımının barındırdığı C kodlama dili argümanlarının, sistemle entegrasyonunun üst düzeyde sağlanabilirliği ispatlanmış .NET derleyicilerinden kaynaklıdır. OPNET C derleyicileri için en uygun arayüz, .NET platformu ile sağlanmaktadır.

Yazılımın kurulum hiyerarşisindeki adımların sırayla izlenmesi sonrasında lisans paketinin de yüklemesi ile OPNET benzetim yazılımı sistemde kullanılabilir olmaktadır. [29]

Uygulama ortamında yeni bir ağ kurulumu ve benzetimi için öncelikle programın ana ekranından yeni bir proje seçimi yapıldıktan sonra bir sonraki ekrandan, ağ senaryonuzun yerleşim yapılandırması için sihirbaz yardımı ile ağın büyüklüğüne göre listeden bir ortam belirlenmelidir. Bu çalışma ortamı kıtalararası çapta olabileceği gibi bir bina içi ağ uygulaması için ofis çapında da olabilir. Bir sonraki ekranda ise benzetim yapılacak ağın ebatlarının, istenilen birim türünden boyutlandırması yapılabilmektedir. Sihirbaz ile bu adımı geçtikten sonraki ekranda ise, kurgulanacak olan ağın teknolojisini veya destekleyeceği tüm teknolojilerini belirleme işlemi gerçekleştirilir. En son olarak yapılan tüm ağ kurulum öncesi seçimlerine ilişkin ön izleme penceresi ile bilgilendirme yapılır.

Artık bir ağın belirlenen teknolojilerinin desteklendiği araç panelinin kullanılması ile yerleşim işlemine geçilebilir. Bu aşamada ağın tüm fiziksel ve mantıksal topolojisine uygun olarak, yerleşim, mesafe, bağlantı kanalları, bağlantı türleri ve yapılandırmaları ile ağdaki tüm düğümlere ilişkin izlenecek benzetim sonuçlarına dair seçimler yapılır. Ağın benzetimi öncesindeki en önemli işlem olan düğüm davranış parametrelerinin düzenlenmesi, tek tek olabileceği gibi tümü için de aynı anda gerçekleştirilebilir.

Ağın topolojik olarak bütün düzenlemeleri yapıldıktan ve benzetimde izlenecek davranışlar seçildikten sonra benzetim penceresi yardımı ile benzetim parametrelerinin seçimi gerçekleştirilir ve benzetim, belirlenen sürece koşular. Sistem başarımına göre benzetim sonuçlarının tahmini sonlanma süresi hesaplanarak anlık gösterilir. Yine benzetim süresince sistem kullanım bilgisi ve benzetim hızı ile ilgili kullanıcıya aktarımlar da benzetim ekranından takip edilebilmektedir.

Benzetim sonuçlarının ilgili menüden izlenmesi ile modellenen ağ için bir senaryo kurgusu tamamlanmış olur. Senaryolar menüsünden farklı bir senaryoya geçiş ve tüm senaryolarla ilgili kurgu yönetimleri kontrol edilebilir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA

### 2.1. Giriş

Bu deneysel çalışmalardaki amaç, Zigbee temelli kablosuz algılayıcı ağlarındaki bağlantı kalitesi değerlendirmeleri için başarımlarını testleri yapmak ve elde edilecek deneysel sonuçlara göre, bir kablosuz ağın kurgulanmasında baz alınacak topolojik yaklaşımların optimizasyonuna yardımcı olacak öneriler sunmaktır.

Bir kablosuz ağın bağlantı kalite başarımını belirleyen parametreler aynı zamanda ağdaki enerji tüketim başarımını ve ağın yaşam süresini doğrudan etkileyen faktörlerden olduğu için, bu çalışmadaki testlerin, kablosuz ağlardaki enerji tüketiminde topolojik düzenlemelerin ne denli etkin olduğunu da ortaya koymaya çalışacaktır.

Genel bilgiler kısmında da bahsedildiği gibi günümüz kablosuz algılayıcı ağlarının bağlantı kalitesi değerlendirme ölçeklerinde ortak nokta olarak görünen, düğümlerin alıcı ve verici kanallarındaki sinyal seviyeleridir. Bu çalışmamızda özellikle koordinatör düğümler açısından alıcı ve verici katındaki sinyal durumlarının da değişik yerleşim senaryolarına göre izlenmesi ve sonuçları değerlendirilecektir.

Yapılan deneysel çalışmalar üç ana senaryo başlığı altında verilecektir:

Birinci senaryoda; yıldız topolojik yapının farklı düğüm sayılarına göre kurgulanmış toplam 9 adet alt senaryodaki benzetimleri koşulacaktır. Elde edilecek bulgular doğrultusunda bağlantı kalitesine ve ağ başarımına dayalı analizler yapılacaktır.

İkinci senaryoda; sabit sayıdaki algılayıcı düğümden oluşan bir ağın yıldız, örgü ve ağaç topolojik benzetimleri yapılarak elde edilecek bulgularla üç farklı yerleşim türüne göre ağın karşılaştırmalı başarımlarını analizi çıkarılacaktır.

Üçüncü senaryoda ise ağ çapı ve düğüm sayıları artırılmış bir PAN'a ait, yönlendiricilerin topolojik bağlantıları dikkate alınarak yıldız, örgü ve ağaç yönlendirmeler [41][37] doğrultusunda karşılaştırmalı ağ başarımlarını incelenecektir.

Senaryolarda izlenecek olan düğüm ve ağ istatistiklerinin açıklamaları ise kısaca aşağıda özetlenmiştir.

MAC katman ağ başarımı (*Throughput*): Üretilen bit bazındaki verinin, paketlendikten sonra başarı ile erişilen kanala yerleştirilme miktarıdır.

MAC katman gecikme (*MAC Delay*): Veri paketinin MAC katman seviyesindeki başarılı kanal erişimi ile kanala konmasına kadarki geçen süre olarak ifade edilir.

Uygulama katmanı noktadan noktaya gecikme (*End to End Delay*): Cihazdan çıkan bir paketin uygulama katman seviyesinden hedefe varıncaya kadar ki tüm gecikme sürelerinin toplamını gösterir.

Ağ katman sıçrama sayıları (*Number of Hops*): Verinin, cihaza ait çıkış kapısından itibaren hedefe varıncaya kadar ki geçtiği toplam kapı sayısı olarak nitelendirilir.

Ağ katman paket kayıp sayıları (*Packets dropped*): Verilerin tüm tekrarlı gönderim denemeleri dahil hedeflenen adrese sağlıklı ulaştırılmaması sonucu kaybolan veri paketlerinin sayısını ifade eder.

Senaryolarda izlenecek olan koordinatör düğümlere ait ağ istatistikleri ve açıklamaları ise şu şekildedir:

Radyo alıcı BHO (*Bit error rate*): Cihazın radyo alıcısı katına ait bu parametre, alınan veri bitlerindeki hata oranının yüzdesini gösterir. Kısaca hatalı bit alım oranıdır.

Radyo alıcı paket kayıp oranı (*Packet loss ratio*): Alıcı katındaki onaysız kalan ve başarısız kabul edilen paket sayılarının yüzdesini ifade eder.

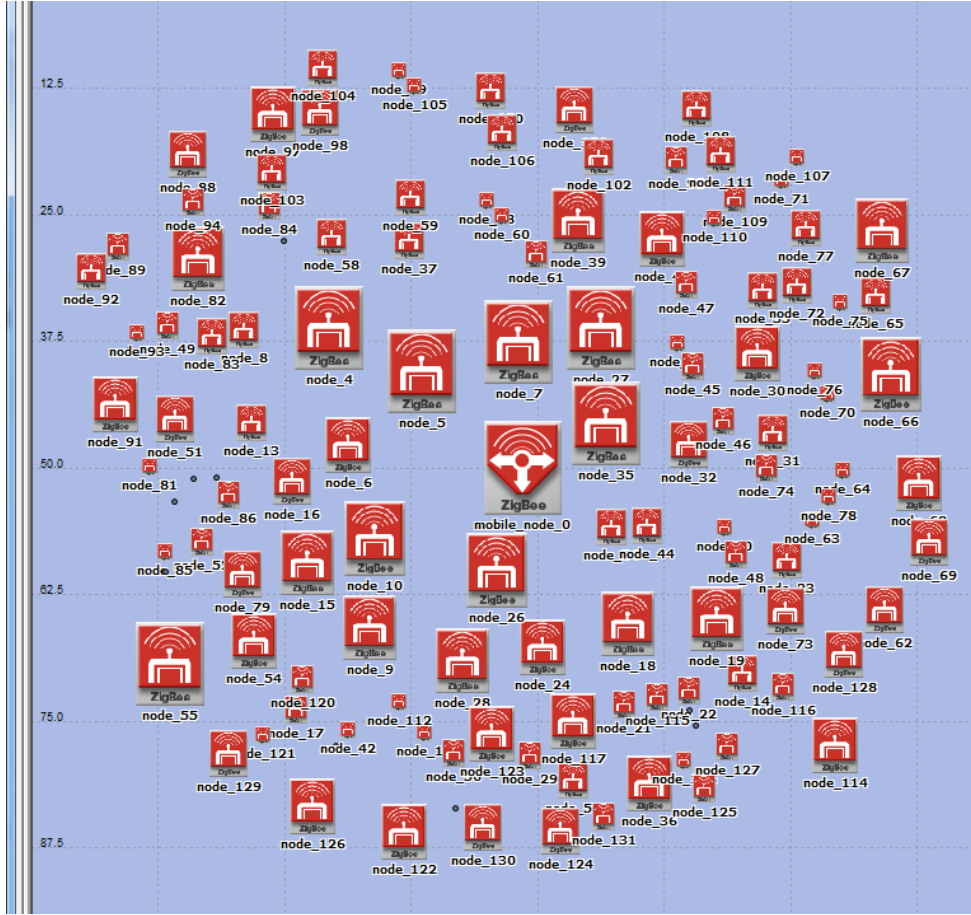
Radyo alıcı katı sinyal seviyeleri (*received power*): Alıcı katındaki karşılanan sinyallerin güç değerini gösteren parametredir.

Radyo alıcı İGO (*Signal to noise ratio*): Ortamın gürültüsüne oranla alınan sinyalin dB (*desibel*) türünden oranını ifade eder. [32]

## 2.2. Senaryo-1

İlk çalışmamızda, farklı düğüm sayılarındaki kablosuz algılayıcı ağların toplam 9 farklı alt senaryo ile yıldız topolojik yerleşimlerine göre ağ başarımları testleri incelenecektir. Alt senaryolarda; 6 adet ZSD + 1 adet ZKD den başlayarak sırasıyla; 9+1, 12+1, 16+1, 32+1, 64+1, 128+1, 210+1 ve 250+1'lik 9 yıldız ağın yerleşimlerine göre benzetim sonuçları incelenmiştir. Bu senaryodaki tüm alt kurgular, 100 m x 100 m ebatlarındaki kampüs ağları olarak tasarlanmışlardır. Bu senaryodaki esas amaç, yıldız topolojide düğüm sayısı artışının bağlantı kalitesi başarımına etkilerini izlemek ve tüm trafiğin yoğunlaştığı esas merkez olan koordinatör düğümün, farklı kurgulardaki davranışlarını karşılaştırmaktır. Elde edilen benzetim sonuçları, düğüm sayısı iyileştirmeleri ile ağın yaşam süresi arasındaki ilişki için bir yorum yapabilmemize olanak sağlanmıştır. Ayrıca bu

senaryoda 100 x 100 m ebatındaki boyutlandırmanın seçilmesindeki bir başka sebep, herhangi bir yönlendirici cihaza ihtiyaç duymayan yıldız topolojide, bir düğümün sağlıklı iletişim kurabileceği mesafenin en fazla 100 metre civarında olmasındandır. Şekil 2.1’de 9 alt kurgudan biri olan 128+1’lik kurguya ait yerleşim şekli verilmiştir.



Şekil 2.1. Senaryo-1 128+1 düğümlük alt kurgu

### 2.2.1. Senaryo-1 Ağ İstatistik ve Benzetim Parametreleri

Bütün alt kurgularda koordinatör düğümler diğer ZSD’lerle sağlıklı iletişim kurabilmesi açısından ağın merkezine yerleştirilmiştir. Ağlardaki düğümlere ait ağ parametreleri Tablo 5’ de verilen değerlerde seçilmiştir. Bir açık alan uygulaması olan bu senaryodaki ZSD’ler için hedef seçimi rastgele belirlenmiştir. Bu şekilde ortamdaki olumsuz şartlar artırılarak, senaryonun bu durumdaki başarımları incelenecektir.



Tablo 5. Senaryo-1 ortak ağ ve düğüm parametreleri

MAC katman parametreleri		Ağ katman parametreleri	
Onay (ACK) durum	Evet	Çocuk üst düğüm sayısı	255
Onay Bekleme süresi (s)	0.05	Yönlendirici sayısı	0
Tekrar sayısı	5	Derinlik sayısı	1
CSMA/CA alt çekilme üsteli	3	Yönlendirme iptal süresi (s)	10
CSMA/CA üst çekilme sayısı	5	Örgü yönlendirme	Hayır
Kanal dinleme aralığı (s)	0.1	Tarama sinyal durumu	Hayır
Fiziksel katman parametreleri		Uygulama parametreleri	
Veri çevrimi (Kbps)	250	Hedef seçimi	Rastgele
Sinyal alım seviyesi (dBm)	-85	Paket üretim sıklığı (s/mutlak)	1
İletim bandı (Ghz)	2.4	Paket boyu (byte)	1024
Sinyal iletim gücü (W)	0.05	Durma süresi	Sınırsız

Bu senaryoda izlenecek olan genel ağ istatistikleri şunlardır:

MAC katman başarımları, gecikme, uygulama katmanını noktadan noktaya gecikme, ağ katman sıçrama sayıları ve paket kayıp sayıları istatistikleridir.

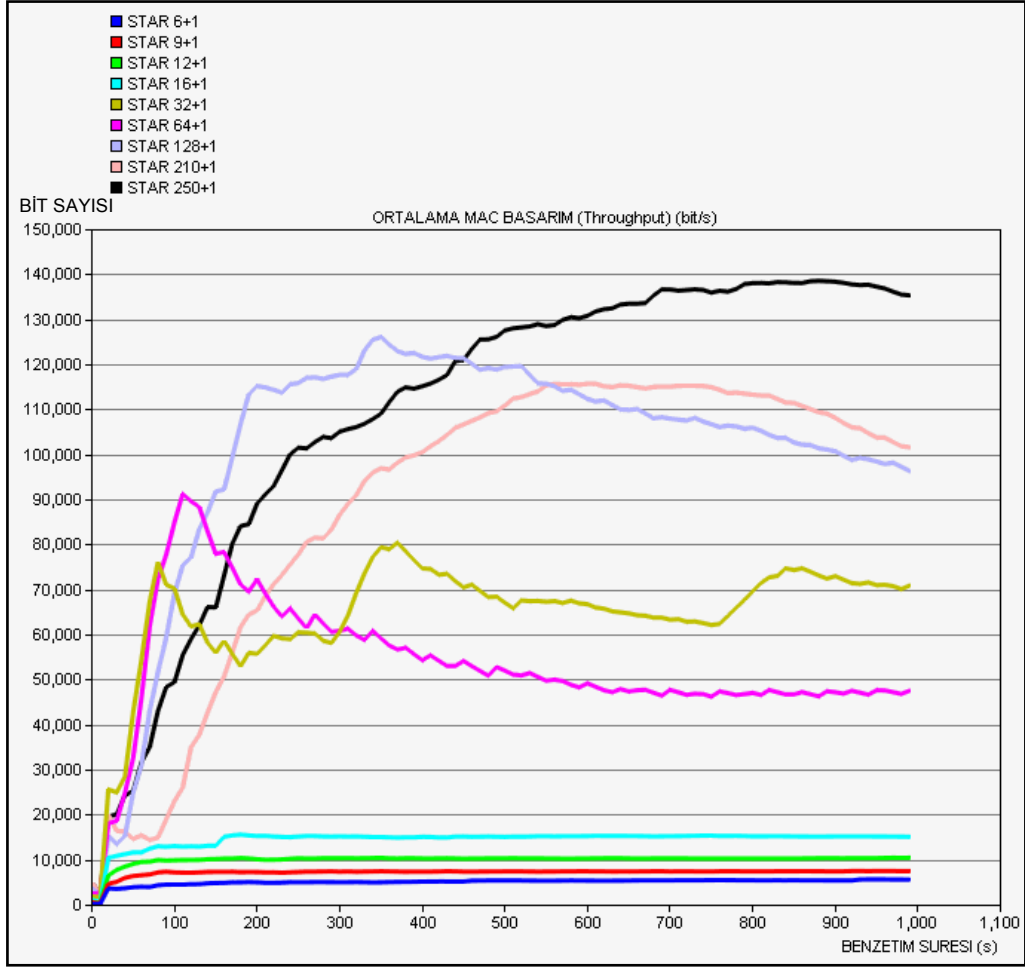
Bu senaryoda izlenecek olan koordinatör düğüm istatistikleri ise şunlardır:

Radyo alıcı BHO, Radyo alıcı paket kayıp oranı, Radyo alıcı katı sinyal seviyeleri, Radyo alıcı İGO.

Benzetim parametreleri olarak tüm kurgularda benzetim süresi 1000 saniye seçilmiş ve benzetim sonuçları için her 100 değerinde bir istatistik tutulması sağlanmıştır.

### 2.2.2. Senaryo-1 Genel Ağ İstatistik ve Analizleri

Senaryonun birinci genel ağ istatistiği olarak MAC katman başarımları değerlerinin karşılaştırmalı grafiği şekil 2.2’de verilmiştir. Bu grafik sonucunda başarımları değerleri için, özellikle 16+1’lik kurgudan sonraki kurgularda bir yükselme ve dağılıma gözlenmiştir. İletilen bit sayılarının yükselmesi düğüm sayılarının artışı ile doğru orantılı olarak artmıştır.



Şekil 2.2. Senaryo-1 ağ başarım grafiği

Doğal olarak düğüm sayısı artışı ile ortamdaki veri akışı yoğunluğundaki yükseliş, iletilen veri miktarlarının yükselmesine sebep olmuşsa da grafiğin özellikle kırılma yaşanan 16+1 üzeri iletim ortalamalarının düzenli seyri, 16+1 ve öncesi düğümlerden oluşan kurgulara göre daha kötümser sonuçlar göstermektedir. Bu grafiğe ilişkin analiz sonuçları tablo 6'da gösterilmiştir.

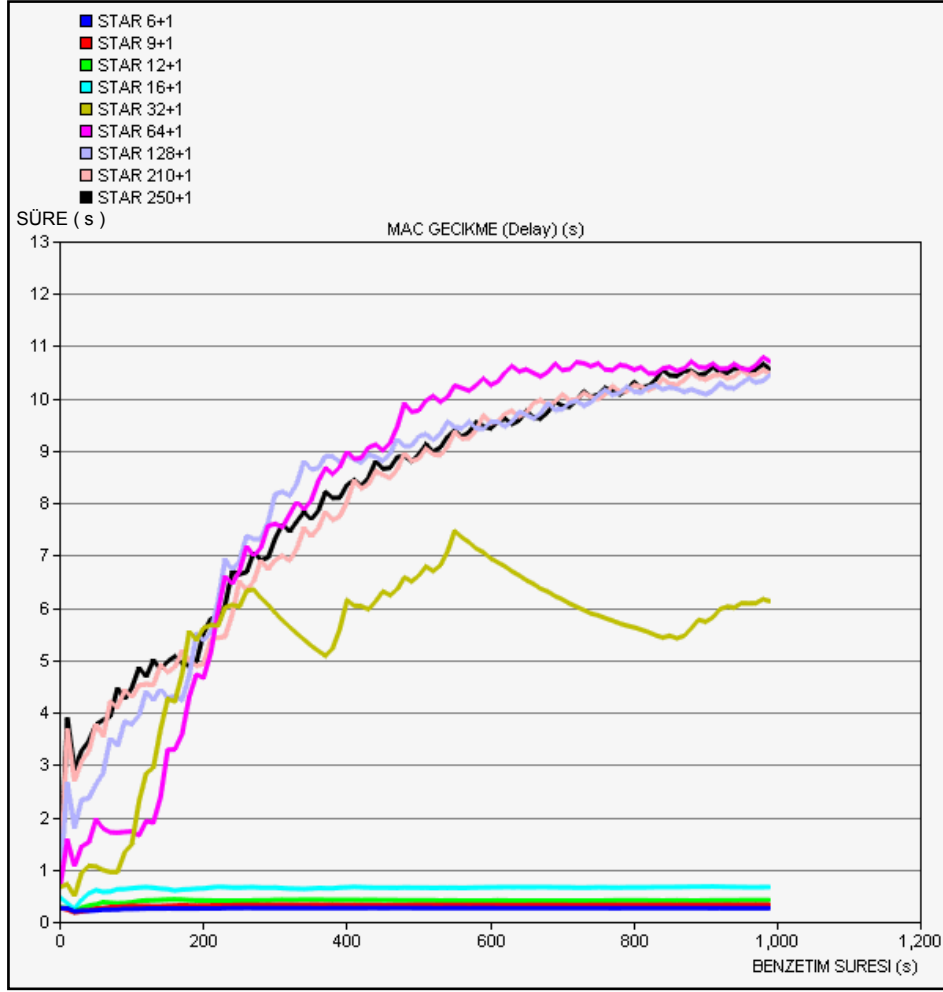
Tablo 6'nın üçüncü sütunu incelendiğinde 6+1, 9+1 ve 12+1 düğümlü kurgularda saniyede üretilen bit miktarına göre başarımın 16+1'lik kurguya kadar azaldığı, daha sonra 16+1, 32+1 ve 64+1'lik kurgularda tekrar yükseldiği görülmektedir. 64+1'den sonra artan düğüm sayılarında ise başarım yüzdeleri tekrar düşüş göstermiş ve en son 250+1'lik kurguda % 6.5 seviyesine gerilemiştir. Her saniyedeki beklenen 1024 bitlik veri üretim değeri ile bir kurgudaki toplam ZSD sayısı çarpımı, dördüncü sütun olan beklenen üretim sayısı değerlerinin hesaplanmasını sağlamıştır.

Tablo 6. Senaryo-1 başarımları grafiği analizleri

Düğüm sayısı	~ Düğüm başına başarımları değeri (bit/s)	~ Ortalama başarımları yüzdesi (%)	~ Beklenen üretim değeri (Kbit/s)	~ Yaklaşık en yüksek başarımları değeri (bit/s)
6+1	1000	12.5	48	6000
9+1	888	11.1	72	8000
12+1	833	10.4	96	10000
16+1	1000	12.5	128	16000
32+1	1875	23.4	256	60000
64+1	1250	15.6	512	80000
128+1	781	9.76	1024	100000
210+1	547	6.8	1680	115000
250+1	520	6.5	2000	130000

Senaryonun ikinci genel ağ istatistiği olarak MAC katman gecikme sürelerinin karşılaştırmalı grafiği şekil 2.3'te verilmiştir.

MAC katman gecikme sürelerine bakıldığında da bir önceki grafik sonuçlarını doğrular nitelikte bir analiz yapmak mümkün olmaktadır. 16+1'lik kurguda, düğümlerdeki ortalama gecikme süreleri, MAC katman seviyesinde 1 saniye altında iken, 32+1 ve üzeri düğümlü kurgularda 11 saniye seviyelerine yaklaşmıştır. Düğüm sayısının 16+1 ve altı olduğu durumlardaki gecikme sürelerindeki istikrarlı grafikler, düğüm sayıları arttıkça istikrarsız ve zamanla artan eğriler olarak daha kötü sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlara göre, 32+1 ve 64+1'lik düğümlerin tablo 6'ya göre başarımları yüzdeleri, yüksek MAC gecikmeleri de dikkate alındığında ZSD'lerin tamponlarında biriken veri miktarlarının artmasından kaynaklanmaktadır. Ancak artan gecikme sürelerinin ağ başarımlarının olumsuz etkenlerinden biri olduğu göz ardı edilmemelidir.



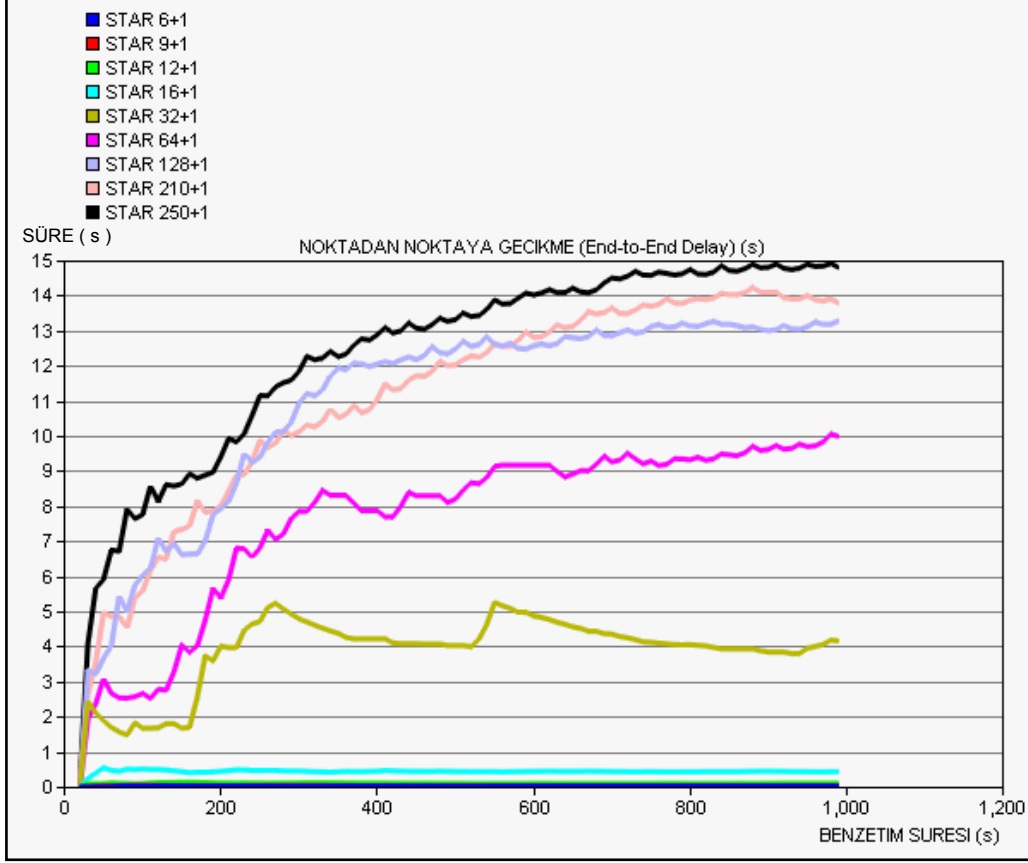
Şekil 2.3. Senaryo-1 MAC gecikme grafiği

Senaryonun üçüncü genel ağ istatistiği olarak, uygulama katmanı noktadan noktaya gecikme sürelerinin karşılaştırmalı grafiği şekil 2.4'te verilmiştir.

MAC katman gecikme sürelerine göre, uygulama katmanındaki gecikmeler aynı paralelde seyretmiştir. Grafiğe göre 16+1 ve altındaki düğüm sayıları bize yine 1 saniye altında gecikme süreleri sunarken, daha yukarı sayıdaki düğümlü kurgularda bu süre benzetim süresi ile orantılı olarak yükselmektedir. MAC seviyesinde 11 saniye civarına kadar olan gecikmeler, uygulama katman seviyesinde 15 saniyeler seviyesini zorlamıştır. Bu değerler arasındaki farkın en mühim sebebi ise katmanlar arasındaki veri aktarımında kaybolan süreden dolayıdır. Özellikle tekrar oranlarının ve çekişmelerin arttığı 16+1 düğümlü kurgulardan sonra bu süreler daha belirgin hale gelmiştir.

Son iki grafik sonuçlarına bakıldığında bir ağdaki gecikme sürelerinin milisaniyeler seviyesindeki değerleri ancak makul kabul edilirken, saniyeler mertebesine çıkılması yıldız

topoloji için en ideal düğüm sayılarının yakalanma zorunluluğunun önemini bir kez daha ortaya çıkarmaktadır.

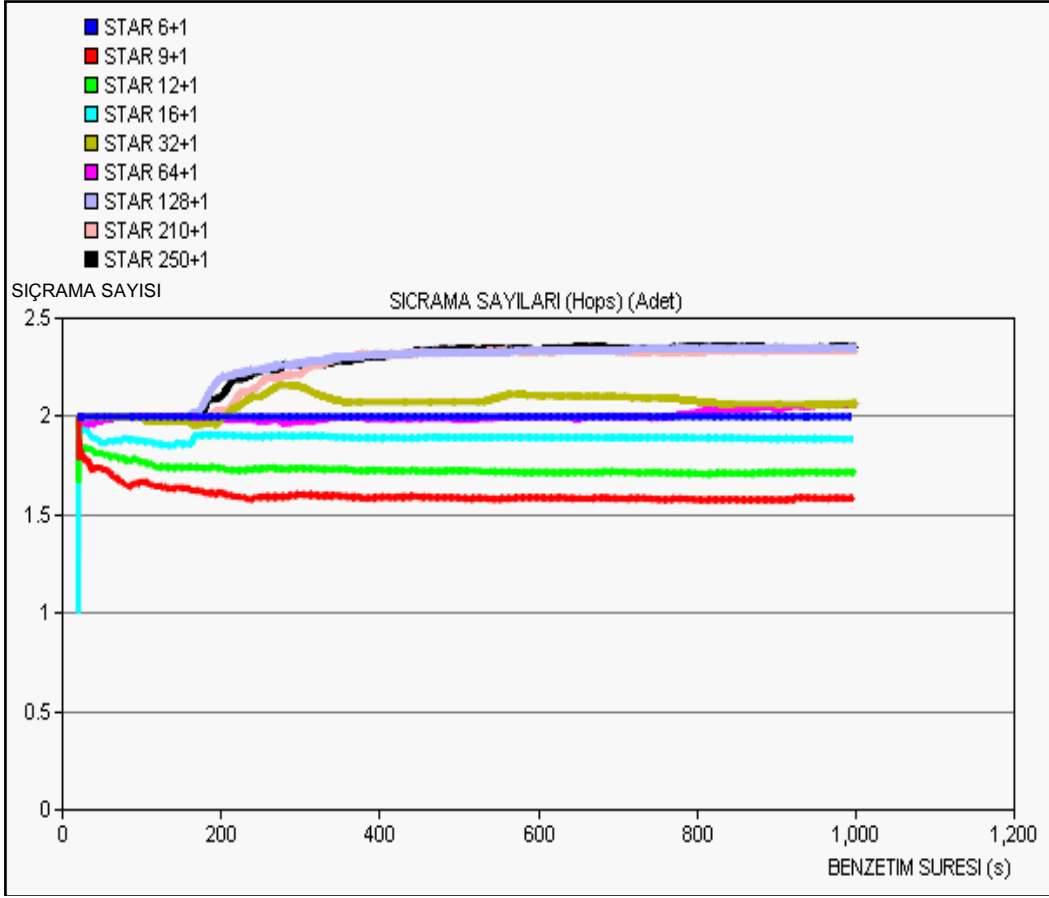


Şekil 2.4. Senaryo-1 noktadan noktaya gecikme grafiği

Senaryonun dördüncü genel ağ istatistiği olarak ağ katmanı sıçrama sayılarına ilişkin karşılaştırmalı grafik şekil 2.5’de verilmiştir.

Ağ katmana ait bir sonuç istatistiği olan düğüm sıçrama sayıları her ne kadar yönlendirici cihazların kullanıldığı ağ modellerinde öne çıkan bir terim olsa da, kablosuz algılayıcı ağların genel karakteristiği olan ZKD ile senkronize olabilme işlevi ve onay çerçeveleri, yıldız ağlarda da sıçrama sayılarını etkilemektedir. Bunun yanında hedef seçiminin rastgele oluşu da sonuçların, beklenen 1 sıçrama sayısı üstünde olmasına hayli katkı yapmıştır. Şekil 2.5’e göre sıçrama sayıları, özellikle 16+1’lik kurgudan sonra 2 ve üzeri seviyelere çıkmıştır.

ZSD’ler için hedef seçimindeki rastgele parametre belirlenmesinin bu çalışmadaki esas amacı, açık alandaki gürültü gibi olumsuz şartların artırılmasını sağlamaktır.



Şekil 2.5. Senaryo-1 sıçrama sayıları grafiği

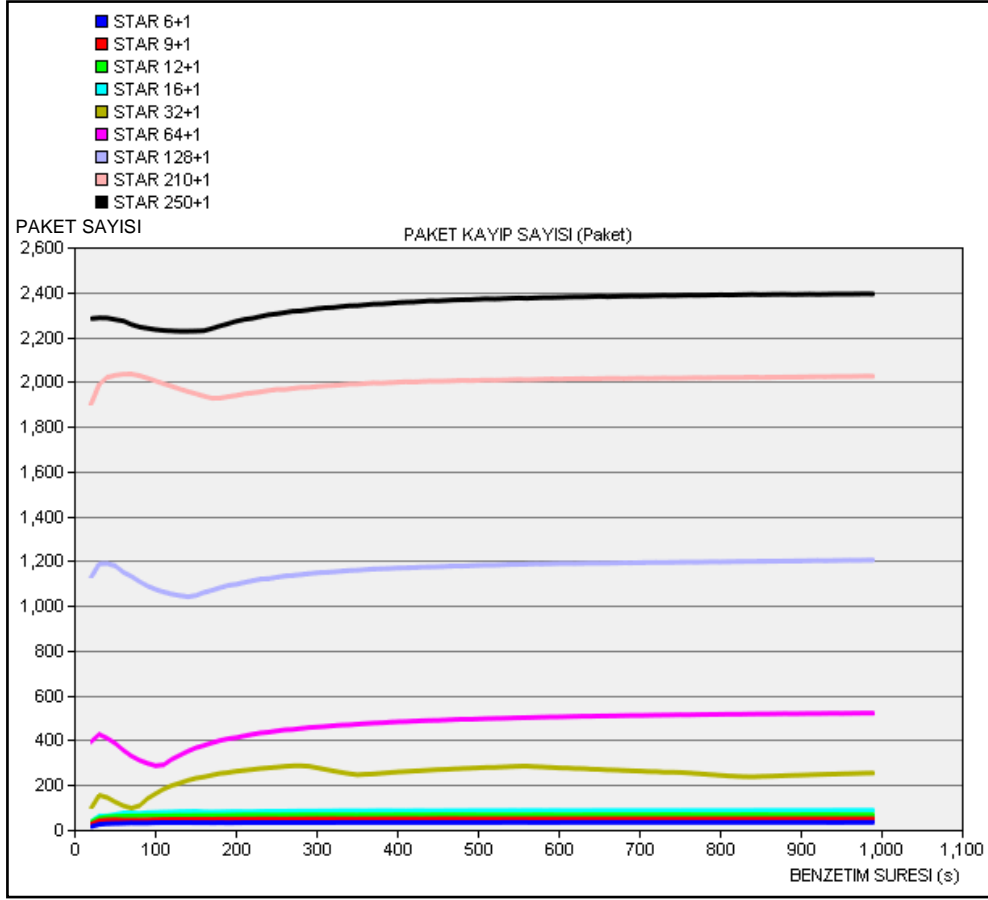
Senaryonun beşinci ve son genel ağ istatistiği olarak ağ katmanı paket kayıp sayılarına ilişkin karşılaştırmalı grafik şekil 2.6’da verilmiştir.

Ağ katman verilerine göre elde edilen bir genel ağ istatistiği olarak, teslim edilemeyen kayıp paket sayıları bilgisi de kablosuz algılayıcı ağların başarımlarında önemli bir yer tutmaktadır.

Bu test istatistiğindeki kayıplar, bit bazında değil paket sayıları bazında ölçülmüştür. Ağdaki üretilen paket trafiğine göre kayıp sayılarının artışı kabul edilebilir seviyelerin hayli üzerinde gözükmektedir.

Yine 16+1’lik kurgu ve aşağısındaki kayıp oranları ideal seviyelerde iken düğüm sayısının paket kayıplarını artırdığı sayı olarak, 16+1 üzeri kurgulardaki kayıplar dikkat çekmektedir.

Koordinatör üzerindeki yoğunlaşan ve sıkışan ağ trafiği, düğüm başına başarımları düşürmekle kalmamış, paket kayıp sayılarını da yukarı çekmiştir.



Şekil 2.6. Senaryo-1 genel ağ paket kayıp sayıları grafiği

Tablo 7’de, senaryo-1 için genel ağ istatistiklerinin analizi çıkarılmıştır. Yukarıdaki tüm analiz sonuçlarının bir özeti niteliğindeki tabloya bakıldığında, benzetim çalışmasının genel ağ istatistiklerinin, düğüm sayılarına göre daha çok kırılma noktaları, 16+1’lik ile 32+1’lik düğüm sayılarının olduğu satırlarda gözlemlenmektedir.

Bir ağın başarımının ve bağlantı kalitesi başarımının testinde kullanılan 5 farklı istatistiğe göre, yıldız topolojide kurgulanmış 1.senaryo için tablo 5’te verilen ağ parametrelerine göre, 16+1’lik düğüm sayısına sahip kurgu, ideal sonuçlara en yakın olanıdır. Daha çok sayıdaki düğüm sayıları ile bu ağ başarımları ve bağlantı kalitesi başarımı düşüş göstermiştir.

Tablo 7 sonuçlarına göre başarım sayıları toplam oluşan ağ trafiğine göredir. Düğüm başına başarım değerlerinin hesaplandığı tablo 6 sonuçlarına bakıldığında 16+1 ve 32+1’lik düğüm sayılarına sahip kurguların daha iyi başarım sergiledikleri görülmektedir.

Tablo 7. Senaryo-1 ağ istatistik analizleri

Düğüm sayısı	Ortalama başarımlı değeri (bit)	En fazla MAC gecikme Süresi (s)	En fazla son nokta gecikme süresi (s)	Ortalama sıçrama sayısı	Ortalama paket kayıp sayıları (paket)
6+1	5500	0.3	0.1	2	40
9+1	8000	0.4	0.2	1.6	50
12+1	10000	0.5	0.3	1.75	80
16+1	13500	0.6	0.5	1.9	100
32+1	65000	7.5	5.2	2.1	250
64+1	55000	10.7	10	2	500
128+1	90000	10.5	13.2	2.3	1200
210+1	110000	10.5	14	2.35	2000
250+1	125000	10.6	15	2.3	2300

### 2.2.3. Senaryo-1 Koordinatör Düğüm İstatistik ve Analizleri

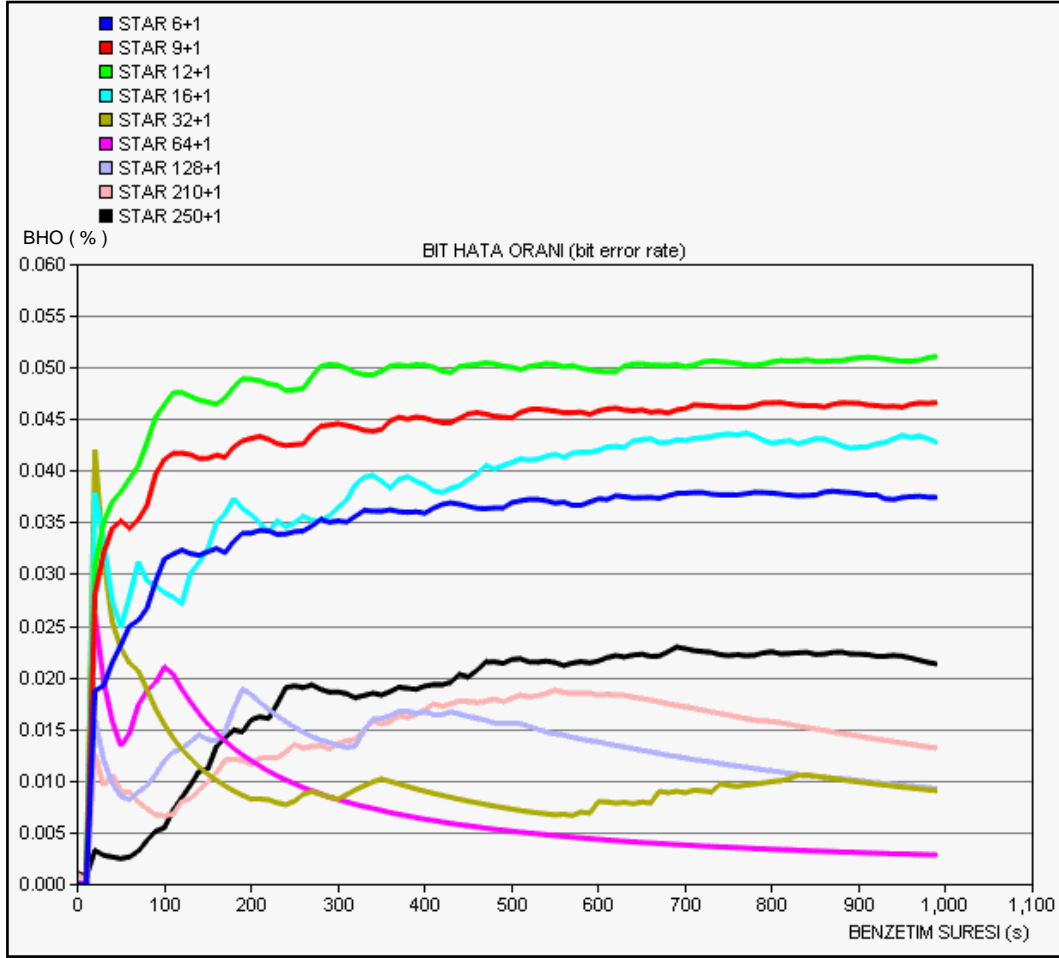
Tek başına bir ağın tüm ağ başarımlını ve bağlantı kalitesini sadece 5 genel istatistik sonuçlarına göre değerlendirmek bir eksiklik olur. Bu noktada ağdaki düğüm bazında da bazı istatistikleri tutmak ve bu istatistik sonuçlarına göre ağın başarımlı ve bağlantı kalitesini değerlendirmek daha doğru olacaktır. Bu amaçla senaryo-1 in bütün alt kurgularında ortak olan ve merkezde yer alan koordinatör düğüm istatistikleri de sırayla ele alınmıştır.

Koordinatör düğüm için ilk istatistik sonuçları, düğümün radyo alıcısı katındaki elde edilen BHO grafikleridir. Yine bu grafikte, 9 farklı alt kurgudaki koordinatör düğümlerin BHO değerleri ayrı ayrı gösterilmiştir.

Şekil 2.7'deki senaryo-1'e ait koordinatör düğüm BHO değerleri incelendiğinde, 16+1' lik kurgu ve altındakiler ile 32+1 ve üzerindeki iki ayrı grup şeklinde kümelendiği görülmektedir. Koordinatör düğüm bazında bakıldığında 32+1, 64+1 ve 128+1'lik kurgularda koordinatörün alıcı katındaki BHO oranlarının 10E-3 seviyelerinde olduğu gözlemlenmektedir. Burada MAC katman başarımları ile doğru orantılı olarak,



16+1, 32+1 ve 64+1'lik kurgularda, ZKD'deki BHO oranları hayli iyileşme göstermiştir. Bu 3 kurgu öncesindeki 6+1, 9+1 ve 12+1'lik kurgular ile sonraki 128+1, 210+1 ve 250+1'lik kurgulardaki MAC başarımlarının düşüklüğü ile orantılı olarak ta BHO değerleri düşük çıkmıştır.

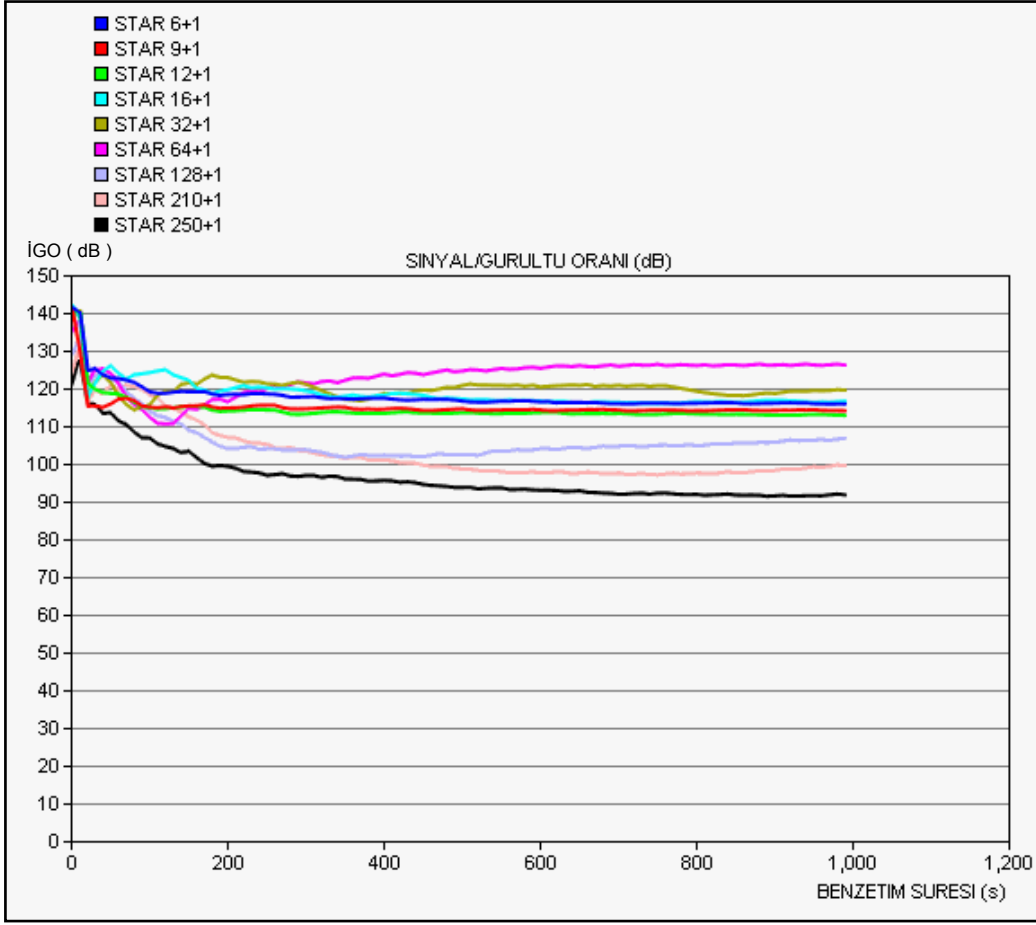


Şekil 2.7. Senaryo-1 koordinatör düğüm BHO grafiği

Birbirleri ile çok yakın ilişkisi olması bakımından İGO grafik sonuçlarını da inceleyerek BHO ve İGO değerleri üzerinden bir analiz yapmak daha mümkün olacaktır. Şekil 2.8'de İGO sonuçları görülmektedir.

Şekil 2.8 incelendiğinde, 100 dB ile 140 dB aralığında bir dağılım olduğu görülmektedir.

BHO istatistiklerine paralel olarak uç grafikler yine 32+1 ve 64+1'lik kurgulara ait gözükmemektedir. Daha çok yığılmanın 120 dB seviyelerinde olduğu yine gözlemlenmektedir.



Şekil 2.8. Senaryo-1 koordinatör düğüm İGO grafiği

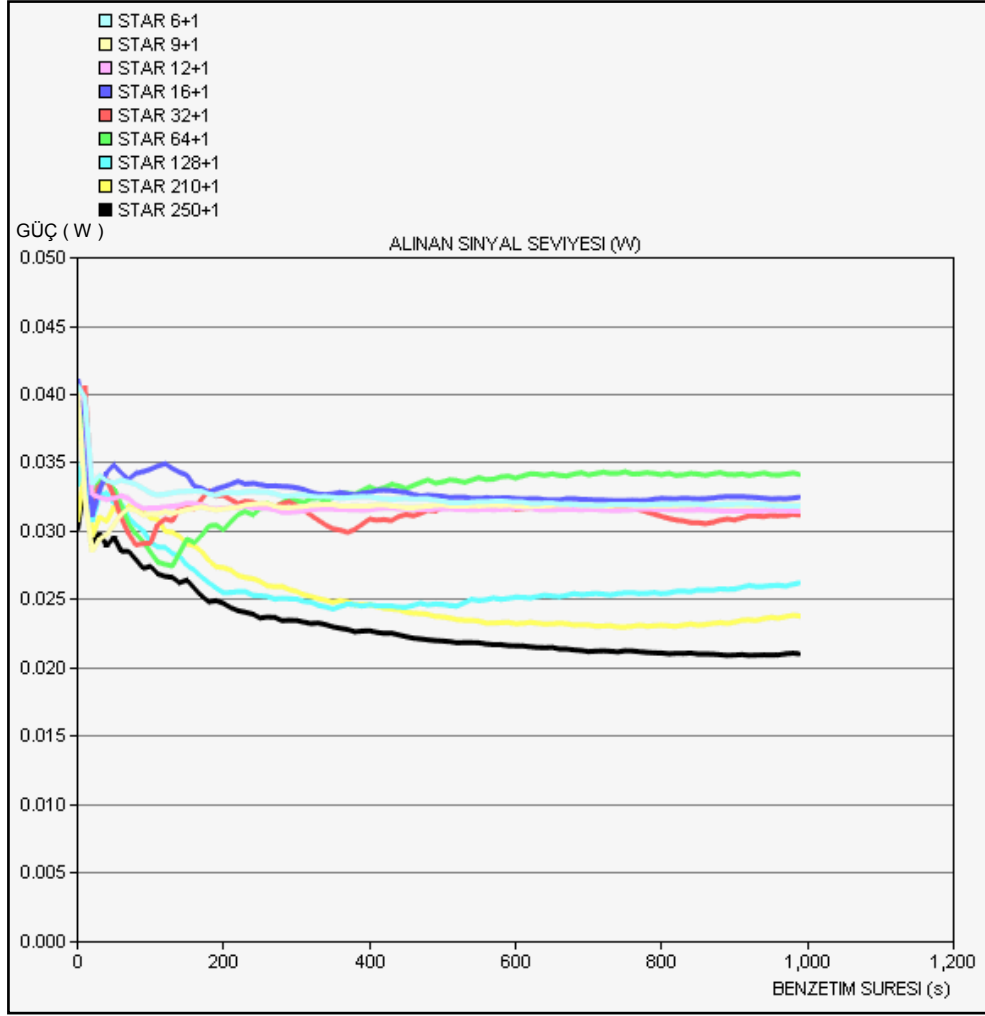
ZKD radyo alıcı katındaki sinyal seviyeleri, şekil 2.9'daki grafikte gösterilmiştir.

Şekil 2.9'a bakıldığında koordinatör alıcı katındaki sinyal seviyelerinin 40mW ile 20mW arasında değişen aralıkta dağıldığı görülmektedir.

64+1 üzeri düğümlü kurgularda sinyal seviyesi, daha düşük değerlerle bir kopma gösterip diğer kurgulardan ayrılmıştır. Bu sinyal seviyesi düşüklüğü özellikle girişim ve çekişmelerin düğüm sayısı artışı ile doğrudan orantılı olmasını desteklemektedir.

Bunun yanında ortamın gürültü katsayısının artışı ve düğümlerin doğrudan görüş açılarının kırılması da sinyal seviyelerinin koordinatör düğümdeki değerlerini düşürmüştür.

Koordinatör düğümle ilgili son istatistik sonuçları Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu grafikte alıcı katındaki paket kayıp oranları görülmektedir.

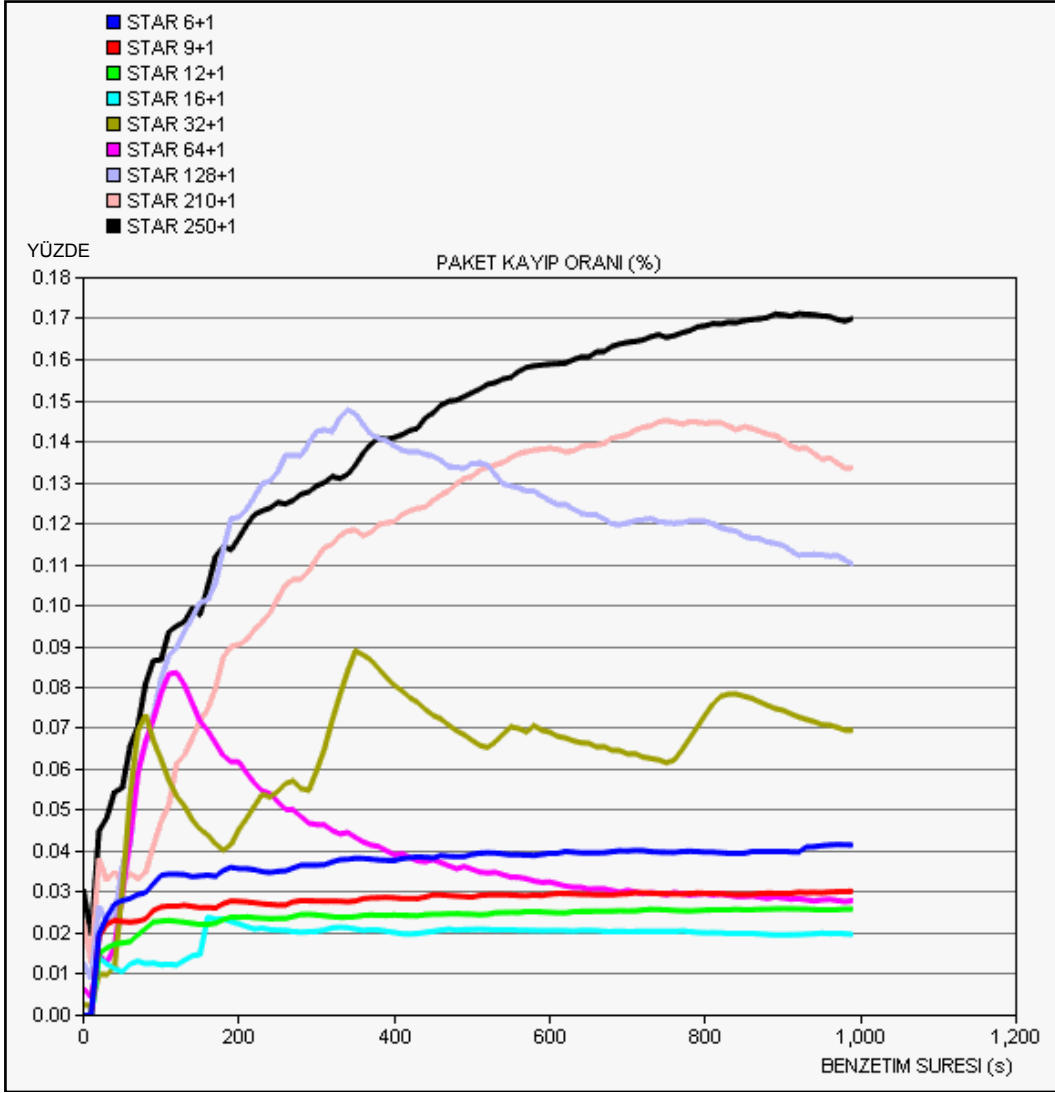


Şekil 2.9. Senaryo-1 koordinatör düğüm sinyal seviyeleri grafiği

Paket kayıp oranları şekil 2.10 üzerinde incelendiğinde, sinyal seviyesinin düşük seyrettiği 64+1 ve üzeri kurgulardaki kayıp oranları da yüksek görülmektedir. 16+1'lik kurgu için, bu istatistik sonuçlarına göre en düşük paket kayıp oranı yakalanmıştır.

32+1 ve 64+1'lik kurgu sonuçları yine diğer grafiklerde olduğu gibi kırılma ve kopmaların başladığı kurgular olarak göze çarpmaktadır. Paket kayıp oranları grafiği iyi incelendiğinde, diğer koordinatör düğüm istatistikleri ile paralel sonuçlar gösterdiği görülmektedir. En yüksek paket kayıp oranı %17 ile 250+1'lik kurguya aitken en düşük paket kayıp oranları da %2'lik değerle 16+1'lik kurguya aittir.

Genel ağ istatistiklerindeki paket kayıp sayıları grafiği ile karşılaştırıldığında, koordinatör düğüm paket kayıp oranlarına ait grafikler birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Ağın trafik yükünü ağırlıklı olarak taşıyan koordinatör düğümün davranışları bu sonucun ortaya çıkmasının temel sebebidir.



Şekil 2.10. Senaryo-1 koordinatör düğüm paket kayıp oranları grafiği

Tablo 8’de koordinatör düğüm istatistiklerinin genel bir analizi yapılmıştır.

Tablo 8’deki sonuçlar incelendiğinde koordinatör düğüm için BHO değerinin tüm kurgularda yaklaşık  $10E-3$  seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Gürültüsüz bir ortam için  $10E-6$  seviyelerinin mükemmelliği referans alınır,  $10E-3$  seviyelerindeki bir BHO değeri ortalamadan biraz daha kötü seviyede bir sonuç olarak gözükmektedir. 32+1 ve 64+1’lik kurgularda BHO değerleri, koordinatör bazındaki değerlendirmeler içindeki en iyi sonuçları göstermektedir. İGO değerleri açısından ve alınan sinyal seviyeleri açısından da diğer kurgulara göre daha yukarıda veya eşit değerler göstermektedir. Gürültü değerleri olarak tablo 7’deki İGO değerlerine bakıldığında çok düşük sonuçlarla karşılaşılmaktadır.

Tablo 8. Senaryo-1 in koordinatör düğümlerine ait istatistik analizleri

Düğüm sayısı	Ortalama BHO	Ortalama İGO (dB)	Ortalama Alınan Sinyal seviyesi (mW)	En fazla paket kayıp oranı (%)
6+1	0.038	118	32	4
9+1	0.045	115	32	3
12+1	0.050	115	32	2.5
16+1	0.040	118	32	2
32+1	0.010	120	32	9
64+1	0.005	128	34	8
128+1	0.015	105	25	15
210+1	0.018	100	22	15
250+1	0.020	90	20	17

#### 2.2.4. Senaryo-1 Genel Değerlendirmesi

Senaryo-1 için, koordinatör düğüm bazında tüm sonuçları incelediğimizde, benzetimler sonucundaki istatistik değerlerinin, birbirine çok uzak olmadıkları görülmektedir. Kurgular arasındaki sonuç farkları genelde BHO ve İGO değerlerinde daha belirgin ortaya çıkmaktadır. ZKD bazındaki bu sonuçlarda, düğüm sayısının düşük olduğu ilk üç kurguda düğüm sayısı arttıkça, MAC başarımlarının düşüşü ile orantılı olarak BHO değerleri artmış, 16 düğümlü kurgu ve sonrasında, MAC başarımlarının tekrar yükselmesi ile BHO değerleri de iyileşmiştir. Bundan sonraki üç kurguda ise artan düğüm sayıları ve gecikme sürelerine bağlı olarak azalan MAC başarımları, BHO değerlerini yine olumsuz etkilemiştir. Bu senaryoda MAC başarımlarının yüzdeleri ile BHO değerleri paralellik göstermiştir. 32+1 ve 64+1'lik kurgularda gecikmelerin artışı ile düğüm tamponlarında biriken veri miktarı artmış ve bir çevrimde ZKD'ye aktarılan hatalı bit oranı da düşmüştür.

Genel ağ istatistikleri için 16+1'lik kurguda yakalanan yıldız topolojik yapıya göre ideal sonuçlar, düğüm bazında bakıldığında ise 64+1'lik kurguya kadar devam etmiştir. Ancak paket kayıp oranları istatistiği yine bize 16+1'lik kurgudaki koordinatör

davranışının, diğer kurgulardaki koordinatör davranışlarına göre daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Özellikle kırılmaların yaşandığı gecikme süresi, başarımların yüzdeleri ve BHO istatistikleri de, senaryo-1 için 16 düğümlü kurgunun daha başarılı olduğunu göstermektedir.

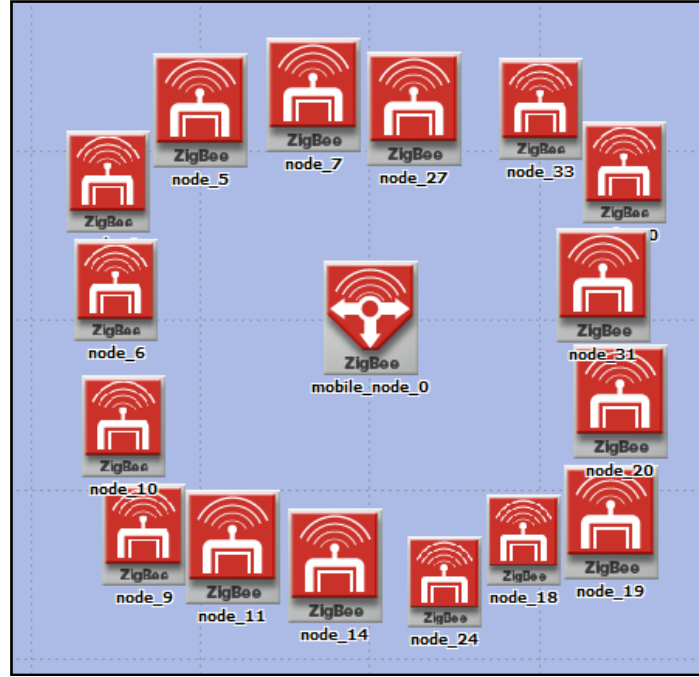
### 2.3. Senaryo-2

İlk senaryoda yoğunlaştığımız yıldız topolojinin farklı kurgularındaki başarımların testlerinin, özellikle ikinci senaryo analizlerine iyi bir referans olması düşünülmüştür. Birinci senaryoda yukarıda sıkça ifade ettiğimiz ve tüm test sonuçlarına göre elde edilen en iyi değerlere sahip 16+1'lik kurgu, ikinci senaryonun da bir üyesi olacaktır. Bu senaryoda, bahsi geçen 16+1'lik yıldız topolojik kurgunun yanında, 16 düğümlü örgü ve 16 düğümlü ağaç topolojiler diğer alt kurgular olarak tasarlanmıştır. Örgü ve ağaç topolojik kurgularda yıldız yapıdan farklı olarak yönlendirici (*router*) düğümlerine de yer verilmiştir. Bu sayede gerçek manada örgü ve ağaç topolojik yapıların kurgulanması mümkün olmuştur. Böylece 3 farklı topolojik kurgudaki senaryo-2'ye ait ağ başarımlarının izlenmesi sağlanmıştır.

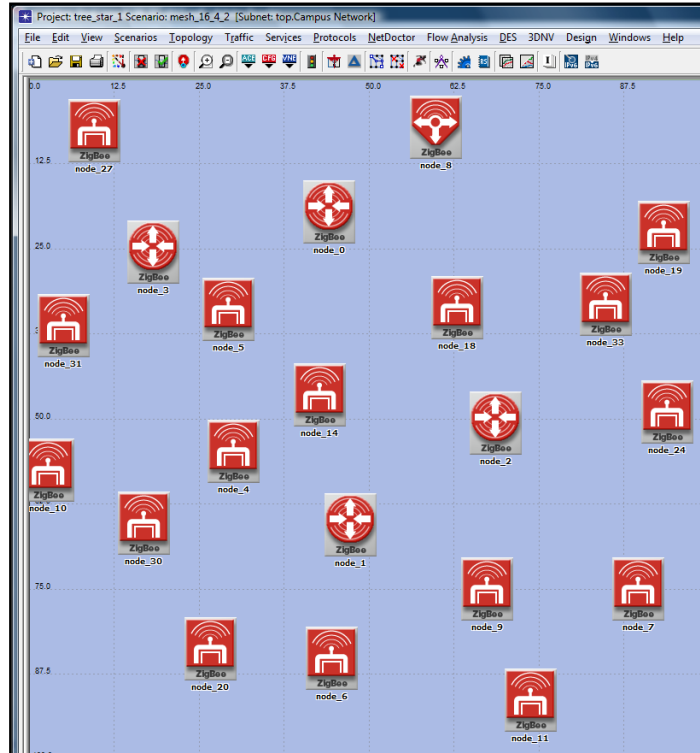
Örgü topolojide ve ağaç topolojide 16+1'lik düğümlere ilave olarak kullanılan yönlendirici cihazların ağ parametreleri de son düğümlerle aynı değerlerde seçilmiştir. Yönlendirici sayısı her iki topolojide de 4 adet kullanılmıştır. Tüm düğümlerle etkin bağ oluşturabilecek en ideal değer tüm alt benzetim çalışmalarından sonra 4 yönlendirici olarak saptanmıştır. Düğüm sayısının artışı ile bu sayının da yukarı çıkması etkin sonuçlar elde edilebilmesi için gereklidir.

Örgü ve ağaç topolojiler için, koordinatör düğüm ağ parametrelerinde belirlenen, maksimum çocuk düğüm sayısı, bir daldaki maksimum yönlendirici sayısı ve her dalın maksimum derinliği gibi parametreler ikinci senaryonun bu iki kurgusu için en önemli ağ parametreleridir. Yine örgü topolojik kurgu benzetiminde -örgü yönlendirme- parametresi de önemli bir anlam ifade etmektedir. Bu parametre ile ZYD lerin kendi aralarındaki ve ZKD ile bağlantılarındaki gerekli yönlendirmeler açısından aktif yapılmıştır. Ağaç topoloji için örgü yönlendirme tekniği kullanılmadığından ilgili kurguda bu seçim aktif yapılmamıştır.

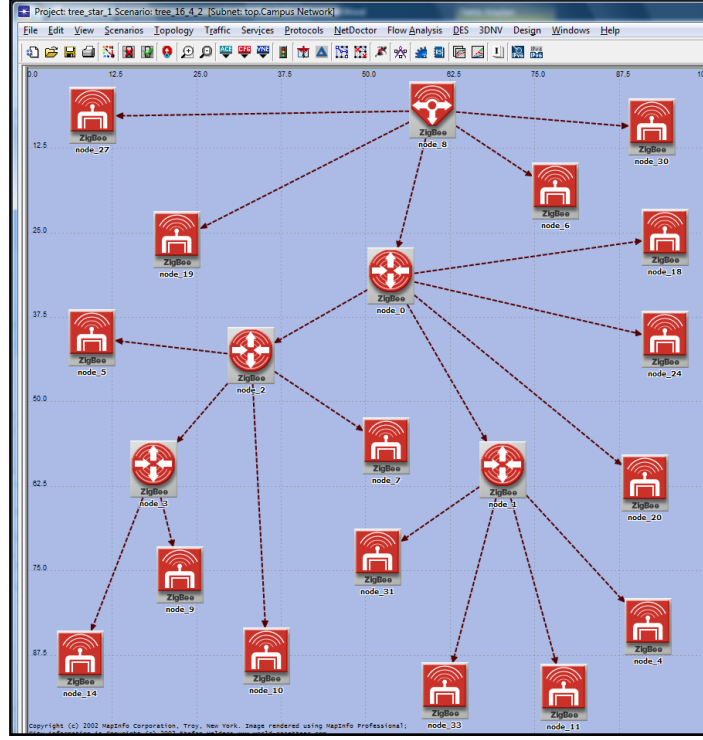
Senaryonun her 3 kurgusunda da ebatlar 100 x 100 m seçilmiştir. Düğüm ağ parametreleri için seçilen değerler Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 2.11. Senaryo-2 yıldız topolojik kurgu



Şekil 2.12. Senaryo-2 örgü topolojik kurgu



Şekil 2.13. Senaryo-2 ağaç topolojik kurgu

### 2.3.1. Senaryo-2 Ağ, İstatistik ve Benzetim Parametreleri

Senaryonun üç farklı kurgusu için belirlenen ortak düğüm parametreleri tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Senaryo-2 ortak düğüm parametreleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Onay bekleme süresi (s)	0.1	Onay mekanizması	Evet
Yeniden iletim sayısı	5	İletim bandı (Ghz)	2.4
Kanal dinleme aralığı (s)	0.1	Gönderim gücü (W)	0.05
Veri çevrimi (kbps)	250	Hedef seçimi	Rastgele
Sinyal alım seviyesi (dBm)	-85	Paket boyu (byte)	1024

Senaryonun üç kurgusu için de farklı olan ağ parametreleri ise tablo 10’da verilmiştir. Senaryonun izlenecek ağ ve koordinatör düğüm istatistikleri ise tablo 11’de belirtilmiştir.



Tablo 10. Senaryo-2 ağ parametreleri

Parametreler	Yıldız ağ değerleri	Örgü ağ değerleri	Ağaç ağ değerleri
En fazla Çocuk düğüm	255	6	6
En fazla yönlendirici	0	2	2
En fazla derinlik	1	5	5
Örgü Yönlendirme	Disabled	Enabled	Disabled

Tablo 11. Senaryo-2 İzlenecek istatistikler

Genel ağ İstatistikleri	Koordinatör Düğüm istatistikleri
MAC Başarım değerleri	BHO değerleri
MAC katman MAC gecikme süreleri	İGO değerleri
Uygulama katmanı noktadan noktaya gecikme	Alınan sinyal seviyeleri
Ağ katman sıçrama sayıları	Paket kayıp oranları

Senaryo-2 deki her üç kurgu için tablolarda belirtilen parametreler doğrultusunda tablo 11'de verilen istatistikler izlenerek karşılaştırmalı grafikler üzerinde sonuçlar değerlendirilecektir. Benzetim çalışma süresinin 1000 saniye ve her 100 değerde bir istatistik tutulmasını sağlayacak parametreler ise, benzetim parametreleri penceresi aracılığı ile belirlenmiştir.

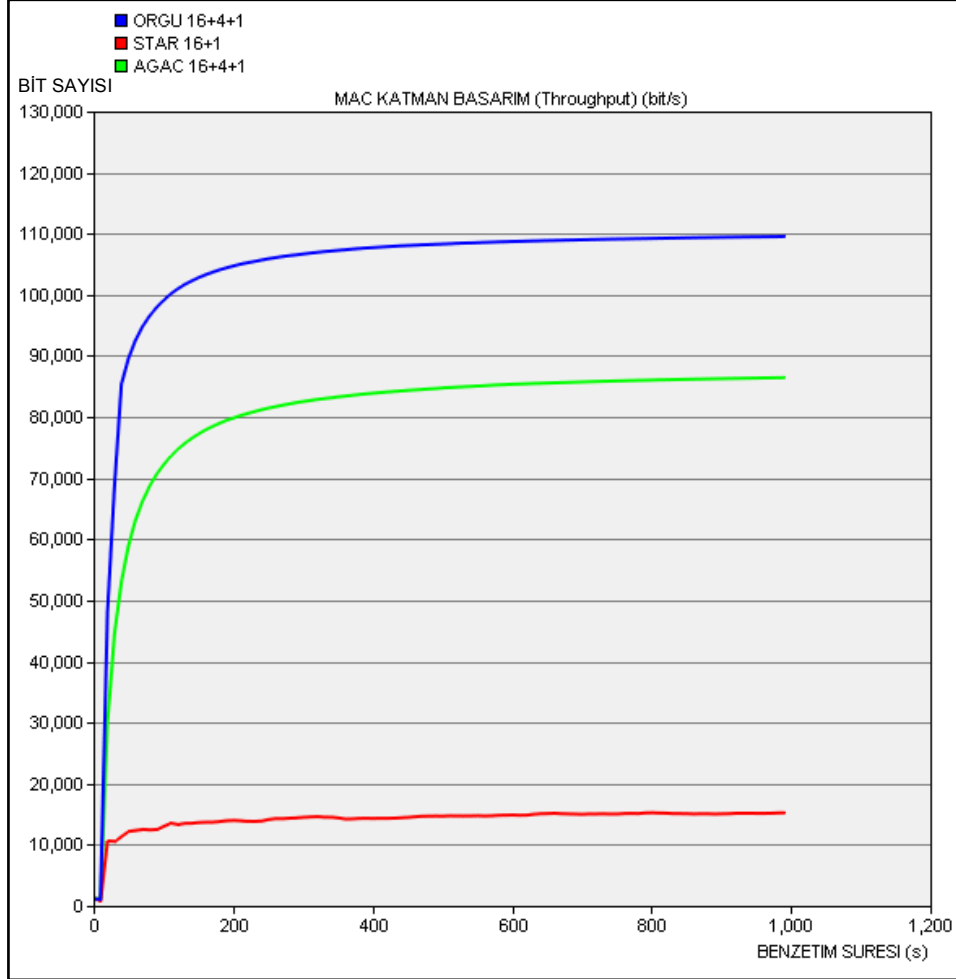
### 2.3.2. Senaryo-2 Genel Ağ İstatistik ve Analizleri

Senaryonun her üç kurgusuna ait benzetimlerin koşulması neticesinde elde edilen sonuç grafiklerinden birincisi MAC katmana ait başarım değerleridir.

İkinci senaryonun başarım istatistik sonuçları için şekil 2.14 incelendiğinde, yıldız topolojik yapıdaki kurgunun başarım değerleri, örgü ve ağaç yapılarıdaki kurguların başarım değerlerinden azımsanamayacak derecede aşağı kaldığı görülmektedir.

Örgü topoloji ve ağaç topolojik yapılarıdaki elde edilen bu iyileşme, yıldız topolojideki tüm trafiği karşılayan koordinatör düğümün anlık yük trafiğinin, yönlendirici cihazlar üzerinden dengeli bir dağılımla algılanmasındandır. Tüm düğümler doğrudan koordinatörle iletişime geçmedikleri için bağlı oldukları daldaki yönlendirici üzerinden dengeli bir ulaşım göstermektedirler. Bu dengeli yük dağılımının daha verimli bir son

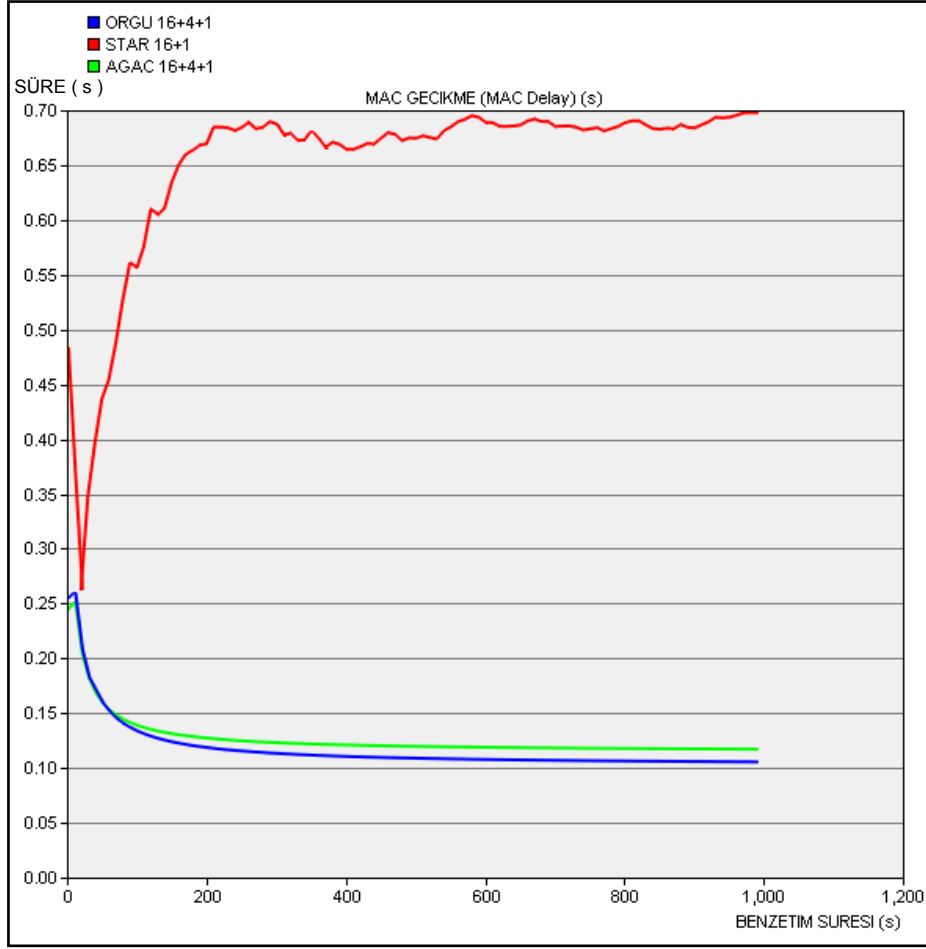
düğüm - koordinatör ilişkisi ortaya çıkardığı gözükmektedir. Özellikle paket tekrar oranlarının azalmasıyla karşımıza çıkan dengeli yük dağılımı, başarımlar grafiğinde en öne çıkan sonuçtur.



Şekil 2.14. Senaryo-2 başarımlar değerleri grafiği

Şekil 2.15’de ise MAC katman gecikme istatistiğine ait grafik görülmektedir.

Senaryo-2’nin MAC gecikme grafiğine bakıldığında da açık bir şekilde yıldız topolojinin gecikme süresinin, örgü ve ağaç topolojilerdeki gecikmelere göre 10 kattan daha fazla olduğu görülmektedir. Bir önceki senaryodaki MAC gecikmelerine ilişkin sonuç grafiğinde, en az düğümlerle bile bir yıldız ağdaki gecikme değerlerinin 0.5 saniye civarlarında olması göz önüne alındığında, ikinci senaryonun eklenen iki alt kurgusunun gecikme başarımları oldukça dikkat çekicidir.



Şekil 2.15. Senaryo-2 MAC gecikme grafiği

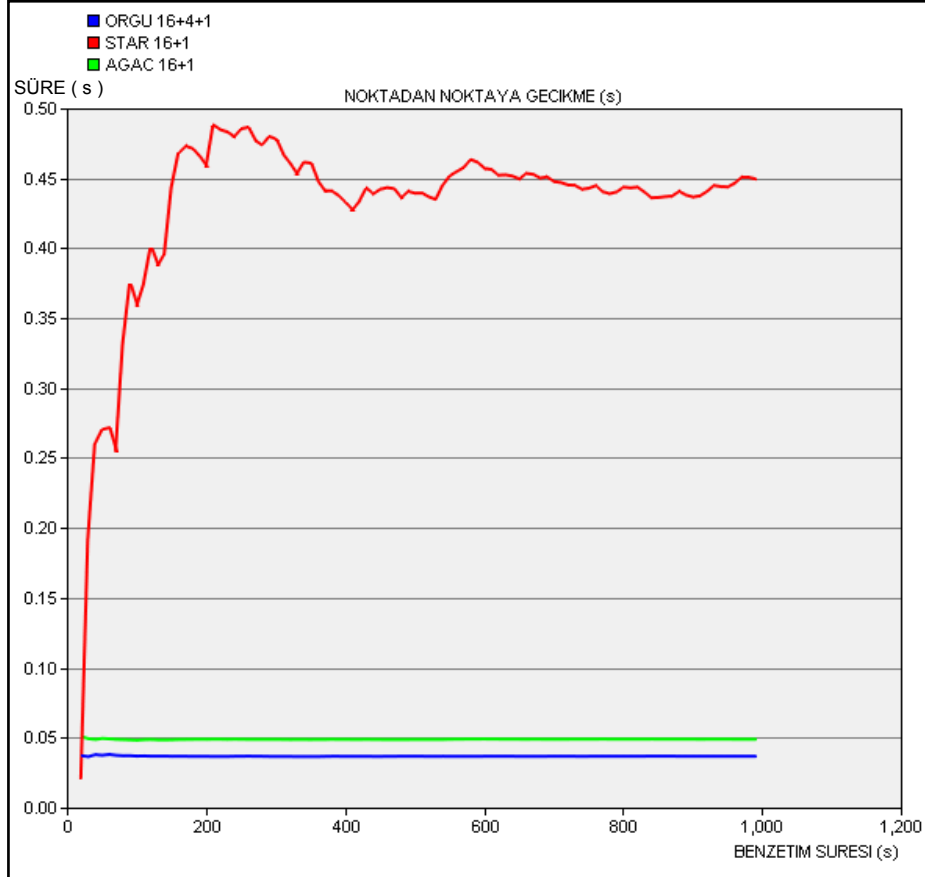
Elde edilen bu iyileştirmenin algılayıcı son düğümlerin, koordinatör düğüm bağımlılıklarının birim süre bazında azaldığını bize göstermektedir. Üretilen ağ trafiklerinin, düğüm sayılarının eşit tutulmasından dolayı birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu kabul edilirse, koordinatör üzerindeki ağ yoğunluklarının örgü ve ağaç topolojilerde yönlendiriciler yardımı ile ne denli azaltıldığı daha iyi anlaşılmaktadır.

Bu grafik sonuçlarındaki yıldız topoloji gecikmesi 700 ms sınırlarını zorlayarak, örgü ve ağaç topolojilerden uzak bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Örgü ve ağaç topolojilerde elde edilen gecikme süreleri ise 100-120 ms aralığında gözükmektedir.

Bir sonraki istatistik sonuçları şekil 2.16 üzerinde görülen noktadan noktaya gecikme sürelerine ait grafiktedir. Bu grafik uygulama seviyesindeki gecikmeleri göstermektedir.

Bir önceki MAC katman gecikmeleri ile aynı doğrultuda sonuçlar veren, şekil 2.16'daki noktadan noktaya gecikme grafiğinin, uygulama katman seviyesindeki değerlerine bakıldığında, yıldız topolojide yaklaşık olarak, MAC katman gecikmesine göre

200-250 ms arası azalma gözlemlenirken, örgü topolojide 50 ms nin hemen altında bir ortalamanın elde edildiği görülmektedir. Yine ağaç topolojide de, 50 ms seviyesinde bir ortalama değer elde edilmiştir. Bu sonuçların ortaya çıkmasındaki önemli faktörlerden biri, düğümler arası çekişmelerden kaynaklan gecikmelerin örgü ve ağaç topolojilerde azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.16. Senaryo-2 noktadan noktaya gecikme grafiği

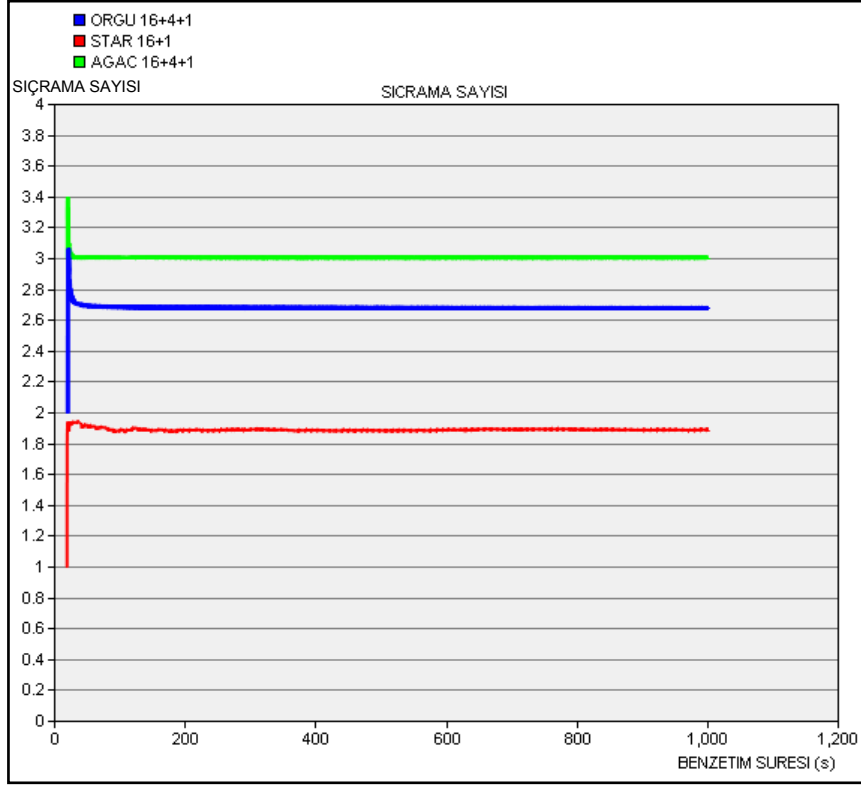
Senaryo-2'nin dördüncü ve son genel ağ istatistiği olan sıçrama sayılarını şekil 2.17'deki grafik göstermektedir. Burada sıçrama sayıları incelendiğinde, ağaç topolojide ortalama 3, örgü topolojide 2.7 ve yıldız topolojide 1.8 değerleri elde edilmiştir. Örgü ve ağaç yapılarıdaki ağ trafiklerinde bir son düğüm, verisini koordinatöre iletirken, doğrudan gönderme imkanını bu grafiğe göre çok az bulmuştur. Çünkü kurguya göre son düğümlerin çoğu, en az bir yönlendirici üzerinden koordinatöre ulaşmaktadır.

Yönlendirici etkisinin daha baskın görüldüğü sonuç ise ağaç yapıda elde edilen sıçrama sayısıdır. Burada özellikle derinlik faktörünün, sıçrama sayılarına olumsuz

yansıması görülmektedir. Ağaç yapının doğası en az 2 derinlik değerini gerektirmektedir. Düğüm sayılarının artışı ve koordinatör düğüm yük dağılımları göz önüne alındığında ise derinliğin daha da artırılması kaçınılmaz olmaktadır. Bu artış ta sıçrama sayılarında mecburi bir yükselme göstermektedir.

Oluşturulan yönlendirme tablolarına bağımlılık, ağaç topolojideki bir düğümün, verisini koordinatöre iletirken mecburi sayıda sıçramaya uğramasını da zorunlu kılar.

Örgü topolojideki sıçrama sayıları ise anlık durum değerlendirmelerine göre düğüm davranışlarının doğurduğu sonuçtur ve daha etkindir. Çünkü en az sayıda sıçrama ile koordinatöre ulaşma imkanı bulmaktadır.



Şekil 2.17. Senaryo-2 sıçrama sayıları grafiği

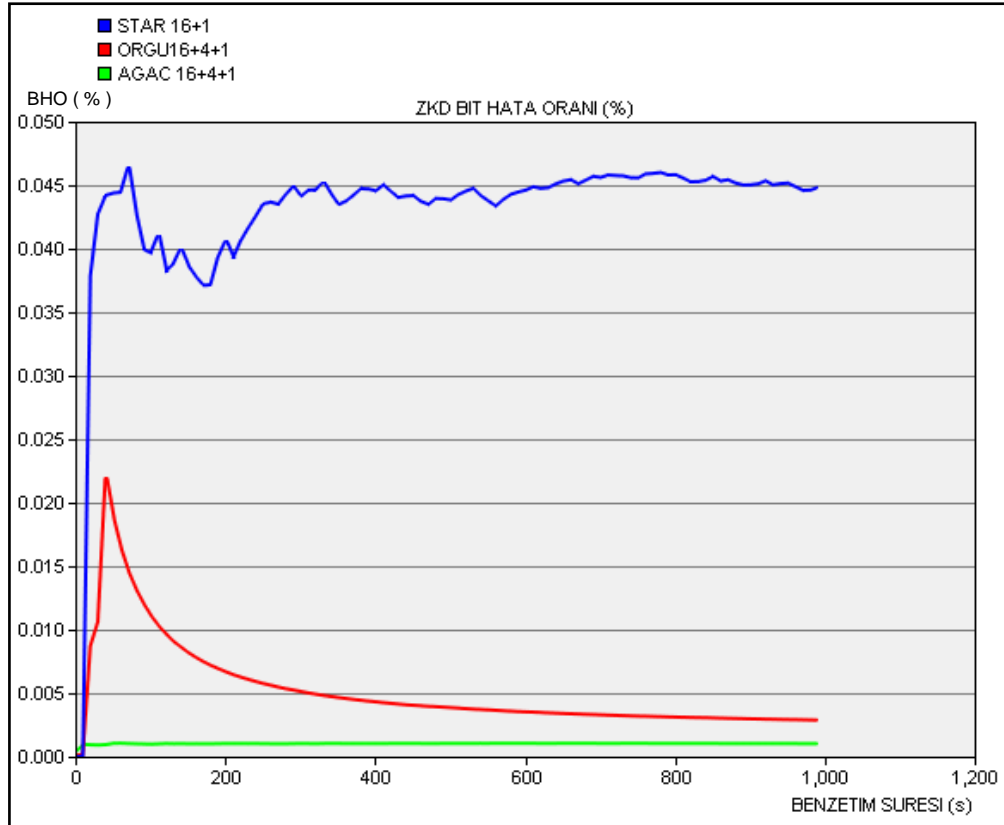
Başarısız bir iletişim durumundaki alternatif yol arayışları ancak sıçrama sayılarının yükselmesine katkı yapmaktadır.

Dinamik yönlendirme tablosu üretkenliği, örgü topolojinin sıçrama sayısını, sabit yönlendirme tablolarından dolayı sabit sıçrama sayılarını zorunlu kılan ağaç yapıdan daha az çıkarmıştır.

Tablo 12. Senaryo-2 genel ağ istatistik analizleri

İstatistik adı	Yıldız	Örgü	Ağaç
Başarım (bit)	15000	110000	85000
MAC Gecikme (ms)	680	100	120
Noktadan Noktaya Gecikme (ms)	450	40	50
Sıçrama sayısı	1.8	2.7	3

### 2.3.3. Senaryo-2 Koordinatör Düğüm İstatistik ve Analizleri



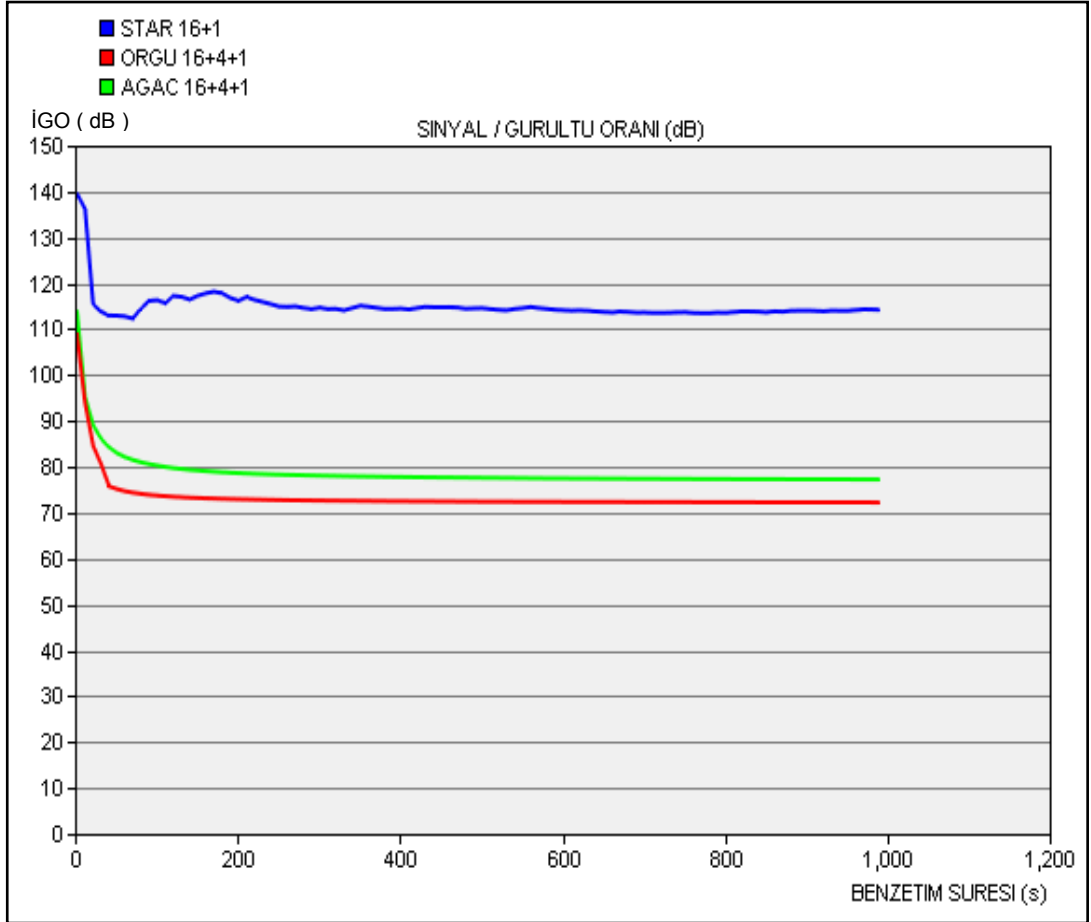
Şekil 2.18. Senaryo-2 koordinatör düğüm BHO grafiği

İlk senaryoda olduğu gibi senaryo-2 için de koordinatör düğümüne ait düğüm istatistiklerinin incelenmesi, ağların bağlantı kalite değerlendirmeleri için daha etkin yorumlar yapılabilmesine olanak sağlayacaktır.

Bu doğrultuda ilk düğüm istatistiği olarak şekil 2.18 üzerinde koordinatör düğümlerin 3 farklı topolojideki BHO değerleri gösterilmiştir.

Şekil 2.18 incelendiğinde, koordinatör düğüm bazında, yıldız topolojide %4 civarında bir BHO oranı yakalanırken, örgü ve ağaç topolojilerde çok daha düşük seviyelerde başarılı birer BHO ortalaması yakalanmıştır.

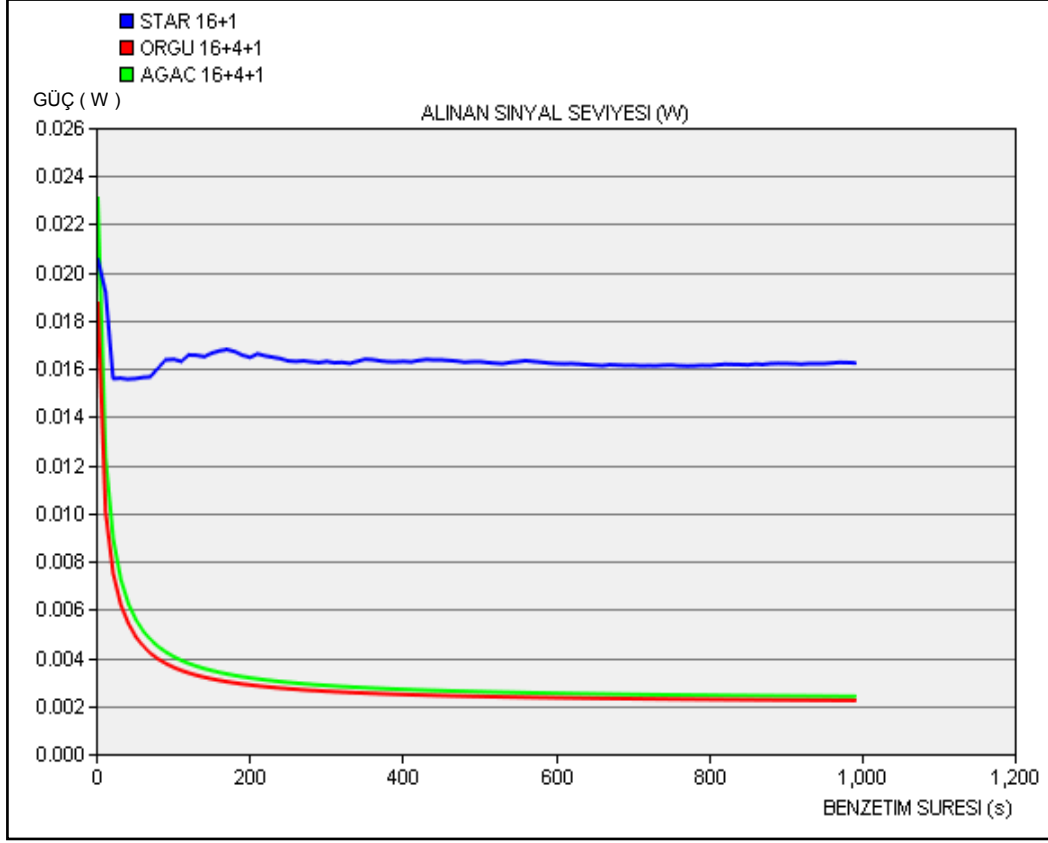
Senaryo-2 için diğer düğüm istatistiği olan İGO grafiği şekil 2.19'de görülmektedir.



Şekil 2.19. Senaryo-2 koordinatör düğüm İGO grafiği

İGO değerleri incelendiğinde örgü ve ağaç topoloji değerlerinin birbirine yakın ve 70 - 80 dB aralığında olduğu, yıldız yapıda ise bu değerlerin 115 dB seviyelerine çıktığı görülmektedir. Şekil 2.19 dan, örgü ve ağaç topolojilerdeki gürültü yoğunluğunun daha çok olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Diğer bir düğüm istatistiği olarak sinyal seviyeleri grafiği, şekil 2.20'de görülmektedir.



Şekil 2.20. Senaryo-2 koordinatör düğüm sinyal seviyeleri grafiği

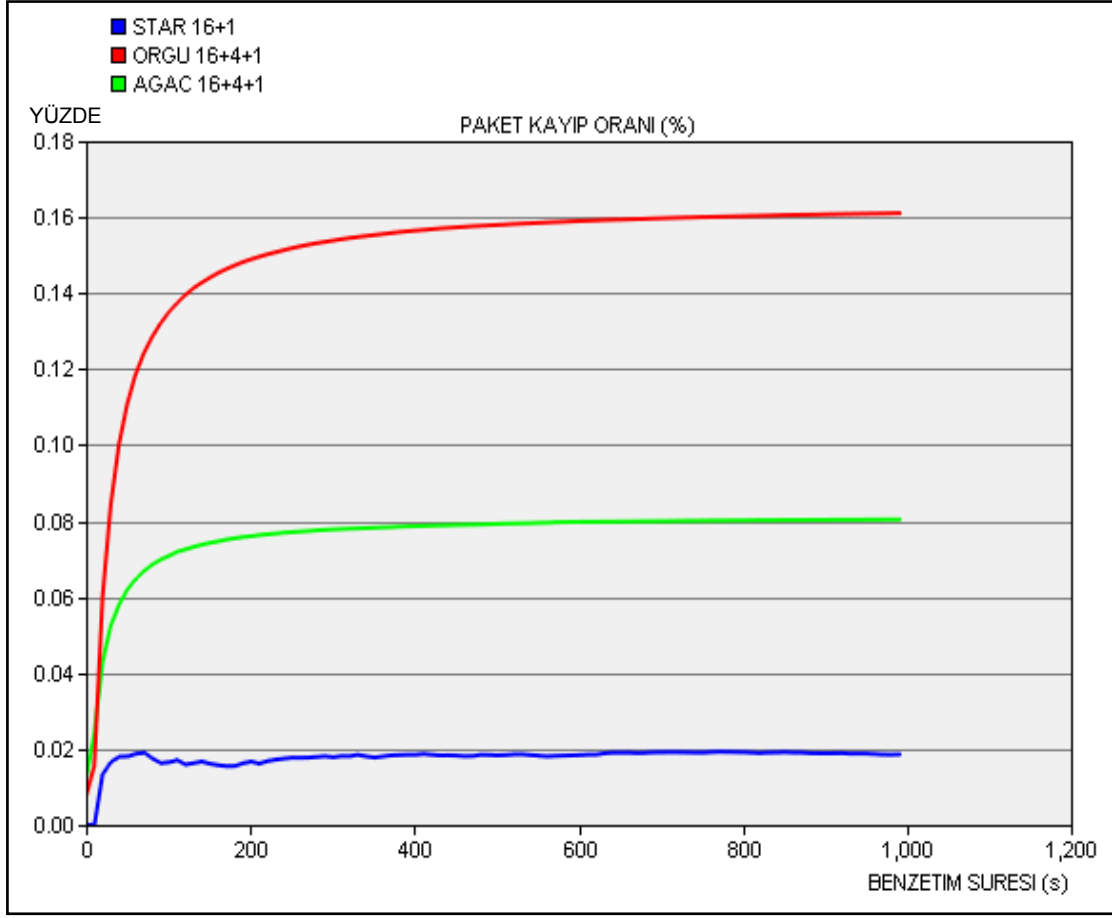
Koordinatör düğüm üzerindeki alıcı katında elde edilen sinyal seviyelerini şekil 2.20’de incelediğimizde, yıldız topolojideki sinyal gücünün 16 mW seviyelerinde, örgü ve ağaç kurgularda ise 2 mW seviyelerinde olduğu görülmektedir. Örgü ve ağaç kurgulardaki başarımlarının hayli yüksek olduğu incelenirse, bu iki kurguda elde edilen sinyal seviyelerinin de normal sonuçlar olduğu görülmektedir.

Üretilen trafik yoğunluğuna göre örgü ve ağaç topolojilerde elde edilen bu sinyal seviyelerinde iletişim gerçekleşmesi, yıldız topolojiden daha başarılı sonuçlar doğurmaktadır.

Son düğüm istatistiği Paket kayıp oranları grafiği olarak şekil 2.21’de verilmiştir.

Şekil 2.21’e göre paket kayıp oranları istatistiği incelendiğinde, en düşük ortalama yıldız topolojide görülmektedir. Yıldız ağda %2 seviyelerindeki değer, ağaç yapıda %8 seviyesinde iken örgü topolojik kurguda ise %16 seviyesinde görülmektedir.





Şekil 2.21. Senaryo-2 koordinatör düğüm paket kayıp oranları grafiği

Derinlik faktörünün bir başka olumsuz etkisinin de paket kayıp oranlarında ortaya çıktığı bu grafikte gözlemlenmektedir. Buna karşın aynı sayıdaki yönlendirici ile daha etkin sonuçlar ortaya koyan ağaç yapının başarısı da bu grafikte diğer dikkat çeken noktadır.

Tablo 13 üzerinde koordinatör düğüm istatistiklerinin genel bir analizi çıkarılmıştır.

Tablo 13. Koordinatör düğüm istatistik ve analizleri

İstatistik adı	Yıldız	Örgü	Ağaç
BHO (bit hata oranı) (%)	4.5	0.3	0.2
İGO (sinyal gürültü oranı) (dB)	115	72	77
Alınan sinyal seviyesi (mW)	16	3	3
Paket kayıp oranı (%)	2	16	8

### 2.3.4. Senaryo-2 Genel Değerlendirmesi

Yapılan tüm çalışmaların değerlendirilmesi olarak, gerek genel ağ istatistikleri bazında, gerekse de koordinatör düğüm istatistikleri bazında örgü topolojik yapının ağ başarısı diğer iki kurguya göre daha iyi sonuçlar çıkarmıştır. Ağaç yapının da yakın değerlerle örgü yapıya iyi bir alternatif bağlantı türü olabileceği gözlemlenmiştir. Hatta bazı uygulama türleri için örgü yapıdan daha verimli sonuçlar ortaya çıkaracağı da gerçektir.

Bu çalışma neticesinde, senaryo-1'deki yıldız bağlantıdaki ideal düğüm sayısının 16+1 olduğu kurgudaki sonuçlarının, senaryo-2'deki örgü ve ağaç bağlantılardaki sonuçlarına göre yadsınamayacak derecede geri kaldığı ortaya konmuştur.

Genellikle kolay kurulumundan dolayı yıldız topolojinin ilk akla gelen bağlantı türü olmaması gerektiği ortaya çıkmıştır. Örgü ve ağaç yapıların yönlendirme parametreleri, yıldız bağlantının çıkardığı sonuçların hayli önünde sonuçlar doğurmuştur. Kablosuz algılayıcı ağlardaki en etkin verimsizlik ögesi olan çekişme kavramı, ağaç ve örgü yapılarda daha aza indirildiğinden, başarımlarında daha iyi sonuçlar çıkmasına sebep olmuştur.

### 2.4. Senaryo-3

Daha önceki senaryo-1 ve senaryo-2 çalışmalarında elde edilen sonuçların bir adım daha ötesinde olmak üzere, düğüm yoğunluğu ve ağ çapı artırılmış 3.senaryo çalışmamızda, üzerinde durmayı hedeflediğimiz asıl konu, kablosuz algılayıcı ağlarındaki yönlendirme etkileridir.

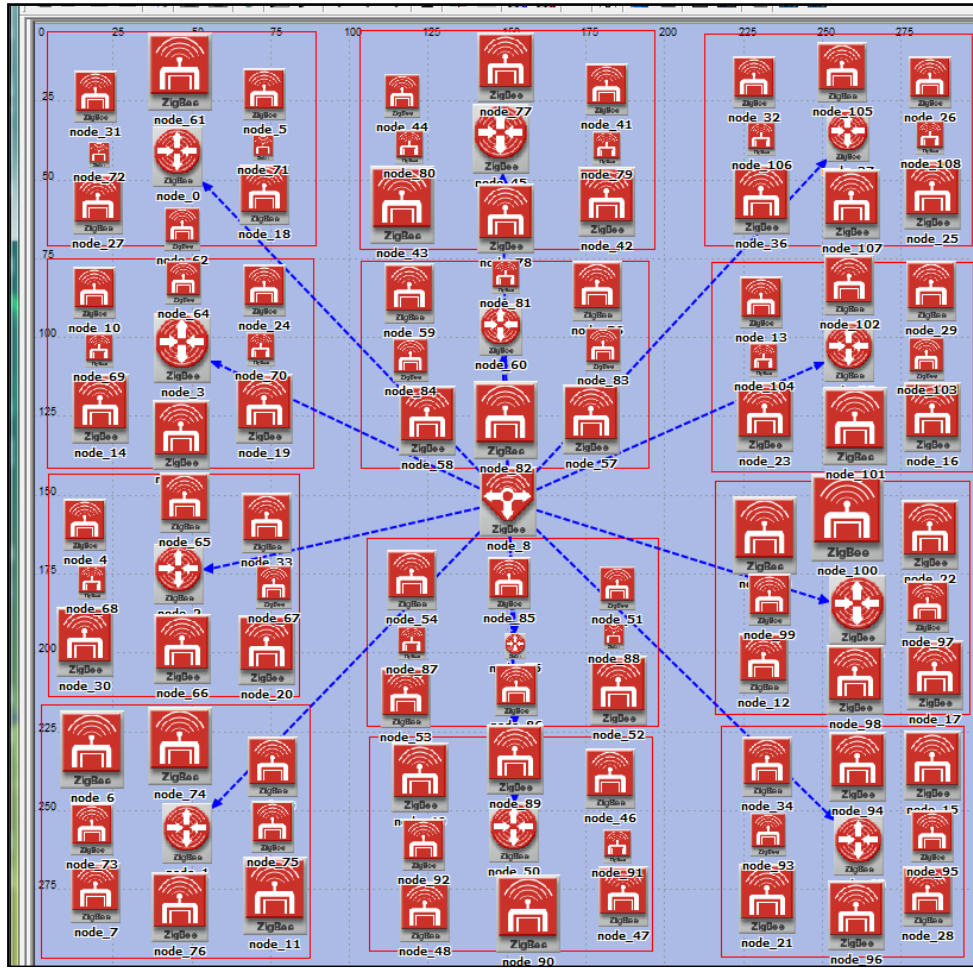
Senaryo-1 için ele aldığımız; yönlendirmesiz bir topoloji olan yıldız yapıdaki ağ kurgularındaki, düğüm sayılarının artışına bağlı olarak ağ başarımlarında, ikinci senaryoda ele aldığımız; topoloji bağımlılıklarının ağ başarımına etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmalar bizlere, düğüm sayılarına göre topolojik yerleşimlerin tercihi noktasında bir fikir sunması açısından faydalı olmuştur.

Çalışmamızın üçüncü senaryosu ile daha önce de bahsi geçen üç farklı yönlendirme tekniğinin incelenmesi hedeflenmiştir.

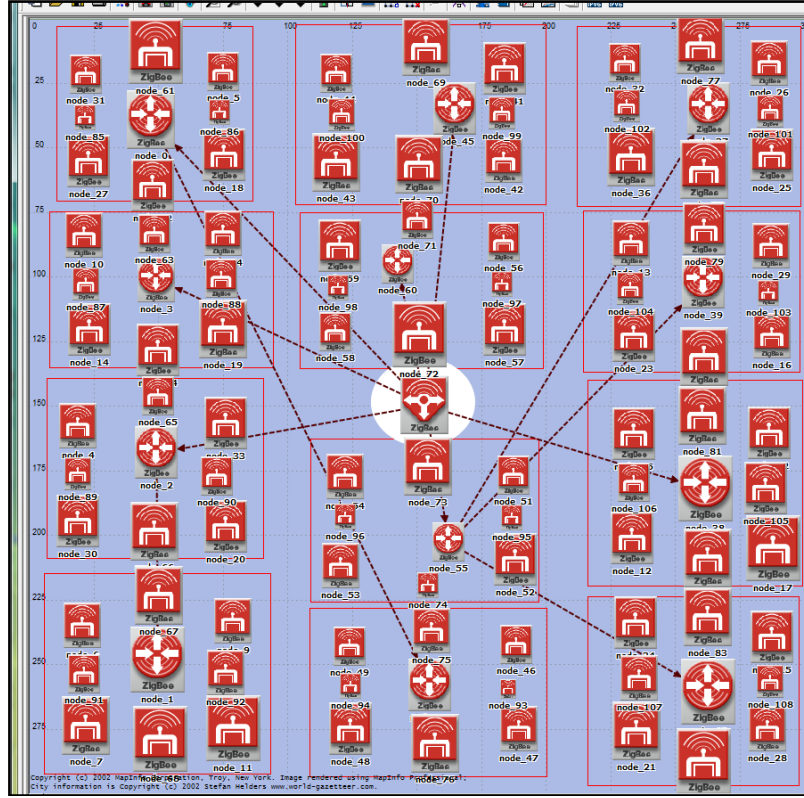
Yıldız, örgü ve ağaç yönlendirme tekniklerine göre üç ayrı kurguya bölünmüş bu senaryoda toplam düğüm sayıları dağılımı ise şöyledir: 96'şar adet ZSD, 12'şer adet ZYD ve 1'er adet ZKD.

Senaryonun 3 kurgusunda da, her bir ZYD ve sahip oldukları 8'er adet ZSD arasındaki yıldız topolojik bağlantı ile toplam 12 adet kümenin oluşması sağlanmıştır. Senaryonun alt kurgularının her birinde, ZYD'ler ve ZKD'ler arasındaki iletişim için yönlendirme teknikleri ayrı ayrı ele alınacaktır. Senaryonun ağ ebatları daha önceki senaryolardan farklı olarak 300 m x 300 m ölçülerinde birer kampüs ağı olarak düşünülmüştür.

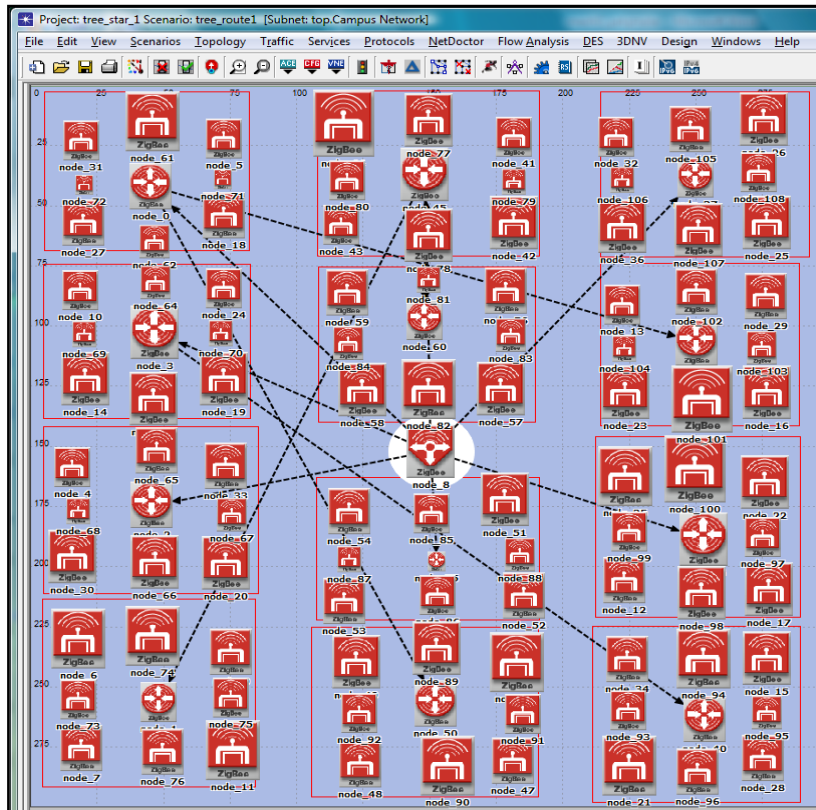
Bu senaryoda da benzetim parametreleri olarak, benzetim süresi 1000 saniye ve her 100 değerinde bir istatistik tutulacak şekilde ayarlama yapılmıştır.



Şekil 2.22. Senaryo-3 yıldız yönlendirmeli ağ kurgusu



Şekil 2.23. Senaryo-3 örgü yönlendirmeli ağ kurgusu



Şekil 2.24. Senaryo-3 ağaç yönlendirmeli ağ kurgusu

### 2.4.1. Senaryo-3 Ağ, İstatistik ve Benzetim Parametreleri

Senaryonun üç farklı kurgusu için belirlenen ortak düğüm parametreleri tablo 14’de, ağ parametreleri ise tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 14. Senaryo-3 ortak düğüm parametreleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Onay bekleme süresi (s)	0.05	Onay mekanizması	Evet
Yeniden iletim sayısı	5	İletim bandı (Ghz)	2.4
Kanal dinleme aralığı (s)	0.1	Gönderim gücü (W)	0.05
Veri çevrimi (kbps)	250	Hedef seçimi	Rastgele
Sinyal alım seviyesi( dBm)	-85	Paket boyutu (byte)	1024

Tablo 15’de çocuk düğüm sayısı ve yönlendirici sayısı parametreleri, koordinatör düğümlerin etki alanındaki tüm yönlendirici ve son düğümler arasındaki üst seviye bağlantılabilirlik sağlanabilmesi için çok sayıdaki denemeler sonucunda elde edilmiş ideal değerlerdir. Hedef düğüm seçim parametresinin rastgele olmasından dolayı bazı denemelerde bağlantısı zayıf veya hiç bağlantısız kalan düğümler ağ başarımlarında sağlıklı sonuçlar sunamamıştır. Hedef seçiminin ZKD ve ZYD’ler için rastgele olması, gerçek bir ağ benzetimine en yakın sonuçlar elde edilebilmesi içindir. ZSD’ler için ise bu değerler, buldukları kümenin başı olan ZYD isimleri olarak belirlenmiştir.

Tablo 15. Senaryo-3 ağ parametreleri

Parametreler	Yıldız yönlendirme kurgusu	Örgü yönlendirme kurgusu	Ağaç yönlendirme kurgusu
En fazla Çocuk düğüm	15	8	12
En fazla yönlendirici	14	8	8
En fazla derinlik	1	5	5
Örgü Yönlendirme	Disabled	Enabled	Disabled

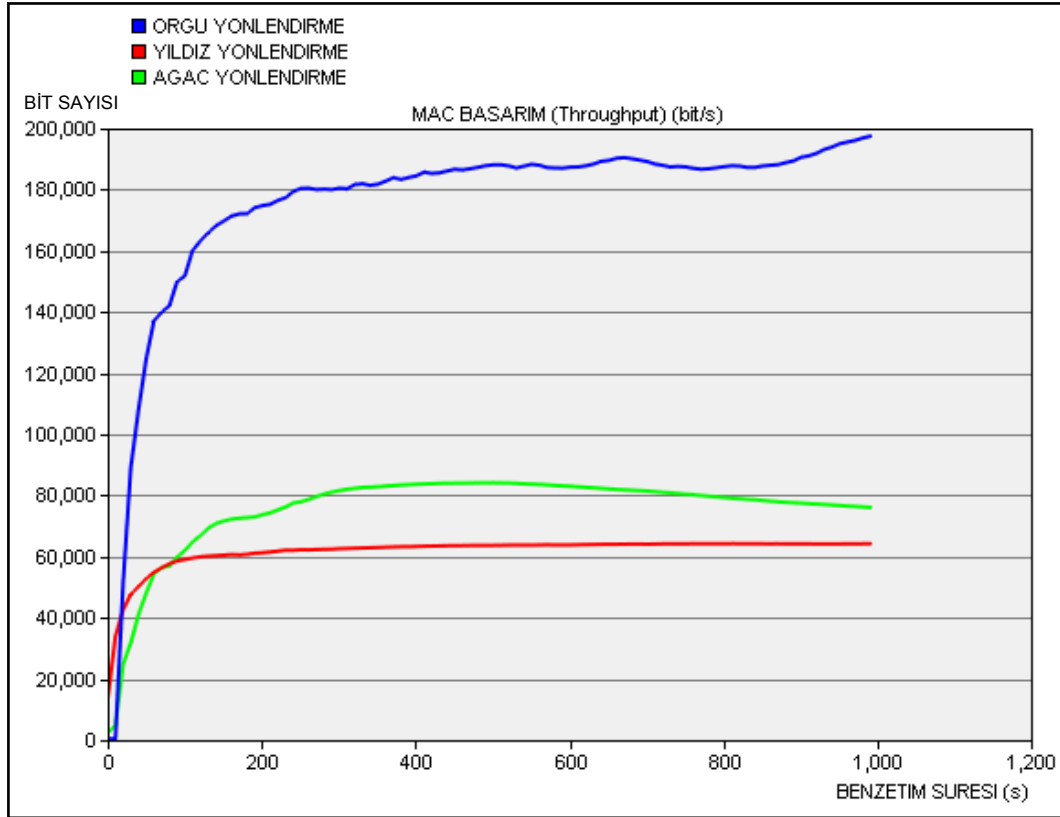
Tablo 16’da verilen istatistikler senaryo-3 için izlenerek karşılaştırmalı grafikler üzerinde sonuçlar değerlendirilecektir.

Tablo 16. Senaryo-3 izlenecek istatistikler

Genel ağ İstatistikleri	Koordinatör Düğüm istatistikleri
MAC başarımlar değerleri	Alınan sinyal seviyeleri
MAC katman gecikme süreleri	Paket kayıp oranları
Ağ katman sıçrama sayıları	MAC katman yük

### 2.4.2. Senaryo-3 Genel Ağ İstatistik ve Analizleri

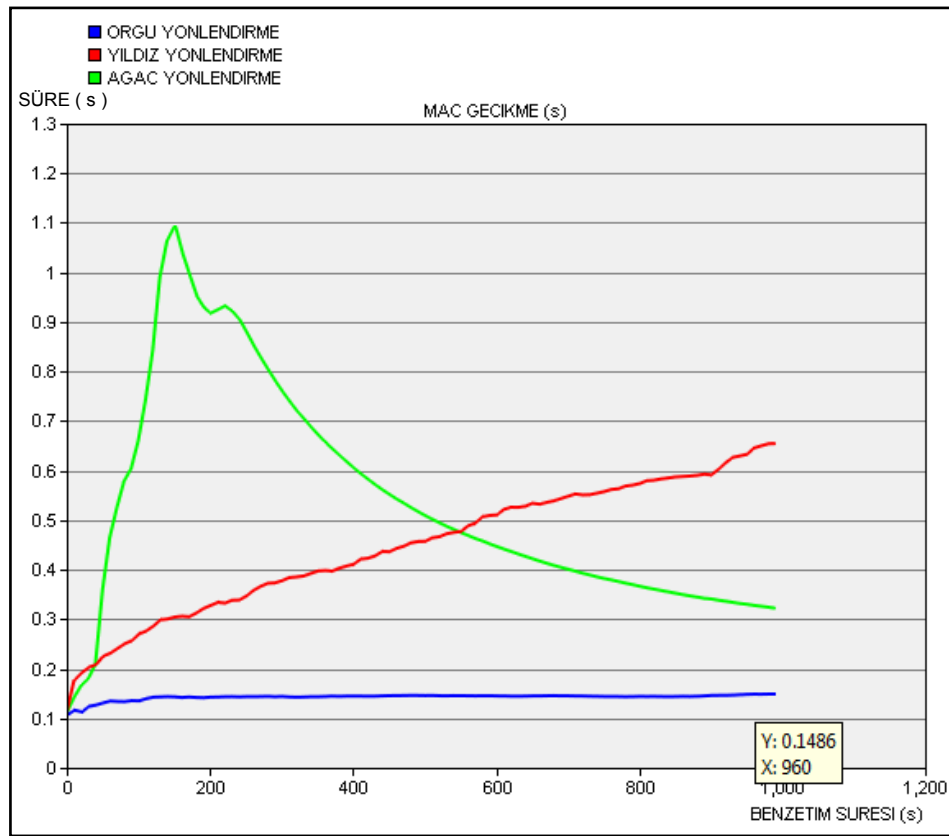
Senaryo-3 için koşulan bütün kurguları sonucunda elde edilen sonuçlardan ilk incelenecek olanı, genel ağ başarımlar değerleri grafiğidir.



Şekil 2.25. Senaryo-3 genel ağ başarımlar grafiği

Şekil 2.25 sonuçları incelendiğinde, senaryonun üç farklı yönlendirme tekniğine göre kurgulanmış alt ağları içinde, örgü yönlendirmeli kurgunun başarımının diğer kurgulardan yaklaşık olarak 2-3 kat daha fazla iyimser değer ürettiği gözlemlenmektedir. Yine ağaç yönlendirme tekniğine sahip kurgunun da yıldız yönlendirmeli kurguya göre, 20000 bit/s daha iyi sonuç ürettiği görülmektedir. En düşük başarımlı değeri ise beklenildiği gibi yıldız yönlendirme tekniğine sahip kurgu göstermiştir.

Şekil 2.26 üzerinde senaryo-3 için incelenecek olan ikinci genel ağ istatistiği olan MAC katman seviyesindeki gecikme grafiğidir.



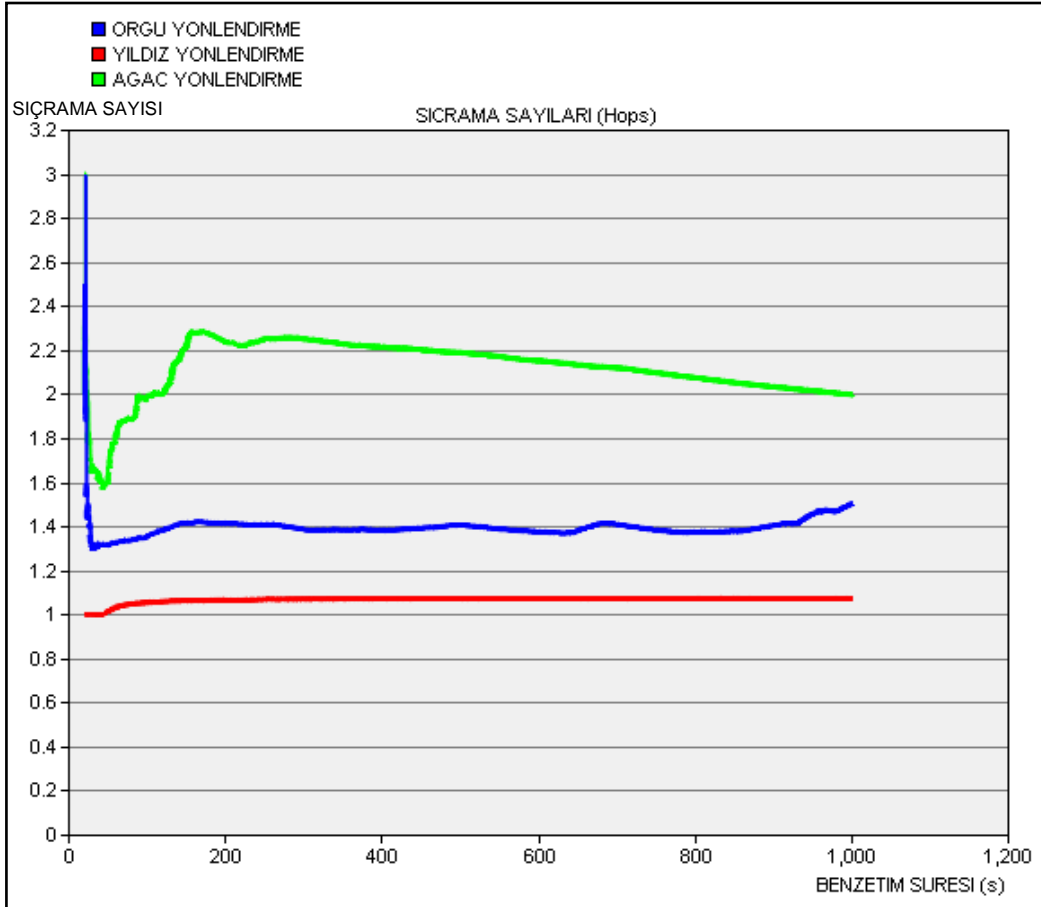
Şekil 2.26. Senaryo-3 genel ağ gecikme grafiği

Bu grafik sonuçları incelendiğinde yine örgü yönlendirme yapısındaki kurguya ait gecikme değerinin diğer iki kurguya oranla daha iyi sonuç ortaya koyduğu görülmektedir. Yaklaşık 120 ms seviyesindeki bu gecikme değeri, ağaç yönlendirmeli kurgu gecikmesinde elde edilen en iyi 350 ms seviyelerindeki gecikmeye göre yaklaşık 3 kat daha iyi sonuç ortaya koymuştur.

Yıldız yönlendirmeli kurgudaki gecikme süresi ise benzetimin her geçen süresinde daha olumsuz gecikme sürelerine doğru tırmanma eğilimindedir. Senaryo-3'e göre ortalama 500 ms seviyelerindeki gecikme değeri örgü ve ağaç yönlendirmeli kurgulardan çok daha kötümser sonuçlar sergilemiştir. Ağaç yönlendirmeli kurgunun verdiği kararsız düşüş, benzetim süresinin uzamasına göre bu grafik için 300 ms seviyesine oturmakla sonuçlanabilecek bir eğilimdedir.

Benzetimin ilk 200 saniyelik süresince ağaç yönlendirme tablolarının belirli bir kararlılıkta oluşturulmasına kadar 1 saniyelik yüksek gecikmeler sergilense de, ilerleyen benzetim süresince gecikme süreleri 300 ms seviyelerine yaklaşarak iyileşme göstermiştir. Örgü yönlendirmeli kurgudaki kararlı gecikme seyri ise bu grafikteki en dikkat çekici eğridir.

Bir sonraki genel ağ istatistik değerlendirmesi için şekil 2.27'de, sıçrama sayıları grafiği verilmiştir.



Şekil 2.27. Senaryo-3 genel ağ sıçrama sayıları grafiği



Bu grafiğe göre örgü yönlendirmeli kurgu için sıçrama sayıları ortalama 1.4 değerine sahipken ağaç yönlendirmeli kurgu için sıçrama değerinin ortalama 2 seviyelerinde olduğu gözükmektedir. Yıldız yönlendirme kurgusunda ise bu değer ortalama 1 değerindedir. Örgü yönlendirmeli yapıdaki sıçrama sayısının dinamik olarak değişen yönlendirme tablosu akışkanlığı ile doğru orantılı olduğu bu grafikten gözlemlenebilmektedir. Ağaç yönlendirmeli yapıya ait statik yönlendirme tabloları ise düğüm bağımlılıklarını sabit tutmamaya sebep olduğu için daha yüksek bir ortalama sonuç çıkmasını sağlamıştır. Düğüm sayılarının çokluğu ve ağ çapının genişliği göz önünde bulundurulduğunda örgü ve ağaç yönlendirmeli kurguların sıçrama sayılarının çok ideal sonuçlar ürettiği görülmektedir. Derinlik parametresinin sınırları pek zorlanmadan, bağlantılabilirliğin üst seviyede gerçekleştiği bir senaryo olduğu bu grafikte daha iyi gözlemlenmektedir.

### 2.4.3. Senaryo-3 Koordinatör Düğüm İstatistik ve Analizleri

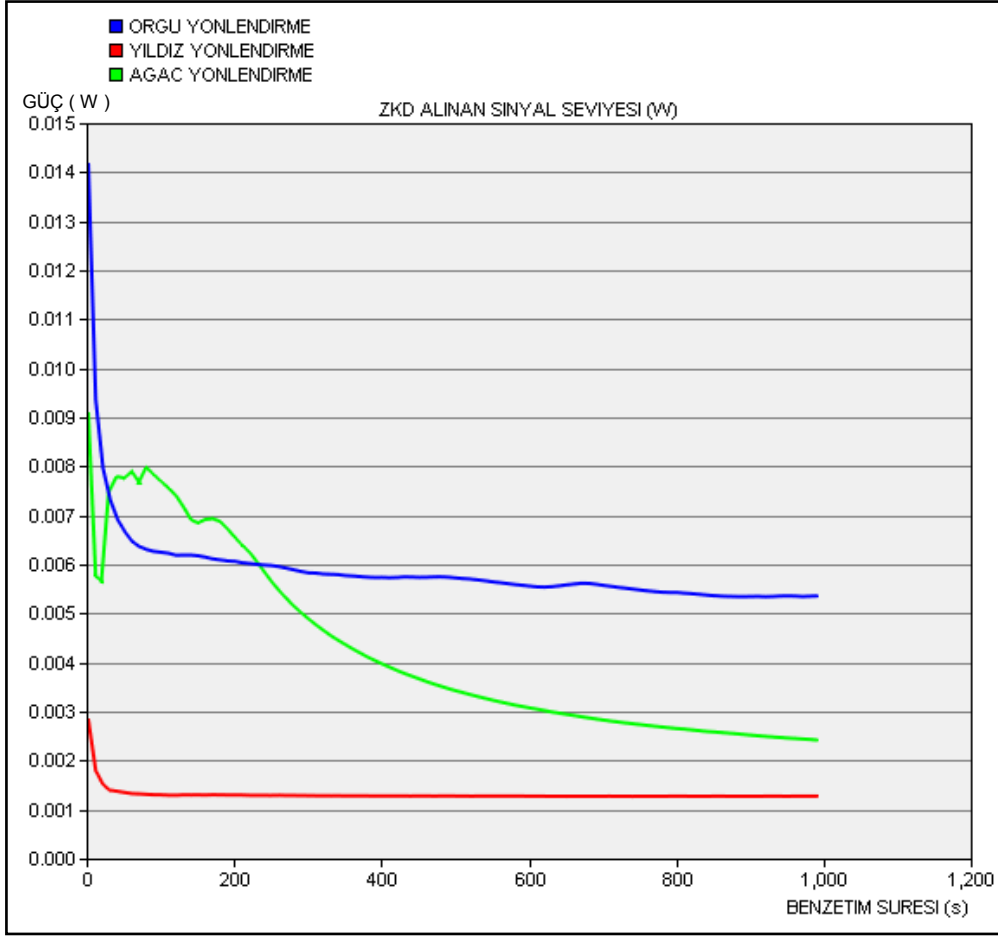
Diğer senaryoların aksine bu senaryoda üç adet düğüm istatistiğinin incelenmesi ağ başarımlı değerlendirme açısından yeterli görülmüştür. Diğer senaryolarda yer verilen BHO ve İGO grafiklerine bu senaryonun ZKD istatistiklerinde yer verilmemiştir.

ZKD'ler için senaryo-3 ün incelenecek ilk istatistiği şekil 2.28'de verilen, alınan sinyal seviyeleri grafiğidir.

Bu grafik sonuçlarına bakıldığında, ZKD'ler bazında alınan en yüksek güç seviyesine sahip kurgunun yine genel ağ istatistiklerini doğrulayan paralelde örgü yönlendirmeli kurguda elde edildiği görülmektedir. Yaklaşık olarak radyo alıcı katındaki sinyal kalitesi bakımından ağaç ve yıldız yönlendirmeli kurgulara göre daha iyi sonuçlar üretilmiştir.

Örgü yönlendirmeli kurguda ZKD radyo alıcı katında ortalama 5 mW seviyesinde sinyal gücü elde edilmiştir. Ağaç yönlendirmeli kurguda ise alınan sinyal seviyesi ortalama 3 mW seviyelerinde gözlemlenmektedir. Yıldız yönlendirmeli kurguda ise ortalama 1.5 mW değerlerinde sonuçlar elde edilmiştir.

Ortalama 50 dB örgü ve ağaç ile 60 dB yıldız yönlendirmeli kurgularda çıkan İGO sonuçlarına göre gürültü seviyesinin yıldız yönlendirmeli kurguda daha çok olduğu görülmektedir. Buradaki sinyal seviyelerindeki farklılık değişen gürültü oranları ile açıklanabilir. Bu değişkenliği ortaya çıkaran faktörler ise çekişme sayılarının artışı, yönlendirme tekniklerinin farklılıkları, ZKD anlık yük yükselmesi olarak sıralanabilir.

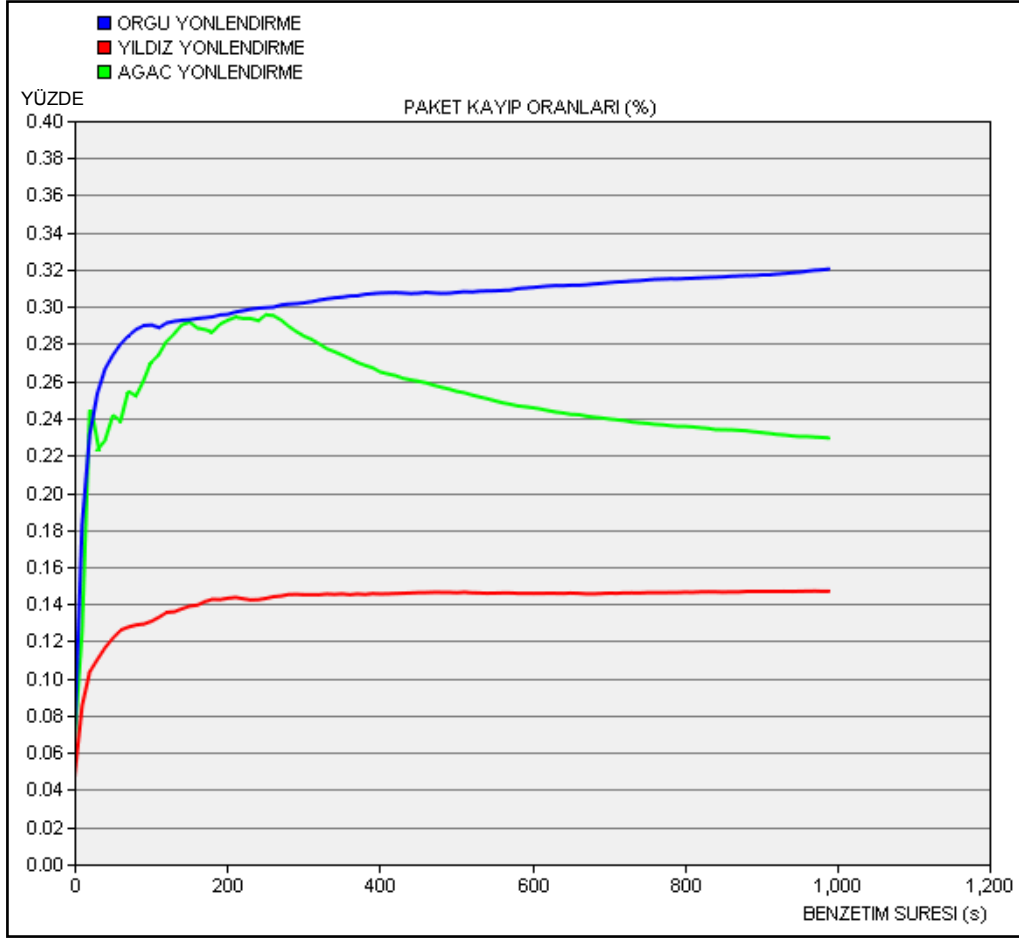


Şekil 2.28. Senaryo-3 ZKD sinyal seviyeleri grafiği

Bir sonraki ZKD istatistiği olarak ele alınacak bulgu paket kayıp oranları grafiği şekil 2.29'da verilmiştir.

Bu grafik bulguları incelendiğinde, ZKD radyo alıcı katındaki kayıp paket oranları açısından yıldız yönlendirmeli kurgu ortalama %15'lik bir değer üretmiştir. Ağaç yönlendirmeli kurguda bu oran %25 seviyelerinde iken örgü yönlendirmeli kurguda ise %30 seviyesini aşmıştır.

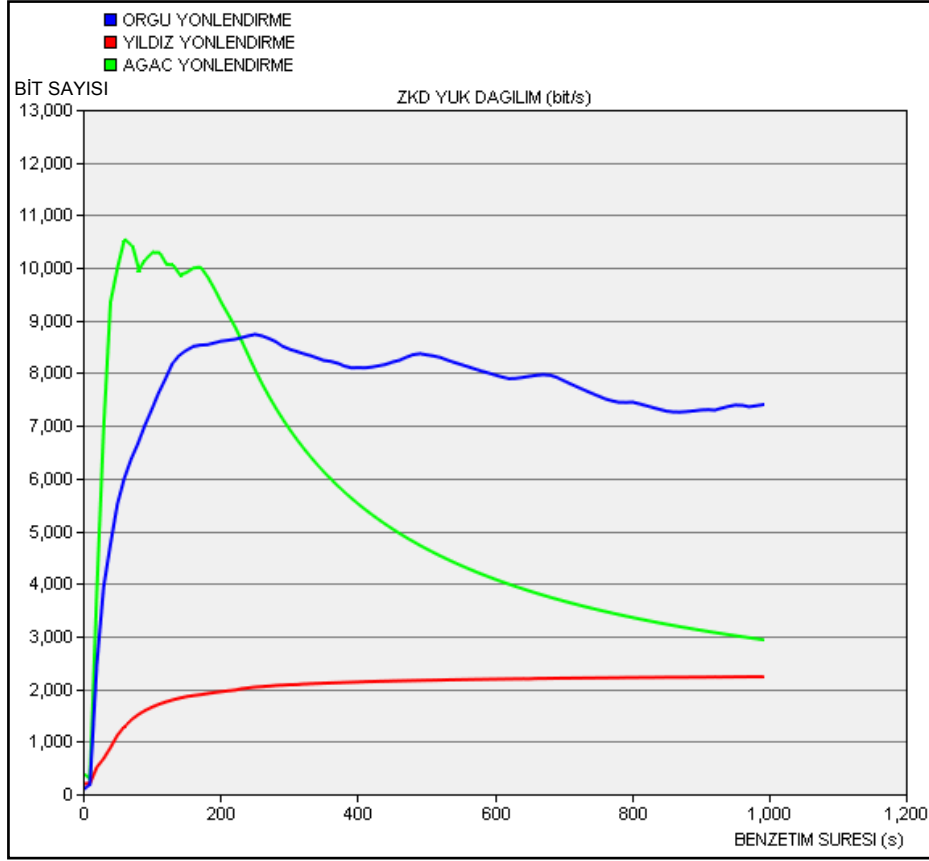
Senaryonun bu istatistik sonucuna göre ZKD üzerindeki paket kayıp oranları açısından örgü topolojinin veri bütünlüğü açısından daha kötü sonuçlar sergilediği görülmektedir. Bu grafik örgü yönlendirmeli kurguda ZKD üzerindeki her 3 paketten birinin kayıpla sonuçlandığını ortaya koymaktadır. Bu değer ağaç yönlendirmeli kurguda 4 pakette 1 kayıp gösterirken, yıldız yönlendirmeli kurguda ise yaklaşık 7 pakette 1 kayıp göstermektedir.



Şekil 2.29. Senaryo-3 ZKD paket kayıp oranları grafiği

ZKD'ler bazında incelenecek son istatistik bulguları olan MAC katman yük dağılım grafiği şekil 2.30'da verilmiştir.

Bu grafik bulgularına göre ZKD'ler üzerindeki yükün en fazla olduğu kurgu örgü yönlendirmeli kurguda ortaya çıkmıştır. Ağaç yönlendirmeli kurguda ise yük dengesi benzetimin ilerleyen süresince azalma göstermiştir. Yıldız yönlendirmeli kurguda ise yük dengesi benzetim boyunca yaklaşık aynı değerde seyretmiştir. Bunun en önemli sebebi, yıldız yönlendirmede belirli bir yönlendirme bağımlılığının olmayışındandır. Ağaç ve örgü yapılar da ise yönlendirme tablolarının getirdiği bağımlılıklar yük dengesinin ZKD üzerinde değişkenlik göstermesine yol açmıştır. Bu yük dağılımlarına göre bir önceki paket kayıp oranlarındaki bulguları onaylayan sonuçlar elde edilmiştir. Örgü yönlendirmeli kurgudaki sıçrama sayılarının düşük olması da ilgili kurgunun yük dengesinin yüksek seyrinde etkili olmuştur.



Şekil 2.30. Senaryo-3 ZKD yük dağılım grafiği

#### 2.4.4. Senaryo-3 Genel Değerlendirmesi

Senaryo-3 için koşulan tüm benzetimler sonucunda elde edilen genel ağ ve ZKD bazındaki bulgular değerlendirildiğinde, örgü ve ağaç yönlendirmeli ağ kurgularının yıldız yönlendirmeli kurgulardan daha iyi sonuçlar ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Özellikle genel ağ istatistikleri açısından örgü yönlendirmeli ağ kurgusunun en başarılı olan yönlendirme tekniği olduğu görülmüştür. Bunun yanında ZKD bazındaki değerlendirmelere bakıldığında ise ağaç yönlendirmeli yapının daha iyimser sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür. Örgü yönlendirmeli ağ yapısının da ağaç yönlendirme yapısına yakın ama daha kötü sonuçlar ortaya çıkarması, ZKD'ler açısından ağaç yapıyı daha verimli göstermektedir. Ancak ağın tüm başarımlarına bakıldığında ise örgü yönlendirmeli ağ yapısının ortalama olarak ağaç ve yıldız yapılardan daha başarılı sonuçlar ortaya çıkardığı izlenmiştir.

Yıldız yönlendirmeli ağ yapısının özellikle genişleyen ağ çapları ve artan düğüm sayılarına verimli katkılar yapmadıkları senaryo-3 üzerinde daha iyi gözlemlenmiştir.

Bunun yanında bit bazında çok iyi başarımlar çıkaran örgü yönlendirmeli ağ kurgusunun da paket bazında aynı başarımları sergileyemediği görülmüştür. Ağaç yönlendirmeli yapı için hem genel hem de ZKD bazındaki ortaya çıkan sonuçlar birbirleri ile örtüşen nitelikte gözlenmiştir.

Tablo 17 üzerinde senaryo-3 genel ağ istatistiklerinin, tablo 18 üzerinde de senaryo-3'ün ZKD bazındaki istatistik bulgularının analizleri çıkarılmıştır.

Tablo 17. Senaryo-3 genel ağ istatistikleri analizi

İstatistikler	Yıldız yönlendirmeli kurgu sonuçları	Ağaç yönlendirmeli kurgu sonuçları	Örgü yönlendirmeli kurgu sonuçları
Başarım (bit/s)	60000	80000	180000
Gecikme (s)	0.5	0.3	0.12
Sıçrama sayısı	1.1	2.1	1.4

Tablo 18. Senaryo-3 ZKD istatistikleri analizi

İstatistikler	Yıldız yönlendirmeli kurgu sonuçları	Ağaç yönlendirmeli kurgu sonuçları	Örgü yönlendirmeli kurgu sonuçları
Alınan sinyal gücü (mW)	15	35	55
Paket kayıp oranı (%)	15	25	30
Yük dağılımı (bit/s)	2000	5000	8000

### 3. SONUÇLAR

Bu tezde, topolojik etkiler göz önünde bulundurularak, üç senaryo başlığı altında, Zigbee temelli algılayıcı ağların OPNET benzetim yazılımı ile benzetimleri yapılmıştır.

Bu senaryolardan ilkinde yıldız topolojik bir ağın çoklu düğüm sayılarından oluşan farklı ağ kurgularının benzetimleri yapılmış, ağ başarımı açısından en verimli istatistiklerin hangi düğüm sayılarındaki yıldız topolojik kurguda gerçekleşeceği incelenmiştir. Benzetim sonunda görülmüştür ki, 100 m x 100 m ebatlarındaki bir yıldız ağda 16 civarı düğüme sahip kurgu beklenen en iyi sonuçları çıkarmıştır. İkinci senaryoda ise birinci senaryonun en ideal düğüm sayısı olarak belirlenen 16 adet ZSD'nin kullanıldığı örgü, ağaç ve yıldız topolojiler arasındaki başarımlar istatistikleri karşılaştırılmıştır. Her üç kurguda koşulan benzetimler sonucunda, örgü topolojinin, 16 düğüm üzerindeki 100 m x 100 m ebatlı bir ağda daha iyi istatistikler ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Üçüncü senaryoda ise son düğümler bazında yıldız bir ağın, yönlendiriciler bazındaki 3 farklı topolojiye göre kurgulanmış benzetimi yapılmıştır. Böylece 3 farklı yönlendirme tekniği kullanılarak, ağın ebatları genişletilmiş, düğüm sayıları artırılmış ve yönlendirici destekleri ile kurgulanmış bir senaryo üzerinden başarımlar testleri yapılmıştır. Özellikle 3 farklı yönlendirme tekniğine göre bu senaryonun en iyi istatistikleri örgü ve ağaç yönlendirme tekniklerinde gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bir algılayıcı ağının ağ ebatları seçilirken en ideal düğüm sayılarının ve ideal ağ topolojisi seçiminin ağın verimliliği açısından önemi ortaya çıkarılmıştır. Özellikle enerji tüketiminin ve ağın yaşam süresinin doğrudan ilgili olduğu ağ başarımı için bu gereklilik ispatlanmıştır. Yine bu çalışma, kullanılacak yönlendirici sayıları ve yönlendirme tekniği tercihlerinin, algılayıcı ağlarının planlamasındaki önemini bir kez daha göstermiştir. Belirli bir düğüm ortalamasına göre yönlendirici sayısı belirleme ve en uygun tekniği kullanarak ağ kurmanın, algılayıcı ağlardaki yaşam süresi en iyileştirmesi çalışmalarında kaçınılmaz planlama parametreleri olduğu böylece ispatlanmıştır.

#### 4. ÖNERİLER

Bu tezde incelenen her üç senaryonu ağ başarım istatistikleri sonrasında, Zigbee temelli bir algılayıcı ağının planlanması aşamalarına dönük öneriler ortaya çıkarılmıştır. Bunlardan ilki, ağ boyutu seçimi ve maliyete bağlı olarak, yıldız topoloji tercih edilecekse düğüm sayısının ideal seviyelerde seçilmesi önerisidir. Bu çalışmaya göre, 100 metrekare boyutundaki bir kampüs ağında, 16 ile 32 düğüm arasının, yıldız topolojik kurgular için ideal sayılar olduğu söylenebilir. Diğer bir öneri, topoloji seçimi konusundadır. Maliyet sınırları zorlanarak en ideal performansın oluşmasında, örgü topolojinin 100 metrekare boyutundaki ağlar için verimli olduğu bu çalışmada görülmüştür. Bir başka planlama parametresi olarak yönlendirici sayısının ortalama değerlerde seçilmesi gerekliliğidir. Burada unutulmaması gereken, yönlendirme tekniği ve topoloji seçiminin en öncelikli planlama parametreleri olduğudur. Örgü veya ağaç topolojilerden birinin, özellikle geniş çaplı ağ kurgularında tercih edilmesi uygun olacaktır. Düğüm sayıları da dikkate alınarak koordinatöre doğru yönlendirici sayılarının azaltılarak ağ yükünün ve başarımının iyileştirilmesi sağlanmalıdır. Bu çalışmaya göre 300 metrekare ebatındaki bir ağ için 8-12 düğüme bir yönlendirici ataması, ortalama bir verimlilik için yeterli gözükmektedir.

Bu çalışmadaki değerlendirmeler, algılayıcı ağlarının planlanmasına dönük çalışmalarda yararlı olacaktır. Özellikle geniş çaplı algılayıcı ağlar için, tıkanıklık ve yönlendirme kalitesi çalışmalarına iyi bir referans teşkil edecektir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Somay, A., Bir Kablosuz Ölçüm Sisteminin IEEE 802.15.4 (ZigBee) Standardı Kullanılarak Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
2. Karasulu, B., Toker, L. ve Korukoglu, S., ZigBee – IEEE 802.15.4 Standartı Temelli Kablosuz Algılayıcı Ağları, Inet-tr Aralık 2009, İstanbul.
3. Hadim, S. ve Nader, M., Middleware Challenges and Approaches for Wireless Sensor Networks, *IEEE Computer Society*, 7, 3 (2006).
4. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., Wireless Sensor Networks-A Survey, *Elsevier Computer Networks*, 38 (2002) 393-422.
5. <http://standards.ieee.org/wireless/overview.html>, IEEE wireless standarts zone, 2014.
6. <http://www.zigbee.org>, ZigBee Alliance websitesi, 14 Haziran 2014.
7. Callaway, E., Gorday, P., Hester, L., Gutierrez, J. A., Naeve, M., Heile, B. ve Bahl, V., Home networking with IEEE 802.15.4 : A developing Standard for low-rate wireless Personal Area Networks, *Communication Magazine IEEE*, 40,8 (2002).
8. Kahveci, S., Türk, K. ve Kaya, İ., IEEE 802.15.4 Zigbee Standardının 2.4 GHZ ISM Bandında Kapasite Analizi, URSI (Union Radio Science Internationale) Türkiye Ulusal Komitesi, URSI-TÜRKİYE'2004 Bilimsel Kongresi, 8-10 Eylül 2004, Bilkent Üniversitesi-Ankara, 170-172.
9. Benkic, K., Planinsic, P. ve Cucej, Z., Custom Wireless Sensor Network based on ZigBee, 49th International Symposium ELMAR-2007, Eylül 2007, Zadar, Croatia, 259-262.
10. Kim, T., Kim, D. Park, N., Yoo, S. ve Lopez, T.S., Shortcut Tree Routing in ZigBee Networks, Wireless Pervasive Computing - ISWPC 2007, 2nd International Symposium, 2007, 42-27.
11. IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for LowRate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003.
12. Coates, M. ve Rabat, M., Sensor Networks Part 2: ZigBee and IEEE 802.15.4, <http://www.ece.mcgill.ca/~coates/publications/shortcourse-part2.pdf>, 3 Ekim 2008.
13. Gutierrez, J. A., IEEE Std. 802.15.4. Enabling Pervasive Wireless Sensor Networks, Eaton Corp., Graduate Seminar on Sensor Actuator Networks - Tutorial Slides on



- Berkeley Uni. (Eğitim sunumu), [www.eecs.berkeley.edu/~prabal/teaching/cs294-11-f05/slides/day21.pdf](http://www.eecs.berkeley.edu/~prabal/teaching/cs294-11-f05/slides/day21.pdf), 7 Aralık 2005.
14. Kinney, P., ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, Technical-White Paper, Kinney Consulting LLC, Chair of IEEE 802.15.4 Task Group, Secretary of ZigBee BoD, Chair of ZigBee Building Automation Profile WG, 2003.
  15. Safaric, S. ve Malaric, K., ZigBee wireless standard, 48th International Symposium ELMAR-2006, Zadar, Croatia, Haziran 2006, 259-262.
  16. Zheng, L., ZigBee Wireless Sensor Network in Industrial Applications, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Ekim 2006, 1067-1070.
  17. Dazhi, C. ve Pramod, K.V., QoS Support in Wireless Sensor Networks:A Survey, International Conference on Wireless Networks, Las Vegas, Nevada, USA, 2004, 227-233.
  18. CISCO Systems, Cisco AVVID Network Infrastructure Enterprise Quality of Service Design Solutions Reference Network Design, Ağustos 2002.
  19. Baccour, N., Koubaa, A., Ben Jamaa, M., Youssef, H., Zuniga, M. ve Alves, M., A Comparative simulation study of link quality estimators in wireless sensor networks, MASCOTS '09 IEEE International Symposium, Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems, London, UK London, Great Britain, 2009 .
  20. Li, Y., Chen, J., Lin, R., ve Wang, Z., A reliable routing protocol design for wireless sensor networks, IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005.
  21. Tang, L., Wang, K.C., Huang, Y. ve Gu, F., Channel characterization and link quality assessment of ieee 802.15.4-compliant radio for factory environments, IEEE Trans. Industrial Informatics, 3,2 (2007) 99-110.
  22. Lal, D., Manjeshwar, A., Herrmann, F., Uysal-Biyikoglu, E., ve Keshavarzian, A., Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks, IEEE Global Telecommunications Conference, 2003, GLOBECOM'03 IEEE 1, 446-452.
  23. Çakıroğlu, M. ve Özcerit, A., Denial of Service Attack Resistant MAC Protocol Design for Wireless Sensor Networks, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ, 22,4 (2007) 697-707.
  24. Cerpa, A., Wong, J.L., Potkonjak, M., ve Estrin, D., Temporal properties of low power wireless links: modeling and implications on multi-hop routing, in MobiHoc '05: Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 2005, New York, USA ACM, 414-425.

25. Woo, A., ve Culler, D., Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks, EECS Department, University of California, Berkeley, Tech. Rep. UCB/CSD-03-1270, 2003.
26. Bayılmış, C., Modelleme ve simülasyon teorisi uygulamaları ders notları, Sakarya Üniv. Tek.Eğt.Fak. Elektronik/Bilgisayar Bölümü , 2009.
27. Fujimoto, R.M., Perumalla K.S. ve Riley, G.F., Network Simulation, Synthesis Lectures on Communication Network, Berkeley, USA, 1,1 (2007) 72.
28. Tubaishat, M. ve Madria, S., "Sensor networks: an overview," Potentials, IEEE , 22, 2 (2003) 20-23.
29. OPNET Technologies, OPNET Modeler 14.5 Documentation, , Release 14.5, 2010.
30. Dunaytsev, R., Network simulators: Overview and examples, Department of Communications Engineering Tampere University of Technology, 2010.
31. Anu Maria, Introduction to modeling and simulation, Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, 1997, 7-13.
32. Nourildean, S.W., A Study of ZigBee Network Topologies for Wireless Sensor Network with One Coordinator and Multiple Coordinators, Tikrit Journal of Engineering Sciences, , 19, 4 (2012) 65-81.
33. Mallanda, C., Suri, A. ve Kunchakarra, V., Simulating Wireless Sensor Networks with OMNeT++, IEEE computers, ACM, LSU Simulator, Ver 1, 2005.
34. Hammoodi, I.S., Stewart, B.G, Kocian, A. ve McMeekin, S.G., A Comprehensive Performance Study of OPNET Modeler For ZigBee Wireless Sensor Networks, Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2009, 357 – 362.
35. Marghescu, C., Pantazica, M., Brodeala, A., ve Svasta, P., Simulation of a Wireless Sensor Network Using OPNET, 2011 IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Oct 2011, Timisoara, Romania, 249–252.
36. Taehong, K., Daeyoung, K., Noseong, P., Seong-eun, Y. ve Tomas, S.L., Shortcut Tree Routing in ZigBee Networks, 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 2007, 42– 47.
37. Da Silva Severino, R.A.R., On the use of IEEE 802.15.4/ZigBee for Time-Sensitive Wireless Sensor Network Applications, Master Thesis submitted to Polytechnic Institute of Porto, School of Engineering, Porto, Ekim, 2008.
38. Yuejun, D., Shuqin Z., Zhiyong, D. ve Cui, Y., ZigBee based Energy Efficient Reliable Routing in Wireless Sensor Network: Study and Application, IEEE 2011, 464 – 467.

39. Sharma, D., Effective Data Flow In ZigBee Network Using OPNET, International Conference on Communication and Signal Processing, Nisan 2014, India.
40. Grover, A., Arora A., ve Grover, N., The Effect of Channel Sensing Duration: Performance Comparison of Various Topologies, First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation, 2013.
41. Ameen, S.Y. ve Nourildean, S.W., Coordinator and Router Investigation in IEEE 802.15.14 ZigBee Wireless Sensor Network, The First International Conference of Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering ICECCPCET13/17-18 Aralık 2013.
42. Sharma, D., Verma, S. ve Sharma, K., Network Topologies in Wireless Sensor Networks: A Review , IJECT, 4,3 (2013).

## ÖZGEÇMİŞ

Yasin KOÇ, 1978 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla, Trabzon 24 Şubat ilkokulu, Trabzon Cumhuriyet Ortaokulu ve Trabzon Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimini, 1996 yılında girdiği Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Bilgisayar Sistemleri Öğretmenliği Bölümü'nde, 2000 yılında tamamladı. Mezuniyetinin ardından 2 yıl, İstanbul'da özel bir holding bünyesinde eğitimci olarak çalıştı. Bu süre zarfında mesleki alanda bir çok seminer ve eğitime katıldı. 2002 yılında atandığı Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı, Akçaabat Çok Programlı Anadolu Lisesi Bilişim Teknolojileri Alanı'nda halen öğretmen olarak görev yapmaktadır. Askerlik hizmetini de 2003 yılında Bosna-Hersek Türk Taburu'nda tamamladı. Evli ve 2 çocuk babası olan Yasin KOÇ, İngilizce ve Farsça bilmektedir.