KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

GEZGİN ALGILAYICI AĞLAR İÇİN KATMANLARARASI ETKİLEŞİMLİ YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ

SÜLEYMAN ÇAKICI

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

GEZGİN ALGILAYICI AĞLAR İÇİN KATMANLARARASI ETKİLEŞİMLİ YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ

SÜLEYMAN ÇAKICI

Prof. Dr. İsmail ERTÜRK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç. Dr. Ali TANGEL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç. Dr. Celal ÇEKEN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....

Doç. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....

Yrd. Doç. Dr. Sedat ATMACA
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.07.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllardaki kablosuz haberleşme ve mikro elektromekanik sistem (MEMS) teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde algılama, işleme ve kablosuz haberleşme işlevlerini küçük bir paket içinde yerine getirebilen kablosuz algılayıcı düğümler üretilebilmektedir. Algılayıcı düğümler bir coğrafi alan içerisinde uygun biçimde dağıtılarak Kablosuz Algılayıcı Ağ'ları (KAA'lar) oluşturmaktadır. Geleneksel KAA uygulamalarında düğümlerin hareketsiz oldukları varsayılmaktadır. Bu yaklaşım izlenen ortamın veya olayların dinamik olduğu durumlarda sistem başarımını düşürmektedir. Ağ başarımının iyileştirilmesi ve KAA'lara esnek kullanım özelliği kazandırılması amacıyla mevcut yapıya hareket kabiliyetine de sahip düğümler eklenerek Gezgin Algılayıcı Ağlar (GAA'lar) geliştirilmiştir.

KAA'larda başarımı belirleyen başlıca etkenler enerji tüketimi ve uçtan-uca paket gecikmeleridir. Mevcut problemlere ek olarak, düğümlerin bulundukları uzayda tasarsız biçimde yer değiştirdiği GAA'larda paket iletim güvenilirliğinin sağlanması da oldukça zor bir görevdir. Çözüm bekleyen sorunları yeni bir boyut kazandığından, GAA'lar için geleneksel çözümlerin yerine dinamik ağ koşullarına dayanıklı güncel tasarımların yapılması gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, GAA haberleşme başarımının iyileştirilmesi amacıyla beş OSI referans modeli katmanının etkileşimini kullanan yeni bir yönlendirme protokolü tasarlanmış bulunmaktadır.

Yüksek lisans ve doktora eğitimim süresince değerli birikimlerini benimle paylaşan, tezimin her aşamasında sorunlarımı dinleyerek çalışmalarıma yön veren ve yoğun akademik yaşamında kıymetli zamanını her türlü problemimi çözmeye ayıran tez danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. İsmail ERTÜRK'e; çalışmalarımda ve tezimin yazımında kıymetli bilgilerini ve zamanını paylaşan, değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Sedat ATMACA'ya; üniversite yıllarımdan bu yana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her ihtiyacım olduğunda yanımda bulduğum değerli dostlarım Alper KARAHAN ve Ergin ERYILMAZ'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan annem Kezban ÇAKICI ve babam Sadık ÇAKICI'ya; hayatıma dâhil olduğu andan itibaren maddi ve manevi desteğini üzerimden eksik etmeyen değerli eşim Ayşe Nur Abir ÇAKICI'ya saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz - 2013 Süleyman ÇAKICI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR vi
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri 3
1.2. Önceki Çalışmalar 4
1.3. Tez Çalışmasının Katkıları 8
1.4. Tez Düzeni 9
2. GEZGİN ALGILAYICI AĞLARDA KATMANLARARASI ETKİLEŞİM VE YÖNLENDİRME 11
2.1. Giriş 11
2.2. Gezgin Algılayıcı Ağlar (GAA) 12
2.3. GAA'larda Katmanlararası Etkileşim 13
2.4. GAA'larda Yönlendirme 15
2.4.1. GAA yönlendirme protokollerinin sınıflandırılması 15
2.4.2. GAA yönlendirme protokollerinin tasarımı 20
2.5. GAA'larda Katmanlararası Etkileşimli Yönlendirme 24
2.6. Sonuç 24
3. KATMANLARARASI ETKİLEŞİMLİ YENİ BİR GAA YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ 26
3.1. Giriş 26
3.2. Önerilen MACRO Yönlendirme Protokolü 27
3.2.1. Geliştirilen yol-yön (rota) keşif algoritması 27
3.2.2. Geliştirilen paket yönlendirme algoritması 33
3.2.3. Geliştirilen yol-yön yönetim algoritması 36
3.2.4. Geliştirilen yönlendirme enerji verimliliği algoritması 37
3.3. Önerilen MACRO Yönlendirme Protokolünün Benzetim Modeli 40
3.3.1. Uygulama katmanı 40
3.3.2. Ulaşım katmanı 41
3.3.3. Ağ katmanı 42
3.3.4. OEK katmanı 46
3.3.5. Fiziksel katman 50
3.4. Sonuç 50
4. ÖNERİLEN MACRO PROTOKOLÜ KULLANILAN ÖRNEK BİR GAA UYGULAMASI VE BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ 52
4.1. Giriş 52
4.2. MACRO Protokolünü Kullanan GAA Uygulamasının Benzetimi 52
4.2.1. Benzetim parametreleri 53

4.2.2. Örnek benzetim senaryoları 54
4.3. Paket Dağıtım Başarım Değerlendirmesi 55
4.3.1. Sabit hızlı gezgin veya hareketsiz düğümlerden oluşan senaryo 55
4.3.2. Değişken hızlı tamamı gezgin düğümlerden oluşan senaryo 57
4.4. Ortalama Uçtan-uca Paket Gecikmesi Başarım Değerlendirmesi 58
4.4.1. Sabit hızlı gezgin veya hareketsiz düğümlerden oluşan senaryo 58
4.4.2. Değişken hızlı tamamı gezgin düğümlerden oluşan senaryo 60
4.5. Enerji Tüketim Değerlendirmesi 61
4.5.1. Sabit hızlı gezgin veya hareketsiz düğümlerden oluşan senaryo 61
4.5.2. Değişken hızlı tamamı gezgin düğümlerden oluşan senaryo 62
4.6. Sonuç 63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 65
5.1. Öneriler 67
KAYNAKLAR 68
EKLER 73
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 76
ÖZGEÇMİŞ 77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Gezgin algılayıcı ağ örneği (doğal yaşam denetimi) 12
Şekil 2.2. GAA'lar için (a) katmanlı ve (b) katmanlararası etkileşim 14
Şekil 3.1. MACRO protokolüne ait yol keşif algoritmasının akış diyagramı 28
Şekil 3.2. APK ve TPK kuyruklarının çalışması 29
Şekil 3.3. MACRO protokolüne ait bir yol keşif işlemi örneği 32
Şekil 3.4. Geliştirilen paket yönlendirme algoritmasının akış diyagramı 34
Şekil 3.5. Veri iletiminde gönderim gücünün ayarlanması 35
Şekil 3.6. Geliştirilen yol-yön yönetim algoritması akış diyagramı 37
Şekil 3.7. Sabit görev döngüsü ve geliştirilen uyarlanabilir görev döngüsü 38
Şekil 3.8. MACRO protokolünde katmanlı ve katmanlararası bilgi paylaşımı 40
Şekil 3.9. Uygulama modülü süreç modeli 41
Şekil 3.10. Ulaşım katmanı süreç modeli 42
Şekil 3.11. Ağ katmanı süreç modeli 43
Şekil 3.12. MACRO protokolünün yönlendirme tablosu 44
Şekil 3.13. Ağ katmanı süreç modeli algoritması 45
Şekil 3.14. MACRO protokolünün OEK süreç modeli 47
Şekil 3.15. MACRO protokolünün OEK süreç modeli algoritması 48
Şekil 4.1. MACRO protokolünü kullanan GAA uygulamasının benzetim modeli 53
Şekil 4.2. Ağdaki gezgin düğümlerin oranının PDO başarımına etkisi 56
Şekil 4.3. Ağdaki gezgin düğümlerin hızının PDO başarımına etkisi 57
Şekil 4.4. Ağdaki gezgin düğümlerin oranının ortalama UUG başarımına etkisi 59
Şekil 4.5. Ağdaki gezgin düğümlerin hızının ortalama UUG başarımına etkisi 60
Şekil 4.6. Ağdaki gezgin düğümlerin oranının ortalama enerji tüketimine etkisi 61
Şekil 4.7. Ağdaki gezgin düğümlerin hızının ortalama enerji tüketimine etkisi 63

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Gönderim gücü seviyeleri ve ikili karşılıkları 39
Tablo 4.1. MACRO protokolünün benzetim modelinde kullanılan parametreler 54

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

α : Alınan RREQ paketinin iletilmesi için gereken süre, (s)
β : Erteleme işlemlerinde kullanılacak olan bir zaman dilimine ait süre, (s)
μ : Paketin kabul edilmesi için gereken en düşük sinyal gücü eşiği, (dBm)
δ : Genel güvenilirlik göstergesi
ε : Ardışık iki gönderim gücü seviyesi arasındaki fark
ρ : Yol güvenilirlik derecesi
φ : Atlama sayısı
τ : Yolun eklenme zamanından itibaren geçen süre, (s)
v : Düğüm hızı, (m/s)
V_{max} : Düğüm için belirlenen en yüksek hız
V_{min} : Düğüm için belirlenen en düşük hız
wt : RREQ paketinin APK kuyruğunda bekletilme süresi (s)
η_1 : Veri paketinin ilk bitinin üretim zamanı (s)
η_2 : Veri paketinin ilk bitinin üretim zamanı (s)
γ : Bir düğüm tarafından alınan tekrarsız veri paketi sayısı
λ : Gönderilen toplam veri paketi sayısı

Kısaltmalar

ACK : Acknowledgement (Alındı Onay Paketi)
ACQUIRE : Active Query Forwarding in Sensor Networks (Algılayıcı Ağlarda Aktif Sorgu Yönlendirmesi)
ADV : Advertisement (İlan Mesajı)
AODV : Ad hoc On-demand DistanceVector (Tasarsız Ağlar için Talebe-dayalı Mesafe Vektörü)
APE : Aktarılan Paket Eşiği
APK : Alınan Paket Kuyruğu
APTEEN : Adaptive Periodic Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (Uyarlanabilir Periyodik Eşiğe Duyarlı Enerji Verimli Algılayıcı Ağ Protokolü)
CBR : Constant Bit Rate (Sabit Veri Hızı)
CSMA : Carrier Sense Multiple Access (Taşıyıcı Dinleyen Çoklu Erişim)
CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Çarpışma Önleyiciyle Taşıyıcı Dinleyen Çoklu Erişim)
CTS : Clear-To-Send (Gönderme Onayı)
DCF : Distributed Coordination Function (Dağıtık İşbirliği İşlevi)
DSR : Dynamic Source Routing (Dinamik Kaynak Yönlendirme)
GAA : Gezgin Algılayıcı Ağ
GAF : Geographic Adaptive Fidelity (Coğrafi Uyarlanabilir Yönlendirme)
GEAR : Geographic and Energy-Aware Routing (Coğrafi ve Enerji Farkındalıklı Yönlendirme)
GPK : Gönderilecek Paket Kuyruğu

GPS : Global Positioning System (Küresel Konum Belirleme Sistemi)
GRI : Global Reliability Index (Genel Güvenilirlik İndeksi)
HELLO : Hello Paketi
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
KAA : Kablosuz Algılayıcı Ağ
LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (Düşük Enerjili Uyarlanabilir Küme Hiyerarşisi)
LRI : Local Reliability Index (Yerel Güvenilirlik İndeksi)
LLC : Logical Link Control (Mantıksal Bağ Denetimi)
MAC : Medium Access Control (Ortama Erişim Kontrolü)
MACRO : Mobility Adaptive Cross-layer Routing (Gezginlik Uyarlanabilir Katmanlararası Yönlendirme)
MECN : Minimum Energy Communication Network (En Düşük Enerjili Haberleşme Ağı)
MEMS : Microelektromecanic Systems (Mikroelektromekanik Sistemler)
MF : Mesafe Faktörü
MSN : Mobile Sensor Network (Gezgin Algılayıcı Ağlar)
OEK : Ortam Erişim Kontrol
OSI : Open System Interconnection (Açık Sistem Ara-bağlantısı)
PDO : Paket Dağıtım Oranı
PEGASIS : Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (Algılayıcı Bilgi Sistemlerinde Enerji Verimli Toplama)
QoS : Quality of Service (Servis Kalitesi)
REQ : Request (Talep Mesajı)
RREP : Route Reply Packet (Yol Cevap Paketi)
RREQ : Route Request Packet (Yol Talep Paketi)
RSSI : Received Signal Strength Indicator (Alınan İşaret Gücü Göstergesi)
RTS : Request-To-Send (Gönderme Talebi)
SMECN : Small Minimum-Energy Communication Network (Küçük En düşük Enerjili Haberleşme Ağı)
SNR : Signal to Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SPIN : Sensor Protocols for Information via Negotiation (Algılayıcı Ağlar için Müzakere Yoluyla Bilgi Toplama)
TDMA : Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
TEEN : Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (Eşiğe Duyarlı Enerji Verimli Algılayıcı Ağ Protokolü)
UUG : Uçtan-Uca Gecikme
WSN : Wireless Sensor Network (Kablosuz Algılayıcı Ağ)

GEZGİN ALGILAYICI AĞLAR İÇİN KATMANLARARASI ETKİLEŞİMLİ YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ

ÖZET

Geleneksel Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (KAA'larda) genellikle düğümlerin sabit oldukları varsayılmaktadır; ancak, bazı KAA uygulamalarında izlenen olaylar veya çevre dinamik bir yapıya sahip olabilmektedir. Söz konusu uygulamalardaki algılama ve haberleşme başarımının iyileştirilmesi için hareket kabiliyetine de sahip algılayıcı düğümler içeren Gezgin Algılayıcı Ağ (GAA) sistemleri önerilmektedir.

GAA'larda algılama verilerinin bir uç düğümden başkasına aktarılması genel olarak düğümlerin birbirleri üzerinden iletişimiyle sağlanmaktadır. Bununla birlikte, enerji sınırlamalı gezgin algılayıcı düğümler sıklıkla bağlantı hatalarına sebep olmaktadır. Verilerin hedefe başarılı bir şekilde ulaştırılabilmesi için enerji verimli ve güvenilir yönlendirme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, GAA'larda veri iletim güvenilirliğini artırmak için bütünleşik bir yapıda OSI referans modelinin beş katmanının (fiziksel, veri-bağı, ağ, ulaşım ve uygulama katmanları) etkileşimini ve işbirliğini esas alan yeni bir yönlendirme protokolü (MACRO) tasarlanmıştır. Önerilen protokolün üç ana amacı bulunmaktadır:
(i) Ağ üzerinde güvenilir yön-yolları keşfetmek,
(ii) Mevcut yön-yolların güvenilirliğini sürdürmek ve
(iii) Enerji farkındalıklı ve gecikme duyarlı iletişimi sağlamak.

Tasarlanan MACRO protokolünün modellenmesi ve benzetimi OPNET Modeler yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki ayrı GAA uygulama senaryosunun benzetim sonuçları kullanılarak, MACRO'nun üç farklı geleneksel yönlendirme protokolü ile karşılaştırmalı başarım değerlendirmesi yapılmıştır. Önerilen MACRO protokolü, özellikle paket dağıtım oranı açısından iki kata kadar ve ortalama uçtan-uca paket gecikmesi açısından beş kata kadar daha iyi başarım sunmaktadır. Ayrıca, ortalama enerji tüketimi başarımının diğer protokollere ile benzer; ancak, daha kararlı olduğu sonucu, MACRO protokolünün katkısını diğer iki ölçüt ile ödünleşme yaklaşımı çerçevesinde üst düzeye çıkardığı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gezgin Algılayıcı Ağ, Katmanlararası Etkileşim, Yönlendirme.

A CROSS LAYER ROUTING PROTOCOL FOR MOBILE SENSOR NETWORKS

ABSTRACT

In traditional Wireless Sensor Networks (WSNs), it is generally assumed that the sensor nodes are stationary; but some WSN applications can have a dynamic structure due to the monitored events or environment. To improve the performances of sensing and communication of these applications; Mobile Sensor Networks (MSNs) are proposed in the literature.

In Mobile Sensor Networks (MSNs), sensor data is generally transferred via mobile sensor nodes by multi-hop fashion. Because of the mobility of the nodes in the network, employing efficient routing protocols are essential to ensure end to end route reliability while incurring minimal power consumption and packet delay.

In this thesis work, a new routing protocol named Mobility Adaptive Cross-layer Routing (MACRO) has been designed in order to improve the reliability of data transmission in MSNs. MACRO is based on a new cross-layer interaction and corporation among the five layers (application, transport, network, data-link and physical layers) of the OSI reference model in an integrated structure. MACRO protocol has three main objectives:
(i) To discover the most reliable route in the network,
(ii) To sustain the route reliability and
(iii) To achieve energy-aware and delay-sensitive communication.

The proposed MACRO protocol has been designed, modeled and simulated by using OPNET Modeler software. According to the obtained simulation results of two separate MSN application scenarios, MACRO's comparative performance assessment was performed with three different classical routing protocols. The proposed MACRO protocol offers up to two times and up to five times better performance than the others in terms of packet delivery ratio and average end-to-end packet delay, respectively. In addition, it is concluded that MACRO's energy consumption performance is close to the classical other protocols; however it is more stable than the others, well traded off the packet delivery ratio and end-to-end packet delay results.

Keywords: Mobile Sensor Network, Cross-layer Interaction, Routing.

GİRİŞ

Kablosuz haberleşme ve mikro elektromekanik sistem (MEMS) teknolojilerindeki güncel gelişmeler küçük boyutlu, düşük-güçlü ve düşük-maliyetli donanımsal bileşenlerin üretilmesini mümkün kılmıştır. Söz konusu gelişmelerin bir sonucu olarak, küçük bir paket içerisinde algılama, işleme ve kablosuz haberleşme işlevlerini yerine getirebilen kablosuz algılayıcı düğümler geliştirilmiştir. Bu düğümler, bulundukları ortamdaki fiziksel değişimler hakkında veriler toplamak ve bu verileri merkezi bir istasyona göndermek için, bir coğrafi alan içerisinde uygun biçimde dağıtılarak Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) yapısını oluşturmaktadır [1].

Geliştirildiği ilk yıllarda sadece askeri amaçlı olarak kullanılan KAA'lar, günümüzde doğal yaşamın izlenmesi, orman yangınlarının sezilmesi, hassas tarım, yaşlı ve hasta takibi, insanların ulaşamadıkları ortamlarda bilimsel incelemeler yapılması gibi birçok alanda oldukça geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmuştur [2]. KAA uygulama alanlarının artmasına paralel olarak yeni gereksinimler ortaya çıkmıştır. Bu gereksinimleri karşılayabilmek ve sabit düğümlerden oluşan geleneksel KAA'lara esnek kullanım özelliği kazandırmak [3] amacıyla; mevcut yapıya hareket kabiliyetine de sahip algılayıcı düğümler eklenerek Gezgin Algılayıcı Ağ (GAA) sistemleri geliştirilmiştir.

GAA'larda, düğümlerin her biri varsayılan temel görevlerinin (algılama, işleme, alma, iletim vs.) yanı sıra, diğer düğümlere ait algılama verilerinin hedefe yönlendirilmesinden de ara eleman olarak sorumludur. Bu verilerin bir uç düğümden başkasına aktarılması gezgin düğümlerin birbirleri üzerinden haberleşmeleriyle sağlanmaktadır [4]. Bununla birlikte, ağdaki gezgin düğümlerin tasarsız biçimde yer değiştirebiliyor olması düğümler arasındaki bağlantıların güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır. Özellikle paket iletimi esnasında, ilgili yol üzerinde meydana gelen bağlantı hataları paket kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Paket kayıplarının artması ise, paket iletim başarımını düşürmekte; sistemin geçerlilik ve güvenilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca ağın başarılı paket iletimi, uçtan uca gecikme ve enerji

tüketimi başarımını olumsuz etkilemektedir. Bahsedilen problemlere ek olarak; gezgin ağlardaki değişken ağ topolojisi, uygulamaların farklı servis kalitesi gereksinimleri ve en önemlisi gezgin haberleşme aygıtlarının genellikle sınırlı kaynaklara sahip olması bu ağlar için geleneksel çözümlerin yerine yeni tasarımların yapılmasını zorunlu hale getirmektedir.

Sunulan tez çalışması kapsamında; GAA'lar için Açık Sistem Ara-bağlantısı (OSI) referans modelinin beş katmanının etkileşimini esas alan yeni bir yönlendirme protokolü tasarlanmıştır. Bu protokolde paket iletim güvenilirliği öncelikli olmak üzere, uçtan uca gecikme ve enerji tüketimi açısından yönlendirme başarımının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

Dağıtık sistemler; aralarındaki koordinasyonun sadece mesajlaşma yoluyla sağlanabildiği, birbirinden bağımsız bileşenlerin ortak bir amaca yönelik bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş sistemler olarak tanımlanmaktadır [5]. Bir dağıtık sistem uygulaması olan GAA'larda, bağımsız gezgin algılayıcı düğümler bulundukları ortamdaki nem, sıcaklık, ses, basınç, hareketlilik, ışık vb. fiziksel değişimler hakkında veriler toplamaktadır. Düğümler, topladıkları verileri doğrudan ya da birbirleri üzerinden merkezi bir istasyona göndermektedir.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri

GAA'larda algılama verilerinin ağdaki diğer düğümler üzerinden gönderilmesi sürecinde izleyecekleri yol yönlendirme protokolleri tarafından belirlenmektedir. Verilerin başarılı olarak hedefe ulaştırılabilmesi ise belirlenen yolların geçerliliğine ve güvenilirliğine bağlıdır. Bununla birlikte, gezgin algılayıcı düğümlerin tasarsız biçimde yer değiştirebiliyor olması izlenen yol üzerinde bulunan düğümler arasında bağlantı hatalarına sebep olduğundan yolların güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır. Hareketsiz KAA sistemlerindeki başlıca problemler haberleşme esnasında harcanan enerjinin ve paket gecikmelerinin azaltılması şeklinde sıralanabilir. Fakat gezgin düğümler geleneksel KAA'lardaki mevcutlara ek olarak yeni problemlerin ortaya çıkmasına sebep olduğundan, GAA'lar için geleneksel çözümlerin yerine güncel çözümlerin geliştirilmesi ihtiyacı ön plana çıkmaktadır [4].

KAA'lar için önerilen mevcut haberleşme protokollerinde genellikle OSI referans modeli olarak da bilinen geleneksel ağ modeli (ayrık-katmanlı) esas alınmakta; fakat bu mimaride yeni yöntemler verimli olarak kullanılamamaktadır [6]. Özellikle gezgin cihazlar için tasarlanan ayrık-katmanlı protokoller değişken topoloji ve ortam şartlarına karşı dayanıksız olabilmektedir [1]. Söz konusu olumsuzlukların giderilmesi için ayrık-katmanlı mimari üzerinde bir takım iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir [6]. Bu nedenle, geleneksel mimari yerine katmanlararası etkileşimli güncel tasarımların geliştirilmesi önerilmiştir [4].

Altyapısında yer alan bu bilgiler ışığında, tez çalışmasında önerilen katmanlararası etkileşimli yönlendirme protokolünün temel amaçları;

- GAA'larda yönlendirme başarımının iyileştirilmesi için ayrık-katmanlı mimariden kaynaklanan olumsuzlukları azaltan veya ortadan kaldıran yeni bir katmanlararası etkileşim yaklaşımı geliştirmek,
- Yeni yol-yön belirlenmesi esnasında gereksiz keşif paketlerinin yayılımını önleyerek, haberleşme ortamının ve düğümlerin enerji kaynaklarını verimli kullanılabilmesi için etkin bir yol-yön keşif algoritması geliştirmek ve
- GAA'larda veri iletim güvenilirliğini artırmak için değişken topoloji ve ortam şartlarına karşı dayanıklı yeni bir yönlendirme protokolü tasarlamaktır.

GAA'larda, algılayıcı düğümlerin her biri varsayılan temel görevlerinin yanı sıra, paketlerin ilgili hedefe yönlendirilmesinden de ara eleman olarak sorumludur. Üretilen paketler düğümlerin yönlendirme tablolarında yer alan ve genellikle birbirlerine komşu olan düğümler üzerinden belirlenmiş yollar kullanılarak hedef düğüme ulaştırılmaktadır. Bir paketin hedefe başarılı bir şekilde ulaştırılabilmesi için, ilgili yol üzerinde bulunan düğümler arasındaki bağlantıların güvenilir olması gerekmektedir. Fakat gezgin düğümler arasında bağlantı güvenilirliğini sağlamak oldukça zor bir görevdir. Bu nedenle, GAA yönlendirme protokolleri hem verilerin hedefe yönlendirilirken izleyeceği yolu belirlemeli hem de söz konusu yolun geçerliliğini ve güvenilirliğini garanti edebilmelidir. Ayrıca, gezgin düğümler genellikle sınırlı enerji kaynaklarına sahip olduğundan, GAA yönlendirme protokolleri düğümlerin enerjisini verimli kullanmalıdır. Bahsedilen gereksinimlerden hareketle; GAA'larda güvenilir ve enerji verimli yönlendirme protokollerine duyulan ihtiyaç bu tez çalışmasının öncelikli başlatılma sebebini oluşturmaktadır.

1.2. Önceki Çalışmalar

Son yıllarda, özellikle kablosuz ağ sistemleri için katmanlar arası etkileşimli protokollerin tasarımı oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Literatürde, bir kablosuz ağın ortama erişim, enerji tüketimi, uçtan uca paket gecikmesi, vs. başarım parametrelerinden birinin ya da bir kaçının iyileştirilmesi amacıyla tasarlanmış birçok katmanlararası etkileşimli protokol bulunmaktadır. Bu bölümde, sunulan tez

çalışmasının hedefleri doğrultusunda, kablosuz algılayıcı ağlarda haberleşme güvenilirliğinin artırılması için geliştirilmiş katmanlararası etkileşimli yönlendirme protokolleri üzerinde durulmaktadır.

Ramachandran ve Shanmugavel [7], uygulama, fiziksel ve ağ katmanının etkileşimini kullanarak, gezgin düğümler için Tasarsız Ağlar için Talebe-dayalı Mesafe Vektörü (AODV) [8] yönlendirme protokolünü iyileştiren katmanlararası bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşımda, düğümlerin hız bilgisi ve alınan paketlerin sinyal gücü değerlendirilerek kararlı ve en uygun yolların bulunması hedeflenmektedir.

Gunasekaran ve Qi [9] tarafından geliştirilen yönlendirme protokolünde, ağ üzerinde verimli yolların bulunabilmesi için fiziksel katman ve uygulama katmanı etkileşimi kullanılmaktadır. Bu çalışmada sunulan "değişken paket boyutlarına bağlı olarak düğümün gönderim gücünün ayarlanması" ve "kontrol mesajlarının veri paketlerine eklenip gönderilerek, ağ trafiğinin ve enerji tüketiminin azaltılması" yöntemleri önerdiğimiz tez çalışmasında da esas alınmaktadır.

Liu ve diğ. [10], sabit düğümlerden oluşan KAA'larda enerji verimli paket iletimi için, fiziksel katman ile veri-bağı katmanının etkileşimini kullanan bir haberleşme protokolü önermiştir. Enerji tasarrufu için, düğümlerin birbirlerine olan uzaklıklarına göre en uygun gönderim gücü seçilmektedir. Bu çalışma Bai ve diğ. [11] tarafından geliştirilerek, en uygun enerji tüketimine sahip yolların seçilmesi için ağ katmanı da etkileşimli yapıya dâhil edilmiştir.

Chilamkurti ve diğ. [12] tarafından yapılan çalışmada, ağ ve veri-bağı katmanlarının etkileşiminden yararlanılmıştır. Önerilen iç denetim mekanizması sayesinde, Dinamik Kaynak Yönlendirme (DSR) algoritmasının yol yönetim işlem yükü azaltılarak enerjinin verimli kullanılması amaçlanmaktadır. Enerji odaklı çalışan bu yöntemde, yol hataları paket kayıpları yaşandıktan sonra fark edilmekte ve hatanın giderilmesi yoluna gidilmektedir. Önerilen tez çalışmasında ise, ilgili yolun güvenilirlik kestirimi veri haberleşmesi başlatılmadan yapılmaktadır. Böylece, yol hatalarından kaynaklanan paket kayıpları önemli oranda azaltılmaktadır.

Zhang ve diğ. [13], düğüm enerji tüketimi ve paket gecikme performansını iyileştirmek için iki ayrı haberleşme protokolü önermiştir. Protokoller bağımsız çalışma süresi belirleme ve dinamik yönlendirme özelliklerine sahiptir. Ancak, kullanılacak protokolün ağdaki düğümlerin yoğunluğuna bağlı olarak önceden belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında önerilen yaklaşım, söz konusu iki çatılı protokol yapısının olumsuzluklarını ortadan kaldırmaktadır. Yerel ve genel düzeydeki bağlantı değerlendirmelerinin tek bir yapı içerisinde gerçekleştirilebilmesi sayesinde, hem yoğun hem de seyrek ağlarda kullanılabilmektedir.

Huang ve diğ. [14], ağ ve veri-bağı katmanlarının etkileşimini kullanarak düğümlerin enerjilerinin tükenmesi nedeniyle ortaya çıkan bağlantı hatalarına karşı dayanıklı bir yönlendirme protokolü tasarlamıştır. Paket iletim başarımını iyileştirmek için, uçtan-uca yol bilgisi tutmak yerine, her düğüm paketin aktarılacağı bir sonraki düğümü kendisi seçmektedir. Fakat seçilen düğüme ait bağlantı güvenilirliği ve tıkanıklık denetimi dikkate alınmamıştır. Bu tez çalışmasında önerilen protokolde, topoloji değişimlerine karşı paket iletim güvenilirliğinin sağlanabilmesi için paketin aktarılacağı bir sonraki düğüm benzer bir yaklaşım kullanılarak seçilmektedir. Ayrıca, veri iletimi başlatılmadan önce seçilen yol için bağlantı güvenilirliği ve tıkanıklık denetimi yapılmaktadır.

Vuran ve Akyıldız [15] tarafından yapılan çalışmada ulaşım, ağ ve ortama erişim kontrol (OEK) alt-katmanının özelliklerini birleştiren katmanlararası etkileşimli bir haberleşme protokolü tasarlanmıştır. Fang ve diğ. [16], bu çalışmada önerilen açısal yönlendirme algoritması üzerinde bazı iyileştirmeler yapmıştır. Her iki protokolde de konuma dayalı ve alıcı odaklı bir yönlendirme stratejisi izlenmektedir. Ayrıca, protokollerin tasarımı ve başarım değerlendirmesi, ağdaki düğümlerin sabit oldukları varsayılarak yapılmıştır. Bu tez çalışmasında önerilen protokolü söz konusu çalışmalardan ayıran iki önemli fark bulunmaktadır. Birincisi, önerilen protokolün hem gezgin hem de sabit düğümlerden oluşan ağlar için kullanılabilmesi; ikincisi ise, uygulama katmanının da etkileşimli yapı içerisine dâhil edilmesiyle, topoloji değişimlerine karşı yol güvenilirliğinin artırılmış olmasıdır.

Heinzelman ve diğ. [17] kablosuz algılayıcı ağlar için, LEACH olarak adlandırdıkları küme tabanlı bir yönlendirme protokolü önermiştir. Kümeler Alınan Sinyal Gücü

Göstergesi (RSSI) bilgilerine göre oluşturulmaktadır. Küme liderleri, hem kendi üyelerinden hem de diğer küme liderlerinden gelen veri paketlerini hedefe yönlendirmekten sorumludur. Ağdaki düğümlerin sabit olduğu uygulamalar dikkate alınarak tasarlanan LEACH protokolünün gezgin sistemlerde kullanılabilmesi için, Kim ve diğ. [18] tarafından LEACH-Mobile protokolü geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde, küme lideri ile düğümler arasında pasif bağlantı denetimi yapılmaktadır. Gezginlik sebebiyle kümelerinden ayrılan düğümler yeni bir kümeye dâhil edilmektedir. Fakat düğümlerin kümeden ayrı kalma sıklığının ve sürelerinin artması, yol bağlantı hatalarının ve paket kayıplarının da artmasına neden olmaktadır.

Awwad ve diğ. [19], veri-bağı ve ağ katmanlarının etkileşimiyle LEACH-Mobile üzerinde bazı iyileştirmeler yaparak katmanlararası etkileşimli bir yönlendirme protokolü (CBR-Mobile) tasarlamıştır. CBR-Mobile protokolünde TDMA tabanlı bir OEK protokolü benimsenmiştir ve zaman dilimleri, biri öncelikli olmak üzere, kümedeki iki ayrı düğüme atanmaktadır. Birincil düğümün göndereceği veri bulunmadığında veya küme dışına çıkması durumunda, ilgili düğüm için atanan zaman dilimi diğer düğüm tarafından kullanılmaktadır. Ayrıca, dinamik bağlantı denetimi sayesinde, kümeden ayrılan düğümler LEACH protokolüne göre daha hızlı fark edilmektedir. Böylece, paket kayıpları ve gecikmeleri azaltılabilmektedir. Karşılaştırmalı başarım analizi yapmak için, bu tez çalışmasında önerilen protokolün benzetim sonuçları LEACH-Mobile ve CBR-Mobile protokollerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Daabaj ve Ahmeda [20], çoklu düğümler üzerinden güvenilir ve enerji verimli bir haberleşme için yaşam süresi odaklı; fiziksel, ağ ve uygulama katmanlarının etkileşimini kullanan bir yönlendirme protokolü önermiştir. Ağaç tabanlı olarak tasarlanan bu protokolde yol seçimleri bir maliyet fonksiyonu kullanılarak yapılmaktadır. Ayrıca, ağdaki enerji tüketimini dengelemek ve ağın ömrünü uzatmak için yol üzerindeki düğümler arasında iş yükünün dengede tutulması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, önerilen yaklaşım topoloji değişimlerine karşı dayanıklı olmadığından gezgin sistemlerde kullanılmak için uygun değildir.

Babulal ve Tewari [21] sabit ya da az hareketli düğümlerden oluşan KAA'larda paket iletim güvenilirliği ve düğüm enerji tüketimi başarımını iyileştirmek için ağ,

veri-bağı ve fiziksel katmanın etkileşimini kullanan bir yönlendirme protokolü tasarlamıştır. Protokolde, ilgili iki düğüm arasındaki bağlantı güvenilirliğinin kestirilmesi ve ağdaki enerji tüketiminin dengelenmesi amacıyla, yeni yol keşfi esnasında enerji temelli bir test gerçekleştirilir. Talep paketini alan düğüm, bu testin sonucuna göre, haberleşmeye katılıp katılmama kararını verir. Ayrıca, yönlendirme tablosunda hedefe giden birden fazla yol bulunuyorsa, veri paketlerinin aktarılacağı en uygun yolun seçimi için iki uç düğüm arasındaki mesafeye bağlı olarak bir maliyet analizi yapılır. Bu çalışmayı tez çalışmasında önerilen protokolden ayıran en önemli fark, gezgin düğümler için tasarlanmış olmamasıdır. Bunun yanında, sunulan benzetim sonuçları incelendiğinde, geliştirilen yöntem için seçilen parametrelerin bağlantı güvenilirliğini sağlamak için yeterli olmadığı görülmektedir.

Nabil ve diğ. [22] tarafından sunulan çalışmada enerji başarımının iyileştirilmesi için katmanlararası etkileşimli bir yönlendirme protokolü önerilmektedir. Küme tabanlı bu protokolde uygulama, ağ ve fiziksel katmanları etkileşimli olarak çalışmaktadır. Uygulama katmanından alınan düğümün enerji seviyesine göre ağ katmanında iletişime katılma kararı alınmaktadır. Alınan bu karar doğrultusunda kablosuz iletişim cihazlarını kapatan düğümler yarı aktif duruma geçmektedir. Bu düğümler üzerinden merkez istasyona ulaşmak isteyen düğümler ise alternatif yolları kullanmaktadır. Geliştirilen protokol, düğümleri hareketsiz ve düzenli yerleştirilmiş ağlarda kullanılmak için uygun olsa da gezgin ağ sistemleri için elverişli değildir.

1.3. Tez Çalışmasının Katkıları

Bu tez çalışması kapsamında GAA'lar için önerilen katmanlararası etkileşimli yeni yönlendirme protokolünün özgün katkıları aşağıda özetle sunulmaktadır.

Bir kablosuz ağın tüm katmanlarında ilgili sistemin başarımını etkileyecek ya da iyileştirecek birçok parametre bulunabilmektedir. Söz konusu parametrelerin etkileşimli yapı içerisinde değerlendirilmesi hedef katmanda daha uygun kararlar verilmesine olanak sağlamaktadır. Önerilen tez çalışmasında geliştirilen protokolde, paket dağıtım güvenilirliği ve gecikme başarımının iyileştirilmesi başta olmak üzere, GAA'ların yönlendirme başarımını iyileştirmek amacıyla OSI referans modelinin beş katmanı birbiriyle etkileşimli olarak çalışmaktadır. Bu yönüyle önerilen yaklaşımın literatürdeki benzer çalışmalar arasında tek olduğu düşünülmektedir.

GAA'lar gibi çoklu atlamalı haberleşme kullanılan ağlarda, her düğüm kendi veri paketlerinin yanı sıra diğer düğümlerden gelen veri paketlerinin de hedef düğüme ulaştırılmasından ara eleman olarak sorumludur. Veri paketine sahip gezgin düğümün yönlendirme tablosunda hedefe giden bir yol bulunmuyorsa yeni bir yol-yön keşif işlemi başlatılır. Keşif paketleri ağdaki düğümler üzerinden yayılarak hedefe ulaştırılmaktadır. Bu durum genellikle tıkanıklığa, paket çarpışmalarına ve gereksiz paket iletimine yol açmaktadır. Sunulan tez çalışması kapsamında, bahsedilen bu üç temel sorunun giderilmesine yönelik yeni bir yol-yön keşif algoritması geliştirilmiştir. Söz konusu algoritma, kaynak düğüm ile hedef düğüm arasında kısa ve güvenilir yolların bulunmasına da olanak sağlamaktadır.

Veri paketleri hedef düğüme gönderilirken düğümlerin yönlendirme tablolarındaki mevcut yollar kullanılmaktadır. Klasik yöntemlerde, yolların güvenilirliği yalnız ilgili yol için tanımlanan kullanım süresi ile doğrulanmaktadır. Bu yöntem, düğümlerin hızlı ve sıkça yer değiştirdiği gezgin ağlarda verimli olarak çalışamadığından paket kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Sunulan tez çalışmasında, mevcut yollar için dinamik kullanım süresi belirlenmektedir. Ayrıca, veri paketi gönderilmeden önce basit fakat etkin bir kestirim yapılarak ilgili yolun güvenilirliği denetlenmektedir. Bunun yanında, birden fazla yolun bulunduğu durumlarda basit bir matematiksel ifade kullanılarak ilgili yollar arasından en güvenilir olanı seçilmektedir. Böylece, paket kayıpları ve gecikmeleri azaltılabilmektedir.

1.4. Tez Düzeni

Bölüm 2'de, gezgin algılayıcı ağlar, katmanlararası etkileşim ve yönlendirme protokolleri hakkında genel bilgilere yer verilmektedir.

Bölüm 3'te, beş referans katman arasındaki etkileşimi esas alan GAA'lar için katmanlararası etkileşimli yeni yönlendirme protokolü MACRO'nun tasarımı ve benzetim modeli açıklanmaktadır.

Bölüm 4'te, önerilen MACRO protokolünün kullanıldığı örnek bir gezgin algılayıcı ağ uygulamasının, OPNET Modeler yazılımı kullanılarak benzetimi ve benzetim sonuçları kullanılarak yapılan başarım değerlendirmesi sunulmaktadır.

Geliştirilen katmanlararası MACRO yönlendirme protokolünün yenilikleri, bilime ve teknolojiye sunmuş olduğu katkılar, sonuçlar ve değerlendirmeler Bölüm 5'te ifade edilmektedir. Bu bölümde ayrıca, MACRO protokolünün geliştirilmesine ve uygulanmasına yönelik bazı öneriler de yer almaktadır.

2. GEZGİN ALGILAYICI AĞLARDA KATMANLARARASI ETKİLEŞİM VE YÖNLENDİRME

2.1. Giriş

Gezgin algılayıcı ağlar (GAA'lar), çevrelerindeki fiziksel değişimleri incelemek amacıyla iş birliği halinde çalışan, hareket kabiliyetine sahip algılayıcı düğümlerin oluşturduğu özel ağlardır. Algılayıcı düğümler, başlangıçta rastgele veya planlı bir biçimde dağıtılmış olabilir ve dağıtıldıkları coğrafi alanda sınırlı veya bağımsız olarak hareket edebilirler. Ayrıca, düğümler topladıkları verileri bir merkez istasyona ulaştırmak için doğrudan ya da birbirleri üzerinden yeni bir haberleşme altyapısı oluşturabilirler [23]. Merkez istasyon, algılayıcı düğümün haberleşme alanı içerisinde yer alıyorsa, ilgili düğüm veri paketini doğrudan merkez istasyona gönderebilmektedir. Doğrudan haberleşmenin mümkün olmadığı durumlarda ise, veri paketleri, yönlendirme protokolü tarafından belirlenen yollar kullanılarak, ağdaki diğer düğümler üzerinden merkez istasyona aktarılmaktadır.

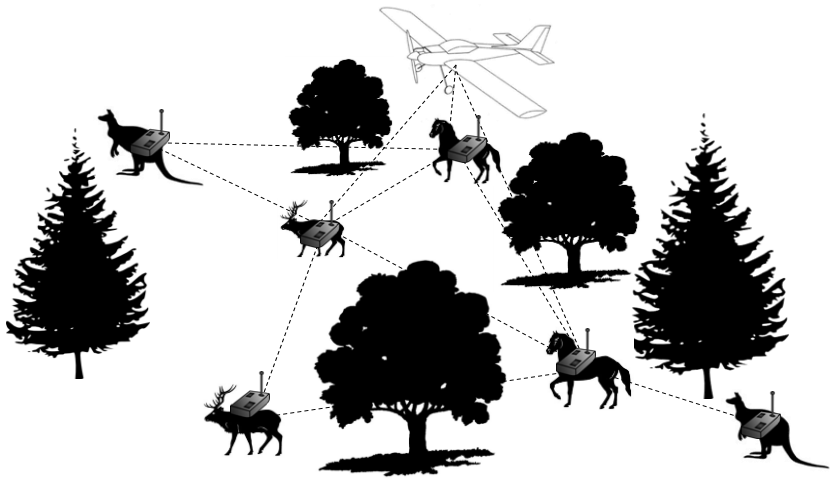
Çoklu düğüm haberleşmesinde, verilerin merkez istasyona başarılı olarak aktarılabilmesi, yönlendirme sürecinde, izlenen yolun geçerliliğinin sürdürülebilir olmasına bağlıdır ve yol güvenilirliği olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, haberleşme esnasında ortaya çıkan bağlantı hataları yol güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır. Sabit KAA sistemlerindeki bağlantı hatalarının başlıca sebebi düğümlerin enerjilerinin tükenmesi iken; GAA'larda, gezgin düğümlerin tasarsız biçimde yer değiştirmesidir. Gezgin düğümler, geleneksel KAA problemlerinin içeriklerini ve önceliklerini değiştirdiğinden, GAA'lar için geleneksel çözümlerin yerine güncel çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu çözümlerin bir örneği olan katmanlararası etkileşim, çevre ve ağdaki değişimlere hızla uyum sağlayabilecek esnek tasarımların gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu bölümde, GAA'lar için katmanlararası etkileşim ve yönlendirme protokolleri hakkında genel bilgilere yer verilmektedir.

2.2. Gezgin Algılayıcı Ağlar (GAA)

Geleneksel KAA sistemleri genellikle düğümlerin sabit oldukları varsayılarak tasarlanmaktadır. Fakat bu yaklaşım izlenen varlıkların, olayların veya ortamın dinamik olduğu uygulamalarda, algılama ve haberleşme problemlerine neden olmaktadır. KAA başarımının iyileştirilmesi ve söz konusu aksaklıkların giderilmesi için, ağdaki düğümlerin bir kısmının ya da tamamının gezgin olarak tasarlandığı GAA'lar geliştirilmiştir.

GAA'ları oluşturan düğümler, sabit türlerinde olduğu gibi güç kaynağı, işlemci, algılayıcı ve kablosuz haberleşme birimlerini içermektedir. Bu düğümleri sabit eşleniklerinden ayıran en önemli fark ise, bulundukları uzayda yer değiştirmelerine imkân sağlayan nesnelerle bütünleşik halde olmalarıdır. Söz konusu nesneler, mekanik bir sistem (robot, araç, vs.) olabileceği gibi doğal bir etken (hayvan, sıvı akışı, hava akımı vb.) de olabilmektedir [3].



Şekil 2.1. Gezgin algılayıcı ağ örneği (doğal yaşam denetimi) [4]

Şekil 2.1'de görülebileceği gibi, GAA'lar çok dinamik bir yapıya sahip olabilmektedir. Bu nedenle, KAA'lardaki öncelikli problemler, harcanan enerjinin ve paket gecikmelerinin azaltılması iken; GAA'larda, bunlara ek olarak, paket iletimi esnasında düğümler arasındaki bağlantının korunması ve ağın sürdürülmesi problemleri öne çıkmaktadır. Problemler yeni bir boyut kazandığından, geleneksel yöntemler GAA'larda verimli olarak kullanılamamaktadır ve GAA'lar için yeni haberleşme yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

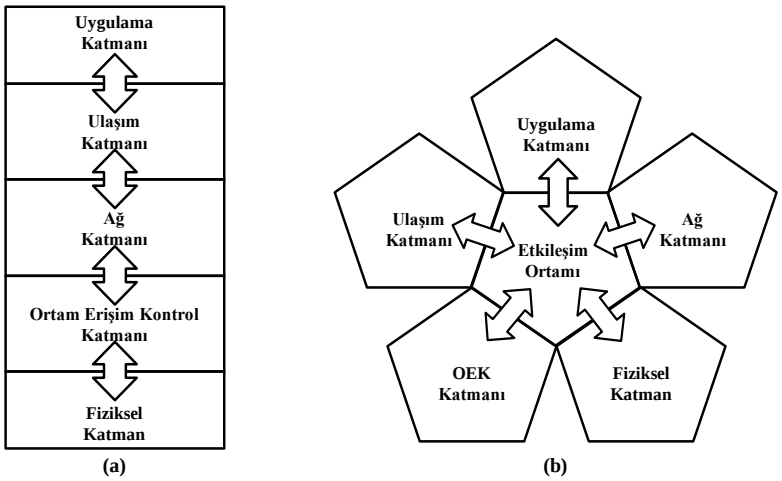
2.3. GAA'larda Katmanlararası Etkileşim

Bilgisayar ağlarının kullanılmaya başlandığı ilk zamanlarda, sadece aynı üretici tarafından geliştirilen cihazlar birbirleriyle iletişim kurabiliyordu. Bu sınırlamanın önüne geçebilmek için, ağ üzerindeki cihazlarda çalışan uygulamaların birbirleriyle nasıl iletişim kuracaklarının tanımlandığı, açık sistem ara-bağlantısı (OSI) olarak da bilinen, ayrık katmanlı ağ referans modeli geliştirilmiştir. OSI referans modeli genel ağ haberleşme görevlerini alt birimlere ayırmakta ve katmanların her biri tarafından sağlanan hizmetler hiyerarşisini tanımlamaktadır. Söz konusu hizmetler ise farklı katmanlar için tasarlanan protokollerden oluşmaktadır [6].

GAA'lar için önerilen haberleşme protokollerinin tasarımında genellikle OSI referans modelinin beş katmanı (Şekil 2.2-a) kullanılmaktadır [24]. Fakat bu ayrık katmanlı yaklaşım kablosuz ağ sistemlerinde bazı sakıncalar ortaya çıkarmaktadır. Öncelikle, bu yaklaşım kablolu sistemler için elverişli olmasına rağmen, kablosuz haberleşme sistemleri üzerinde yüksek başarım sunamamaktadır. İkincisi, dinamik topolojiye sahip olan ağlarda düğümler arasındaki bağlantı güvenilirliğinin sağlanmasını ve veri aktarımını zorlaştırmaktadır. Özellikle gezgin cihazların bulunduğu ağlarda (3G, GAA vb.) kablosuz haberleşmenin sunduğu avantajlar ve yeni yöntemler verimli olarak kullanılamamaktadır [25]. Üçüncüsü, GAA gereksinimleri ve sınırlamaları birbirleriyle bağlantılı olduğundan, bir katmandaki iyileştirme ya da problem diğer katmanlardaki başarımı etkilemektedir [26]. Ayrıca, katmanlı yaklaşım esnek olmadığından iyileştirilmeleri zorlaştırmakta ve problemler kolaylıkla aşılamadığından başarımın düşmesine sebep olmaktadır. Bahsedilen sorunların çözülebilmesi için katmanlı mimari üzerinde bazı iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir [6]. Bu nedenle, yeni nesil çalışmalar katmanlararası etkileşimli haberleşme yöntemlerinin tasarımı üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Katmanlararası etkileşim, bir eniyileme problemini çözmek amacıyla iki veya daha fazla katmanın karşılıklı ya da tek yönlü bilgi paylaşımı [27] veya güncel duruma uyarlanması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.2-b). Son yıllarda katmanlararası etkileşimli protokollerin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda önemli bir artış gözlenmekte ve önerilmiş birçok katmanlar arası etkileşimli protokol bulunmaktadır. Örneğin, fiziksel katman ile veri-bağı katmanı etkileşiminde; fiziksel katmandan

alınan bit-hata oranı bilgisine göre, veri-bağı katmanında çerçeve boyutlarının dinamik olarak değiştirilmesinin, enerji tüketiminin azalmasına ve iş çıkarma oranının yükselmesine yardımcı olduğu görülmüştür. Fiziksel katman, veri-bağı katmanı ve ağ katmanı etkileşimi; gezgin cihazların, bulundukları ağdan bir başka ağa geçişlerinde, ağın güvenilir biçimde sürdürülebilmesine ve gecikmelerin azaltılmasına olanak sağlamaktadır [25]. Bununla birlikte, geliştirilen katmanlararası yaklaşımların sağladığı katkının yanı sıra, getirdiği yükün de hesaba katılması gerekmektedir [8].



Şekil 2.2. GAA'lar için (a) katmanlı ve (b) katmanlararası etkileşim [4]

GAA'lar düğümlerinin hareketli olması, değişken topoloji ve kablosuz bağlantı kalitesi gibi nedenlerden dolayı oldukça dinamik bir yapıya sahiptir. Ayrıca, algılayıcı ağlardaki en kritik sınırlamanın enerji olduğu, en fazla enerjinin ise haberleşme esnasında harcandığı da bilinmektedir. Söz konusu problemlerin çözülmesi için GAA'larda uçtan-uca başarılı paket iletimini garanti edebilecek enerji verimli haberleşme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, GAA'da temel amaç veri toplamak [28] olduğundan yol güvenilirliğinin sağlanması enerji verimli çalışma gereksinimine göre daha yüksek önceliğe sahiptir. Söz konusu öncelik sebebiyle GAA protokollerinin enerji farkındalıklı, fakat yönlendirme tabanlı olarak tasarlanması daha uygun olacaktır. Sonuç olarak, GAA haberleşme başarımının iyileştirilebilmesi için diğer katman parametrelerini de (enerji, hız, sinyal kalitesi, vs.) dikkate alan katmanlararası etkileşimli yönlendirme protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

2.4. GAA'larda Yönlendirme

GAA'lar, uygulama senaryolarının çoğunda düğümlerin tamamının birbirleriyle doğrudan iletişim kurmasının mümkün olmadığı bir alanda dağıtılmış çok sayıda düğümden oluşmaktadır. Merkez istasyona yakın olan düğümler topladıkları verileri doğrudan iletebilmektedir. Fakat uzak noktalardaki düğümlere ait veriler hedefe uygun yollar üzerinden çoklu düğüm haberleşmesi kullanılarak aktarılmaktadır [29]. Yolların keşfedilmesi, yönetimi ve sürdürülmesi ise kullanılan yönlendirme protokollerinin sorumluluğundadır.

2.4.1. GAA yönlendirme protokollerinin sınıflandırılması

Algılayıcı ağlardaki yönlendirme protokolleri veri merkezli, hiyerarşik veya konum tabanlı olarak sınıflandırılabilmektedir [30]. Veri merkezli yönlendirmede gereksiz bilgilerin çoğu elenebilmektedir. Hiyerarşik protokollerde, merkez istasyona bağlı küme liderleri aldıkları verileri birleştirebilir, enerji tasarrufu için paket boyutlarını azaltabilir. Bu tür yönlendirme de küme lideri ya da ağ geçidi olarak seçilen düğümler; enerji, hafıza, veri işleme, gönderme hızı gibi özellikleri yönüyle, diğer algılayıcı düğümlere göre daha kabiliyetli cihazlar olması gerekmektedir. Konum tabanlı yönlendirmede ise; veriler ağın tamamına değil, konum bilgisi kullanılarak yalnız istenilen bölgelere aktarılmaktadır.

2.4.1.1. Veri merkezli yönlendirme

Yönlendirilmiş Yayılma [31]: Ağdaki gereksiz işlemlerin ve veri trafiğinin önüne geçmek amacıyla, merkez istasyon tarafından talep edilen verilerin özelliklerini içeren bir ilgi şeması yayınlanır. Her bir düğüm aldığı ilgi şemasını ön belleğinde tutar ve bu değerlerle algıladığı verileri karşılaştırır. İlgi kaydının içinde, başlatıldığı düğüme doğru, ters bir cevap yolu bulunmaktadır. Kaynak düğümdeki veriler bu yol üzerinden merkez düğüme ulaştırılır. Seçilen yolda, herhangi bir nedenle bağlantı hatası meydana gelirse, alternatif yollardan biri devreye sokulur. Bu protokolde veri haberleşmesi talep üzerine gerçekleştiğinden, düğümlerin enerjisi verimli kullanılmaktadır. Bununla birlikte, algılanan verilerin karşılaştırılması işlemi fazladan bir işlem yükü getirmektedir. Yönlendirilmiş yayılma, merkez düğüme sürekli veri akışının gerektiği uygulamalar için önerilemez.

SPIN [32]: Veriye sahip olan düğüm, ağdaki düğümler üzerinden bu verinin özelliklerini periyodik olarak ilan eder. Düğümlerin her biri potansiyel merkez düğüm niteliğindedir. Gereksiz veri trafiğinin önlenmesi amacıyla, veri talebi yalnızca merkez düğümler tarafından yapılabilir ve bir iletim işlemi de ancak bir merkez düğüm tarafından başlatılabilir. SPIN ailesinin asıl sürümleri SPIN1 ve SPIN2'dir. SPIN1 üç tür algılayıcı mesaja sahip, üç basamaklı bir iletişim kuralıdır. Algılayıcı mesaj türleri yeni veri ilan mesajı (ADV), veri talep mesajı (REQ) ve talep edilen veridir. Bu üç basamak için enerji tüketimleri belirli bir eşik değerinin altına düşmemek şartıyla düğümler iletişime katılabilirler. SPIN1 ile SPIN2 arasındaki tek fark bu eşik değerleridir. Topoloji değişimlerini yerelleştirerek hızlı uyum sağlaması ve gereksiz verileri bertaraf eden sorgu temelli yapısı olumlu özellikleri arasında sıralanabilir. Bununla birlikte, veri dağıtımının garanti edilememesi nedeniyle çoğu uygulamalar için elverişli değildir.

Enerji farkındalıklı yönlendirme [33]: Ağın yaşam süresini uzatmak amacıyla, paketlerin yönlendirilmesinde düğümlerde harcanan enerjinin en az olduğu alternatif yollar kullanılmaktadır. Düğümler yönlendirme tablolarındaki komşuları üzerinden merkez istasyona ulaşmak için maliyete dayalı bir olasılık hesabı yapmaktadır. Bu yöntem doğrudan yönlendirmeyle benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, enerji kullanımı açısından doğrudan yönlendirmeye göre daha elverişli olmasına rağmen, yollardaki kopmalara karşı yeterli dayanıklılığa sahip değildir.

ACQUIRE [34]: Çalışma şekli açısından doğrudan yönlendirmeyle benzer özellikler taşımaktadır. Merkez düğüm, her biri farklı durumlara yönelik alt sorgulardan oluşan, aktif bir sorgu yayınlar. Aktif sorgu ağ üzerinden düğümlere dağıtılır ve sorgunun bulunduğu düğüm aktif düğüm olarak adlandırılır. Sorguyu alan düğüm sahip olduğu eski verilerini günceller ve etrafındaki düğümlerden de topladığı verilerle sorgunun mümkün olan en fazla kısmını çözmeye çalışır. Bazı uygulamalar için bu veriler düğümlere özel de olabilir, yani her düğüm yalnız bir değişkeni izlemektedir. Bir kısmı çözülen sorgu rasgele ya da belirli kıstaslara göre (başarılı sorgu oranı gibi) seçilen bir başka komşu düğüme iletilir. Sorgu tamamen çözüldüğünde, geldiği yolun tersine ya da en kısa yol seçilerek, ilk üretildiği düğüme doğru sorgunun çözüldüğüne dair bir cevap mesajı gönderilir.

2.4.1.2. Hiyerarşik tabanlı yönlendirme

KAA'lardaki ölçeklenebilirlik ağ geçidi kullanılarak sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, geniş çaplı ağlarda gecikmelerin ve paket kayıplarının artması başarımın düşmesine neden olduğundan, hizmet kalitesini etkilemeden ölçeklenebilirlik çözümü için hiyerarşik yönlendirme önerilmiştir. Bu yöntemde, iş yüklerinin alt kümelere dağıtılmasıyla, enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

LEACH [17]: Hiyerarşik yönlendirme için önerilmiş ilk yaklaşımlardandır. Alt kümeler, komşu düğümlerden alınan radyo işaretlerinin SNR değerlerine bağlı olarak oluşturulmaktadır. Yerel merkezler olan küme liderleri (alt ağ geçitleri), haberleşme yükünü azaltmak için toplanan verileri birleştirme ve merkez istasyona yönlendirme işlevini yerine getirmektedir. Bununla birlikte, küme liderleri merkez istasyon ya da merkez istasyona yakın başka bir küme lideriyle haberleşebilecek özellikte olmalıdır. Yüksek güçle veri iletimi yapılması gerektiğinden, bu düğümlerdeki enerji tüketimi daha fazla olmaktadır. Düğümlerdeki güç tüketiminin dengelenmesi amacıyla, ağdaki diğer düğümler dönüşümlü olarak küme lideri olmaktadır. Gezgin düğümler üzerinden kümelerin oluşturulması ve sürdürülmesi çok zor olduğundan, gezginlik oranı yüksek olan GAA'lar için elverişli değildir.

PEGASIS [35]: Düğümler komşularından aldıkları verileri birleştirip merkez düğüme yönlendirerek gönderme trafiğini azaltmaktadır. Doğrudan merkez istasyonla sadece bir düğüm haberleşebildiğinden, bu düğüme kadar olan düğüm zincirinin uzun olması durumunda gecikmeler artacağı için elverişli değildir.

Aşamalı-PEGASIS [36]: Önceki sürümdeki paket gecikmelerini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Ağaç topolojisine benzer bir yapıyla, düğümler gelen verileri, kendi verileri ile birleştirerek, üst dallardaki düğümlere iletirler. Bir üst aşamada kendisi ile aynı işlemleri yapan iki düğüm yan yana geldiğinde, biri kendisindeki veriyi diğerine aktarır. Alınan veri ile kendi verisini birleştiren düğüm bir aşama daha yukarı çıkar. Kalan son düğüm lider olarak kabul edilir ve sahip olduğu veriyi merkeze iletir. Düğümlerin komşularından haberdar olması için sürekli topoloji desteği gerektiğinden, gezgin ve yoğun haberleşmenin olduğu ağlarda uygun değildir.

TEEN [37]: Algılama ortamında ani cereyan eden olaylara hızlı cevap verebilmek üzere tasarlanmıştır. Düğümler komşu düğümlerle, küme liderleri de kendi aralarında alt-kümeler oluştururlar ve bunlardan biri yeni grubun da lideri olur ve merkezle haberleşir. Ağ koordinatörü iki eşik değeri yayınlar. Haberleşme trafiğini azaltmak için, algılama değeri üst eşik değerine eşit ya da bu değerden büyükse ve değişim miktarı alt eşik değerine eşit ya da bu değerin üzerindeyse, algılanan veri küme liderine gönderilmektedir. TEEN'de ancak eşik değerlerini sağlayan verilerin aktarılmasına izin verildiğinden, algılanan verilerin sürekli olarak aktarılmasını gerektiren uygulamalar için uygun değildir. Periyodik veri toplama ve gerçek zamanlı olaylar göz önünde bulundurularak, TEEN'deki olumsuzlukları ortadan kaldırmak için APTEEN [38] geliştirilmiştir ve başarımın arttığı görülmüştür. Her ikisinde de işlemler ek yük getirir ve karmaşık yapıdadır.

Küme tabanlı yönlendirme [39]: Bu protokolde, düğümler kendi aralarında farklı gruplar oluştururlar ve aralarından biri küme lideri olur. Küme liderleri bir ağ geçidi ile haberleşmektedir. Ağ geçidinin düğümlerin konumlarını bildiği ve enerji sınırlamasının diğer düğümlere göre daha düşük olduğu varsayılmaktadır. Algılama verilerinin merkez düğüme aktarılacağı yol ağ geçidi tarafından belirlenir. Düğüm verilerini ağ geçidine ulaştırmak için TDMA tabanlı bir ortama erişim kontrol mekanizması kullanılır. Yönlendirme yolu belirlenirken ise, iki düğüm arasında bir maliyet fonksiyonu tanımlanır ve buna göre düğümlerle ağ geçidi arasındaki en az maliyetli yol bulunur. Algoritma, gecikmenin azaltılması için minimum haberleşme mesafesi zorlanmaktadır.

2.4.1.3. Konum tabanlı yönlendirme

KAA uygulamalarında düğümlerin konumları bilindiğinde düğümler arası mesafeler hakkında kestirim yapılabilir, veri paketleri tasarruflu olarak yönlendirilebilir ve haberleşme trafiği azaltılabilir. Bununla birlikte, algılayıcı ağlar için tasarlanmış konum tabanlı yönlendirme protokollerinin birçoğu enerji merkezli olmadığından KAA'lar için elverişli değildir.

MECN [40]: Düğümlerin hareketli olmadığı KAA'larda uygulanabilirliği yüksek bir algoritmadır. Düşük güç tüketimine sahip GPS kullanılarak enerji tasarruflu bir ağ kurulur. Her düğüm için, doğrudan yönlendirmeye göre daha az enerji harcanacak bir

aktarma bölgesi tanımlanır. Bir düğümün kapsamı, düğümün erişebildiği bütün aktarma bölgelerinin bileşimi alınarak belirlenir. Düğüm aktarma bölgesinde yerel bir tarama yapılarak olabildiğince az düğümden oluşan bir alt-ağ bulmak amaçlanır. İki boyutlu olarak düğümlerin konumları alınır ve maliyet ölçütünün güç tüketimi olduğu, Belmann-Ford en kısa yol algoritması kullanılarak en uygun yollar bulunur. Ağa yeni düğümlerin katılmasına ya da düğümlerin ağdan ayrılmasına aktif olarak uyum sağlanabilir. Yukarıdaki işlemlerin daha az düğümle başarılması amacıyla, MECN geliştirilerek SMECN [41] önerilmiştir. Enerji tüketiminin MECN'ye göre az olduğu görülmüştür; fakat az sayıda düğümden oluşan alt-ağlar bulmak sisteme ciddi bir ek yük getirmektedir.

GAF [42]: Yönlendirme güvenilirliğini etkilemeden ağdaki ihtiyaç duyulmayan düğümleri kapatarak enerji tasarrufu sağlanması amaçlanır. Kapsama alanı sanal karelere bölünür. Düğümler GPS donanımları ile bulundukları kareleri tespit ederler ve aynı karedeki düğümler eşdeğer olarak tanımlanır. Enerji tasarrufu için, eşdeğer düğümlerden biri hariç diğerleri kapanırlar ve güç tüketimini dengeleme amacıyla aktif düğüm sırayla değiştirilir. Düğümler komşularını tespit ettiği keşif, yönlendirme işleminde rol aldığı aktif ve haberleşme radyosunun kapalı olduğu üç durumdan herhangi birinde bulunur. GAF konum tabanlı bir algoritma olmasına rağmen, eşdeğer düğümlerin bulunduğu kareler bir küme olarak değerlendirilir ve bunları temsilen bir düğümün aktif olduğu düşünüldüğünde hiyerarşik yönlendirmeyle benzerlik gösterir. Fakat yönlendirme veriler birleştirilmeden yapılmaktadır.

GEAR [43]: Sorguların ağın tamamı yerine belirli bir bölgesine yönlendirilmesiyle, ağ trafiğinin azaltılması amaçlanmaktadır. Yönlendirme için komşu düğüm kestiriminde düğümlerin konum bilgileri kullanılır ve enerji ön planda tutulmaktadır. Düğümler, komşuları üzerinden hedefe doğru, kestirilen ve öğrenilen olmak üzere iki maliyet bilgisi tutmaktadır. Yönlendirme işlemi, paketin hedef bölgeye aktarılması ve hedef bölgede ilerlemesi olmak üzere iki kademede yapılır. Düğümler, paketleri en yakın komşularının üzerinden hedef bölgeye iletirler. Paket hedef bölgeye ulaştığında, sınırlandırılmış paket seli algoritması ya da özyineli konuma bağlı paket seli algoritması kullanılmaktadır. Bölge dört alt bölüme ayrılır, paketin kopyaları her birine gönderilir ve bu işlem bir düğüm kalana kadar devam ettirilir. Hedef düğüme ulaşıldığında öğrenilen maliyet bir önceki düğüme bildirmektedir.

2.4.2. GAA yönlendirme protokollerinin tasarımı

GAA'larda yönlendirme başarımını etkileyen en kritik problem ağdaki topoloji değişimleridir. Haberleşme sırasında ortaya çıkan, değişken topoloji kaynaklı bağlantı hataları paket kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Sabit KAA'larda topoloji değişimlerinin temel sebebi, genellikle enerjilerinin tükenmesi sonucu devre dışı kalan düğümlerdir. Fakat GAA'lardaki topoloji değişimlerinin başlıca sebebi, enerjisi tükenenlerden daha çok, tasarsız biçimde yer değiştiren düğümlerdir. GAA topolojilerindeki bu kararsızlık, veri iletim güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır. Güvenilir yönlendirme protokollerinin tasarlanması, GAA haberleşme başarımının iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, sabit KAA'lar için önerilen birçok yönlendirme protokolü bulunmasına rağmen [28]; bu protokollerin çoğu bahsedilen zayıf yönleri nedeniyle GAA uygulamalarında kullanılmak için uygun değildir. Bu nedenle, dinamik GAA yapısına uygun güncel yönlendirme protokollerinin tasarlanması gerekmektedir. Tasarlanan yönlendirme protokolünün GAA'ya uygunluğu temel olarak ağdaki düğümlerin donanımsal özelliklerine ve uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değerlendirilmektedir.

2.4.2.1. GAA yönlendirme protokollerinin tasarım gereksinimleri

Algılayıcı düğümler genellikle enerji, işleme ve depolama kapasiteleri açısından sınırlı kaynaklara sahip cihazlar olduğundan; tasarlanan protokollerin etkin kaynak yönetimi politikalarını içermesi gerekmektedir. Bununla birlikte, GAA'ların çoğu uygulamaya özgü olarak tasarlandığından protokollerin tasarım gereksinimleri de ilgili uygulamaya göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, aşağıdaki temel tasarım gereksinimlerinden bir kısmı ya da tamamı, GAA'lar için tasarlanan yönlendirme protokollerinde göz önünde bulundurulmalıdır:

Gezginlik: GAA'larda, uygulamaya bağlı olarak düğümler merkez istasyon veya izlenecek olay ya da varlık hareketli olabilmektedir. Yönlendirme protokollerinin, söz konusu dinamik yapıdan kaynaklanan sorunlarla baş edebilmesi oldukça zordur; fakat güvenilir haberleşme için gerekli desteği sağlaması beklenmektedir.

Düşük güç tüketimi: Algılayıcı düğümler, pil gücüyle çalıştıkları için, enerji kapasiteleri sınırlıdır. GAA'lar için tasarlanan yönlendirme protokolleri, diğer başarım beklentilerinin yanı sıra; düğümlerin ve dolayısıyla tüm ağın ömrünü uzatmak için, sınırlı olan enerji kaynaklarını olabildiğince verimli kullanmalıdır.

Güvenilirlik: Gezginlik, enerji tükenmesi veya zayıf bağlantı kalitesi vb. sebeplerle devre dışı kalan düğümlerden dolayı GAA'lar dinamik bir ağ topolojisine sahiptir. Tasarlanan yönlendirme protokolleri topoloji değişiklikleri ve düğüm hatalarına karşın uçtan uca paket iletim güvenilirliğini sağlayabilmelidir.

Uyarlanabilirlik: GAA'larda, herhangi bir zamanda, bazı düğümlerin devre dışı kalması, ağın dışına çıkması veya ağa katılması, düğüm yoğunluğunda ve ağ topolojisinde değişikliklere neden olmaktadır. Bu durumda, GAA için tasarlanmış yönlendirme protokolleri, yoğunluk ve topoloji değişimlerine karşı uyarlanabilir olmalıdır.

Veri birleştirme: Birbirlerine yakın mesafedeki düğümler, yüksek miktarda gereksiz veri oluşturabileceğinden; düğümlerden alınan benzer paketler birleştirilerek, ağ trafiği azaltılabilir. Veri birleştirme, yönlendirme protokollerinde enerji tasarrufu sağlanması ve veri aktarımının iyileştirmesi amacıyla kullanılabilmektedir.

Servis kalitesi: Farklı GAA uygulamalarının, gecikme ve paket kayıpları açısından, farklı servis kalitesi (QoS) gereksinimleri olabileceğinden; söz konusu uygulamaların QoS gereksinimleri göz önünde bulundurmalıdır.

2.4.2.2. GAA yönlendirme protokollerinin tasarım problemleri

GAA'lar için yönlendirme protokollerinin tasarımında; enerji, bant genişliği, işleme ve depolama gibi, ağ kaynakları ile ilgili bilinen sınırlamalara ek olarak farklı ağ kısıtlamaları nedeniyle çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Bu kısıtlamaların bir sonucu olarak ortaya çıkan tasarım problemlerinden bazıları aşağıda belirtilmektedir [44]:

Gezginlik ve yol güvenilirliği: GAA'larda, düğümler gürültülü, hata eğilimli ve zamanla değişen bir kablosuz ortam yoluyla birbirlerine bağlanmaktadır. GAA'lar kablosuz ortam haberleşmesinin yanı sıra; enerjisi tükenen, ağa eklenen ya da ayrılan gezgin düğümlerden dolayı, dinamik bir ağ topolojisine sahiptir. Bu durumda,

başarılı veri iletimi, güvenilir yolların kullanılmasına; yol güvenilirliğinin garanti edilebilmesi ise, topoloji değişimine neden olan tüm etmenlerin hesaba katılmasına bağlıdır. Yol güvenilirliği, başarılı paket iletimi, uçtan uca paket gecikmesi ve enerji verimliliği açısından yönlendirme başarımını doğrudan etkilemektedirler.

Sınırlı kaynaklar: Algılayıcı düğümler, pil gücüyle çalıştıkları için, sınırlı enerji kaynaklarına sahiptir. Pillerin değiştirilmesi ya da yeniden şarj edilmesi, genellikle çok zor veya imkânsız olduğundan; enerji tüketimi büyük bir sorun teşkil etmektedir. Ayrıca, düğümler, enerji kapasitelerinin yanı sıra, işleme ve depolama kabiliyetleri yönüyle de sınırlı olduğundan, sadece düşük seviyeli hesaplama fonksiyonlarını gerçekleştirebilirler. Donanımsal sınırlamalar, GAA yazılımlarının geliştirilmesini ve yönlendirme protokollerinin tasarımını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, tasarımlarda, düğümlerin yalnız enerji değil, işleme ve depolama kapasiteleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Düğümlerin konum bilgisi: Yönlendirme protokollerinin tasarımında karşılaşılan başka bir sorun, düğümlerin güncel konum bilgilerinin sağlanması ve yönetilmesidir. Konum bilgisi gerektiren protokollerde, güncel konum bilgisi için, küresel konumlandırma sistemi (GPS) alıcılarının veya konum belirleme tekniklerinin kullanıldığı varsayılmaktadır. Fakat GPS alıcıları kapalı ortamlarda kullanılamadığı gibi, enerji tüketimini de artırmaktadır. Konum belirleme teknikleri ise, işlem kabiliyeti sınırlı olan algılayıcı düğümlerde, çalıştırılması oldukça güç olan karmaşık algoritmalar içerebilmektedir. Söz konusu zorlukların aşılabilmesi için konum bilgisi gerektirmeyen ya da konum belirleme için basit algoritmalar kullanan protokoller tasarlanmalıdır.

Ölçeklenebilirlik: Tasarsız biçimde hareket eden düğümler herhangi bir anda ağa dâhil olabilir ya da ağdan ayrılabilir veya bir bölgede yoğun ya da seyrek halde bulunabilirler. Bu nedenle, ağın durumuna göre yönlendirme protokollerinin ölçeklenebilirliği mümkün olmalıdır. Ayrıca, düğümler enerji, işleme, algılama ve iletişim açısından aynı özelliklere sahip olmayabilir. Bu nedenle, bağlantılı iki düğüm arasında çift yönlü haberleşme mümkün olmayabilir. Yönlendirme protokollerinde, bu durum da dikkate alınmalıdır.

2.4.2.3. GAA yönlendirme protokollerinin başarım ölçütleri

GAA'larda yönlendirme protokollerinin değerlendirilebilmesi için, öncelikle başarım ölçütlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde sunulan başarım ölçütleri, değerlendirilecek protokolün karakteristik özelliklerine bağlı olarak seçilmektedir. Söz konusu başarım ölçütleri aşağıda kısaca açıklanmaktadır:

Paket dağıtım oranı (PDO), uçtan-uca paket iletim başarımını ve bağlantı kalitesini ölçmek için kullanılan temel ölçütlerden biridir. Denklem (2.1)'de ifade edildiği gibi, merkez istasyon tarafından alınan tekrarsız toplam paket sayısının (γ), kaynak düğümler tarafından gönderilen toplam paket sayısına (λ) oranıdır. Diğer bir deyişle, başarıyla alınan paket yüzdesidir.

$$PDO = \frac{\gamma}{\lambda} \times 100 \tag{2.1}$$

Uçtan-uca paket gecikmesi (UUG), bir paketin hedefe ulaşıncaya kadar geçen süre olarak ifade edilebilir. Bu süre, paketin kuyrukta bekletilme, çekişme ve iletim esnasında geçirdiği sürelerin toplamını içermektedir. Denklem (2.2)'de belirtildiği gibi uçtan-uca gecikme, bir paketin ilk bitinin kaynakta üretilmesi (η_1) ile merkez istasyon tarafından son bitinin alınması (η_2) arasında geçen toplam süre olarak tanımlanır.

$$UUG = \eta_2 - \eta_1 \tag{2.2}$$

Ortalama enerji tüketimi, merkez istasyon tarafından alınan bir paketin iletimi sürecinde harcanan toplam enerji miktarıdır. Tüm paketlerin iletimi için harcanan toplam enerjinin, alınan paket sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Elde edilen değerin küçük olması, protokolün enerji verimliliğinin yüksek olduğu anlamını taşımaktadır.

Atlama sayısı, çoklu düğüm haberleşmesinde, aktarılan bir paketin hedefe ulaşana kadar geçtiği düğüm sayısıdır. Bu ölçüt, paket bazında yönlendirme başarımını ifade eder. Elde edilen değerin küçük olması, ilgili yolun kısa ve maliyetinin düşük olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte; en kısa yol algoritması, genellikle ağdaki enerji tüketiminin dengelenmesi prensibi ile çatışmaktadır.

2.5. GAA'larda Katmanlararası Etkileşimli Yönlendirme

Literatürde, algılayıcı ağlar için önerilen, ayrık katmanlı mimarinin benimsendiği, birçok yönlendirme protokolü bulunmaktadır [45-48]. Ayrık katmanlı protokollerde, yönlendirme başarımının iyileştirilmesi için yalnız ağ katmanı parametreleri hesaba katılmaktadır. Bu nedenle, iyileştirilmek istenen ölçütler açısından yüksek başarım elde edilebilirken; bu iyileştirmenin genel başarıma etkisi dikkate alınamamaktadır. Örneğin; GAA'lar gibi dinamik sistemlerin başarımını etkileyen faktörler de oldukça dinamik bir yapıya sahip olduğundan; bir katmanda meydana gelen değişimler, diğer katman parametrelerini de etkilemektedir.

Katmanlararası etkileşimli yönlendirme protokollerinde, ağ katmanında verilecek bir kararın diğer katman parametreleriyle desteklenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, bir çeşit kapalı çevrim kontrol sistemi oluşturularak, birbirinden bağımsız olarak yapılan iyileştirmeler arasındaki uyumsuzlukların ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Aşağıda konuyla ilgili olarak birkaç tasarım örneği sunulmaktadır:

Uygulama ve ağ katmanlarının etkileşimi: Alıcı tabanlı yönlendirmede, ağ katmanında düğümün hızı ve enerji seviyesi gibi uygulama katmanı parametreleri değerlendirilir. Değerlendirme sonucuna göre düğüm ilgili yönlendirme sürecinin bir üyesi olup/olmamaya doğrudan kendisi karar vermektedir.

Uygulama, ulaşım, veri-bağı ve fiziksel katmanların etkileşimi: Düğümün hızı, paket boyutu ve ortam koşulları değerlendirilerek; paketlerin küçük parçalara ayrılmasına ya da düğümün gönderim gücünün değiştirilmesine karar verilir. Örneğin, büyük paketler için daha yüksek gönderim gücü seçilerek [8], zayıf bağlantı kalitesi nedeniyle ortaya çıkan paket kayıpları azaltılabilir. Diğer taraftan, dinamik ağ koşulları dikkate alındığında, alt parçalara ayrılarak gönderilen paketlerin başarılı iletim olasılığı daha yüksektir. Ayrıca, alt parçaların iletiminde yaşanan paket kayıpları daha düşük maliyetle telafi edilebilir.

2.6. Sonuç

GAA'lar, bulundukları çevrelerdeki fiziksel değişimler hakkında bilgi toplamak amacıyla, genellikle rastgele veya planlı olarak dağıtılmış çok sayıda algılayıcı

düğümden meydana gelmektedir. Düğümlerde toplanan veriler, doğrudan ya da çoklu düğüm haberleşmesi kullanılarak bir merkez istasyona aktarılır.

GAA'lar, düğümlerin hareketli olması ve değişken kablosuz bağlantı kalitesi gibi nedenlerden dolayı, oldukça dinamik bir yapıya sahiptir. Sabit KAA sistemlerindeki temel problemler, harcanan enerjinin ve paket gecikmelerinin azaltılması iken; GAA'larda, bunlara ek olarak, paket iletimi esnasında düğümler arasındaki bağlantının korunması ve ağın sürdürülmesi problemleri öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, GAA'lardaki temel amaç veri toplamak olduğundan, yol güvenilirliğinin sağlanması, enerji verimli çalışma gereksinimine göre daha yüksek önceliğe sahiptir. Söz konusu öncelik sebebiyle, GAA protokollerinin, yönlendirme tabanlı olarak tasarlanması daha uygun olacaktır.

Ayrık katmanlı protokollerde, yönlendirme başarımının iyileştirilmesi için yalnız ağ katmanı parametreleri hesaba katılmaktadır. Fakat GAA'lar gibi dinamik sistemlerin başarımını etkileyen faktörler de oldukça dinamik bir yapıya sahip olduğundan; bir katmanda meydana gelen değişimler, diğer katman parametrelerini de etkilemektedir. Bu nedenle, GAA'lar için önerilen yönlendirme protokollerinin verimli olarak çalışabilmesi, katmanlararası etkileşime bağlıdır.

3. KATMANLARARASI ETKİLEŞİMLİ YENİ BİR GAA YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ

3.1. Giriş

Ağdaki düğümlerin tasarsız biçimde yer değiştirebildiği GAA'larda, toplanan verilerin gezgin düğümler üzerinden aktarılması sürecinde, başarılı veri iletimi için ilgili yol güvenilirliğinin sağlanması istenir. Çoklu düğüm haberleşmesinde, güvenilir yolların keşfedilmesi ve güvenilirliğinin sürdürülmesi ise yönlendirme protokollerinin ana işlevleri arasında yer almaktadır.

Geleneksel KAA sistemleri için geliştirilen yönlendirme protokollerinin tasarımında genellikle ayrık katmanlı ağ mimarisi esas alınmaktadır. Ancak, katmanlı yaklaşım, GAA'lar gibi dinamik ağ sistemlerindeki değişken koşullara kolaylıkla ve kısa zamanda uyum sağlayamamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda katmanlararası etkileşimli yaklaşımların geliştirilmesi üzerinde durulmaktadır.

GAA'lar için katmanlararası etkileşimli protokollerin geliştirilmesinde temel olarak iki yöntem izlenmektedir. Birincisi, katmanlı mimari yapısı korunmak üzere, etkileşimli çalışma esnasında ilgili katmanlar arasındaki bilgi paylaşımını sağlayacak arayüzlerin ya da parametrelerin kullanılmasıdır. İkincisi ise, henüz tasarım aşamasında uygun değişiklikler yapılarak farklı katmanların yalnız bir katman içerisinde birleştirilmesidir [15]. Bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşımda, önerilen protokole esnek kullanım özelliği kazandırmak için birinci yöntem esas alınmıştır.

Bu bölümde, önerilen tez çalışması kapsamında OSI referans modelinin beş katmanı arasındaki etkileşimi esas alan GAA'lar için katmanlararası yeni bir yönlendirme protokolünün tasarımı ve benzetim modeli detaylı olarak açıklanmaktadır. Önerilen bu protokol, Gezginlik Uyarlanabilir Katmanlararası Yönlendirme (Mobility Adaptive Cross-layer Routing) olarak adlandırılmıştır ve "MACRO" kısaltması ile tezin ilerleyen bölümlerinde ifade edilmektedir.

3.2. Önerilen MACRO Yönlendirme Protokolü

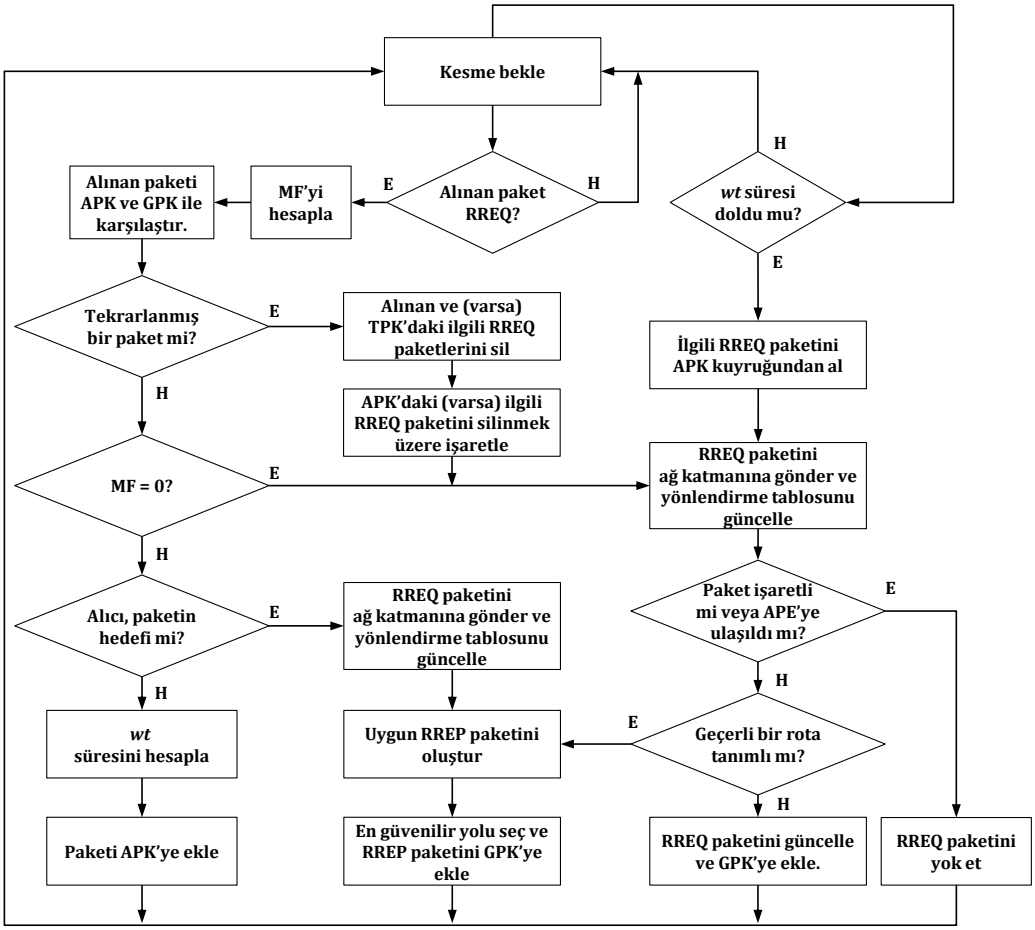
3.2.1. Geliştirilen yol-yön (rota) keşif algoritması

Literatürde, gezgin tasarsız ağlar için önerilen çok sayıda yönlendirme protokolü bulunmaktadır [49]. Bu protokollerde, paketlerin yönlendirileceği uygun yolların keşfedilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ağdaki düğümlerin ya da merkez istasyonun konumlarının bilinemediği ya da belirlenemediği uygulamalarda, yeni yolların keşfedilmesi için genellikle taşma (flooding) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yol-yön keşfi için kaynak düğüm tarafından bir yol talep (RREQ) paketi üretilir ve yayınlanır. Yayınlanan RREQ paketinin ağdaki diğer düğümler üzerinden merkez istasyona ulaştırılması esas alınmaktadır. Teorik olarak, RREQ paketi son düğüme ya da merkez istasyona ulaşıncaya kadar paketi alan düğümler tarafından güncellenerek yayınlanmaktadır. Ancak, söz konusu yöntem genellikle tıkanıklıklara, paket çarpışmalarına ve gereksiz paket iletimine sebep olmaktadır [50].

Yol-yön keşif paketlerinin yayılması ile ilgili yukarıda bahsedilen problemlerin aşılması ve verimli yönlendirme için bu tez çalışması kapsamında yeni bir RREQ paket iletim yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemle, aynı anda çekişmeye giren düğüm olasılığı ve gereksiz paket iletimi azaltılarak ağdaki paket çarpışmaları ve tıkanıklık önlenmektedir. Ayrıca, ağdaki gereksiz paket alımı ve gönderimi de azaltıldığından gezgin düğümlerde enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ek-A'da program kodları sunulan, önerilen MACRO protokolünün yol-yön keşif algoritmasının çalışması aşağıda açıklanmaktadır.

GAA'larda uç düğüm olarak adlandırılan gezgin düğümler çevrelerindeki fiziksel değişimleri izleyerek bunlara uygun anlamlı veri paketleri üretmektedirler. Bir uç düğüm (kaynak) ürettiği veri paketini merkez istasyona (hedef) iletmek istediğinde, hedefe ulaşmak için yönlendirme tablosunda tanımlanmış bir yolun varlığını kontrol etmektedir. Tanımlı bir yol varsa, paket bu yol üzerinden hedefe ulaştırılmak üzere gönderilmektedir. Tanımlı yol olmaması durumunda ise, yeni bir yolun keşfedilmesi için RREQ paketi üretilir ve yayınlanır. Komşu düğümler, fiziksel katmandan aldıkları RREQ paketini veri-bağı katmanına aktarırlar. Veri-bağı katmanı ortama erişim kontrol (OEK) ve mantıksal bağ kontrol (LLC) olmak üzere iki alt katmanın birleşiminden oluşmaktadır. Önerilen MACRO protokolünde yalnız OEK katmanı

için tasarımlar yapıldığından bundan sonraki açıklamalarda veri-bağı yerine OEK katmanı ifadesi kullanılmaktadır. Buraya kadar uygulanan süreçler, geleneksel talebe dayalı yönlendirme protokollerinde kullanılan temel yol keşif yöntemindekiyle aynıdır. Bu noktadan itibaren, geleneksel yaklaşımın aksine önerilen MACRO protokolü gereksiz paket iletiminden kaçınarak, hedefe giden en kısa yolu bulmak için fiziksel, veri-bağı ve ağ katmanlarının etkileşiminden ve işbirliğinden faydalanmaktadır. Ayrıca, MACRO protokolü OEK katmanı için iki ayrı kuyruk kullanımı gerektirmektedir. Birincisi, alınan RREQ paketlerinin geçici olarak tutulduğu Alınan Paket Kuyruğu (APK) diğeri ise, iletilecek tüm paketlerin tutulduğu Gönderilecek Paket Kuyruğu'dur (GPK). Geliştirilen algoritmanın akış şemasında gösterilen (Şekil 3.1) çalışma aşamaları aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 3.1. MACRO protokolüne ait yol-yön keşif algoritmasının akış diyagramı

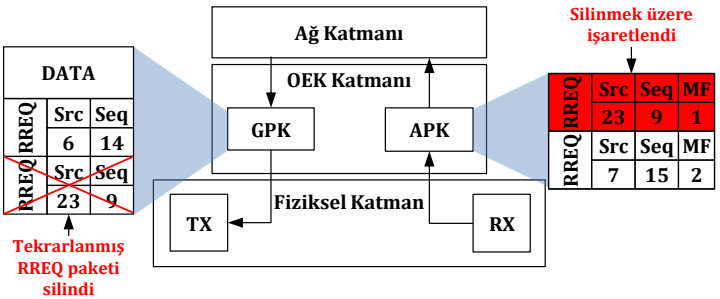
Önerilen MACRO protokolünde, komşu düğümler tarafından alınan RREQ paketleri hemen ağ katmanına gönderilmemektedir. Öncelikle, RREQ paketini alan düğümün yayın önceliğinin belirlenmesi amacıyla, Mesafe Faktörü (MF) hesaplanır. MF,

RREQ paketinin gönderildiği düğüm ile alındığı düğüm arasındaki tahmini mesafeyi temsil eden 0, 1, 2 veya 3 sayılarından birine karşılık gelir. En uzaktaki düğümler en küçük MF değerine sahip olurlar. Ayrıca, eşit MF değerlerine sahip düğümlerin, eşit öncelik düzeyinde olduğu kabul edilmektedir ve yalnız eşit önceliğe sahip düğümler ortama erişim için çekişmeye girmektedir. Düğümlerin MF değeri her yeni RREQ paketi için tekrar hesaplanmaktadır. İki komşu düğüm arasındaki MF değeri Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanır.

$$MF = floor\ \frac{(\ RSSI - m\ )}{e} \tag{3.1}$$

Denklemde verilen RSSI parametresi gelen RREQ paketine ait alınan sinyalin güç seviyesini; μ bir paketin başarılı olarak kabul edilmesi için gereken en düşük sinyal gücü eşiğini; ε ardışık iki gönderim gücü seviyesi arasındaki farkı temsil etmektedir. Buradaki tüm değerler dBm cinsindendir.

Hesaplanan MF değeri 0 ya da RREQ paketini alan düğüm bu paketin hedefi ise, alıcı düğümün birinci yayın önceliğine sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda, alınan RREQ paketi doğrudan ağ katmanına gönderilmektedir. MF değeri 0'dan büyük bir değere sahipse ve alıcı düğüm RREQ paketinin hedefi değilse, alınan RREQ paketi, daha önceden alınarak APK'da ve GPK'da bekletilen diğer RREQ paketleri ile karşılaştırılır. Alınan paketin, daha önceden alınan bir kopyası GPK'da bulunuyorsa, hem alınan hem de GPK'daki paketlerin her ikisi de iptal edilir. Fakat alınan RREQ paketinin bir kopyası APK'da bulunuyorsa, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, sadece alınan paket iptal edilir. APK'daki paket ise, işlendikten sonra silinmek üzere işaretlenir ve ağ katmanına gönderilir. Ağ katmanında, içindeki yönlendirme verilerinin alınmasının ardından yok edilir.



Şekil 3.2. APK ve TPK kuyruklarının çalışması

Her iki kuyrukta da alınan RREQ paketinin hiçbir kopyası bulunmuyorsa; alınan paket, Denklem (3.2) ile hesaplanan bekletilme süresinin (wt: waiting time) sonunda ağ katmanına gönderilmek üzere alıcı düğümün APK kuyruğuna eklenir.

$$wt = MF\left(\alpha + 32 \times \beta\right) \tag{3.2}$$

Burada MF mesafe faktörünü; α alınan RREQ paketinin iletilmesi için gereken süreyi; β ise erteleme işlemlerinde kullanılacak olan bir zaman dilimine ait süreyi ifade etmektedir. Denkleme sabit olarak eklenen 32 katsayısı ise, benzetim çalışmaları esnasında deneysel olarak elde edilmiş bulunmaktadır ve bir RREQ paketinin tekrar gönderilmesinden önceki en yüksek çekişme süresini belirtmektedir. Böylece, en büyük MF değerine sahip olan paketin en fazla bekleyeceği açıkça anlaşılmaktadır.

Yayın önceliği olan ya da APK'daki bekleme süresi dolan RREQ paketleri, işlenmek üzere ağ katmanına gönderilmektedir. Ağ katmanında, paket içerisindeki bilgiler doğrultusunda düğümün yönlendirme tablosu güncellenmektedir. Ardından, düğüm yönlendirmeye katılıp katılmama kararını vermektedir. Düğüm, bu kararın alınması sürecinde, ilk olarak, söz konusu paketin daha önceden alınıp alınmadığının kontrol edildiği bir döngü denetimi yapmaktadır. Aynı zamanda, belirli bir zaman aralığı içerisinde, bu düğüm tarafından üretilen ve yönlendirilen veri paketlerinin toplam sayısının tutulduğu Aktarılan Paket Eşiği'nin (APE) aşılıp aşılmadığı da kontrol edilir. APE, tıkanıklık denetimi için ağ ve ulaşım katmanları arasında paylaşılan bir parametredir [15]. Bu kontroller sonucunda, bir döngünün oluştuğu ya da APE'nin aşıldığı tespit edilirse; alınan RREQ paketi yok edilir ve düğüm yönlendirmeye katılmaz. Bir döngü tespit edilmediyse veya APE aşılmadıysa, düğüm yönlendirmeye katılma kararı alır. Bu aşamada, yönlendirme tablosunda, ilgili paketin hedefine doğru bir yolun bulunup bulunmadığı kontrol edilir. Eğer uygun yol/yollar bulunuyorsa, bir Yol Cevap (RREP) paketi üretilir; diğer durumda ise, alınan RREQ paketinin "Önceki Düğüm", "Sıra Numarası" ve "Atlama Sayısı" kısımları güncellenir. Ardından, alınan RREQ paketine karşılık olarak gönderilecek paket (RREP ya da güncellenmiş RREQ paketi) OEK katmanına aktarılır.

OEK katmanında; alınan bir RREQ paketinin yeniden gönderilmesi sürecinde, yalnız aynı *MF* değerine sahip olan düğümler çekişmeye gireceğinden, tıkanıklık ve paket

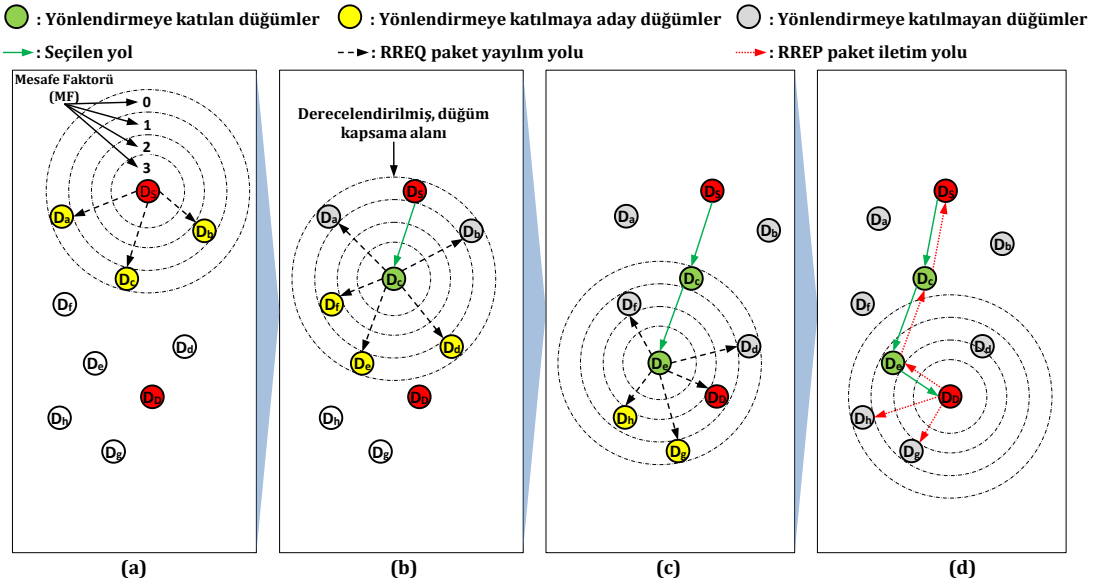
çarpışma olasılığı azalmaktadır. Kablosuz haberleşme ortamı için çekişen düğümler, paket çarpışmalarının önlenmesi için iletimden önce rastgele bir süre beklerler. Öte yandan, önerilen MACRO protokolünde ise bilinenden farklı olarak bu süre için bit üst sınır belirlenmiştir. Bu nedenle, düğümler iletim işlemini başlatmadan önce, en fazla 32 zaman dilimi süresi kadar beklemektedir. Çekişmeyi kazanan düğüm, diğerlerinden daha önce RREQ paketini göndermektedir. Eğer bu paket, aynı paketin bir kopyasını göndermek üzere bekleyen başka düğümler tarafından alınırsa, bu düğümler bekleyen RREQ paketini ve gönderme işlemlerini iptal ederler. RREQ paketi hedef düğüme ya da buraya ulaşmak için uygun yola sahip başka bir düğüme ulaşıncaya kadar yukarıda bahsedilen süreçler tekrarlanmaktadır.

Bir RREQ paketi hedef düğüm ya da buraya ulaşmak için uygun bir yola sahip düğüm tarafından alınırsa, bu talep paketine karşılık bir RREP paketi üretilir. Üretilen RREP paketi talep paketinin alındığı yol üzerinden kaynağa iletilmek üzere gönderilir. Eğer düğümün yönlendirme tablosunda birden fazla yol tanımlıysa, RREP paketinin aktarılacağı yol, bir sonraki alt bölümde detaylandırılan paket yönlendirme algoritmasındaki yol-yön seçim süreçleri kullanılarak belirlenmektedir. Bu algoritma, yolların tazelik, atlama sayısı ve güvenilirlik katsayısı parametrelerini göz önünde bulundurarak güvenilir yolların seçilebilmesini sağlamaktadır. RREP paketi kaynağa ulaşıncaya kadar aynı işlemler tekrar edilmektedir.

Önerilen MACRO protokolünün yol-yön keşif algoritması, Şekil 3.3'te verilen yeni oluşturulmuş örnek bir GAA yol keşif senaryosu üzerinden açıklanmaktadır. Başlangıçta, kaynak düğüm D_S, hedef düğüm D_D'ye gönderilmek üzere bir veri paketine sahiptir; ancak, D_S'nin yönlendirme tablosunda uygun ve tanımlı bir yol bulunmamaktadır. Bu durumda, veri paketini hedef düğüm D_D'ye ulaştırılabilmesi için yeni bir yol bulunması gerektiğinden D_S bir RREQ paketi üretir ve yayınlar.

Şekil 3.3.a'da görüldüğü gibi, bu paket D_S'nin haberleşme alanı içerisinde farklı mesafelerde bulunan komşuları D_a, D_b ve D_c düğümleri tarafından alınır. Paketi alan bu düğümler öncelikle mesafe faktörünü (MF) hesaplar. Şekil 3.3.a'dan anlaşılacağı gibi, D_a ve D_c düğümlerinin D_b düğümüne göre yayın önceliği bulunmaktadır. D_a ve D_c düğümlerinin her ikisi de aynı MF değerine sahip oldukları için RREQ paketlerini yayınlamak için yalnız bu iki düğüm çekişmeye girmektedir. Bu esnada D_b düğümü

kendi paketinin iletimi için bekleme süresinin (wt) bitmesini beklemektedir. İletim hakkını kazanan düğüm (burada D_c), ağ katmanında güncellenen RREQ paketini yayınlar. Yayınlanan RREQ paketi D_c düğümünün haberleşme alanı içerisindeki komşuları D_a, D_b, D_d, D_e ve D_f düğümleri tarafından alınır.



Şekil 3.3. MACRO protokolüne ait bir yol-yön keşif işlemi örneği

Şekil 3.3.b'de görüldüğü gibi, D_a ve D_b düğümleri göndermek üzere bekledikleri RREQ paketlerinin yeni bir kopyasını almışlardır. Bu durumda, gereksiz paket yayılımını önlemek için, her iki düğüm de kuyrukta bekleyen ilgili RREQ paketlerini yok ederek gönderme işlemlerini iptal ederler. Aynı zamanda, eşit yayın önceliğine sahip olan D_e ve D_d düğümleri kablosuz haberleşme ortamı için çekişmeye girerler.

Çekişmenin galibi olarak iletim hakkını kazanan düğüm (burada D_e), güncellenen RREQ paketini komşularına gönderir. Bu paketi, hedef düğüm D_D'nin yanı sıra D_d, D_f, D_g ve D_h düğümleri de alır. D_d ve D_f düğümleri, göndermek üzere bekledikleri RREQ paketinin bir kopyasını tekrar aldıkları için kuyruktaki RREQ paketlerini yok ederek gönderme işlemlerini iptal ederler. Aslında, Şekil 3.3.c'de görüleceği gibi, yayınlanan RREQ paketi D_c düğümü tarafından da alınmıştır. Gönderdiği bir RREQ paketini yeniden alan düğüm, yol üzerinde bir döngü oluşmaması için bu paketi yok etmektedir. Diğer bir ifade ile D_c düğümü de aldığı RREQ paketini yok eder.

Hedef düğüm D_D, gelen talep paketine karşılık olarak bir RREP paketi üretir ve kaynak düğüm D_S'ye iletilmek üzere D_e düğümüne gönderir (Şekil 3.3.d). Bununla

birlikte, gönderilen RREP paketi, RREQ yayını için bekleyen D_g ve D_h düğümleri tarafından da alınır. Yol-yön keşif işleminin tamamlandığına karar veren D_g ve D_h düğümleri gereksiz paket yayılımını önlemek için kuyrukta bekleyen ilgili RREQ paketlerini iptal ederler.

Geliştirilen yol-yön keşif algoritması ile gereksiz paket iletiminin önlenmesinin yanı sıra hem güvenilir hem de en düşük maliyete sahip (maliyet-etkin) yolun bulunma olasılığı artırılabilmektedir. Bir RREP paketi, kaynak düğüm tarafından alındığında, düğüm, yol bilgisini yönlendirme tablosuna ekleyerek ilgili paketin iletim sürecini başlatır.

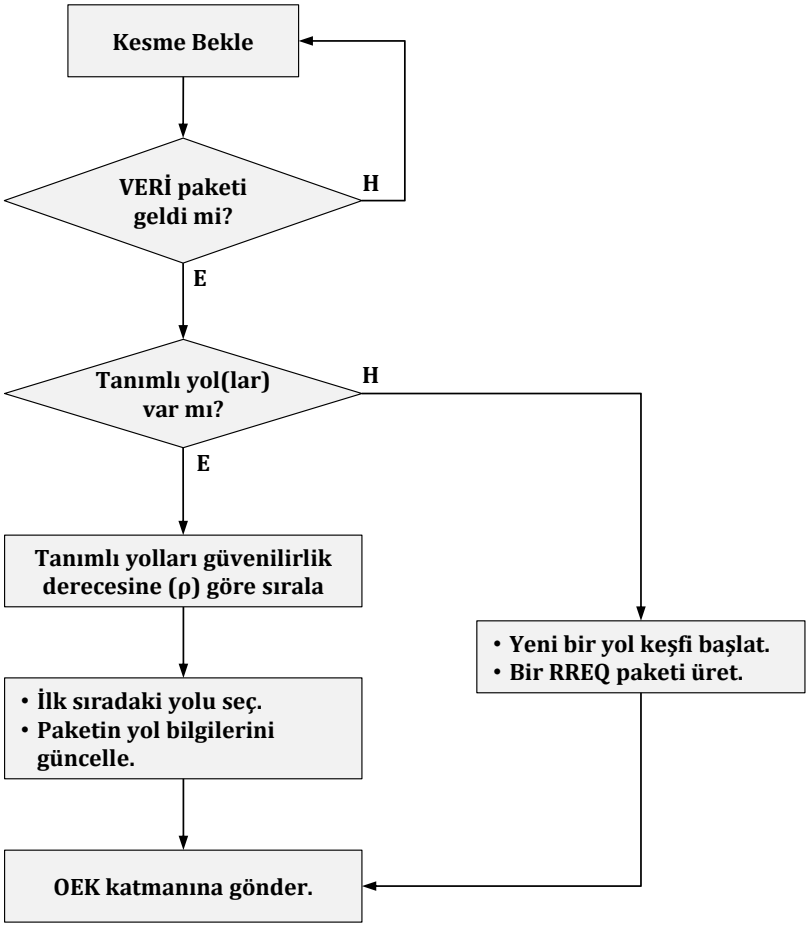
3.2.2. Geliştirilen paket yönlendirme algoritması

Algılayıcı düğümler, kendilerine ait paketlerin yanı sıra ağdaki diğer düğümlere ait paketleri de merkez istasyona aktarmaktadırlar. Paketlerin aktarılacağı güvenilir yolların seçilebilmesi için yeni bir paket yönlendirme algoritması (Şekil 3.4) geliştirilmiştir. Veri paketine sahip olan bir düğüm, öncelikle yönlendirme tablosunda bu paketi hedefe başarılı olarak ulaştırmak için geçerli olasılığa sahip bir yolun bulunup bulunmadığını kontrol etmektedir. Uygun bir yol bulunursa, paket bu yol üzerinden gönderilmek üzere bir sonraki düğüme aktarılmaktadır. Eğer yönlendirme tablosunda birden fazla yol bulunuyorsa; geliştirilen paket yönlendirme algoritması kullanılarak (Ek-A) bunlar arasından en güvenilir olanı seçilmektedir. Seçim işleminde, ilgili yollar Denklem (3.3)'ten elde edilen ρ değerlerine göre azalan sırada derecelendirilmektedir.

$$\rho = \begin{cases} \delta^2 / (f)^2 \tau & (f > 0) \\ \delta & (f = 0) \end{cases} \tag{3.3}$$

Burada ρ ilgili yolun güvenilirlik derecesini; φ atlama sayısını; τ yolun eklenme zamanından itibaren geçen süreyi (yolun tazeliğini); δ ise genel güvenilirlik göstergesini ifade etmektedir. Genel güvenilirlik göstergesi, ilgili yol üzerindeki en zayıf bağlantının güvenilirlik seviyesini temsil eden ve 0 ile 255 arasında değişen bir katsayıdır. Bu katsayının aktarılabilmesi için ağ katmanı paketleri içerisinde 8 bitlik bir alan ayrılmaktadır. İlgili paketin aktarıldığı her düğüm tarafından kontrol edilmektedir ve gerektiğinde güncellenmektedir. Yolların derecelendirme ve

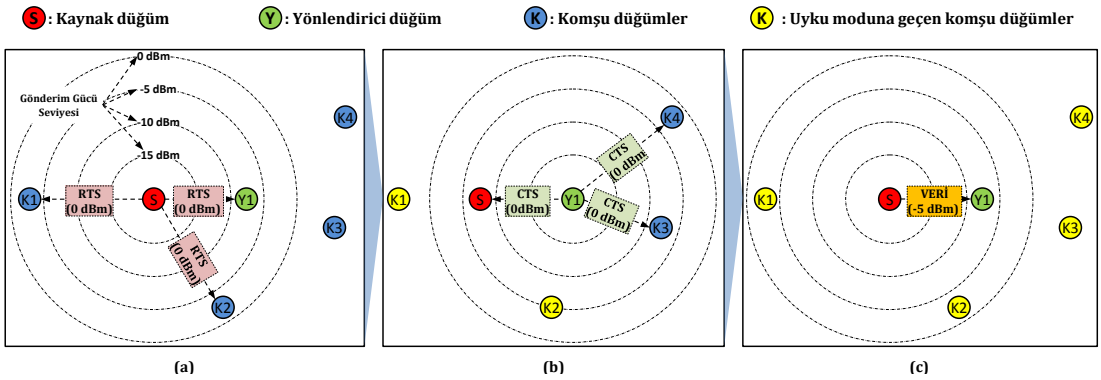
sıralanma işleminin tamamlanmasının ardından; maliyet ve güvenilirlik açısından en uygun yol yeni oluşturulan listenin ilk sırasında yer almaktadır. İletim için söz konusu yol seçilir ve veri paketinin yol bilgileri buna göre güncellenir. Veri paketi bu yol kullanılarak merkez istasyona ya da yönlendirilmek üzere bir sonraki ara düğüme iletilir. Bu işlem, paket hedefe ulaşıncaya kadar geçtiği tüm ara düğümler tarafından tekrar edilerek uygulanmaktadır.



Şekil 3.4. Geliştirilen paket yönlendirme algoritmasının akış diyagramı

Önerilen MACRO protokolünde veri haberleşmesi başlatılmadan önce gönderme talebi (RTS) ve gönderme onayı (CTS) paketleri kullanılmaktadır (Şekil 3.5). RTS ve CTS paketleri gizli düğüm sorununun çözülmesi için geliştirilmiştir. MACRO protokolünde, bu paketlere ek görevler yüklenmiştir. Bu görevler, çarpışmaları önlemek için olası tüm komşuları başlatılacak iletişimden haberdar etmek ve verimli iletişim için veri paketinin iletiminde uygun gönderim gücünün seçilmesine imkân sağlamaktır. Geliştirilen gönderim gücü ayarlama algoritmasında RTS ve CTS

paketleri en yüksek gönderme gücü seçilerek gönderilmektedir (Şekil 3.5.a). Hedef ya da ara düğüm dışında bu paketlerden birini alan düğüm enerji tasarrufu için uyku durumuna geçmektedir (Şekil 3.5.b). CTS paketini alan kaynak düğüm ise, ilk olarak CTS paketiyle gelen gönderim gücü, alınan paketin sinyal gücü (RSSI) ve işaret gürültü oranı (SNR) bilgilerine göre uygun gönderim gücünü belirlemektedir. Veri paketinin iletiminde bu gönderim gücünü esas alınmaktadır (Şekil 3.5.c). İletim işlemi tamamlandığında gönderim gücü tekrar varsayılan değerine döndürülmektedir. Böylece, enerji tasarrufu yapılmasının yanı sıra olası çarpışmaların da büyük çoğunluğu önlenmektedir. Geliştirilen algoritmanın program kodları Ek-A'da sunulmaktadır.



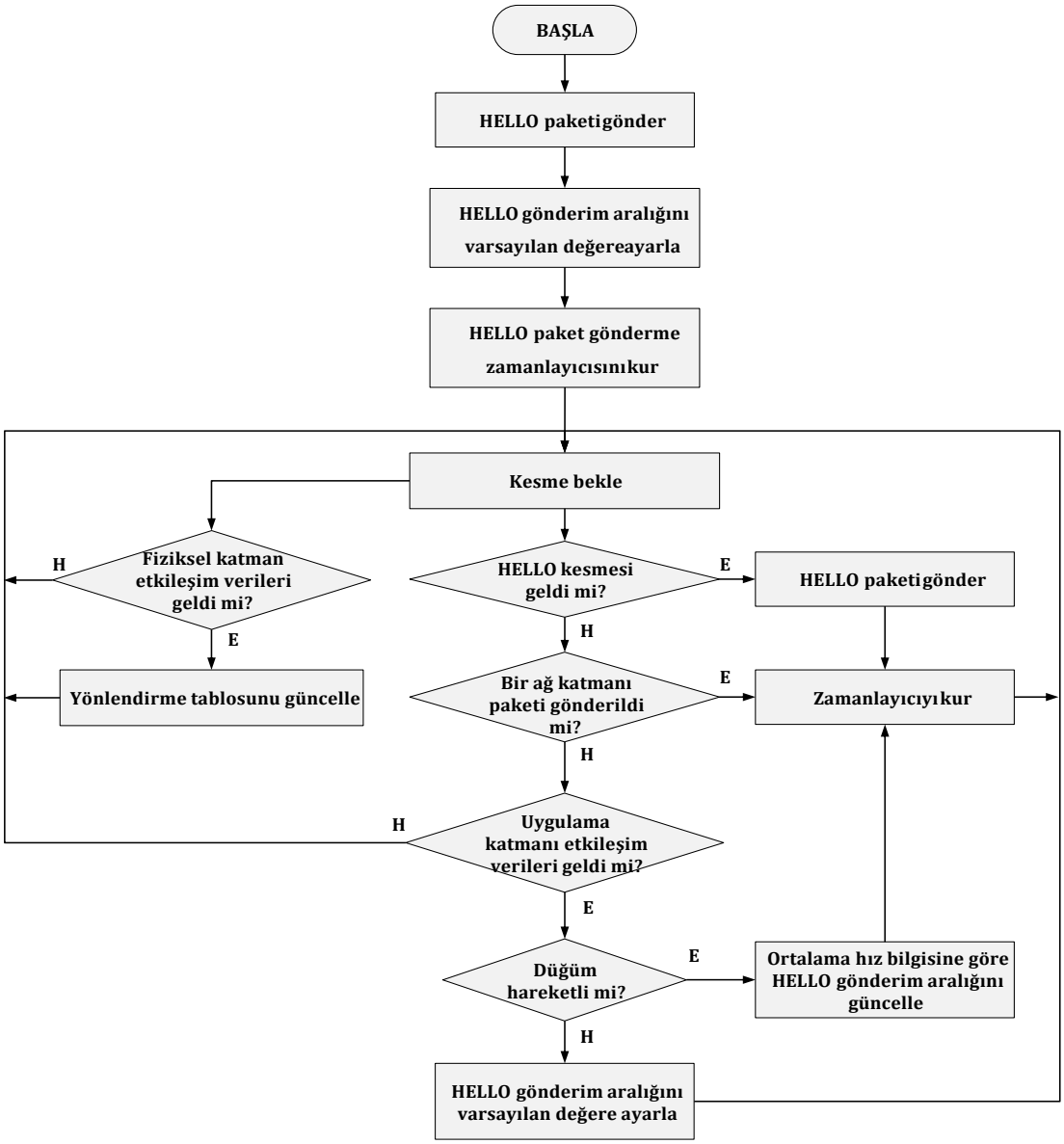
Şekil 3.5. Veri iletiminde gönderim gücünün belirlenmesi

Haberleşme esnasında verinin aktarılacağı yol üzerindeki bir sonraki düğüm yer değiştirmesi veya enerjisinin tükenmesi sonucu erişilemez olabilmektedir. Beklenen CTS ya da alındı onayı (ACK) paketlerinden herhangi biri belirli sayıdaki denemenin ardından alınamamışsa, kullanılan yolun artık geçerli olmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda iletilecek veri paketi ağ katmanına gönderilir ve bir yol-yön telafi süreci başlatılır. Bu süreçte öncelikle yönlendirme tablosundaki mevcut yolların varlığı (varsa yolların güvenilirliği) kontrol edilmektedir. Geçerli bir yol bulunamadığında ise, yeni bir yol-yön keşif işlemi başlatılmaktadır. Söz konusu işlemler tamamlanarak uygun bir yol bulununcaya kadar veri paketleri kuyrukta bekletilmektedir. Bununla birlikte, mevcut yolların güvenilirliği gelecek bir sonraki alt bölümde detaylandırılan yol-yön yönetim algoritması tarafından denetlenmektedir. Önerilen MACRO protokolünde yol-yön hatalarının nadiren ortaya çıktığı 4. Bölümde sunulan benzetim sonuçları ile de doğrulanmaktadır.

3.2.3. Geliştirilen yol-yön yönetim algoritması

Gezgin ağlarda yeni yolların keşfedilmesi ve mevcut yolların yönetilmesi ağdaki düğümlerin hareketli olmasından dolayı oldukça zor bir görevdir. Özellikle veri iletimi sırasında ortaya çıkan bağlantı hataları paket kayıplarının ve gecikmelerin artmasına sebep olan çok önemli bir sorundur. Önerilen MACRO protokolündeki yeni yol-yön keşif işlemi, talebe dayalı [50] yönlendirme algoritmasında olduğu gibi gerçekleştirilmektedir. Keşfedilen yollar ise tabloya dayalı [50] yönlendirme algoritmasındaki gibi geçici bir yönlendirme tablosunda tutulmaktadır; ancak, tablolar hiçbir şekilde diğer düğümler arasında paylaşılmamaktadır. Mevcut yolların güvenilirliğinin garanti edilebilmesi için ise, yeni bir yol-yön yönetim algoritması geliştirilmiştir (Şekil 3.6). Geliştirilen algoritmada (Ek-A), yönlendirme tabloları uygulama katmanı ve fiziksel katmandan alınan gezginlik, hız ve RSSI bilgileri ile desteklenmektedir. Düğümlerin ortalama hızına ve gezginlik düzeyine göre mevcut yolların kullanım süreleri belirlenmektedir. Yol-yön kullanım süresi hareketsiz düğümler için sabit, gezgin düğümler için ise düğümlerin ortalama hızı ve RSSI değişim oranı değerlendirilerek hesaplanmaktadır. Düğümler yönlendirme tablolarını belirli aralıklarla kontrol ederek süresi dolan yol bilgilerini tablodan silmektedirler. Ayrıca, RSSI değişim oranına bağlı olarak yolların güncel durumu hakkında basit bir geçerlilik kestirimi yapılmaktadır. Böylece, uyarlanabilir kullanım süreleri ve geçerlilik kestirimi sayesinde yol güvenilirliğinin artırılması sağlanmaktadır.

Talebe dayalı yönlendirme algoritmasında, düğümler kendi kapsama alanı içerisindeki komşularının varlıklarından haberdar olması için, sabit aralıklarla HELLO paketi yayınlamaktadır [51]. Bu yöntem, ağdaki düğümlerin sayısına bağlı olarak trafik yoğunluğunu artırmaktadır. Önerilen MACRO protokolünde, söz konusu problemin önlenebilmesi için HELLO paketlerinin yayınlanma aralığını dinamik olarak belirleyen yeni bir algoritma geliştirilmiştir (Şekil 3.6). Geliştirilen algoritmada, hareketsiz düğümler geleneksel yöntemde olduğu gibi periyodik olarak; gezgin düğümler ise, ortalama hızlarına göre değişen esnek aralıklarla HELLO paketlerini yayınlamaktadır (Ek-A). Ayrıca, gezginlik ve yönlendirme bilgileri ağ katmanı paketlerine eklenerek de gönderildiğinden bir ağ katmanı paketi gönderen düğüm, HELLO paket gönderme işlemini ertelemektedir. Böylece, düğümlerin komşuluk ve bağlantı durumu daha verimli bir şekilde izlenebilmektedir.



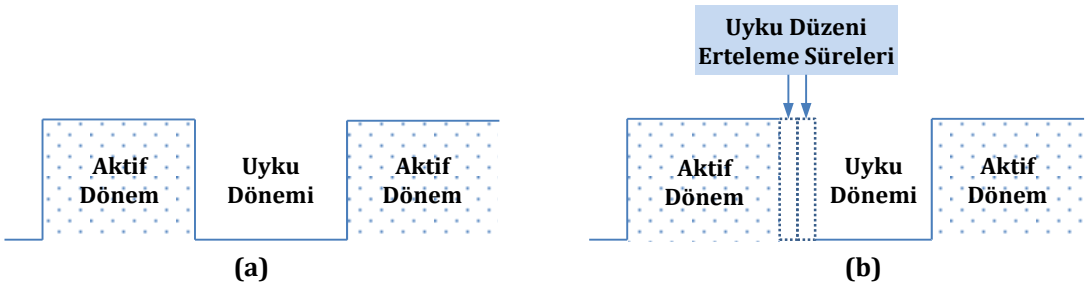
Şekil 3.6. Geliştirilen yol-yön yönetim algoritmasının akış diyagramı

3.2.4. Geliştirilen yönlendirme enerji verimliliği algoritması

Algılayıcı düğümler pil gücüyle çalışan cihazlar olduğundan, kullanılan protokollerin enerji verimliliği ağ yaşam süresi açısından çok önemli bir gereksinimdir. Ağın yaşam süresinin uzatılması yeni bir yönlendirme algoritmasının geliştirilmesi sürecinde karşılaşılan önemli bir sorundur. Özellikle bir yönlendirme bileşeni üzerinde iyileştirme yapılırken enerji kullanımının bu durumdan olumsuz etkilenmesi katmanlararası etkileşimli çalışmayı gerektirmektedir. Örneğin; en kısa yol algoritması enerji tasarrufu sağladığı ve uçtan-uca paket gecikmesini azalttığı gerekçesiyle geleneksel yönlendirme algoritmaları için önemli bir başarım ölçütüdür.

Fakat kısa yollar üzerindeki düğümlerin daha sık kullanılmalarından dolayı pilleri daha hızlı tükenmektedir. Enerjilerinin tükenmesi sonucu kullanım dışı kalan düğümler ise ağ üzerinde bağlantı hatalarına sebep olmaktadır [52]. Bu örnekten hareketle, yönlendirme başarımı ile enerji kullanımı arasında verimli bir ödünleşme için önerilen MACRO protokolünün enerji yönetimi üzerinde bazı iyileştirmeler yapılmıştır.

MACRO, ortama erişim için taşıyıcıyı dinleyen çoklu erişim (CSMA) tabanlı bir OEK protokolü kullanmaktadır. Bilindiği gibi CSMA tabanlı protokollerde düğüm enerjisinin çoğu boşta dinleme esnasında harcanmaktadır [53]. Harcanan enerjinin azaltılabilmesi için düğümün kablosuz iletişim cihazının gerekli olmadığında kapatılması bir çözüm olabilmektedir. Ancak, düğümlerin ihtiyaç duyulduğunda erişilemez olması da bağlantı hatalarına; dolayısıyla, paket kayıplarına sebep olmaktadır. Bu durumda, paket kayıplarının önlenebilmesi, gerektiğinde düğümlerin kullanılabilir (uyanık) olmalarına bağlıdır. MACRO protokolündeki enerji tasarrufu-bağlantı güvenilirliği ikileminin verimli bir şekilde çözülebilmesi için uyarlanabilir görev döngüsü algoritması geliştirilmiştir (Ek-A).



Şekil 3.7. Sabit görev döngüsü (a) ve geliştirilen uyarlanabilir görev döngüsü (b)

MACRO protokolünde düğümler arasında zaman eşlemesi mümkün olmadığından, düğümlerin görev döngüsü organize bir şekilde belirlenememektedir. Geliştirilen algoritmada düğümlerin aktif kalma sürelerinin uzunluğu yönlendirme gereksinimine göre uyarlanmaktadır. Başlangıçta, S-MAC [54] protokolünde olduğu gibi sabit bir görev döngüsü (Şekil 3.7.a) benimsenmektedir. Ancak, aktif dönemi tamamlayan düğümler, uyku düzenine geçmeden önce kuyruğu ve son haberleşmeye katıldığı andan itibaren geçen süreyi kontrol etmektedir. Eğer kuyrukta bekleyen bir paket varsa veya son haberleşmeye katıldığı andan itibaren geçen süre belirli bir eşiğin altındaysa, uyku düzenine geçme belirli bir süre ertelenmektedir. Bu sürenin sonunda

da aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Erteleme için gerekli şartlar sağlanmadığında uyku düzenine geçilmektedir. Döngünün başında uyku için ayrılan süreden erteleme sürelerinin toplamı çıkarılmakta ve düğüm sadece kalan süreyi uyku düzeninde geçirmektedir (Şekil 3.7.b). Böylece, uyku düzeninin kullanılmasıyla enerji tasarrufu sağlanırken, gerektiğinde aktif düzende kalınarak paket kayıpları da engellenmektedir. Bununla birlikte, ağ üzerinde stratejik noktalarda bulunan düğümlerin aktif dönem süreleri diğer düğümlere göre daha fazladır. Aktif dönemin uzaması ise, harcanan enerji miktarını artıracağından bu düğümlerin enerji kaynakları diğerlerine nispeten daha hızlı tükenmektedir. Ancak, MACRO protokolü önceliği paket iletim güvenilirliği olduğundan böyle bir durumda enerji tüketimindeki artış göz ardı edilmektedir ve bu ödünleşmeye bağlı olarak geleneksel yöntemlere yakın düğüm enerji tüketim sonuçları görülebilmektedir.

Tablo 3.1. Gönderim gücü seviyeleri ve ikili karşılıkları

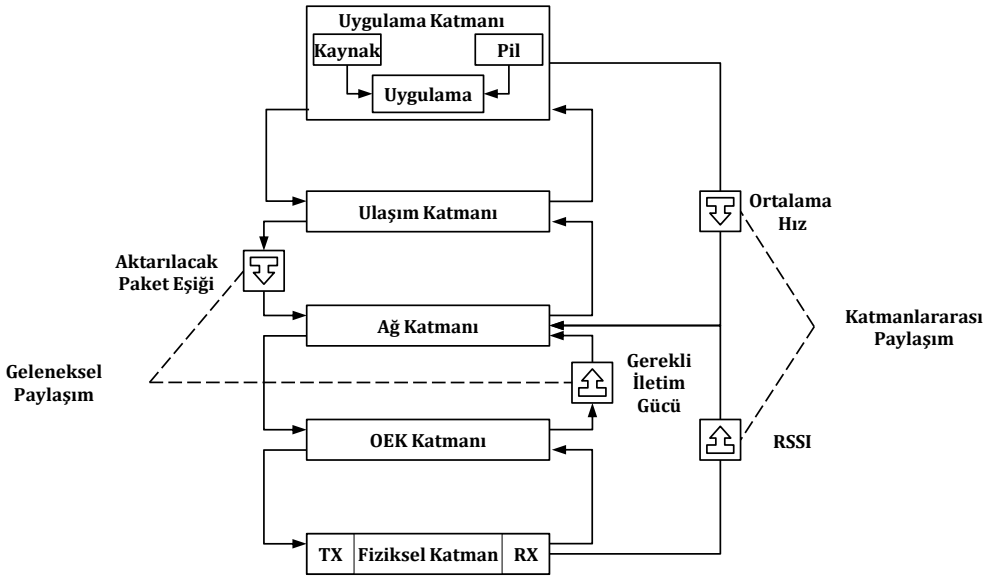
Gönderim Gücü Seviyesi	İkili Karşılığı	Gönderim Gücü (dBm)
0	00	0
1	01	-5
2	10	-10
3	11	-15

GAA'larda düğümlerin enerjisinin büyük bölümünün haberleşme esnasında harcandığı bilinmektedir. Önerilen MACRO protokolünde veri iletiminde harcanan enerjinin azaltılabilmesi için, gereksinime bağlı olarak düğümlerin gönderim gücünü uyarlamalı olarak belirleyen (Şekil 3.5) bir enerji verimlilik algoritması geliştirilmiştir. Ek–A'da program kodları sunulan bu algoritmada, düğümler paket iletimini ön tanımlı dört farklı gönderim gücü seviyesinden birini kullanarak yapmaktadır (Tablo 3.1). RREP ile veri paketleri dışındaki tüm paketler en yüksek gönderim gücü ile iletilmektedir. Seçilen gönderim gücü iki bitlik bir bilgi olarak (Tablo 3.1) gönderilen paketin içeriğine de eklenmektedir. Böylece, alıcı düğüm paketin alındığı komşusu ile haberleşebilmek için uygun gönderim gücünü hesaplayabilmektedir. Seçilen gönderim gücü ve komşuluk bilgileri, gerektiğinde OEK katmanı tarafından da kullanılmak üzere düğümün yönlendirme tablosunda tutulmaktadır. Böylece, haberleşme esnasında gereğinden fazla enerji harcanması önlenirken aynı zamanda daha az bir alandaki haberleşme ortamı meşgul edilmektedir.

3.3. Önerilen MACRO Yönlendirme Protokolünün Benzetim Modeli

Bu alt bölümde, önerilen MACRO yönlendirme protokolünün OPNET Modeler yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen benzetim modeli açıklanmaktadır. Ek-B'de sunulan MACRO benzetim modeli, ayrık olarak tasarlanmış beş OSI referans modeli katmanından oluşmaktadır. Katmanlararası etkileşim özellikleri ise OSI referans modeline uygun olarak bu katmanlı yapı içerisine dâhil edilmiştir (Şekil 3.8).

Etkileşimli yapı içerisindeki katmanların bazıları, ilişkili katmanlar ile sadece bilgi paylaşırken bazıları da kendi çalışma durumunu bu katmanlardan alınan bilgilere göre uyarlamaktadır. Örneğin, ağ topolojisindeki değişikliklere uyum sağlamak amacıyla ağ katmanı, uygulama katmanından gelen gezgin düğümün hız bilgisine göre bazı parametrelerinde değişiklik yapmaktadır. MACRO protokolünün benzetim modeli aşağıda genel hatlarıyla açıklanmaktadır.



Şekil 3.8. MACRO protokolünde katmanlı ve katmanlararası bilgi paylaşımı

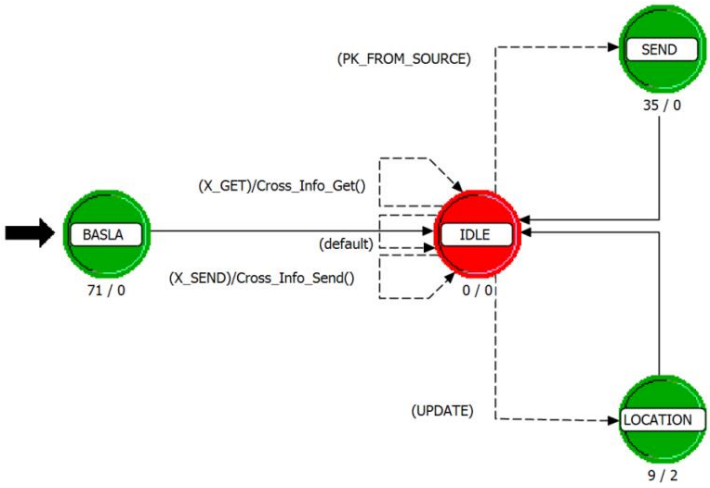
3.3.1. Uygulama katmanı

Uygulama katmanı benzetim modeli uygulama, kaynak ve pil olmak üzere üç alt modülden oluşmaktadır (Şekil 3.8):

Kaynak modülü, farklı türlerde algılayıcı cihazlar içermektedir ve bu cihazlardan gelen bilgilere göre veri paketleri oluşturmaktadır. Söz konusu paketlerin, Poisson dağılımı ile üretilerek, uygulama modülüne gönderildiği varsayılmaktadır.

Pil modülü, düğüme ait harcanan ve kalan enerjinin izlenmesinden sorumludur. Modül esnek güç değerleri kullanılarak modellendiğinden; literatürde çokça bilinen algılayıcı düğüm cihazlarına göre kolaylıkla uyarlanabilmektedir. Ayrıca bu modül, belirli zaman aralıklarıyla, harcanan ve kalan enerji miktarlarını uygulama modülüne bildirmektedir.

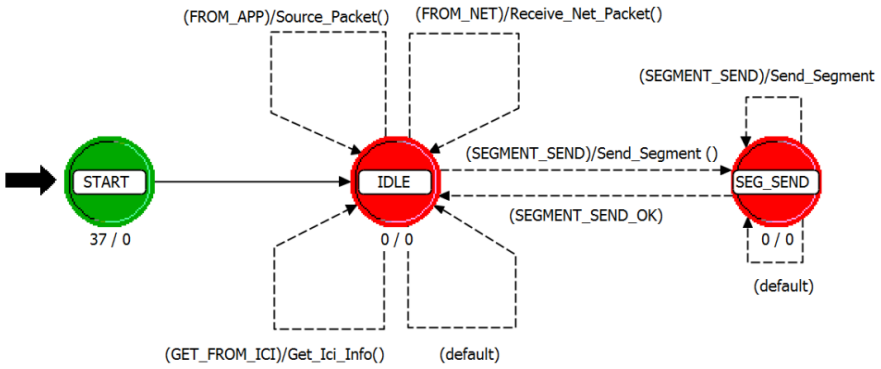
Uygulama modülü, diğer modüller tarafından gerçekleştirilen işlemlerin yönetildiği, uygulama katmanının ana alt-modülüdür (Şekil 3.9). Ayrıca, gezgin düğümün ortalama hızını hesaplamak için temel bir ivmeölçer içermektedir. Düğümün hız değişimi her 50 milisaniye için örneklenmektedir. Belirli bir süre aralığında (varsayılan olarak 10 saniye) örneklenmiş hız verileri, ortalama hızın hesaplanmasında kullanılmaktadır. Hareketlilik ve hız bilgileri düzenli olarak ağ katmanına sunulmaktadır.



Şekil 3.9. Uygulama modülü süreç modeli

3.3.2. Ulaşım katmanı

Ulaşım katmanı süreç modeli Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu katman, ağ katmanı ile etkileşimli çalışarak, tıkanıklık denetimini gerçekleştirir. Belirli bir zaman aralığında, düğüm tarafından üretilen veya yönlendirilen paketlerin toplam sayısı bu katmanda tutulur. Bu sayı Aktarılan Paket Eşiği'ne (APE) ulaştığında, ulaşım katmanı, düğümün yönlendirmeye katılmaması ile ilgili olarak, ağ katmanını bilgilendirmektedir. APE'nin aşıldığı durumlarda düğüm gelen yol talep paketlerine cevap vermeyerek yönlendirmeye katılmayı reddeder. Bu yöntem, ağdaki trafiğin artmasını engelleyerek tıkanıklığın önlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.10. Ulaşım katmanı süreç modeli

3.3.3. Ağ katmanı

GAA'larda, düğümlerin merkez istasyonla doğrudan haberleşemediği durumda, algılama verileri diğer düğümler üzerinden merkez istasyona iletilmektedir. Verilerin hedef düğüme yönlendirilmesi sırasında izleyecekleri yolların belirlenmesi ise ağ katmanının görevidir. MACRO protokolünün benzetim modelinde yönlendirme başarımının iyileştirilmesi için ağ katmanına atanan ek görevler aşağıda sıralanmıştır:

- Yeni bir yol-yön keşif sürecinde, güvenilir ve düşük maliyetli yolların bulunması,
- Veri veya RREP paketlerinin iletileceği yolların güvenilirliğinin denetlenmesi,
- Düğümün yönlendirme tablosunda birden fazla uygun yol bulunuyorsa, bunlar arasından en güvenilir olanın seçilmesi ve
- Gereksiz HELLO paket yayının önlenmesidir.

MACRO protokolünün ağ katmanı süreç modeli Şekil 3.11'de görülmektedir. Burada kullanılan durum makineleri, işlevleri ve bunlara ait görevler aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır:

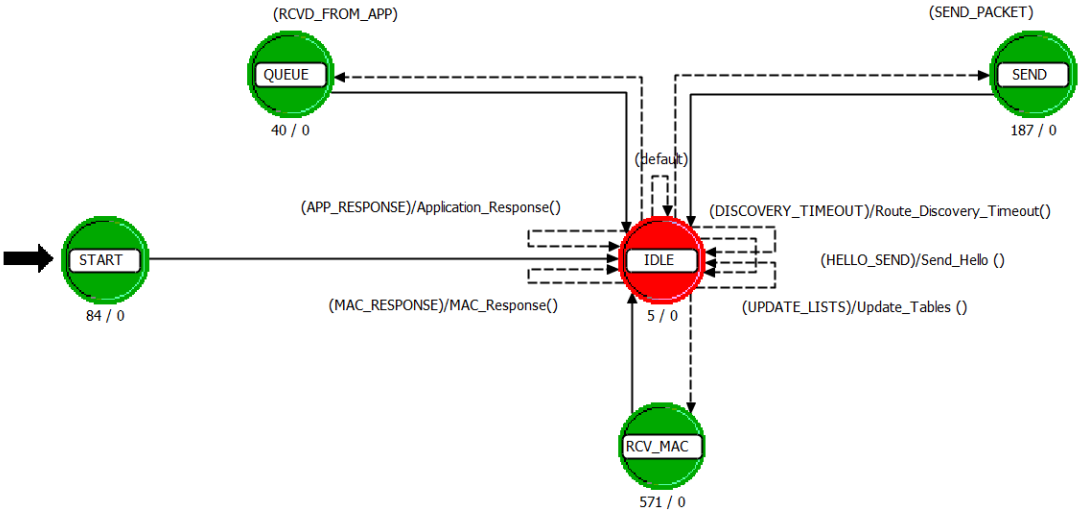
'START' durum makinesi, gerekli parametrelerin ve istatistiklerin tanımlandığı başlangıç işlemlerini gerçekleştirir.

'IDLE' durum makinesi, başlangıç işlemlerinin ardından oluşacak kesmeleri bekler.

'QUEUE' durum makinesi, üst katmandan gelen veri paketlerini kuyruğa ekler ve gönderme sürecini başlatır.

‘SEND’ durum makinesi, kuyrukta bekleyen veri paketleri için, yönlendirme tablosunu kontrol ederek uygun yolların varlığını araştırır. Eğer bir yol-yön bulunursa, pakete yol-yön bilgilerini ekleyerek OEK katmanına gönderir. Yol bulunamadığında ise, yol-yön keşif sürecini başlatır. Ayrıca, yönlendirilen paket sayısını ulaşım katmanına bildirir.

‘RCV_MAC’ durum makinesi, OEK katmanından alınan paketlerin yol-yön bilgileri ile yönlendirme tablosunun güncellenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, yönlendirilecek paketlerin yol-yön bilgilerini güncelleyerek OEK katmanına iletir.



Şekil 3.11. Ağ katmanı süreç modeli

Ağ katmanında, durum makinelerinin yanı sıra bazı işlevler de tanımlanmıştır. Bu işlevler ve görevleri aşağıda sıralanmaktadır:

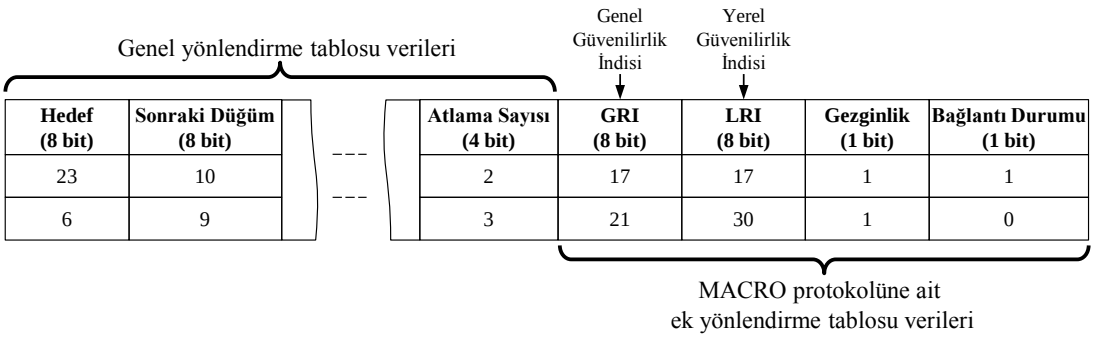
‘Application_Response’ işlevi, katmanlararası etkileşim sağlanması için üst katmanlardan alınan enerji, hız ve gezginlik bilgilerini alır. HELLO paket yayın aralığını ve mevcut yolların zaman aşımı sürelerini belirler.

‘MAC_Response’ işlevi, OEK katmanından gelen katmanlararası etkileşim bilgilerini alır.

‘Route_Discovery_Timeout’ işlevi, başarısız bir yol-yön keşif sürecinin ardından çalışır. Deneme üst sınırına ulaşılmamışsa, deneme sayısını artırarak, yeni bir keşif sürecini başlatır. Üst sınıra ulaşılmışsa, ilgili paketi yok eder.

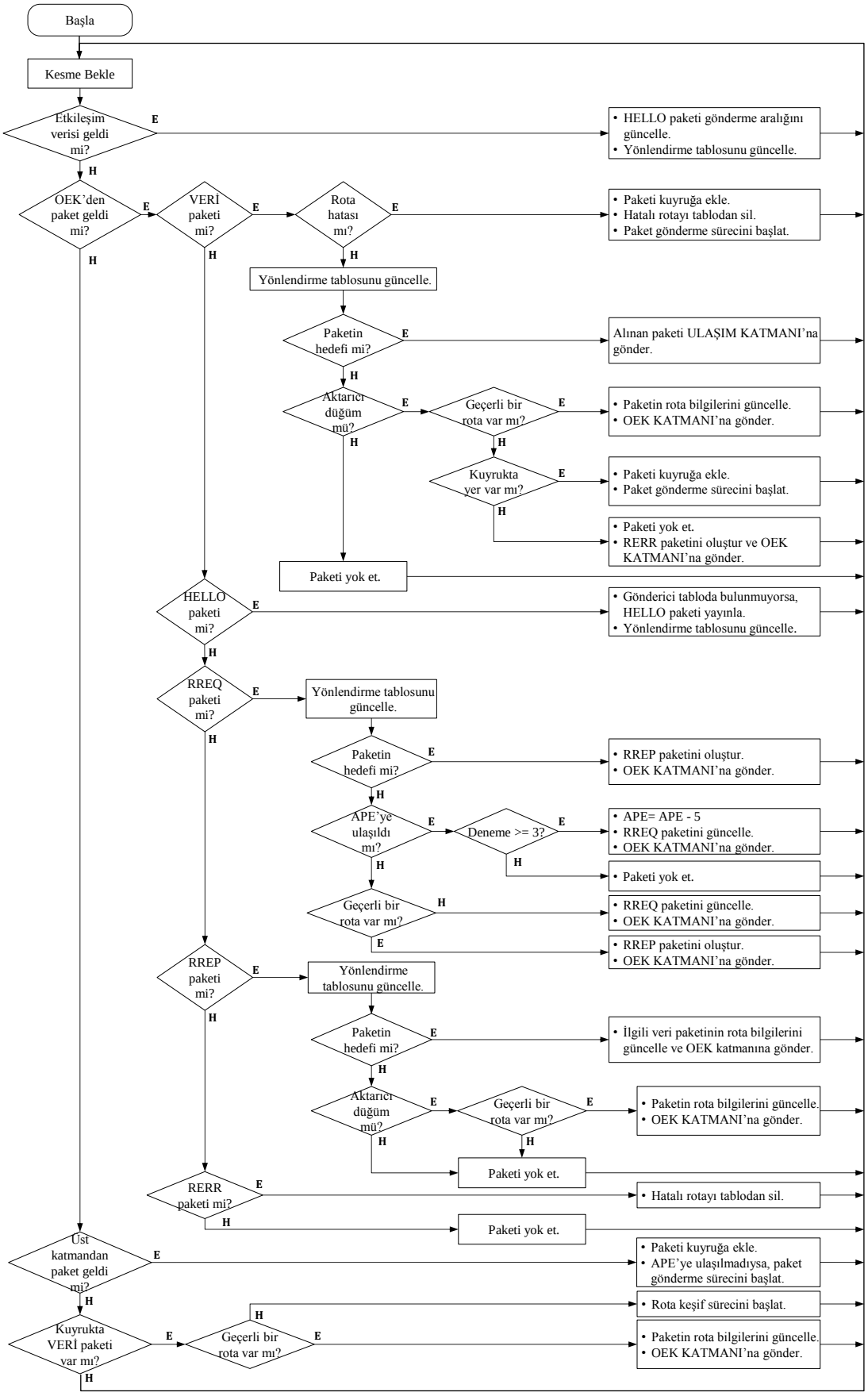
‘Update_Tables’ işlevi, yönlendirme tablosunu günceller. Süresi dolan yolları siler. Ayrıca, yolların güvenilirliğinin garanti edilebilmesi için, ilgili yol üzerindeki en zayıf bağlantının durumu hakkında kestirim yapar. Geçerli olmadığı sonucuna varılan yolları tablodan siler.

Ağ katmanı benzetim modelinde önceden keşfedilmiş yolların tutulduğu, geçici bir yönlendirme tablosu bulunmaktadır (Şekil 3.12). Tabloda, yolun yanı sıra ilgili yola ait uygulama, OEK ve fiziksel katmanlardan alınan bilgiler tutulmaktadır. Yol-yön bilgileri ağ katmanı paketleri içerisinde aktarılmaktadır. Bir ağ katmanı paketi içerisinde gelen yol, yönlendirme tablosunda bulunmuyorsa, tabloya yeni bir yol olarak eklenmektedir. Söz konusu yol, daha önceden tanımlanmış ise, tabloda yer alan mevcut yol bilgileri güncellenmektedir.



Şekil 3.12. MACRO protokolü yönlendirme tablosu

Yönlendirme tablosunda yer alan son dört parametre, önerilen MACRO protokolündeki yol güvenilirlik testinde kullanılmaktadır. Yerel güvenilirlik indisi (LRI), ilgili yolda yer alan komşu düğümden alınan son paketin sinyal gücünü göstermektedir ve 1 ile 255 arasındaki sekiz bitlik bir sayı ile ifade edilmektedir. Genel güvenilirlik indisi (GRI), yol üzerindeki en düşük LRI değerini tutmaktadır. Gezginlik parametresi için bir bitlik alan ayrılmıştır. Komşu düğüm gezgin bir düğüm ise bu parametre “1” diğer durumda ise 0 olmaktadır. Bağlantı Durumu ise komşu düğüm ile aradaki sinyal kalitesinin durumunu ifade etmektedir. Bir bitlik bu parametre, sinyal gücü zayıflıyorsa 0 güçleniyorsa 1 olmaktadır. GRI, Gezginlik ve Bağlantı Durumu parametreleri, yolun güvenilirlik testinin yanı sıra veri ya da RREP paketlerinin aktarılabileceği birden fazla yolun bulunduğu durumlarda en uygun (güvenilir) olanının seçilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 3.13’te MACRO’nun ağ katmanı süreç modeli algoritması görülmektedir.



Şekil 3.13. Ağ katmanı süreç modeli algoritması

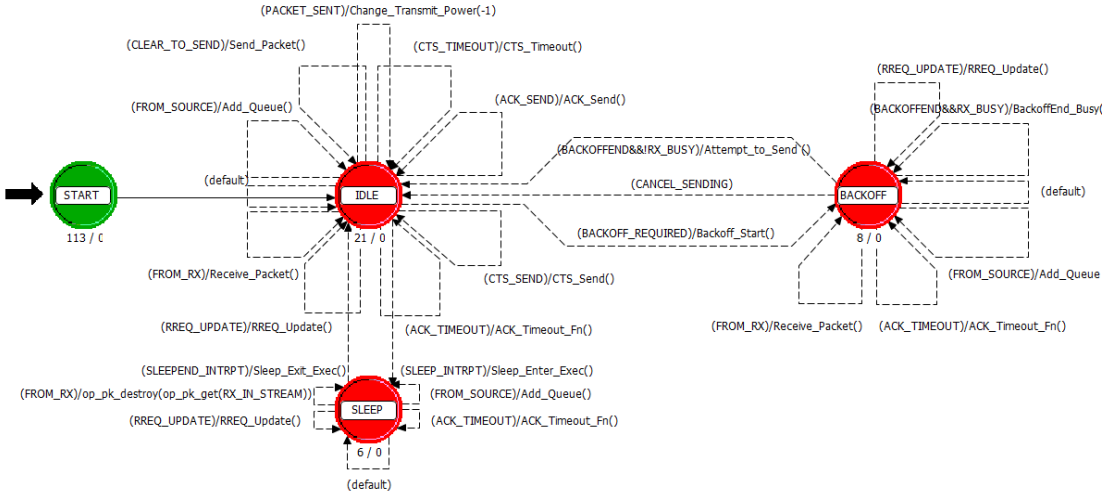
Düğümde gönderilmek üzere bekleyen bir veri paketi bulunuyorsa, ilgili yol bilgisi için yönlendirme tablosuna başvurulmaktadır. Önceden tanımlanmış, güvenilir bir yolun bulunmadığı durumda, yol-yön keşif işlemi başlatılmaktadır. Uygun yolun keşfedilmesinin ardından, veri paketi bu yol üzerinden merkez istasyona aktarılmaktadır. Paketin bulunduğu yönlendirici ara düğümün tablosunda birden fazla yol tanımlı ise, bunların arasından en uygun olanı seçilmektedir. Yol-yön keşif işlemi başarısız olduğunda, süreç dört kez tekrarlanmaktadır. Beşinci tekrar da başarısız olursa, ilgili veri paketi yok edilmektedir. Bununla birlikte, bir düğümün komşusunun gönderdiği üç ardışık RREQ paketi, diğer düğümler tarafından cevaplanmamışsa söz konusu paket kayıplarını engellemek için APE'ye ulaşılmış olmasına rağmen düğümün yönlendirmeye katılması sağlanmaktadır.

3.3.4. OEK katmanı

MACRO protokolünde düğümler arasındaki iletişim kablosuz ve çekişmeli bir haberleşme ortamı üzerinden gerçekleştirilmektedir. OEK katmanında, çekişmeli ortama erişim için geliştirilen IEEE 802.11 DCF temelli bir OEK protokolü kullanılmaktadır.

Benzetim modelinde, OEK katmanının ortama erişim dışında dört ayrı görevi bulunmaktadır. Bu görevler aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır:

- MACRO yönlendirme algoritmasının bir parçası olarak, RREQ paketlerinin takibi ve organize edilmesi.
- Veri iletişiminde gizli düğüm problemini ortadan kaldırmak ve paket çarpışma olasılığını indirgemek için RTS/CTS el sıkışma algoritmasının işletilmesi.
- Alınan paketin RSSI ve gönderim gücü değerlerine bağlı olarak paketin alındığı düğüm için uygun gönderim gücünün hesaplanması ve ağ katmanına bildirilmesi.
- Düğümün kullanılmadığı zamanlarda uyku düzenine geçilerek enerji tasarrufu sağlanması; bununla birlikte, gerektiğinde aktif kalma süresini uzatarak paket kayıplarının önlenmesini hedefleyen, uyarlanabilir görev süresi algoritmasının işletilmesi.



Şekil 3.14. MACRO protokolü OEK katmanı süreç modeli

MACRO protokolünün OEK katmanı süreç modeli Şekil 3.14'te görülmektedir. Burada kullanılan durum makineleri, fonksiyonlar ve bunlara ait görevler aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır:

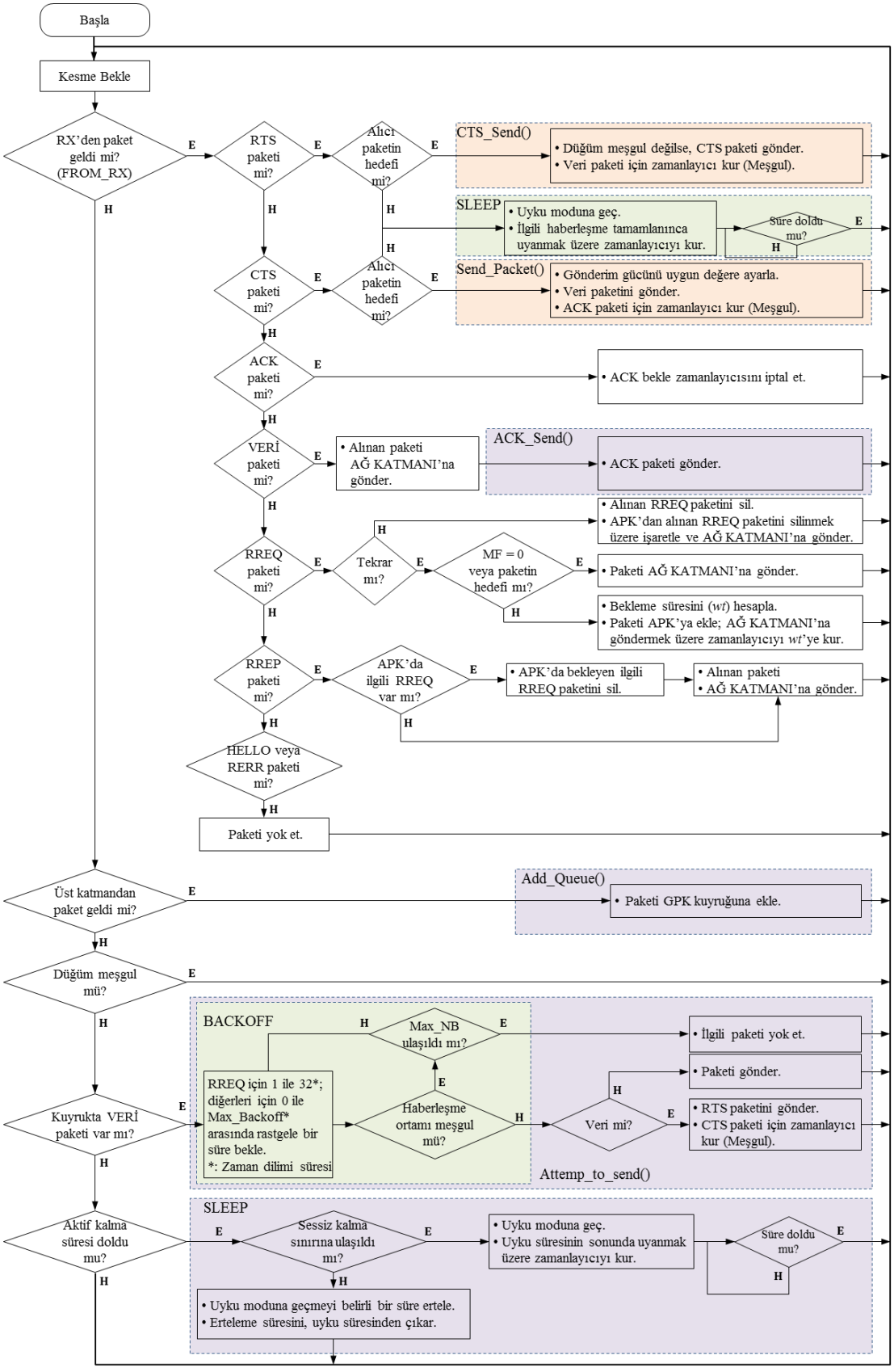
'START' durum makinesi, OEK katmanında çalıştırılan algoritmalar ve istatistikler için gerekli başlangıç işlemlerini gerçekleştirir.

'IDLE' durum makinesi, başlangıç işlemlerinin ardından ve düğüm boşta iken oluşacak kesmeleri bekler.

'BACKOFF durum makinesi, haberleşme sırasında meydana gelebilecek, olası paket çarpışmalarının önlenmesi için, iletim başlamadan önce gerçekleştirilecek bekleme süreçlerini işletmektedir.

'SLEEP' durum makinesinde, enerji tasarrufu için düğümün haberleşme cihazları kapatılmaktadır. Uyarlanabilir görev süresi algoritmasının bir parçası burada çalıştırılmaktadır.

Önerilen MACRO protokolünün OEK katmanı süreç modelinin algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 3.15'te verilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen modelde tasarım kolaylığı olması açısından durum makineleri yerine bazı işlevler tanımlanmıştır. Bu işlevler ve görevleri aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 3.15. MACRO protokolü OEK süreç modeli algoritması

‘Add_Queue’ işlevi, kaynak düğümden ya da ağ katmanından gelen paketleri GPK kuyruğuna eklemektedir.

‘Backoff_Start’ işlevi, GPK kuyruğunda bekleyen sıradaki paketin çarpışmasız gönderilebilmesi için zamanlayıcıyı rastgele bir süreye kurar ve haberleşme sürecini başlatır.

‘BackoffEnd_Busy’ işlevi, bir bekleme işleminin ardından, kontrol edilen haberleşme ortamının yeniden meşgul olduğu durumda çalışmaktadır. Eğer deneme sınırına erişilmemişse, yeni bir bekleme zamanlayıcısı kurulur. Diğer durumda, ilgili paket yok edilir ve gönderme işlemi iptal edilir.

‘Attemp_to_Send’ işlevi, bir bekleme işleminin ardından, kontrol edilen haberleşme ortamının paket iletimi için uygun olduğu durumda çalışmaktadır.

‘Send_Packet’ işlevi, iletilecek paket bir veri paketi ise, RTS paketi gönderir; diğer durumda ilgili paketin gönderme işlemini başlatır.

‘CTS_Timeout’ işlevi, gönderilen bir RTS paketi için, belirli bir süre zarfında beklenen CTS paketinin alınamaması durumunda çalışmaktadır. Yedi denemenin ardından yine başarısız olunursa; ilgili veri paketi, yeni bir yol-yön keşfi için ağ katmanına gönderilir. Bu süreç, söz konusu veri paketi için tekrarlanıyorsa, veri paketi ağ katmanına iletilmeden yok edilir.

‘CTS_Send’ işlevi, düğüm eğer meşgul değilse (başka bir haberleşme süreci devam etmiyorsa), alınan RTS paketine karşılık bir CTS paketi gönderir.

‘Change_Transmit_Power’ işlevi, düğümün gönderim gücünün değiştirilmesi için tanımlanmıştır. Parametre olarak ‘-1’ gönderildiğinde, düğümün gönderim gücü varsayılan değerine ayarlanmaktadır.

‘ACK_Timeout’ işlevi, veri paketi iletiminin ardından, belirli bir süre zarfında, beklenen ACK paketinin alınamaması durumunda çalışmaktadır. Eğer tekrar deneme üst sınırına (varsayılanı değeri üçtür) ulaşılmamışsa, yeni bir iletim işlemi başlatılır. Diğer durumda, yeni bir yol-yön keşfi için paket ağ katmanına gönderilmektedir. Söz konusu durum tekrarlanıyorsa, ilgili veri paketi yok edilmektedir.

‘ACK_Send’ işlevi, başarılı olarak alınan bir veri paketine karşılık, kaynak düğüme bir ACK paketi gönderir.

‘Receive_Packet’ işlevi, fiziksel katmandan alınan paketleri işlemektedir. Alınan RTS paketi ise CTS paketi gönderme; CTS paketi ise veri iletimi süreçlerini başlatmaktadır. Alınan bir ACK paketi ise ACK bekleme zamanlayıcısını iptal etmektedir. Veri paketi alınmışsa, ACK gönderme işlemi başlatılır. RREQ ve RREP paketlerinin takibi ve organizasyonu bu işlev içerisinde yapılmaktadır.

Sleep_Enter_Exec işlevi, düğümün aktif kalma ve uykuda geçireceği süreleri hesaplamaktadır. Aktif kalma süresi dolan ya da diğer düğümlerin haberleşmesini bekleyen düğümlerin uyku sürecini başlatmaktadır.

‘Sleep_Exit_Exec’ işlevi, düğümün aktif kalma sürecini başlatmaktadır.

3.3.5. Fiziksel katman

Fiziksel katman modülü, kablosuz verici ve alıcı birimlerinden oluşmaktadır ve fiziksel katman işlemlerinin tümünün yönetiminden sorumludur. Alıcı ve verici birimleri aynı frekans bandında çalışmaktadır. Algılayıcı düğümlerin kapsama alanı, alma eşik değeri (-85 dBm) ve önceki bölümde açıklanan, uyarlanabilir gönderim gücüne bağlı olarak belirlenmektedir. Bu modül ayrıca ilişkilendirilmiş katmanlara RSSI ve SNR bilgisini sunmaktadır. Fiziksel katman modelinde kanal modeli olarak Two-Ray Ground model kullanılmıştır. Bu modelde alınan sinyal, doğrudan gelen ve zeminden yansıyan sinyallerin toplamıdır.

3.4. Sonuç

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirilen beş OSI referans katmanı arasındaki işbirliğini esas alan, GAA’lar için katmanlararası etkileşimli yeni yönlendirme protokolü MACRO’nun tasarımı ve benzetim modeli açıklanmıştır.

MACRO protokolündeki katmanlararası etkileşim, temel katmanlı mimari yapısı korunmak üzere, ilgili katmanlar arasında bilgi paylaşımını sağlayacak arayüzlerin ya da parametrelerin kullanılması yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre, birbirinden bağımsız olarak modellenen katmanlar arasında paylaşılan ortak

parametreler tanımlanmıştır. Etkileşimli yapı içerisindeki katmanların bazıları, ilişkilendirilmiş katmanlar ile sadece bilgi paylaşırken bazıları da kendi çalışma durumunu diğer katmanlardan alınan bilgilere göre uyarlamaktadır.

MACRO yönlendirme protokolünün benzetim modeli, OPNET Modeler benzetim yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim modeli, sabit bir merkez istasyon ve gezgin algılayıcı düğümlerden oluşmaktadır. Merkez istasyon dâhil olmak üzere, düğümlerin tamamı aynı düğüm modelini kullanmaktadır.

4. ÖNERİLEN MACRO PROTOKOLÜ KULLANILAN ÖRNEK BİR GAA UYGULAMASI VE BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

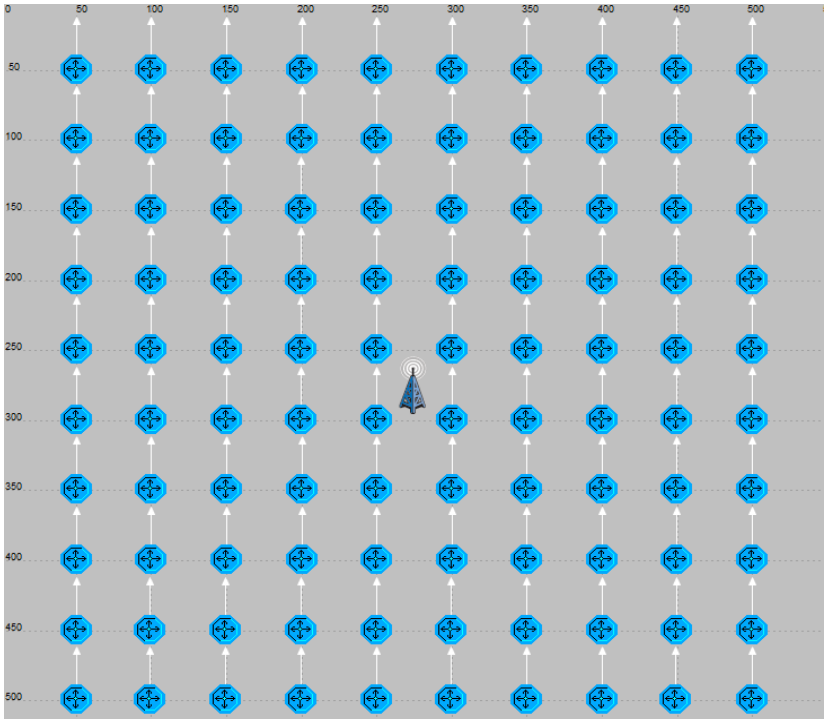
4.1. Giriş

Bu bölümde, önerilen MACRO protokolünün kullanıldığı örnek bir gezgin algılayıcı ağ uygulamasının, OPNET Modeler Benzetim yazılımı kullanılarak benzetimi ve benzetim sonuçlarının başarım değerlendirmesi detaylı bir şekilde yapılmaktadır.

Önerilen MACRO protokolünün başarım değerlendirmesi için bir merkez istasyon ve yüz adet gezgin algılayıcı düğümden oluşan bir GAA üzerinde iki ayrı benzetim senaryosu modellenmiştir. Birinci senaryoda, hızları sabit tutulurken gezgin düğümlerin hareketsiz düğümlere oranı değiştirilmektedir. İkinci senaryoda ise, tamamı gezgin olan düğümlerin hızları değiştirilmektedir. Her iki senaryo için gerçekleştirilen benzetimlerin sonuçları paket iletim güvenilirliği, ortalama uçtan uca gecikme ve ortalama enerji tüketimi açısından değerlendirilmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar bilinen bazı önemli yönlendirme protokolleri (AODV, LEACH-Mobile ve CBR-Mobile) ile karşılaştırılmaktadır.

4.2. MACRO Protokolünü Kullanan GAA Uygulamasının Benzetimi

Şekil 4.1'de OPNET Modeler benzetim programı ile gerçekleştirilen MACRO protokolünün, merkez istasyon ile gezgin algılayıcı düğümlerin bulunduğu örnek bir benzetim modeli görülmektedir. Ağı oluşturan düğümlerin tamamı (merkez istasyon dâhil) aynı özelliktedir. Benzetim ortamı, bir kenar uzunluğu 500 metre olan kare bir alandır; merkez istasyon bu alanın tam ortasında ve sabit olarak bulunmaktadır. Düğümlerin tamamı birbirinden bağımsız olarak hareket edebilmektedir. Kablosuz kanal "two-ray ground" yayılım modeli tanımlanmıştır. Benzetim modelinin gerçekleştirildiği kablosuz ortamda, zemin ve algılayıcı düğümler dışında haberleşme sinyallerinin yansıyacağı ya da çarpacağı herhangi bir engel bulunmadığı varsayılmaktadır.



Şekil 4.1. MACRO protokolü kullanılan GAA uygulamasının benzetim modeli

4.2.1. Benzetim parametreleri

MACRO protokolünün benzetim modelinde, ağdaki düğümlerin tamamının hareket kabiliyeti bulunmasına rağmen düğümlerin bir kısmı ya da tamamı, bulundukları konumda sabit olabilir. Gezgin düğümlerin hareket yörüngesinin belirlenmesinde Rastgele Dolaşım Modeli [55] kullanılmaktadır. Bu modelde, gezgin düğümlerin yolları belirlenirken öncelikle [0, 2π] aralığında rastgele bir yön seçilir. Ardından, gezgin düğümler rastgele belirlenen *d* mesafesindeki yeni konumuna doğru seçilen yönde bir *v* ($v \mid V_{min} < v < V_{max}$) hızıyla hareket eder. İzlenen yol bir sınıra ulaştığında düğüm kalan mesafeyi simetrik açıyla sınırdan uzaklaşarak tamamlamaktadır. Hedef noktaya ulaşıldıktan sonra, düğüm rastgele bir süre burada bekler. Bu sürenin sonunda aynı işlemler tekrarlanır.

Merkez istasyon hareketli değildir ve benzetim ortamının tam ortasına yerleştirilmiş olarak bulunmaktadır. Başlangıçta, gezgin algılayıcı düğümler benzetim ortamında düzgün biçimde dağılım (uniform) ile yerleştirilmiş bulunmaktadır. Düğümlerin tamamı, paket üretimi için aynı olasılık dağılım işlevini ve parametrelerini kullanmaktadır.

Önerilen MACRO protokolü, düğümlerin konum bilgilerini gerektirmediğinden; düğümlerin herhangi bir konum belirleme donanımı ya da algoritması kullanmadığı varsayılmaktadır. Böylece, önerilen protokol kapalı bir ortam (iç mekân, orman vb.) içerisinde de çalışabilmektedir. Tablo 4.1'de benzetim ortamında kullanılan diğer parametreler görülmektedir.

Tablo 4.1. MACRO protokolünün benzetim modelinde kullanılan parametreler

Parametreler		**Değerler**
Benzetim Alanı		500 m x 500 m
Benzetim Süresi		300 saniye
Başlangıçtaki Düğüm Dağılımı		Düzenli
Bant Genişliği		5 MHz
Frekans		933 MHz
Gezginlik Modeli		Rastgele Dolaşım Modeli
Gezgin Düğüm Sayısı		100
Gezgin Düğüm Hızı		0 – 10 m/s
Gezgin Düğüm Oranı		0 – 100 %
İletim Gücü	0 dBm	93 mW
	-5 dBm	72 mW
	-10 dBm	57 mW
	-15 dBm	49,5 mW
Alma Gücü		81 mW
Boşta Çalışma Gücü		3 mW
Uyku Düzeni Gücü		6 μW
Veri İletim Hızı		40 Kbit/s
Veri Paketi Üretim Hızı		4 paket/dakika (Sabit bit hızı)
Veri Paketi Boyutu		2000 bit
Kanal Modeli		Two-Ray Ground

4.2.2. Örnek benzetim senaryoları

Birinci örnek benzetim senaryosunda, değişen sayılarda gezgin ve sabit olmak üzere yüz adet algılayıcı düğümden oluşmaktadır. Ağdaki gezgin düğümlerin değişken oranının, önerilen MACRO protokolünün paket dağıtım oranı (PDO), ortalama uçtan-uca gecikme (UUG) ve ortalama enerji tüketimi üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. Alınan benzetim sonuçlarına göre MACRO yönlendirme protokolü, söz konusu başarım ölçütleri açısından bilinen bazı yönlendirme protokolleri ile karşılaştırılmaktadır. Bununla birlikte, karşılaştırılan protokoller

kısmen veya tamamen çekişmeye dayalı haberleşme kullanmaktadır. Ağdaki düğüm yoğunluğu yüksek olduğu için aynı komşuluğa sahip düğümlerin sayısı da fazla olmaktadır. Çekişen düğüm sayısındaki artış paket kayıplarını ve tıkanıklığını da artırmaktadır. Bu sebeple, benzetimler ağdaki paket trafiğinin düşül olduğu varsayılarak gerçekleştirilmektedir.

İkinci örnek benzetim senaryosunda ise ağ, hızları 1-10 m/s arasında değişen ve tamamı gezgin yüz adet düğümden oluşmaktadır. Farklı hızlarla yer değiştiren düğümlerin, önerilen MACRO protokolünün paket dağıtım oranı, ortalama uçtan-uca gecikme ve ortalama enerji tüketimi başarımları üzerindeki etkileri incelenmektedir. MACRO protokolü, birinci senaryodaki başarım ölçütleri açısından yine aynı yönlendirme protokolleri ile karşılaştırılmaktadır. Bununla birlikte, AODV protokolünde, ağdaki gezginlik oranının artmasıyla, yol bağlantı hataları da artmaktadır. Bu durum, paket kayıplarının yanı sıra bağlantı hatalarının giderilmesi için yayınlanan kontrol paketlerinin sayısının da artmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, geçerli ve anlamlı bir başarım değerlendirmesi yapılamadığından, AODV yönlendirme protokolü ikinci senaryoda değerlendirmeye alınmamıştır.

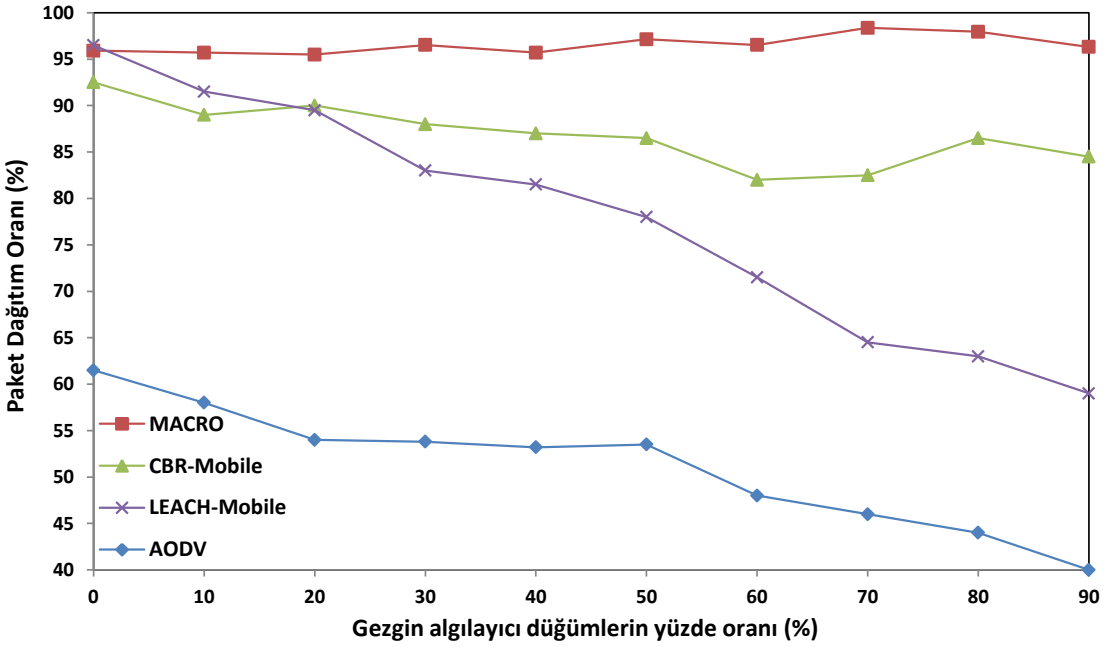
4.3. Paket Dağıtım Başarım Değerlendirmesi

Bu alt bölümde, sunulan iki senaryo üzerinden gerçekleştirilen benzetim sonuçları kullanılarak MACRO, CBR-Mobile, LEACH-Mobile ve AODV protokollerinin paket dağıtım başarım değerlendirmesi yapılmakta ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

4.3.1. Sabit hızlı gezgin veya hareketsiz düğümlerden oluşan senaryo

Bu senaryoda, sabit ve gezgin algılayıcı düğümlerden oluşan bir GAA uygulamasında, karşılaştırılan protokollerin ağdaki gezgin düğümlerin yüzde oranına bağlı olarak değişen PDO'ları incelenmektedir. Benzetimlerde, gezgin düğümlerin hızının 5 m/s ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Şekil 4.2'de, ağdaki gezgin düğümlerin sayısının artmasına karşılık önerilen MACRO protokolü dışındaki diğer tüm yönlendirme protokollerine ait PDO değerlerinin son derece olumsuz bir şekilde azaldığı görülmektedir. LEACH-Mobile ve CBR-Mobile gibi küme tabanlı protokollerde düğümlerin gezgin olmalarından dolayı kümelerinin dışına çıkan bazı

gezgin düğümlerin, bir süreliğine ağ ile bağlantısı kesilebilmektedir. Böyle bir duruma maruz kalan düğümlerin paket kayıpları yüksek olmaktadır. Bu sebeple, ağdaki gezgin düğümlerin sayısı arttığında düğümlerin ağdan ayrı kalma sürelerinin uzunluğuna bağlı olarak paket kayıpları artmaktadır. Bununla birlikte, LEACH-Mobile protokolünün iyileştirilmiş sürümü niteliğindeki CBR-Mobile protokolünde, kümelerinden ayrılan düğümler, LEACH protokolüne göre çok daha kısa zamanda yeni bir kümeye dâhil olabildiğinden ağdan ayrı kalma süreleri daha kısa olmaktadır. Böylece, CBR-Mobile protokolü, LEACH-Mobile protokolüne göre daha yüksek PDO başarımı sunmaktadır. AODV protokolünde ise gezgin düğümlerin sayısının artmasına paralel olarak, yol hatalarının sayısı da arttığından PDO başarımı oldukça düşük çıkmaktadır.



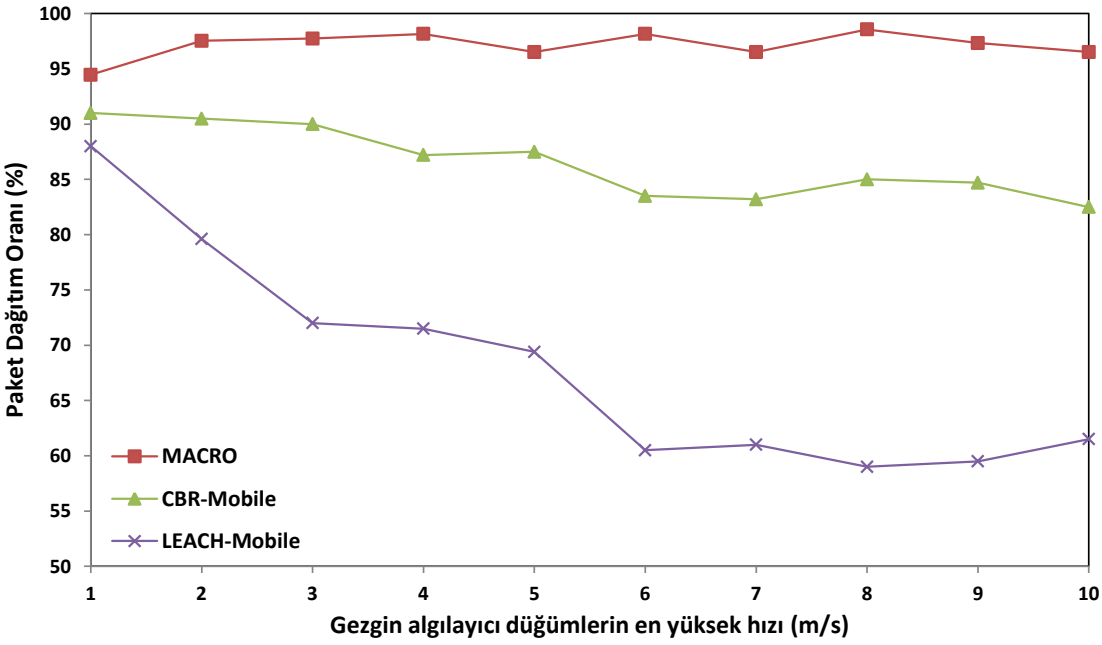
Şekil 4.2. Ağdaki gezgin düğümlerin oranının PDO başarımına etkisi

Önerilen MACRO protokolü, güvenilir yollar keşfetme kabiliyetinin yanı sıra kullanılacak yolların güvenilirliği hakkında basit bir kestirim de yapabilmektedir. Bu sebeple, yol bağlantı hatalarından kaynaklanan paket kayıpları azaltılabilmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, önerilen MACRO protokolünün PDO başarımı, ağdaki gezgin düğüm sayısı artıyor olmasına rağmen diğer protokollere göre hem daha yüksek hem daha kararlıdır. MACRO protokolü, CBR-Mobile protokolüne göre %11, LEACH-Mobile protokolüne göre %37 ve AODV protokolüne göre %56'ya kadar daha iyi paket dağıtım başarımı sunmaktadır.

4.3.2. Değişken hızlı tamamı gezgin düğümlerden oluşan senaryo

Bu senaryoda, modellenen GAA uygulaması, yine sabit ve gezgin algılayıcı düğümlerden oluşmaktadır. Benzetimler, gezgin düğümlerin çıkabileceği en yüksek hız değerleri sınırlanarak yapılmaktadır. Böylece, gezgin düğümlerin hızları 1 m/s ile en yüksek hız sınırı arasında değişebilmektedir. Şekil 4.3'te, karşılaştırılan protokollerin, ağdaki gezgin düğümlerin çıkabileceği en yüksek hıza bağlı olarak değişen PDO'ları sunulmaktadır.

Şekil 4.3'te, ağdaki gezgin düğümlerin hızları arttığında, LEACH-Mobile ve CBR-Mobile protokollerinin PDO başarımının azaldığı görülmektedir. Bu protokollerde, düğümlerin hızlarının artmasıyla, küme dışına çıkma ve yeni kümeye dâhil olma olayları çok daha hızlı ve sık yaşanmaktadır. Küme değişimine bağlı olarak düğümlerin ağdan ayrı kalma sıklığının artması, ilgili düğümlerdeki paket kayıplarının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.3. Ağdaki gezgin düğümlerin hızının PDO başarımına etkisi

Düğüm hızlarının 1 m/s veya daha düşük olduğu durumlarda, tüm protokollerde, birbirlerine oldukça yakın PDO değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, LEACH-Mobile protokolünde, gezgin düğüm hızlarının artmasına paralel olarak PDO değerlerinin hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Söz konusu düşüşün sebebi, küme tabanlı protokollerde, hızlarının artmasıyla düğümlerin ağdan ayrılma sayısının

ve sıklığının artması olduğu bilinmektedir. LEACH-Mobile protokolünde, ağdan ayrı kalan düğümlerin yeniden ağa dâhil olması uzun zaman alabilmektedir. Ayrı kalma sürelerinin artması, ilgili düğümlerdeki paket kayıplarının artmasına yol açmaktadır. CBR-Mobile protokolü, LEACH-Mobile ile bu bakıdan aynı özellikte olmasına rağmen CBR-Mobile protokolünde çok daha iyi ve kararlı sonuçlar alınabilmektedir. Bu durumun iki ayrı sebebi bulunmaktadır: Birincisi, gezginlik özelliğine bağlı olarak ağdan ayrı kalan düğümler, kısa süre içinde yeniden ağa dâhil olabilmektedir. İkincisi ise her zaman diliminin, asil ve yedek olmak üzere, kümedeki iki ayrı düğüme atanmasıyla paket gecikme ve kayıplarının azaltılmasıdır.

Gezgin düğümler arasındaki bağlantı hatalarının sayısı, önemli ölçüde düğüm hızlarına bağlı olarak artmaktadır. Bu sebeple, hızlı hareket eden düğümler üzerinden yönlendirilen paketler için yol güvenilirliğinin sağlanması oldukça zor bir görevdir. MACRO protokolü, geliştirilen katmanlararası yaklaşımı ile söz konusu görevi yüksek oranda başarabilmektedir. Şekil 4.3'te görülebileceği gibi PDO açısından CBR-Mobile protokolüne göre yaklaşık %16, LEACH-Mobile protokolüne göre %56'ya kadar daha yüksek başarım elde edilebilmektedir. Ayrıca, MACRO, düğüm hızlarının artmasına rağmen oldukça kararlı sonuçlar sunmaktadır.

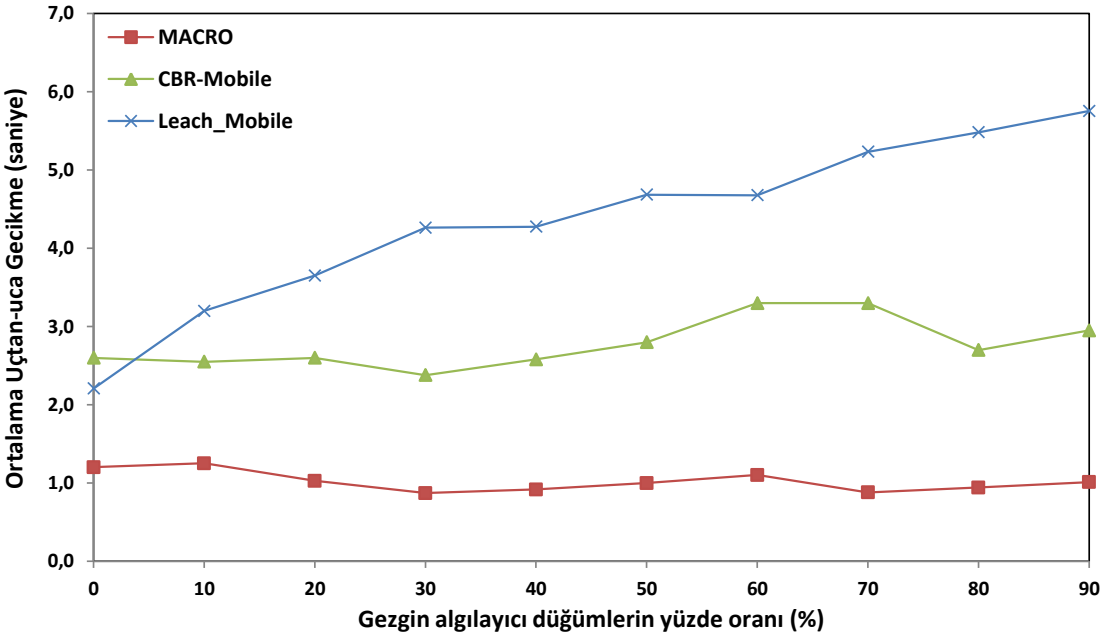
4.4. Ortalama Uçtan-uca Paket Gecikmesi Başarım Değerlendirmesi

Bu alt bölümde, önerilen senaryolar üzerinden gerçekleştirilen benzetim sonuçları kullanılarak MACRO, CBR-Mobile ve LEACH-Mobile protokollerinin ortalama UUG başarım değerlendirmesi karşılaştırmalı olarak yapılmaktadır.

4.4.1. Sabit hızlı gezgin veya hareketsiz düğümlerden oluşan senaryo

Bu senaryoda, GAA uygulaması için gezgin düğümlerin sayısındaki değişimin ortalama UUG üzerindeki etkisi incelenmektedir. Şekil 4.4'te, ağdaki gezgin düğümlerin sayısı artarken LEACH-Mobile protokolünün başarımının oldukça olumsuz ve hızlı bir şekilde kötüleştiği görülmektedir. Ağdan ayrılan gezgin düğümlerin yeniden ağa dâhil olması sürecinde, ilgili düğüm tarafından aktarılmak istenen paketler kuyrukta bekletilmektedir. Dolayısıyla, düğümlerin ağdan ayrı kalma sürelerinin uzunluğuna bağlı olarak paketlerin kuyrukta bekleme süreleri artmaktadır. Söz konusu bekleme süresinin artması ise UUG'nin artmasına sebep

olmaktadır. CBR-Mobile protokolünde, ağ ile bağlantısı kopan düğümlerin yeniden ağa bağlanma süreci, LEACH-Mobile protokolüne göre, daha kısa sürede tamamlandığından ortalama UUG açısından daha kararlı ve yüksek başarım elde edilebilmektedir.

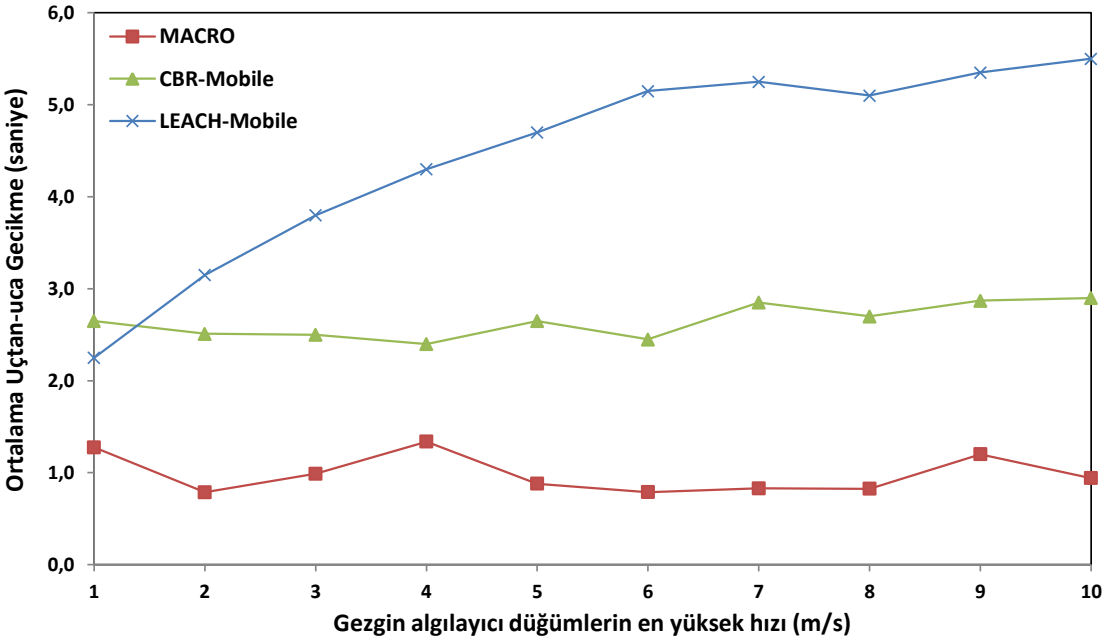


Şekil 4.4. Ağdaki gezgin düğümlerin oranının ortalama UUG başarımına etkisi

Şekil 4.4'te, ağdaki gezgin düğüm sayısının artmasına rağmen önerilen MACRO protokolünün UUG başarımının diğer protokollere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, MACRO ve CBR-Mobile protokollerine ait başarım sonuçları nispeten kararlı bir grafik çizmektedir. Gezginlik sebebiyle meydana gelen değişimlere uyum sağlayabilmek için her iki protokol de katmanlararası etkileşim kullanmaktadır. Ancak, bu protokoller çalışma prensipleri açısından birbirlerinden ayrılmaktadır. Önerilen MACRO protokolündeki temel amaç, yol güvenilirliğinin paket iletimi başlamadan önce sağlanması iken CBR-Mobile'deki amaç yol güvenilirliğini tehlikeye atan bağlantı hatalarının telafi sürelerinin kısaltılmasıdır. Bu yüzden, CBR-Mobile'de, düğümlerin gezginliğine bağlı olarak PDO başarımı düşerken (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5) ortalama UUG başarımı düşmediği gibi, kararlı bir grafik izlemektedir. Benzetim sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde ise önerilen MACRO protokolünün UUG başarımının, CBR-Mobile protokolüne göre yaklaşık 2,7 kat, LEACH-Mobile protokolüne göre ise 4,3 kat daha iyi olduğu görülebilmektedir.

4.4.2. Değişken hızlı tamamı gezgin düğümlerden oluşan senaryo

Bu senaryoda, tamamen gezgin düğümlerden oluşan bir GAA uygulamasında, düğümlerin hızlarındaki değişimin UUG üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. Şekil 4.5 incelendiğinde, düğümlerin hızı artarken LEACH-Mobile protokolünün ortalama UUG başarımının birinci senaryoya göre daha hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Gecikme başarımındaki bu azalmanın öncelikli sebebi ağdaki düğümlerin tamamının gezgin olmasıdır. Buna ek olarak, gezgin düğümlerin hızının da artıyor olması ağdan ayrılma sayısının yanı sıra sıklığının da artmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, paketlerin kuyrukta bekleyerek geçirdikleri süreler arttığı için ortalama UUG değerleri de artmaktadır. Benzer bir özellikte olmasına rağmen CBR-Mobile, gezginliğe uyarlanabilir yapısı sayesinde LEACH-Mobile protokolüne nispeten daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca, bu protokolde çok iyi düzeyde UUG başarımı elde edilememekle birlikte yüksek oranda kararlılık da söz konusudur. CBR-Mobile'deki UUG başarımının düşük olması düğümlerin kısa süreli de olsa ağdan ayrı kalmalarının sonucudur.



Şekil 4.5. Ağdaki gezgin düğümlerin hızının ortalama UUG başarımına etkisi

Şekil 4.5'te, MACRO ve CBR-Mobile protokollerinin ortalama UUG başarımlarının oldukça kararlı olduğu görülmektedir. Yol-yön keşif işlemlerinin kısa sürede tamamlanması ve bağlantı hatalarının düşük olması sebepleriyle, önerilen MACRO

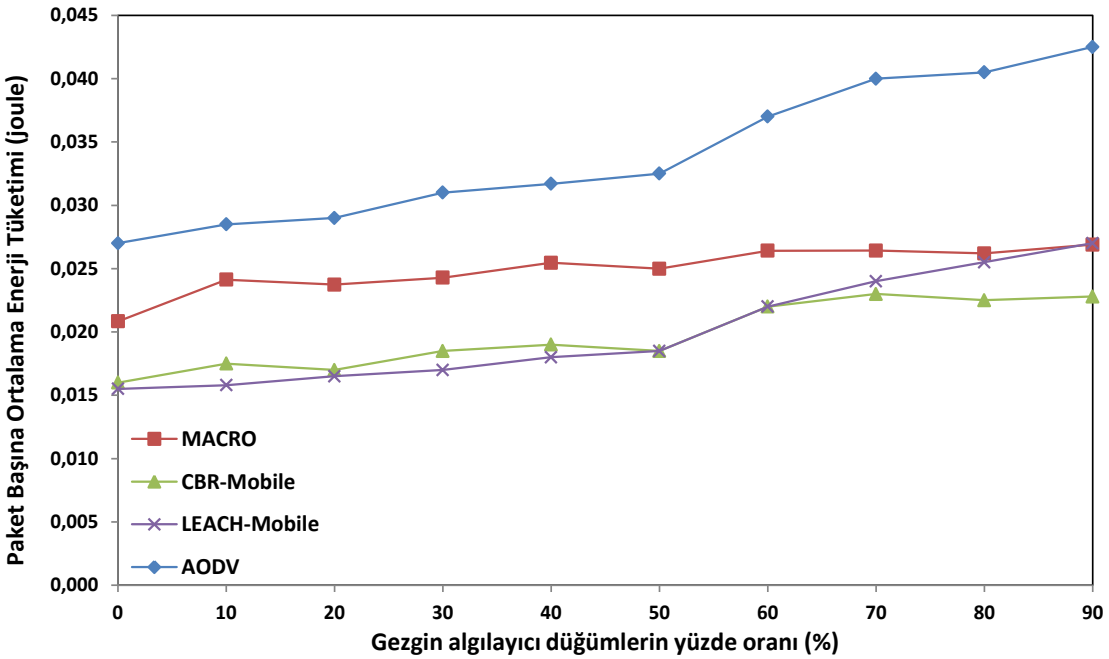
protokolü diğer protokollere göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, MACRO, CBR-Mobile protokolüne göre yaklaşık 2 kat ve LEACH-Mobile protokolüne göre ise yaklaşık 5 kat daha iyi UUG başarımı sunmaktadır.

4.5. Enerji Tüketim Değerlendirmesi

Bu alt bölümde, yine iki farklı uygulama senaryosu esas alınarak önerilen MACRO protokolünün enerji tüketim başarımı açısından CBR-Mobile ve LEACH-Mobile protokolleri ile karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmaktadır. Başarım değerlendirmesi için bir veri paketinin kaynak algılayıcı düğümden hedef merkez istasyona iletilmesi sürecinde harcanan ortalama enerji miktarı referans alınmaktadır.

4.5.1. Sabit hızlı gezgin veya hareketsiz düğümlerden oluşan senaryo

Bu senaryoda, modellenen GAA uygulaması için ağdaki gezgin düğümlerin sayısındaki değişimin ortalama enerji tüketimine etkisi incelenmektedir. Şekil 4.6'da, farklı yönlendirme protokolleri için bir veri paketinin kaynak düğümden hedef düğüme iletilmesi sürecinde harcanan ortalama enerji değerleri görülmektedir. Gezgin düğümlerin oranı yükseldiğinde genel olarak tüm protokoller için enerji başarımı kötüleşmektedir.



Şekil 4.6. Ağdaki gezgin düğümlerin oranının ortalama enerji tüketimine etkisi

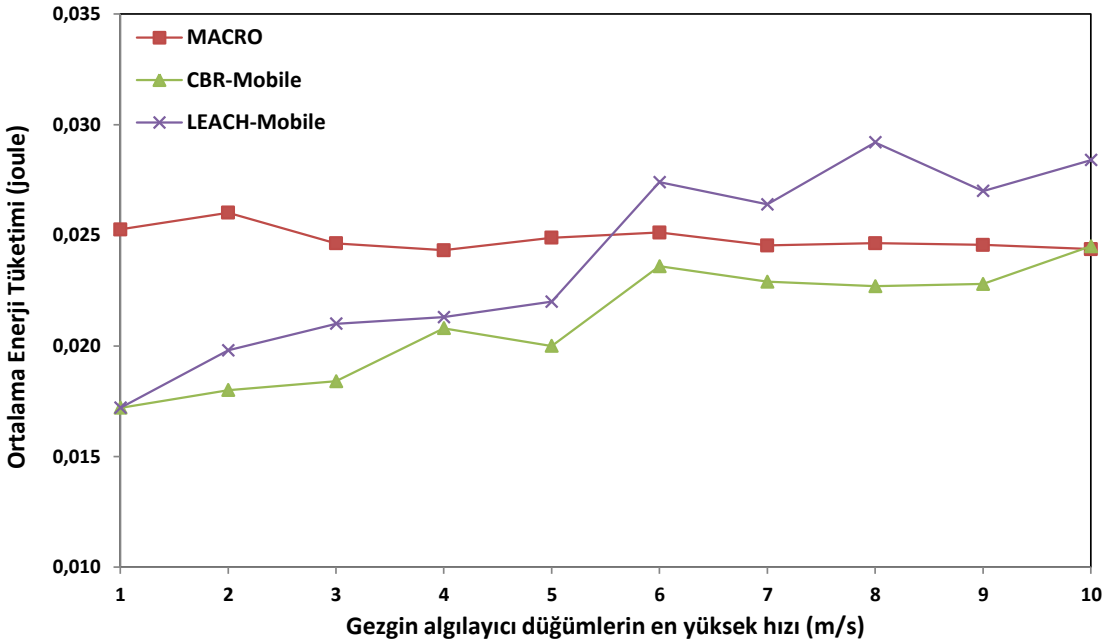
CBR-Mobile ve LEACH-Mobile protokollerinde, düğümlerin gezginlik oranlarına bağlı olarak geçici bir süre için ağ ile bağlantısı kesilen çok sayıda gezgin düğüm bulunmaktadır. Özellikle bu düğümler, yeni bir kümeye dâhil olmak için belli bir süre boyunca kablosuz haberleşme cihazlarını açık tutarak küme liderlerinden gelecek kayıt mesajlarını beklerler. Bekleme sırasında diğer düğümler tarafından gönderilen mesajlar da alındığından söz konusu düğümlerdeki enerji tüketimi daha da fazla olmaktadır. Düğümlerin, ağdan ayrı kalma sürelerinin uzamasına bağlı olarak istenmeyen bir şekilde enerji tüketimi de artmaktadır. Diğer protokollerle karşılaştırıldığında, AODV'de tüketilen enerjinin fazla olmasının sebebi kablosuz ortamın gereksiz dinlenilmesi esnasında harcanan enerji miktarının çok daha fazla olmasıdır. Ayrıca, AODV'de gezginliğe bağlı olarak yol hataları da artmaktadır. Yol hatalarının giderilmesi için yayınlanan yol-yön keşif ve bakım paketlerinin artması harcanan enerjinin artmasına yol açmaktadır. Önerilen MACRO protokolünde, talep olmadığı dönemlerde düğümler uyku düzenine geçirilerek, geleneksel protokollerde karşılaşılan gereksiz ortam dinlenilmesine bağlı olarak harcanan enerjinin azaltılması için "uyarlanabilir görev süresi" yöntemi kullanılmaktadır.

CBR-Mobile ve LEACH-Mobile protokolleri, zamanlama tabanlı OEK protokolü kullanmaktadır. Zamanlama tabanlı haberleşmede, gereksiz ortam dinlemesi söz konusu olmadığından enerji kullanımı çekişme tabanlı haberleşmeye göre daha verimlidir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi bu protokollerin enerji başarımı, diğer protokollere göre daha yüksektir. Önerilen MACRO protokolünde ise çekişme tabanlı bir OEK protokolü kullanıldığından enerji tüketimi, bahsedilen iki protokole göre kısmen daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte, MACRO protokolünün, düğümlerin gezginliğinin artmasına karşın gösterdiği kararlı başarımın yanı sıra yüksek gezginlik oranlarında diğer protokollere yakın sonuçlar verdiği ve sonuçların 0,025 Joule değerine yakınsadığı Şekil 4.6'daki grafikte açıkça görülebilmektedir.

4.5.2. Değişken hızlı tamamı gezgin düğümlerden oluşan senaryo

Bu senaryoda, tamamı gezgin düğümlerden oluşan bir GAA uygulamasında, hızlarındaki değişimin düğümlerin enerji tüketim başarımı üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. Şekil 4.7'deki farklı protokollere ait enerji tüketim grafikleri incelendiğinde, düğümlerin hızlarının artmasıyla önerilen MACRO protokolü

dışındaki tüm protokollerin enerji başarımlarının son derece olumsuz bir şekilde etkilendiği görülmektedir. CBR-Mobile protokolüne ait ortalama enerji tüketiminin, LEACH-Mobile ile karşılaştırıldığında yaklaşık %22 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Gezgin düğümlerin hızının artmasına bağlı olarak düğümlerin küme değiştirme hızı ve sıklığı, birinci senaryoya göre daha fazladır. Bu sebeple, düğümlerin ağdan ayrı kaldığı dönemlerinin süresi daha uzun olmaktadır. Bu dönemdeki gereksiz ortam dinlemesi de enerji tüketimini artırmaktadır. Önerilen MACRO protokolü, gezginliğe (değişken ve artan düğüm hızlarına) uyarlanabilir tasarımı sayesinde, bağlantı hatalarını ve paket kayıplarını azaltmaktadır. Yüksek gezginlik oranlarında, özellikle PDO ve ortalama UUG sonuçları da dikkate alındığında başarılı bir ödünleşme ile diğer protokollere göre yakın bir enerji kullanım başarımı sunmaktadır.



Şekil 4.7. Ağdaki gezgin düğümlerin hızının ortalama enerji tüketimine etkisi

4.6. Sonuç

Bu bölümde, önerilen MACRO protokolünü kullanan örnek bir GAA uygulamasının OPNET Modeler yazılımı kullanılarak farklı iki senaryo için benzetimleri yapılmıştır. Birinci senaryoda ağdaki gezgin düğümlerin yüzde oranındaki değişimin ve ikincisinde tamamı gezgin olan düğümlerin ulaşabileceği en yüksek hızdaki değişimin farklı başarım ölçütleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

MACRO protokolünün benzetim sonuçları; paket dağıtım oranı (PDO), ortalama uçtan-uca gecikme (UUG) ve ortalama enerji tüketimi açılarından, bilinen üç farklı yönlendirme protokolünün (AODV, LEACH-Mobile ve CBR-Mobile) sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucunda, önerilen MACRO yönlendirme protokolünün, karşılaştırılan diğer protokollere göre paket dağıtım oranı açısından iki kata, ortalama uçtan-uca paket gecikmesi açısından ise beş kata kadar daha yüksek başarım sunduğu görülmüştür. Bununla birlikte, öngörülen bir ödünleşme ile MACRO protokolünün paket dağıtım oranı ve ortalama uçtan-uca paket gecikmesi başarımı diğer protokollerinkinden beş kata kadar iyi olmasına rağmen paket başına ortalama enerji tüketimi açısından MACRO protokolünün başarımı diğer protokollerinkine yakın değerlerde çıkmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gezgin ağlarda, verilerin hedefe ulaştırılabilmesi için güvenilir yollara ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat güvenilir yolların keşfedilmesi ve mevcut olanların güvenilirliğinin sürdürülmesi, düğümlerin gezgin olmasına bağlı olarak oldukça zor görevlerdir. Gezginlik, genellikle düğümler arasındaki bağlantı hatalarının artmasına yol açmaktadır. Özellikle, veri iletimi sırasında meydana gelen bağlantı hataları paket kayıplarının ve gecikmelerinin artmasına sebep olmaktadır. Söz konusu problemlerin aşılması için verimli yönlendirme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yönlendirme protokolleri yeni yol-yön keşif, paket yönlendirme ve yol-yön yönetim algoritmalarının birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Literatürde sunulan yol-yön keşif algoritmalarının çoğunda taşma yöntemi kullanılmaktadır. Taşma yöntemi, genellikle tıkanıklığa, paket çarpışmalarına ve enerji israfına sebep olmaktadır. Bu nedenle, yönlendirme algoritmalarının tasarımında ağ katmanının yanı sıra diğer katmanların ve ağın genel başarımının da dikkate alınması gerekmektedir. Bahsedilen gereksinimin karşılanması için katmanlararası etkileşimli protokollerin geliştirilmesi önerilmektedir.

Sunulan tez çalışmaları kapsamında, GAA'larda paket iletim güvenilirliğini artırmak için katmanlararası etkileşimli bir yönlendirme yaklaşımı ve bu yaklaşımı esas alan güvenilir bir yönlendirme protokolü (MACRO) tasarlanmıştır. Önerilen yaklaşım, bütünleşik bir protokol içerisinde beş OSI referans katmanının etkileşimini kullanan, literatürdeki ilk katmanlararası etkileşimli tasarımdır.

MACRO yönlendirme protokolü, güvenilir yolların bulunabilmesi için geliştirilen, yeni bir yol-yön keşif algoritması kullanmaktadır. Söz konusu algoritma ağ trafiğini azaltarak, aşırı enerji tüketimini ve gereksiz paket iletiminden kaynaklanan tıkanıklıkları önlemektedir. Algoritma, güvenilir yolların keşfedilmesinin yanı sıra en kısa yolların bulunmasını da sağlamaktadır. Sık kullanılan yollar üzerindeki düğümlerin enerjileri daha çabuk tükendiğinden, ağ bir süre sonra kullanılamaz hale

gelmektedir. Bu problemin çözümü için, belirli bir zaman aralığında düğümlerin aktaracağı paket sayısı denetimli sınırlandırılarak yük dengelemesi yapılmaktadır.

Önerilen MACRO yönlendirme protokolü ile üç önemli yenilik sağlanmıştır:

- Literatürde ilk defa, beş OSI referans modeli katmanlarının tamamını tek protokol içerisinde birleştiren katmanlararası etkileşimli yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir.
- Katmanlararası etkileşim ve işbirliği esasına dayalı olarak geliştirilen verimli yol-yön keşif ve yönetim algoritmalarıyla GAA yönlendirme güvenilirliği artırılarak paket dağıtım oranı ve uçtan-uca gecikme sonuçları açısından geleneksel protokollere kıyasla yüksek başarım elde edilmiştir.
- Mevcut yönlendirme protokollerinde sıklıkla kullanılan taşma (flooding) yol-yön keşif algoritması üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Geliştirilen yeni algoritmayla ağ kaynaklarının verimli kullanılmasının yanı sıra en kısa ve güvenilir yolların keşfedilmesi sağlanmıştır.

Sunulan tez çalışmasının getirdiği bu üç ana yeniliğin yanı sıra aşağıda sıralanan ek özellikleri ve üç önemli katkısı da bulunmaktadır.

Ek özellikleri:

- Boşta dinleme esnasında harcanan gereksiz enerji tüketimini azaltmak amacıyla, ağ katmanı ile etkileşimli çalışan yeni bir "uyarlanabilir görev süresi" algoritması geliştirilmiştir.
- Önerilen yeni yönlendirme yaklaşımı tüm gezgin tasarsız ağ sistemlerine kolayca uyarlanabilir ve esnek bir tasarıma sahiptir.
- Çekişmeli haberleşme ortamından kaynaklanan sınırlamalar dışında, önerilen yeni yönlendirme yaklaşımıyla teorik olarak ölçeklenebilirlik sınırı bulunmayan bir protokol geliştirilmiştir.

Ek katkıları:

- Düğümler arasındaki bağlantı güvenilirliğinin sağlanması için ağdaki trafiği ve enerji tüketimini olumsuz etkileyecek dinamik bir yöntem kullanılmamaktadır. Önerilen MACRO protokolünde, iletilen mevcut ağ katmanı paketlerinden yararlanılarak ağdaki gereksiz paket trafiği ve enerji tüketimi azaltılmaktadır.

- Çekişme tabanlı OEK protokollerinde, haberleşme ortamının gereksiz dinlenmesi enerji tüketimini artırmaktadır. Geliştirilen yeni "uyarlanabilir görev süresi" algoritmasıyla haberleşmeye katılmayan düğümlerin boşta dinleme esnasında harcadıkları enerji azaltılmaktadır.
- Yol talep paketini alan ara düğümler ulaşım ve ağ katmanlarının etkileşimini kullanarak yönlendirmeye katılma kararını kendileri almaktadır. Böylece, ağdaki yük dağılımı dengelenirken, olası tıkanıklıkların da önüne geçilmektedir.

5.1. Öneriler

Sunulan tez çalışmaları kapsamında, tasarlanan yeni MACRO yönlendirme protokolünü kullanan örnek bir GAA'nın OPNET Modeler yazılımı ile benzetim modeli geliştirilmiş ve üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bir sonraki araştırma aşaması olarak, MACRO protokolü bir GAA uygulaması ilk örneği üzerinde gerçekleştirilebilir.

Önerilen MACRO protokolünde, ortam erişim yöntemi olarak CSMA/CA kullanılmaktadır. Ancak, CSMA gibi çekişme tabanlı sistemlerde, haberleşme ortamının gereksiz dinlenilmesi önemli ölçüde enerji israfına sebep olmaktadır. Söz konusu problemin çözülebilmesi için çekişmeli ve zamanlama tabanlı haberleşmeyi birleştiren melez bir yöntem kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Çakıcı S., Kablosuz Algılayıcı Ağların Analitik Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 341426.

[2] Akyildiz I. F., Su W., Sankasubramaniam Y., Cayirci E., Wireless Sensor Networks: A Survey, *Computer Networks*, 2002, **38**, 393-422.

[3] Basagni S., Carosi A., Petrioli C., Mobility in Wireless Sensor Networks, Editör: Boukerche A., *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*, 1st Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 267-305, 2009.

[4] Cakici S., Erturk I., Karahan A., The Cross-layer Interaction Approach and Using in Mobile Sensor Network Routing Protocols, *The 6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazig, Turkey, 16-18 May 2011.

[5] Tanenbaum A. S., Van Steen M., *Distributed Systems Principles and Paradigms*, 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2007.

[6] Srivastava V., Motani M., Cross-layer Design: A Survey and the Road Ahead, *IEEE Communications Magazine*, 2005, **43**, 112-119.

[7] Ramachandran B., Shanmugavel S., Mobility Adaptive Cross Layer Design for Reliable Route Discovery in Ad-hoc Networks, *IEEE 3rd International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks*, Allahabad, India, 13-15 December 2007.

[8] Perkins C. E., Royer E. M., Ad-hoc on-demand distance vector routing, *IEEE 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, New Orleans, USA, 25-26 February 1999.

[9] Gunasekaran R., Qi H., XLRP: Cross Layer Routing Protocol for Wireless Sensor Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Las Vegas, USA, 31 March-3 April 2008.

[10] Liu S., Bai Y., Sha M., Deng Q., Qian D., CLEEP: A Novel Cross-Layer Energy-Efficient Protocol for Wireless Sensor Networks, *The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Dalian, China, 12-14 October 2008.

[11] Bai Y., Liu S., Sha M., Lu Y., Xu C., An Energy Optimization Protocol Based on Cross-Layer for Wireless Sensor Networks, *Journal of Communications*, 2008, **3**, 27-34.

[12] Chilamkurti N., Zeadally S., Vasilakos A., Sharma V., Cross-Layer Support for Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks, *Journal of Sensors*, 2009, **134165**, 1-9.

[13] Zhang T., Chen L., Chen D., Xie L., EEFF: A Cross-Layer Designed Energy Efficient Fast Forwarding Protocol for Wireless Sensor Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Budapest, Hungary, 5-8 April 2009.

[14] Huang P., Chen H., Xing G., Tan Y., SGF: A State-Free Gradient-Based Forwarding Protocol for Wireless Sensor Networks, *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, **5**, 1-25.

[15] Vuran M. C., Akyildiz I. F., XLP: A Cross-Layer Protocol for Efficient Communication in Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, **9**, 1578-1591.

[16] Fang W., Liu Z., Liu F., A Cross-Layer Protocol for Reliable and Efficient Communication in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2012, **8**, 7185-7198.

[17] Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H., Energy efficient routing protocols for wireless microsensor networks, *The 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, Hawaii, 4-7 January 2000.

[18] Kim D., Chung Y., Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Network, *IEEE 1st International Multi-Symposium of Computer and Computational Sciences*, Hangzhou, China, 20-24 June 2006.

[19] Awwad S. A. B., Ng C. K., Noordin N. K., Rasid M. F. A., Cluster Based Routing protocol for Mobile Nodes in Wireless Sensor Network, *Wireless Personal Communications*, 2011, **61**, 251-281.

[20] Daabaj K., Ahmeda S., Real-Time Cross-Layer Routing Protocol for Ad Hoc Wireless Sensor Networks, Editor: Schmidt M., *Advances in Computer Science and Engineering*, 1st Edition, InTech, Rijeka, 71-94, 2011.

[21] Babulal K. S., Tewari R. R., Cross layer design with link and reliability analysis for wireless sensor network, *International Conference on Engineering*, Ahmedabad, Gujarat, 8-10 December 2011.

[22] Nabil A. A., Shafiullah K., Jaime L., Jonathan L., Secure Routing Protocol Using Cross-Layer Design and Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, **374796**, 1-11.

[23] Yick J., Mukherjee B., Ghosal D., Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, 2008, **52**, 2292–2330.

[24] Baronti P., Pillai P., Chook V., Chessa S., Gotta A., Hu Y. F., Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards, *Computer Communications*, 2007, **30**, 1655-1695.

[25] Raisinghani V. T., Iyer S., Cross-layer Design Optimizations in Wireless Protocol Stacks, *Advances in Future Mobile/Wireless Networks and Services*, 2004, **27**, 720-724.

[26] Mendes L. D. P., Rodrigues J. J. P. C., A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks, *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, **34**, 523-534.

[27] Hurni P., Braun T., Bhargava B. K., Zhang Y., Multi-hop Cross-layer Design in Wireless Sensor Networks: A Case Study, *IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication*, Avignon, France, 12-14 December 2008.

[28] Villalba L. J. G., Orozco A. L. S., Cabrera A. T., Abbas C. J. B., Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, *Sensors*, 2009, **9**, 8399-8421.

[29] Chuang S., Chen C., Jiang C., Minimum-Delay Energy-Efficient Source to Multisink Routing in Wireless Sensor Networks, *International Conference on Parallel and Distributed Systems*, Taiwan, China, 5-7 December 2007.

[30] Akkaya K., Younis M., A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks, *Ad hoc Networks*, 2005, **3**, 325-349.

[31] Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D., Heidemann J., Silva, F., Directed diffusion for wireless sensor networking, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, **11**, 2-16.

[32] Heinzelman W., Kulik J., Balakrishnan H., Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, *The 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Seattle, Washington, 15-20 August 1999.

[33] Shah R., Rabaey J., Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks, *The IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Orlando, Florida, 17-21 March 2002.

[34] Sadagopan N., Krishnamachari B., Helmy A., The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks, *IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, Anchorage, Alaska, 11 May 2003.

[35] Lindsey S., Raghavendra C. S., Sivalingam K., Data gathering in sensor networks using the energy*delay metric, *The 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, San Francisco, USA, 23-27 April 2001.

[36] Lindsey S., Raghavendra C. S., PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems, *IEEE Aerospace Conference*, Los Angeles, USA, 9-16 March 2002.

[37] Manjeshwar A., Agrawal D. P., TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, *The 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, San Francisco, USA, 23-27 April 2001.

[38] Manjeshwar A., Agrawal D. P., APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks, *The 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing*, Florida, USA, 15-19 April 2002.

[39] Younis M., Youssef M., Arisha K., Energy-aware routing in cluster-based sensor networks, *The 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, Texas, USA, 16-18 October 2002.

[40] Rodoplu V., Ming T. H., Minimum energy mobile wireless networks, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 1999, **17**, 1333–1344.

[41] Li L., Halpern J. Y, Minimum energy mobile wireless networks revisited, *IEEE International Conference on Communications*, Helsinki, Finland, 11-14 June 2001.

[42] Xu Y., Heidemann J., Estrin D., Geography-informed energy conservation for ad hoc routing, *The 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Rome, Italy, 16-21 July 2001.

[43] Yu Y., Estrin D., Govindan R., Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks, *UCLA Computer Science Department*, UCLA-CSD TR-01-0023, 1-11, 2001.

[44] Al-Karaki J., Kamal A. E., Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Magazine*, 2004, **11**, 6-28.

[45] Huang X., Zhai H., Fang Y., Robust cooperative routing protocol in mobile wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, **7**, 5278-5285.

[46] Karim L., Nasser N., Reliable location-aware routing protocol for mobile wireless sensor network, *IET Communications*, 2012, **6**, 2149-2158.

[47] Deng S., Li J., Shen L., Mobility-based clustering protocol for wireless sensor networks with mobile nodes, *IET Wireless Sensor Systems*, 2011, **1**, 39-47.

[48] Wang Y., Wu H., Tzeng N., Cross-Layer Protocol Design and Optimization for Delay/Fault-Tolerant Mobile Sensor Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, **26**, 809-819.

[49] Boukerche A., Turgut B., Aydin N., Ahmad M. Z., Boloni L., Turgut D., Routing protocols in ad hoc networks: A survey, *Computer Networks*, 2011, **55**, 3032-3080.

[50] Yadav S. N, Yadav R. P., Performance Comparison and Analysis of Table-Driven and On-Demand Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks, *International Journal of Information and Communication Engineering*, 2008, **4**, 411-419.

[51] Su M., WARP: A wormhole-avoidance routing protocol by anomaly detection in mobile ad hoc networks, *Computers & Security*, 2010, **29**, 208-224.

[52] Sethom K., Al- Ibrahimi N., Pujolle G., Ing: Indoor Routing Protocol for Green Home Networks, *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, 2011, **3**, 33-44.

[53] Men C., Lu Y., Wang D., A MAC Protocol with Little Idle Listening for Wireless Sensor Networks, *Emerging Direction in Embedded and Ubiquitous Computing*, Taipei, Taiwan, 17-20 December 2007.

[54] Ye W., Heidemann J., Estrin D., An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *The 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, New York, USA, 23-27 June 2002.

[55] Camp T., Boleng J., Davies V., A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2002, **2**, 483–502.

EKLER

EK-A

Önerilen MACRO yönlendirme algoritmasının program kodları tez çalışmasının ekindeki CD'de sunulmaktadır.

EK-B

Önerilen MACRO yönlendirme protokolünün OPNET Modeler benzetim modeli tez çalışmasının ekindeki CD'de sunulmaktadır.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Karahan A., Erturk I., Atmaca S., **Cakici S.**, Generic Analytical and Simulation Model for TDMA-based Wireless Sensor Network Medium Access Control Protocols, *SDU International Journal of Technological Sciences*, 2013, **5**, 128-141.

[2] Sahin I., **Cakici S.**, Erdogmus P., Performance and Cost Evaluations of Adders Used in FPGA-Based Systems, *E-Journal of New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, 2011, **6**, 73-84.

[3] **Cakici S.**, Erturk I., Karahan A., Katmanlar Arası Etkileşim Yaklaşımı ve Gezgin Algılayıcı Ağ Yönlendirme Protokollerinde Kullanımı, *The 6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazig, Turkey, 16-18 May 2011.

[4] Karahan A., Erturk I., Atmaca S., **Cakici S.**, A Hybrid Wireless Sensor Network MAC protocol, *The 6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazig, Turkey, 16-18 May 2011.

[5] Karahan A., Erturk I., Atmaca S., **Cakici S.**, Teaching Wireless Sensor Network Applications Using Computer Modeling and Simulation Approach, *The 4th International Computer and Instructional Technologies Symposium*, Konya, Turkey, 24-26 September 2010.

[6] **Cakici S.,** Erturk I., Karahan A., Atmaca S., An Integrated Approach for Analytical Modeling of WSNs, *IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, Baku, Azerbaijan, 14-16 October 2009.

ÖZGEÇMİŞ

1984'te İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Tekirdağ'da, orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nden 2006 yılında Elektronik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2006 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2009 yılında tamamladı. 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde başladığı doktora eğitimine halen devam etmektedir. 2008 yılından beri Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.