

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİ
MELEZ ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLÜ**

ALPER KARAHAN

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİ
MELEZ ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLÜ

ALPER KARAHAAN


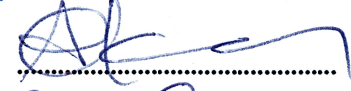



Prof.Dr. İsmail ERTÜRK
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Adnan KAVAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

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

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

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


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.02.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Milyarlarca insanın bir arada yaşadığı ve sürekli hareket halinde olduğu günümüz dünyasında, kablosuz haberleşmenin önemi giderek artmaktadır. Yaşam temposunun artması, daha küçük ve taşınabilir cihaz arayışı ile birlikte bilgiye anında erişim isteğini de beraberinde getirmektedir. Askeri alanlardan sağlığa ve tarıma kadar geniş yelpazeli, özel bir ağ olan kablosuz algılayıcı ağlar da bilgiye erişimi kolaylaştırmaları dolayısıyla yaygın hale gelmektedir. Bu özel ağlar sayesinde fiziksel büyüklükler anlık olarak algılanabilmekte, işlenebilmekte ve tüm bunlardan da öte olaylara müdahalede bulunulabilmektedir. Yaşamı kolaylaştıracak teknolojiler arasında kablosuz algılayıcı ağların yeri bu açıdan bakıldığında çok daha net bir şekilde anlaşılmaktadır.

Tez çalışmasında, kablosuz algılayıcı düğümlerin sürekli küçülmeleri ve hayatın her alanında yaygınlaşmaları dolayısıyla açığa çıkan düğümlerdeki kısıtlı enerjinin kullanım problemlerine, kablosuz ortamın etkili ve adil bir şekilde paylaşılması esasıyla çözüm üretilmeye çalışılmakta ve bu açıdan eşleniklerine göre kayda değer bir enerji verimliliği sonucu sunulmaktadır.

Akademik hayatıma başladığım günden bu yana her türlü problemimle yakından ilgilenen, daima her açıdan en iyiler arasında yer almam telkiniyle motive eden ve mezuniyet aşamasına getiren değerli Hocam Sayın Prof. Dr. İsmail ERTÜRK'e öncelikle minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans ve doktora tezim boyunca kendisinden çok şey öğrendiğim, her türlü problemimde, en yoğun zamanlarında bile bana yardım için koşacağını bildiğim Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Sedat ATMACA'ya, yaptığı çalışmalarla akademik hayatımızda bize yeni ufuklar açan ve yardımını esirgemeyen Hocam Sayın Doç. Dr. Celal ÇEKEN'e, lisans yıllarımdan bu yana desteğini esirgemeyen Hocam Sayın Doç. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ'a, tez jürimde bulunarak katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Adnan KAVAK'a, kardeşimden ayırmadığım, desteklerini her zaman yanımda bulduğum değerli dostlarım Ergin ERYILMAZ ve Süleyman ÇAKICI'ya teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarımin her birine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Beni dünyaya getiren ve her türlü zorluğa katlanarak yetiştiren annem Emine ve babam Mustafa KARAHAN'a, tanıdığım günden bu yana her zaman desteğini yanımda bulduğum, sabırla beni dinleyen ve kendi zamanlarından fedakârlık ederek yardımcı olmaya çalışan eşim Zübeyde'ye ve mutluluk kaynağımız, kızımız Zümra'ya sonsuz teşekkürler.

Şubat – 2014

Alper KARAHAN

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.....	5
1.3. Tez Çalışmasının Katkıları	8
1.4. Tez Düzeni	10
2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR VE OEK PROTOKOLLERİ.....	11
2.1. Giriş.....	11
2.2. KAA Mimarisi ve Uygulama Alanları.....	11
2.3. KAA’larda Kullanılan OEK Protokol Türleri.....	14
2.3.1. Çekişme tabanlı OEK protokolleri	14
2.3.2. Zamanlama tabanlı OEK protokolleri	15
2.3.3. Kod bölmeli OEK protokolleri	15
2.3.4. Melez OEK protokolleri	16
2.3.5. Tez çalışmasında tercih edilen OEK protokol türleri ve seçilme sebepleri.....	16
2.4. KAA’ları Modelleme Yöntemleri.....	17
2.4.1. Analitik yöntem	17
2.4.2. Benzetim yöntemi	17
2.4.3. İlk örnek yöntemi.....	18
2.4.4. Tez çalışmasında kullanılan modelleme yöntemleri ve tercih sebepleri.....	18
2.5. Sonuç.....	18
3. GENİŞ ÖLÇEKLİ KAA’LAR İÇİN GELİŞTİRİLEN ENERJİ VERİMLİ MELEZ OEK PROTOKOLÜ (MELOEK)	20
3.1. Giriş.....	20
3.2. Önerilen MELOEK Protokolü ve Bileşenleri	20
3.2.1. Çoklu atlamalı topoloji	20
3.2.2. Geliştirilen standartlaştırılmış düğüm	23
3.2.3. Uyarlamalı çerçeve yapısı.....	23
3.2.4. Alma tabanlı zaman dilimi tahsis	24
3.2.4.1. Alma ve gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis yöntemlerinin karşılaştırılması	24
3.2.5. Geliştirilen MELOEK melez ortam erişim yöntemi genel yapısı	27
3.3. MELOEK Protokolü Benzetim Modeli ve Ayrıntıları.....	30
3.3.1. Proje modeli.....	30

3.3.2. Dügüm modeli	31
3.3.3. Süreç modeli	33
3.3.3.1. Kurulum düzeni süreç modeli	33
3.3.3.2. İletim düzeni süreç modeli	35
3.3.4. Paket yapıları	36
3.4. MELOEK Protokolü Analitik Modeli	37
3.4.1. Dügüm enerji tüketimi analitik modeli.....	37
3.4.2. İş çıkarma oranı analitik modeli	39
3.4.3. Uçtan uca paket gecikmesi analitik modeli	39
3.5. Sonuç.....	41
4. ÖNERİLEN MELOEK PROTOKOLÜ KULLANILAN ÖRNEK BİR KAA UYGULAMASI VE BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ.....	42
4.1. Giriş.....	42
4.2. Örnek KAA Uygulaması İçin Geliştirilen Benzetim Modeli	42
4.2.1. Topoloji.....	42
4.2.2. Başarım değerlendirmesinde kullanılan değişkenler	43
4.3. MELOEK Protokolünün Analitik ve Benzetim Modelleme Yöntemleri ile Doğrulanması.....	45
4.3.1. Enerji tüketim doğrulaması.....	45
4.3.2. İş çıkarma oranı doğrulaması.....	46
4.3.3. Uçtan uca paket gecikmesi doğrulaması.....	48
4.4. MELOEK Protokolünün Benzer Bilinen Bir Protokol İle Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi	49
4.4.1. Dügüm enerji tüketim değerlendirmesi	49
4.4.2. İş çıkarma oranı değerlendirilmesi.....	51
4.4.3. Paket dağıtım oranı değerlendirilmesi	52
4.4.4. Paket/Enerji tüketim değerlendirilmesi.....	53
4.5. Sonuç.....	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
5.1. Öneriler	57
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	66
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	69
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kablosuz düğümlerin temel yapısı	12
Şekil 2.2.	Kablosuz düğümlerde kullanılan protokol yapısı.....	13
Şekil 3.1.	CAA'larda kullanılan merkezi düğümlü topoloji	21
Şekil 3.2.	CAA'larda kullanılan çoklu atlamalı topoloji.....	22
Şekil 3.3.	Gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis tablosu	25
Şekil 3.4.	Alma tabanlı zaman dilimi tahsis tablosu	26
Şekil 3.5.	MELOEK protokolü akış şeması	29
Şekil 3.6.	MELOEK protokolü OPNET proje modeli	31
Şekil 3.7.	MELOEK protokolü OPNET düğüm modeli.....	32
Şekil 3.8.	Kurulum düzeni süreç modeli	34
Şekil 3.9.	İletim düzeni süreç modeli	35
Şekil 3.10.	Klavuz paketi yapısı	36
Şekil 3.11.	Veri paketi yapısı	37
Şekil 4.1.	Başarım değerlendirmesinde kullanılan CAA topolojisi	43
Şekil 4.2.	MELOEK protokolü düğüm enerji tüketimi doğrulaması	46
Şekil 4.3.	MELOEK protokolü iş çıkarma oranı doğrulaması	47
Şekil 4.4.	MELOEK protokolü uçtan uca paket gecikmesi doğrulaması.....	48
Şekil 4.5.	MELOEK protokolü enerji tüketim değerlendirmesi.....	50
Şekil 4.6.	MELOEK protokolü iş çıkarma oranı değerlendirmesi	51
Şekil 4.7.	MELOEK protokolü paket dağıtım oranı değerlendirmesi.....	53
Şekil 4.8.	MELOEK protokolü paket-enerji tüketim değerlendirmesi.....	54

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. TDMA OEK protokollerinde zaman dilimi tahsis yöntemleri	27
Tablo 4.1. Benzetimde ve analitik modellerde kullanılan değişkenler	44

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$\bar{E}_{Boşta}$: Düğümün boşa beklerken harcadığı ortalama enerji miktarı, (joule)
\bar{E}_{Rx}	: Düğümün paket alırken harcadığı ortalama enerji miktarı, (joule)
\bar{E}_{Tx}	: Düğümün paket gönderirken harcadığı ortalama enerji miktarı, (joule)
\bar{E}_{Uyku}	: Düğümün uyku durumunda harcadığı ortalama enerji miktarı, (joule)
\bar{E}_F	: Düğümün çerçeve boyunca harcadığı toplam enerji miktarı, (joule)
\bar{E}_T	: Düğümün belirli süre içerisinde harcadığı toplam enerji miktarı, (joule)
T_d	: Paket için veri iletim süresi, (s)
Q_M	: Bir çerçeve süresince kaynaktan gelen paket sayısının olasılık kütle fonksiyonu
m	: Kablosuz düğüme gelen anlık paket sayısı
P_{Rx}	: Paket alma işlemi için harcanan güç, (W)
P_{Tx}	: Paket gönderme işlemi için harcanan güç, (W)
$P_{Boşta}$: Düğüm boşa beklerken harcanan güç, (W)
P_{Uyku}	: Düğüm uyku durumunda beklerken harcanan güç, (W)
G	: Ortalama yük değeri
e	: Üstel dağılım
T_s	: Zaman dilimi uzunluğu, (s)
n	: Çerçevede bulunan zaman dilimi sayısı
η	: İş çıkarma oranı
γ	: Hedef düğümde alınan toplam paket sayısı
ζ	: Kaynak düğümden gönderilen toplam paket sayısı
λ	: Ortalama paket geliş oranı, (paket/s)
μ	: Servis sunucu için ortalama servis oranı, (paket/s)
X	: Rastgele değişken
$E[x]$: Kuyruktaki ortalama servis süresi, (s)
$E[W]$: Kuyruktaki ortalama bekleme süresi, (s)
$E[N]$: Kuyruktaki ortalama paket sayısı
ρ	: Trafik yoğunluğu

Kısaltmalar

ACK	: Acknowledgement (Alındı Onay Paketi)
CS	: Control Slot (Kontrol Zaman Dilimi)
CSMA	: Carrier Sense Multiple Access (Taşıyıcı Dinleyen Çoklu Erişim)
CDMA	: Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)

DCF	: Distributed Coordination Function (Dağıtık İşbirliği İşlevi)
FDMA	: Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
KAA	: Kablosuz Algılayıcı Ağ
MAC	: Medium Access Control (Ortam Erişim Kontrol)
MEMS	: Microelektromecanic Systems (Mikroelektromekanik Sistemler)
OEK	: Ortam Erişim Kontrol
OSI	: Open System Interconnection (Açık Sistem Ara-bağlantısı)
QoS	: Quality of Service (Servis Kalitesi)
PDO	: Paket Dağıtım Oranı
TDMA	: Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
TS	: Time Slot (Zaman Dilimi)
WN	: Wireless Node (Kablosuz Düğüm)
WSN	: Wireless Sensor Network (Kablosuz Algılayıcı Ağ)
ZD	: Zaman Dilimi

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR İÇİN ENERJİ VERİMLİ MELEZ ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLÜ

ÖZET

Bilgiye ihtiyacın sürekli ve hızla artması ile günümüzde fiziksel ortamlardan alınan bilgilerin sanal dünyada değerlendirilmesi ve gerekli tepkilerin verilmesinde kullanılan Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA'lar) hızla yaygınlaşmıştır. KAA'lar gelişmelerinin ilk zamanlarında sadece askeri uygulamalarda kullanılmalarına rağmen son yıllarda sağlıktan tarıma birçok uygulama alanı için tercih edilmektedir.

KAA uygulamalarında en kritik problemlerden biri düğümlerdeki sınırlı enerji kaynaklarıdır. KAA'larda enerji tüketiminin sebepleri incelendiğinde en fazla tüketimin kablosuz alıcı-verici biriminde meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle, KAA düğümlerindeki enerji tüketiminin en aza indirilmesi, çalışma düzeni büyük ölçüde Ortam Erişim Kontrol (OEK) katmanı fonksiyonları ile ilgili olan düğüm alıcı-verici biriminin yerinde ve etkin şekilde kullanımına bağlıdır. Bu katmanda kullanılacak olan OEK protokolü, ortamı adil bir şekilde paylaştıracak, çarpışmaları önleyecek ve düğümlerin kendileriyle ilgili olmayan verileri dinlemelerini en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. KAA uygulamaları son derece farklı gereksinimlere sahip olabildiklerinden tek tip bir OEK protokolü ile geniş bir aralıktaki uygulama alanlarına hitap edilememektedir. Bu nedenle, KAA kullanımının çeşitlenmesiyle birlikte dinamik ya da ihtiyaca uygun OEK tasarımı ön plana çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, geniş ölçekli KAA uygulamalarında kullanılmak üzere düğüm enerji tüketim verimliliğini esas alan ve MELOEK olarak adlandırılan melez bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Tasarlanan melez OEK protokolünde, Carrier Sense Multiple Access (CSMA) ve Time Division Multiple Access (TDMA) ortam erişim yöntemlerinin üstün yönleri bir arada kullanılmaktadır. Böylece geniş ölçekli KAA uygulamalarında her iki yöntemden de daha enerji verimli bir OEK protokolü hedeflenmiştir. Olaylara (events) hızlı tepki veren CSMA yöntemi ile çarpışma ve gereksiz dinlemeleri en aza indiren TDMA yöntemi alma tabanlı olarak bütünleştirilerek yüksek sistem başarımı ve düğüm enerji verimliliği elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Analitik Model, Kablosuz Algılayıcı Ağlar, OPNET Benzetim Modeli, Ortam Erişim Kontrol Protokolü.

ENERGY EFFICIENT HYBRID MEDIUM ACCESS CONTROL PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSNs), which are used for assessing data obtained from physical environment and then initiating a corresponding event accordingly, have rapidly become prevalent with the continuously and increasingly need for information technologies. Although initially used just for military purposes, they have been preferred for numerous areas ranging from the health applications to agriculture for the last decade.

One of the most critical problems for WSN applications is the limited node battery sources. Regarding the main sources of node energy consumption in WSNs, it is seen that most of the energy is consumed in the wireless transceiver operations. Therefore, reducing the energy consumption in Wireless Nodes (WNs) is highly dependent on the efficient usage of the transceiver unit, which is mainly related to the Medium Access Control (MAC) layer functions. The MAC protocol to be used in this layer should be designed to have the capability of allocating wireless medium fairly as well as avoiding both collisions and overhearing. As WSN applications have usually different kind of requirements and specifications, only a standard-type WSN MAC protocol cannot be sufficient for a wide range of applications. Therefore, application specific new design strategies necessary for the WSN MACs according to the user and/or application requirements have come to the fore.

In this thesis, a hybrid, energy efficient MAC, named as MELOEK, has been developed for usage in dense WSN applications. In the hybrid MAC designed, favorable aspects of both CSMA and TDMA techniques are considered. Consequently, a MAC protocol which is more energy efficient than both CSMA or TDMA-based MAC protocols is aimed. Therefore, with the combination of Carrier Sense Multiple Access (CSMA) which responses to the events rapidly and Time Division Multiple Access (TDMA) which reduces the collisions and unnecessary channel listening, high system throughput and node energy efficiency are obtained.

Keywords: Analytical Model, Wireless Sensor Networks, OPNET Simulation Model, Medium Access Control Protocol.

GİRİŞ

Kablosuz iletişim eğilimleri ilk olarak 1980’li yıllarda kablosuz ses ağları ile karşımıza çıkmaktadır. Ardından ikinci evre olarak 1999’da kablosuz veri ağları gündeme gelmiştir. Günümüzde ise, değişimin üçüncü aşaması olarak “internet of things” evresine girilmiştir. Söz konusu gelişmeler kablosuz ağlardaki makine–makine etkileşiminin daha ileri bir seviyeye taşımaktadır. Bunun anlamı, fiziksel dünya ile elektroniğin sanal dünyası arasındaki boşluğun kablosuz algılama ve kontrol teknolojileri ile doldurulmasıdır [1]. Orman yangınlarının otomatik olarak sezilmesi ve müdahalede bulunulması, araç trafiğinin düzenlenmesi, hastane kontrollerinin uzaktan yapılabilmesi gibi birçok yeni uygulama, binlerce algılayıcının kablosuz ortam üzerinden kuracakları ağlar sayesinde gerçekleştirilebilecektir. Tüm bunların gerçekleştirilmesi ise Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) algılama ve iletişim teknolojilerinin gelişimi ile mümkündür [2].

Kablosuz alıcı–verici, mikrodenetleyici, algılayıcı(lar) ve güç kaynağı biriminden oluşan kablosuz algılayıcı düğümler KAA’ları meydana getirmektedir. KAA’lar son yıllarda hızla gelişmekte ve yaşamın her alanında yerini almaktadır. Bu gelişimi bilgiye her yerden ve etkin erişim ihtiyacı tetiklerken mikroeletromekanik sistem (MEMs) teknolojilerindeki ilerlemeler de desteklemektedir [3].

Algılayıcı düğümler genellikle küçük boyutlarda üretilmektedir. Düğümlerin çalışması için gerekli enerji de yine bu küçük paket içerisindeki sınırlı kapasiteye sahip ve genellikle bütünleşik bataryalardan sağlanmaktadır. Enerjisi tükenen bataryaların değiştirilmesi birçok uygulama için mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, KAA uygulamalarındaki en önemli problemlerden biri düğümlerin enerji tüketim stratejilerinin belirlenmesidir [4]. Diğer ağ protokollerinde olduğu gibi, KAA’lar için geliştirilen ağ protokollerinde de OSI (Open System Interconnection) referans modeli esas alınmaktadır. Düğüm enerji tüketiminde en büyük etkiye sahip olan OSI katmanı Ortam Erişim Kontrol (OEK) alt–katmanıdır. OEK alt–katmanı, veri–bağı katmanının bir üyesidir ve düğüm enerji kaynaklarının önemli miktardaki

bölümünün tüketildiği kablosuz haberleşme biriminin fonksiyonlarını kontrol etmektedir [5, 6]. Uygulama alanlarının günden güne çeşitlendiği KAA'larda güncel gereksinimleri karşılayabilmesinin yanında, enerji kaynaklarını da verimli kullanan yeni ve uygulamaya özel OEK protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Sunulan tez çalışması kapsamında; geniş ölçekli KAA uygulamaları için TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemlerinin olumlu yönlerini tek bir protokolda birleştiren alma tabanlı melez bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Kısaca MELOEK (MELez OEK) olarak adlandırılan protokol, analitik ve benzetim modelleri ile doğrulanmaktadır. Yapılan karşılaştırmalı değerlendirmelerde kablosuz düğümlerin haberleşme başarımı yüksek tutulurken enerji tüketiminin en aza indirildiği gösterilmektedir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebepleri

Günümüzde kablosuz ağ teknolojileri, sundukları maliyet–etkin çözümleri, hareket kabiliyeti ve farklı platformlara kolaylıkla uyarlanabilme üstünlükleri sayesinde, birçok alanda hızla geleneksel kablolu eşleniklerinin yerini almaktadır [7]. Bunun yanında, ağ teknolojilerinin çeşitlenmesi ve üretim maliyetlerinin azalması özel amaçlı kablosuz ve gezgin ağların gelişimini desteklemektedir [3]. Söz konusu özel amaçlı ağ türlerinden biri olan KAA’lar, küçük boyutlu, sınırlı donanımlı ve enerji bağımlı düğümlerin kullanılması ile oluşturulurlar.

KAA’lar gelişiminin ilk safhalarında sadece askeri amaçlı olarak savaş alanlarının izlenmesi amacıyla kullanılmışlardır. Ancak, son zamanlarda çevresel gözlemden savunmaya, endüstriden sağlık alanına kadar birçok farklı alanı içine alan oldukça geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmuştur [8, 9]. Bununla birlikte, günümüzde özellikle geniş ölçekli ve uzun süreli çalışması gereken uygulamalar (yangın, sel, çevre gözlemi, askeri uygulamalar vb.) düşünüldüğünde uzun yaşam süresi, kendi kendine organize olabilme, dayanıklılık ve düşük hata oranı gibi gereksinimler ön plana çıkmaktadır [10–13]. KAA’ların tanımlı görevlerini yerine getirebilmesi ve kesintisiz sürdürebilmesi öncelikle düğümlerin enerjilerinin dengeli harcanması ve yaşam sürelerinin uzunluğuna bağlıdır. Kritik öneme sahip olduğu halde enerjisi tükenerek devre dışı kalan düğümler ağ bağlantısının başarısız olmasına neden olabilmektedir [14]. Düğümlerin yaşam süreleri genel olarak ağ ömrünü belirleyen en önemli göstergedir. Dolayısıyla, düğümlerin sınırlı kapasiteye sahip enerji kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlayacak güncel yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir [15–18].

Kablosuz düğümlerin enerji tüketim verileri incelendiğinde en fazla enerjinin kablosuz haberleşme biriminde harcadığı görülmektedir. Dolayısıyla bu birimin etkin kullanılabilmesi için kablosuz alıcı–vericilerin sadece haberleşmenin yapılacağı durumlarda açık olmaları, düğümlerin kendilerine ait olmayan gereksiz verileri

dinlememeleri veya fazladan veri gönderme/alma işleminin en aza indirilmesi gerekmektedir. Tüm bu sebepler dikkate alındığında, küçük boyutlu ve sınırlı kaynağa sahip düğümlerden oluşan KAA'ların en önemli tasarım problemlerinden olan enerji tasarruflu çalışma probleminin, fiziksel katmanla birlikte düğümlerin ortama erişimini belirleyen uygun ve maliyet-etkin bir OEK protokolü geliştirilmesiyle çözülebileceği öngörülmektedir [19–21].

Tez çalışmasında, sınır gözlemi ve çevre takibi gibi geniş ölçekli, rastgele düğüm dağıtmayı ve bu düğümlerin kendi kendilerine organize olmalarını gerektiren KAA uygulamalarında, başarımın yüksek tutularak, enerji tüketiminin en aza indirildiği, dolayısıyla ağın ömrünün uzatıldığı melez bir OEK protokolü tasarlanarak doğrulama ve değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çerçevede, temel ortam erişim yöntemlerinden TDMA ve CSMA birlikte düşünülerek her iki yöntemin ayrı ayrı kullanıldığı OEK protokollerinden de daha etkin ve enerji verimli bir OEK protokolü geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Geliştirilen MELOEK protokolünün ve başarım değerlendirmesinin yedi ana amacı bulunmaktadır:

- Rastgele dağıtılan KAA düğümlerinin uyanma zamanlarına bağlı olarak kendi kendilerine organize olmalarını sağlamak,
- Küme tabanlı haberleşme altyapısı kullanan çoklu atlamalı (multi-hop) bir iletişim kuralı geliştirmek,
- CSMA ortam erişim yönteminin, düğüm aktivitelerini sezmedeki hızlı tepki verme özelliği ile dinamik olarak çerçeve (frame) yapısı belirlemek,
- Çerçeve yapısına göre iletişim devam ederken TDMA ortam erişim yönteminin içinde CSMA kullanarak genel başarımı yükseltmek ve aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamak,
- Başarım değerlendirmesi için bir uygulama senaryosu esas alınarak, geliştirilen protokolün benzetim ve analitik modelini çıkarmak,
- Analitik ve benzetim modellerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak önerilen melez OEK protokolünün doğrulama işlemini gerçekleştirmek ve
- Benzer özellikteki bilinen bir OEK protokolü ile önerilen OEK protokolünün karşılaştırmalı başarım analizini ve değerlendirmesini yapmak.

1.2. Önceki Çalışmalar

Literatürde sunulan çalışmalar incelendiğinde, KAA'lar için önerilen çok sayıda OEK protokolü ile karşılaşılmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu protokollerde, genellikle ortam erişim yöntemlerinin sadece birinin benimsendiği görülmektedir. Birden fazla ortam erişim yönteminin işlevsel özelliklerini birleştiren melez yapıdaki protokollere ise daha az rastlanmaktadır. Bu tez çalışmasında melez bir OEK protokolü tasarımı önerildiğinden, literatürdeki ilgili çalışmalar arasından yalnız melez yapıya sahip ve başarımları diğer melez protokollere göre daha iyi olan başlıca protokoller seçilmiştir. Seçilen protokollere ait bilgiler ve bu protokoller ile önerilen tez çalışması arasındaki farklar aşağıda özetlenerek sunulmaktadır.

Wang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada enerji verimliliğini sağlamak için yerel çerçeve yapısı kullanan bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Bu protokolde haberleşme ortamının gereksiz dinlenilmesinin azaltılması amaçlanmaktadır. Komşu kablosuz düğümler her bir zaman dilimi belirleme sürecinde bilgilendirilmektedir. Ayrıca, bilgi almayacak olan düğümler uyku durumuna geçirilerek enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Önerilen tez çalışmasında zaman dilimi tahsisleri kümeleme yöntemine göre yapılmaktadır. Zamanlama çizelgesi bilgilendirmesinde düğümlerin bilgi almaya uygun olacağı zaman bilgisi iletilmektedir. Kablosuz düğümler sadece veri gönderme ve veri alma işlemlerini gerçekleştirecekleri zamanlarda “uyanık” tutulmaktadır. Böylece, gereksiz dinleme süresi azaltılarak enerji verimliliğinin artırılması hedeflenmektedir [22].

Cho ve diğ. yaptıkları çalışmada merkezi düğümlü haberleşme için yeni bir OEK protokolü önermişlerdir. Öncelik tabanlı melez zaman koordinesi (çekişmeli ve çekişmesiz) gerçekleştiren bu protokol güvenilir bir servis kalitesi desteği sunmaktadır. Ayrıca “rezervasyon şeması” kullanılarak, belirlenen kullanıcılar için en zor koşullarda bile yüksek iş çıkarma oranı sağlanabilmektedir. Bunun yanında, benimsenen periyodik kapatma şeması sayesinde enerji verimliliği arttırılmaktadır. Ancak geniş ölçekli ağlar söz konusu olduğunda merkezi düğümlü haberleşme uygun olmadığından, bunun yerine çoklu atlamalı (multi-hop) bir yapının geliştirilmesi zorunlu hale gelmektedir. Önerilen tez çalışmasında çoklu atlamalı bir yapı

kullanılması planlanmaktadır. Böylece geniş ölçekli ağlarda kullanılmak için uygun bir OEK protokolü geliştirilmesi öngörülmüştür [23].

Halkes ve Langendoen KAA düğümlerinin çok yoğun yerleştirildiği bölgelerde yüksek başarımlar elde etmek için yeni bir KAA OEK protokolü tasarlamışlardır. Bu protokolda, aynı küme içerisindeki gereksiz dinlemeler azaltılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Düğümlerin konumları bir tabloda tutmadığı için tasarlanan protokolün büyük bellek gereksinimi de yoktur. Kablosuz düğümler sabit bir çerçeve yapısında ve MAC adreslerine göre haberleşmektedirler. Ancak bu yöntem düğümlerin haberleşme yoğunluğuna bağlı olarak başarımları düşürmektedir. Düğüm yoğunluğunun düşük olduğu ağlarda çerçeve zaman dilimlerinin boş geçilmesi nedeniyle kablosuz kanalın etkin kullanılamaması da protokolün olumsuz özellikleri arasında yer almaktadır. Önerilen tez çalışmasında uyarlamalı olarak haberleşme çerçevesi değiştirilerek gereksiz kanal kullanımı azaltılmakta ve kablosuz düğümlerin haberleşebilme olasılığı artacağından iş çıkarma oranı artırılarak gecikmeler en aza indirilmektedir [24].

Rhee ve diğ. yaptıkları çalışmada TDMA ve CSMA protokollerinin birlikte kullanıldığı Zebra MAC'i geliştirmiş ve uygulamışlardır. Ağdaki düğümlerin yoğunluğuna bağlı olarak, TDMA veya CSMA ortam erişim yöntemlerinden biri tercih edilerek paket çarpışmalarının azaltılması, kanal kullanım oranının artırılması ve gecikmelerin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen tez çalışmasında ise, TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanılması ve olumlu yönlerinin birleştirilmesiyle enerjinin daha verimli kullanıldığı, başarımları yüksek bir melez OEK protokolünün tasarlanması amaçlanmaktadır [25].

Raja ve Su tarafından yapılan çalışmada hareketli ve sabit düğümlerin bulunduğu ağlar için melez bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Hareketli düğümler için ağ topolojisinde meydana gelebilecek değişikliklere hızlı tepki verme yeteneğine sahip CSMA tabanlı bir ortam erişim yöntemi, sabit düğümler için enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlayan TDMA tabanlı bir ortam erişim yöntemi kullanılmıştır. Önerilen tez çalışmasında ise çekişme tabanlı ortam erişim yöntemi ile zamanlama tabanlı ortam erişim yöntemini bütünleşik bir yapı içerisinde birleştiren, hem sabit hem de hareketli düğümler için uygun olabilecek bir OEK geliştirilmiştir [26].

Tan ve diğ. yaptıkları çalışmada kümeleme yaklaşımı esaslı bir KAA için küme içi ve kümeler arası olmak üzere iki farklı yöntem kullanmıştır. Küme içinde çarpışmaları en aza indirmek amacıyla TDMA, kümeler arasında ise eş zamanlı çalışma gereksinimi olmayan CSMA tercih edilmiştir. Önerilen tez çalışmasında küme içinde ve kümeler arasında TDMA–CSMA tabanlı ortam erişim yöntemleri bütünlük olarak kullanılmıştır [27].

Vidhya ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada kümeleme bilgileri kullanılarak OEK katmanı fonksiyonları iki farklı gruba ayrılmaktadır. Tez çalışması kapsamında önerilen OEK protokolünde ise iki ayrı protokole gerek kalmadan tek protokolle kablosuz düğümlerin haberleşmesi tek protokol kullanılarak sağlanmaktadır [28].

Sitanayah ve diğ. zamanlama ve çekişme tabanlı kablosuz erişim yöntemlerini birlikte değerlendirerek acil durum izlemesinde kullanılmak üzere ER–MAC'ı geliştirmişlerdir. Protokol, kullanılan senkronize ve esnek zaman dilimi yapısı sayesinde düğümlerin ağa dahil olmalarına ve ayrılmalarına izin verecek niteliktedir. Her bir çerçevenin başında düğümlerin kendileri için zaman dilimi isteğinde bulunarak acil durumlarda veri gönderme işlemine dahil olmaları sağlanmaktadır. Elde edilen sonuçlarda Z–MAC protokolüne göre daha iyi paket dağıtım oranı, daha düşük gecikme ve daha düşük düğüm enerji tüketimi sunduğu görülmektedir. Tez çalışmasında sadece acil durumlarda değil tüm uygulama ihtiyaçlarını karşılayacak esnek bir protokol geliştirilmiştir [29].

Srikanth ve diğ. hareketli düğümler için uyarlamalı çerçeve yapısına sahip, enerji verimli, melez bir OEK protokolü önermişlerdir. Bu çalışmada veri paketlerinin iletiminde TDMA, kontrol paketlerinin iletiminde ise CSMA tabanlı bir OEK protokolü kullanılmaktadır. Böylece paket çarpışmalarının en aza indirilmesi ve enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında önerilen OEK protokolü ise hem hareketli hem de sabit düğümler için kullanılabilir nitelikte tasarlanmıştır. CSMA ortam erişim yönteminin sadece kontrol paketleri gönderilirken değil, veri haberleşmesi sırasında da kullanılmasıyla enerji tasarrufu sağlanması ve başarımın artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca geliştirilen OEK protokolü geniş ölçekli ağlarda kullanılmak için uygun olmasına rağmen Srikanth ve arkadaşları tarafından önerilen OEK protokolü bu alanda yetersiz kalmaktadır [30].

Salmani ve Chou Bin-MAC adını verdikleri kaynak bağımlılığı yüksek olan olay güdümlü KAA uygulamaları için melez bir OEK protokolü geliştirmişlerdir. Çalışma, merkezi düğümlü bir topoloji için gerçekleştirilmiş ve CSMA sadece merkezi düğümlerde kullanılmıştır. Önerilen tez çalışmasında sunulan OEK protokolü ise çoklu atlamalı ağ topolojileri için geliştirilmiştir. Protokolde TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. Söz konusu melez yapının aksine, ağdaki tüm düğümler aynı özelliktedir ve bu düğümler tek protokol üzerinden haberleşebilmektedirler [31].

Yukarıda sıralanan temel melez OEK'ler dışında farklı tipteki uygulama isteklerini karşılayacak melez OEK protokollerine de literatürde rastlanmaktadır [32-51].

1.3. Tez Çalışmasının Katkıları

Motivasyonu “çoklu atlamalı (multi-hop) KAA'lar için, geleneksel yöntemlerden daha yüksek enerji verimliliğine ve iş çıkarma başarımına sahip yeni bir OEK protokolü geliştirme ihtiyacı” olan bu tez çalışmasında, değişen ihtiyaçlara (gecikme, iş çıkarma vb.) cevap verebilecek, enerji verimliliğini arttıracak, dolayısıyla da ağın yaşam süresinin uzamasına katkı sağlayacak, temel iki erişim yöntemini (TDMA-CSMA) bütünleşik bir yapı içerisinde birleştiren melez bir OEK protokolü geliştirilerek literatüre kazandırılmaktadır.

Tez çalışmasında geliştirilen yeni OEK protokolü ile birlikte, çoklu atlamalı ağlarda farklı düğüm donanımları kullanma zorunluluğu ortadan kaldırılmaktadır. Ağdaki tüm düğümlerin aynı özelliğe sahip olmasının sağlanmasıyla maliyet etkin bir çözüm sunulmaktadır. Tek tip düğüm kullanılması bilgi toplanacak alanın daha hızlı ve daha kolay bir şekilde kapsanmasına olanak sağlamaktadır. Önerilen tez çalışmasının gerçekleştirilmesi ile ülkemizin de ihtiyacı olan askeri (sınır gözlemi vb.) ve orman yangını izleme sistemleri gibi ekonomiye ve çevreye üst düzeyde katkı sağlayabilecek uygulamaların geliştirilebilmesi amacıyla yerli bir kablosuz algılayıcı düğümün tasarlanması ve üretilmesinin de önü açılmaktadır.

Önerilen tez çalışması kapsamında sunulan, geniş ölçekli ağlar için, alma tabanlı TDMA ortam erişim yöntemi ile uyarlmalı bir çerçeve yapısının birlikte kullanıldığı yeni bir OEK protokolünün tasarımı literatürde bulunmayan özgün bir çalışmadır.

Bunun yanında, önerilen protokolün enerji verimliliği açısından sağladığı önemli katkılar sunulan analitik ve benzetim modelleri ile ortaya konulmaktadır. Ayrıca, enerji başarımını arttırmasına rağmen, özellikle geniş ölçekli ağlarda uygulanması oldukça zor olan TDMA ortam erişim yöntemi üzerinde bir takım iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda geniş ölçekli ağlar için uygun, haberleşme ve enerji başarımını artırmasının yanında ağın yaşam süresini de uzatabilecek yeni bir protokol geliştirilmiştir.

TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemlerinin bütünleşik bir yapı içinde kullanımı, uyarlamalı çerçeve yapısı sayesinde haberleşme başarımının arttırılması, söz konusu işlevlerin enerji verimli şekilde gerçekleştirilmesi özgün bir çalışma olarak değerlendirilmektedir. Literatürde sunulan önceki çalışmalarda düğüm enerji verimliliği arttırılırken haberleşme başarımı düşmekte, dolayısıyla sistemin uygulama potansiyeli sınırlandırılmaktadır. Önerilen protokolle, uyarlamalı çerçeve yapısı sayesinde enerji tüketimindeki küçük bir artışa karşılık haberleşme başarımında önemli bir iyileşme olduğu gözlemlenmektedir.

Algılayıcı düğümler izlenecek bölgeye genellikle rastgele biçimde dağıtılmaktadır. Düğümler arasındaki eşgüdüm süreci işlem yeteneği yönünden diğerlerinden daha üstün olan ve ağın belirli noktalarında bulunan lider düğümler tarafından yönetilmektedir. Diğer düğümlerle birlikte rastgele dağıtılan merkezi düğümlerin ağ içerisindeki uygun noktalara yerleşebilmesi ise neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle, düğümler ilk uyanmaya başladıklarında aralarındaki eşgüdümü sağlayarak zaman dilimlerini tahsis edecek düğümlerin diğerlerinden farklı olmaması (güç, frekans vb.) ve “sanal küme lideri” kavramı bu çalışmanın diğer özgün katkılarıdır. Geniş ölçekli uygulamalarda düğümlerin rastgele dağıtılma gerekliliği göz önünde bulundurulduğunda düğümlerin birbirinden farksız olmasının sunacağı avantajlar daha açık bir şekilde anlaşılabilir.

Ayrıca, tez çalışması kapsamında geliştirilen analitik ve benzetim modelleriyle, TDMA zaman dilimi tahsisinin alma veya gönderme tabanlı gerçekleştirilmesinin düğüm enerji başarımı üzerindeki etkisinin ortaya konulması uygulama geliştiricilere yol gösterecek niteliktedir.

1.4. Tez Düzeni

Bölüm 2’de KAA’lar, uygulama alanları, KAA’larda kullanılan OEK protokol çeşitleri ve KAA başarımlarını değerlendirme yöntemleri hakkında genel ve öz bilgilere yer verilmektedir.

Bölüm 3’te geniş ölçekli KAA uygulamaları için geliştirilen enerji verimli melez OEK protokolü bileşenleri sunulmakta, önerilen KAA OEK protokolünün çeşitli ölçütler için benzetim modeli ve analitik modelleri detaylı olarak açıklanmaktadır.

Bölüm 4’te, önerilen MELOEK protokolünün kullanıldığı örnek bir KAA uygulaması için OPNET benzetim modeli ve analitik modellerden elde edilen uçtan uca paket gecikmesi, iş çıkarma oranı ve düğüm enerji tüketimi sonuçlarının doğrulaması (validation) yapılmaktadır. Ayrıca bu bölümde, geliştirilen MELOEK protokolü ile aynı türden bir KAA OEK protokolü olan Crankshaft’a ait paket dağıtım oranı ve düğüm enerji tüketimi benzetim sonuçları karşılaştırılarak başarımlarını değerlendirilmesi (evaluation) sunulmaktadır.

Bölüm 5’te tez çalışmasında geliştirilen MELOEK protokolünün yenilikleri, bilime katkıları, sonuçları ve genel değerlendirmeler ifade edilmektedir. Bu bölümde ayrıca, MELOEK protokolünün uygulanmasına yönelik önerilere de yer verilmektedir.

2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR VE OEK PROTOKOLLERİ

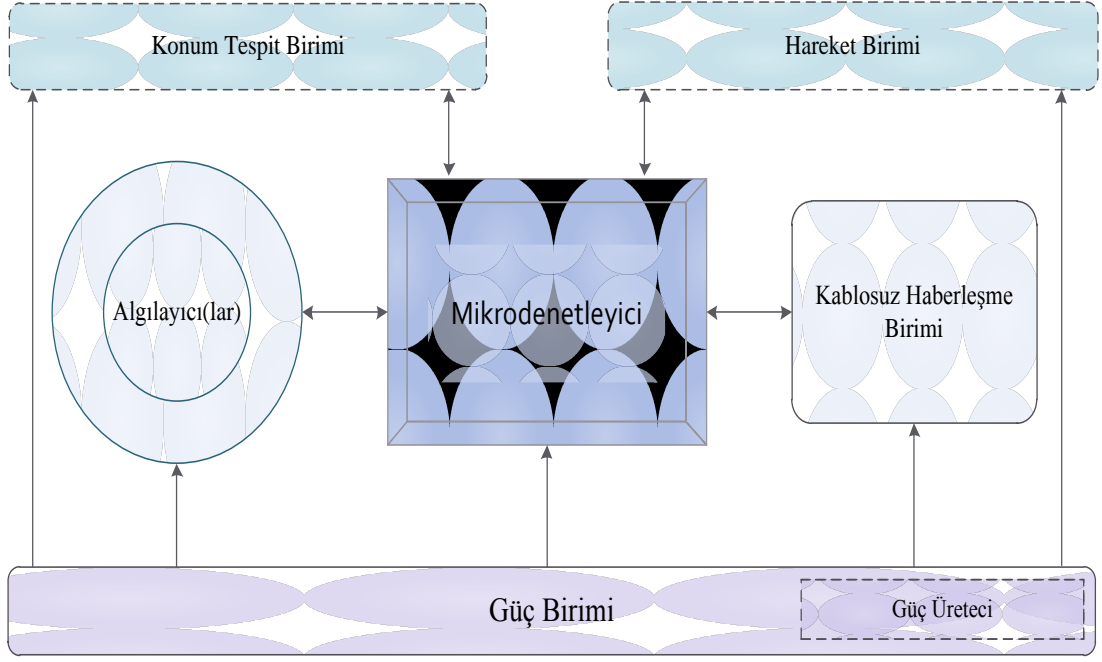
2.1. Giriş

Günümüzde bilgi ve iletişim kavramlarına atfedilen değer yaşadığımız çağın bilişim çağı olarak anılmasına neden olmuştur. Bilgiye olan ihtiyacın artması çeşitli bilgi kaynaklarına ulaşılması ve elde edilen verilerin değerlendirilmesi konularını gündeme getirmektedir. Güncel gereksinimler konuyla ilgili yeni teknolojilerin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Söz konusu gelişmelerin bir sonucu olarak, fiziksel ortamdan alınan verilerin sanal dünyada değerlendirilmesini ve gerekli tepkilerin verilmesini sağlayan algılayıcı/eyleyici ağlar önerilmiştir. Geliştirildikleri ilk dönemlerde sadece askeri uygulamalar için kullanılan KAA'lar son yıllarda sağlıktan tarıma birçok alanı kapsayan sayısız uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.2. KAA Mimarisi ve Uygulama Alanları

KAA'lar çeşitli fiziksel değişimleri algılayabilen, kablosuz haberleşme yeteneğine sahip düğümlerin bir araya gelerek oluşturdukları ağlar olarak tanımlanmaktadır. Kablosuz düğümler temel olarak algılayıcı birimi, kablosuz haberleşme birimi, mikrodenetleyici ve bataryadan oluşmaktadır. Uygulamaların gereksinimlerine bağlı olarak düğümlere hareket birimi, konum tespit birimi ve güç üretici de eklenebilmektedir (Şekil 2.1). Eklenecek her bir özellik maliyete etki edeceğinden tasarlanacak sistemde kullanıcı istekleri göz önünde bulundurulmalı ve en iyi fayda sağlayacak şekilde maliyet etkin bir çözüm sunulmalıdır.

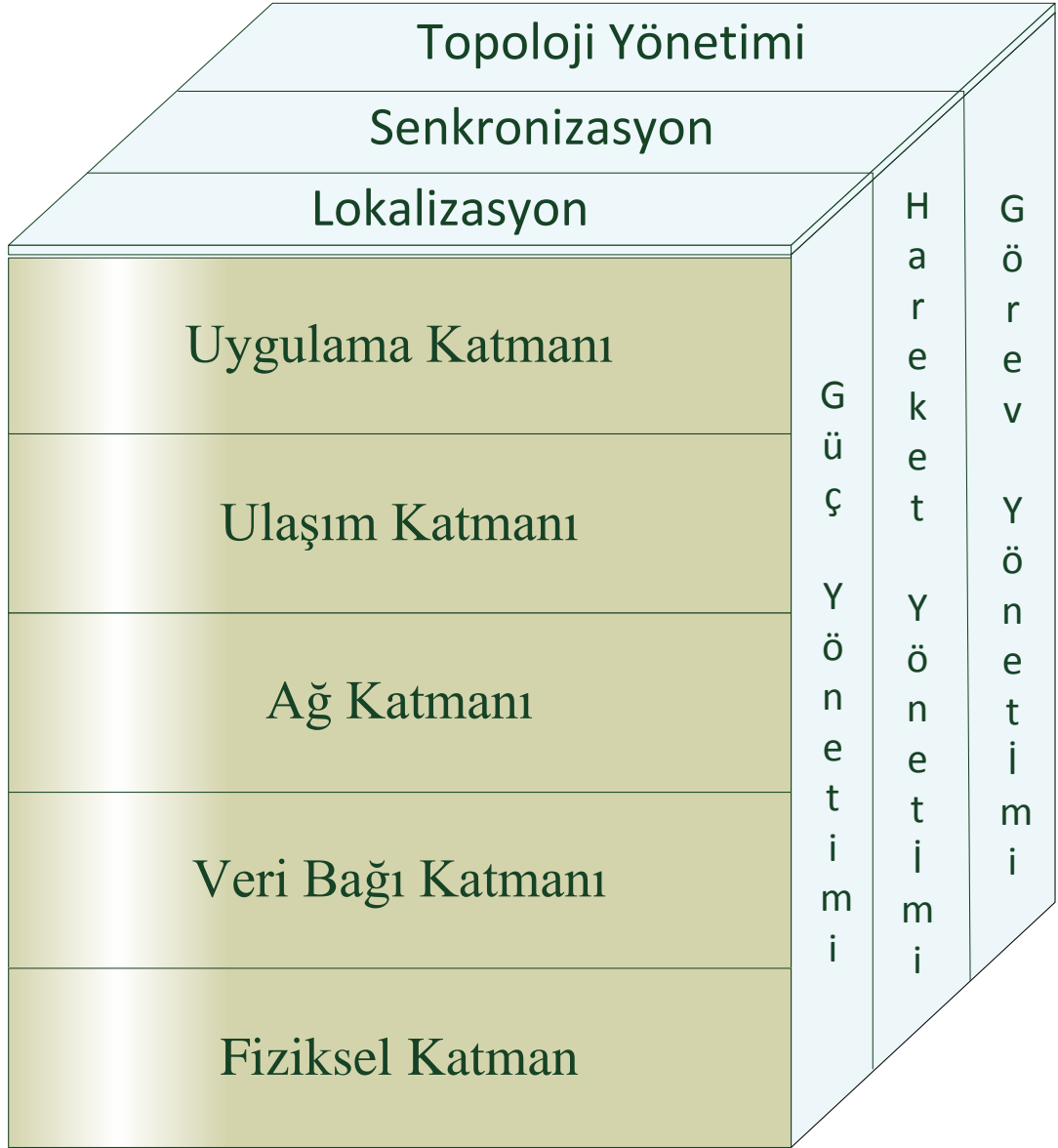
KAA'ları oluşturan düğümler fiziksel bilgi toplanacak alana rastgele dağıtılabilecekleri gibi belirli bir düzen içerisinde de yerleştirilebilirler [5, 11]. Her iki durum için de önceden kurulmuş bir altyapı gereksinimi bulunmaması KAA'ların önemli üstünlükleri arasında yer almaktadır. Kendi kendilerine organize olabilecek bu akıllı ve küçük cihazlar, dağıtıldıkları coğrafi alanda doğrudan (merkezi yapılı) veya erişim noktalı (çoklu atlamalı) bir haberleşme altyapısı oluşturabilmektedirler.



Şekil 2.1. Kablosuz düğümlerin temel yapısı

İlk algılayıcı ağ uygulaması, soğuk savaş döneminde Sovyet denizaltılarının yerini tespit etme ve izleme amaçlı olarak gerçekleştirilmiştir [17]. Kablosuz iletişim ve ağ teknolojilerindeki güncel gelişmelerle birlikte, akıllı ve düşük maliyetli algılayıcı (sensor) ve eyleyici (actuator) aygıtlar üretilerek çevresel gözlem, savunma, endüstri, sağlık gibi oldukça farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Geleneksel bilgisayar ağlarından farklı olarak KAA'lar OSI referans modelinin daha az katmanını kullanmaktadır. Bu katmanlar fiziksel katman, veri bağı katmanı, ağ katmanı, ulaşım katmanı ve uygulama katmanı olarak sıralanabilir. KAA uygulamalarında birbirleri içine girmiş, birden fazla katmana ait işlevleri tek katmanda birleştiren katmanlararası etkileşim de benimsenebilmektedir. Katmanlararası etkileşim sayesinde düğümlerin bilgiyi toplama veya iletme sırasında kararları daha isabetli bir şekilde almaları sağlanabilmekte, böylece performans artışı elde edilmektedir. Şekil 2.2'de KAA'ları oluşturan kablosuz düğümlerin protokol yapısı sunulmaktadır [52].



Şekil 2.2. Kablosuz düğümlerde kullanılan protokol yapısı

KAA'larda kullanılan düğümler genellikle sınırlı enerji kaynaklarına sahiptir. Bu nedenle uygulama geliştirme sürecinde dikkat edilmesi gereken önemli konuların başında enerjinin verimli şekilde kullanılması gelmektedir [3]. Düğümlerde en fazla enerjinin harcandığı birim kablosuz haberleşme birimidir. Kablosuz haberleşme biriminin çalışma süreleri ise OEK katmanı tarafından yönetilmektedir [53, 54]. Dolayısıyla OEK katmanının tasarımında uygulama gereksinimleri dikkate alınarak birimin gereksiz kullanılmasının önüne geçilebilmektedir.

2.3. KAA’larda Kullanılan OEK Protokol Türleri

KAA uygulamaları farklı gereksinimlere sahip olduklarından, tek tip bir OEK protokolü ile geniş yelpazede uygulamalar geliştirilebilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle geliştirilecek ağın gereksinimleri de göz önüne alınarak bir ya da birden fazla ortam erişim tekniğinin birlikte/bütünleşik kullanılması ve ihtiyaca uygun OEK protokolünün geliştirilmesi gerekmektedir [55]. Günümüzde sıklıkla kullanılan OEK protokolleri çekişme tabanlı, zamanlama tabanlı, kod bölmeli ve melez olmak üzere dört başlık altında incelenebilmektedir [56].

2.3.1. Çekişme tabanlı OEK protokolleri

Çekişme tabanlı OEK protokollerinin temel işlevleri, haberleşme ortamının kontrol edilmesi; ortam diğer düğümler tarafından kullanılmıyorsa verinin gönderilmesi şeklinde açıklanabilir. Genellikle IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) yapısı kullanılmaktadır [57, 58]. Kurulumlarının basit olması ve ağ yapısındaki değişimlere çok hızlı uyum sağlayabilmeleri nedeniyle olay güdümlü (event driven) uygulamalarda yaygın olarak tercih edilirler [59]. Düğümlerin boşa dinleme sürelerinin uzunluğu, diğer düğümlere ait bilgilerin dinlenmesi ve iletişim sırasında meydana gelen paket çarpışmaları bu protokollerin en önemli olumsuzluklarıdır.

Çekişme tabanlı OEK protokollerinin kullanıldığı, ağ trafiğinin yoğun olduğu uygulamalarda çarpışma sayısının arttığı görülmektedir. Çarpışmaların artması hem gecikmelerin artmasına hem de batarya ömrünün azalmasına neden olduğundan bu protokoller genellikle tercih edilmemektedir. Ayrıca veri paketlerinin ne zaman geleceği bilinemeyeceği için düğümler haberleşme ortamını sürekli olarak dinlemek zorundadırlar. Bu durum çekişme tabanlı OEK protokollerini enerji verimli olmaktan çıkarmaktadır. Çekişme tabanlı OEK algoritmalarına uyku düzeni eklenerek, boşa dinlemeler azaltılmakta ve enerji verimliliğinin artırılmasında bir miktar başarı elde edilebilmektedir [60].

2.3.2. Zamanlama tabanlı OEK protokolleri

Zamanlama tabanlı OEK protokolleri iletişim zamanının belirli uzunluktaki parçalara ayrılması esasına göre tasarlanmaktadır. Bu protokollerde her bir düğüm kendine ayrılmış zaman aralıklarında paket iletimini gerçekleştirmektedir. Haberleşme ortamı aynı zaman diliminde yalnız bir düğüm tarafından kullanılacağı için çarpışma sorununu ortadan kaldırılmaktadır. Çarpışmaların önlenmesi sayesinde paketlerin yeniden gönderilme sayısında önemli bir iyileşme sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, düğümlerin kendilerine tahsis edilen zaman diliminde gönderecek verisinin bulunmaması durumunda ilgili süre boş olarak geçirilmektedir. Bir uyku düzeninin sisteme dahil edilmesiyle söz konusu durumun olumsuz etkisi azaltılabilmekte, enerji tüketiminde büyük kazançlar elde edilebilmektedir [61–63]. Zamanlama tabanlı OEK protokolleri, merkezi düğümlü topolojilerin kullanıldığı uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir.

Zamanlama tabanlı OEK protokollerinin uygulanmasında karşılaşılan en önemli sorun ağdaki düğümler arasındaki zaman eşlemesidir [64–68]. Zaman eşleme sürecinde ya da iletişim sırasında meydana gelen zamanlama hataları paket kayıplarına neden olmaktadır. Ayrıca, gönderecek verisi bulunmayan düğümler tarafından boş geçilen zaman dilimleri ağı gecikme başarımını düşürmektedir. Söz konusu problemler zamanlama tabanlı protokollerin olumsuz özellikleri arasında yer almaktadır. Bunun yanında, ağ topolojisindeki hızlı tepki verememesi bu protokollerin patlamalı veri akışı gerektiren sistemlerde kullanılmasını zorlaştırmaktadır.

2.3.3. Kod bölmeli OEK protokolleri

Kod bölmeli erişim yönteminde kullanıcılar tek bir frekans üzerinden, farklı kodlar kullanarak haberleşmektedir. Ağdaki tüm kullanıcılar aynı frekans bandını kullandığı için ortam paylaşırma problemi ortadan kalkmaktadır [5, 69]. Ancak, karmaşık hesaplama gereksinimleri ve güç tüketimini arttırmaları nedeniyle, bu protokoller sınırlı enerji kaynaklarına sahip düğümlerden oluşan KAA uygulamaları için uygun değildir.

2.3.4. Melez OEK protokolleri

Birden fazla kablosuz ortam erişim yönteminin birlikte ya da bütünleşik kullanıldığı OEK protokolleridir [5]. Kullanılan ortam erişim yöntemlerinin olumlu yönlerinin alınması, olumsuz yönlerinin de en aza indirilmesi amacıyla geliştirilirler. Örneğin geliştirilecek bir melez protokolde çekişme tabanlı erişim yönteminin olumlu yönü olan olaylara hızlı tepki verme yönü alınarak boşa dinlemedeki fazla enerji tüketimi zamanlama tabanlı erişim ile azaltılabilmektedir [70–72].

OEK'lerin uygulamalara göre farklılaşma gerekliliği uygun yöntemlerin birkaçının birlikte kullanılması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Örneğin bir uygulamada melez yapılı çözümlerle zamanlama tabanlı yöntem hızlı tepki isteyen süreçler için, çekişme tabanlı yöntem ise yoğun trafiğin olduğu süreçler için kullanılabilir.

Önerilen tez çalışmasında bu grupta değerlendirilebilecek bir yaklaşımla TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemleri birleştirilerek geniş ölçekli ağlarda başarıyı yüksek ve enerji verimli melez bir OEK tasarlanmıştır.

2.3.5. Tez çalışmasında tercih edilen OEK protokol türleri ve seçilme sebepleri

Tez çalışmasında KAA uygulamalarında en sık rastlanan OEK protokol türlerinden olan çekişme ve zamanlama tabanlı ortam erişim yöntemleri bütünleşik kullanılmaktadır. Bu ortam erişim yöntemlerinden CSMA, olaylara hızlı tepki vermesi ve kolay organize olabilmeye olanak sağlamasından dolayı tercih edilmiştir. TDMA ise başarımının yüksek olması, çarpışmaları/yeniden göndermeleri en aza indirmesi ve enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarması dolayısıyla kullanılmaktadır.

Bu iki farklı OEK protokol türünün birlikte kullanılması ile çoklu atlamalı topolojiler için uygun olmayan TDMA ortam erişim yönteminin alma tabanlı zaman dilimi tahsisi ile geniş ölçekli uygulamalarda kullanımına imkan sağlanmıştır [73]. Benzer şekilde, geniş ölçekli uygulamalarda enerji tüketimi son derece yüksek ve başarıyı oldukça düşük olan CSMA ortam erişim yöntemi de birlikte kullanım ile faydalı hale dönüştürülmüştür.

2.4. KAA'ları Modelleme Yöntemleri

Bilgisayar ağları ve KAA'ların, gerçek kurulumundan önce başarımlarının test edilip gerekli iyileştirmelerin yapılabilmesi amacıyla üç temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; ilk örnek (prototip), benzetim (simulation) ve analitik (analytical) yöntem olarak sıralanabilir [73–79]. Bu yöntemlerin her birisi ağ başarımlarının değerlendirilmesinde tek başına kullanılabilirler. Bununla birlikte, iki veya üç yöntemin birlikte kullanımı başarımlarının değerlendirilmesinde güvenilirlik ve geçerliliği üst düzeye çıkarmaktadır. Tez çalışmasında, sonuçların doğruluğunu gösterebilmek ve kolay bir karşılaştırmalı değerlendirme ortamı sunmak üzere benzetim yöntemi ve analitik yöntem birlikte kullanılmıştır.

2.4.1. Analitik yöntem

Matematiksel modelleme olarak da adlandırılan bu yöntem herhangi bir iletişim sisteminin denklemler ile ifade edilmesine dayalıdır. Analitik modeller sistem üzerinde etkiye sahip değişkenlerin davranışlarını, algoritmalarını ve karakteristik özelliklerini yansıtır [53, 74–76]. Ancak, sistemin tüm yönleriyle ve detaylarıyla bir analitik modele dahil edilmesi analitik modeli son derece karmaşık ve bazen de oluşturulması imkansız hale getirir. Bu modellerde kullanılacak veriler belirli zaman aralıklarında üretilen işlemlerin ölçümlerine ait verilerden elde edilir. Diğer modelleme yöntemleri ile birlikte kullanılmadıkları durumlarda doğruluklarının değerlendirilmesi beklenen sonuçları sağlayıp sağlamamasına göre yapılır.

2.4.2. Benzetim yöntemi

Tasarlanacak olan sistemin tamamının veya bir kısmının bilgisayar programları aracılığıyla taklit edilerek, incelenecek ölçütlerin elde edilmesi esasına dayanır [53, 74–76]. Bütün işlemler açıkça sunularak kodlamaya dahil edilir. Ticari benzetim yazılımlarının yanı sıra ücretsiz/açık kaynak benzetim yazılımları haberleşme ağlarının değerlendirilmesinde sıklıkla tercih edilirler. Bu yöntem kullanılarak çok karmaşık yapılara sahip sistemlerde benzetim süresi ve elde edilecek ölçütler kolaylıkla sınırlandırılabilir, farklı senaryolar denenebilir ve böylece karmaşık sistemler için geliştirilmiş daha basit eşlenikler elde edilebilir.

2.4.3. İlk örnek yöntemi

Tasarımla ilgili küçük bir örneğin fiziksel olarak uygulandığı başarımların değerlendirme yöntemidir [74, 75]. Sistem açısından gerçek bilgiler verdiğinden diğer yöntemlere göre daha güvenilir ve somut kestirimler yapılabilir. Kurulumlarının maliyetli, zor ve zaman alması nedenleriyle genellikle benzetim ve analitik yöntemler kullanılarak eniyilemelerin yapılmasının ardından sistem değerlendirmesi yapmak üzere tercih edilir.

2.4.4. Tez çalışmasında kullanılan modelleme yöntemleri ve tercih sebepleri

Tez çalışmasında başarımların değerlendirilmesi amacıyla analitik ve benzetim modelleme yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Bu iki yöntemin birlikte kullanılma nedeni ise başarımların ölçütleri için her iki modelden elde edilecek sonuçların güvenilirlik ve geçerliğinin artırılmasıdır. Başarımların değerlendirilmesinde yalnızca bir yöntemin kullanılması, karşılaştırılacak olan diğer benzer protokollerin sonuçları, aynı ortam koşullarında elde edilmiş ise yeterli olabilmektedir. Bununla birlikte farklı modelleme yöntemlerinin birlikte kullanılması ve benzer protokollerden de elde edilen sonuçların bulunması değerlendirmeyi neredeyse hatasız olarak yapmaya imkan sağlamaktadır.

Tez çalışmalarında geliştirilen MELOEK protokolünün kabul edilebilirliğini ve test edilmesini sağlamak amacıyla öncelikle analitik model ve benzetim modeli sonuçları uçtan uca paket gecikmesi, düğüm enerji tüketimi ve iş çıkarma oranı ölçütleri için kıyaslanarak doğrulama yapılmaktadır. Ardından geniş ölçekli ağlar için önerilen bir başka geleneksel protokol olan Crankshaft [24] protokolü ile bu ölçütler ve paket dağıtım oranı açısından benzetim sonuçları kıyaslanmakta ve geliştirilen protokolün değerlendirilmesi yapılmaktadır. Böylelikle sonuçların daha iyi irdelenebilmesi sağlanmaktadır.

2.5. Sonuç

Elektronik cihazların gelişmesi ve aynı zamanda küçülmesi ile gezginlik ve her an bilgiye ulaşma isteği sürekli artmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, fiziksel dünyadan

bilginin elde edilmesi, işlenmesi ve faydalı bilginin istenilen yere aktarılmasına aracılık eden KAA'ların oldukça önemli hale geldiği görülmektedir.

KAA'larda en önemli problem gerçekleştireceği işleve ve ağın büyüklüğüne bağlı bir şekilde düğüm enerji tüketimi olarak ön plana çıkmaktadır. Düğümlerde en büyük enerji tüketimi kablosuz haberleşme biriminde oluşmaktadır. Enerji verimliliğini arttırmak ise genellikle kablosuz haberleşme birimini yöneten ve kablosuz ortamı paylaştırmadan sorumlu birim olan OEK'in adil ve etkin bir biçimde kullanılması ile mümkün olabilmektedir. İhtiyaca göre zamanlama tabanlı, çekişme tabanlı, kod bölmeli ve melez olmak üzere çeşitli OEK'ler kullanılmakta ve en iyi fayda sağlanmaya çalışılmaktadır.

KAA tasarımında bir diğer önemli husus da çeşitli ölçütler açısından başarımların testlerinin yapılmasıdır. Daha tasarım ve geliştirme aşamalarında iken gerekli eniyilemelerin yapılması ve başarımların düşüşlerine neden olacak faktörlerin en aza indirilmesi gerekmektedir.

3. GENİŞ ÖLÇEKLİ KAA'LAR İÇİN GELİŞTİRİLEN ENERJİ VERİMLİ MELEZ OEK PROTOKOLÜ (MELOEK)

3.1. Giriş

Sınırlı bir kaynak olan ve haberleşmede birçok zorluğu beraberinde getiren kablosuz ortam, olabilecek en etkin şekilde kullanılmalıdır. Bu noktada en büyük yükümlülük kablosuz ortamın kullanıcılar arasında paylaştırılmasından sorumlu birim olan OEK katmanına ve burada kullanılan protokole düşmektedir. OEK protokolleri birden fazla kullanıcının ortama erişmesinde adil, gereksiz dinlemeleri önleyen ve çarpışmaları en aza indiren nitelikte olmalıdır. Çeşitli ortam erişim teknikleri ihtiyaca göre, tek başlarına veya birlikte kullanılarak uygulama gereksinimleri karşılanmalı ve fiziksel ortamlardan kesintisiz veri akışı sağlanmalıdır.

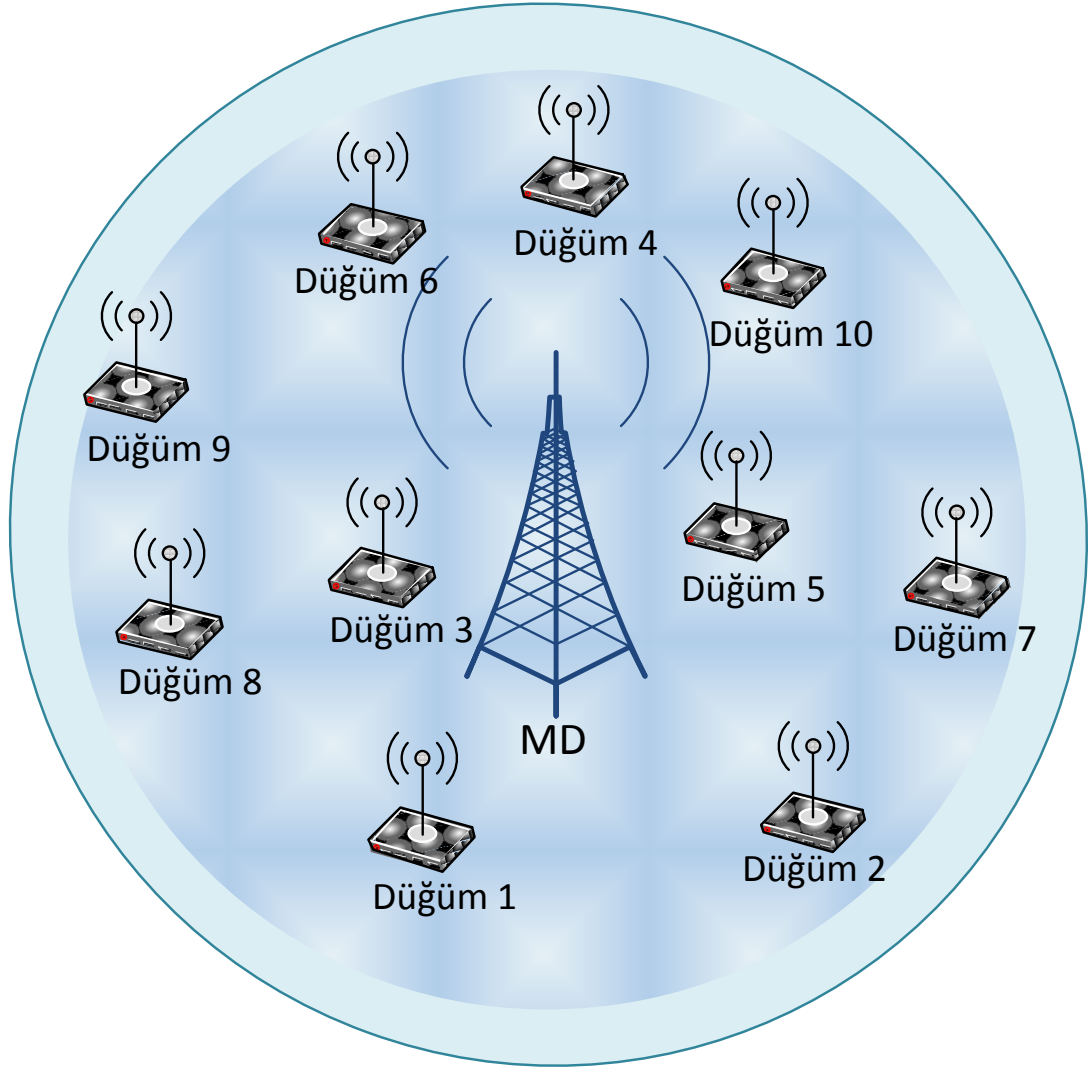
Bu bölümde geniş ölçekli KAA uygulamaları için TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemlerinin olumlu yönlerini birleştirerek geliştirilen enerji verimli ve yüksek başarıma sahip melez OEK protokolü (MELOEK) tasarım aşamaları sunulmaktadır.

3.2. Önerilen MELOEK Protokolü ve Bileşenleri

MELOEK protokolü geniş ölçekli KAA uygulamalarında enerji verimliliğini üst seviyelere çıkarırken aynı zamanda başarıma da yüksek tutmak üzere tasarlanmıştır. Bu çerçevede kullanılan protokol bileşenleri alt başlıklarda detaylandırılmaktadır.

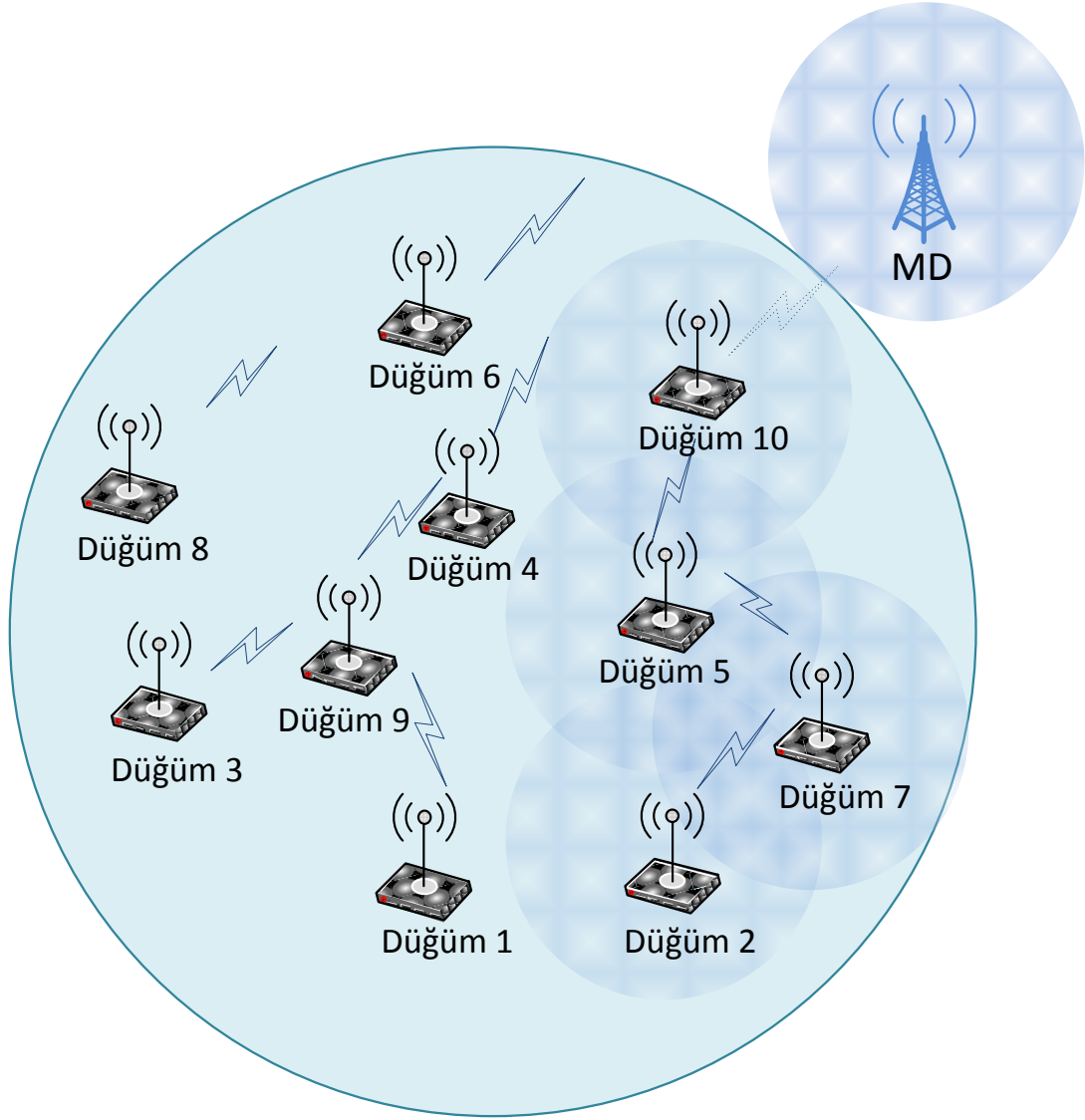
3.2.1. Çoklu atlamalı topoloji

Küçük ölçekli KAA uygulamalarında düğümler doğrudan merkezi düğüme ulaşabilirler. Merkezi düğüm de tüm üye düğümlerle haberleşebildiğinden ortamı kolaylıkla paylaşırabilir. Bu tür uygulamalarda, genellikle enerji verimli olmaları nedeniyle TDMA tabanlı OEK protokolleri kullanılır. Geleneksel TDMA tabanlı sistemlerde, merkezi düğüm zaman dilimi tahsisini gönderme tabanlı olacak şekilde gerçekleştirir ve üye kablosuz düğümler bu belirlenen zaman dilimlerinde merkezi düğüme verilerini gönderirler (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. KAA’larda kullanılan merkezi düğümlü topoloji

Bu merkezi düğümlü ağ topolojisi, sınırlı sayıda KAA düğümünün kullanıldığı uygulamalar için uygun olmakla birlikte, geniş ölçekli uygulamalarda KAA düğümleri doğrudan merkezi düğüme erişemeyeceğinden uygun değildir. Uygulamalarda düğüm sayısının artması, merkezi düğümlü topolojiden çoklu atlamalı ağ topolojisine geçişi zorunlu kılmaktadır. Geniş ölçekli KAA uygulamalarında verilerin bir merkezde toplanması için çoklu atlamalı topoloji ile kablosuz düğümler birbirleri üzerinden paketlerini iletmeli ve merkezi düğüme ulaştırmalıdır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. KAA’larda kullanılan çoklu atlamalı topoloji

Çeşitli geniş ölçekli uygulamalar için çoklu atlamalı topolojide düğümlerin küme yapısı ile haberleştikleri görülmektedir [10]. Küme yapısı içerisinde kullanılacak OEK protokolünde TDMA tercih edilmesi durumunda küme lideri olan düğümün diğerlerine göre özellikle donanımsal üstün özelliklere sahip olması problemi ortaya çıkmaktadır. Küme lideri olacak düğümün küme içerisinde paketleri toplama ve bir sonraki küme liderine iletme zorunluluğu vardır. Bu durum düğümlerin rastgele dağıtıldığı geniş ölçekli uygulamalar için geleneksel TDMA yönteminin yer aldığı OEK protokollerinin kullanılmasını son derece güç hale getirmektedir. Diğer yandan CSMA tabanlı OEK kullanılması durumunda ise ortamın sürekli dinlenmesi gereklidir ve bu durum da enerji israfına neden olur.

Geliştirilen MELOEK protokolü geniş ölçekli uygulamalar için, sunulan gereklilikler dikkate alınarak çoklu atlamalı topolojide küme yapısını kullanacak şekilde tasarlanmıştır. Küme yapısı içerisinde ise tek tip düğümlerin ortam erişim yöntemi olarak TDMA ve CSMA'nın birlikte kullanılması esas alınmıştır.

3.2.2. Geliştirilen standartlaştırılmış düğüm

KAA uygulamalarında fiziksel ortamdan algılanacak verinin nereden ve nasıl alınacağı tasarım aşaması için öncelikle değerlendirilmesi gereken hususlardandır. Verinin elde edileceği alanın küçük olması bütün düğümlerin istenilen ve en iyi faydayı sağlayacak şekilde yerleştirilmelerini olanaklı kılar. Ancak geniş ölçekli uygulamalar düşünüldüğünde, düğümlerin istenilen noktaya yerleştirilmesi fiziksel ortam şartlarına bağlı olarak her zaman mümkün olamamaktadır. Ayrıca uygulama kurulumundaki aciliyet ve tehlike boyutları da tasarlı bir ağ yapısını olanaksızlaştırabilir. Örneğin orman yangını veya bir savaş sırasında düğümlerin el ile yerleştirilmesinin düşünülemeyeceği açıktır. Bu tür uygulamalar ancak rastgele dağıtılan ve kendi kendilerine organize olan düğümlerle mümkündür.

Tez çalışmasında geniş ölçekli uygulamalar öncelikli hedef olarak belirlendiğinden, düğümlerin tek tip olması ve istenilen yere rastgele yerleştirilebilecek yapıda olmaları kritik önemli olarak belirlenmiştir.

3.2.3. Uyarlamalı çerçeve yapısı

TDMA tabanlı OEK protokollerinde düğümlerin paket gönderme veya alma işlemleri merkezi bir düğüm tarafından belirlenen zaman dilimi/dilimlerinde gerçekleştirilir. Ortamın adil olarak paylaşılmasını esas olan bu yöntemde düğümlere belirli aralıklarla iletişim izni verilir. Bu iletişim izinlerinin verilmesi yani zaman dilimlerinin tahsis periyodu sabit veya uyarlamalı çerçeve yapısı ile sağlanabilmektedir. Çerçeve yapısının sabit veya uyarlamalı olarak belirlenmesi durumu ise uygulamanın özelliklerine bağlı olarak fayda veya zarar olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin düğüm sayılarının değişmediği durumlarda uyarlamalı bir çerçeve yapısı kullanmanın bir anlamı bulunmamaktadır. Bununla birlikte düğüm sayılarının kestirilemediği, özellikle rastgele dağıtılan ve kendi kendilerine organize olan sistemlerde sabit çerçeve yapısı, başarımı (düğüm enerji tüketimi, iş çıkarma

vb.) olumsuz etkileyebilecek niteliktedir. Belirlenen sabit çerçevede bulunan zaman dilimi sayısının altında bir sayıda düğümün paket alışı verisi gerçekleştireceği durumlarda boş geçilecek zaman dilimleri üssel gecikme artışlarına yol açarken hem iş çıkarma başarımından taviz verilmiş hem de sınırlı kablosuz iletişim kaynağı israf edilmiş olacaktır. Benzer şekilde düğüm sayısının çerçevedeki zaman dilimi sayısından fazla olduğunda ise bazı düğümlere hiçbir koşulda zaman dilimi tahsisi gerçekleştirilemeyecektir. Üretilen paketler gönderilemeyecek dolayısıyla düğümün varlık nedeni ortadan kalkacaktır.

Tez çalışması kapsamında fiziksel büyüklüklerin algılanacağı ortama rastgele dağıtılmaya uygun ve kendi kendilerine organize olabilen düğümlerin kullanımı öngörülmektedir. Bu doğrultuda, geniş ölçekli KAA uygulamalarında çoklu atlamalı topolojiden dolayı küme yapısının kullanılma zorunluluğu ve küme içerisinde olabilecek düğüm sayılarının farklı olabileceği değerlendirilerek tez çalışmasında uyarlamalı çerçeve yapısı kullanılmıştır.

3.2.4. Alma tabanlı zaman dilimi tahsisi

TDMA tabanlı OEK protokollerinde zaman dilimi tahsisi, alma ve gönderme olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır [73]. Gönderme tabanlı zaman dilimi tahsisinde merkezi düğüm tarafından kablosuz düğümlere paket gönderecekleri zaman dilimi bildirilirken alma tabanlı tahsis yönteminde ise ne zaman veri alabilecekleri bildirilir. Bu iki farklı zaman dilimi tahsis yaklaşımının uygulamalara göre değişen üstünlükleri veya olumsuzları bulunmaktadır. Geliştirilecek sistemin gereksinimlerine uygun olarak iki yöntemden birisi seçilmelidir.

3.2.4.1. Alma ve gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis yöntemlerinin karşılaştırılması

Bir kablosuz düğümün enerji tüketimi, paket gönderme, paket alma ve boşta kalma durumlarına göre farklılık gösterir. Bu yüzden enerji verimliliği sağlamak için paket gönderme, paket alma ve boşta kalma süreleri de göz önünde bulundurularak kullanılacak ağ topolojisine en uygun OEK protokolünün tasarlanması gereklidir.

KAA uygulamalarında kullanılan zamanlama tabanlı OEK protokollerinde tahsis edilen zaman dilimlerinin gönderme veya alma tabanlı olması doğrudan düğüm enerji tüketimini etkiler. Merkezi yapılı, gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis yönteminde düğümler paket gönderecekleri zaman diliminde/dilimlerinde ve varsa kontrol zaman diliminde uyanık kalırlar, diğer zaman dilimlerinde ise uyku durumuna geçerek enerji tasarrufu sağlarlar.

Çoklu atlamalı topolojilerde ise kablosuz düğümler paketlerini birbirleri üzerinden merkezi düğüme iletirler. Bu yöntemde düğüme ait paketin alınacağı zaman dilimi belli olmadığından, gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis yöntemi kullanıldığında düğüm, paket gönderme ve kontrol zaman dilimleri dışında da uyanık kalmak zorundadırlar. Dolayısıyla kablosuz düğüm kendisine ait olmayan paketleri de alarak gereksiz dinleme (overhearing) yapacağından enerji tüketimi artar. Bu tür topolojilerde zaman dilimi tahsisi alma tabanlı yapıldığında, paket alma işleminin hangi zaman diliminde yapılacağı belirli olduğundan düğümler sadece o zaman diliminde, varsa kontrol zaman diliminde ve paket gönderecekleri zaman diliminde uyanık kalarak diğer durumlarda uyku düzenine geçerek enerji tasarrufu sağlayabilirler.

Şekil 3.2’de sunulan topolojide fiziksel ortamdan alınan verilerin sırasıyla 2–5–7–10 numaralı düğümler üzerinden aktaracağı düşünülürse oluşacak gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis tablosu aşağıdaki gibi olacaktır (Şekil 3.3).

		Çerçeve (Frame)										
		CS	TS ₁	TS ₂		...					TS ₁₀	
Düğüm 2		CS	IDLE	Tx	IDLE	IDLE	Rx	IDLE	Rx	IDLE	IDLE	Rx
Düğüm 5		IDLE	Rx	IDLE	IDLE	Tx	IDLE	Rx	IDLE	IDLE	IDLE	Rx
Düğüm 7		IDLE	Rx	IDLE	IDLE	Rx	IDLE	Tx	IDLE	IDLE	IDLE	Rx
Düğüm 10		IDLE	Rx	IDLE	IDLE	Rx	IDLE	Rx	IDLE	IDLE	IDLE	Tx

CS: Kontrol Zaman Dilimi **IDLE:** Boşta Bekleme Zaman Dilimi
TS_i: Zaman Dilimi *i* **Tx:** Gönderme Zaman Dilimi **Rx:** Alma Zaman Dilimi

Şekil 3.3. Gönderme tabanlı zaman dilimi tahsis tablosu

Gönderme tabanlı zaman dilimi tahsisinde düğümler ne zaman veri geleceğini bilmediğinden sürekli boşa bekleme durumunda olmak zorundadır. Herhangi bir düğüm veri göndermeye başladığında ise hangi düğüme veri gönderildiği belli olmadığından küme içerisindeki tüm düğümler veri paketini alırlar. Zorunlu bekleme ve kendisine ait olmayan verileri alma gereksiz enerji tüketimine neden olarak bu tür protokolleri enerji verimli olmaktan çıkarır.

Şekil 3.4'te aynı veri iletim yolu için zaman dilimleri tahsislerinin alma tabanlı olarak yapıldığında oluşan zaman dilimi tahsis tablosu sunulmaktadır.

		Çerçeve (Frame)										
		CS	TS ₁	TS ₂		...					TS ₁₀	
Düğüm 2			S	Rx	S	S	S	S	Tx	S	S	S
Düğüm 5			S	S	S	S	Rx	S	S	S	S	Tx
Düğüm 7			S	S	S	S	Tx	S	Rx	S	S	S
Düğüm 10			S	S	S	S	S	S	S	S	S	Rx

CS: Kontrol Zaman Dilimi **TS_i:** Zaman Dilimi *i*
S: Uyku Zaman Dilimi **Tx:** Gönderme Zaman Dilimi **Rx:** Alma Zaman Dilimi

Şekil 3.4. Alma tabanlı zaman dilimi tahsis tablosu

Alma tabanlı zaman dilimi tahsisinde düğümlere hangi zaman diliminde veri alacakları bildirildiğinden sadece veri gönderecekleri, alacakları ve kontrol zaman dilimlerinde uyanık kalabilirler. Bu yolla gereksiz dinlemeler ve boşa beklemler önlenerek enerji verimliliği sağlanmış olur.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 birlikte değerlendirildiğinde dört düğüm için gönderme tabanlı zaman dilimine göre tahsis yapıldığı durumda iki düğümün sürekli olarak kendisine ait olmayan verileri aldığı ancak alma tabanlı zaman dilimi tahsisinde ise fazladan veri alma işleminin gerçekleşmediği görülmektedir. Ayrıca alma zaman dilimi tahsis yönteminde düğümlerin boşa bekleme konumunda kalmadıkları ve uyku moduna geçerek enerjiyi israf etmeyecekleri açıktır.

Özet olarak, alma tabanlı TDMA yapıları, çoklu atlamalı topolojilerde enerji verimliliği sağlarken, merkezi düğümlü topolojilerde enerji israfına neden

olabilecektir. Diğer taraftan, gönderme tabanlı TDMA yapıları, merkezi düğümlü topolojilerde enerji verimliliği sağlarken, çoklu atlamalı topolojilerde enerji israfına neden olabilirler.

Tablo 3.1’de gönderme ve alma tabanlı zaman dilimi tahsis yöntemlerinde önemli ölçütlerin karşılaştırması görülmektedir.

Tablo 3.1. TDMA OEK protokollerinde zaman dilimi tahsis yöntemleri

	Alma Tabanlı TDMA OEK	Gönderme Tabanlı TDMA OEK
Alma/Gönderme Zaman Dilimi Tahsisi	Yönlendirme Protokolüne Göre	Sabit Zaman Dilimi
Alma Zaman Dilimi	Önceden Belirlenir	Diğer Düğümlere Göre Belirlenir
Gönderme Zaman Dilimi	Önceden Belirlenmemiştir	Önceden Belirlenmiştir
Zaman Dilimi Tahsisi	Paket Alma Durumuna Göre	Paket Gönderme Durumuna Göre
Bir Çerçeve Uyanık Kalınan Zamanlar	Alma, Gönderme ve Kontrol Zaman dilimleri	Tüm Zaman dilimleri
QoS Desteği	Sağlar	Sağlar
İş Çıkarma Oranı	Yüksektir	Yüksektir
Enerji Verimliliği	Yüksektir	Düşüktür

3.2.5. Geliştirilen MELOEK melez ortam erişim yöntemi genel yapısı

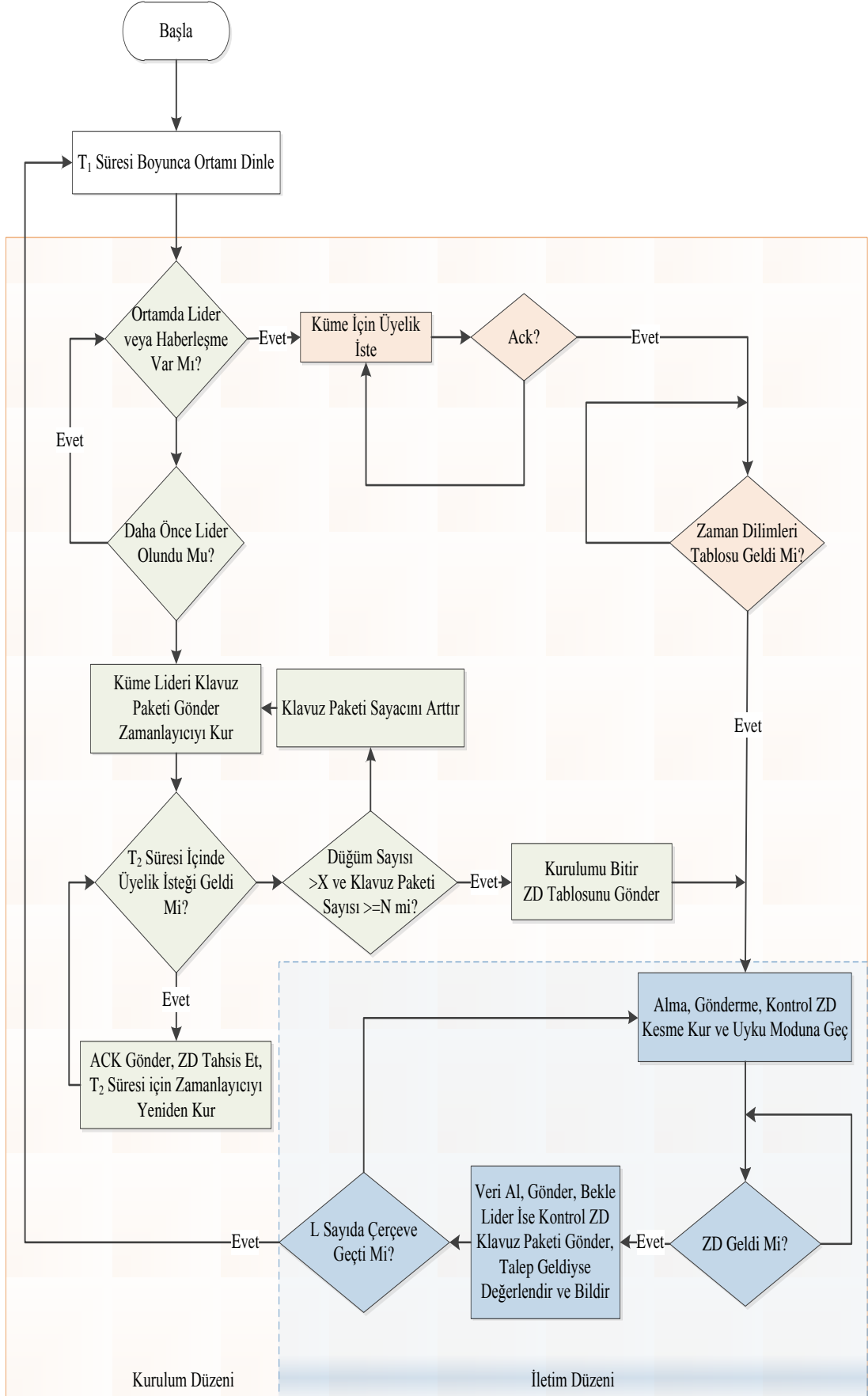
Tez çalışmasında, geleneksel ortam erişim yöntemlerinden TDMA ve CSMA’nın olumlu yönlerinin birleştirilmesi ile her iki yöntemden de daha üstün özelliklere sahip, geniş ölçekli ağlar için melez, enerji verimli ve yüksek başarıma sahip bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Protokolde TDMA’nın kullanılma nedeni enerji verimliliğini üst düzeye çıkarmaktır. CSMA kullanılmasının nedeni ise KAA’larda enerji sınırlılığı sebebiyle paket çarpışmaları meydana gelmeden çarpışmalardan kaçınılması ve olaylara hızlı tepki verilmesi gerekliliğidir.

Geliştirilen protokolün genel yapısı gerçekleştirilen işlemler açısından kurulum düzeni (modu) ve iletim düzeni olarak iki kısma ayrılmaktadır;

Kurulum düzeninde CSMA yönteminin olaylara hızlı tepki verebilme özelliğinden faydalanılarak uyanmaya başlayan düğümlerin birbirlerinden haberdar olma ve

TDMA için kullanılacak zaman dilimleri dağıtımının eşgüdümü işlemleri gerçekleştirilmektedir. Başlangıçta zaman dilimlerini dağıtacak olan ve sadece küme içerisindeki haberleşmeyi koordine etmekten sorumlu olan bir düğüm “sanal küme lideri” olarak kendiliğinden belirlenerek diğer düğümlerin üyelik taleplerine cevap verilmektedir. Taleplerin bitiminden belirli bir süre sonra sanal küme lideri, diğer düğümlerin ne zaman paket alacaklarını belirleyen zaman dilimlerini göndermekte ve kurulum düzenini sonlandırmaktadır. Sanal küme lideri yeniden kurulumlarda değiştirilerek enerji tüketiminin dengesiz ilerlemesi önlenmektedir. Böylelikle batarya geri kazanma etkisinden (battery recovery effect) de faydalanılarak daha uzun bir batarya ömrü sağlanmaktadır.

İletim düzeninde enerji verimliliğini üst düzeye çıkaran ve gereksiz tekrar göndermeleri azaltarak gecikmeyi de en aza indiren TDMA yöntemi alma zaman dilimi tahsisli olarak kullanılmaktadır. Ayrıca TDMA’da kullanılan alma zaman dilimleri içerisinde CSMA de eklenerek birkaç düğümün aynı hedef düğüme paket göndermek isteyecekleri durumda çekişme ile paket göndermeleri sağlanmıştır. Böyle bir durumda çekişmeyi kaybeden diğer düğümlerin uykuya geçmeleri sağlanarak ayrıca enerji tasarrufları sağlanmıştır. Şekil 3.5’de MELOEK protokolü akış şeması sunulmaktadır. Burada kullanılan ZD, zaman dilimini temsil etmektedir.



Şekil 3.5. MELOEK protokolü akış şeması

Geliştirilecek uygulamanın gereksinimlerine göre, Şekil 3.5'te sunulan akış şemasında yer alan;

- Başlangıçtaki ortamı dinleme zamanı (T_1),
- Klavuz paketi göndermek için son üyelik isteğinden veya klavuz paketinden sonra ne kadar bekleneceği (T_2),
- Kurulumu sonlandırmak için kaç adet klavuz paketi gönderileceği (N),
- En az kaç düğümle kurulumun sonlandırılacağı (X),
- Tüm sistemin, eklenen–ayrılan düğümlerin belirlenmesi ve sanal küme liderinin değişmesi için kaç çerçeve sonra yeniden kurulacağı (L)

belirlenmeli ve düğümler dağıtılmadan önce gerekli ayarlamalar yapılmalıdır.

3.3. MELOEK Protokolü Benzetim Modeli ve Ayrıntıları

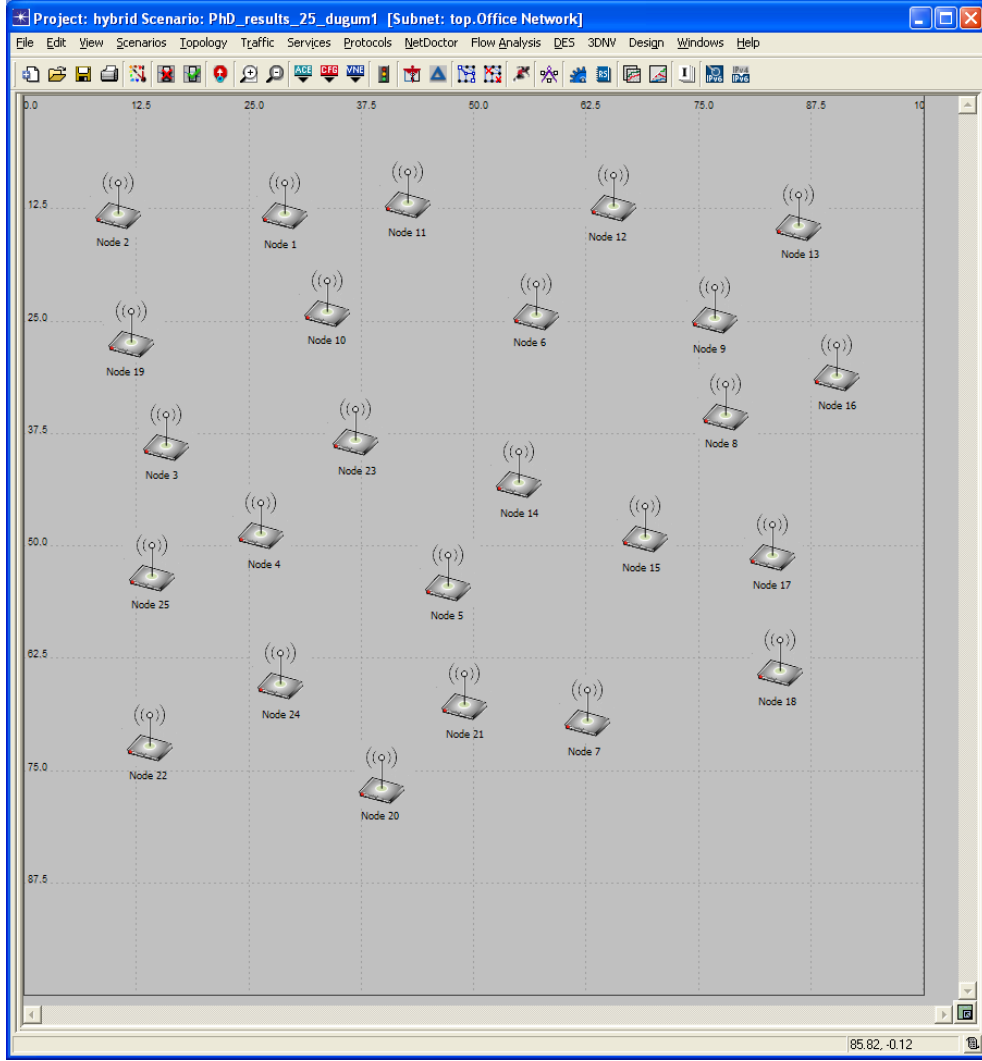
Geliştirilen MELOEK protokolünün benzetimi OPNET Modeler benzetim programından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim yazılımının tercih nedeni güvenilir olması, teknik destek sağlaması ve daha önceki çalışmalardan dolayı kullanımında bilgi, beceri ve tecrübe sahibi olunmasıdır.

OPNET Modeler'de benzetimin gerçekleştirilebilmesi için temel olarak topolojinin belirlendiği “proje modeli”, düğümlerin çalışma şeklini belirleyen “düğüm modeli” ve her bir düğüm içerisinde bulunan işlemcilerin amaca göre programlanmasını sağlayan “süreç modelleri” kullanılmaktadır.

Bölüm 4'te başarımlı değerlendirilmesinde kullanılacak topolojide yer alan kablosuz algılayıcı düğümlerin proje, düğüm ve süreç modelleri ayrıntılı olarak alt bölümlerde sunulmaktadır.

3.3.1. Proje modeli

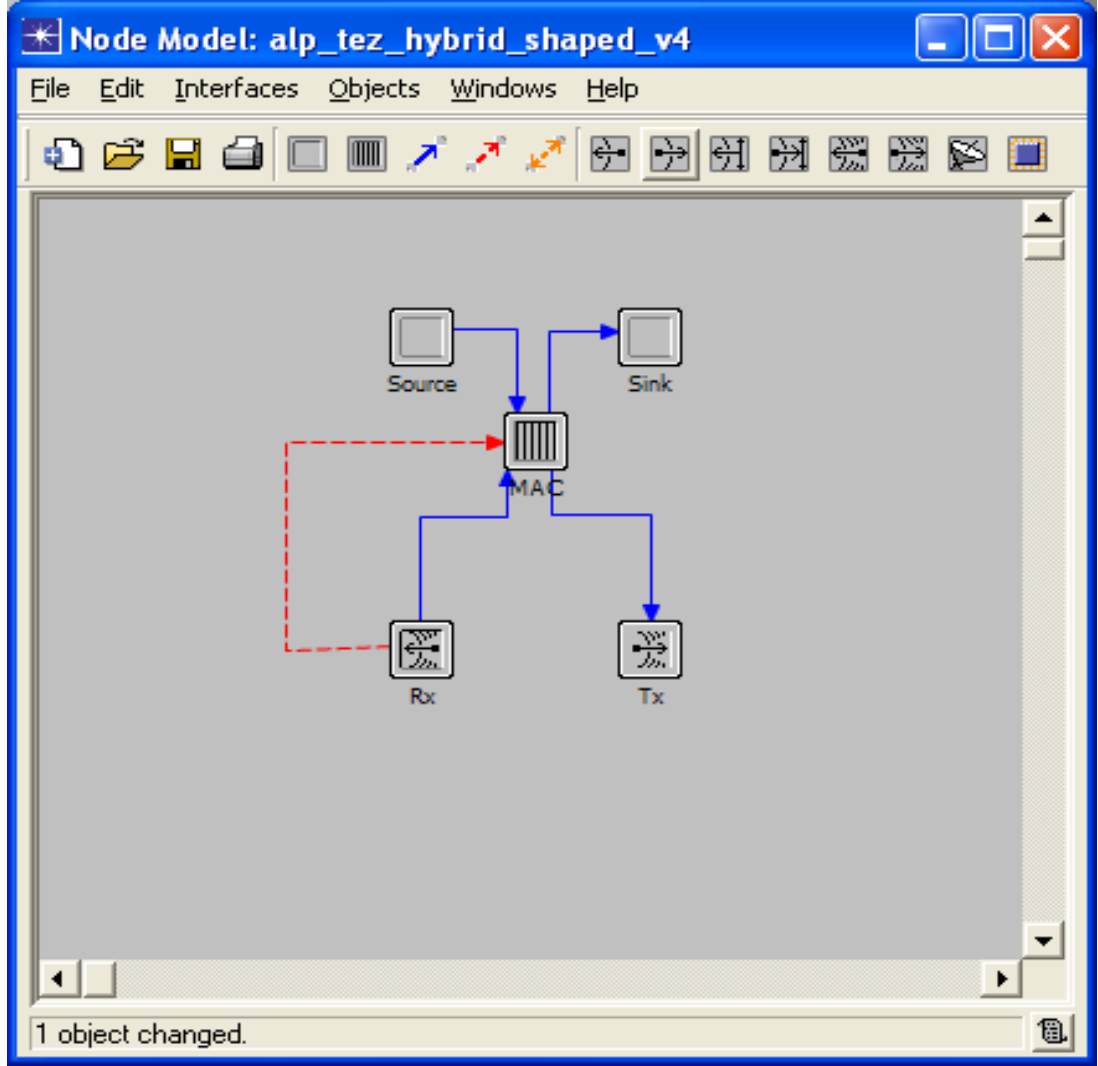
Proje modeli benzetimde kullanılacak topolojinin ve düğüm hareketlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu modeller alt ağlar, düğümler ve linkler olmak üzere üç temel nesneden oluşur. Proje editörü sayesinde istenilen sayıda düğüm benzetim ortamına yerleştirilebilmekte, kolaylıkla ağ modeli tasarlanabilmekte ve benzetim gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.6'da MELOEK protokolünde 25 düğümün kullanıldığı örnek proje modeli sunulmaktadır.



Şekil 3.6. MELOEK protokolü OPNET proje modeli

3.3.2. Düğüm modeli

Düğüm modeli, bir düğümün hangi işlevleri yerine getireceği, fiziksel ortam ve düğüm içerisinde kullanılan işlemcilerin birbirleri ile nasıl haberleşeceklerinin belirlendiği OPNET modelidir. Şekil 3.7’de MELOEK’te kullanılan işlemciler ve giriş-çıkış birimleri sunulmaktadır.



Şekil 3.7. MELOEK protokolü OPNET düğüm modeli

Düğüm modelinde kullanılan ve “Source”, “Sink”, “MAC”, “Rx” ve “Tx” olarak adlandırılan işlemciler ve kablosuz modüller tüm fonksiyonları gerçekleştirmektedir.

“Source” işlemcisi, OEK katmanına üst katmanlardan gelen paketlerin temsil edilmesi ve istenilen aralıklarda paket üretilmesi işlevlerini yerine getirmektedir. Bu işlemcide kuyruk yapısı bulunmamaktadır.

“Sink” işlemcisi, OEK katmanına gelen paketlerin sonlandırılarak istatistiklerinin tutulmasını sağlamaktadır ve bu işlemcide de kuyruk yapısı bulunmamaktadır.

“MAC” işlemcisi, OEK katmanında geliştirilen ve ayrıntıları Bölüm 3.3.2’de sunulan MELOEK protokolünün kodlanması işlevini yerine getirmektedir. Bu işlemcide kuyruk yapısı yer almaktadır.

“Rx” modülü kablosuz ortamdan paketlerin alınmasını sağlayan birimdir.

“Tx” modülü kablosuz ortama paketlerin gönderilmesini sağlayan birimdir.

3.3.3. Süreç modeli

Şekil 3.7’de yer alan “MAC” kuyruklu işlemcisi içerisinde düğümün nasıl çalışacağını belirleyen MELOEK protokolü OPNET süreç modeli, uygulamada bütünlük bir yapıya sahip olsa da gerçekleştirdiği fonksiyonlar açısından kurulum düzeni ve iletim düzeni olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Süreç modelinde kullanılan durum makineleri program kodları Ek-A’da ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3.3.3.1. Kurulum düzeni süreç modeli

Kurulum düzeni, tasarsız olarak dağıtılan KAA düğümlerinin ilk olarak uyanmaya başladıkları ve ağ yapısını oluşturdukları evrenin davranışlarını belirler. MELOEK protokolü kurulum düzeni süreç modeli Şekil 3.8’de görülmektedir.

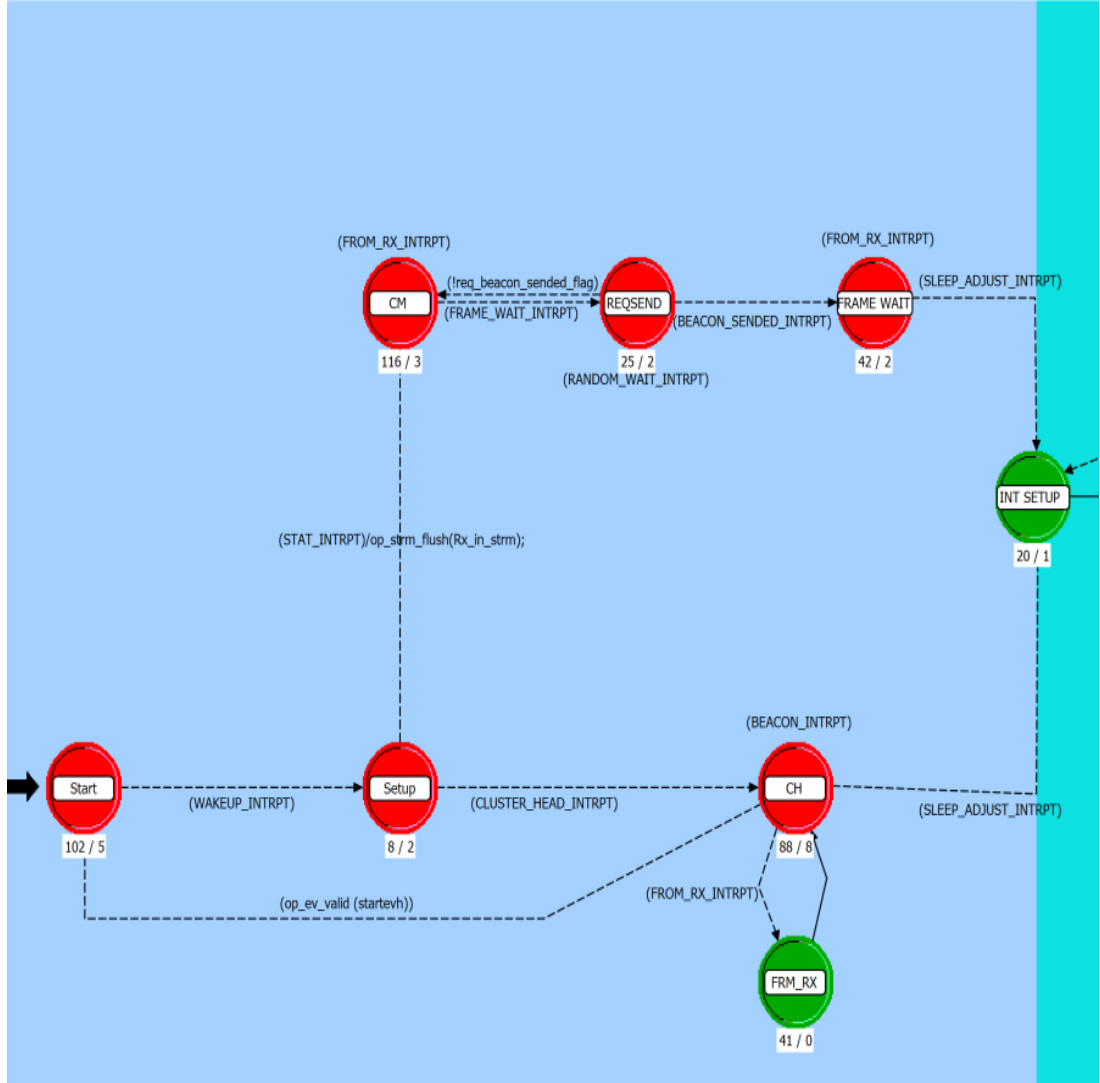
Kurulum düzeni süreç modelinde kullanılan durum makineleri ve icra ettikleri görevler aşağıda sıralanmaktadır.

“Start” durum makinesi, süreç modelinin tamamında kullanılacak gerekli değişkenlerin ve istatistiksel bilgilerinin tanımlanması, kablosuz düğümle ilgili haberleşme veri hızı gibi sabit değerlerin elde edilmesi işlevlerini yerine getirir.

“Setup” durum makinesi, ortamda haberleşmenin olup olmadığını belirler.

“CM” durum makinesi, ilk kurulum düzeninde mi yoksa düğümler arasında haberleşmenin yapıldığı iletim düzeninde mi olduğunu belirler. Buna göre küme liderini öğrenerek istek gönderilmek üzere bir sonraki durum makinesine geçilmesini sağlar.

“REQSEND” durum makinesi, sanal küme liderinden zaman dilimi tahsisi yapması için istek paketi gönderilmesi işlemini gerçekleştirir.



Şekil 3.8. Kurulum düzeni süreç modeli

“FRAME WAIT” durum makinesi, kümeye dahil olma isteğinden sonra sanal küme liderinden gelecek üye düğümlerle ilgili zaman dilimi tahsis bilgisinin beklenmesini sağlar.

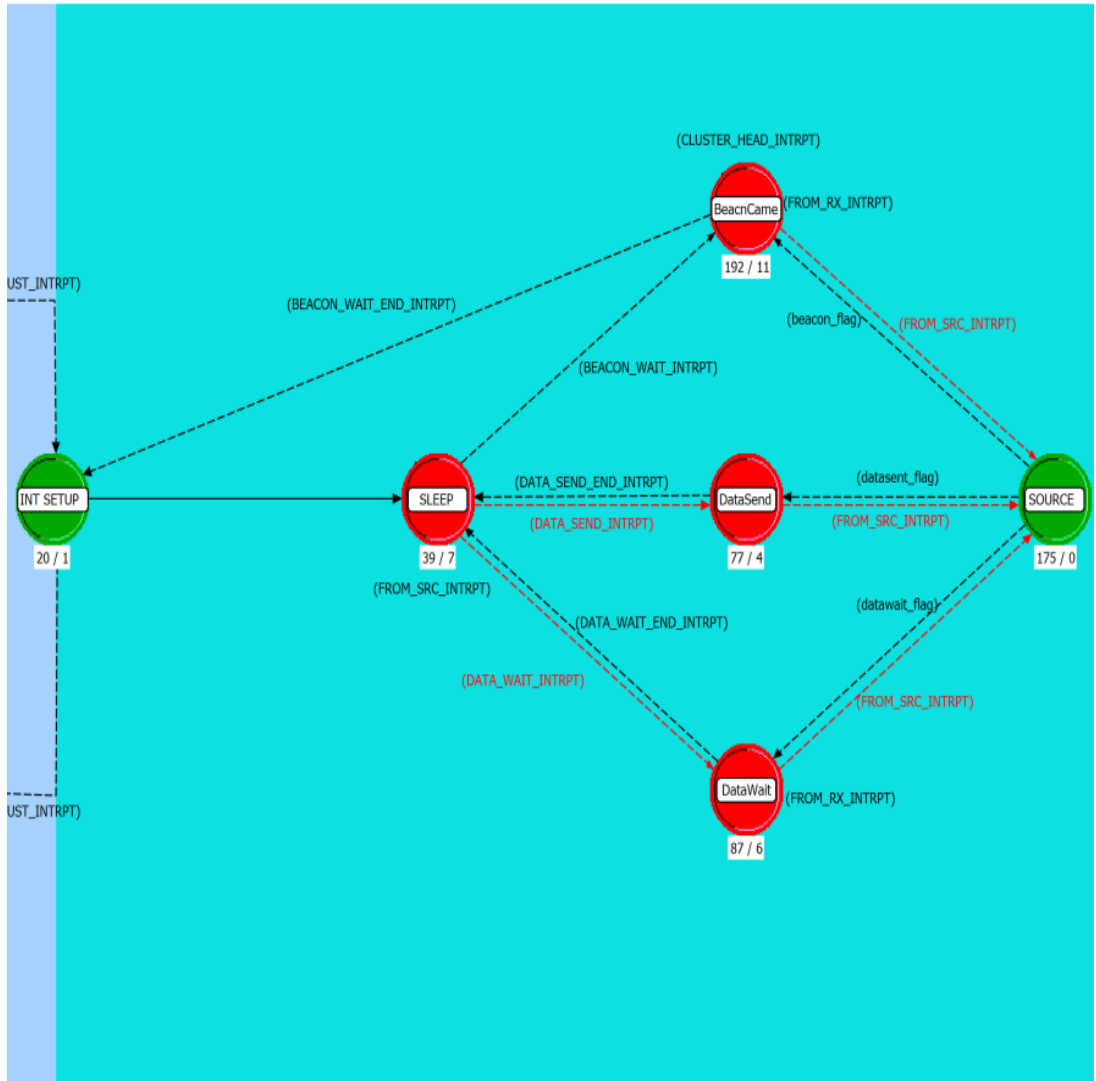
“CH” düğüm uyandıktan sonra belirli bir süre haberleşme yoksa sanal küme lideri olarak deklarasyonun gerçekleştirildiği ve haberleşmeyi başlatmak üzere eşgüdümün sağlandığı durum makinesidir. Diğer düğümlerden gelecek isteklere göre zaman dilimi ataması ve kurulum düzeninin devam ettiğinin bildirildiği kılavuz paketlerinin gönderilmesi bu durum makinesinde gerçekleştirilir.

“FRM RX” durum makinesi, kablosuz kanaldan gelen paketlerin alınması ve gerekli değerlendirmelerin yapılması işlevini yerine getirir.

“INT SETUP” durum makinesi, kurulum düzeninin sonlandırılması ve gelen zaman dilimi tahsislerine göre paket gönderilecek, alınacak ve kontrol zaman dilimleri dışında düğümün uykuya geçirilmesi görevini icra eder.

3.3.3.2. İletim düzeni süreç modeli

İletim düzeninde, zaman dilimleri sanal küme lideri tarafından belirlenen düğümlerin üst katmandan gelen yönlendirme bilgilerine göre diğer düğümlerle haberleşme işlemi gerçekleştirilir. MELOEK iletim düzeni süreç modeli Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. İletim düzeni süreç modeli

İletim düzeni süreç modelinde kullanılan durum makineleri ve icra ettikleri görevler aşağıda sıralanmaktadır.

“SLEEP” durum makinesi, belirlenen alma zaman dilimlerine göre düğümün işlem yapacağı zaman dilimleri dışında uykuda kalmasının sağlanması işlemini yerine getirir.

“BeacnCome” durum makinesi, haberleşme sırasında ağa yeni katılacak olan düğümlerin eklenmesi, var olan düğümlerin bataryasının bitmek üzere olması gibi kritik bilgilerin sanal küme liderine gönderilmesi, çerçeve boyutunda oluşabilecek değişikliklerin yani yeni katılacak üye düğümlerin diğer düğümlere bildirilmesi işlevlerini yerine getirir.

“DataSend” durum makinesi, paket gönderilecek düğümün alma zaman dilimine göre uyanarak, çekişme kazanıldığında veri paketinin gönderilmesi görevini yerine getirir.

“DataWait” durum makinesi, sanal küme lideri tarafından atanan ve duyurulan alma zaman dilimine göre uyanık kalıp diğer düğümlerden paket beklenmesi işlevini icra eder.

“Source” durum makinesi, OEK katmanına üst katmandan gelen paketlerin alınarak kuyruğa konulması işlevini yerine getirir.

3.3.4. Paket yapıları

MELOEK protokolü benzetiminde klavuz paketi ve veri paketi olmak üzere iki farklı türde paket yapısı kullanılmaktadır. Klavuz paketi, saat eşzmanlamasını sağlamak ve sanal küme lideri seçimini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 3.10).

Kaynak ID (8 Bit)	Tip (8 Bit)
----------------------	----------------

Şekil 3.10. Klavuz paketi yapısı

Veri paketi ise sanal küme liderinin üye düğümlere zaman dilimlerini bildirmesi ve düğümlerin fiziksel ortamdan elde ettikleri bilgilerin iletilmesi sırasında kullanılır (Şekil 3.11).

Kaynak ID (8 Bit)	Hedef ID (8 Bit)	Tip (8 Bit)	Veri (1-50 Bayt)
----------------------	---------------------	----------------	---------------------

Şekil 3.11. Veri paketi yapısı

3.4. MELOEK Protokolü Analitik Modeli

Bu bölümde sunulan analitik modeller, geliştirilen MELOEK protokolünün benzetim modeli ile birlikte kullanılarak doğrulanması işleminde kritik öneme sahiptir. Değerlendirme ölçütleri olarak KAA’larda sistem tasarımı hakkında önemli bilgiler veren düğüm enerji tüketimi, iş çıkarma oranı ve uçtan uca paket gecikmesi seçilmiştir. Kurulum sırasında kullanılacak paketlerin küçük olması, paket sayısının az olması, kurulumun kısa sürede sonuçlanması ve burada kullanılacak enerjinin toplam enerjiye göre çok düşük olması nedeniyle analitik modellerde kurulum düzeni etkileri göz ardı edilmiştir. Alt bölümlerde her bir değerlendirme ölçütü için analitik modellere yer verilmektedir.

3.4.1. Düğüm enerji tüketimi analitik modeli

Tüketilen toplam ortalama enerjinin bulunması için, gönderme \bar{E}_{Tx} , alma \bar{E}_{Rx} , boşa bekleme $\bar{E}_{Boşta}$ ve uyku \bar{E}_{Uyku} durumunda harcanan ortalama enerjilerin yüke göre değişimini ifade eden bir analitik model geliştirilmiştir. Bir kablosuz algılayıcı düğümün herhangi bir çerçeve boyunca alma durumunda anlık enerji tüketimi;

$$E_{Rx} = T_d Q_M(m) m P_{Rx} \quad (3.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $Q_M(m)$ ve m sırasıyla bir çerçeve süresince kaynaktan gelen paket sayısının olasılık kütle fonksiyonunu ve kablosuz düğüme gelen anlık paket sayısını göstermektedir. Ayrıca, T_d veri iletim süresini, P_{Rx} alma işlemi için harcanan gücü sembolize etmektedir. Bir düğümün alma paket olasılığı, ağ içerisinde başka bir düğümün gönderme olasılığına eşit olacağından, kaynak

düğümüne paket gelme olasılığı, ortalama yük değeri G olan Poisson dağılımı ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada yük, zamanlama tabanlı OEK protokolü kullanan ağlar için, bir kablosuz düğüme bir zaman dilimi süresince uygulanan ortalama paket sayısı olarak tanımlanabilir. Böylece, düğüme uygulanan yük miktarına göre düğüm ortalama enerji tüketimi hesaplanır.

$$Q_M(m) = \frac{e^{-G} G^m}{m!} \quad (3.2)$$

Poisson dağılımının ortalama değeri göz önüne alınarak bir düğümün alma durumunda ortalama enerji tüketimi;

$$\bar{E}_{R_x} = T_d G P_{R_x} \quad (3.3)$$

şeklinde modellenebilir. Aynı şekilde, bir düğümün paket gönderme olasılığı da Poisson dağılımı ile ifade edildiğinden çerçeve süresi boyunca paket gönderme sırasında harcanan ortalama enerji;

$$\bar{E}_{T_x} = T_d G P_{T_x} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilebilir. Alma tabanlı zaman dilimi tahsisinde yalnızca alma işleminin gerçekleştirildiği zaman diliminde boşta bekleme olabileceğinden, bu durumda harcanan enerji;

$$\bar{E}_{Boşta} = (T_s - T_d) G P_{Boşta} \quad (3.5)$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada T_s zaman dilimi uzunluğunu gösterir. Uykuda geçen süre, çerçeve içerisindeki gönderme ve alma dışında kalan zaman dilimleri toplamına eşit olacağından, uykuda harcanan ortalama enerji;

$$\bar{E}_{Uyku} = (n - 2) T_s P_{Uyku} \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada n çerçevede bulunan zaman dilimi sayısını ifade eder. Bir düğümün çerçeve boyunca harcadığı toplam enerji, düğümün tüm durumlarında tükettiği enerji miktarlarının toplamı ile yükün çarpımına eşittir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\bar{E}_F = (\bar{E}_{Rx} + \bar{E}_{Tx} + \bar{E}_{Uyku} + \bar{E}_{Boşta})G \quad (3.7)$$

Çerçevedeki enerji, yükün normalize edildiği durumda;

$$\bar{E}_F = \begin{cases} \bar{E}_F & G \geq 1 \\ \bar{E}_F G, & G < 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

şeklinde hesaplanabilir. Benzetim süresi boyunca enerji tüketimi ise;

$$\bar{E}_T = \sum_{i=1}^{T_F} \bar{E}_F(i) \quad (3.9)$$

bağıntısı ile bulunur. Buradaki T_F enerji tüketimi bulunmak istenen süredeki toplam zaman dilimi sayısını göstermektedir.

3.4.2. İş çıkarma oranı analitik modeli

Yük (G) bir zaman diliminde gönderilen ortalama paket sayısını belirtmek üzere, hedef düğümde alınan ortalama paket sayısını ifade eden iş çıkarma oranı (η) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\eta = \begin{cases} G, & G < 1 \\ 1, & G \geq 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

İş çıkarma oranı, sınırlı bir kaynak olan kablosuz iletişim ortamının ne kadar verimli kullanıldığını gösterdiğinden haberleşme sistemlerinde sistemin doğrulanması ve değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak TDMA tabanlı sistemlerde doğru değerlendirme yapılabilmesi için toplam zaman dilimi sayısının, tahsis edilen düğüm sayısından büyük veya eşit olması gereklidir. Düğüm sayısının zaman dilimi sayısından büyük olduğu durumlarda ise benzer bir ölçüt olan paket dağıtım oranı daha anlamlı bir değerlendirme olanağı sunmaktadır.

3.4.3. Uçtan uca paket gecikmesi analitik modeli

KAA OEK protokollerinin analitik modellenmesinde, genellikle kuyruk modelleri kullanılır. Ortam erişiminde kullanılan yöntemin türüne göre farklı kuyruk modelleri

oluşturularak başarımlar ölçütleri elde edilir. Haberleşme sistemleri analitik modellerinin çıkarılmasında kuyruk sistemlerinin kullanılmasının nedeni, aynı anda sadece bir işlemin yapılabilmesi ve diğer işlemlerin sırada bekletilmesidir. Kuyruk teorisi, bilgisayar sistemlerindeki kuyruklarda geçen bekleme sürelerinin hesaplanması ve böylece herhangi bir iş/süreç için sistem içerisinde harcanacak toplam bekleme süresinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır [18, 75, 76].

Paketlerin kaynak tarafında ilk bitinin üretildiği andan, hedef tarafında son bitinin elde edildiği ana kadar geçen süreye uçtan uca gecikme denir [7]. Kablosuz tüm sistemlerin tasarlanması aşamasında en önemli başarımlar değerlendirme parametreleri arasında yer aldığından, KAA'lar için de göz önünde bulundurulması gereken bir ölçüttür. Bu çerçevede denklemlerde kullanılan değişkenler;

λ : Ortalama paket geliş oranı (paket/s)

μ : Servis sunucu için ortalama servis oranı (paket/s)

X: Rastgele değişken

ρ : Trafik yoğunluğu

E[x]: Ortalama servis süresi (s)

E[W]: Ortalama bekleme süresi (s)

E[N]: Ortalama paket sayısı

olmak üzere, sistemdeki ortalama paket sayısı;

$$E[N] = \rho + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (3.11)$$

esas alınarak ve “Little Kuralı” kullanılarak sistemde ortalama bekleme süresi aşağıdaki gibi hesaplanır [18]:

$$E[N] = \lambda E[W] \quad (3.12)$$

$$\rho + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2(1-\rho)} = \lambda E[W] \quad (3.13)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (3.14)$$

$$\mu = \frac{1}{E[x]} = \frac{\lambda}{\rho} \quad (3.15)$$

$$E[W] = \frac{\rho}{\lambda} + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (3.16)$$

$$E[W] = E[X] + \frac{\lambda E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (3.17)$$

$$E[W] = E[X] + \frac{\rho E[X]}{2(1-\rho)} \quad (3.18)$$

3.5. Sonuç

Bu bölümde geniş ölçekli KAA uygulamaları için TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemlerinin olumlu yönlerini birleştiren enerji verimli ve yüksek başarıma sahip melez OEK protokolü MELOEK'in tasarım aşamaları sunulmaktadır. Bu çerçevede öncelikle önerilen MELOEK protokolünün bileşenleri olan çoklu atlamalı topoloji, geliştirilen standartlaştırılmış düğüm yapısı, uyarlamalı çerçeve yapısı, alma tabanlı zaman dilimi tahsisi ve geliştirilen melez ortam erişim yöntemi detaylandırılmıştır. Ardından MELOEK protokolü benzetim modeli ve analitik modelleri sunularak uygulanabilir ve farklı başarımlar ölçütleri açısından değerlendirilebilir bir çözüm ortaya konulmuş bulunmaktadır.

4. ÖNERİLEN MELOEK PROTOKOLÜ KULLANILAN ÖRNEK BİR KAA UYGULAMASI VE BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

4.1. Giriş

Bu bölümde tez çalışması kapsamında geliştirilen MELOEK protokolünün öncelikle analitik ve benzetim yöntemleri kullanılarak doğrulanması, ardından da literatürde bilinen bir başka melez protokol olan Crankshaft ile karşılaştırmalı değerlendirilmesi yapılmaktadır. Değerlendirme işlemi Crankshaft protokolünün kullanılma nedeni, daha önce geniş ölçekli ağlar için geliştirilen OEK protokollerinden daha iyi sonuçlar vermesi ve MELOEK protokolüne benzer şekilde melez bir protokol olmasıdır.

Benzetim ve analitik modellerde kullanılan topoloji ve değişkenler ile elde edilen sonuçlar alt bölümlerde sunulmaktadır.

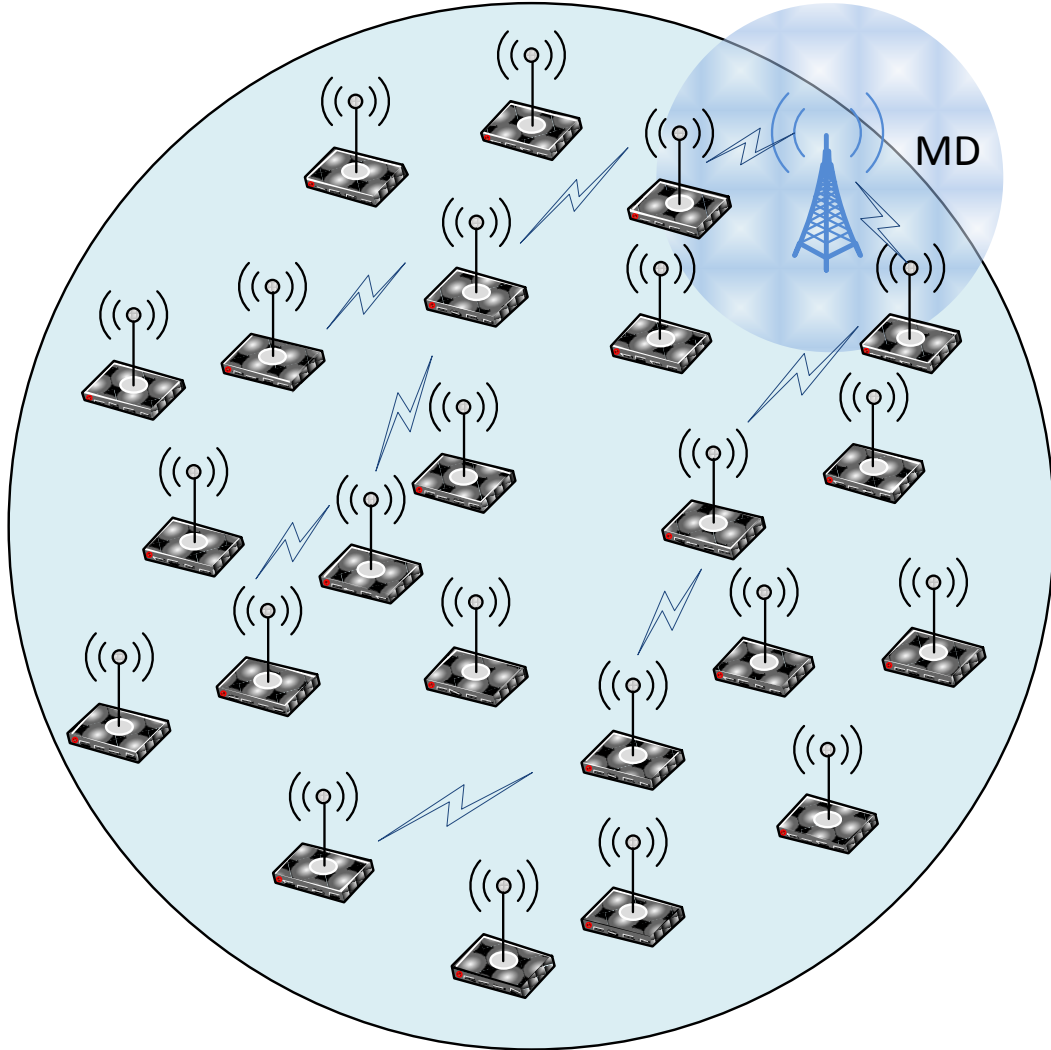
4.2. Örnek KAA Uygulaması İçin Geliştirilen Benzetim Modeli

Geliştirilen MELOEK protokolünün başarımlı değerlendirilmesinde Bölüm 3.3'te ayrıntılı olarak sunulan ve Ek-B'de modellerine yer verilen OPNET Modeller benzetimi kullanılmıştır. Bu alt bölümdeki örnek KAA uygulaması benzetim modellerinde yer alan ve MELOEK kullanan tüm kablosuz algılayıcı düğümler tezin hedefleri doğrultusunda aynı özellikte seçilmiştir. Düğümler rastgele zamanlarda uyanacak şekilde programlanarak rastgele dağıtılmıştır. Bir kenarı 100 metre olan kare benzetim uygulama ortamında tüm düğümler hareketsiz (fixed) olarak kabul edilmiştir. Kablosuz kanal modeli olarak ise serbest uzay (free space) yayılım modeli kullanılmıştır. Ayrıca düğümler arasında kablosuz sinyallerin yansıtacağı veya kırılacağı herhangi bir cisim olmadığı öngörülmüştür.

4.2.1. Topoloji

MELOEK protokolünün başarımlı değerlendirilmesinde Şekil 4.1'de sunulan topoloji kullanılmıştır. Geliştirilen protokolün geniş ölçekli uygulamalar için tasarlanması sebebi ile düğümlerin çoklu atlamalı olarak hedefe paket aktarmaları gerekmektedir. MELOEK protokolünün küme yapısı kullanılması öngörülmüştür. Rastgele

tanımlanan yolda (route) herhangi bir düğüm üzerinden alınan sonuçlar ile doğrulamalar ve başarımlar değerlendirilmeye başlanmıştır. Çalışmanın geleneksel eşleniklerinden Crankshaft protokolü ile değerlendirilmesi amacıyla yapılan benzetimlerde de yine aynı yol üzerinden iletimin yapılacağı bir senaryo takip edilmektedir. Küme içerisindeki düğüm sayısı değerlendirme amacıyla artırılarak değişik ölçütler için sonuçlar elde edilmektedir.



Şekil 4.1. Başarımlar değerlendirilmesinde kullanılan KAA topolojisi

4.2.2. Başarımlar değerlendirilmesinde kullanılan değişkenler

Tablo 4.1’de MELOEK protokolünün analitik ve benzetim yöntemleri ile yapılan doğrulamasında ve Crankshaft protokolü ile yapılan karşılaştırmalı başarımlar değerlendirmelerinde kullanılan değişkenler ve değerleri sunulmaktadır.

Tablo 4.1. Benzetimde ve analitik modellerde kullanılan değişkenler

Değişken	Değeri
Düğüm Sayısı	5–25
Çerçevdeki Düğüm Sayıları	5–25
Benzetim Süresi	1 Saat
Ortalama Yük	0,1 / 1,5 Paket/Zaman Dilimi
Zaman Dilimi Uzunluğu	50 ms
Veri İletim Hızı	250 Kbit/s
Paket Boyutu	50 Bayt
Paket Varışlar Arası Süre	Üssel Dağılım
Topoloji	Çoklu Atlamalı
$P_{Boşta}$	60 μ W
P_{Tx}	52,2 mW
P_{Rx}	59,1 mW
P_{Uyku}	3 μ W
T_1	50 ms
T_2	49 ms
X	5
N	3
L	20

Burada kullanılan değişken değerleri KAA uygulamaları geliştirme aşamasında sıklıkla tercih edilen MicaZ düğümler esas alınarak tanımlanmıştır [18]. Küme içerisindeki en yüksek düğüm sayısı karşılaştırma yapılacak Crankshaft protokolüne göre belirlenmiştir [24]. Zaman dilimi uzunluğunun 50 ms seçilme nedeni ise genelde KAA karşılaştırmalarında tercih elden S-MAC protokolünün esas alınmasıdır [59]. Bununla birlikte farklı uzunlukta zaman dilimi kullanılması da mümkündür. Zaman dilimi uzunluğu ve buna bağlı olarak veri paketleri boyutunu belirleyecek en önemli etken KAA uygulamasının türüdür. Ayrıca servis kalitesi desteği (QoS) parametreleri de kullanılacaksa belirleyici unsur olarak dikkate alınmalıdır.

Geliştirilecek KAA uygulamalarına göre veri hızı, paket boyutu ve zaman dilimi uzunluğu ihtiyaç dahilinde doğrulama ve değerlendirme parametrelerinde değişikliğe gidilerek tekrardan tanımlanmalıdır.

4.3. MELOEK Protokolünün Analitik ve Benzetim Modelleme Yöntemleri ile Doğrulanması

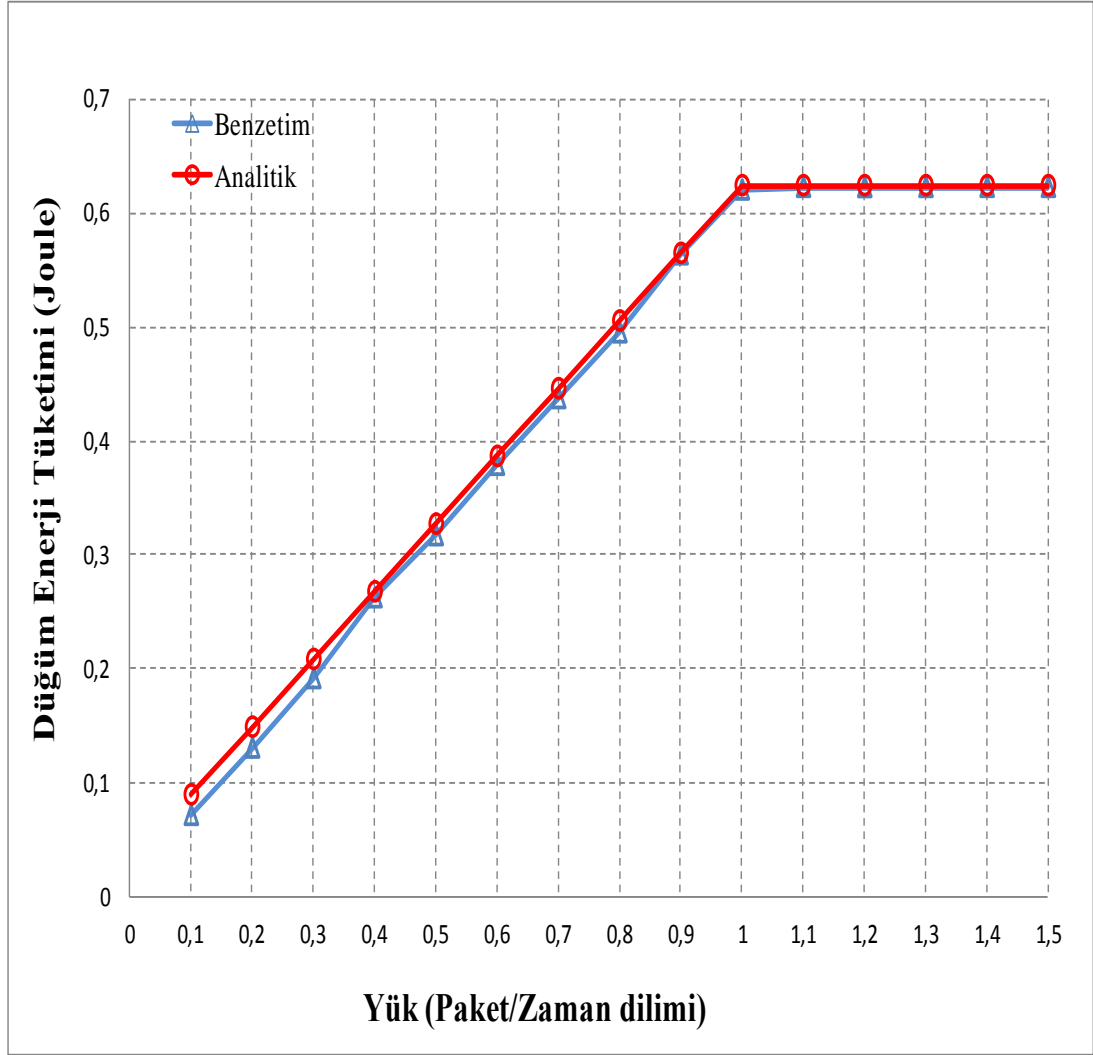
Bir KAA OEK protokolünün daha geliştirme aşamasında iken eksikliklerinin giderilmesi ve eniyilemelerin yapılması kritik öneme sahiptir. Bu çerçevede kullanılacak olan başarımların değerlendirme yöntemlerinden birkaçının birlikte kullanılması geliştirilen OEK protokolünden elde edilen sonuçların doğruluğunu ispat edecektir.

Tez çalışmasında geliştirilen MELOEK protokolünün değerlendirilmesi sırasında kullanılacak sonuçların güvenilirliğini test etmek amacıyla analitik ve benzetim modelleme yöntemleri kullanılarak örnek bir senaryoda sonuçlar elde edilmiş ve birbirleri ile doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Enerji tüketim doğrulanması

Şekil 4.2’de MELOEK protokolünün farklı yükler altında 1 saat boyunca düğümler üzerinde kullanılması ile oluşan enerji tüketimleri sunulmaktadır.

Düğüm enerji tüketimleri, 0,1 ile 1 paket/zaman dilimi yük değerlerinde doğrusal bir şekilde artarken protokolde kullanılan TDMA ortam erişim yöntemi nedeni ile 1 paket/zaman dilimi yük değerinden sonrasında sabit kalmaktadır. Yükün 1 paket/zaman dilimi’nden küçük olduğu durumlarda gönderilecek paket olmadığından enerji de daha az tüketilmektedir. Aynı şekilde yükün 1 paket/zaman dilimi üzerinde olduğu durumlarda kuyrukta paket olmasına rağmen zaman diliminin yetersiz olması nedeniyle gönderme işlemi gerçekleşmeyeceğinden enerji tüketimi de aynı seviyede kalmaktadır.

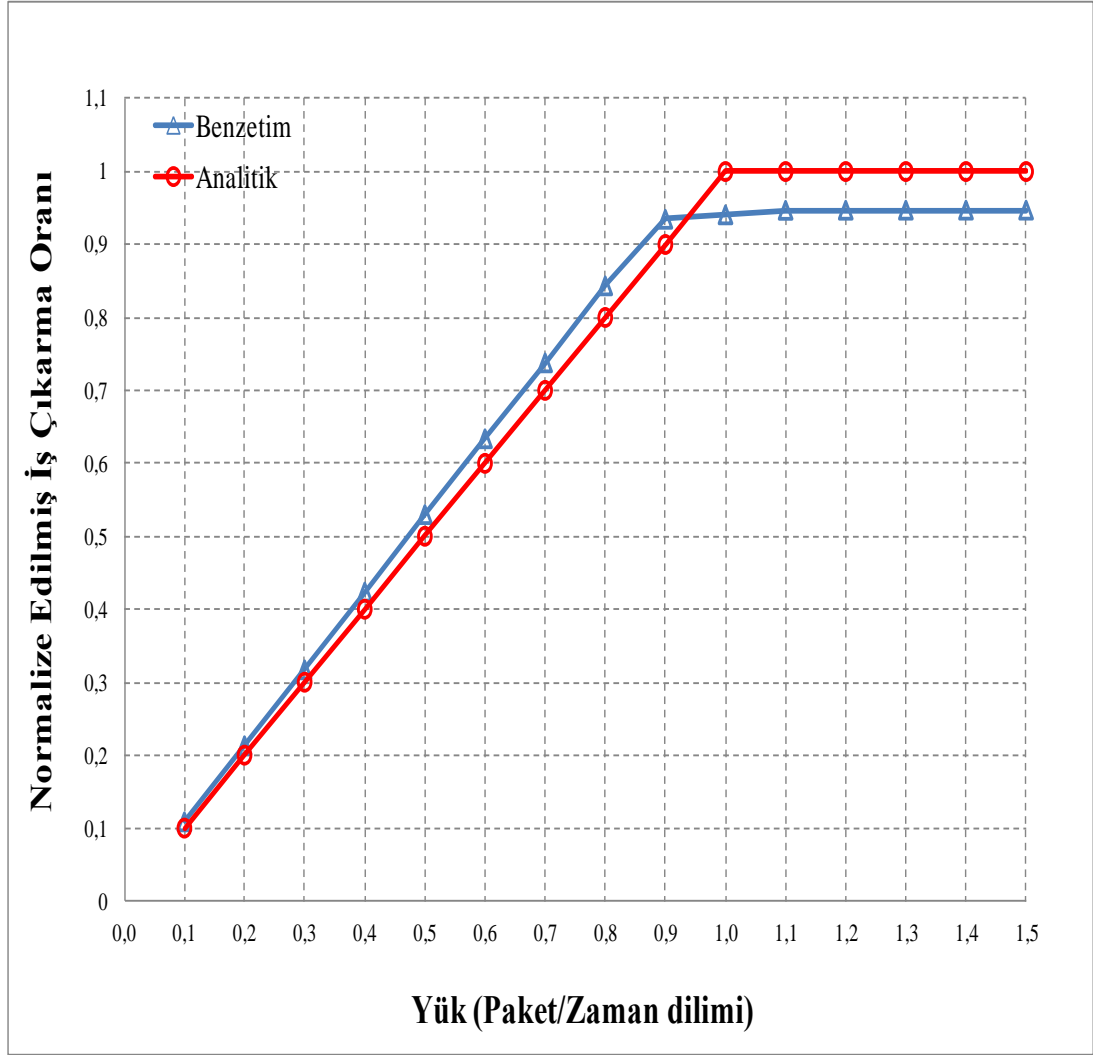


Şekil 4.2. MELOEK protokolü düğüm enerji tüketimi doğrulaması

MELOEK'te ayrıca TDMA ile birlikte CSMA ortam erişim yöntemi de melez olarak kullanıldığından analitik ve benzetim yöntemlerinden elde edilen sonuçlar küçük farklılıklar göstermekle birlikte büyük ölçüde örtüşmektedir.

4.3.2. İş çıkarma oranı doğrulaması

Farklı yükler altında örnek KAA uygulamasında MELOEK kullanılmasıyla oluşan iş çıkarma oranları Şekil 4.3'te görülmektedir.



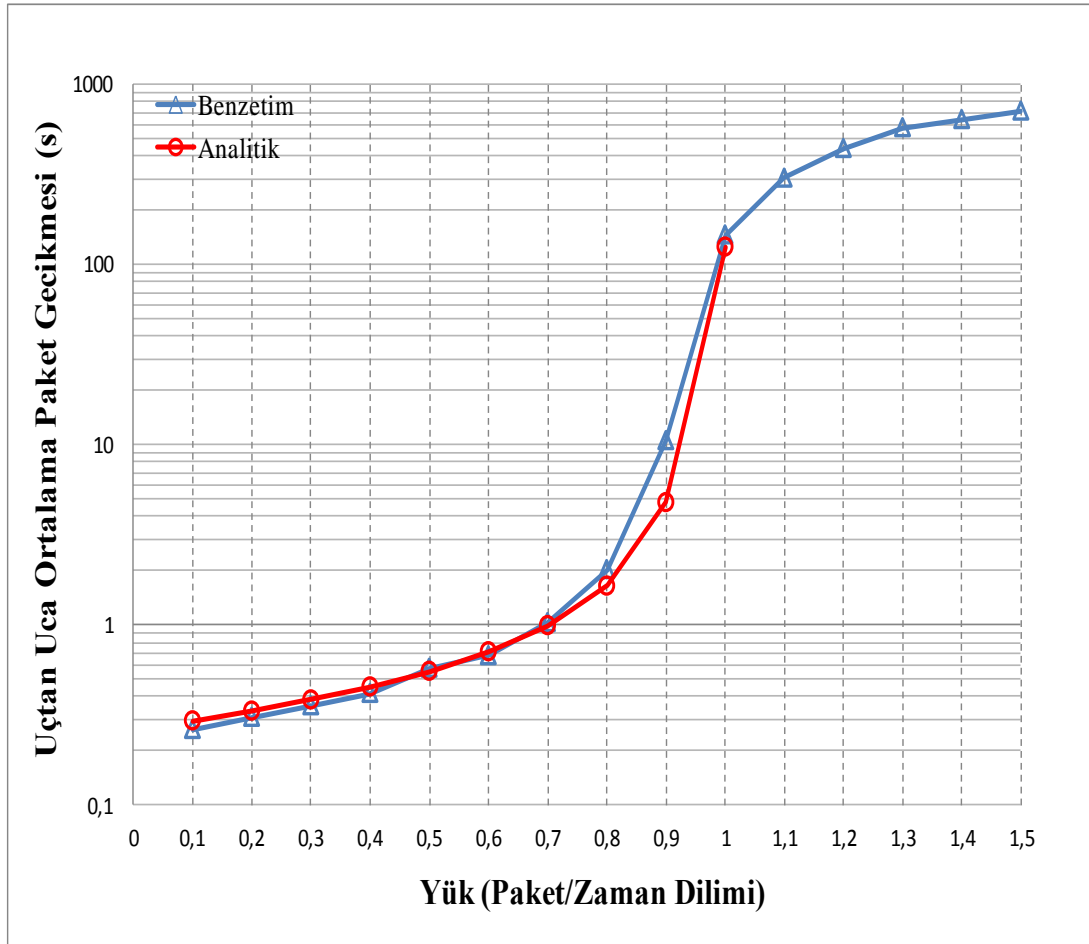
Şekil 4.3. MELOEK protokolü iş çıkarma oranı doğrulaması

Geliştirilen protokolde TDMA ve CSMA ortam erişim yöntemlerinin birlikte kullanılmasından ve kontrol zaman dilimlerinden dolayı analitik ve benzetim yöntemlerden elde edilen sonuçlar küçük farklar göstermektedir. MELOEK protokolünde veri paketlerinin gönderilmesi sırasında TDMA ortam erişim yöntemi temel alınarak zaman dilimleri içerisinde CSMA kullanılması sebebi ile grafik büyük ölçüde geleneksel TDMA temelli OEK protokollerinin iş çıkarma oranı grafiklerine benzemektedir. TDMA'nın tipik özelliğinden dolayı yük 0,1 paket/zaman diliminden 1'e kadar arttırıldığında doğru orantılı olarak iş çıkarma oranı da artmaktadır. Yükün 1 paket/zaman dilimini geçtiği durumlarda ise iş çıkarma oranı, gönderilecek paket sayısının sabit olmasından dolayı değişmemektedir.

Analitik modellerde CSMA ortam erişim yönteminin ihmal edilmesi nedeni ile tam olarak TDMA temelli iş çıkarma oranı grafiği elde edilmektedir. Bununla birlikte benzetim modellerinde CSMA’da dâhil edildiğinden iş çıkarma oranı değerleri biraz daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni, çoklu atlamalı topoloji dolayısıyla bir düğüme birden çok düğümün paket göndermek isteyebileceğidir. Kontrol zaman dilimleri analitik modellerde dikkate alınmadığından analitik yöntemden elde edilen sonuçlarda iş çıkarma oranı 1’e kadar çıkabilmektedir. Benzetim yönteminde ise kontrol zaman dilimlerinde veri gönderilmediğinden iş çıkarma oranı 1’den bir miktar aşağıda kalmaktadır.

4.3.3. Uçtan uca paket gecikmesi doğrulaması

Şekil 4.4’te rastgele seçilmiş iki KAA algılayıcı düğümü arasında elde edilen uçtan uca ortalama paket gecikmeleri için analitik ve benzetim yöntemi sonuçları sunulmaktadır.



Şekil 4.4. MELOEK protokolü uçtan uca paket gecikmesi doğrulaması

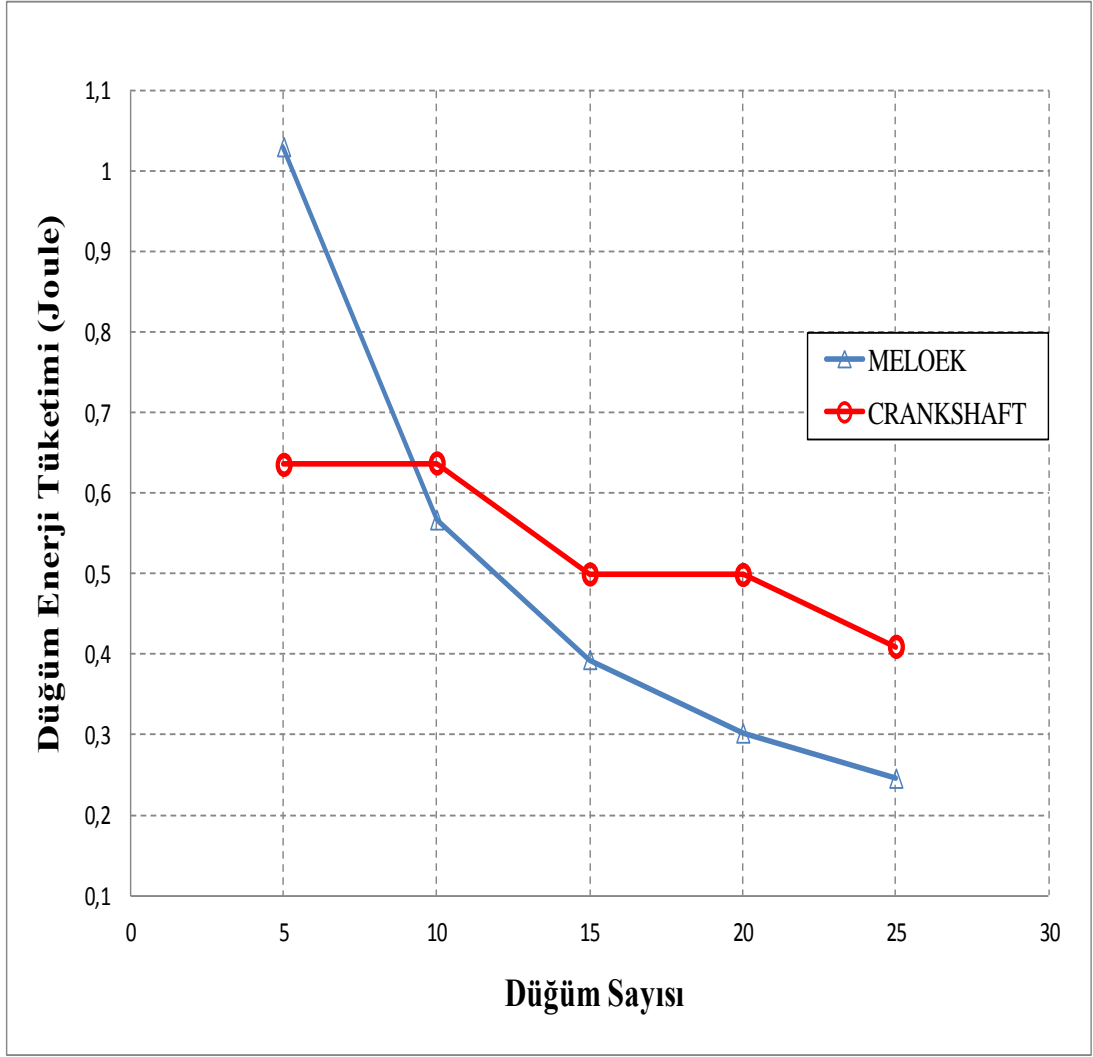
Yük 0,1'den 1,5 paket/zaman dilimine kadar arttırıldığında MELOEK protokolünün TDMA tabanlı melez yapısından dolayı uçtan uca gecikme sonuçları da artmaktadır. Grafikler incelendiğinde analitik ve benzetim yöntemlerinden elde edilen sonuçların 0,8 paket/zaman dilimi yük oranına kadar örtüştüğü, bu noktadan sonra ise kuyruğun dolmaya başlaması nedeni ile sonuçlarda farklılaşmalar görülmektedir. Yükün 1 paket/zaman dilimi olmasının ardından kuyrukta bekllemeler aşırı olarak meydana gelmekte ve buna bağlı olarak uçtan uca gecikmeler benzetim modelinde üssel olarak, analitik modelde ise sonsuza giderek artmaktadır. Grafikte analitik yöntemden elde edilen sonuçların yükün 1 paket/zaman dilimi olduğu duruma kadar alınmasının nedeni uçtan uca gecikmenin bu noktada sonsuza gitmesidir.

Benzetim ve analitik modellerden elde edilen uçtan uca paket gecikmesi sonuçlarının büyük ölçüde örtüşmesi geliştirilen modellerin doğruluğunu kanıtlamakta ve güvenilir sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

4.4. MELOEK Protokolünün Benzer Bilinen Bir Protokol İle Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

4.4.1. Düğüm enerji tüketim değerlendirilmesi

Crankshaft ve MELOEK protokollerine ait enerji tüketim sonuçları Şekil 4.5'te bir küme içerisinde değişen düğüm sayısına göre görülmektedir. Düğüm sayısının 5'ten 25'e kadar arttırıldığı durumda MELOEK protokolünün enerji tüketimi 1 Joule'den 0,25 Joule'e kadar düşmektedir. Bu düşüşün sebebi uyarlamalı çerçeve yapısı dolayısıyla düğümlerin daha az sayıda paket göndermeleridir.

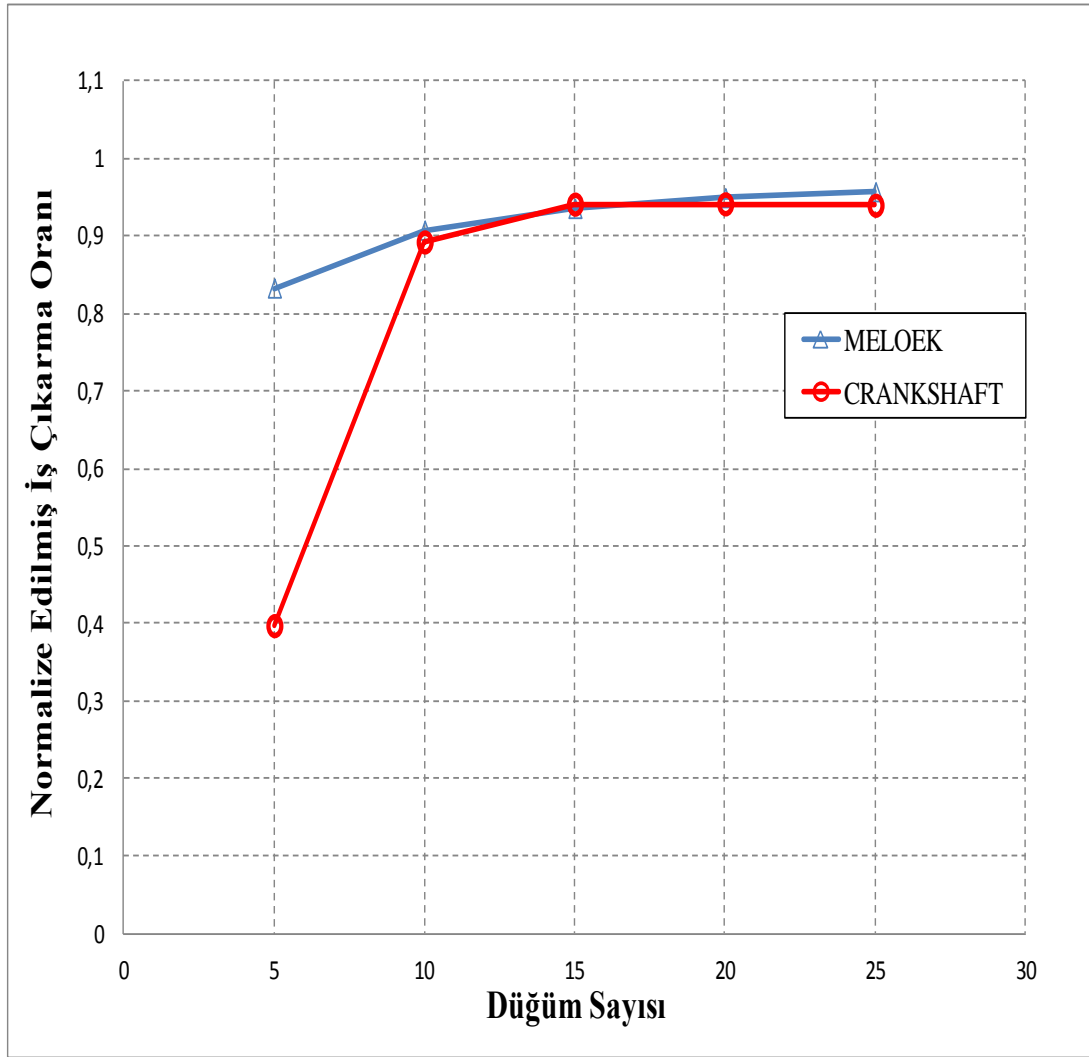


Şekil 4.5. MELOEK protokolü enerji tüketim değerlendirmesi

Küme içerisinde sadece 5 düğümün olduğu durumlarda Crankshaft protokolünün enerji tüketiminin MELOEK protokolüne göre düşük olmasının nedeni çerçeve yapısının sabit olması ve dolayısıyla boşa kalan zaman dilimlerinde paket gönderilememesidir. Enerji tüketiminin düşük olması KAA'lar için istenilen bir durumdur ancak buradaki enerji tüketimi düşüklüğü iş çıkarma başarımına negatif etki yapmaktadır ve dolayısıyla kapasite etkin bir şekilde kullanılamamaktadır. Düğüm sayısının küme içerisinde 10 düğümünden fazla olduğu durumlarda ise çerçeve yapısına bağlı olarak sadece 10 düğümün veri paketi gönderebilmesi nedeniyle yine düğüm enerji tüketimi azalmaktadır.

4.4.2. İş çıkarma oranı değerlendirilmesi

Şekil 4.6'da değerlendirmede kullanılan her iki protokol için iş çıkarma oranları sunulmaktadır. Düğüm sayısının küme içerisinde 5'ten 25'e arttırıldığı durumlarda MELOEK protokolünün ortalama 0,9 paket/zaman dilimi civarında iş çıkarma oranına sahip olduğu görülmektedir. Crankshaft protokolünün ise kümede 5 düğüm olduğu durumda iş çıkarma oranının 0,4 paket/zaman dilimi, diğer düğüm sayılarında ise MELOEK protokolüne benzer şekilde 0,9 paket/zaman dilimi civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. MELOEK protokolü iş çıkarma oranı değerlendirilmesi

Grafikler diğer değerlendirme ölçütleri dikkate alınmadan irdelendiğinde kümede 5 düğümün olması durumu haricinde geliştirilen MELOEK protokolünün Crankshaft protokolünden iş çıkarma oranı açısından farkının olmadığı düşünülebilir. Bununla

birlikte Crankshaft protokolünde çerçevede bulunan zaman dilimi sayısının sabit 10 olması ve bu sayıdan fazla düğüm sayılarında küme içerisinde bulunan herhangi bir düğümün büyük ölçüde paket gönderebilmesi dolayısıyla iş çıkarma oranı yüksek olarak hesaplanmaktadır. Ancak düğümlerin ürettikleri ve gönderebildikleri paketler incelendiğinde iş çıkarma oranının yüksek olmasına rağmen paket dağıtım oranının düşük olduğu görülebilecektir. Bunu destekler bir diğer durum da Şekil 4.5'te sunulan düğüm enerji tüketimi değerlendirmesinde küme içerisindeki düğüm sayısının 10'un üzerinde olduğunda enerji tüketiminin aynı oranda artmaması, hatta azalmasıdır. Tüm bu veriler ışığında iş çıkarma oranı ile birlikte paket dağıtım oranı ölçütünün kullanılmasının değerlendirmelerde daha anlamlı ve etkin bir yöntem olacağı açıktır.

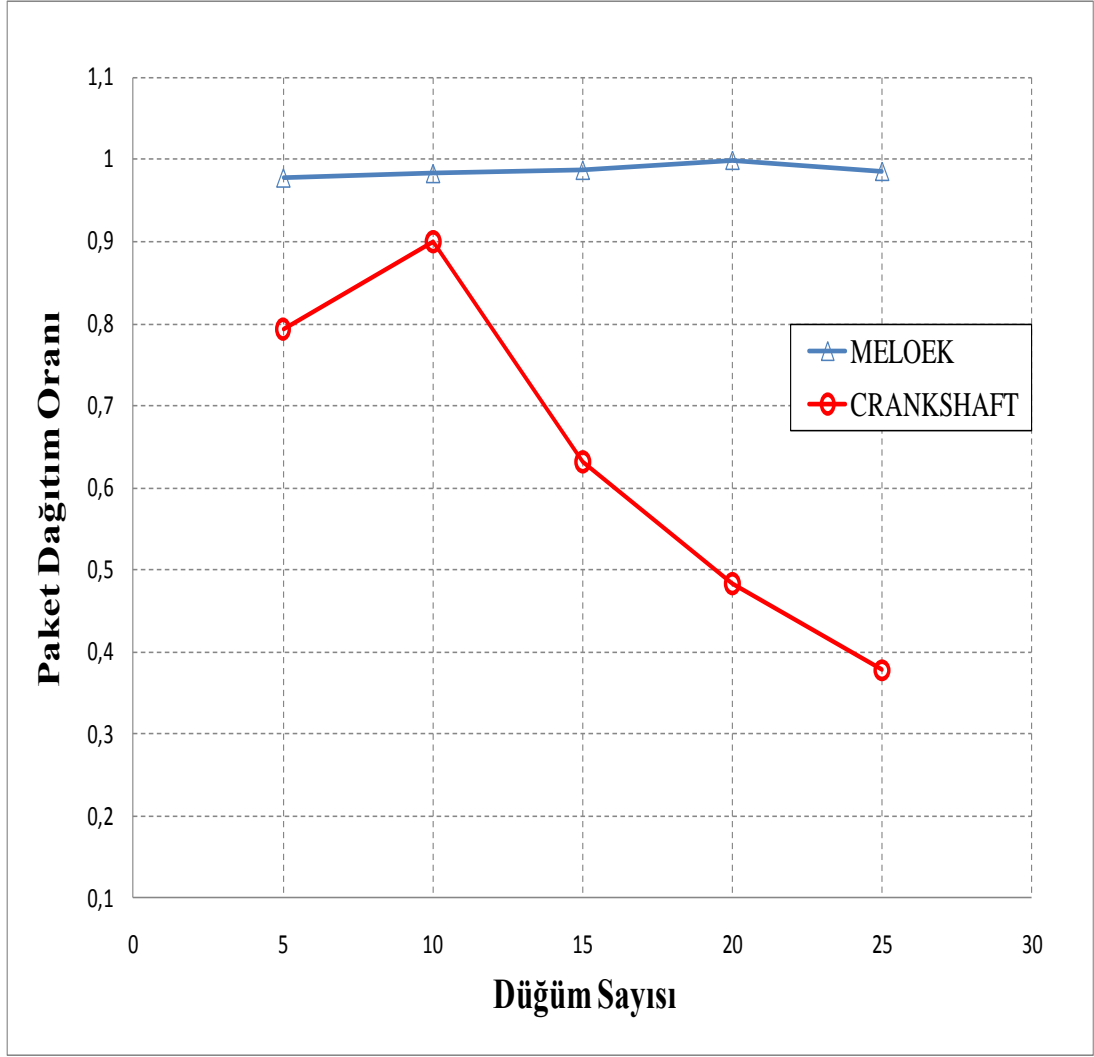
4.4.3. Paket dağıtım oranı değerlendirmesi

Paket dağıtım oranı, hedef düğümde alınan toplam paket sayısının (γ), kaynak düğümden gönderilen toplam paket sayısına (ζ) oranı olarak tanımlanmaktadır [80]. Denklem (3.19)'da normalize edilmiş paket dağıtım oranı (PDO) sunulmaktadır.

$$PDO = \frac{\gamma}{\zeta} \quad (3.19)$$

Her düğüm tam yük altında çalışırken, düğüm sayısının çerçevedeki toplam zaman dilimi sayısından büyük olduğu durumlarda iş çıkarma oranı 1'e eşittir. Oysaki toplamda üretilen paketler açısından bakıldığında, düğümler paket üretmelerine rağmen hiçbir zaman tüm paketleri hedefe aktaramamaktadır. Bu nedenle KAA başarımlı değerlendirilmesinde iş çıkarma oranı ile birlikte, paket dağıtım oranı kullanıldığında sistem hakkında daha sağlıklı bilgilerin elde edilmesi sağlanır.

Şekil 4.7'de düğüm sayısının küme içerisinde 5 ile 25 arasında değiştirildiğinde elde edilen paket dağıtım oranı grafikleri görülmektedir. MELOEK protokolünün uyarlamalı yapısı nedeniyle paket dağıtım oranı küme içerisinde tüm düğümler için 1 paket/zaman dilimi civarında iken Crankshaft protokolü zaman dilimi sayısının 10 olmasına bağlı olarak ancak küme içerisinde 10 düğüm bulunduğunda 0,9 paket/zaman dilimi düzeyine çıkabilmektedir.

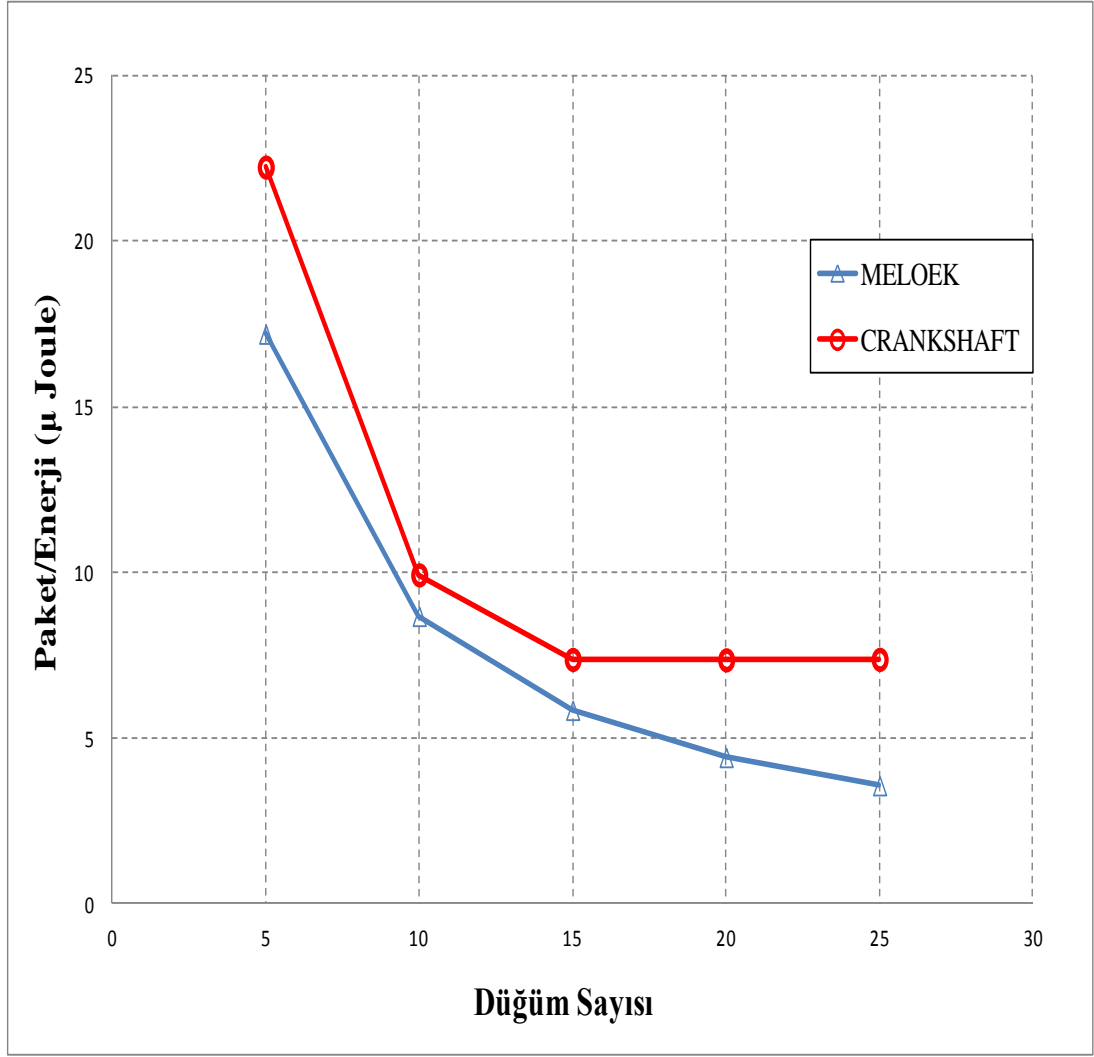


Şekil 4.7. MELOEK protokolü paket dağıtım oranı değerlendirilmesi

Bir önceki alt bölümde ifade edildiği üzere Crankshaft protokolü iş çıkarma oranı açısından değerlendirildiğinde MELOEK ile benzer sonuçlar alınmasına rağmen, üretilen paketlerin gönderilip gönderilemediğini gösteren paket dağıtım oranları sonuçlarına göre MELOEK protokolünün oldukça gerisinde kaldığı kolayca anlaşılmaktadır. Küme içerisinde 10 düğümün olduğu durumlarda her iki protokolden biri kullanıldığında da istenen sonuçlar elde edilebilecekken diğer durumlarda MELOEK protokolünün kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceği bu grafiklerden çıkarılabilecek bir diğer sonuçtur.

4.4.4. Paket/Enerji tüketim değerlendirilmesi

Kablosuz algılayıcı düğümler arasında bir paketin iletilmesi sırasında harcanan enerji değerleri Şekil 4.8’de sunulmaktadır.



Şekil 4.8. MELOEK protokolü paket–enerji tüketim değerlendirmesi

Küme içerisindeki düğüm sayısı 5–25 arasında değiştirildiğinde, kablosuz algılayıcı düğümlerin paket gönderememelerinden kaynaklanan enerji tüketimlerinin Crankshaft protokolü için 23 μ Joule ile 8 μ Joule arasında, MELOEK protokolü için ise 17 μ Joule ile 4 μ Joule arasında değiştiği görülmektedir. KAA OEK protokollerinde iletilen paketlerin sayısı ve iş çıkarma oranlarıyla birlikte düğümde bu işler için tüketilen enerji miktarları da büyük önem arz etmektedir. Örneğin Şekil 4.5'te sunulan düğüm enerji tüketim değerlerine göre küme içerisinde 5 düğüm bulunduğu MELOEK protokolü için daha yüksek enerji tüketimi değeri elde edilmesine rağmen Şekil 4.8'deki paket/enerji tüketimleri incelendiğinde Crankshaft protokolünün daha yüksek enerji tüketimine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum gereksiz enerji tüketimi olduğunun açık bir göstergesidir ve paket başına düşen

düğüm enerji tüketimi açısından MELOEK protokolünün daha iyi sonuçlar verdiği değerlendirilebilir.

4.5. Sonuç

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirilen MELOEK protokolünün benzetim yöntemi ile analitik yöntem sonuçları doğrulanarak güvenilirliği test edilmiştir. Ardından MELOEK protokolünün geniş ölçekli KAA uygulamaları için önerilmiş benzer bir melez protokol olan Crankshaft ile karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılarak tez çalışmalarının katkısı açıklanmıştır. Elde edilen verilere göre analitik ve benzetim yöntem sonuçlarının örtüşmesi modellerin doğru ve kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Crankshaft protokolüyle kıyaslandığında, MELOEK kullanımı ile daha iyi düğüm enerji verimliliği ve başarımları elde edilmesi ise geliştirilen protokolün geçerliliğini ve kullanılabilirliğini göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Geniş ölçekli KAA uygulamalarında düğümlerin düzenli bir şekilde yerleştirilebilmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle rastgele dağıtılacak düğümlerin kendi kendilerine organize olabilmesi ve veri akışını güvenilir bir şekilde sağlaması gereklidir. Tüm bunlar yapılırken enerji tüketimi en az seviyede tutulmalı ve talep edilen başarımlar değerlerinden de taviz verilmemelidir.

KAA düğümlerinde enerji tüketiminin sebepleri incelendiğinde en fazla tüketimin kablosuz alıcı-verici biriminde meydana geldiği bilinmektedir. Bu nedenle, KAA düğümlerindeki enerji tüketiminin en aza indirilmesi, çalışma düzeni büyük ölçüde OEK katmanı fonksiyonları ile ilgili olan düğüm alıcı-verici biriminin yerinde ve etkin şekilde kullanımına bağlıdır. Bu katmanda kullanılacak olan protokol, iletişim ortamını adil ve etkin bir şekilde paylaşacak, çarpışmaları önleyecek ve düğümlerin kendileriyle ilgili olmayan verileri dinlemelerini en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. KAA uygulamaları son derece farklı gereksinimlere sahip olduklarından tek tip bir OEK protokolü ile geniş bir yelpazedeki uygulama alanlarına hitap edilememektedir. Bu nedenle, KAA kullanımının çeşitlenmesiyle birlikte ihtiyaca yönelik OEK tasarımı ön plana çıkmaktadır.

Tez çalışmasında, geniş ölçekli KAA uygulamalarında kullanılmak üzere düğüm enerji tüketim verimliliğini esas alan ve MELOEK olarak adlandırılan melez bir OEK protokolü gerçekleştirilmiştir. CSMA ve TDMA ortam erişim yöntemlerinin üstün yönlerinin bir arada kullanıldığı, her iki yöntemden de daha etkin ve enerji verimli bir OEK protokolü tasarlanmıştır. Ağdaki değişimlere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilen CSMA yöntemi ile çarpışma ve gereksiz dinlemeleri en aza indiren TDMA yöntemi birleştirilerek başarımlar ve enerji verimliliğinin artırılması sağlanmıştır.

Geliştirilen protokolde yeni yaklaşım ile geniş ölçekli uygulamalar için “veri gönderecekleri” zaman dilimine göre tahsis yapıldığında enerji verimli olmaktan çıkan TDMA yöntemi, bu tez çalışmasında “alma tabanlı” olarak kullanılarak

düğümün gereksiz veri dinlemelerinin önüne geçilmektedir. Bu yöntem ile geniş ölçekli uygulamalarda sıklıkla kullanılan küme yapısı içerisinde, her bir düğüm kendisine ne zaman veri geleceğini bildiğinden diğer zaman dilimlerinde uyku düzenine geçebilmekte ve böylece enerji tasarrufu en üst düzeye çıkarılmaktadır. Düğümlerin birbirinden haberdar olmaları ile sistemin hızlı bir şekilde işlemesi ve bir zaman diliminde birden fazla düğümün aynı hedefe veri göndermek istediği durumlarda ise CSMA kullanılarak çarpışmaların en aza indirilmesi sağlanmaktadır.

Literatürde sunulan bazı OEK protokollerinde “melez” yapıdan faydalanılmaktadır. Bununla birlikte tez çalışmasında gerçekleştirilen türde bir OEK bulunmamaktadır. Önerilen melez OEK’in literatürdeki benzerlerinden üç temel üstünlüğü bulunmaktadır:

- Zaman dilimlerinin düğümlerin veri alacakları zamana göre dağıtılması,
- Uyarlamalı çerçeve yapısını içermesi,
- Geniş ölçekli uygulamalar için önerilen geleneksel OEK protokollerinin aksine tek tip düğüm kullanılması ve
- “Sanal küme lideri” kavramı.

Tüm bu özellikler birleştiğinde, düşük enerji tüketimi ile yüksek iş çıkarma oranı (throughput) garanti edilmiştir.

Gerçekleştirilen örnek uygulama dikkate alındığında MELOEK protokolünün analitik ve benzetim yöntem modellerinden elde edilen sonuçların birbirini doğrular nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca MELOEK protokolünün, geniş ölçekli ağlar için literatürde sunulan benzer bir OEK protokolü olan Crankshaft protokolü ile değerlendirildiğinde düğüm enerji tüketimi, iş çıkarma oranı, paket dağıtım oranı ve paket başına düşen düğüm enerji tüketimi açısından daha iyi sonuçlar sunduğu görülmektedir.

5.1. Öneriler

Tez çalışmasında tasarlanan MELOEK ile geniş ölçekli KAA uygulamalarında kullanılacak ve eşleniklerine göre daha iyi sonuçlar veren bir OEK protokolü gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşama olarak, geliştirilen MELOEK protokolünün uygulaması gerçekleştirilebilir. Ayrıca MELOEK protokolüne servis kalitesi desteği

(QoS) eklenerek daha çok uygulama için kullanılabilir bir nitelik kazandırılabilir. Bunlara ek olarak MELOEK protokolünde kullanılan sabit düğümlere gezginlik özelliği kazandırılarak protokolün mobil kullanıcıları desteklemesi de sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Srivastava N., Challenges of Next-Generation Wireless Sensor Networks and Its Impact on Society, *Journal of Telecommunication*, 2010, **1**, 128–133.
- [2] Demirkol I., Ersoy C., Alagoz F., MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Magazine*, 2006, **44**(4), 115–121.
- [3] Akyildiz I. F., Su W., Sankasubramaniam Y., Cayirci E., Wireless Sensor Networks: A Survey, *Computer Networks*, 2002, **38**, 393–422.
- [4] Miladi M., Ezzedine T., Bouallegue R., Hybrid MAC Protocols Characteristics in Multi-Hops Wireless Sensor Networks, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, **2**, 729–737.
- [5] Zheng J., Jamalipour A., *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*, Wiley-IEEE Press, Canada, 2009.
- [6] Bachir A., Dohler M., Watteyne T., Leung K., MAC Essentials for Wireless Sensor Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, **12**(2), 222–248.
- [7] Stallings W., *Wireless Communications & Networks*, Second Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [8] Gilbert E. P. K., Kaliaperumal B., Rajsingh E. B., Research Issues in Wireless Sensor Network Applications: A Survey, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2012, **2**(5), 702–706.
- [9] García-Hernández C. F., Ibarguengoytia-González P. H., García-Hernández J., Pérez-Díaz J. A., Wireless Sensor Networks and Applications: A Survey, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2007, **7**(3), 264–273.
- [10] Shakir M., Ahmed I., Peng M., Wenbo W., Cluster Organization Based Design of Hybrid MAC Protocol in Wireless Sensor Networks, *Third International Conference on Networking and Services*, Athens, 19–25 June 2007.
- [11] Liu W., Fei X., Tang T., Wang P., Luo H., Deng B., Yang H., Application Specific Sensor Node Architecture Optimization Experiences from Field Deployments, *17th Asia and South Pacific Design Automation Conference*, Sydney, 30 January 2012–2 February 2012.
- [12] Kim E. J., Youm S., Kang C. H., Power-Controlled Topology Optimization and Channel Assignment for Hybrid MAC in Wireless Sensor Networks, *IEICE Transactions on Communications*, 2011, **E94-B**(9), 2461–2472.

- [13] El-Hoiydi A., Decotignie J. D., WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Sensor Networks, *First International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, Turku, Finland, 15–16 July 2004.
- [14] Halawani S., Khan A., Sensors Lifetime Enhancement Techniques in Wireless Sensor Networks—A Survey, *Journal of Computing*, 2010, **2**(5), 34–47.
- [15] Augustin A., Effective Power Consumption in MAC Protocols for Wireless Sensor Networks, Master Thesis, Halmstad University, School of Information Science, Halmstad, Sweden, 2006.
- [16] Karahan A., Erturk I., Atmaca S., Çakıcı S., A Hybrid Wireless Sensor Network MAC Protocol, *The Sixth International Advanced Technologies Symposium*, Elazig, Turkey, 16–18 May 2011.
- [17] Chong C. Y., Kumar S. P., Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges, *Proceedings of the IEEE*, 2003, **91**(8), 1247–1256.
- [18] Karahan A., TDMA Tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ Ortam Erişim Kontrol Protokolleri İçin Genel Bir Analitik ve Benzetim Modeli, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 380905.
- [19] Ameen M. A., Islam S. M. R., Kwak K., Energy Saving Mechanisms for MAC Protocols in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2010, **2010**, 1–10.
- [20] Hasenfratz D., Meier A., Woehrle M., Zimmerling M., Thiele L., If You Have Time Save Energy with Pull, *8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Zurich, Switzerland, 3–5 November 2010.
- [21] Anastasi G., Conti M., Francesco M. D., Passarella A., Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey, *Ad Hoc Networks*, 2009, **7**(3), 537–568.
- [22] Wang W., Wang H., Peng D., Sharif H. R., An Energy Efficient Pre-Schedule Scheme for Hybrid CSMA/TDMA MAC in Wireless Sensor Networks, *10th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Singapore, 30–31 October 2006.
- [23] Cho H. W., Cho M. H., Chung J. M. M., Jeong W. C. C., A Centralized Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information*, Melbourne, Australia, 3–6 December 2007.
- [24] Halkes G. P., Langendoen K., Crankshaft: An Energy-Efficient MAC-Protocol for Dense Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks*, Netherlands, 29–31 January 2007.
- [25] Rhee I., Warrier A., Aia M., Min J., Sichertiu M. L., Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, **16**(3), 511–524.

- [26] Raja A., Su X., A Mobility Adaptive Hybrid Protocol for Wireless Sensor Networks, *5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, Nevada, 10–12 January 2008.
- [27] Tan M., Tang L., Chang H., Tian H., A Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Network, *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Beijing, 24–26 September 2009.
- [28] Vidhya J., Kalpana G., Dananjayan P., Energy Efficient Hybrid MAC Protocol for Cluster-Based Wireless Sensor Network, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2010, **1**(3), 271–277.
- [29] Sitanayah L., Sreenan C. J., Brown K. N., ER-MAC: A Hybrid MAC Protocol for Emergency Response Wireless Sensor Networks, *Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Venice, Italy, 18–25 July 2010.
- [30] Srikanth B., Harish M., Bhattacharjee R., An Energy Efficient Hybrid MAC Protocol for WSN Containing Mobile Nodes, *8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, Singapore, 13–16 December 2011.
- [31] Salmani V., Chou P. H., Bin-MAC: A Hybrid MAC for Ultra-Compact Wireless Sensor Nodes, *IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, Hangzhou, 16–18 May 2012.
- [32] Mehta S., Kwak K. S., H-MAC: A Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Computer Networks & Communications*, 2010, **2**(2), 108–117.
- [33] Tan L., Meng J., Li J., Chao H. C., PH-MAC: A Periodically Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *Journal of Internet Technology*, 2007, **8**, 373–375.
- [34] Arifuzzaman M., Alam M. S., Matsumoto M., A Hybrid MAC with Intelligent Sleep Scheduling for Wireless Sensor Networks, *ITU-T Kaleidoscope Academic Conference*, Cape Town, 12–14 December 2011.
- [35] Raja P., Dananjayan P., Game Theory Based Energy Efficient Hybrid MAC Protocol for Lifetime Enhancement of Wireless Sensor Network, *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 2014, **10**(1), 10–17.
- [36] Salajegheh M., Soroush H., Kalis A., HYMAC: Hybrid TDMA/FDMA Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks, *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens, 3–7 September 2007.
- [37] Qi Q., Wu H., Ji L., FDMA/TDMA Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Network, *Advanced Sensor Systems and Applications*, Beijing, China, 29–30 November 2012.

- [38] Slama I., Jouaber B., Zeglache D., Priority-Based Hybrid MAC for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks, *Wireless Sensor Network Journal*, 2010, **2**(10), 755–767.
- [39] Ahn G. S., Miluzzo E., Campbell A. T., Hong S. G., Cuomo F., Funneling-MAC: A Localized, Sink-Oriented MAC for Boosting Fidelity in Sensor Networks, *Fourth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Colorado, USA, 1–3 November 2006.
- [40] Liu B. H., Bulusu N., Pham H., Jha S., CSMAC: A Novel DS-CDMA Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *IEEE Global Telecommunications Conference Workshops*, Dallas, USA, 1–3 December 2004.
- [41] Fan G., Chen H., Xie L., Wang K., A Hybrid Reservation-Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks, *Ad Hoc Networks*, 2013, **11**(3), 1178–1192.
- [42] Jian W., Estevez C., Chowdhury A., Jia Z., Chang G. K., A Hybrid MAC Protocol Design for Energy-Efficient Very-High-Throughput Millimeter Wave Wireless Sensor Communication Networks, *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, Shanghai, China, 8–12 December 2010.
- [43] Slama I., Shrestha B., Jouaber B., Zeglache D., A Hybrid MAC with Prioritization for Wireless Sensor Networks, *33rd IEEE Conference on Local Computer Networks*, Montreal, 14–17 October 2008.
- [44] Yadong W., Qin W., Xiaotong Z., Jinwu X., Lei G., Lei L., Ruofei W., A Hybrid TDM-FDM MAC Protocol for Wireless Sensor Network Using Timestamp Self-Adjusting Synchronization Mechanism, *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, 21–25 September 2007.
- [45] Sarvakar K., Patel P. S., An Efficient Hybrid MAC Layer Protocol Utilized for Wireless Sensor Networks, *Fourth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks*, Allahabad, 27–29 December 2008.
- [46] Ma G., Qiu D., An Efficient MAC Protocol Based on Hybrid Superframe for Wireless Sensor Networks, *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Dalian, China, 12–14 October 2008.
- [47] Yahya B., Ben-Othman J., An Energy Efficient Hybrid Medium Access Control Scheme for Wireless Sensor Networks with Quality of Service Guarantees, *IEEE Global Telecommunications Conference*, New Orleans, USA, 30 November–4 December 2008.
- [48] Kam C., Schurgers C., ConverSS: A Hybrid MAC/Routing Solution for Small-Scale, Convergecast Wireless Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, **10**(9), 1227–1236.

- [49] Shon T., Kim E. J., In J., Park Y., Design and Implementation of Hybrid MAC-Based Robust Architecture for Wireless Sensor Network, *IEICE Transactions on Communications*, 2010, **E93.B(4)**, 1016–1019.
- [50] Gajaweera N., Dias D., FAMA/TDMA Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks, *4th International Conference on Information and Automation for Sustainability*, Colombo, 12–14 December 2008.
- [51] Zhao M., Chen Z. G., Zhang L., Ge Z. H., HS-Sift A Hybrid Spatial Correlation-based MAC for Event-Driven Wireless Sensor Networks, *IET Communications*, 2007, **1(6)**, 1126–1132.
- [52] Akyildiz I. F., Vuran M. C., *Wireless Sensor Networks*, First Edition, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2010.
- [53] Dâmaso A., Freitas D., Rosa N., Silva B., Maciel P., Evaluating the Power Consumption of Wireless Sensor Network Applications Using Models, *Sensors*, 2013, **13**, 3473–3500.
- [54] Dong Q., Dargie W., Schill A., The Energy Cost of Control Packets in Hybrid MAC Protocols, *IEEE 12th International Conference on High Performance Computing and Communications*, Melbourne, 1–3 September 2010.
- [55] Yick J., Mukherjee B., Ghosal D., Wireless Sensor Network Survey, *Computer Networks*, 2008, **52(12)**, 2292–2330.
- [56] Gunn M., Koo S. G. M., A Comparative Study of Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2009, **2(8)**, 695–703.
- [57] ANSI/IEEE Std 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications, *IEEE Standards 802.11*, 1999, 70–90.
- [58] Ferrari P., Flammini A., Marioli D., Taroni A., IEEE802.11 Sensor Networking, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, **55(2)**, 615–619.
- [59] 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.
- [60] Zhou H., Luo D., Gao Y., Zuo D., Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks, *Wireless Sensor Network*, 2011, **3(1)**, 18–23.
- [61] Brownfield M. I., Energy efficient Wireless Sensor Network MAC Protocol, Doctor of Philosophy, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2006, 103.
- [62] Pantazis N. A., Vergados D. J., Vergados D. D., Douligeris C., Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks Using Sleep Mode TDMA Scheduling, *Ad Hoc Networks*, 2009, **7(2)**, 322–343.

- [63] Sivrikaya F., Yener B., Time Synchronization in Sensor Networks: A Survey, *IEEE Network*, 2004, **18**(4), 45–50.
- [64] Tanenbaum A. S., Van Steen M., *Distributed Systems Principles and Paradigms*, Second Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2007.
- [65] Tjoa R., Chee K. L., Sivaprasad P. K., Rao S. V., Lim J. G., Clock Drift Reduction for Relative Time Slot TDMA-Based Sensor Networks, *15th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Barcelona, Spain, 5–8 September 2004.
- [66] Romer K., Time Synchronization in Ad Hoc Networks, *2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, California, USA, 4–5 October 2001.
- [67] Su W., Akyildiz I. F., Time-Diffusion Synchronization Protocol for Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, **13**(2), 384–397.
- [68] Sundararaman B., Buy U., Kshemkalyani A. D., Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey, *Ad Hoc Networks*, 2005, **3**(3), 281–323.
- [69] Stallings W., *Data and Computer Communications*, Eighth Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2007.
- [70] Polastre J., Hill J., Culler D., Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks, *2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Baltimore, Maryland, USA, 3–5 November 2004.
- [71] Chen K., Jiang F., On the Analysis of Efficient Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, USA, 11–13 January 2007.
- [72] Sahooa P. K., Sheub J. P., Changa Y. C., Performance Evaluation of Wireless Sensor Network with Hybrid Channel Access Mechanism, *Journal of Network and Computer Applications*, 2009, **32**(4), 878–888.
- [73] Karahan A., Erturk I., Atmaca S., Cakici S., Effects of Transmit-based and Receive-based Slot Allocation Strategies on Energy Efficiency in WSN MACs, *Ad Hoc Networks*, 2014, **13**(Part B), 404–413.
- [74] Çakıcı S., Kablosuz Algılayıcı Ağların Analitik Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259441.
- [75] Jain R., *The Art of Computer Systems Performance Analysis, Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [76] Baldwin R. O., Davis N. J., Midkiff S. F., Kobza J. E., Queueing Network Analysis Concepts Terminology and Methods, *The Journal of Systems and Software*, 2003, **66**, 99–117.

- [77] Mark B. L., Kobayashi H., *System Modeling and Analysis: Foundations of System Performance Evaluation*, Prentice Hall, New Jersey, 2008.
- [78] 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.
- [79] Kabara J., Calle M., MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and A General Method of Performance Evaluation, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, **2012**, 1–11.
- [80] Çakıcı S., Gezin Algılayıcı Ağlar İçin Katmanlararası Etkileşimli Yönlendirme Protokolü, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342566.

EKLER

EK-A

Önerilen MELOEK protokolünün süreç modeli program kodları tez çalışmasının ekindeki CD’de sunulmaktadır.

EK-B

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

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Karahan A.**, Erturk I., Atmaca S., Cakici S., Effects of Transmit-based and Receive-based Slot Allocation Strategies on Energy Efficiency in WSN MACs, *Ad Hoc Networks*, 2014, **13**(Part B), 404–413.
- [2] Kirbas I., **Karahan A.**, Kacar S., Bayilmis C., Performance Aspects of isMAC Protocol for WBANs Using isMotes, *10th International Conference on Electronics Computer and Computation*, Ankara, Turkey, 7–9 November 2013.
- [3] Bayrakdar M. E., Atmaca S., **Karahan A.**, A Slotted Aloha Based Random Access Cognitive Radio Network with Capture Effect in Rayleigh Fading Channels, *10th International Conference on Electronics Computer and Computation*, Ankara, Turkey, 7–9 November 2013.
- [4] Kirbas I., **Karahan A.**, Sevin A., Bayilmis C., isMAC: An Adaptive and Energy-Efficient MAC Protocol Based on Multi-Channel Communication for Wireless Body Area Networks, *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2013, **7**, 1805–1824.
- [5] Kirbas I., **Karahan A.**, Sevin A., Bayilmis C., isMOTE: Mobile Sensor and Actuator Node Design for Wireless Body Area Networks, *IEEE 21st Signal Processing and Communications Applications Conference*, Girne, KKTC, 24–26 April 2013.
- [6] **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.
- [7] Bayrakdar M. E., Atmaca S., **Karahan A.**, A Slotted Aloha Based Random Access Cognitive Radio Network and its Performance Evaluation, *The 20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, Split, Croatia, 11–13 September 2012.
- [8] 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.
- [9] **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.
- [10] Yalman Y., Erturk I., **Karahan A.**, Software Design and Implementation for Revealing Digital Stego Images, *4th International Computer and Instructional Technology Symposium*, Konya, Turkey, 24–26 September 2010.

- [11] **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.
- [12] 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.
- [13] Okçuoğlu Z., Ertürk İ., **Karahan A.**, Kablosuz Algılayıcı Ağ Uygulaması: İdeal İzleme, *Elektrik–Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26–30 Kasım 2008.

ÖZGEÇMİŞ

1983'te Mersin'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mersin'de tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nden 2006 yılında Elektronik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2007 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2010 yılında tamamladı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde başladığı doktora eğitimine halen devam etmektedir. 2007 yılından buyana Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.