

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKTİF DÜĞÜM VE DİNAMİK ZAMAN DİLİMİ TAHSİSİ
ESASLI KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ ORTAM ERİŞİM
KONTROL PROTOKOLÜ**

DOKTORA TEZİ

Yüksek Müh. Nükhet SAZAK

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Danışman : Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA

Ortak Danışman : Prof. Dr. İsmail ERTÜRK

Mart 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKTİF DÜĞÜM VE DİNAMİK ZAMAN DİLİMİ TAHSİSİ
ESASLI KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ ORTAM ERİŞİM
KONTROL PROTOKOLÜ


DOKTORA TEZİ


Yüksek Müh. Nükhet SAZAK


Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ


Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

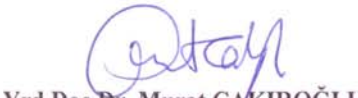
Bu tez 23/03/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. M. Ali YALÇIN
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA
Üye


Doç. Dr. Yaşar BECERİKLİ
Üye


Yrd. Doç. Dr. Mehmet YAKUT
Üye


Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKIROĞLU
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora tez sürecinde bilgi ve tecrübelerini paylaşan danışman hocalarım Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA'ya ve Prof. Dr. İsmail ERTÜRK'e, tez izleme jüri üyesi olan değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN'a ve Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKIROĞLU'na yardımları için şükranlarımı sunarım.

Ayrıca her zaman yanımda olan annem Nursen, babam Nedim, kardeşlerim Nevzat, Nilgün ve Nusret SAZAK'a sabır, destek ve anlayışları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Literatürde Yapılan Çalışmaların Özetleri	5
1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebebi.....	10
1.3. Tez Çalışmasının Katkıları.....	12
1.4. Tez Düzeni	12
BÖLÜM 2.	
KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR.....	14
2.1. Giriş.....	14
2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağların Tarihsel Gelişimi	15
2.3. Kablosuz Algılayıcı Ağ Yapısı	16
2.4. Kablosuz Algılayıcı Düğüm Yapısı	17
2.5. Kablosuz Algılayıcı Ağ Protokol Mimarisi	17
2.6. Kablosuz Algılayıcı Ağ Uygulama Alanları.....	19
2.7. Olay Güdümlü KAA Uygulamaları	20
2.8. Sonuç.....	22

BÖLÜM 3.

KAA ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ	23
3.1. Giriş.....	23
3.2. OEK Protokol Tasarımını Etkileyen Özellikler	26
3.2.1. Enerji tüketimi	28
3.2.2. Gecikme.....	30
3.3. Temel TDMA protokolü	30
3.3.1. Temel TDMA protokolünde enerji tüketimi	32
3.3.2. Temel TDMA protokolünde gecikme	34
3.4. E-TDMA Protokolü	35
3.4.1. E-TDMA protokolünde enerji tüketimi.....	35
3.4.2. E-TDMA protokolünde gecikme.....	36
3.5. BMA Protokolü.....	36
3.5.1. BMA protokolünde enerji tüketimi	38
3.5.2. BMA protokolünde gecikme	38
3.6. EA-TDMA Protokolü	39
3.6.1. EA-TDMA protokolünde enerji tüketimi.....	40
3.7. Sonuç.....	41

BÖLÜM 4.

AKTİF DÜĞÜM VE DİNAMİK ZAMAN DİLİMİ TAHSİSİ ESASLI KAA OEK PROTOKOLÜ (M-BMA)	43
4.1. Giriş.....	43
4.2. Önerilen Aktif Düğüm Belirleme Yöntemi (ADBY)	44
4.3. M-BMA Protokolünün Tasarım Aşamaları	46
4.4. M-BMA Protokolünün Başarım Değerlendirmesi.....	53
4.4.1. Enerji tüketimi değerlendirme	54
4.4.1.1. Düğüm sayısı değişimine göre enerji tüketimi.....	55
4.4.1.2. Aktif düğüm oranının değişimine göre enerji tüketimi.....	58
4.4.1.3. Çerçeve sayısı değişimine göre enerji tüketimi	60
4.4.2. Gecikme değerlendirme.....	63
4.5. Sonuç.....	67

BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
5.1. Öneriler	72
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ADBY	: Aktif Düğüm Belirleme Yöntemi
BMA	: Bit-map assisted
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim
CSMA	: Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
DSN	: Distributed Sensor Networks
E-TDMA	: Energy-efficient TDMA
EA-TDMA	: Energy-Efficient Adaptive TDMA
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
KAAs	: Kablosuz Algılayıcı Ağ
LEACH	: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
M-BMA	: Modified-BMA
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
OEK	: Ortam Erişim Kontrol
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	KAA yapısı.....	16
Şekil 2.2.	Bir algılayıcı düğümün bileşenleri.....	17
Şekil 2.3.	Kablosuz algılayıcı ağ protokol mimarisi.....	18
Şekil 3.1.	Temel TDMA için bir devir gösterimi.....	31
Şekil 3.2.	BMA için bir devir gösterimi.....	37
Şekil 3.3.	EA-TDMA için bir devir gösterimi.....	40
Şekil 4.1.	M-BMA protokolü için bir devir gösterimi.....	48
Şekil 4.2.	M-BMA protokolünde küme başı için akış şeması.....	51
Şekil 4.3.	M-BMA protokolünde üye düğüm için akış şeması.....	52
Şekil 4.4.	Düğüm sayısına göre enerji tüketimi.....	57
Şekil 4.5.	Düğüm sayısına ve aktif düğüm oranına göre enerji tüketiminin değişimi.....	58
Şekil 4.6.	Düğüm oranlarına göre enerji tüketimi.....	59
Şekil 4.7.	Kaynak ve aktif düğüm oranlarına göre enerji tüketiminin değişimi.....	60
Şekil 4.8.	Çerçeve sayısına göre enerji tüketimi.....	62
Şekil 4.9.	Çerçeve sayısına ve aktif düğüm oranına göre enerji tüketiminin değişimi.....	63
Şekil 4.10.	Düğüm oranlarına göre gecikmenin değişimi.....	66
Şekil 4.11	Kaynak ve aktif düğüm oranlarına göre gecikmenin değişimi.....	67

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1	Analitik ifadelerde yer alan değişkenler.....	33
-----------	---	----

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Ortam Erişim Kontrol Protokolü, Aktif Düşüm, Dinamik Zaman Dilimi Tahsisi

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA'lar); kurulum kolaylığı, kendi kendine organize olabilme, bakım gereksinimlerinin az olması gibi benzersiz özellikleri sayesinde farklı alanlarda geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. Ancak algılayıcı düşümlerin güç, hesaplama kapasitesi ve bellek bakımından kısıtlı kaynaklara sahip olması; geleneksel kablosuz ağlardaki birçok protokol ve algoritmanın KAA'lara doğrudan uygulanamamasına sebep olmaktadır. Ayrıca uygulamaların gereksinimlerinin farklılıklar göstermesi geliştirilecek haberleşme protokollerinin de uygulamaya-özel olmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışması kapsamındaki KAA'lar, olay güdümlü uygulamaları içermektedir. Özellikle çok sayıda düşümün uzak ve erişilmesi güç yerlere rastgele ve yoğun olarak yerleştirildiği uygulamalarda, düşümlerin enerjilerini sağladıkları pilleri değiştirmek ya da şarj etmek çoğu zaman oldukça zor ve hatta imkansızdır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında da esas alındığı üzere, enerji verimliliği başlıca tasarım ölçütü haline gelmektedir. Olay güdümlü KAA uygulamalarında algılanan verinin mümkün olan en kısa zamanda iletilmesi gerektiği için iletişim gecikme değerlerinin belirli sınırlar içerisinde tutulması da büyük önem taşımaktadır.

Geleneksel TDMA tabanlı OEK protokolleri, olay güdümlü KAA uygulamaları için çok uygun değildir. Literatürde bu tür uygulamalar için geliştirilmiş protokoller de bulunmaktadır; ancak, söz konusu protokoller sadece kaynak düşümlere zaman dilimi tahsisi gerçekleştirmekte, aynı verinin tekrar iletilmesinin meydana getireceği veri fazlalığını dikkate almamaktadırlar. Belli bir bölgeden eşzamanlı olarak gelecek aynı verinin olayın/durumun değerlendirilmesine katkı sağlamayacağı fikrinden hareketle, benzer içerikli veriye sahip kaynak düşümlerden sadece birine zaman dilimi tahsis edilmesi ile veri trafiğinin, enerji tüketiminin ve uçtan uca gecikmenin azaltılabileceği düşüncesi bu tez çalışmasının başlatılma sebebinin oluşturmıştır.

Bu doktora tezinde, olay güdümlü KAA uygulamaları için geliştirilen bir OEK protokolü sunulmaktadır. OEK tasarım aşamasında kullanılan ve aktif düşüm belirleme yöntemi (ADBY) olarak adlandırılan genel bir içerik tabanlı çizelgeleme yaklaşımı geliştirilmiştir. ADBY'nin uygulaması olarak TDMA-tabanlı yeni bir OEK protokolü (M-BMA) gerçekleştirilmiş bulunmaktadır. Eşleniği olan protokollerle yapılan karşılaştırmalı başarımlar değerlendirilmeleri ile M-BMA protokolünün enerji tasarrufunda ve gecikmenin azaltılmasında sağladığı iyileştirme gösterilmiştir.

A WIRELESS SENSOR NETWORK MEDIUM ACCESS CONTROL PROTOCOL DESIGN BASED ON ACTIVE NODE AND DYNAMIC TIME SLOT ALLOCATION

SUMMARY

Key Words: Wireless Sensor Networks, Medium Access Control Protocol, Active Node, Dynamic Slot Allocation.

The unique features of Wireless Sensor Networks (WSNs) such as ease of installation, self-organizing, simple maintenance requirements etc. make them have a wide range of applications in many different areas. On the other hand, many protocols and algorithms used in traditional wireless networks are not feasible to be applied directly to WSNs due to the strictly limited power, computation capability and memory resources of sensor nodes. Moreover, distinct requirements of WSN applications usually impose application-specific approaches for communication protocols. Event driven WSN applications are targeted in the scope of this thesis. Especially in the applications, where a large number of sensor nodes are randomly and densely deployed in remote and difficult to reach networking environments, changing batteries supplying energy to the sensor nodes is extremely difficult, even impossible. Therefore energy efficiency becomes one of the most important WSN design criteria as in this thesis. Keeping the communication delays in some given limits is also critically important for this kind of applications since the sensed data should be transmitted as soon as possible in event driven WSN applications.

Conventional TDMA based MAC protocols are not well suited to the event driven WSN applications. In the literature, there are some MAC protocols specially designed for these applications but they allocate time slots to only source nodes and do not take into consideration data redundancy resulting from the same data retransmitted from the same region. By the opinion that getting the similar data from the same region simultaneously does not provide additional contribution for evaluation of the event/situation, the fundamental motivation of this thesis work is to reduce data redundancy, energy consumption and latency by assigning a time slot to only one of the source nodes all with the same data sensed and to be sent.

In this PhD thesis, a MAC protocol (M-BMA) for event driven WSN applications is proposed. A new generic content based scheduling approach, named as active node determination method (ANDM), has been developed and deployed in the MAC design stages. By means of comparative performance analyses with its counterpart protocols, it has been concluded that the M-BMA protocol provides improvement in energy saving and latency reduction.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA'lar); sınırlı kapasiteye sahip, kısa mesafede kablosuz ortam üzerinden haberleşebilen düşük güçlü, düşük maliyetli ve çok fonksiyonlu algılayıcı düğümlerden meydana gelmektedir (Akyildiz ve diğerleri, 2002). Algılayıcı düğümler; sıcaklık, basınç, nem, hareket, gürültü, aydınlık, mekanik gerginlik gibi değişik fiziki çevre koşullarını algılayabilirler, kablosuz olarak haberleşirler ve ortak bir uygulama için işbirliği yaparlar. KAA'ların kurulum kolaylığı, bakım gereksinimlerinin az olması gibi özellikleri, çok farklı alanlarda uygulama potansiyeline sahip olmalarını sağlamaktadır. KAA'lar doğa olaylarını izlemekten, afet yardım, endüstriyel, ticari, askeri ve sağlık alanlarındaki uygulamalara kadar geniş bir uygulama alanı aralığına sahiptirler.

Algılayıcı düğümlerin konumlarının planlanıp düzenlenmesine veya önceden belirlenmesine ihtiyaç duyulmaması, çok sayıda algılayıcı düğümün erişilemeyen yerlere veya afet yardım bölgelerine rastgele yerleştirilmesine imkan vermektedir. Bu tür uygulamalarda algılayıcılar genellikle uzak yerlere çok sayıda yerleştirilmekte ve özerk bir şekilde çalışmaları beklenmektedir. Algılayıcı düğümler genellikle sınırlı enerji kapasitesine sahip oldukları için çoğu durumda yerleşimden sonra enerji kaynakları değiştirilememekte veya yenileme yapılamamaktadır ya da çok maliyetlidir (Kredo ve Mohapatra, 2007). KAA'ların tasarımında düğüm/ağ ömrünü maksimum yapmanın öncelikli amaç olmasının nedeni budur. Pili biten düğüm ölü varsayıldığından ağ ömrünü arttırma, KAA araştırmalarının ortak amacıdır. Bundan dolayı ağ ömrünü uzatmak için enerji-verimli protokoller gereklidir (Demirkol ve diğerleri, 2006).

Bu amaçla KAA çalışmalarının çoğu, bir algılayıcı düğümün en fazla enerji tüketen birimi olan alıcı-verici üzerinde doğrudan kontrole sahip olan ortam erişim kontrol

(OEK) protokolü tasarımına yoğunlaşmaktadır. Kısıtlı enerji kaynakları, algılayıcı ağ protokol tasarımının en önemli sınırlamalarından biridir; bu yüzden önerilen OEK protokolleri öncelikle kablosuz ortamla ilgili enerji kayıplarını azaltmaya odaklanmaktadır (Kredo ve Mohapatra, 2007). Bu şartlar altında KAA'lar için önerilen bir OEK protokolü enerji verimli olmalıdır.

Kablosuz ağlarda düğümlerin haberleşebilmek için kullandıkları iletişim ortamı, tüm algılayıcı düğümler tarafından adil bir şekilde paylaşılmalıdır. Ağ başarımı, büyük ölçüde düğümlerin bu ortak ortamı etkin ve adil olarak paylaşabilmelerine bağlıdır (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Bu amacı yerine getirmek için bir ortam erişim kontrol protokolü kullanılmalıdır. Bir OEK protokolünün adil olarak adlandırılabilmesi için ağ iş çıkarma oranını düşürmeksizin rekabet eden düğümler arasında kanal kapasitesini düzgün bir şekilde tahsis etmesi gerekmektedir. OEK protokolleri, düğümlerin kanala ne zaman ve nasıl erişeceklerine karar vermelerine yardım etmek için geliştirilmektedir. Bu problem, kanal tahsisi (channel allocation) veya çoklu erişim problemi olarak da bilinmektedir (Ye ve Heidemann, 2003). Ortam erişim kontrol protokolünün seçimi, KAA başarımını etkileyen önemli etkenlerden birisidir (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Kablosuz algılayıcı ağları (KAA'ları) diğer ağlardan farklı kılan karakteristik özellikler, geleneksel ağlar için var olan algoritma ve protokollerin KAA'larda doğrudan kullanılamamasına neden olmaktadır. Diğer ağlar için önerilen OEK protokolleri çoğu zaman algılayıcı düğümlerdeki sınırlı kaynaklar ve farklı uygulama gereksinimleri gibi birçok nedenden dolayı KAA'lar için uygun değildir. Geleneksel kablosuz OEK protokolleri; yüksek iş çıkarma oranı, düşük gecikme, adalet ve hareketlilik yönetimi sağlamaya çalışmakta fakat enerji korunumu konusunu ya göz önünde bulundurmamakta ya da yeteri kadar ele almamaktadır. KAA'lar için önerilen OEK protokolleri, her düğüm için mevcut sınırlı enerji kaynakları yüzünden en az enerji tüketiminde en iyi başarımı sağlamalıdır (Kredo ve Mohapatra, 2007).

KAA'lar için başarımı yüksek bir OEK protokolü tasarlamak üzere göz önünde bulundurulması gereken özellikler tanımlanmıştır (Ye ve diğerleri, 2004) ve bunlardan birincisi enerji verimliliğidir. Algılayıcı düğümler, pille çalıştıkları için

pilleri değiştirmek ya da şarj etmek çoğu zaman oldukça güçtür. Bu sebeple KAA'lar için tasarlanacak OEK protokolü güç tüketimini minimize etmelidir. KAA'lar için tasarlanacak OEK protokolünde bulunması gereken ikinci özellik ise, ölçeklenebilirlik ve uyarlanabilirliktir. Bazı düğümler zamanla ölebilir, bazı yeni düğümler ağa katılabilir, bazı düğümler ise farklı konumlara hareket edebilir. Bu nedenle ağın bu gibi değişikliklere rağmen görevlerini yerine getirebilmesi gerekmektedir. İyi bir OEK protokolü bu tür değişikliklere uyum sağlamalıdır. Adalet (fairness), gecikme, iş çıkarma oranı (throughput) ve band genişliği kullanımı gibi özellikler algılayıcı ağlarda ikinci derecede önemlidir.

KAA'larda OEK protokolleri için çizelgeli protokoller (schedule based) ve çizelgesiz/rasgele/çekişme-tabanlı (contention based) protokoller olmak üzere iki genel sınıflandırma vardır. Çekişme tabanlı protokollerde ortak bir kanal, tüm düğümler tarafından paylaşılmakta ve talep üzerine tahsis edilmektedir. Herhangi bir zamanda hangi düğümün kanala erişim hakkına sahip olacağına karar vermek üzere bir çekişme mekanizması kullanılmaktadır (Ye ve Heidemann, 2003). Çekişme-tabanlı kanal erişim düzenleri, radyo alıcı-vericilerinin kanalı her zaman izlemesini gerektirmeleri yüzünden algılayıcı ağlar için uygun değildir. Bu, iletim ve alımın neredeyse aynı enerji maliyetine sahip olduğu algılayıcı ağların düşük radyo mesafeleri için özellikle maliyetli bir öneridir. Alınacak veya gönderilecek bilgi olmadığında radyonun kapatılması tercih edilmektedir (Sohrabi ve diğerleri, 2000).

Çizelge tabanlı OEK protokolleri, düğümler arasındaki çekişmeden sakınmak için kaynaklara erişimi düzenleyen bir çizelgenin olduğunu kabul etmektedir. Diğer bir deyişle çizelgeli OEK protokolleri, algılayıcı düğümleri ortak bir çizelge ile koordine ederek enerji tüketimini azaltmaya çalışmaktadır. Bir çizelge oluşturan OEK protokolü, herhangi bir zamanda hangi düğümlerin kanalı kullanması gerektiğine açıklık getirmekte ve böylece çarpışmaları, boş dinlemeyi (idle listening) ve kulak misafiri olmayı (overhearing) sınırlamakta veya ortadan kaldırmaktadır. Bu metotta mesaj haberleşmesine katılmayan düğümler, bir mesaj gönderecekleri veya alacakları zamana kadar uyku moduna girebilirler. Ayrıca OEK protokolü, trafik veya durum bilgisini paylaşabilir; böylece algılayıcı düğümler, sadece tek bir algılayıcı düğüm yerine düğümler topluluğunun enerji tüketimini en iyileştirebilir. Örneğin önemli

trafiği olan veya daha çok birikmiş mesajı olan düğümler zaman dilimi atamasında öncelik kazanabilir (Kredo ve Mohapatra, 2007). Çizelge tabanlı OEK protokollerinin ana amacı, ağ ömrünü uzatmak için yüksek seviyede bir enerji verimliliği elde etmektir (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Genelde çizelge-tabanlı protokoller çekişmesizdir, çarpışmaların neden olduğu enerji israfını ortadan kaldırmaktadırlar. Ayrıca algılayıcı düğümler veri alacakları veya iletecekleri dilimlerde radyolarını açma ihtiyacı duymaktadırlar. Diğer tüm dilimlerde algılayıcı düğüm, radyosunu kapatabilir, böylece kulak misafiri olmaktan sakınmaktadır. Bu da, ağ ömrünü önemli derecede arttırabilen düşük çalışma oranı (low-duty-cycle) düğüm çalışmalarına yol açmaktadır (Sohraby ve diğerleri, 2007). TDMA-tabanlı OEK protokolleri, çekişmeli protokollerle karşılaştırıldığında enerji korunumu bakımından doğal bir avantaja sahiptir çünkü radyonun çalışma oranı (duty cycle) azaltılmaktadır, çekişme ek yükü (contention overhead) ve çarpışmalar yoktur (Ye ve diğerleri, 2004).

Frekans bölmeli çoklu erişimde (frequency division multiplexing access-FDMA) iletişim ortamı, frekans bantlarına bölünmekte ve her düğüm bilgisini atan bantta iletmektedir. Kod bölmeli çoklu erişimde (code division multiplexing access-CDMA) ise, düğümler veri iletmek için farklı kodları kullanmaktadırlar. CDMA'da farklı düğümlerden iletimler, aynı zamanda bütün frekans bandını işgal etmektedir. FDMA ve CDMA, sırasıyla ilave devre ve hesaplama karmaşıklığı gereksinimleri yüzünden KAA'lar için uygun protokoller değildir. Çoklu erişimin diğer biçimlerinin (frekans veya kod bölmeli erişim) algılayıcı düğümlerin güç gereksinimlerini ve maliyetini arttırması nedeniyle KAA'lar için kullanılan çizelge tabanlı protokollerin çoğu, kanalın zaman dilimlerine bölüdüğü zaman bölmeli çoklu erişimin (TDMA) değişik bir biçimini kullanmaktadır (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Yukarıda sunulan çalışmalardan görüleceği üzere özet olarak enerji kısıtlı düğümlerden oluşan KAA'lar için enerji verimli protokoller geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji verimli protokoller, KAA mimarisinin çeşitli katmanlarında geliştirilebilir; fakat algılayıcı düğümün en çok enerji tüketen birimi olan alıcı-verici üzerinde doğrudan kontrole sahip olması dolayısıyla literatürdeki çalışmaların çoğu OEK protokolleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Çizelge tabanlı OEK protokollerinin

çekişme tabanlılardan enerji tüketimi açısından daha verimli ve KAA'lar için geliştirilen çizelge tabanlı OEK protokollerinin çoğunun TDMA esaslı olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında KAA'lar için aktif düğümlerin veri iletmesi esasına dayanan TDMA tabanlı yeni bir OEK protokolü tasarımına odaklanılmaktadır. Tasarlanan protokolün en önemli hedefi, gereksiz enerji sarfiyatını azaltarak ağ ömrünün uzatılmasını sağlamaktır.

1.1. Literatürde Yapılan Çalışmaların Özetleri

Literatürde TDMA tabanlı çeşitli protokoller önerilmiştir. KAA'lar için TDMA protokolleri küme-tabanlı ve dağıtılmış olmak üzere iki sınıfa kategorize edilmektedir. Kümeleme tekniği ile TDMA çizelgesinin birleştirildiği küme-tabanlı TDMA protokollerinin geleneksel TDMA çizelgesinden daha fazla ölçeklenebilir olması dolayısıyla büyük ölçekli KAA uygulamaları için uygun olduğu söylenebilir. Küme-tabanlı TDMA protokollerinde, düğümler kümeler oluşturmakta ve küme başları üye düğümlere dilim tahsis etmektedir. LEACH (Heinzelmann ve diğerleri, 2000), BMA (Li ve Lazarou, 2004) ve ED-TDMA (Gong ve diğerleri, 2010) küme-tabanlı TDMA protokollerine örnek olarak verilebilir. Dağıtılmış TDMA protokolleri ise, ağın çakışmayan kısımlarında yer alan düğümlerin aynı zaman dilimini kullanmasına imkan vermesi yüzünden daha karmaşıktır. EMACs (Van Hoesel ve diğerleri, 2004), LMAC (Van Hoesel ve Havinga, 2004) ve TRAMA (Rajendran ve diğerleri, 2003) dağıtılmış TDMA protokolleri arasında yer almaktadır.

EMACS (EYES Medium Access Control) protokolü, düğümlerin komşuluk bilgisini toplayarak kendi zaman dilimini seçtikleri dağıtılmış TDMA-tabanlı bir OEK protokolüdür (Van Hoesel ve diğerleri, 2004). Geleneksel TDMA'nın aksine, protokoldeki zaman dilimleri merkezi bir yönetici tarafından ağ düğümleri arasında bölünmez. Baz istasyonlarına ya da merkezi yöneticilere dayalı değildir, kendi kendine organize olma metoduna dayanmaktadır. Her bir zaman dilimi; haberleşme talebi (Communication Request, CR), trafik kontrolü (Traffic Control, TC) ve veri bölmesi olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır. Zaman dilimi talebi olan düğüm, haberleşme talebi bölümünde rasgele bir başlangıç zamanında o anki dilimi kontrol eden düğüme bir talep mesajı gönderebilir. Zaman diliminin sahibi, veri bölümünde

meydana gelecek haberleşmeyi komşularına bildirmek için trafik kontrolü bölümünde bir mesaj iletmektedir. Düğüm trafik kontrol mesajındaki bit haritası (bitmap) bilgisinden boş bir zaman dilimi seçmektedir. Bu yöntem, bir zaman diliminin komşunun en az iki sekmesinden sonra tekrar kullanılmasını sağlamaktadır. Radyo sinyali üçüncü derece komşularda oldukça şiddetli şekilde zayıfladığı için zaman dilimleri tekrar kullanılabilir. Dğümlerin komşu dğümlerin trafik kontrol bölümlerini dinleyerek yerel topoloji bilgisine sahip olması sayesinde ağdaki yönlendirme mesajlarının sayısı azaltılmaktadır. Trafik kontrolü kısmından sonra veri transferi gerçekleşmektedir. Veri bölümünde yer almayan komşu dğümler, boş dinlemeden sakınmak üzere uyku durumuna geçmektedirler. Bir zaman dilimi, herhangi bir dğüm tarafından kontrol edilmediğinde tüm dğümler o zaman dilimi boyunca uyku durumunda kalmaktadırlar.

LMAC (Lightweight Medium Access Control) protokolü, EMACs protokolüne dayalı olarak geliştirilmiştir (Van Hoesel ve Havinga, 2004). LMAC protokolü, fiziksel katman özelliklerini göz önünde bulundurmaktadır. Protokolün amacı, alıcı-vericinin anahtarlama sayısını en aza indirmek ve algılayıcı dğümlerin uyku aralığını veri trafiği miktarına uyarlamalı hale getirmektir. LMAC protokolünde her zaman dilimi, kontrol mesajı ve veri mesajı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Sabit bir boyuta sahip olan kontrol mesajı, zaman dilimi kontrolörünün kimliğini taşımak, ağda basit bir yönlendirme yapmak için sekmelerde dğümün geçide mesafesini göstermek, istenen alıcıya hitap etmek ve veri biriminin uzunluğunu bildirmek gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Kontrol verisi, dğümler arasında senkronizasyonu sürdürmektedir. Tüm komşu dğümler, komşularının kontrol mesajlarını almaya çalışmaktadır. Mesajda hitap edilmeyen bir dğüm, sonraki zaman diliminde uyanmak üzere alıcı-vericisini kapatmaktadır. Hitap edilen bir dğüm ise, veri birimini dinlemektedir. Mesaj transferi tamamlandıktan sonra hem verici hem de alıcı alıcı-vericilerini kapatmaktadır.

EMACs ve LMAC protokollerinin zaman dilimi tahsisi için merkezi bir yöneticiye ihtiyaç duymaması, topoloji değişikliklerine dayanıklı olmalarını sağlamaktadır. Diğer yandan çarpışma sorununu gidermek üzere bir çarpışma sezme mekanizmasına sahip olmamaları ve öngörülen paket zaten alınmasına rağmen istenen alıcının tüm

veri bölümü boyunca alım durumunda kalmasını gerektirmeleri, EMACs ve LMAC protokollerinin olumsuz özellikleridir.

TRAMA (Traffic-adaptive MAC protocol) da dağıtılmış bir TDMA protokolüdür (Rajendran ve diğerleri, 2003). Zaman, rasgele-erişim ve çizelgeli-erişim olmak üzere iki periyoda ayrılmaktadır. Komşu bilgisi değiş-tokuşu rasgele-erişim periyodunda yapılırken, veri iletimi çizelgeli-erişim periyodunda gerçekleştirilmektedir. Belirli bir dilimde iki-sekme komşuluğunda sadece bir düğüm iletmektedir. Uyku süresinin daha yüksek yüzdeye sahip olması ve daha az çarpışma olasılığının elde edilmesi TRAMA protokolünün olumlu özelliklerindedir. TRAMA, merkezi bir baz istasyonu olmaksızın iyileştirilmiş enerji verimliliği hedefini gerçekleştirmektedir. Ancak gecikmesinin yüksek olması, gecikmeye hassas uygulamalar için uygun olmamasına yol açmaktadır. Ayrıca TRAMA protokolünün uygulaması karmaşıktır.

Dağıtılmış TDMA'nın ağdaki düğümlere çakışmayan zaman dilimleri tahsis etmesi gereği yüzünden (Gong ve diğerleri, 2010) küme tabanlı TDMA'dan daha karmaşık olması sebebiyle bu tezde küme tabanlı TDMA protokolü geliştirilmesi tercih edilmiştir. Bu tezde sunulan protokol de (M-BMA), bir küme tabanlı TDMA protokolüdür.

LEACH (Heinzelmann ve diğerleri, 2000) küme-tabanlı bir OEK protokolüdür. Düğümler, periyodik ve rasgele olarak kendi aralarından küme başları seçmektedirler. LEACH protokolünde her kümede küme başı, bir TDMA çizelgesi oluşturmak ve sürdürmekten sorumludur; kümenin diğer bütün düğümleri üye düğümlerdir. Tüm üye düğümlere, üye düğüm ve küme başı arasında veri değiş tokuşu yapmak için kullanılabilecekleri TDMA dilimleri atanmaktadır. Küme başları geleneksel kümeleme algoritmalarında olduğu gibi önceden seçilirse ve sistem ömrü boyunca sabit olursa, küme başı olarak seçilen düğümlerin ömürleri diğerlerine oranla çok daha çabuk bitecektir. Bu yüzden LEACH, yüksek enerji gerektiren küme başının rasgele ve dönüşümlü olarak değişmesini öngörmektedir. Böylece tek bir algılayıcının pilinin bitmemesi için küme başı olma görevi çeşitli düğümler arasında sıra ile yapılmaktadır. LEACH dinamik ağlar için ölçeklenebilirliği ve dayanıklılığı

mümkün kılmak üzere yerel koordinasyonu kullanmakta ve baz istasyonuna iletilmesi gereken veri miktarını azaltmak için veri birleştirmeyi yönlendirme protokolüne dahil etmektedir. LEACH, kümelerden baz istasyonuna gönderilen veri miktarını sıkıştırmak için yerel veri birleştirme gerçekleştirmekte, enerji dağılımını azaltmakta ve sistem ömrünü arttırmaktadır. LEACH, tüm düğümlerin her zaman iletecek verisi olduğunu varsaydığı için yüksek trafik koşulları altında iyi çalışmaktadır. Fakat bir üye düğüm iletecek verisi olmadığında dahi kendisine tahsis edilen zaman dilimlerinde radyosunu açmak zorundadır. Bu ise, düğümün enerjisini önemli ölçüde tüketen boş (aylak) konumda çalışmasına neden olmaktadır. Ayrıca LEACH, düğüm arızaları veya trafik yükü değişiklikleri yüzünden çerçeve boyutu ve dilim atamasını dinamik olarak değiştirmemektedir. M-BMA protokolünde sadece farklı verisi olan düğümlere dilim tahsis edildiği için verisi olsun ya da olmasın tüm düğümlere dilim tahsis eden LEACH'den daha enerji etkindir. Öte yandan M-BMA protokolü açıklanırken verilen akış diyagramlarında protokolün genelliğine vurgu yapmak amacıyla herhangi bir kümeleme algoritması ismi verilmemiş olmasına rağmen LEACH'deki küme oluşum yaklaşımının kullanıldığı kabul edilmektedir.

Geleneksel TDMA protokolleri gibi küme-tabanlı TDMA protokolleri de algılayıcı düğümlerin her zaman gönderecek veriye sahip olduğu sürekli gözleme dayalı KAA uygulamaları için daha uygundur. Belirli bir olayın gözlenmesine veya belirli bir parametrenin ölçülmesine dayalı olan olay-güdümlü KAA uygulamalarında ise, algılayıcı düğümler her zaman iletecek veriye sahip olmayabileceğinden bu tür uygulamalara uygun protokollerin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

BMA protokolü (Li ve Lazarou, 2004) (Li, 2004) (Lazarou ve diğerleri, 2007), olay güdümlü KAA uygulamaları için tasarlanmış küme-tabanlı bir OEK protokolüdür. BMA protokolünün çalışması da LEACH'deki gibi her biri kurulum ve sürekli hal aşamalarından oluşan devirlere bölünmektedir. Küme oluşum algoritması LEACH protokolününki ile aynı olmakla birlikte LEACH'in aksine sürekli hal aşaması; çekişme periyodu, veri iletim periyodu ve boş periyottan oluşan sabit uzunlukta oturumlara ayrılmaktadır. Her bir çekişme periyodu, kümedeki düğüm sayısına eşit zaman dilimine bölünmektedir. Her çerçeve esnasında çekişme aşamasında kaynak düğümler veri dilimini rezerve etmek için küme başına 1-bitlik kontrol mesajı

göndermektedirler. Küme başları, o anki çerçevede hangi üye düğümlerin ileteceğini bilmekte ve bu kaynak düğümlere veri dilimi tahsis etmektedirler. Kaynak düğümler iletimlerini bitirdiklerinde küme başları sonraki çerçevede aktif hale gelene kadar uyuyabilmektedirler. Veri iletim periyodu boyunca verisi olan düğüm kendisine tahsis edilen zaman diliminde radyosunu açmakta ve verisini küme başına iletmektedir. Diğer üye düğümler, veri iletim periyodu boyunca radyolarını kapalı tutmaktadırlar. Boş periyotta tüm üye düğümlerin radyoları kapalıdır. Bir oturum bittiğinde sonraki oturum yine bir çekişme periyodu ile başlamakta ve aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Küme başı, tüm kaynak düğümlerden veri toplamakta, birleştirilen ve sıkıştırılan veriyi baz istasyonuna iletmektedir. Önceden belirlenen bir zaman sonra sistem, sonraki devire başlamakta ve tüm süreç tekrar edilmektedir. Tezin üçüncü bölümünde BMA protokolünden ayrıntılı olarak söz edilmektedir. Bu doktora çalışmasında sunulan M-BMA (Modified BMA) protokolü, BMA protokolüne dayanmaktadır, zaten ismi de bu benzerlikten gelmektedir. M-BMA'nın BMA protokolünden farkı, çekişme periyodunda kaynak düğümlerin verileri olduğunu bildirmek üzere 1 bit göndermek yerine fark verisini ilettikleri 4 bit kullanmasıdır.

ED-TDMA (Gong ve diğerleri, 2010) protokolü de olay güdümlü KAA uygulamaları için geliştirilmiş enerji etkin bir OEK protokolüdür. BMA gibi ED-TDMA protokolü de, kurulum ve sürekli hal aşamalarını kapsayan devirlerden oluşmaktadır. Kümeleme ve zaman senkronizasyonunu içeren kurulum aşamasından sonraki sürekli hal aşaması n tane değişken uzunlukta TDMA çerçevesinden meydana gelmektedir. Bir düğüm veri iletmek istediğinde bir çerçevenin başlangıcında küme başına bir talep göndermekte ve küme başının dilim tahsis etmesini beklemektedir. ED-TDMA protokolü, kaynak düğümlerin sayısına göre TDMA çerçevesinin uzunluğunu değiştirerek kanal kullanımını iyileştirmekte ve çizelge ek yükünü azaltmak üzere TDMA çizelge paketlerinin uzunluğunu azaltmaktadır. Ancak ne BMA ne de ED-TDMA protokolü kaynak düğümlere dilim tahsis ederken veri fazlalığını (data redundancy) göz önünde bulundurmamaktadır. Bu durumda kaynak düğümlerden gelen veri aynı olsa dahi dilim tahsis edilmektedir. Oysa aynı bölgeden gelecek aynı veri ilave katkı sağlamamasının yanı sıra enerji israfına ve gecikmede artışa neden olmaktadır. Öte yandan M-BMA protokolü aktif düğümlere (farklı

veriye sahip kaynak düğümlere) dilim atadığı için veri dilimi sayısını azaltarak enerji tasarrufu ve gecikmede azalma sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında düğüm yerleşiminin yoğun olduğu, büyük ölçekli olay güdümlü KAA uygulamaları hedef olarak seçilmiştir. Bu tür uygulamalar için yeni bir çizelgeleme yaklaşımı önerilmiş ve bu yaklaşımın uygulandığı yeni bir küme tabanlı TDMA protokolü (M-BMA) geliştirilmiştir. Bu yeni protokolde benzerlerinden farklı olarak dilim tahsisinde kaynak düğümlerin içerikleri göz önünde bulundurulmak suretiyle atanan dilim sayısı azaltılarak enerji tüketiminde azalma ve gecikmede iyileşme elde edilmiştir.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Sebebi

Çizelge-tabanlı OEK protokollerinin kablosuz algılayıcı ağlarda kullanımlarını sınırlayan olumsuzluklarından biri, TDMA-tabanlı OEK protokollerinin sınırlı ölçeklenebilirliğe sahip olması ve düğüm hareketliliğine, ağ trafiğinde ve topolojisindeki değişikliklere kolayca uyum sağlayamamasıdır. Bir kümeye düğümler katıldığında veya kümeden ayrıldığında dilim atamasının yanı sıra çerçeve uzunluğu da ayarlanmalıdır. Sık değişiklikler maliyetli olabilir veya geçerli olması uzun zaman alabilir (Sohraby ve diğerleri, 2007). Bir küme içindeki düğümlerin sayısı değiştiğinde bir TDMA protokolünün çerçeve uzunluğunu ve zaman dilimi atamasını dinamik olarak değiştirmek oldukça güçtür. Bu yüzden TDMA tabanlı bir protokolün ölçeklenebilirliği, çekişme tabanlı protokolünki kadar iyi değildir (Ye ve diğerleri, 2004).

Kümeleme, KAA'larda ölçeklenebilirliği destekleme için en popüler yaklaşım olduğundan TDMA-tabanlı OEK protokollerinin gereksinimlerini karşılayabilir. Ölçeklenebilirliği desteklemek için düğümler kümelere ayrılabilir ve her küme, küme başı olarak adlandırılan bir lider düğüme sahip olabilir. Tüm algılayıcıların verilerini bir baz istasyonuna iletmesinden ziyade bir bölge içindeki düğümler işbirliği yapabilir ve bölge için tek bir özet paket gönderebilirler. Kümeleme, düğümlerin yerel bir baz istasyonu ile haberleşmek için kümelere organize olması ve bu yerel baz istasyonlarının son kullanıcı tarafından erişilen global baz istasyonuna veri

iletmesidir. Bu, tipik olarak yerel baz istasyonu kümedeki tüm düğümlere yakın olduğundan veri iletmek için düğümlerin ihtiyaç duyduğu mesafeyi büyük ölçüde azaltmaktadır. Böylece kümeleme enerji verimli bir haberleşme protokolü olarak ortaya çıkmaktadır (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Literatürde kablosuz algılayıcı ağlar için çeşitli kümeleme yaklaşımları önerilmektedir (Abbasi ve Younis, 2007). LEACH (Heinzelmann ve diğerleri, 2000) ilk kümeleme protokolüdür, tek sekmeli haberleşmeye dayalı iki-aşamalı bir mekanizma önermektedir (Xin ve diğerleri, 2008).

Kümedeki üye düğümlerin hepsi her zaman iletecek veriye sahip olmayabilir. Üye düğüm, bir kümenin elemanı olan algılayıcı düğümdür. Kaynak düğüm ise, iletecek veriye sahip olan düğümdür. Kümedeki üye düğümlerin hepsi kaynak düğüm olmayabilir. Kaynak düğüm, uygulamaya göre periyodik olarak veri iletebilir ya da belli koşullar gerçekleştiğinde (örneğin belli bir sıcaklık eşik değerini aştığında) veri iletmeye hazır olabilir. Kümelerdeki düğüm sayısı ve düğümlerin veri iletim ihtiyaçları farklılık gösterebilir. Düğümlerin sabit olduğu varsayılsa dahi kümedeki düğüm sayısı aşağıda örnekleri verilen durumlarda zaman içinde değişebilir:

- Pilinin bitmesi, bozulma, yanma vb. sebeplerle düğümler kümeden ayrılabilir.
- Ayrılan düğümlerin yerine yenileri eklenebilir.
- Küme başının rotasyonu sonucunda daha önce A kümesine dahil olan bir düğüm aldığı sinyal seviyesine göre bir sonraki devirde B kümesinin üyesi olabilir.
- Olaya dayalı uygulamalarda herhangi bir üye düğüm algıladığı olay neticesinde kaynak düğüm haline gelip veri iletimine geçebilir. Örneğin önceden belirlenen bir eşik değerinin üzerinde sıcaklık algılayan düğüm algıladığı değeri küme başına iletmek isteyebilir.

Diğer yandan kaynak düğümler aynı veriyi iletmek isteyebilirler. Özellikle yoğun yerleştirilmiş, çok sayıda düğümün meydana getirdiği kümedeki birbirine yakın düğümler aynı olayı algılayabilir. Oysa aynı bölgeden gelecek aynı verinin olay hakkında ilave katkı sağlamayacağı açıktır. Önemli olan, olayın meydana geldiği yerden veri elde edilmesidir.

Bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda küme başının oluşturacağı çizelgenin düğümlerin veri iletim ihtiyaçlarına göre oluşturulması gereği açıkça görülmektedir. Bu şekilde oluşturulacak dinamik çizelge yapısı özellikle kritik zamanlı olaya dayalı uygulamalar açısından önemli fayda sağlayabilir.

KAA'ların değişik alanlardaki hızla artan uygulamaları dikkate alındığında; ağ başarımının, genellikle küçük algılayıcı düğümlerin kablosuz iletişim ortamını etkin ve adil paylaşımı ile en iyileştirilmesi ve ağ ömrünün, verimli düğüm enerji kullanımı stratejileri ile artırılması bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.3. Tez Çalışmasının Katkıları

Bu tez çalışmasında elde edilen katkılar özetle şunlardır:

1. Olay güdümlü kablosuz algılayıcı ağ uygulamaları için geliştirilen ortam erişim kontrol protokollerine uyarlanabilecek jenerik bir aktif düğüm belirleme yöntemi (ADBY) tasarlanmıştır.
2. Kümelenen olay güdümlü KAA uygulamalarına yönelik yeni bir ortam erişim kontrol protokolü (M-BMA) geliştirilmiştir.
3. Tasarlanan OEK protokolüne ilişkin analitik ifadeler elde edilmiştir.

1.4. Tez Düzeni

Bölüm 2'de kablosuz algılayıcı ağlara dair tarihsel gelişim, ağ ve düğüm yapısı, protokol mimarisi ve uygulama alanları hakkında genel bilgiler verilmektedir. Ayrıca tez çalışmasının hedef çalışma alanını oluşturan olay güdümlü uygulamalardan da kısaca söz edilmektedir.

Bölüm 3'de ortam erişim kontrol protokolleri hakkında genel bilgi verildikten sonra OEK protokol tasarımını etkileyen özellikler açıklanmakta ve bu özelliklerden enerji ile gecikmeden ayrıntılı olarak söz edilmektedir. Karşılaştırmalı başarımlar analizinde

kullanılan temel TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokollerinden bahsedildikten sonra bu protokollerin enerji ve gecikme parametrelerine ilişkin matematiksel ifadeler yer verilmektedir.

Bölüm 4’de OEK protokollerinde kullanılmak üzere içerik tabanlı çizelgeleme yaklaşımı önerilmektedir. Aktif Düğüm Belirleme Yöntemi (ADBY)’nin çalışma mantığı anlatılmakta ve akış şemaları sunulmaktadır. ADBY uygulanarak elde edilen yeni M-BMA (Modified-BMA) protokolünün enerji ve gecikme denklemleri elde edilmektedir. M-BMA protokolünün enerji ve gecikme ölçütleri bakımından Bölüm 3’de özetlenen protokoller ile karşılaştırmalı başarımların analizi sonuçlarına yer verilmektedir.

Bölüm 5’de tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte, bilime ve teknolojiye sunduğu katkılar sıralanmakta ve gelecekteki çalışmalar için öneriler ifade edilmektedir.

BÖLÜM 2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

2.1. Giriş

Her şeyin sürekli değiştiği bilgisayar dünyasında hesaplama, üç çağ halinde ele alınabilir (Dulman ve Havinga, 2009). Otuz yıl önce üniversitelere anabilgisayar (mainframe) olarak adlandırılan çok büyük cihazlar yerleştirildi ve çok sayıda kullanıcının tek bir anabilgisayarı kullandığı ilk çağdan sonra günümüzde sonuna yaklaşmakta olan ikinci çağ başladı. Daha ucuz ve daha küçük kişisel bilgisayarların olduğu bu dönemde bir kullanıcı birden fazla bilgisayarı kullanabilmekte ve bilgisayarlar hemen hemen her ev ve iş yerinde bulunmaktadır. Günümüzde ise teknolojik ilerlemeler sayesinde masaüstü bilgisayarların yerini dizüstü bilgisayarlar almakta, kişisel bilgisayarlar daha da küçülmekte ve cep telefonu birçok işlevi yerine getirebilen karmaşık bir cihaz haline gelmektedir. Yirmi yıl önce Mark Weiser (Weiser, 1999) tarafından yaygın hesaplama (ubiquitous computing) olarak adlandırılan üçüncü çağda birçok kullanıcının bir anabilgisayarın etrafında toplandığı ilk çağın aksine kullanıcı sistemin ortasında yer almakta ve gömülü ağların sunduğu hizmetlerden yararlanmaktadır. Kablosuz algılayıcı ağlar ise, hesaplamanın üçüncü çağının en önemli araçlarından birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Kablosuz haberleşmenin de ilave edilmesi ile işlevselliği oldukça artırılan algılayıcı düğümler yardımıyla KAA'lar bir ortamdan veri toplama ve izleme olanaklarını önemli ölçüde arttırmaktadır.

KAA'lar yerleşim kolaylığı, güvenilirlik, ölçeklenebilirlik, esneklik ve kendi kendine organize olabilmeleri sayesinde özellikle kablolu sistemlerin yerleştirilemediği, savaş alanları, okyanus derinlikleri vb. yaşanması zor, ulaşılması güç, tehlikeli yerlere yerleştirilebilir (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Bu sistemler, mevcut bilgisayar sistemlerinden oldukça farklıdır ve yeni mimarilere dayalı olacak ve yeni protokoller kullanacaklardır (Nieberg ve diğerleri, 2003). Çeşitli disiplin ve alanları

içine alan KAA uygulamaları sadece uygulama geliştiricinin hayal gücü ile sınırlanmaktadır (Ali ve diğerleri, 2006). Kablosuz algılayıcı ağlar; daha yüksek doğrulukta, gerçek zamanda, edinilmesi zor bilgiyi elde etmeye ve bilgi elde etme maliyetini azaltmaya yardım edebileceği için gelecekte birçok farklı alanda uygulanacağı varsayılmaktadır (Roedig, 2004).

2.2. Kablosuz Algılayıcı Ağların Tarihsel Gelişimi

İnternet'in çok sayıda kullanıcı arasında bilgilerin çeşitli şekillerde paylaşımına imkan tanınması yoluyla hayatımızı kökten değiştirmesi gibi KAA'ların da, ilgilenilen fiziksel olaya dair bilgi sağlayarak, sezerek ve kontrol ederek yakın gelecekte aynı derecede önemli olabileceği öngörülmektedir (Chen ve Varshney, 2004).

(Chong ve Kumar, 2003) gerçekleştirdikleri çalışmada algılayıcı ağlardaki araştırmanın tarihini, 1980'lerdeki Dağıtık Algılayıcı Ağlar (Distributed Sensor Networks -DSN) programından başlayarak Algılayıcı Bilgi Teknolojisi (SensIT) programına kadar geçen otuz yıl boyunca dört aşamada incelemişlerdir.

Aşama 1-Soğuk-Savaş Dönemi Askeri Algılayıcı Ağlar: Soğuk savaş sırasında Amerika Birleşik Devletleri'nde deniz altı gözetimi için kullanılmak üzere akustik ağlar geliştirildi. Bu algılayıcılardan bazıları okyanustaki sismik hareketliliği izlemek için Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA) tarafından halen kullanılmaktadır. Ayrıca Kuzey Amerika'yı savunmak üzere bir dizi Havadan İhbar ve Kontrol Sistemi (Airborne Warning and Control System) uçaklarının algılayıcı olarak kullanıldığı hava savunma radar ağları yerleştirildi (Sohraby ve diğerleri, 2007).

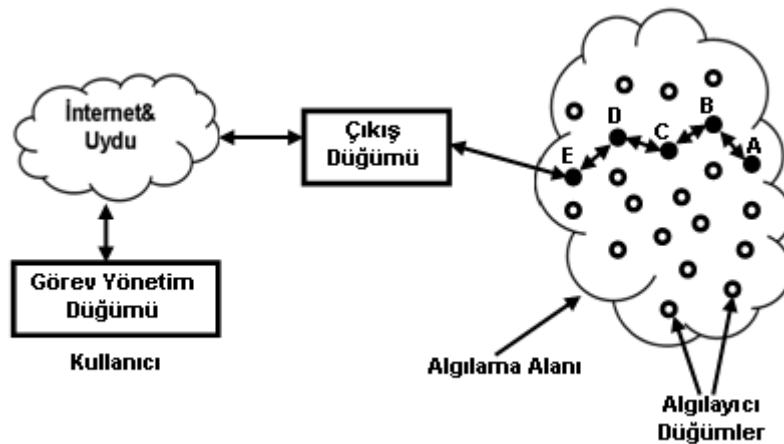
Aşama 2-İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı Girişimleri (Defense Advanced Research Projects Agency -DARPA Initiatives): Algılayıcı ağlar üzerine araştırmalar, 1980'lerin başında DARPA'nın desteklediği programlar ile oldu. Dağıtık Algılayıcı Ağlar (Distributed Sensor Networks-DSN), yeni geliştirilen TCP/IP protokolleri ve ARPAnet (İnternet'in atası) yaklaşımının algılayıcı ağlar kapsamında kullanılabilirliğini araştırmayı amaçladı (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Aşama 3-1980'lerde ve 1990'larda Geliştirilen veya Yerleştirilen Askeri Uygulamalar: Bunlar ilk-nesil ticari ürünler olarak adlandırılabilir. DARPA-DSN araştırması ve geliştirilen deney düzenekleri tarafından üretilen sonuçlara dayanarak 1980'lerde ve 1990'larda askeri planlamacılar, ağ merkezli savaşın anahtar elemanı yapmak üzere algılayıcı ağ teknolojisine sahip çıkmaya karar verdiler (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Aşama 4-Günümüzdeki Algılayıcı Ağ Araştırması: Bunlar ikinci-nesil ticari ürünler olarak adlandırılabilir. 1990'ların sonu ve 2000'lerin başında meydana gelen hesaplama ve haberleşmedeki ilerlemeler yeni nesil algılayıcı ağ teknolojisinin gelişmesine yol açtı (Sohraby ve diğerleri, 2007).

2.3. Kablosuz Algılayıcı Ağ Yapısı

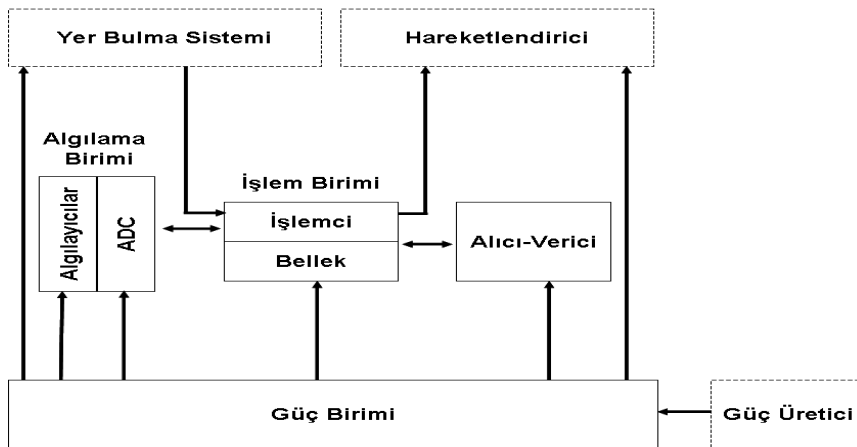
KAA'lar, bir olayın içine veya yakınına yoğun olarak yerleştirilmiş çok sayıda algılayıcı düğümden meydana gelmektedir. Veri toplama ve yönlendirme kabiliyetlerine sahip olan algılayıcı düğümler, genellikle Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bir algılama alanına dağıtılmaktadır. Bu algılayıcılardan her biri çıkış düğümü ile çıkış düğümü ise, görev yönetim düğümü ile İnternet veya uydu yolu ile haberleşebilmekte ve algılayıcı ağın toplamış olduğu bilgilerin uzaktaki kullanıcıya ulaştırılmasını sağlamaktadır (Akyildiz ve diğerleri, 2002).



Şekil 2.1. KAA yapısı (Akyildiz ve diğerleri, 2002)

2.4. Kablosuz Algılayıcı Dügüm Yapısı

Bir algılayıcı düğüm Şekil 2.2’de görüldüğü üzere algılama birimi, işlem birimi, alıcı-verici ve güç birimi olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Algılama birimi, algılayıcılar ve analog-sayısal çevriciler (ADC) olmak üzere iki alt birimden meydana gelmektedir. Algılayıcıların ürettiği analog işaretler, ADC ile sayısal forma dönüştürüldükten sonra işlem birimine gönderilmektedir. İşlem birimi, düğümün diğer düğümler ile işbirliği yapmasını sağlamaktadır. Alıcı-verici, düğümün ağı bağlanmasını sağlayan birimdir. Güç birimi ise, düğümün enerji gereksinimini karşılayan önemli bir birimdir. Yer bulma sistemi, güç üretici ve hareketlendirici gibi ilave bileşenler uygulamaya bağlı olarak yer alabilir (Akyıldız ve diğerleri, 2002).

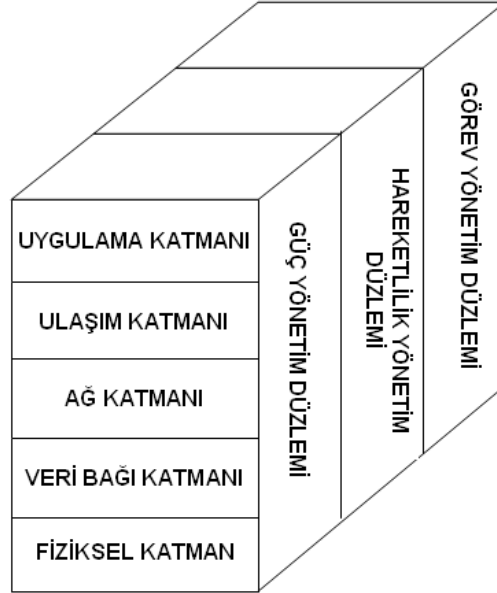


Şekil 2.2. Bir algılayıcı düğümün bileşenleri (Akyıldız ve diğerleri, 2002)

2.5. Kablosuz Algılayıcı Ağ Protokol Mimarisi

Çıkış düğümü ve tüm diğer düğümlerde kullanılan protokol yığını Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Fiziksel katman; frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretimi, işaret sezme, modülasyon ve veri şifrelemeden sorumludur. Veri bağı katmanı; veri akışlarının çoğullanması, veri çerçevesinin sezilmesi, ortam erişim ve hata kontrolünden sorumlu katmandır. Veriyi yönlendirme işlemi ağ katmanında gerçekleştirilmektedir. Ulaşım katmanı, sisteme İnternet veya diğer harici ağlar yoluyla ulaşılması planlandığında ihtiyaç duyulan bir katmandır. Algılama

görevlerine bağlı olarak farklı uygulama yazılım türlerinin kullanılabilirdiği katman, uygulama katmanıdır (Akyildiz ve diğerleri, 2002).



Şekil 2.3. Kablosuz algılayıcı ağ protokol mimarisi (Akyildiz ve diğerleri, 2002)

Güç, hareketlilik ve görev yönetim düzlemleri algılayıcı düğümler arasında güç, hareket ve görev dağılımını izlemekte, algılama görevini koordine etmekte ve toplam güç tüketimini düşürmektedir. Güç yönetim düzlemi, bir algılayıcı düğümün gücünü nasıl kullanacağını yönetmektedir. Hareketlilik düzlemi, algılayıcı düğümlerin hareketini sezmekte ve kaydetmekte, böylece kullanıcıya giden yolu korumakta ve algılayıcı düğümler komşu algılayıcı düğümlerin kim olduğunun izini sürebilmektedirler. Komşularının kim olduğunu bilerek güç ve görev kullanımı dengeleyebilirler. Görev yönetim düzlemi, belirli bir bölgeye verilen algılama görevlerini dengelemekte ve çizelgelemektedir. O bölgedeki tüm düğümlerin aynı zamanda algılama görevini gerçekleştirmesi gerekmez. Sonuç olarak bazı algılayıcı düğümler güç seviyelerine bağlı olarak diğerlerinden daha fazla görev gerçekleştirmektedirler. Bu yönetim düzlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır; çünkü bu sayede algılayıcı düğümler enerji etkin bir biçimde birlikte çalışabilmekte, hareketli bir algılayıcı ağda veri yönlendirebilmekte ve düğümler arasında kaynaklar paylaşılabilir. Onlar olmadan her algılayıcı düğüm, sadece bireysel olarak çalışacaktır. KAA bakış açısından algılayıcı düğümler birbirleri ile işbirliği

yapabilmekte, böylece KAA'ların ömrü uzatılabilmektedir (Akyildiz ve diğerleri, 2002).

2.6. Kablosuz Algılayıcı Ağ Uygulama Alanları

KAA'ların esneklik, hata toleransı, yüksek algılama sadakati, düşük maliyet ve hızlı yerleşim özellikleri uzaktan algılama için birçok yeni uygulama alanı ortaya çıkarmaktadır (Akyildiz ve diğerleri, 2002). Kablosuz algılayıcı ağ uygulama alanlarından bazıları aşağıda verilmektedir (Tubaishat ve Madria, 2003)(Xu, 2002):

- Uzak yerleri analiz etmek (bir hortumun hareketi, bir ormanda yangın tespiti vb.);
- Büyük şehirlerde taksilere yerleştirilen algılayıcılar ile trafik koşullarının gözlenerek yolların etkin olarak planlanması;
- Park yerindeki boş ve dolu yerlerin belirlenmesi;
- Alışveriş merkezi, garaj gibi yerlerde güvenliği sağlama;
- Düşman hareketlerini sezme, konumunu belirleme veya izleme;
- Potansiyel terörist tehditlerine tetikte olmayı arttırma;
- Çevre gözlem uygulamaları;
- Sağlık uygulamaları (hastanelerde ilaç yönetimi, hastaların fizyolojik verisini uzaktan görüntüleme, hastane içindeki doktor ve hastaları izleme vb.);
- Ev uygulamaları (gaz, sıcaklık vb. verilerin uzaktan ölçümü, ev otomasyonu vb.);
- Ticari uygulamalar (envanter yönetimi, fabrika süreç kontrol ve otomasyonu, ürün kalitesini gözleme vb.);
- Yapı sağlığı görüntüleme (hasarı sezme, yerini belirleme, yapının kalan ömrünü önceden haber verme vb.);
- Akıllı anaokulu örneği (Srivastava ve diğerleri, 2001).

Dost kuvvetleri, ekipmanı ve cephaneyi gözlem; savaş alanı gözetleme; düşman kuvvetlerin ve arazinin keşfi; hedef alma, hasar tespiti ve değerlendirilmesi, nükleer, biyolojik ve kimyasal saldırı tespiti askeri uygulamalardan bazılarıdır. DARPA'nın

kendi kendini iyileştiren mayın tarlası (Self-healing Mines, 2008) bir KAA uygulamasıdır.

Glukoz seviye görüntüleme, suni retina (Schwiebert ve diğerleri, 2001) KAA'ların sağlık uygulamaları arasında yer almaktadır.

Great Duck Adası (Mainwaring ve diğerleri, 2002), PODS projesi (Biagioni, 2001) (Biagioni ve Bridges, 2002) ve Zebranet projesi (Juang ve diğerleri, 2002) çevresel gözlem uygulamalarına örnek olarak verilebilir. (Mainwaring ve diğerleri, 2002)'de ifade edilen uygulamada Berkeley California Üniversitesi'ndeki araştırmacılar Maine kıyısındaki Great Duck Adası'nda yuvalarına yerleştirdikleri algılayıcılar sayesinde kuşların varlığını sezmek için ısıyı kullandıkları bir algılayıcı ağ oluşturdular. Princeton'ın Zebranet Projesi'nde (Juang ve diğerleri, 2002) zebraların hareketlerini ve davranışlarını gözlemek için boyunlarına düşük-güçlü bir GPS sistemi ile donanımlı özel tasmalar takılarak dinamik bir algılayıcı ağ meydana getirildi. Hawaii Üniversitesi'ndeki PODS projesinde ise, nadir ve yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalan bitkilerin neden bir bölgede yetiştiğini ve komşu bölgede niçin yetişmediğini araştırmak için çevresel algılayıcılardan oluşan bir kablosuz algılayıcı ağ oluşturuldu (Biagioni, 2001) (Biagioni ve Bridges, 2002).

Firebug, Berkeley California Üniversitesi'nden araştırmacıların 10 düğümlük bir ağı sahaya yerleştirerek bağıl nem ve sıcaklık gibi çevresel koşulları ölçtükleri ve bu sayede bir yangın çevresinde bu teknolojinin uygulanabilirliğini gösterdikleri bir KAA uygulamasıdır (Doolin ve Sitar, 2005).

KAA'lar yukarıda sadece birkaç örneğinden bahsedilen geniş uygulama alanları sayesinde yakın gelecekte hayatın ayrılmaz bir parçası haline gelecektir.

2.7. Olay GÜdümlü KAA Uygulamaları

(Madden ve diğerleri, 2003)'de algılayıcı ağ uygulamalarını olay güdümlü ve sürekli gözlem yapan algılayıcı ağlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İki ağ türü arasındaki farkı, uygulama belirlemektedir. Sürekli gözlem yapan bir algılayıcı ağda veri

örneklenmekte ve düzenli aralıklarda iletilmektedir. Örneğin bir ortam sıcaklığı gözlem istasyonu periyodik ölçümler alabilir ve sadece belirli aralıklarda merkezi bir gözlem istasyonuna gönderebilir (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Great Duck Adası'ndaki fırtına kuşlarının yuvalanma şablonlarının gözlemi (Mainwaring ve diğerleri, 2002), periyodik bildirim sınıfının örnekleri arasında yer almaktadır.

Olay güdümlü bir algılayıcı ağda ise, algılayıcı düğümler belirli bir olay meydana gelene kadar veri göndermezler. Tehlikeli atıkların üretildiği bir alanda zehirlilik seviyesinin ölçümü, orman yangını sezme, fabrikada üretim zincirinde yer alan algılayıcıların sorun bulduklarında alarm vermesi olay-güdümlü uygulamalara örnek olarak verilebilir. Bir silahın sesini analiz ederek bir keskin nişancının yerini belirleme de olaya dayalı bildirim örneğidir (Simon ve diğerleri, 2004). Bu tür KAA uygulamaları sadece olay sezildiğinde çalışmaktadırlar. Örneğin bir fabrikada üretim zincirine yerleştirilen algılayıcı düğümler çeşitli ölçümler (titreşim, nem vb.) gerçekleştirir fakat sadece anormal bir durum söz konusu olduğunda alarm verir. Orman yangını sezme uygulamasında algılayıcı düğümler bir uçaktan ormana bırakılabilir ve düğümler kendi kendilerine organize olarak bir ağ oluştururlar. İlgilenilen olayı (sıcaklık veya dumanda artış) sezen düğümler, verilerini çıkış düğümüne veya küme başına iletirler. Ağ kapsamını ve hata toleransını garanti etmek üzere çok sayıda düğüm yoğun olarak yerleştirilmektedir (Le ve diğerleri, 2007). Yangın durumunda olaya yakın düğümler rasgele ve yoğun yerleşimden dolayı aynı sıcaklığı algılayıp iletmek isteyebilirler. Bu algılayıcıların verilerinin birbirleri ile ilintili olması kuvvetle muhtemeldir (Chen ve Varshney, 2004). Böyle bir durumda aynı bölgede bulunan birçok düğüm gereksiz yere aynı bilgiyi çıkış düğümüne göndermekte ve enerji kaybetmektedir. Sürekli olarak veri toplanmasına ihtiyaç duyulmayan olay güdümlü algılayıcı ağ uygulamalarında ağ ömrünü uzatmak için en az sayıda algılayıcı düğümünün veri iletmesi enerji açısından daha verimli bir yöntemdir (Zhao ve diğerleri, 2005).

Bu tezde olay güdümlü KAA uygulamaları için gereksiz veri sorununu göz önünde bulundurarak TDMA (Zaman bölmeli çoklu erişim) tabanlı OEK (ortam erişim kontrol) protokolleri için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Yaklaşımımızdaki ana

hedef, gereksiz haberleşme sayısını azaltmak ve bu sayede enerji tüketimini düşürerek ağ ömrünün arttırılmasını sağlamaktır.

2.8. Sonuç

Bu bölümde; KAA'ların tarihsel gelişimi, algılayıcı ağ yapısı ve düğüm bileşenleri kısaca incelendikten sonra protokol mimarisi hakkında bilgi verilmiştir. KAA uygulama alanlarının çeşitliliği verilen birkaç örnek uygulama ile vurgulanmış ve ardından tez çalışmasında geliştirilen protokolün temelini oluşturan olay güdümlü uygulamalardan bahsedilmiştir.

BÖLÜM 3. KAA ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ

3.1. Giriş

KAA'ların gereksinimleri geleneksel (kablolu) ağlardan farklıdır; bunlardan ilki ve en önemlisi enerjiyi koruma ihtiyacıdır (Karl ve Willig, 2006). KAA'larda düğümler kısıtlı enerji kaynaklarına sahiptirler ve çoğu uygulamada gözetimsiz bir şekilde çalışmaktadırlar. KAA uygulamalarının gözetimsiz doğası ve düğümlerin yoğun yerleşimi yüzünden çoğu zaman düğümlerin pillerini değiştirmek mümkün veya pratik değildir (Ye ve diğerleri, 2002). Ayrıca ağın ömrü, düğümün ömrüne; o da enerjinin etkin kullanımına bağlıdır. Bu nedenle KAA'larda enerji tüketimini en aza indirmek için bazı çözümler bulmak önemli bir gerekliliktir.

Enerjinin verimli olarak kullanımı ağın farklı katmanlarını yakından ilgilendirmektedir. Ortam Erişim Kontrol (OEK) protokolü, düğümlerin en çok enerji tüketen birimi olan radyoyu doğrudan kontrol ettiği için enerji tüketimi ve gecikme başarımında oldukça önemli bir etkiye sahiptir (Li ve diğerleri, 2009). Enerji verimliliği ile ilgili standart çözümler henüz geliştirilmediği için KAA'lar, yeni OEK tekniklerine ihtiyaç duymaktadır (Muneeb ve diğerleri, 2006).

Ağ başarımı, düğümlerin paylaşımlı olan haberleşme ortamını etkin ve adil olarak kullanabilmelerine bağlıdır (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Ortam Erişim Kontrol (Medium Access Control-MAC) protokolleri her düğüme, kanala ne zaman ve nasıl erişeceklerine karar vermelerinde yardımcı olmak için geliştirilmektedir. Bu problem, kanal tahsis (channel allocation) veya çoklu erişim problemi olarak da bilinmektedir (Ye ve Heidemann, 2003).

Geleneksel kablolu ağlarda kullanılan OEK protokolleri doğrudan KAA'lara uygulanamamaktadır. Altyapıya dayalı hücreli bir sistemde asıl amaç hizmet

kalitesi ve bant genişliği iken, KAA'larda asıl amaç enerji etkinliğidir. KAA'lara benzer olan Bluetooth ve mobil tasarsız ağlarda da enerji tüketimi birinci derecede öneme sahip değildir. Dolayısıyla Bluetooth ve mobil tasarsız ağlar için kullanılan OEK protokolleri KAA'lara doğrudan uygulanamaz (Ilyas ve Mahgoub, 2005).

KAA'ları diğer ağlardan farklı kılan özelliklerden biri, düğümlerin büyük olasılıkla pille çalışması ve çoğu zaman pilleri değiştirmenin mümkün olmamasıdır. Diğer bir fark, düğümlerin tasarsız bir şekilde yerleştirilmesi ve kendi kendilerine bir ağ oluşturacak biçimde organize olmalarıdır. Ayrıca birçok uygulamada çok sayıda düğüm kullanılmakta ve yoğun düğüm yerleşimi söz konusu olmaktadır. KAA'daki trafiğin algılanan olaylar tarafından tetiklenmesi ile patlamalı (bursty) olması bir diğer farktır. Sonuç olarak geleneksel OEK protokollerinin değişiklik olmaksızın kablosuz algılayıcı ağlar için uygun olmadığı görülmektedir (Ye ve Heidemann, 2003).

KAA'lar için OEK protokolleri; algılayıcı ağ alt yapısının oluşturulması ve haberleşme ortamının adil ve etkin paylaşım amaçlarını yerine getirmelidir (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Literatürde KAA'lar için geliştirilmiş olan çok sayıda OEK protokolleri bulunmaktadır (Ye ve Heidemann, 2003) (Demirkol ve diğerleri, 2006). KAA başarımında OEK protokolünün seçiminin önemi büyüktür. KAA'lar için OEK tasarımında göz önünde bulundurulması gereken özelliklerin başında enerji etkin olması gelir. Ağ boyutu, ağ yoğunluğu ve ağ topolojisindeki değişikliklere uyum sağlamak üzere ölçeklenebilir olmasının yanı sıra erişim adaleti, azaltılan gecikme, yüksek iş çıkarma oranı (throughput) ve bant genişliği kullanımı da önemli özelliklerdir (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Enerji-etkin bir OEK tasarımında OEK açısından enerji sarfiyatının nedenleri araştırılmalıdır (Ye ve Heidemann, 2003). Enerji israfına neden olan birkaç kaynak aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Ye ve diğerleri, 2002).

Çarpışma: Bir düğüme aynı anda birden fazla düğümden paket gelirse çarpışma meydana gelmektedir ve gönderilen iletimlerden hiçbiri doğru şekilde

alınamamaktadır. İletimlerin tekrar gönderimi ilave enerji harcanmasının yanı sıra gecikmeye de olumsuz yansımaktadır.

Boş Dinleme: Düşümlerin olası veriyi almak üzere kanalı dinlediği durumdur. Ölçümler, KAA'larda boş dinlemenin alım için gereken enerjinin %50 ila %100 kadarını tükettiğini göstermektedir (Sankarasubramaniam ve diğerleri, 2003). Bazı durumlarda boş dinlemenin sarf ettiği enerji, ömrü boyunca bir algılayıcı düşümün toplam enerjisinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır (Sohraby ve diğerleri, 2007).

Kulak misafiri olma: Bir düşümün gönderdiği veri ortaklaşa kullanılan kablosuz ortam nedeniyle diğer düşümlere ulaşabilmektedir. Kulak misafiri olma, bir düşümün diğer düşümlere ait iletimleri alması durumudur.

Kontrol paket ek yükü: İşaretleşme (signaling), çizelgeme ve çarpışmadan kaçına gibi işlemler nedeniyle kontrol paketlerinin değiş-tokuş edilmesi gerekebilir. Bu durum enerji tüketimine ek yük getirmektedir. KAA'larda kontrol paket boyutları ile veri paketi boyutları birbirine yakın olduğu için kontrol paketlerinin neden olduğu enerji tüketimi önemli etkiye sahiptir (Ergen ve Varaiya, 2006).

OEK protokollerinin ana hedefi, yukarıda söz edilen enerji israf kaynaklarını azaltmaktır. OEK protokolleri, çekişme-tabanlı ve çizelge-tabanlı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Çekişme-tabanlı OEK protokolleri; rasgele erişim protokolleri veya çizelgesiz protokoller olarak da bilinmekte ve düşümler arasında kanala erişim koordinasyonu gerektirmeden bağımsız erişime izin vermektedirler. Çarpışan düşümler, rasgele bir süre geri çekilmekte ve yine kanala erişmeye çalışmaktadırlar. Trafik sık veya ilintili olduğunda çekişme tabanlı OEK protokollerinin başarımı zayıftır ve bu protokoller kararlılık sorunları yaşarmaktadırlar (Tobagi ve Kleinrock, 1977). Çarpışma, boş dinleme, kulak misafiri olma ve kontrol paket ek yükü çekişme-tabanlı protokollerin enerji açısından verimsiz olmasına neden olmaktadır (Shwe ve diğerleri, 2009). Çekişme-tabanlı kanal erişim mekanizmalarının, alıcı-vericilerin kanalı her zaman izlemesini gerektirmeleri yüzünden algılayıcı ağlar için uygun olmadığı söylenebilir (Sohrabi ve diğerleri, 2000).

Bir OEK protokolü çarpışmaya izin vermiyorsa çekişmesizdir (Busch ve diğerleri, 2004). Çizelge-tabanlı protokollerde düğümler, çarpışmadan kaçınmak için kaynaklara erişimi düzenleyen bir çizelgeyi takip etmektedirler. Çizelge-tabanlı protokoller, çarpışmasız olmasının yanında boş dinleme ve kulak misafiri olmanın neden olduğu enerji maliyetinden tasarruf edilebilmesi sayesinde KAA'lar için tercih edilebilir (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA), zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) veya kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) yöntemleri çizelge tabanlı protokollere birer örnektir. FDMA'nın, farklı radyo kanalları ile dinamik olarak haberleşmek için ilave devre ve CDMA'nın, yüksek hesaplama karmaşıklığı gerektirmesi yüzünden TDMA diğerlerine göre avantajlıdır (Yadav ve diğerleri, 2009). KAA'lar için kullanılan çizelge tabanlı protokollerin çoğu, kanalın zaman dilimlerine bölüdüğü zaman bölmeli çoklu erişimin (TDMA) değişik bir biçimini kullanmaktadır (Sohraby ve diğerleri, 2007). TDMA her düğüme veri almak veya göndermek için zaman dilimleri atayarak çarpışmasız bir iletişim sağlamaktadır. TDMA, komşu düğümler arasında girişimden kaçınılmasını garanti etmesinin yanı sıra ilave mesaj yükü olmaksızın gizli terminal sorununu çözebilir (Deliang ve Fei). TDMA-tabanlı protokoller, ağ ömrünü önemli ölçüde arttırabilen algılayıcı düğüm düşük çalışma oranı (duty cycle) çalışmalarını desteklemekte ve yukarıda bahsedilen tüm enerji israf kaynaklarını ortadan kaldırmakta veya azaltmaktadır çünkü düğümler kendilerine tahsis edilen dilimlerde iletimkte veya almaktadırlar (Kredo ve Mohapatra, 2007).

Bu bölümde OEK protokol tasarımını etkileyen özellikler açıklanmakta ve bu özellikler arasında yer alan enerji ve gecikmeden ayrıntılı olarak söz edilmektedir. TDMA tabanlı protokoller tezin asıl eksenini oluşturduğu için temel TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokollerinden bahsedilerek, söz konusu protokollere dair enerji ve gecikme analitik ifadelerine yer verilmektedir.

3.2. OEK Protokol Tasarımını Etkileyen Özellikler

OEK protokol tasarımında göz önünde bulundurulması gereken bazı özellikler vardır. Bu özellikler (Ye ve Heidemann, 2003)'de aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır.

Çarpışmadan kaçınma: Bir düğümün ortama nasıl ve ne zaman erişeceğini ve verisini ne şekilde göndereceğini belirlemek OEK protokollerinin temel görevidir.

Enerji etkinliği: Çok sayıda düğümün pillerini değiştirmek ya da şarj etmek çok zordur. Radyo, bir düğümün en büyük enerji tüketen birimi olduğu için ve OEK katmanı radyoyu doğrudan kontrol ettiğinden dolayı, enerji etkinliği KAA'lar için OEK protokollerinin en önemli özelliklerinden biridir.

Ölçeklenebilirlik ve uyarlanabilirlik: Bir OEK protokolü; bazı düğümlerin zamanla ölmesi, bazı yeni düğümlerin ağa katılması, bazı düğümlerin farklı konumlara hareketi vb. ağ boyutu, düğüm yoğunluğu ve topolojisindeki değişikliklere uyum sağlamalıdır.

Kanal kullanımı: Band genişliği kullanımı veya kanal kapasitesi olarak da adlandırılan bu özellik, haberleşmede kanalın band genişliğinin ne kadar iyi kullanıldığını göstermektedir.

Gecikme: Bir göndericinin gönderecek bir paketi olmasından paket alıcı tarafından başarıyla alınana kadar geçen süredir. KAA'larda gecikmenin önemi uygulamaya bağlıdır.

İş çıkarma oranı (throughput): Bir göndericiden bir alıcıya belirli bir sürede başarıyla aktarılan veri miktarını ifade etmektedir. Gecikme gibi iş çıkarma oranı da uygulamaya bağlıdır.

Adalet (Fairness): Farklı kullanıcı, düğüm veya uygulamaların kanalı adil olarak paylaşabilmelerini yansıtmaktadır.

Bu tez çalışmasında önerilen OEK protokolünün odaklandığı husus, enerji verimliliği ve gecikme iyileştirmesi olduğu için aşağıda söz konusu özelliklerden daha ayrıntılı bahsedilmektedir.

3.2.1. Enerji tüketimi

KAA ile geleneksel kablosuz ağ arasındaki en büyük fark, algılayıcıların enerji tüketimine çok hassas olmalarıdır (Shwe ve diğerleri, 2009). KAA uygulamalarının başarımı ağın ömrüne, ağ ömrü de düğümlerin ömrüne bağlı olduğundan enerji etkinliği OEK tasarımında çok önemli bir konudur.

Bölüm 2.4’de ifade edildiği gibi tipik bir algılayıcı düğüm genel olarak güç kaynağı birimi, algılama birimi, hesaplama/işlemci birimi ve haberleşme birimi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Düğüm, enerji kaynağı olarak pil kullanmaktadır ve birçok uygulamada pilleri değiştirmek/şarj etmek imkansızdır. Bir algılayıcı düğüm, sürekli çalıştığında bir çift AA pili (3000 mAh) yaklaşık olarak 100 saatte veya sadece 4 günde bitirebilir (Langendoen, 2008).

Bir kablosuz algılayıcı ağ düğümü algılama, veri işleme ve haberleşmede enerji tüketmektedir; bunlar arasında en çok enerjiyi tüketen radyo haberleşmesidir. Haberleşmenin harcadığı enerjinin, algılama ve hesaplamanınkinden daha yüksek olduğu bildirilmektedir (Ilyas ve Mahgoub, 2005). 1 kb veriyi 100 m iletmek için gereken enerji yaklaşık olarak 3 J’ dür. Aynı enerji miktarı ile 100 MIPS/W güçlü genel amaçlı bir işlemci 3 milyon komut çalıştırabilir (Pottie ve Kaiser, 2000). Kablosuz bir ortamda 1 biti iletmek için o biti işlemekten daha fazla enerji harcandığı bilinmektedir. Sensoria ve Berkeley düğümleri için haberleşme ve hesaplama enerji tüketimlerinin oranları 1000-10000 aralığındadır (Zhao ve diğerleri, 2003).

Bir algılayıcı düğümün en çok enerji tüketen bileşeni olan radyo; genellikle iletim, alım, boş dinleme ve uyku olmak üzere dört çalışma durumuna sahiptir. İletim/alım/boş dinleme/uyku durumlarındaki enerji tüketimi sırasıyla 80/30/30/0.003 mW’dır (Shwe ve diğerleri, 2009). En çok enerji tüketiminin iletim durumunda, en düşük enerji tüketiminin uyku durumunda olduğu; alım ve boş dinlemenin enerji tüketimlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Bu yüzden veri alış/verişinde bulunmayan düğümlerin boş dinleme yerine uyku durumuna alınması enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Kablosuz algılayıcı düğüm tasarımında düşük-güçlü elektronik devreler kullanmak enerji tüketimini azaltmaya yönelik önemli bir yaklaşım olmasına rağmen düğümün işleme ve haberleşme olanaklarından etkin bir biçimde faydalanılamazsa enerji-etkin çip tasarımından elde edilen enerji kazançları boşa harcanmaktadır. Bu yüzden enerji-duyarlı haberleşme protokolleri tasarlanması KAA'lar için önemli bir gerekliliktir (Sohraby ve diğerleri, 2007). Enerji etkinliği konusu protokol yığınının hemen hemen her katmanı ile ilgili olmasına rağmen, algılayıcı düğümün enerjisinin büyük bir kısmını tüketen radyo üzerinde doğrudan kontrole sahip olan ortam erişim katmanı ile yakından ilgilidir.

Düğümün aktif olmadıklarında uyumalarına izin vermek pil ömrünü uzatmanın ana unsurudur. Bunun nedenlerinden biri, boş dinlemenin iletim veya alımla karşılaştırılabilecek kadar enerji tüketmesidir. İkinci neden, pil deşarjının doğrusal olmaması ve kullanılmayan yüklerin bazılarının uykudan sonra pile geri yüklenebilmesidir. Düğümler ortama fazla sayıda yerleştirilirse, tümünün eş zamanlı olarak uyanmasına ihtiyaç duyulmaması da diğer nedendir (Younis ve diğerleri, 2006). Düşük çalışma oranı, bir düğümün daha uzun süre uyuduğu anlamına gelir ve çalışma trafik yükü ne olursa olsun enerji tüketimini sınırlamanın etkili bir yoludur (Patel ve diğerleri, 2009).

TDMA tabanlı protokoller, çekişmeye dayalı protokollere oranla enerji bakımından daha verimli olmalarına rağmen kablosuz algılayıcı ağların ölçeklenebilirlik ve uyarlanabilirlik gereksinimleri, söz konusu protokollerin kullanımını kısıtlamaktadır. Tüm algılayıcıların verilerini bir baz istasyonuna iletmesinden ziyade bir bölge içindeki düğümler ile işbirliği yapması ve o bölge için tek bir özet paket göndermesi daha elverişli bir yaklaşımdır. Kümeleme, düğümlerin yerel bir baz istasyonu ile haberleşmek için kümeler şeklinde organize olması ve bu yerel baz istasyonlarının son kullanıcı tarafından erişilen global baz istasyonuna veri iletmesidir. Kümeleme sayesinde düğümler kendisine yakın yerel baz istasyonuna veri iletme için ihtiyaç duyulan iletim mesafesi oldukça kısalmaktadır. Bu işlem gönderim gücünün azalmasına ve başarımın artmasına neden olmaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı kümeleme, KAA'lar için enerji tasarrufu sağlayan bir haberleşme protokolü olarak ortaya çıkmaktadır (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Kümeleme teknikleri, tasarımlarına

düğümün çalışma oranını (duty cycle) da dahil etmelidir. Düğümlerin periyodik olarak veri gönderdiği uygulamalarda küme başı olmayan düğümlerin küme başları ile haberleşmediklerinde uyumalarına izin verilebilir. Düğümlerin beklenmeyen olaylar için sahayı sürekli izlemesini gerektiren uygulamalarda küme başı, çalışmasının gereksiz olduğunu belirlediği düğümlerin uyumasını sağlayarak az sayıda aktif düğüm grubu oluşturabilir (Younis ve diğerleri, 2006).

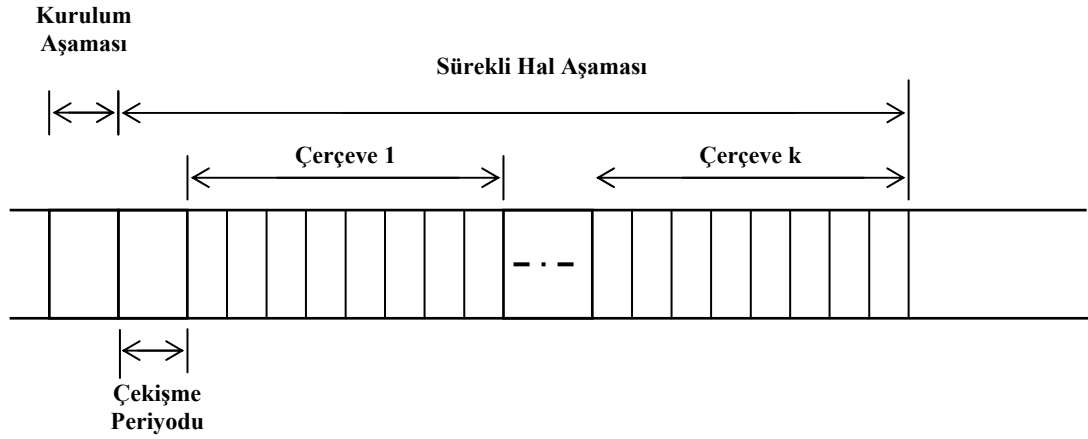
3.2.2. Gecikme

Gecikme süresi (latency), bir göndericinin göndereceği bir pakete sahip olmasından paketin alıcı tarafından başarılı olarak alınana kadar geçen süre olarak bilinmektedir. Gecikmenin önemi uygulamaya bağlıdır (Ye ve Heidemann, 2003). Bir orman yangını KAA uygulaması örnek olarak ele alınabilir. Bir ormana yerleştirilen algılayıcı düğümler tarafından yangın göstergesi sayılabilecek anormal derecede yüksek sıcaklık algılandığında, bu tür veriler mümkün olduğunca kısa sürede toplayıcı düğüme veya küme başına bildirilmelidir. Algılayıcı düğümler, kontrol edilemiyor hale gelmeden önce yangının kaynağını veya yayılma yönünü belirlemelidir (Akyildiz ve diğerleri, 2002). Bu paha biçilemeyen bilgi sayesinde en yakın acil durum personeli ve teçhizatı o bölgeye yönlendirilebilir ve güvenli tahliye yolları belirlenebilir (Estrin ve diğerleri, 1999).

3.3. Temel TDMA protokolü

KAA'lar için kullanılan çizelge tabanlı protokollerin çoğu kanalın zaman dilimlerine bölündüğü zaman bölmeli çoklu erişimin (TDMA) değişik bir biçimini kullanmaktadır (Sohraby ve diğerleri, 2007). Şekil 3.1' de görüldüğü gibi her çerçeve N dilimden oluşmaktadır. Geleneksel TDMA'da düğümlerin iletecek verisi olsun ya da olmasın her düğüme dilim tahsis edilmektedir. Sorun, her düğümün iletecek verisi yoksa bile kendisine ayrılan zaman diliminde radyosunu açması ve boşta beklemek zorunda olmasıdır. Çizelge; ya sabit ya da trafik örüntüsünün ve algılayıcı düğümlerin o anki gereksinimlerine göre baz istasyonu tarafından talebe dayalı olarak oluşturulan veya farklı zaman ölçeklerine ve algılayıcı davranışına göre değişen karma (hibrit) bir yapıda olabilmektedir. Temel TDMA protokolünde her

devir bir kurulum ve bir sürekli hal aşamasını içermektedir. Küme oluşumundan sonra her düğüm küme başı tarafından tahsis edilen dilimde alıcı-vericisini açmakta ve verisi varsa iletmekte; yoksa boş durumda beklemektedir. Düğümler kendilerine atanan dilimler dışında ise uyku durumundadırlar.



Şekil 3.1. Temel TDMA için bir devir gösterimi (Shafiuallah ve diğerleri, 2008)

TDMA'nın avantajı, düğümlerde düşük çalışma oranını desteklediği için enerji verimli olmasıdır (Ye ve Heidemann, 2003). TDMA'da düğümler sadece kendilerine bildirilen dilimlerde iletim yaptıkları için çarpışmasızdır. Kendi dilimleri haricinde radyolarını kapalı tuttıkları için kulak misafiri olmaktan sakınılabirler (Shwe ve diğerleri, 2009). Komşu düğümler farklı zaman dilimlerinde gönderim yaptıklarından dolayı fazladan mesaj yükü olmaksızın gizli terminal sorunu çözülebilmektedir (Liu ve Ni, 2007). Ayrıca TDMA protokolleri iletim gecikmesini etkin olarak azaltabilmektedir (Li ve Tan, 2009). TDMA'nın bu olumlu özellikleri KAA'lar için cazip hale gelmesini sağlamaktadır.

TDMA tabanlı protokollerde çarpışmayı engelleyecek şekilde komşular arasındaki bağlantılara kanalları atama görevi (TDMA dilimleri, frekans bantları veya yayılı spektrum kodları) oldukça karmaşıktır. Atamayı kolaylaştırmak için genelde ağda düğüm gruplarının yerini belirlemek ve kanal atama görevini daha yönetilebilir yapmak üzere hiyerarşik bir yapı oluşturulmaktadır. (Ilyas ve Mahgoub, 2005).

TDMA tabanlı protokoller, küme tabanlı ve dağıtılmış olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Temel TDMA'nın zayıf ölçeklenebilirliğine karşın küme tabanlı TDMA

daha fazla ölçeklenebilir. Küme tabanlı TDMA'da düğümler kümeler şeklinde organize olmakta ve küme başları üye düğümlere zaman dilimi tahsis etmektedir. Küme tabanlı TDMA çizelgesi ağın ölçeklenebilirliğini iyileştirmektedir ve büyük ölçekli KAA'lar için uygundur (Gong ve diğerleri, 2009). BMA (Li ve Lazarou, 2004), literatürdeki küme tabanlı bir TDMA protokolüne örnektir.

Dağıtılmış TDMA'da ağın çakışmayan kısımlarında yer alan birden fazla düğüm aynı zaman dilimini kullanabileceği için daha karmaşıktır (Gong ve diğerleri, 2010). LMAC (Van Hoesel ve Havinga, 2004), TRAMA (Rajendran ve diğerleri, 2003) dağıtılmış TDMA protokollerindedir.

Geleneksel TDMA tabanlı OEK protokolleri olay güdümlü KAA uygulamaları için çok uygun değildir. Hem geleneksel TDMA hem de küme tabanlı TDMA sürekli gözlem uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu tür KAA uygulamalarında düğümler her zaman gönderecek veriye sahip olduğu için yüksek kanal kullanımı elde edilebilir. Düğümlerin her zaman iletecek verisinin olmadığı olay güdümlü uygulamalarda kanal kullanımı düşük ve enerji harcaması daha yüksek olacaktır (Gong ve diğerleri, 2009).

3.3.1. Temel TDMA protokolünde enerji tüketimi

Enerji ve gecikme denklemlerinde kullanılan notasyonların ayrıntıları Tablo 3.1'de sunulmaktadır.

(Shafiullah ve diğerleri, 2008)'da tanımlandığı gibi temel bir TDMA-tabanlı OEK çerçevesinde bir kaynak düğümün veri iletmek için harcadığı enerji Denklem (3.1)'de görülmektedir.

$$E_{dn} = P_t T_d \quad (3.1)$$

Tablo 3.1. Analitik ifadelerde yer alan değişkenler

P_t	İletim durumu güç tüketimi
P_r	Alım durumu güç tüketimi
P_i	Boşta bir düğümün güç tüketimi
T_d	Bir veri paketi iletmek/almak için gereken süre
T_c	Bir kontrol paketi iletmek/almak için gereken süre
T_{ch}	BMA için küme başının bir kontrol paketi iletmesi için gereken süre
E_{dn}	Bir kaynak düğümün veri iletimindeki enerji tüketimi
E_{dn-c}	Kaynak düğümün çekişme periyodunda harcadığı enerji
E_{in}	Kaynak olmayan bir düğümün enerji tüketimi
E_{in-c}	Kaynak olmayan düğümün çekişme periyodunda harcadığı enerji
E_{ch}	Küme başının bir kontrol paketi göndermedeki enerji tüketimi
E_{ch-c}	Küme başının çekişme periyodunda harcadığı enerji
E_{ch-f}	Küme başının çerçevede harcadığı enerji
E_n	Bir üye düğümün kontrol paketi almadaki enerji tüketimi
N	Düğüm sayısı
n	Kaynak düğüm sayısı
p	Kaynak düğüm olma olasılığı/ kaynak düğüm oranı
l	Çerçeve sayısı

Çerçevede kaynak olmayan bir düğümün tükettiği enerji (Shafiullah ve diğerleri, 2008)'da tanımlandığı gibi

$$E_{in} = P_i T_d \quad (3.2)$$

şekindedir. (Shafiullah ve diğerleri, 2008)'da tanımlandığı gibi çerçevede küme başı tarafından harcanan enerji

$$E_{ch-f} = nP_r T_d + (N - n)P_i T_d \quad (3.3)$$

ile gösterilir. Kurulum aşamasında küme başı ve tüm düğümler radyolarını açar. Küme başı, düğümler için zaman dilimlerini belirler ve onlara yayınlar.

Çekişme periyodunda bir kontrol paketi iletmek için küme başı tarafından tüketilen enerji Denklem (3.4) ile verilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_{ch-c} = P_t T_c \quad (3.4)$$

Bir kontrol paketi almak için her bir üye düğüm tarafından tüketilen enerji Denklem (3.5)' deki gibi bulunur (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_n = P_r T_c \quad (3.5)$$

Çekişme periyodunda harcanan toplam enerji Denklem (3.6)'daki gibi hesaplanır (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_C = P_t T_c + NP_r T_c \quad (3.6)$$

Temel bir TDMA protokolünde bir devir boyunca tüketilen enerji Denklem (3.7)' deki gibi ifade edilebilir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_{TDMA} = P_t T_c + NP_r T_c + I[nP_t T_d + 2(N-n)P_i T_d + nP_r T_d] \quad (3.7)$$

3.3.2. Temel TDMA protokolünde gecikme

Tablo 3.1'de gösterildiği gibi bir veri paketini göndermek veya almak için gereken süre T_d ve bir kontrol paketini göndermek veya almak için gereken süre T_c ile temsil edilmektedir. İletişim kanallarının hatasız olduğu varsayılmakta ve küme başının bir kontrol paketi iletmesi için gereken süre T_{ch} ile tanımlanmaktadır. Devir başına oturum veya çerçeve sayısı k parametresi ile gösterilmektedir. α , ısrarcı-olmayan CSMA'nın (non-persistent CSMA) iş çıkarma oranı için kullanılmaktadır. N , küme başı olmayan düğüm sayısı ve p , bir düğümün kaynak düğüm olma olasılığını göstermek üzere kaynak düğüm sayısı (n) $n=Np$ ifadesi ile verilmektedir. n_i , i . oturum veya çerçevedeki kaynak düğümlerin sayısıdır. Bir düğümün veriye sahip olup olmaması bir Bernoulli denemesi olarak düşünüldüğünde $E[n_i]=Np=n$, $i=1,2,\dots,k$ olmak üzere bir devirdeki kaynak düğümlerin toplam sayısının beklenen değeri (Lazarou ve diğerleri, 2007)'da verildiği gibi

$$E\left[\sum_{i=1}^k n_i\right] = \sum_{i=1}^k E[n_i] = kn \quad (3.8)$$

olarak ifade edildiğinde TDMA gecikmesi Denklem (3.9) ile gösterilmektedir.

$$L_{TDMA} = \frac{\left(\frac{N}{\alpha} + 1\right)T_c + kNT_d}{kn} \quad (3.9)$$

3.4. E-TDMA Protokolü

Enerji etkin TDMA (Energy-efficient TDMA, E-TDMA)'da (Li ve Lazarou, 2004), temel TDMA'nın aksine kaynak olmayan düğümler kendilerine tahsis edilen dilimlerde alıcı-vericilerini kapatmaktadırlar. Bu protokol, boş durumdaki enerji tüketimini azaltarak (Sazak ve diğerleri, 2009) enerji tasarrufu sağlamasına rağmen gecikmeyi iyileştirmez. Her iki protokol (temel TDMA ve E-TDMA) için de gecikme ifadeleri aynıdır.

3.4.1. E-TDMA protokolünde enerji tüketimi

(Li ve Lazarou, 2004)'da tanımlandığı gibi temel bir E-TDMA-tabanlı OEK çerçevesinde bir kaynak düğüm tarafından harcanan enerji Denklem (3.10)'da görülmektedir.

$$E_{dn} = P_t T_d \quad (3.10)$$

(Li ve Lazarou, 2004)'da tanımlandığı gibi çerçevede küme başı tarafından harcanan enerji ise Denklem 3.11'deki formül ile hesaplanabilir.

$$E_{ch-f} = nP_r T_d + (N - n)P_i T_d \quad (3.11)$$

Çekişme periyodunda bir kontrol paketi iletmek için küme başı tarafından tüketilen enerji Denklem (3.12) ile verilmektedir (Li ve Lazarou, 2004).

$$E_{ch-c} = P_t T_c \quad (3.12)$$

Bir kontrol paketi almak için her bir üye düğüm tarafından tüketilen enerji Denklem (3.13)'deki gibi bulunur (Li ve Lazarou, 2004).

$$E_n = P_r T_c \quad (3.13)$$

Çekişme periyodunda harcanan toplam enerji tüketimi Denklem (3.14) ile hesaplanır (Li ve Lazarou, 2004).

$$E_c = P_t T_c + N P_r T_c \quad (3.14)$$

Sonuç olarak E-TDMA protokolünde bir devir boyunca tüketilen enerji Denklem (3.15)'deki gibi ifade edilebilir (Li ve Lazarou, 2004).

$$E_{E-TDMA} = P_t T_c + N P_r T_c + l[n P_t T_d + (N - n) P_i T_d + n P_r T_d] \quad (3.15)$$

3.4.2. E-TDMA protokolünde gecikme

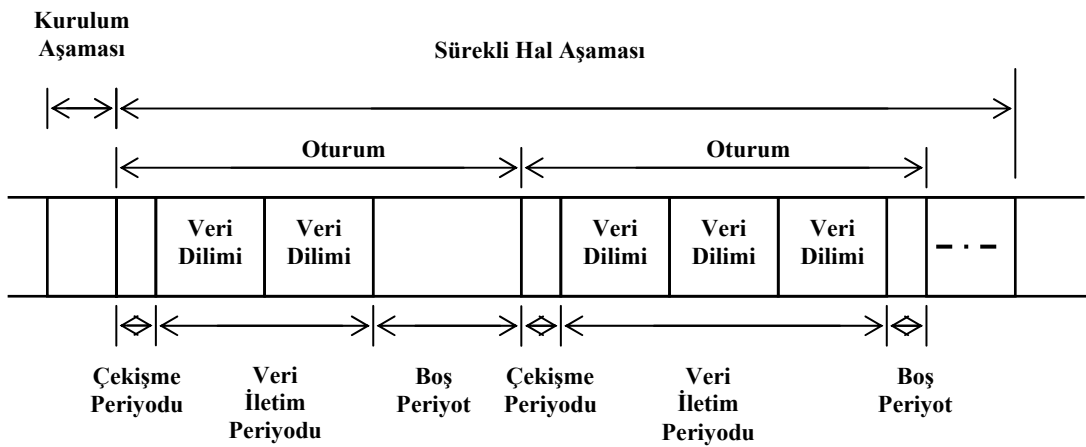
E-TDMA protokolü için ortalama gecikmesi TDMA protokolününki ile aynıdır ve Denklem (3.16)'da ifade edilmektedir (Lazarou ve diğerleri, 2007).

$$L_{E-TDMA} = \frac{\left(\frac{N}{\alpha} + 1\right) T_c + k N T_d}{k n} \quad (3.16)$$

3.5. BMA Protokolü

BMA (Bit-map assisted) (Li ve Lazarou, 2004) (Li, 2004) (Lazarou ve diğerleri, 2007), büyük ölçekli küme-tabanlı kablosuz algılayıcı ağlar için önerilen küme içi OEK protokolüdür. BMA protokolü de çizelge tabanlıdır ve dinamik bir çizelgeleme düzenine sahiptir. BMA, algılayıcı düğümlerin sadece önemli/önceden belirlenmiş olaylar meydana geldiğinde veri ilettiği olay güdümlü KAA uygulamaları için tasarlanmıştır. BMA'nın çalışması da kurulum ve sürekli hal aşamalarını içeren

devirlere bölünmektedir. Sürekli hal aşaması; çekişme periyodu, veri iletim periyodu ve boş periyottan oluşan alt oturumlara ayrılmaktadır (Şekil 3.2). Veri iletim periyodunun boyutu değişkendir, çünkü her düğüm her zaman gönderecek veriye sahip değildir. Diğer yandan veri iletim ve boş periyotların toplamı sabit bir değere eşittir. Tüm düğümler her çekişme periyodunda radyolarını açmaktadırlar. Her çekişme periyodu, kümedeki düğüm sayısına eşit zaman dilimine bölünmektedir. Çekişme periyodu TDMA-benzeri bir çizelge izlemektedir. Her düğüme bir zaman dilimi atanmaktadır. Düğüm, verisi varsa 1-bit kontrol mesajı iletmekte aksi halde dilimi boş bırakmaktadır. Çekişme periyodu tamamlandıktan sonra küme başı kaynak düğümleri bilerek, bir iletim çizelgesi hazırlamakta ve yayınlamaktadır. Ardından sistem, veri iletim periyoduna girmektedir. Üye düğümlerden hiç biri iletecek veriye sahip değilse, sistem sonraki oturuma kadar boş periyoda girmektedir. Veri iletim periyodu boyunca kaynak düğümler kendilerine tahsis edilen dilimlerde radyolarını açmakta ve küme başına veri iletmektedirler. Diğer üye düğümler veri iletimi esnasında radyolarını kapalı tutarlar. Boş periyotta ise tüm üye düğümlerin radyoları kapalıdır. Bir oturum bittiğinde sonraki oturum bir çekişme periyodu ile başlamakta ve aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Küme başı, tüm kaynak düğümlerden veri toplamakta, birleştirilen ve sıkıştırılan veriyi baz istasyonuna iletmektedir. Önceden belirlenen bir zaman sonra sistem sonraki devire başlar ve tüm süreç tekrar edilir. BMA, düşük ve orta trafik yüklerinde TDMA ve E-TDMA'dan daha iyi olduğundan düşük trafik koşulları için uygun bir protokoldür. BMA, TDMA ve E-TDMA protokollerinden daha düşük gecikmeye sahiptir.



Şekil 3.2. BMA için bir devir gösterimi (Li ve Lazarou, 2004).

3.5.1. BMA protokolünde enerji tüketimi

BMA protokolünde bir kaynak düğüm tarafından çekişme periyodunda tüketilen enerji (Shafiullah ve diğerleri, 2008) 'da tanımlandığı gibi Denklem (3.17)'de görülmektedir.

$$E_{dn-c} = P_r T_{ch} + P_t T_c + (N-1)P_i T_c \quad (3.17)$$

BMA çerçevesinde kaynak olmayan bir düğümün çekişme periyodunda harcadığı enerji (Shafiullah ve diğerleri, 2008)'da ifade edildiği gibi Denklem (3.18) ile verilmektedir.

$$E_{in-c} = P_r T_{ch} + NP_i T_c \quad (3.18)$$

Çekişme periyodunda “ $nP_r T_c + (N-n) P_i T_c + P_t T_{ch}$ ” ve veri iletim periyodunda “ $nP_r T_d$ ” olmak üzere küme başının harcadığı enerji (Shafiullah ve diğerleri, 2008)

$$E_{ch} = n(P_r T_c + P_r T_d) + (N-n)P_i T_c + P_t T_{ch} \quad (3.19)$$

dir. BMA protokolünde bir devir boyunca tüketilen toplam enerji Denklem (3.20)'de ifade edilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_{BMA} = l[n(P_t T_c + (N-1)P_i T_c + P_t T_d + P_r T_{ch}) + (N-n)(NP_i T_c + P_r T_{ch}) + n(P_r T_c + P_r T_d) + (N-n)P_i T_c + P_t T_{ch}] \quad (3.20)$$

3.5.2. BMA protokolünde gecikme

BMA için ortalama gecikmesi Denklem (3.21)'de gösterilmektedir (Lazarou ve diğerleri, 2007).

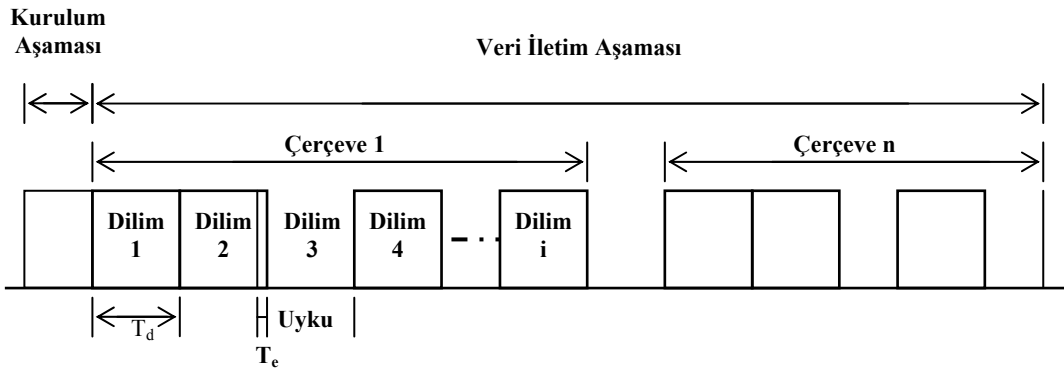
$$L_{BMA} = \frac{NT_c + T_{ch} + nT_d}{n} \quad (3.21)$$

BMA, TDMA ve E-TDMA protokollerinden daha düşük gecikmeye sahiptir (Lazarou ve diğeri, 2007).

3.6. EA-TDMA Protokolü

EA-TDMA protokolü (Energy-Efficient Adaptive TDMA) küme tabanlı bir TDMA protokolüdür (Shafiullah ve diğeri, 2008). Bir kümede bir küme başı ve N adet küme başı olmayan düğüm olduğu kabul edilmektedir. EA-TDMA protokolü, her biri kurulum ve veri iletim aşamalarından oluşan devirlerden meydana gelmektedir. Şekil 3.3'de EA-TDMA protokolüne ait bir devir gösterilmektedir.

Küme oluşumu ve küme başı seçimi kurulum aşamasında gerçekleşirken düğümün küme başına veri iletimi veri iletim aşamasında meydana gelmektedir. Kurulum aşamasında küme başı ve tüm düğümler radyolarını açık tutmaktadır. Kurulum aşamasında küme başı bir TDMA çizelgesi hazırlamakta ve küme içindeki tüm düğümlere çizelgeyi yayınlamaktadır. Küme başı bütün düğümleri o anki devirin başlangıcı, çerçeve başlangıç/bitiş süresi, bir devirdeki çerçeve sayısı hakkında bilgilendirmektedir. Veri iletim aşaması l tane çerçeveden meydana gelmektedir. Çerçevelerin her birinin boyutu sabittir. Düğümler kendilerine ayrılan zaman dilimlerinde çerçeve başına bir defa küme başına verilerini göndermektedirler. Küme başı, düğümlerden tüm veriyi aldıktan sonra birleştirilmektedir. Bir TDMA çizelgesindeki zaman dilimi süresi T_d olarak varsayılmaktadır. EA-TDMA protokolünde veri iletim aşamasında her düğüm kendisine atanan zaman dilimlerinde radyosunu açmakta ve verisini küme başına iletmektedir. Eğer bir düğüm radyosunu açtıktan sonra arabelleğini boş bulursa, yani iletecek verisi yoksa enerji tasarruf etmek için radyosunu hemen kapatır. Bu yüzden Şekil 3.3'de görüldüğü gibi radyo tüm T_d süresi boyunca açık kalmak yerine T_e süresinden sonra kapatılmaktadır. Veri yokluğunda düğümler boş durum yerine uyku durumuna geçmektedir. Bu protokol, boş dinleme periyodunu azaltarak veri iletimi esnasında enerji tüketimini azaltmaktadır. Önceden belirlenen bir süre sonra sistem sonraki devire başlar ve tüm süreç tekrarlanır.



Şekil 3.3. EA-TDMA için bir devir gösterimi (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

3.6.1. EA-TDMA protokolünde enerji tüketimi

Bir EA-TDMA çerçevesinde bir üye düğümün harcadığı enerji Denklem (3.22) ile verilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_{dn} = P_t T_d \quad (3.22)$$

Kaynak olmayan bir düğüm verisi olup olmadığını öğrenmek için arabelleğini kontrol ettiğinde harcanan güç P_e olarak tanımlanmaktadır ve kaynak olmayan bir düğümün arabelleğini kontrol etmesi için gereken süre T_e olarak ifade edilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008). Çerçevde kaynak olmayan bir düğümün belleğini kontrol ederken tükettiği enerji (Shafiullah ve diğerleri, 2008)'da ifade edildiği gibi Denklem (3.23)'de görülmektedir.

$$E_e = P_e T_e \quad (3.23)$$

Küme başının çerçevde harcadığı enerji Denklem (3.24) ile gösterilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_{ch-f} = nP_r T_d + (N - n)P_i T_d \quad (3.24)$$

Bir çerçevdeki sistemin enerji harcaması Denklem (3.25) ile ifade edilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

$$E_{se} = nP_t T_d + (N - n)P_e T_e + (N - n)P_i T_d + nP_r T_d \quad (3.25)$$

Küme başının bir kontrol paketi iletmek için harcadığı enerji (Shafiullah ve diğerleri, 2008)'da tanımlandığı gibi Denklem (3.26)'da görülmektedir.

$$E_{ch-c} = P_t T_c \quad (3.26)$$

Her bir üye düğümün kontrol paketi almak için harcadığı enerji ise

$$E_n = P_r T_c \quad (3.27)$$

olarak gösterilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

Çekişme periyodundaki toplam enerji tüketimi

$$E_C = P_t T_c + NP_r T_c \quad (3.28)$$

ifadesi ile verilmektedir (Shafiullah ve diğerleri, 2008).

EA-TDMA protokolünde (Shafiullah ve diğerleri, 2008) bir devir boyunca tüketilen toplam enerji Denklem (3.29) ile ifade edilmektedir.

$$E_{EA-TDMA} = P_t T_c + NP_r T_c + l[nP_t T_d + (N - n)P_e T_e + (N - n)P_i T_d + nP_r T_d] \quad (3.29)$$

3.7. Sonuç

Kablosuz algılayıcı ağlarda algılayıcı düğümlerin paylaşılan kanala erişimini düzenleyen bir OEK protokolü gereklidir. Bir OEK protokolünün görevi, uygulamaya bağlı başarımların gereksinimleri karşılanacak şekilde düğümlerin paylaşılan kablosuz ortama erişimini düzenlemektir (Karl ve Willig, 2006).

KAA'ların yoğun düğüm yerleşimi ve düşük çalışma oranı çalışma ihtiyaçları, OEK protokolü seçimini güç bir sorun haline getirmektedir. Genel bir OEK protokolü olmaması yüzünden araştırmacılar tarafından çok sayıda protokol önerilmektedir. Uygun çözüm; uygulamaya, beklenen yük örüntülerine, beklenen yerleşime ve donanımın enerji tüketim davranışına bağlıdır (Karl ve Willig, 2006).

Bu bölümde diğer ağlarda kullanılan OEK protokollerinin KAA'lara doğrudan uygulanamama sebeplerinden söz edildikten sonra ortam erişim kontrol protokollerinin temel gereksinimleri tanımlanmaktadır. OEK protokolleri sınıflandırıldıktan sonra temel TDMA, E-TDMA, BMA, EA-TDMA protokolleri kısaca açıklanmaktadır.

BÖLÜM 4. AKTİF DÜĞÜM VE DİNAMİK ZAMAN DİLİMİ TAHSİSİ ESASLI KAA OEK PROTOKOLÜ (M-BMA)

4.1. Giriş

Algılayıcı düğümlerin donanım kısıtlamaları yüzünden kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarında çok sayıda düğüm yerleştirilmesi gerekmektedir. Algılayıcı düğümler, gözlenen olayın içine veya yakınına yoğun olarak yerleştirildikleri için komşu düğümler birbirlerine çok yakın olabilmektedir (Akyildiz ve diğerleri, 2002). Bu yoğun yerleşim yüzünden komşu düğümlerin ölçümlerinin ilintili (correlated) olmasının muhtemel olduğu varsayılmaktadır (Akyildiz ve diğerleri, 2004). Düğümlerin aşırı yoğunluğu, komşu düğümler arasında yüksek veri fazlalığına yol açmaktadır (Ilyas ve Mahgoub, 2005). Bilinen bir duruma ait tekrar mahiyetindeki bilginin katkı sağlayan etkisi bulunmadığı için (Karl ve Willig, 2006) düğümlerin yoğun yerleşimi, veri fazlalığına neden olmanın yanı sıra gecikmeyi de arttırmaktadır.

Kablosuz algılayıcı ağlardaki düğümlerin enerji kısıtları ve yerleştirildikleri yere ulaşılması zor olması nedeniyle pili biten düğümleri değiştirme veya şarj etme imkanının olmadığı uygulamalarda ağ topolojisinde değişiklikler meydana gelmektedir. Düğümlerin arızalanması, eklenmesi, eksilmesi ya da küme üyesi olmasına rağmen kaynak düğüm olmayan (iletecek verisi olmayan) algılayıcıların mevcut olması gibi durumlar; TDMA-tabanlı bir protokolün dinamik olarak ayarlanabilen bir çerçeve yapısına sahip olmasını gerektirmektedir.

Tezin bu bölümünde olay güdümlü KAA uygulamaları için Aktif Düğüm Belirleme Yöntemi (ADBY) olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Tasarım süreçleri açıklandıktan sonra yaklaşımın uyarlandığı ve kısaca M-BMA (Modified BMA) olarak anılan yeni geliştirilen protokolün üzerinde detaylıca durulmaktadır. Son olarak geliştirilen yeni protokolün enerji tüketimi; düğüm sayısına, kaynak ve

aktif düğüm oranlarına ve çerçeve sayısına göre temel TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokolleri ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca geliştirilen M-BMA protokolünün gecikmede sağladığı iyileştirme; temel TDMA, E-TDMA ve BMA protokolleri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

4.2. Önerilen Aktif Düğüm Belirleme Yöntemi (ADBY)

Bir KAA'da herhangi bir olayı sezen ya da bir ölçümü gerçekleştiren düğüm, ölçtüğü değerleri komşularına veya baz istasyonuna göndermek için veri paketi oluşturmaktadır. İşte bu şekilde gönderecek verisi olan düğümlere "kaynak düğüm" adı verilmektedir. Olay güdümlü uygulamalarda bir kaynak düğüm, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak belirli bir olayı veya önceden belirlenen ölçüm parametresini (sıcaklık, nem, basınç vb.) algılayan düğümdür. Bu, olay güdümlü KAA uygulamalarında tüm düğümlerin gönderecek veriye sahip olmadığı anlamına gelmektedir.

Birçok KAA uygulamasında düğümlerin ölçüm yapılacak ortama rastgele dağıtıldıkları düşünüldüğünde düğümlerin birbirlerine coğrafi açıdan yakın olma ihtimalleri oldukça yüksektir. Böyle bir durumda yoğun ve yakın yerleşim gibi nedenlerden ötürü aynı olayı sezen veya aynı ölçüm değerlerini gerçekleştiren birçok düğüm olabilmekte ve bu kaynak düğümler, içerikleri aynı ya da benzer verilerini baz istasyonlarına iletmek istemektedir. Amaç, olay yerinden veri elde etmektir fakat birden fazla düğümden aynı paketi almanın anlamı yoktur. Böyle bir durumda düğümler eşik değerinden yüksek bir değer algıladığında iletim yapsalar bile aynı algılama bölgesinde bulunan düğümlerin verilerini gönderme talepleri sebebiyle gereksiz iletim yapılmaktadır. Bu veri fazlalığı, hem gereksiz enerji sarfiyatına ve gecikmede artışa neden olmakta hem de anlık tıkanıklığa (congestion) yol açabilmektedir. Bu gereksiz iletimler düğümlerin enerji tüketimlerinin artmasına ve ağın ömrünün kısalmasına yol açmaktadır. Olay güdümlü KAA uygulamalarında kaynak düğümlerin tümünün algılama değerlerini göndermesi yerine aynı veriye sahip kaynak düğümlerden sadece bir tanesinin veri iletmesi enerji açısından daha verimli bir yaklaşımdır.

Bu tezde önerilen kaynak düğümlerden aynı veriye sahip olanlardan sadece bir tanesine zaman dilimi tahsis edilmesi yöntemi, aktif düğüm belirleme yöntemi (ADBY) olarak adlandırılmaktadır. Kaynak düğümlerden iletim yapmasına izin verilen düğüm “aktif düğüm” olarak tanımlanmaktadır. Aynı veriyi iletecek düğümlerden zaman dilimi tahsis edilecek olan, kalan enerjisi en fazla olan düğüm ya da küme başına daha yakın olan düğüm vb. çeşitli ölçütlere göre belirlenebilir.

ADBY yönteminin çalışması, olay güdümlü bir KAA örneği olarak bir orman yangını sezme uygulaması ile açıklanabilir. Çok sayıda düğüm bir ormana uçaktan rasgele ve yoğun olarak yerleştirilmektedir. Algılayıcı düğümler kendi kendilerine organize olarak bir kablosuz ağ meydana getirmektedirler. Belirlenen kümeleme algoritmasına göre küme başı seçildikten sonra üye düğümlerin belirlenmesi ile küme oluşum süreci tamamlanarak düğümler küme denilen alt gruplara ayrılmış olur. Düğümler, ölçümleri yeni başlayan bir yangın göstergesi olarak kabul edilebilecek önceden belirlenen bir sıcaklık eşiğine eşit ya da daha fazla olana kadar herhangi bir veri göndermezler. Eşik değeri 40 °C olarak önceden belirlenmişse bu değer altındaki bir sıcaklığı algılayan düğüm herhangi bir iletimde bulunmaz. 40 °C ve üzerindeki sıcaklıkları ölçen düğümler kaynak düğümdür. Ancak düğümlerin sayısı çok fazladır ve düğümlerin yoğun bir şekilde yerleştirilmesi coğrafi açıdan birbirine yakın durumda bulunan düğümlerin olması sonucunu doğurabilmektedir. Yoğun yerleşim yüzünden olaya yakın düğümlerden bazıları aynı veriyi algılayabilmektedir. Bu örnek için yangına yakın komşu düğümler aynı veriyi ölçerek iletmek isteyebilirler. Olay yerinin yakınındaki kümeye ait düğümlerden yangına yakın olan iki düğüm 50 °C, nispeten daha uzakta bulunan bir düğüm 45 °C bir diğeri ise 48 °C ölçmüş olsun. Bu düğümlerin hepsi kaynak düğümdür. Bu kaynak düğümler, çekişme periyodunda eşik değeri olan 40 °C ile aralarındaki farkları küme başına bildirmektedirler. İki tanesi 10, biri 5 ve diğeri 8 verilerini göndermektedirler. 50 °C sıcaklık ölçen düğümlerden ikisinin de veri iletmesi bir anlam ifade etmeyeceğinden küme başı bunlardan sadece birine veri dilimi tahsis etmektedir. Tabii ki aynı veriyi göndermek isteyecek kaynak düğüm sayısı ikiden fazla olabilir. Böyle bir durumda da sadece bir tanesine dilim atanması söz konusudur. Bu basit örnek için kaynak düğüm sayısı dört iken, veri dilimi tahsis edilen düğüm sayısı ya da kısaca aktif düğüm sayısı üçtür. Ormanın sıcaklık haritasını elde etme, yangının yayılma

yönünün belirlenmesine yardım etmektedir. Bu nedenle sahadan farklı veri paketlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu fikir, ADBY yaklaşımının çıkış noktasıdır.

ADBY sayesinde daha çok sayıda düğümün uykuda kalması sağlanarak enerji tasarrufu yapılmakta ve aynı verinin iletiminin ortadan kaldırılmasıyla veri fazlalığı engellenmektedir. ADBY, içerik tabanlı bir çizelgeleme yaklaşımıdır (Sazak ve diğerleri, 2010 a) ve TDMA tabanlı herhangi bir OEK protokolüne uyarlanabilir.

4.3. M-BMA Protokolünün Tasarım Aşamaları

ADBY, herhangi bir OEK protokolüne uyarlanabilen ve uyarlandığı OEK'ya katkı sağlayabilecek bir yaklaşımdır. Bu amaçla ADBY'nin uyarlandığı yeni bir OEK protokolü geliştirilmiştir. BMA protokolüne benzerliği dolayısıyla bu yeni protokol Modified BMA (M-BMA) olarak isimlendirilmiştir. M-BMA protokolünde, dilim tahsis edilecek düğümleri belirlemek üzere kaynak düğümlerin fark verisini göndermeleri sağlanmaktadır. M-BMA protokolünde kaynak düğümler (önceden belirlenen eşikten yüksek bir değer algılayan) küme başına gönderim yapmakta ve gönderi sadece 4-bitten oluşmaktadır. Kaynak düğüm, algıladığı değer ile eşik değeri arasındaki farkı hesaplayarak bu farkı 4-bit ile temsil etmekte ve bu bilgiyi küme başına göndermektedir. Küme başı da kendisine gelen 4-bitlik verileri kıyaslayarak aynı ölçüm değerini algılayan düğümlerden sadece bir tanesine dilim tahsis etmektedir.

ADBY'nin geliştirilmesi ve protokolün tasarımında bir küme içindeki işleyiş ele alınmaktadır. Olay güdümlü bir KAA uygulaması için sahaya rasgele bırakılan düğümlerin kendi kendilerine kümelere organize oldukları varsayılmıştır. Özellikle büyük ölçekli KAA'larda ölçeklenebilirlik çok önemlidir. Algılayıcı düğümleri gruplandırma yöntemi olan kümeleme, KAA'larda ölçeklenebilirliği destekleme için kullanılan en popüler yaklaşımdır (Abbasi ve Younis, 2007). Kümelenen KAA'lar kümelenmeyenlere göre enerji korunumu açısından iki ana avantaj sunmaktadır (Vlajic ve Xia, 2006):

- a) Kümelenen KAA'lar, oluşturulan kümeler içinde veri iletimini yerelleştirerek ve toplayıcı düğüme gönderilen toplam iletim sayısını azaltarak düğümler arası haberleşme hacmini düşürebilir.
- b) Kümelenen KAA'lar, küme başlarının TDMA tabanlı çizelgeleme ile diğer küme üyelerinin hareketlerini koordine ve optimize etmelerine imkan vererek düğümlerin uyku zamanlarını arttırabilir.

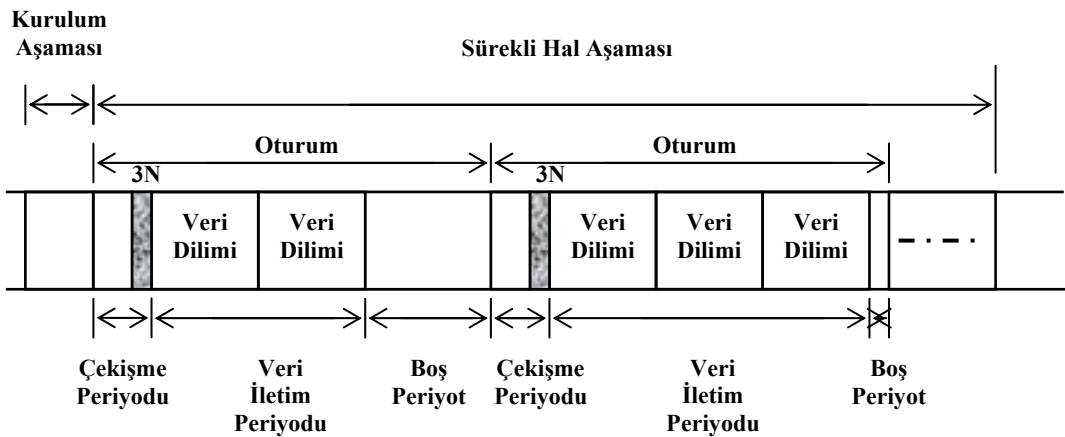
Her küme, küme başı olarak adlandırılan bir lider düğüm ve üye düğümlerden oluşmaktadır. Küme başı, üye düğümlerden veri toplama ve topladığı veriyi birleştirdikten sonra baz istasyonuna iletmekten sorumludur. Küme başının seçimi ve kümelerin oluşumu seçilen kümeleme algoritmasına bağlıdır. Literatürde KAA'lar için önerilen çok sayıda kümeleme algoritması bulunmaktadır (Abbasi ve Younis, 2007). LEACH, en bilinen kümeleme algoritmalarından biridir (Heinzelmann ve diğerleri, 2000).

Kümeleme algoritmasına göre küme başı belirlendikten sonra kalan düğümler, yine kümeleme algoritmasında belirtilen biçimde hangi kümeye dahil olacaklarına karar vermekte ve katıldıkları kümenin başına katılım bilgisini göndererek o kümenin üye düğümleri haline gelmektedirler. Küme başı ve üye düğümlerin belirlenmesi ile küme oluşum süreci tamamlanmış olur.

Şekil 4.2 ve 4.3'de sunulan M-BMA protokolünün çalışmasına ilişkin akış şemalarında ADBY'nin jenerik bir yaklaşım olduğunu vurgulamak amacıyla belirli bir kümeleme algoritmasının ismi verilmemektedir. Akış şemaları açıklanırken BMA protokolündekine benzer olarak küme oluşumunun LEACH'deki gibi olduğu varsayılmaktadır.

M-BMA protokolü, Şekil 4.1' de görüldüğü gibi diğer klasik çizelgeli protokollerdekine benzer şekilde kurulum ve sürekli hal aşamalarını içeren devirlerden meydana gelmektedir. Kurulum aşamasında belirli bir mekanizmaya göre küme başı seçilmekte ve küme oluşturulmaktadır. Küme oluşumunun gerçekleştiği kurulum aşamasının ardından sürekli hal aşamasına geçilmektedir. Sürekli hal aşaması, k adet oturuma bölünmektedir ve her oturum; bir çekişme periyodu, bir veri

iletim periyodu ve bir boş periyottan meydana gelmektedir. Sürekli hal aşamasında BMA protokolündeki gibi bir çekişme periyodu vardır (Şekil 4.1). Bununla birlikte kaynak düğümler; BMA’da olduğu gibi verileri olup olmadığını 1-bit göndererek bildirmek yerine, eşik ve ölçüm değerleri arasındaki fark verisini iletmektedirler. Bu amaçla her düğüme 4-bitlik dilim tahsis edilmektedir. Önceden belirlenen eşik değerine eşit veya daha büyük değer algılayan düğümler, kaynak düğüm olarak adlandırılırlar. Kaynak düğümler, çekişme periyodu esnasında kendilerine tahsis edilen 4-bitlik dilimlerde fark verisini küme başına iletmekte ve kaynak olmayan düğümler ise kendi 4-bitlik zaman dilimlerinde boş durumda bulunmaktadır. Bu sayede küme başı sadece kaynak düğümleri değil, aynı zamanda aynı veriye sahip düğümleri de bilmekte ve bu bilgiye göre veri dilimlerinin atanmasını gerçekleştirmektedir. Küme başı, kaynak düğümlerden aldığı fark değerlerini karşılaştırmakta, aynı olanları tespit etmekte ve aynı veriye sahip düğümlerden sadece bir tanesine veri dilimi tahsis etmektedir. Sözelimi iki ya da beş kaynak düğüm aynı veriye sahip olabilir. Ancak küme başı onlardan sadece bir tanesine veri dilimi tahsis etmektedir. Bu seçimde küme başına en yakın düğüm olma, en fazla enerjisi kalan düğüm olma vb. özellikler göz önünde bulundurulabilir. Bu tezde önerilen yaklaşımın genelliğini sağlamak amacıyla bu seçimin hangi ölçütlere göre yapılması gerektiğine dair bir sınırlama getirilmemektedir.



Şekil 4.1. M-BMA protokolü için bir devir gösterimi.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi daha sonra sistem, veri iletim periyoduna girmektedir. Üye düğümlerden hiçbirinin iletecek verisi yoksa, diğer bir ifade ile kaynak düğüm yoksa sistem sonraki oturuma kadar boş periyoda girer. Boş periyottaki tüm

düğümün radyoları kapalıdır. Veri iletim periyodu sırasında dilim tahsis edilen her kaynak düğüm, kendisine tahsis edilen dilimde radyosunu açmakta ve küme başına verisini iletmektedir. Diğer zamanlarda radyosunu kapalı halde tutmaktadır. Tıpkı kaynak olmayan düğümler gibi dilim tahsis edilmeyen düğümlerin de veri iletim periyodunda radyoları kapalı haldedir.

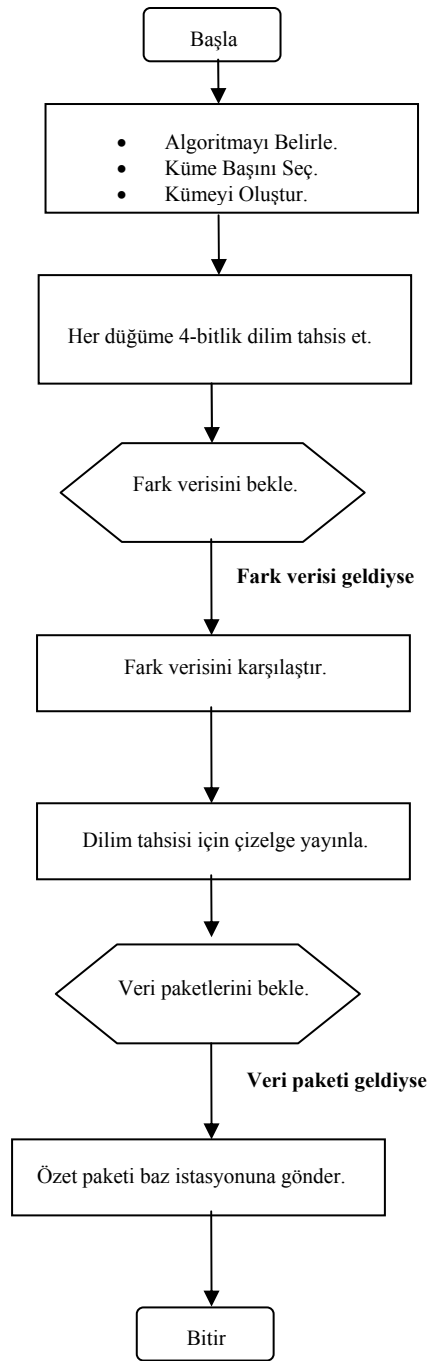
Bir oturum bittiğinde sonraki oturum, yine bir çekişme periyodu ile başlamakta ve yukarıda anlatıldığı biçimde tekrarlanmaktadır. Küme başı düğümlerden veri toplamakta, birleştirmekte ve baz istasyonuna iletmektedir. Önceden belirlenen süreden sonra sistem sonraki devire başlamaktadır.

Şekil 4.2’de M-BMA protokolünde küme başının çalışma şekline dair akış şeması verilmektedir. Öncelikle kümeleme algoritması belirlenmekte ve buna göre küme oluşumu gerçekleştirilmektedir. Akış şemasında herhangi bir kümeleme algoritmasının kullanılabilmesi düşünülmüş ve algoritma ismine yer verilmemiştir. Ancak M-BMA protokolünün BMA protokolüne benzerliği göz önünde bulundurularak BMA protokolündeki gibi LEACH’dekine (Heinzelmann ve diğerleri, 2000) benzer bir küme oluşum algoritmasına kullanıldığı varsayılmaktadır. Buna göre her düğüm küme başı olması hakkında kararını ağdaki diğer düğümlerden bağımsız olarak verir ve bu yüzden küme başlarını belirlemek için ekstra görüşme gerekli değildir. Algılayıcılar herhangi bir zamanda belirli bir olasılıkla kendi kendilerini yerel küme başları olarak seçerler. Bu karar, düğümün en son ne zaman küme başı olarak hizmet ettiğini hesaba katar ve uzun bir süredir küme başı olmayan bir düğümün kendisini seçmesi yakın zamanda küme başı olan bir düğümden daha olasıdır. Bu küme başları durumlarını ağdaki diğer düğümlere yayınlarlar. Küme başları bir CSMA MAC protokolü kullanırlar ve tüm küme başları aynı iletim enerjisini kullanarak duyurularını (advertisement) iletirler. Küme başı olmayan düğümler, bütün küme başı düğümlerin ilanlarını duymak için kurulumun bu aşaması esnasında alıcılarını açık tutmalıdırlar. Bu aşama tamamlandıktan sonra küme başı olmayan her düğüm, bu devir (round) için hangi kümeye ait olacaklarına karar verir. Bu karar, duyurunun alınan sinyal gücüne dayalıdır. Simetrik propagasyon kanalları varsayıldığından en büyük sinyal gücü ile duyulan küme başı ilanı, haberleşme için iletilen enerjinin en az miktarına ihtiyaç duyulan küme başıdır. Her düğüm, en az

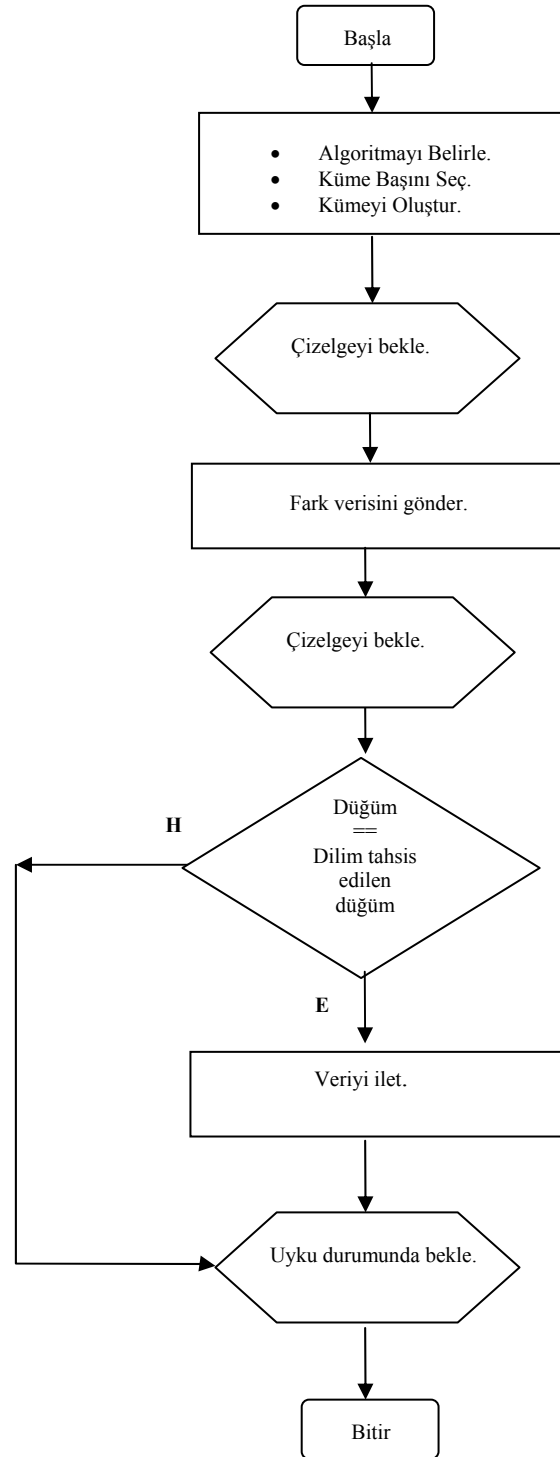
haberleşme enerjisi gerektiren küme başını seçerek ait olmak istediği kümeyi belirler. Her düğüm yine CSMA MAC protokolü kullanarak küme başına bu bilgiyi geri iletir. Bu aşama boyunca tüm küme başı düğümler alıcılarını açık tutmalıdırlar. Kümeler oluşturulduktan sonra sistem sürekli hal aşamasına girmektedir.

Sürekli hal aşamasının çekişme periyodu kısmında küme başı tüm düğümlere 4-bitlik dilimler tahsis etmektedir. Üye düğümlerden gelen fark verilerini beklemekte ve bu verileri karşılaştırdıktan sonra farklı veriye sahip olanlara veri diliminin atandığı çizelgeyi yayınlamaktadır. Gelen veri paketlerini birleştirdikten sonra hazırladığı özet paketi toplayıcı düğüme veya baz istasyonuna göndermektedir.

M-BMA protokolündeki bir üye düğümün çalışması Şekil 4.3'deki akış şeması ile verilmektedir. Yukarıda ayrıntılarına yer verildiği şekilde kurulum aşamasında küme oluşumu tamamlandıktan sonra her bir üye düğüm, küme başının fark verisini göndermesi için tahsis edeceği 4-bitlik dilimlerin olduğu TDMA-benzeri çizelgeyi beklemektedir. Her çekişme periyodu esnasında tüm düğümler radyolarını açık tutmaktadırlar. Eğer düğüm kaynak düğüm değilse söz konusu dilimleri boş bırakmaktadır ve doğrudan uyku durumuna geçmektedir. Kaynak düğüm ise, eşik ile ölçüm arasındaki farkı ilettikten sonra küme başının aktif düğümleri belirleyip yayınladığı çizelgeyi beklemektedir. Eğer düğüme çizelgede dilim atanmamışsa doğrudan uyku durumuna geçmektedir. Aktif düğüm olarak belirlenen düğüm ise, kendisine ayrılan dilimde verisini ilettikten sonra uykuya geçmektedir.



Şekil 4.2. M-BMA protokolünde küme başı için akış şeması



Şekil 4.3. M-BMA protokolünde üye düğüm için akış şeması

4.4. M-BMA Protokolünün Başarım Değerlendirmesi

Bu tezde tasarımı gerçekleştirilen M-BMA protokolünün başarım analizi analitik yöntemlerle yapılmıştır. Başarım, enerji tüketimi ve gecikme kriterlerine göre analiz edilmiş ve protokolün başarımı temel TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokolleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda çekişme periyodundaki bit hataları olasılığı dikkate alınmamaktadır.

Analiz için kümelerden oluşan bir KAA'da bir küme başı ve N tane küme başı olmayan düğümden oluşan bir küme ele alınmaktadır. Bir devir, k adet oturumdan meydana gelmektedir. Sayısal analiz için BMA protokolünde (Lazarou ve diğerleri, 2007) kullanılan Rockwell's WINS modeli (Raghunathan ve diğerleri, 2002) kullanılmıştır. Bu modelde alıcı-verici için iletim gücü 462 mW, alım gücü 346 mW, boş dinleme gücü 330 mW ve veri iletim hızı 24 kbps'dir. Bir veri paketi 250 bayt ve bir kontrol paketi 18 bayt boyutundadır. $P_i = P_e$ ve $T_{ch} = T_c = T_e$ olduğu varsayılmaktadır.

BMA protokolünde çekişme periyodunda her düğüme 1-bit dilim tahsis edildiğinden N tane üye düğümlü bir kümede N dilim olduğu bilinmektedir. M-BMA protokolünde ise N düğümlü ağda her düğüme fark verisini iletmesi için 4-bitlik dilim atandığı için 4N dilim gerekmektedir. BMA protokolünde kaynak-küme başı kontrol mesajı sadece 1-bit uzunluğunda olmasına rağmen kontrol paketi 1-bitlik kontrol mesajına ek olarak diğer OEK seviyesi ek yük bilgisini de içermektedir (Lazarou ve diğerleri, 2007). Ancak Kontrol paketinin tam içeriği bilinmediğinden her düğüme fark verisini iletmesi için 4-bitlik dilim tahsis edilmesi durumunda çekişme periyodunun yapısında ne tür bir değişiklik yapılması gerektiği bilinmemektedir. Bu durumda halihazırda çekişme periyodunun N tane dilim içerdiği bilgisinden hareketle geri kalan 3N tane dilim çekişme periyodunun mevcut yapısına ilave edilmiştir. Elbette çekişme periyodundaki bu artış, protokole bir olumsuzluk olarak yansiyabilir. Ancak bu halde dahi protokolün karşılaştırıldığı protokollerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Başka bir ifade ile, bu en kötü durumda bile protokol bir iyileşme sağlamaktadır. Çekişme periyodunun içeriğinin tam olarak

bilinmesi halinde, ilave edilen kısmın çekişme periyodunun içine dahil edilebilme olasılığı düşünülerek protokolün çok daha iyi neticeler verebileceği öngörülmektedir.

4.4.1. Enerji tüketimi değerlendirmesi

Tablo 3.1’de tanımlanan değişkenlere ek olarak zaman dilimi atanan düğüm sayısı ya da kısaca aktif düğüm sayısı m ile ifade edilmektedir. p' olasılığı, bir düğümün aktif düğüm olma olasılığını ya da aktif düğümlerin oranını temsil etmektedir. Üçüncü bölümde bir düğümün veriye sahip olup olmamasının bir Bernoulli denemesi olarak tanımlanmasına benzer şekilde kaynak düğümlerden farklı veriye sahip düğüm sayısı da Denklem (4.1) ile ifade edilmektedir.

$$m=np' \quad (4.1)$$

Bir çerçevede çekişme periyodunda bir kaynak düğümün harcadığı enerji, Denklem (4.2) yardımıyla hesaplanır.

$$E_{dn}=P_t(T_c+(3N/\text{veri hızı}))+P_i(T_c+(3N/\text{veri hızı}))+P_r(T_{ch}+(3N/\text{veri hızı})) \quad (4.2)$$

Veri iletim periyodunda zaman dilimi atanan m düğümden her biri bir çerçevede;

$$E_s=P_tT_d \quad (4.3)$$

kadar enerji harcamaktadır. Bir çerçevede kaynak olmayan bir düğümün tükettiği enerji ise;

$$E_{in}=NP_i(T_c+(3N/\text{veri hızı}))+P_r(T_{ch}+(3N/\text{veri hızı})) \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Küme başının enerji tüketimi “ mP_rT_d ”, “ $nP_r(T_c+(3N/\text{veri hızı}))$ ”, “ $(N-n)P_i(T_c+(3N/\text{veri hızı}))$ ” ve “ $P_t(T_{ch}+(3N/\text{veri hızı}))$ ”den oluşmaktadır ve böylece veri iletim periyodundaki enerji tüketimi Denklem (4.5) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$E_{ch} = nP_t(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + mP_r T_d + (N-n)P_i(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + P_t(T_{ch} + (3N/\text{veri hızı})) \quad (4.5)$$

M-BMA protokolünde bir devir boyunca harcanan toplam enerji ise Denklem (4.6) yardımıyla hesaplanmaktadır.

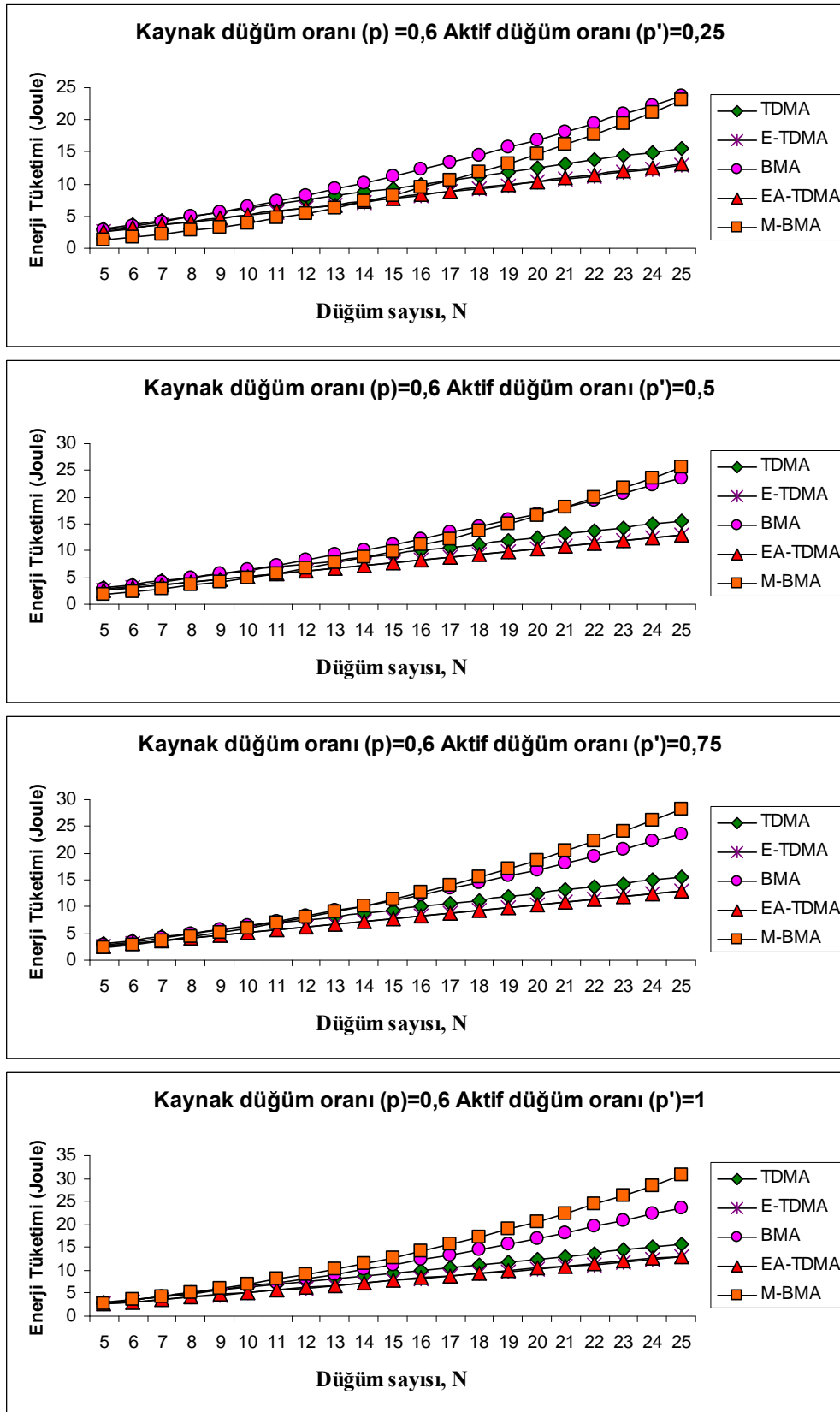
$$E_{M-BMA} = [n\{P_t(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + (N-1)P_i(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + P_r(T_{ch} + (3N/\text{veri hızı}))\} + mP_r T_d + (N-n)\{NP_i(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + P_r(T_{ch} + (3N/\text{veri hızı}))\} + nP_r(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + (N-n)P_i(T_c + (3N/\text{veri hızı})) + mP_r T_d + P_t(T_{ch} + (3N/\text{veri hızı}))] \quad (4.6)$$

Yukarıda verilen denklemler yardımıyla M-BMA protokolünün enerji tüketim analizi üç farklı duruma göre gerçekleştirilmektedir. Düğüm sayısının değişimi, düğüm oranlarının değişimi ve çerçeve sayısının değişimi durumlarına göre M-BMA protokolünün enerji tüketimi; temel TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokolleri ile karşılaştırılmaktadır.

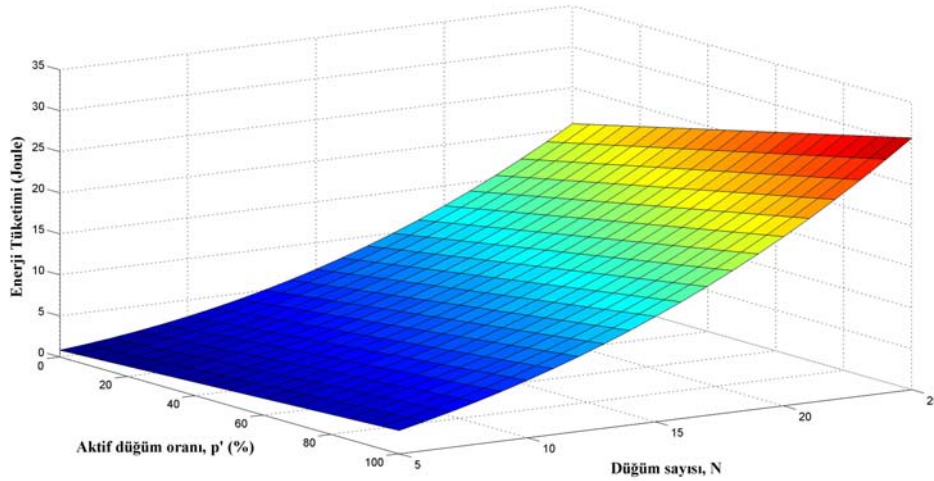
4.4.1.1. Düğüm sayısı değişimine göre enerji tüketimi

$p = 0,6$ sabit değer olarak alınmış ve p' değerleri 0,25 0,5 0,75 ve 1 seçilerek Şekil 4.4'deki grafikler elde edilmiştir. TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokollerinde dilim ataması veri içeriğini göz önünde bulundurmaksızın yapıldığı için bu protokollerin enerji tüketim değerleri aktif düğüm oranı (p' değeri) ile değişmemektedir. p' parametresinin M-BMA protokolü üzerindeki etkisi grafiklerde görülmektedir. p' parametresinin değerinin artması, daha fazla kaynak düğüme dilim atanması ve aktif düğüm oranının artması anlamına gelmektedir. Şekil 4.4'deki grafikten görüldüğü üzere aktif düğüm oranı %25'i olduğunda bu protokolün, belirli düğüm sayılarına kadar diğer protokollerin her birinden daha enerji etkin olduğu aralıklar vardır. Örneğin aktif düğüm oranı %25 ($p'=0,25$) için sırasıyla $N=17$ ve $N=25$ değerlerine kadar TDMA ve BMA protokollerinden daha iyi başarımlar göstermektedir. Diğer yandan düğüm sayısı arttığında M-BMA protokolünün enerji tüketiminin diğer protokollerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji tüketimi açısından 100 düğümlü bir ağ için her devirde optimum küme sayısı 5 olarak

belirtilmektedir (Heinzelman ve diğçerleri, 2002). Böyle bir ağda düğümlerin düzgün dağılımlı varsayıldığında küme başına düğüm sayısı 20'dir. Şekil 4.4'deki sonuçlar göz önünde bulundurularak M-BMA protokolünün küme tabanlı olay güdümlü KAA uygulamaları için enerji kullanımında verimlilik sağladığı sonucuna varılmaktadır (Sazak ve diğçerleri, 2010 b). Şekil 4.5'deki grafikte enerji tkçtiminin aktif düğüm oranı ve düğüm sayısı ile değişimi verilmektedir. Aktif düğüm oranındaki ve düğüm sayısındaki değişimler birlikte değerlendirildiğinde düğüm sayısındaki artışın enerji tkçtiminde çok daha olumsuz bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu grafikten hareketle, düğüm sayısı az kümelerden oluşan ve aktif düğüm oranı düşük (%25) uygulamalar için M-BMA protokolünün daha uygun olduğu sonucuna varılmaktadır.



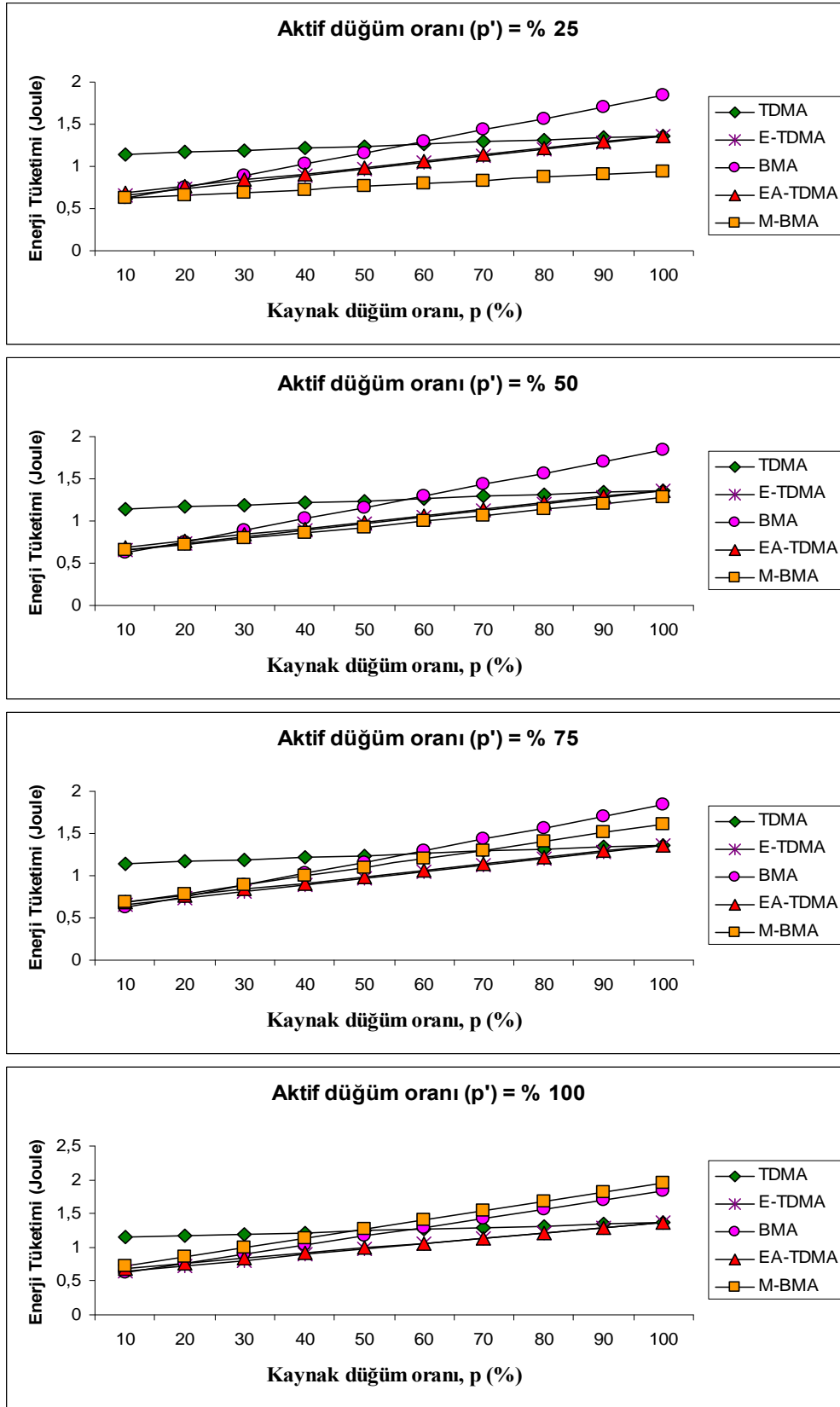
Şekil 4.4. Düğüm sayısına göre enerji tüketimi



Şekil 4.5. Düğüm sayısına ve aktif düğüm oranına göre enerji tüketiminin değişimi

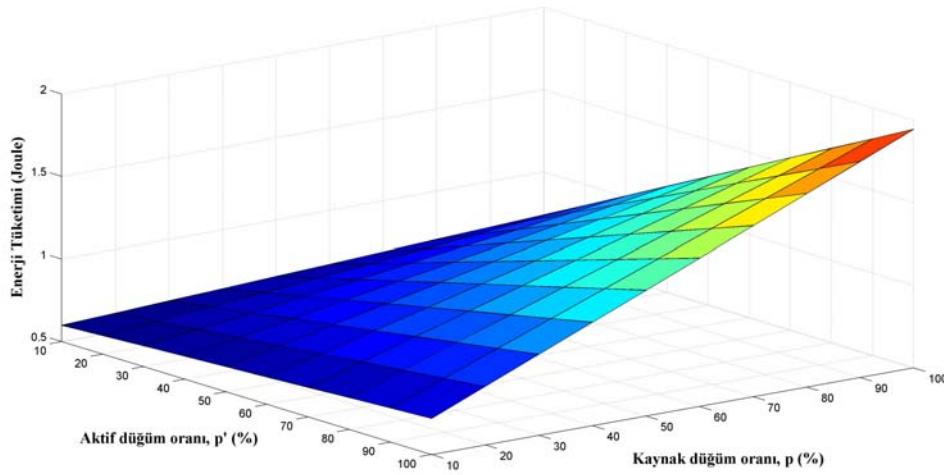
4.4.1.2. Aktif düğüm oranının değişimine göre enerji tüketimi

Şekil 4.6’da aktif düğüm oranının %25, %50, %75 ve %100 olduğu ($p'=0,25, 0,5, 0,75, 1$ değerleri) durumlar için kaynak düğüm oranının (p olasılığının) değişimine göre enerji tüketim grafikleri verilmiştir. $p'=0,25$ aktif düğüm oranının %25’inin olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.6’daki ilk grafikte $p'=0,25$ için M-BMA protokolünün karşılaştırma yapılan diğer protokollerin tümünden daha az enerji tükettiği görülmektedir. p' değeri arttıkça aktif düğüm sayısı artmakta, tahsis edilen düğüm sayısı artmaktadır. İletecek verisi olan düğümlerin tamamının farklı veriye sahip olması durumu (kaynak düğüm sayısı = aktif düğüm sayısı) grafikte $p'=1$ ile ifade edilmektedir ve M-BMA protokolü için en kötü durumdur. Ancak yoğun yerleşimden dolayı birbirine yakın çok sayıda düğümün bulunduğu olay güdümlü bir KAA uygulamasında, iletecek verisi olan düğümlerin tümünün farklı veriye sahip olması oldukça düşük bir ihtimaldir. Çerçeve sayısı (l) 2 ve düğüm sayısı (N) 10 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.6. Düğüm oranlarına göre enerji tüketimi.

Enerji tüketiminin kaynak ve aktif düğüm oranları ile değişimi Şekil 4.7'deki grafikte verilmektedir. Kaynak ve aktif düğüm oranlarındaki artışla birlikte enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir. Ancak aktif düğüm oranının yükselmesiyle birlikte enerji tüketiminin kaynak düğüm oranı ile çok fazla değişmediği gözlenmektedir. Ancak aktif düğüm oranının yükselmesiyle birlikte enerji tüketiminde yol açtığı artış net bir biçimde görülmektedir. Sonuç olarak enerji tüketiminde aktif düğüm oranının kaynak düğüm oranından daha fazla bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

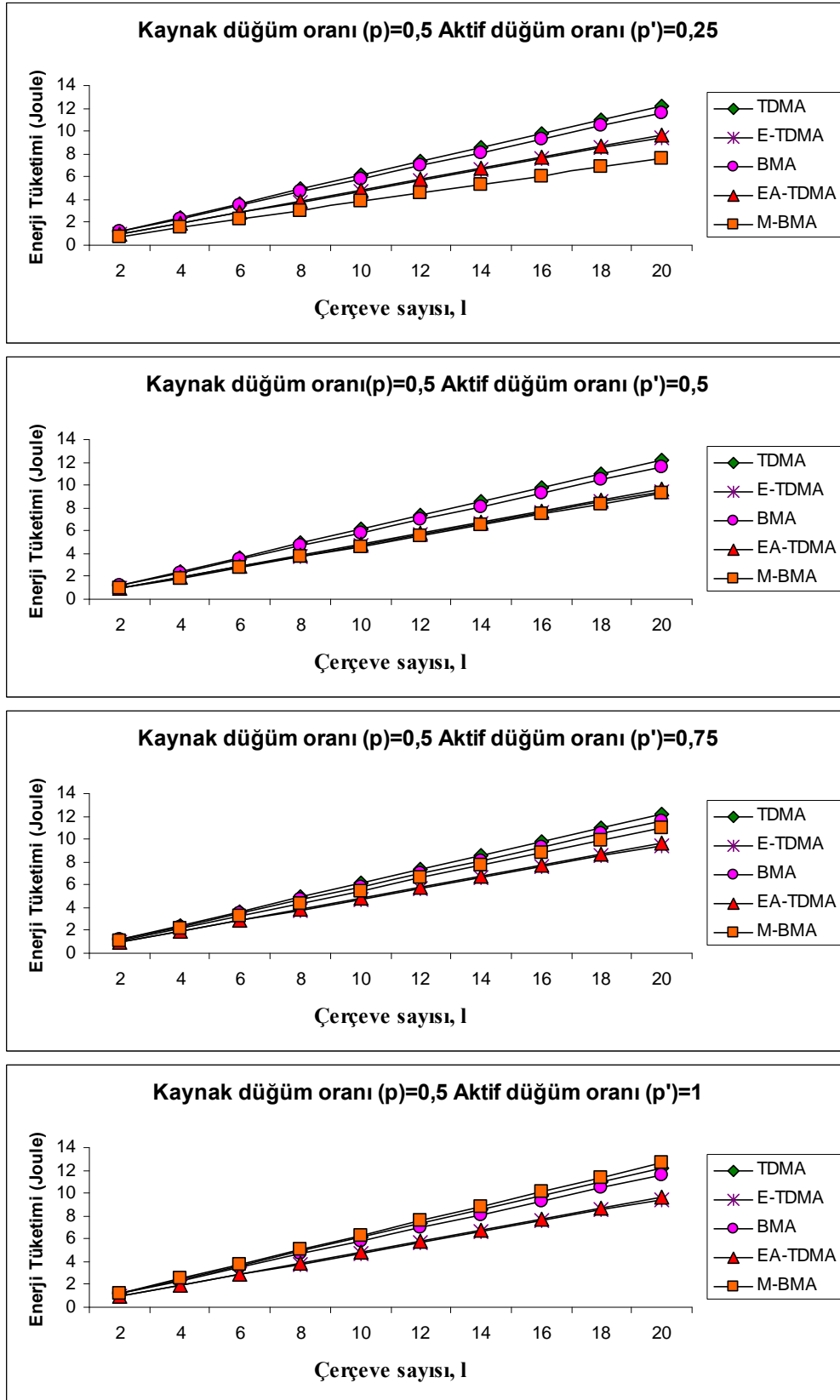


Şekil 4.7. Kaynak düğüm ve aktif düğüm oranlarına göre enerji tüketiminin değişimi.

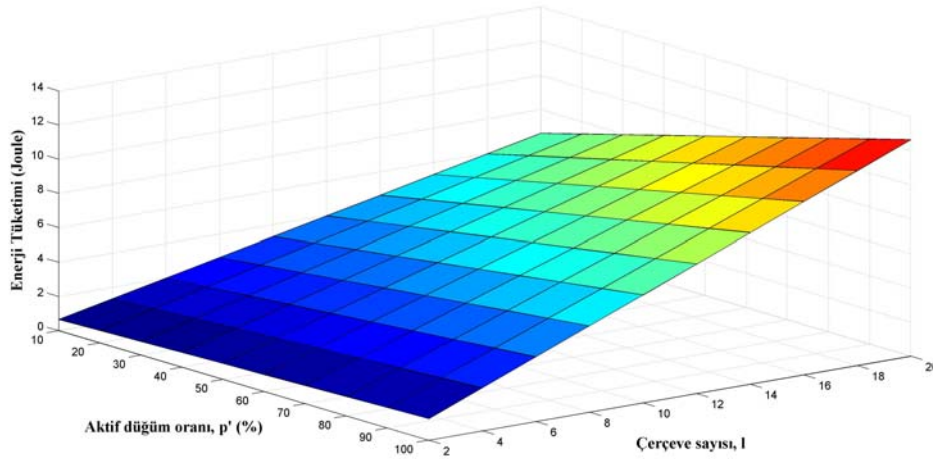
4.4.1.3. Çerçeve sayısı değişimine göre enerji tüketimi

Şekil 4.8'deki grafiklerde kaynak düğüm oranı %50 ($p=0,5$) olarak seçilmiştir. Diğer bir ifade ile, düğümlerin %50'si iletecek veriye sahiptir. Aktif düğümlerin oranı %25, %50, %75 ve % 100 ($p'=0,25$ 0,5 0,75 1) ile ifade edilerek enerji tüketim grafikleri elde edilmiştir. Örneğin 100 düğümlü bir ağda düğümlerin 50 tanesi iletecek veriye sahip olduğu bir durumu ele alalım. Eğer bu 50 düğümün yaklaşık 13 tanesi (%25) farklı veriye sahipse, M-BMA protokolü diğerlerinin hepsinden daha enerji etkindir. Hatta 100 düğümlü bir ağda 50 düğümün iletecek veriye sahip olması fakat bunlardan yarısının farklı veriye sahip olduğu durum ($p'=0,5$ durumu) için de karşılaştırılan diğer protokollerden daha enerji etkindir.

Önceki analizlere benzer şekilde aktif düğüm oranı yani p' olasılığının değeri arttıkça ($1'e$ yaklaştıkça) M-BMA protokolünün enerji etkinliği azalmaktadır. Ancak aynı olayı algılama amacıyla yoğun biçimde yerleştirilen birbirine yakın düğümlerin tamamının farklı veriye sahip olmasının pek mümkün bir durum olmadığını tekrarlamakta yarar vardır. Şekil 4.9'daki grafikte enerji tüketiminin çerçeve sayısı ve aktif düğüm oranı ile değişimi gösterilmektedir. Çerçeve sayısı ile enerji tüketimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu ve aktif düğüm oranının yükselmesinin bu doğrusal artışın eğimini arttırdığı görülmektedir. Bu grafikten görüldüğü gibi enerji tüketiminde çerçeve sayısının artmasının aktif düğüm oranı yükselmesinden daha fazla bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.8. Çerçeve sayısına göre enerji tüketimi



Şekil 4.9. Çerçeve sayısına ve aktif düğüm oranına göre enerji tüketiminin değişimi.

4.4.2. Gecikme değerlendirilmesi

Bir olay meydana gelir gelmez toplayıcı düğüme veya küme başına derhal bildirmek önemli olduğundan olay güdümlü uygulamalar için gecikme, çok önemli bir tasarım parametresidir. Geleneksel TDMA tabanlı OEK protokolleri, bu tür uygulamalar için çok uygun değildir.

Olay güdümlü KAA uygulamalarında daha az sayıda düğümün veri göndermesi KAA'nın daha az gecikmeye sahip olması anlamına gelmektedir. Ortalama paket gecikmesi, bir kaynak düğümün iletecek bir paketi olmasından paketin alıcı tarafından başarıyla alınmasına kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır (Lazarou ve diğerleri, 2007).

İletişim kanallarının hatasız (error-free) olduğu varsayılmaktadır. Bir veri paketini iletmek veya almak için gereken süre T_d ve bir kontrol paketini iletmek veya almak için gereken süre T_c ile temsil edilmektedir. Küme başının bir kontrol paketi iletmesi için gereken süre T_{ch} ile tanımlanmaktadır. Devir başına oturum veya çerçeve sayısı k parametresi ile gösterilmektedir. α , ısrarcı-olmayan CSMA'nın iş çıkarma oranı için kullanılmaktadır. N , küme başı olmayan düğüm sayısı ve p , bir düğümün kaynak düğüm olma olasılığı olmak üzere kaynak düğüm sayısı (n) $n=Np$ ifadesi ile verilmektedir. n_i , i . oturum veya çerçevedeki kaynak düğümlerin sayısıdır. Bir

düğümün veriye sahip olup olmaması bir Bernoulli denemesi olarak düşünüldüğünde $E[n_i]=Np=n$, $i=1,2,\dots,k$. Bir devirdeki kaynak düğümlerin toplam sayısının beklenen değeri (Lazarou ve diğerleri, 2007)'da verildiği gibi Denklem (4.7) yardımıyla hesaplanabilir.

$$E\left[\sum_{i=1}^k n_i\right] = \sum_{i=1}^k E[n_i] = kn \quad (4.7)$$

M-BMA protokolünün ortalama gecikmesi Denklem (4.8)'de verilmektedir.

$$L_{M-BMA} = \frac{N[T_c + (3N / \text{veri hızı})] + [T_{ch} + (3N / \text{veri hızı})] + mT_d}{n} \quad (4.8)$$

Denklemdaki m , veri dilimi atanmış kaynak düğüm sayısıdır; başka bir ifade ile farklı verisi olan kaynak düğüm sayısı ya da kısaca aktif düğüm sayısıdır. p' aynı veriye sahip kaynak düğümlerin oranını ve böylece aktif düğüm oranını ifade etmek üzere $m=np'$ dir.

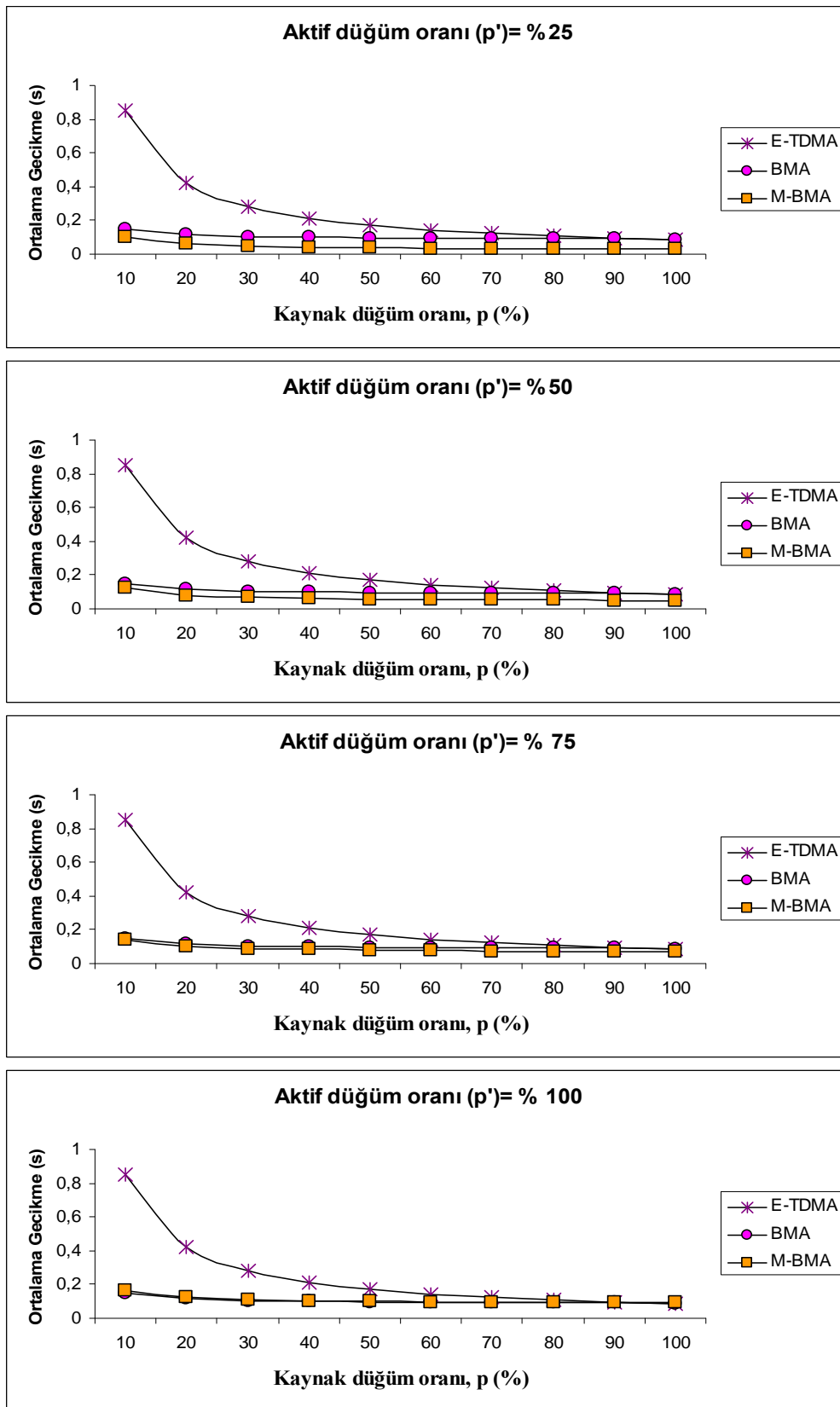
M-BMA protokolünün gecikme analizi düğüm oranlarının değişimlerine göre incelenmiş ve tasarlanan protokol E-TDMA ve BMA protokolleri ile kıyaslanmıştır.

E-TDMA, BMA ve M-BMA protokollerinin ortalama gecikme (L) değerlerinin farklı aktif düğüm oranları için kaynak düğüm oranlarına karşılık değişimleri Şekil 4.10'da verilmektedir. Düğüm sayısı (N) 10 olarak ve devir başına oturum/çerçeve sayısı (k) 4 olarak kabul edilmektedir. Israrcı-olmayan CSMA protokolünün iş çıkarma oranı (α), (Kleinrock ve Tobagi, 1975)'de olduğu gibi 0,815 olarak alınmaktadır. Şekil 4.10'daki grafiklerden de görüldüğü üzere büyük p değerleri için hepsi benzer gecikmelere sahiptir. Bununla birlikte kaynak düğüm oranı sıfıra yaklaştıkça E-TDMA protokolünün ortalama gecikmesi üstel olarak artarken BMA ve M-BMA protokolleri için düşük kalmaktadır. BMA ve M-BMA protokolleri paralel eğilimlere sahip olmasına karşın M-BMA protokolünün gecikmesi daha düşüktür. BMA protokolünde sadece kaynak düğümlere veri dilimleri atanmakta, veri dilimlerinin sayısı azaltılmakta ve böylece gecikme iyileştirilmektedir. M-BMA

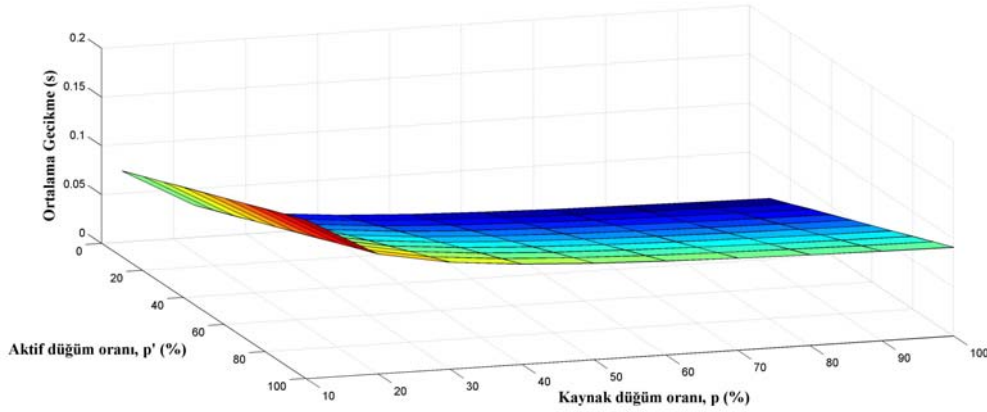
protokolünde ise, sadece farklı veriye sahip kaynak düğümlere veri dilimi tahsis edilerek, ileten kaynak düğümlerin sayısı azaltılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde daha düşük gecikme sonuçlarının elde edileceği açıktır.

M-BMA protokolü için gecikmenin bir düğümün kaynak düğüm olma olasılığına karşı değişimi aktif düğümlerin oranına göre verilmektedir. M-BMA protokolünün ortalama gecikmesi karşılaştırılan tüm olasılık değerleri için E-TDMA protokolününkinden daha düşüktür. Yoğun yerleşimli olay güdümlü KAA uygulamaları için tüm kaynak düğümlerin farklı veriye sahip olduğu ($p'=1$) bir durumla karşılaşmak oldukça güçtür. Bu protokol için en kötü durum olarak düşünülebilecek bir durumda bile, M-BMA protokolünün gecikmesinin BMA protokolünün gecikmesi ile hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. (Sazak ve diğerleri, 2010 c)'de TDMA tabanlı KAA OEK tasarımı için önerilen içerik tabanlı dilim tahsis yaklaşımının gecikme üzerindeki etkisi incelenmektedir.

M-BMA protokolünde fark verisi, 1-bitlik dilim yerine 4-bitlik dilimlerde iletiildiği için çekişme periyodu arttırılmaktadır. Diğer yandan atanan veri dilimleri sayısının azaltılması, gecikmede de azalmayı sağlamaktadır. Şekil 4.11'de M-BMA protokolünün ortalama gecikmesinin kaynak ve aktif düğüm oranlarına göre değişim grafiği verilmektedir. Buna göre kaynak düğüm oranının düşük değerleri için (%10) nispeten daha yüksek bir gecikme olsa da kaynak düğüm oranındaki değişimin gecikme üzerinde çok fazla bir etkisi olmayıp yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Öte yandan aktif düğüm oranı artması, daha çok düğümün veri iletmesi anlamına geldiği için gecikme de artmaktadır.



Şekil 4.10. Düğüm oranlarına göre gecikmenin değişimi.



Şekil 4.11. Kaynak düğüm ve aktif düğüm oranlarına göre gecikmenin değişimi

4.5. Sonuç

Birçok KAA uygulaması için çok sayıda algılayıcı düğümün yoğun yerleşimi sonucunda veri fazlalığı söz konusudur. Birden fazla düğümden gelen aynı veri ek bilgi sağlamamasının yanı sıra enerji tüketimi ve gecikme açısından da olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu bölümde kaynak düğümlerden farklı verisi olanlara dilim tahsis edilmesine dayalı yeni bir yaklaşım (ADBY) önerilmektedir. Aynı veriye sahip düğümlerden sadece birine dilim tahsis edilmekte diğerlerinin uyku durumunda olması sağlanarak iletim yapacak düğüm sayısı azaltılmaktadır. Bu sayede veri iletim fazlalığı azaltılmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Olay güdümlü KAA uygulamaları için ADBY ile geliştirilen yeni bir TDMA-tabanlı OEK protokolü (M-BMA) tasarlanmıştır.

M-BMA protokolü temel TDMA, E-TDMA, BMA ve EA-TDMA protokolleri ile enerji tüketimi bakımından karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4'deki düğüm sayısına göre enerji tüketiminin değişimi grafiğinden görüldüğü üzere aktif düğüm oranı %25'i olduğunda M-BMA protokolü, belirli düğüm sayılarına kadar diğer protokollerin her birinden daha enerji etkin olduğu aralıklar vardır. Örneğin aktif düğüm oranı %25 için $N=17$ 'ye kadar TDMA'dan ve $N=25$ 'e kadar BMA protokollerinden daha iyi başarımlar göstermektedir. Enerji tüketiminin düğüm oranlarına karşılık değişiminin verildiği Şekil 4.6'daki ilk grafikte aktif düğüm oranının %25 olduğunda ($p'=0,25$) M-BMA protokolünün karşılaştırma yapılan diğer protokollerin tümünden daha az enerji tükettiği görülmektedir. Çerçeve sayısına göre enerji tüketiminin değişimi

Şekil 4.8'deki grafiklerle ifade edilmektedir. Kaynak düğüm oranı %50 ($p=0,5$) olarak seçilmiştir. Aktif düğüm oranı ise %25, %50, %75 ve % 100 ($p'=0,25$ 0,5 0,75 1) ile ifade edilerek enerji tüketim grafikleri elde edilmiştir. Örneğin 100 düğümlü bir ağda düğümlerin 50 tanesi iletecek veriye sahip olduğu bir durumu ele alalım. Eğer bu 50 düğümün yaklaşık 13 tanesi (%25) farklı veriye sahipse, Şekil 4.8'deki ilk grafikten görüldüğü üzere M-BMA protokolü diğerlerinin hepsinden daha enerji etkindir. Hatta 100 düğümlü kaynak düğüm sayısının 50 aktif düğüm sayısının 25 olduğu durum ($p'=0,5$ durumu) için de karşılaştırılan diğer protokollerden daha enerji etkindir.

Olay güdümlü KAA uygulamalarında veri iletimi mümkün olduğunca hızlı gerçekleştirilmelidir. TDMA tabanlı OEK protokolleri için veri dilimi sayısının az olması daha düşük gecikme anlamına gelmektedir. M-BMA protokolünde atanan veri dilimi sayısı azaltıldığı için gecikmede de azalma sağlanmaktadır. Şekil 4.10'daki düğüm oranlarına göre gecikmenin değişiminin verildiği grafiklerden de görüldüğü üzere kaynak düğüm oranının yüksek olduğu değerler (büyük p değerleri) için karşılaştırılan protokollerin hepsi benzer gecikmelere sahiptir. Bununla birlikte kaynak düğüm oranı sıfıra yaklaştıkça E-TDMA protokolünün ortalama gecikme üstel olarak artarken BMA ve M-BMA protokolleri için düşük olarak seyretmektedir. BMA ve M-BMA protokolleri paralel eğilimlere sahip olmasına karşın M-BMA protokolünün gecikmesi daha düşüktür. M-BMA protokolünün ortalama gecikmesi karşılaştırılan tüm durumlar için E-TDMA protokolününkinden daha düşüktür.

Aktif düğüm oranı arttıkça farklı veriye sahip düğüm sayısı artmakta, tahsis edilen düğüm sayısı artmaktadır. Kaynak düğümlerin tamamının aktif düğüm olması durumu, grafiklerde $p'=1$ ile ifade edilmektedir ve M-BMA protokolü için en kötü durumdur. Fakat çok sayıda düğümün yoğun olarak yerleştirildiği olay güdümlü bir KAA'da kaynak düğümlerin hepsinin aktif düğüm olması olasılığı oldukça zayıftır. Bu protokol için en kötü durum olarak düşünülebilecek bir durumda bile, M-BMA protokolünün gecikmesinin BMA protokolünün gecikmesi ile hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

ADBY ile geliştirilen M-BMA protokolünün enerji tüketimi ve gecikmede sağladığı iyileştirmeler göz önünde bulundurularak bu içerik tabanlı çizelgeleme yaklaşımının özellikle olay güdümlü KAA uygulamaları için geliştirilebilecek tüm OEK protokollerine uyarlanabilir olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KAA'ların değişik alanlardaki hızla artan uygulamaları dikkate alınarak ağ başarımının, genellikle küçük algılayıcı düğümlerin kablosuz iletişim ortamını etkin ve adil paylaşımı ile en iyileştirilmesi ve ağ ömrünün, verimli düğüm enerji kullanımı stratejileri ile arttırılması bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Bu tezde kablosuz algılayıcı ağlar için yeni bir aktif düğüm belirleme yöntemi önerilmiş ve bu yöntemin kullanıldığı yeni bir ortam erişim kontrol protokolü geliştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında aşağıda özetlenen iki ana yenilik bulunmaktadır.

1. Aktif Düğüm Belirleme Yöntemi (ADBY) olarak adlandırılan içerik tabanlı çizelgeleme yaklaşımı önerilmiştir.

ADBY, kaynak düğümlerin aynı verileri tekrarlamasının meydana getirdiği gereksiz iletimlerin ortadan kaldırılması esasına dayanmaktadır. ADBY ile, kaynak düğümlerin tümünün veri iletmesinin yerine aktif düğüm adı verilen farklı veriye sahip düğümlerin veri iletmesine imkan sağlanmaktadır.

Önerilen ADB yöntemi ile elde edilen dört temel katkı bulunmaktadır:

- Daha fazla düğümün uyuması sağlanarak enerji kaynaklarının etkin kullanımına katkı sağlanmıştır.
- İletim yapan düğüm sayısının azalması ile gecikmede iyileştirme sağlanmıştır.

- Aynı veriyi iletecek düğümlerden sadece birine zaman dilimi tahsis edilmesi sayesinde veri fazlalığı ortadan kaldırılmıştır.
- Bu tez çalışmasında olay güdümlü KAA uygulamalarında kullanılan TDMA-tabanlı OEK protokolleri için önerilen bu yeni çizelgeleme yaklaşımı jenerik bir yaklaşımdır. Herhangi bir OEK protokolüne uyarlanabilir.

2. ADBY'nin etkinliğini göstermek üzere M-BMA ismi ile anılan yeni bir OEK protokolü geliştirilmiştir. Geliştirilen M-BMA protokolünün eşleniği olan protokoller ile analitik yöntemlerle karşılaştırılması suretiyle başarımlı analizlerine yer verilmiştir.

ADBY'nin uyarlandığı OEK protokolüne sağladığı katkıyı göstermek üzere yeni bir OEK protokolü tasarlanmıştır. Bu yeni protokol, olay güdümlü KAA uygulamaları için geliştirilmiş BMA protokolünden yola çıkılarak geliştirilmiş ve BMA protokolüne benzer bir düşünceye sahip olduğu için değiştirilmiş BMA (Modified-BMA, M-BMA) olarak isimlendirilmiştir. M-BMA, TDMA-tabanlı bir OEK protokolüdür. M-BMA protokolünde, düğüm sayısı değişiklikleri ve düğümlerin farklı veri iletim ihtiyaçları göz önünde bulundurularak aktif düğüm tabanlı zaman dilimi tahsisi gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla kümelerdeki aktif düğümler ADBY ile belirlenmekte ve zaman dilimi tahsisi buna göre yapılmaktadır. Diğer bir deyişle düğümlerin veri iletim ihtiyacının yanı sıra iletilecek verinin uygulama açısından anlam ifade etmesi de göz önünde bulundurulmaktadır. Bu tür uygulamalar için geliştirilen M-BMA protokolünün küme tabanlı olay güdümlü KAA uygulamaları için uygun bir çözüm olduğu vurgulanmıştır. Bu protokolün enerji tüketim ve gecikme parametrelerine göre analitik ifadeleri elde edilmiştir.

M-BMA protokolü ile aşağıda ifade edilen katkılar sağlanmıştır:

- M-BMA protokolünün enerji tüketiminde sağladığı fayda; TDMA, E-TDMA (Energy-efficient TDMA), BMA (Bit-map assisted) ve EA-TDMA (Energy-Efficient Adaptive TDMA) protokolleri ile analitik karşılaştırmaları yapılarak gösterilmiştir. M-BMA protokolünün enerji tüketimindeki katkısı, yukarıda

sözü edilen protokoller ile düğüm sayısına, düğüm oranlarına ve çerçeve sayısına göre başarımları analizleri yapılarak ortaya koyulmuştur.

- M-BMA protokolünün gecikme bakımından sağladığı iyileştirme; TDMA, E-TDMA, BMA protokolleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Amacı, olay güdümlü KAA uygulamaları için geliştirilecek OEK protokollerine enerji etkin ve gecikmesi daha az olan yeni ve genel bir yaklaşım geliştirmek olan tez çalışmasının bu hedefi gerçekleştirmiş olmanın yanı sıra yeni bir OEK protokolü (M-BMA) de ortaya koyduğu görülmektedir.

5.1. Öneriler

Tez çalışmasında, KAA'lar için yeni bir çizelgeleme yaklaşımı ve onun uyarlandığı yeni bir OEK protokolü gerçekleştirilmiştir. Bu tezden hareketle gelecekte yapılabilecek çalışmalar şu şekilde ifade edilebilir:

- Bu tez çalışmasında ADBY'nin çalışma mantığı açıklanmış ve herhangi bir OEK protokolüne kolayca uyarlanabilir olduğu vurgulanmıştır. ADBY'nin literatürde mevcut OEK protokollerine uyarlanarak yaptığı etki karşılaştırmalı başarımları analizleri yapılarak gösterilebilir.
- Tez çalışmasında analitik ifadelerine yer verilen M-BMA protokolü, benzetim yöntemi ile gerçekleştirilebilir.
- Bu tezde analitik karşılaştırmalar ile elde edilen sonuçların benzetim çalışmaları ile desteklenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

ABBASI, A. and YOUNIS, M., A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks, *Computer Communications*, Vol. 30, pp. 2826-2841, 2007.

AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., CAYIRCI, E., *Wireless Sensor Networks: A Survey*, *Computer Networks*, 38(4), 393–422, 2002.

AKYILDIZ I. F., VURAN M. C., AKAN O. B., *On Exploiting Spatial and Temporal Correlation in Wireless Sensor Networks*, *Proceedings of WiOpt'04: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, University of Cambridge, UK, March 2004.

ALI, M., SAIF, U., DUNKELS, A., VOIGT, T., RÖMER, K., LANGENDOEN, K., POLASTRE, J., UZMI, Z.A., *Medium Access Control Issues in Sensor Networks*, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Volume 36, Number 2, pp.33-36, April 2006.

BIAGIONI, E., *PODS: Interpreting Spatial and Temporal Environmental Information*. In *Usability Evaluation and Interface Design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents, and Virtual Reality*, Volume I of the *Proceedings of HCI International 2001*, the 9th International Conference on Human-Computer Interaction, pages 317–321, New Orleans, Louisiana, August 2001.

BIAGONI, E., BRIDGES, K., *The Application of Remote Sensor Technology to Assist the Recovery of Rare and Endangered Species*, *International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 16, pp. 315-324, Aug. 2002.

BUSCH, C., MAGDON-ISMAIL, M., SIVRIKAYA, F., YENER, B., *Contention-Free MAC Protocols for Wireless Sensor Networks*, In *Proceedings of the 18th Annual Conference on Distributed Computing (DISC 2004)*, pp. 245-259, Amsterdam, The Netherlands, October 2004.

CERPA, A., ELSON, J., ESTRIN, D., GIROD, L., HAMILTON, M., ZHAO, J., *Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology*, *1st ACM SIGCOMM Workshop Data Commun. Latin Am. Caribbean*, 31(2), 20-41, San Jose, Costa Rica, April 2001.

CHEN, D., VARSHNEY, P. K., *QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey*, *Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*, Las Vegas, Nevada, USA, June 21-24, 2004.

CHONG, C.-Y., KUMAR, S.P., Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges, Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No.8, pp. 1247-1256, Aug. 2003.

DELIANG , L., FEI, P., Energy-efficient MAC Protocols for Wireless Sensor Networks, Information and Communications Technologies, Beihang University, Beijing,100083 , March 2009.

DOOLIN, D. M., GLASER, S.D., SITAR, N., Software Architecture for GPS-enabled Wildfire Sensorboard, TinyOS Technology Exchange, University of California, Berkeley CA, February 26, 2004.

DOOLIN, D., SITAR, N., Wireless Sensors for Wildfire Monitoring, In SPIE Symposium on Smart Structures& Materials, San Diego, CA, March 2005.

DULMAN, S., HAVINGA, P. J. M., Introduction to Wireless Sensor Networks, Embedded Systems Handbook, Second Edition, R. Zurawski (Editor), CRC Press, 2009.

ERGEN S.C., VARAIYA, P., PEDAMACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor Networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 5, No. 7, pp. 920-930, July 2006.

ESTRIN, D., GOVINDAN, R., HEIDEMANN, J., KUMAR, S., Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks, In Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile Computing and Networks, MobiCOM'99, pp. 263-270, Seattle, Washington, August 15-20, 1999.

Firebug projesi, <http://firebug.sourceforge.net/> , erişim tarihi:2008.

GHARAVI, H., KUMAR, S. P., Proceedings of the IEEE: Scanning the Special Issue on Sensor Networks and Applications, Vol. 91; Part 8, pp. 1151-1153, Aug. 2003.

GONG, H., LIU, M., YU, L., and WANG, X., An Event Driven TDMA Protocol for Wireless Sensor Networks, in Proceedings of WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, Vol. 2, pp. 132-136, Kunming, Yunnan, China, January 6-8, 2009.

GONG, H., LIU, M., CHEN, G., and ZHANG, X., A Study on Event-Driven TDMA Protocol for Wireless Sensor Networks, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2010, Article ID 169132, 2010.

HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A., BALAKRISHNAN, H., Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, HICSS 2000, Maui, 8020–8029, January 2000.

HEINZELMAN, W. B., CHANDRAKASAN, A P., BALAKRISHNAN, H., An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, *IEEE On Wireless Communications Trans.* Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, October 2002.

ILYAS, M., MAHGOUB, I., *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, CRC Press, 2005.

JUANG, P., OKI, H., WANG, Y., MARTONOSI, M., PEH, L.S., RUBENSTEIN, D., Energy-efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with Zebanet, In *Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS 2002)*, October 2002.

KARL, H., WILLIG, A., *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Wiley and Sons, 2006.

KREDO, K., MOHAPATRA, P., Medium Access Control in Wireless Sensor Networks, *Computer Networks*, Vol. 51, No. 4, pp. 961-994, 2007.

KLEINROCK, L., TOBAGI, F., Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple Access Modes and Their Throughput-delay Characteristics, *IEEE Trans. Commun.* 23, (12), pp. 1400-1416, 1975.

KULKARNI, S. S., TDMA Services for Sensor Networks, *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, Mar. 2004, pp. 604–609.

LANGENDOEN, K. G., Medium Access Control in Wireless Sensor Networks, In H. Wu and Y. Pan (Eds.) *Medium Access Control in Wireless Networks*, pp. 535-560, Nova Science Publishers, Inc.2008.

LAZAROU, G. Y., LI, J., PICONE, J., A Cluster-based Power-efficient MAC Scheme for Event-driven Sensing Applications, *Ad Hoc Networks*, Elsevier, Vol.5, Issue 7, pp. 1017-1030, September 2007.

LE, H., GUYENNET, H., ZERHOUNI, N., Redundant Communication Avoidance for Event-Driven Wireless Sensor Network, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol.7, No.3, pp. 193-200, March 2007.

LI, J., LAZAROU, G. Y., Modeling the Energy Consumption of MAC Schemes in Wireless Cluster-Based Sensor Networks, In *Proceedings of the 15th IASTED International Conference on Modeling and Simulation*, MSO, pp. 313-318, Marina del Rey, California, USA, March 2004.

LI, J., A Bit-map Assisted Energy-efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks, MSc. Thesis, Electrical Engineering, Mississippi State University, May 2004.

LI, J., LAZAROU, G. Y., A Bit-map Assisted Energy-efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks, in Proceedings of 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04), pp. 55-60, Berkeley, California, USA, 2004.

LI, S., QIAN, D., LIU, Y., BAI, Y., Energy Efficient Event Detection and Dissemination Scheme for Clustered Wireless Sensor Networks, ICWMC, pp.105-109, 2009 Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2009.

LI, H., TAN, J., Heartbeat Driven Medium Access Control for Body Sensor Networks, IEEE Transactions on Information Technology In Biomedicine, Vol. 14, No. 1, January 2010.

LIN, R., WANG, Z., SUN, Y., Energy Efficient Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks and Its State-of-art, Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on, 1:669–674 Vol. 1, May 2004.

LIU, Y., NI, L. M., A New MAC Protocol Design for Long-term Applications in Wireless Sensor Networks, ICPADS, Vol. 1, pp.1-8, 13th International Conference on Parallel and Distributed Systems - Volume 1 (ICPADS'07), 2007.

MADDEN, S. R., FRANKLIN, M. J., HELLERSTEIN, J. M., HONG, W., The Design of an Acquisitional Query Processor for Sensor Networks, in Proc. (SIGMID'03), 1, 491-502, San-Diego, CA, June 2003.

MAINWARING, A., POLASTRE, J., SZEWCZYK, R., CULLER, D., ANDERSON, J., Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring, pp. 88-97, WSN'02, September 2002, Atlanta, Georgia, USA.

NIEBERG, T., DULMAN, S., HAVINGA, P., VAN HOESEL, L., WU, J., Collaborative Algorithms for Communication in Wireless Sensor Networks, Ambient Intelligence: Impact on Embedded Systems, Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-7668-1, Nov. 2003.

PATEL, N., BHALEKAR, M., NIRAV, P., RIZVI, S.S., ELLEITHY, K., Reducing Power Consumption in Sensor Network Using Sensor MAC Protocol, 2009 ASEE Northeast Section Conference, University of Bridgeport, Connecticut, April 3-4, 2009.

POTTIE, G. J., KAISER, W. J., Wireless Integrated Network Sensors, Communications of the ACM Vol.43, No.5, pp. 51-58, 2000.

RAGHUNATHAN, V., SCHURGERS, C., PARK, S., SRIVASTAVA, M. B., Energy-aware Wireless Microsensor Networks, IEEE Signal Processing Magazine, pp. 40-50, March 2002.

RAJENDRAN, V., OBRACZKA, K., ACEVES, J. G.L., Energy Efficient, Collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks[C], 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), pages 181–192, Los Angeles, CA, November 2003.

ROEDIG, U., Session Introduction: Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 30th EUROMICRO Conference (EUROMICRO'04), 31 Aug.-3 Sept. 2004.

SANKARASUBRAMANIAM, Y., AKYILDIZ, I. F., MCLAUGHLIN, S. W., Energy Efficiency Based Packet Size Optimization in Wireless Sensor Networks, in Proc. of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, Anchorage, Alaska, 2003.

SAZAK, N., ERTÜRK, İ., KÖKLÜKAYA, E., Aktif Düğüm Esaslı Enerji Etkin Kablosuz Algılayıcı Ağ Tasarımı, IV. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu (İTUSEM 2009), Adana, 15-16 Ekim 2009.

SAZAK, N., ERTURK, I., CAKIROGLU, M., KOKLUKAYA, E., A Content Based Scheduling Approach for Wireless Sensor Networks MACs, International Symposium on Sustainable Development (ISSD 2010), Sarajevo, June 8-9, 2010.

SAZAK, N., ERTURK, I., KOKLUKAYA, E., CAKIROGLU, M., An Energy Efficient MAC Protocol for Cluster Based Event Driven WSN Applications, 18th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2010), Split-Bol, Croatia, September 23-25, 2010.

SAZAK, N., ERTURK, I., KOKLUKAYA, E., CAKIROGLU, M., An Event Driven Slot Allocation Approach to TDMA Based WSN MAC Design and Its Effect on Latency, Sixth International Computer Engineering Conference (ICENCO 2010), Cairo, Egypt, December 27-29, 2010.

SCHWIEBERT, L., GUPTA, S. K. S, WEINAMANN, J., Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors, ACM MOBICOM 2001, 151-165, Rome, July 2001.

Self-healing Mines, <http://www.darpa.mil/ato/programs/SHM/>, erişim tarihi: 2008.

SHAFIULLAH, G. M., THOMPSON, A., WOLFS, P.J., ALI, S., Energy-efficient TDMA MAC Protocol for Wireless Sensor Networks Applications, Proceedings of International Workshop on Internet and Distributed Computing, Khulna, Bangladesh, December 2008.

SHWE, H. Y., XIAO-HONG, J., HORIGUCHI, S., Energy Saving in Wireless Sensor Networks, Journal of Communication and Computer, ISSN 1548-7709, USA, Volume 6, No.5 (Serial No.54), May 2009.

SIMON, G., MAROTI, M., LEDECZI, A., BALOGH, G., KUSY, B., NADAS, A., PAP, G., SALLAI, J., FRAMPTON, K., Sensor Network-based Countersniper System, 2nd ACM Conf. On Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004), pp. 1-12, Baltimore, MD, Nov. 2004.

SOHRABI, K., POTTIE, G. J., Performance of a Novel Self-Organization Protocol for Wireless Ad Hoc Sensor Networks, Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference (VTC'99), pp. 1222–1226, 1999.

SOHRABI, K., GAO, J., AILAWADHI, V., POTTIE, G. J., Protocols for Self-organization of a Wireless Sensor Network, IEEE Personal Communications, pp.16–27, October 2000.

SOHRABI, K., MINOLI D., ZNATI, T., Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols and Applications, John Wiley & Sons Inc., 2007.

SRIVASTAVA, M., MUNTZ, R., POTKONJAK, M., Smart Kindergarten: Sensor-based Wireless Networks for Smart Developmental Problem-solving Environments, ACM 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM 2001, 132-138, Rome, Italy, 2001.

TOBAGI, F., KLEINROCK, L.: Packet Switching in Radio Channels: Part IV-Stability Considerations and Dynamic Control in Carrier Sense Multiple-Access, IEEE Transactions on Communications, Vol. 25, No. 10, pp. 1103-1119, October 1977.

TUBAISHAT, M., MADRIA, S., Sensor Networks: An Overview, IEEE Potentials, Vol.22, No. 2, pp.20-23, April-May 2003.

VAN HOESEL, L., NIEBERG, T., KIP, H., HAVINGA, P., Advantages of a TDMA Based, Energy-efficient, Self-organizing MAC Protocol for WSNs, In IEEE VTC 2004 Spring, Milan, Italy, May 2004.

VAN HOESEL, L., HAVINGA, P., A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks: Reducing Preamble Transmissions and Transceiver State Switches, Proceedings of the International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2004), Tokyo, Japan, June 2004.

VLAJIC, N., XIA, D., Wireless Sensor Networks: To Cluster or Not To Cluster?, pp.258-268, 2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM'06, 2006.

WEISER, M., The Computer for the 21st Century, SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review 3, 3-11, 1999.

XU, N., A Survey of Sensor Network Applications, Survey Paper for CS694a, Computer Science Department, University of Southern California, 2003, <http://courses.cs.tamu.edu/rabi/cpsc617/resources/sensor%20nw-survey.pdf>.

YADAV, R., VARMA, S., MALAVIYA, N., A Survey of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks, Ubiquitous Computing and Communication Journal, Volume 4, Number 3, August 2009.

YE W., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D., An Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, Proc.of IEEE INFOCOM, pp. 1567-1576, June 2002.

YE, W., J. HEIDEMANN, J., Medium Access Control in Wireless Sensor Networks, USC/ISI Technical Report ISI-TR-580, Okt. 2003, <http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Ye03c.html>

YOUNIS, O., KRUNZ, M., RAMASUBRAMANIAN, S., Node Clustering in Wireless Sensor Networks: Recent Developments and Deployment Challenges, IEEE Network May/June 2006.

ZHANG, Y., ZHENG, S., XIONG, S., A Scheduling Algorithm for TDMA-Based MAC Protocol in Wireless Sensor Networks, ETCS 2009, Vol. 3, pp.148-151, 2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2009.

ZHAO, F., LIU, J., LIU, J. J., GUIBAS, L., REICH, J. E., Collaborative Signal and Information Processing: An Information Directed Approach, Proceedings of the IEEE, 91 (8): 1199-1209, 2003.

ZHAO, M., CHEN, Z., DENG, X., ZHANG, L., LIU, A., HUANG, G., MAEC: A Movement-Assisted Energy Conserving Method in Event Driven Wireless Sensor Networks, International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing Proceedings, WCNM2005, Vols. 1 and 2, pp. 915-920, Wuhan, China, September 23-26, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Nükhet SAZAK, 1977'de Adapazarı'nda doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adapazarı'nda tamamladı. 1994 yılında Adapazarı Ali Dilmen Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Elektronik Bilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans eğitimini 2002 yılında tamamladı. 2000 yılından günümüze Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümü Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.