

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA SAĞLAM,
DİNAMİK GRUPLANDIRMA VE ORANSAL
YÜK DENGELİMLEME YÖNLENDİRME**

İsmail TELLİOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

GEBZE

2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA SAĞLAM,
DİNAMİK GRUPLANDIRMA VE ORANSAL
YÜK DENGELİMLEME YÖNLENDİRME**

İsmail TELLİOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali MANTAR

GEBZE
2009



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/07/2009 tarih ve 2009/16..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 31/08/2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan İsmail Tellioğlu'nun tez çalışması Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali MANTAR

ÜYE

: Doç. Dr. İbrahim SOZUKPINAR

ÜYE

: Doç. Dr. Oğuz KUCUR

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: Kablosuz Sensör Ağlarında Sağlam, Dinamik Gruplandırma ve Oransal Yük Dengeli Yönlendirme

YAZAR ADI: İsmail TELLİOĞLU

Bu çalışmada kablosuz sensör ağları için oransal yük dengelemeli yönlendirme protokolü ve kablosuz sensör ağını dinamik bir şekilde gruplandıran, bu gruplarda meydana gelebilecek hatayı ve yük dengelenmesi problemini göz önünde bulunduran bir protokol geliştirilmiştir.

İlk yöntem ağda yönlendirme yaparken yol üzerindeki sensörlerin enerji ve trafik durumlarını göz önünde bulundurmakta, böylece enerjiyi dengeli kullanmakta ve trafik yoğunluğundan dolayı yaşanacak paket kayıplarının önüne geçmektedir. Bu dengelemeyi yaparken oluşabilecek salınım problemini göz önünde bulundurarak, paketleri bir sonraki adımdaki komşulara oransal olarak dağıtarak yük dengelemesinin performansını artırmaktadır.

İkinci yöntem ise bir kablosuz sensör ağını, sensörlerin enerjisi ve komşu sayılarını göz önünde bulundurarak dinamik olarak gruplandırmaktadır. Bu yöntem gruplandırma temelli protokollerde görülen tek nokta hatası problemine çözüm olarak dinamik yedek grup lideri yaklaşımını getirmektedir. Böylece grup liderlerinden birinde bir hata meydana geldiğinde tüm ağı yeniden gruplandırma işlemine tabi tutmadan o grup hatadan kurtarılabilir. Ayrıca önerilen yöntem gruplar arası dinamik olarak yük dengelemesi yapmaktadır. Yoğun trafik gözlemlenen grup liderinin üyelerinden bazıları diğer gruplara üye olmakta, böylece grup liderinin trafiği azaltılarak meydana gelebilecek paket kayıplarından doğacak enerji kaybı önlenerek grubun ve tüm ağın daha uzun süre canlı kalması sağlanmaktadır.

SUMMARY

THESIS TITLE: Robust Dynamic Clustering and Proportional Load Balanced Routing in Wireless Sensor Networks

AUTHOR: İsmail TELLİOĞLU

In this thesis, a proportional load balancing algorithm and a dynamic clustering algorithm, which considers cluster head faults and load balancing in clusters, are introduced for wireless sensor networks.

First method considers next hop's energy and traffic rates for routing. So, it uses sensors' energy in a balanced way and prevents packet drops whose reason is traffic congestion. While achieving this load balancing, method also considers fluctuation problem and shares load proportionally among next hop neighbors and raises performance of load balancing.

Other method builds clusters dynamically according to sensors' energy and neighbor numbers. It uses dynamic back up cluster head approach to handle single point of failures on cluster heads. Thus, without needing to re-cluster whole network, that cluster can be healed locally. Besides, method introduces a dynamic load balancing algorithm among clusters. According to this approach, some of overloaded cluster's member is transferred to other clusters. Overloaded cluster's traffic is decreased, thus packet drop problem is avoided and overloaded cluster does not drain its energy rapidly. Thus, method prolongs life time of cluster and whole network.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında bana sürekli destek olan ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali MANTAR' a ve tez çalışmam sırasında bana gösterdikleri sabır ve anlayıştan ötürü tüm çalışma arkadaşlarıma, ayrıca tezi yazarken karşılaştığım zorluklarda bana her zaman yardımcı olan arkadaşım Rahim KARABAĞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1 Kablosuz Sensör Ağlarında Yük Dengelenmesi Problemi	5
1.2 Gruplama Yöntemlerinde Oluşması Muhtemel Problemler	5
1.3 Tez Çalışmada Yapılanlar	6
1.3.1 Oransal Yük Dengelemesi	6
1.3.2 Dinamik, Sağlam, Yük Dengelemeli Sınıflandırma	7
2.KONUUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR	9
2.1 Yük Dengelemesi Problemi ile İlgili Çalışmalar	9
2.1.1 Grup veya Yol Oluşturma Aşamasında Yük Dengeleme Uygulayan Protokoller	9
2.1.2 Merkezi Yapıya Dayanmayan Yöntemler	11
2.2 Dinamik Sınıflandırma ve Hata Durumları İçin Geliştirilen Yöntemler	13
3. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA ORANSAL YÜK DENGELEME YÖNTEMİ (PLB)	17
3.1 Sistem Modeli	17
3.2 Hedefe Olan Maliyetin Hesaplanması	18
3.3 Oransal Yük Dengelenmesi	20

4.KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN, SAĞLAM ve YÜK Dengelemeli Gruplandırma Yöntemi (DRLC)	24
4.1 Sistem Modeli	24
4.2 Dinamik Gruplandırma	24
4.3 Hatadan Kurtarma İşlemi	27
4.4 Dinamik Yük Dengeleme	28
5.DENEYSEL SONUÇLAR	30
5.1 PLB İçin Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	30
5.1.1 Performans Sonuçları	31
5.2 DRLC İçin Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	35
5.2.1 Performans Sonuçları	35
6.SONUÇLAR	40
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BS: Merkezi Alıcı (Base Station)

CH: Grup Lideri (Cluster Head)

WSN: Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensor Networks)

GPS: Global Positioning System

PLB: Oransal Yük Dengeleme Algoritması (Proportional Load Balancing Algorithm)

GEAR: Geographical and Energy Aware Routing

TAR: Traffic-Adapted Load Balancing in Sensor Networks Employing Geographic Routing

DRLC: Sağlam ve Yük Dengelemli Gruplandırma Yöntemi (Dynamic Robust Load Balanced Clustering)

MAC: Ortama Erişim Kontrolü (Medium Access Control)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1.Genel bir sensör yapısı	1
2.1 A) Dengelenmemiş en kısa yol ağacı, B) Dengeli ağaç	10
2.2 Grup lideri hatası durumunda DED algoritmasının çalışması	15
3.1 Ağ modeli	17
3.2 Örnek bir ağ yapısı	19
3.3 Oransal yük dengeleme algoritması	21
3.4 Salınım problemi	22
4.1 Dinamik gruplandırma algoritması	26
5.1 Paket kaybı performans karşılaştırması	32
5.2 BS' ye ulaşan paket başına harcanan ortalama enerji	32
5.3 Enerji kullanımının standart sapması	33
5.4 Ortalama paket gecikmesi	34
5.5 Farklı paket hızları için gösterilen performans	34
5.6 BS' ye ulaşan paket başına harcanan ortalama enerji	36
5.7 Grup lideri enerjisini tüketene kadar BS' ye ulaşan paket sayısı	37
5.8 Grup lideri hatalarının olduğu durumlarda gösterilen performans	37
5.9 Paket hızı 1,5 paket/saniye iken gözlemlenen performans	38
5.10 Paket hızı 2 paket/saniye iken gözlemlenen performans	39

Sekil**Sayfa**

5.11 Paket hızı 3paket/saniye iken gözlemlenen performans

39

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

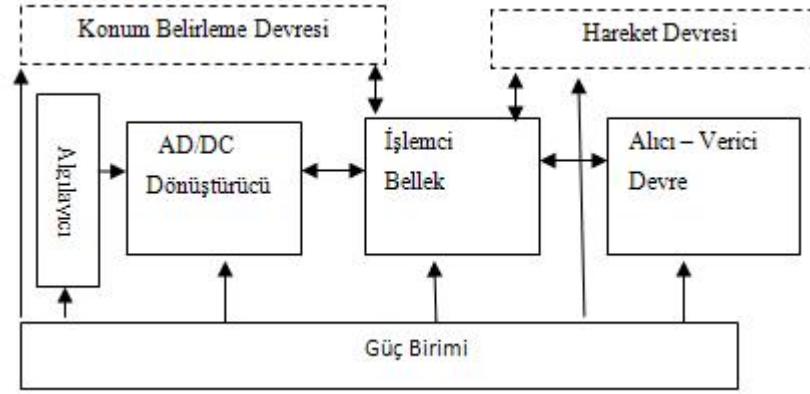
Sayfa

4.1 Dinamik ve durağan yedek CH karşılaştırması

38

1. GİRİŞ

Elektronik ve kablosuz iletişimde kaydedilen gelişmeler kablosuz sensör ağları (WSN) kavramının doğmasına ve çeşitli alanlarda kullanımına olanak sağlamıştır. Sensörler algılama, iletişim, güç ve hesaplama devrelerinden oluşan mikro elektronik algılayıcılardır ve bu temel devrelerin yanında bazı uygulamalar için sensörlerin hareket etmesini sağlayan ve bulundukları konumun bilgilerini öğrenmeye yarayan yardımcı devrelerde olabilir (Şekil 1.1). Sensörler, bulundukları ortamdaki veriyi sürekli olarak veya belli aralıklarla algılayarak merkezi alıcıya ulaştırmaya çalışırlar. Tek bir sensörün elde ettiği veri tam olarak doğru sonucu veremeyeceğinden birçok uygulamada sensörler gözlemlenecek alana yoğun olarak dağıtılırlar.



Şekil 1.1. Genel bir sensör yapısı.

WSN kavramı ise çok sayıda birbirleriyle kablosuz iletişim kurabilen sensörün bir alanda belli bir amaçla bir araya gelmesi ve yerleştirilmesi ile oluşan yapıyı ifade etmektedir. Hemen hemen tüm WSN uygulamalarında sensörler ortamı gözlemleyerek algıladıkları veriyi bir veya birkaç merkezi alıcıya (BS) göndermeye çalışırlar. Verinin toplandığı merkezin sensörlere göre daha fazla iletişim kapasitesine ve enerjiye sahip olduğu ve bu merkezlere veriyi elde etmek için dışarıdan erişilebildiği kabul edilir.

Kablosuz sensör ağları gelişen teknoloji ve azalan maliyetler sonucu birçok alanda kullanılmaktadır. Sensörlerin kullanım alanlarından biri habitat gözlemlemedir. Örneğin Hawaii üniversitesi tarafından "Hawaii Volcanos National

Park”da nesli tükenen bitkilerin yetiştiği ortamları ve bu alanlara komşu ortamları gözlemlmek amacıyla kablosuz iletişim kurabilen sensörler bu alanlara yerleştirilmiştir [Biagioni and Bridges, 2002]. On dakikada bir hava durumunu ve bir saatte bir de ortamın görüntüsünü içeren veri toplamayı ve Internet üzerinden sunuculardaki bu verilere ulaşmayı başarmışlardır. Diğer bir uygulama alanı askeri uygulamalardır. Askeri uygulamalarda sensörler, sınırdan yapılan nüfuz tespitleri için veya düşman bölgesinin gözlemlenmesi için kullanılmaktadırlar. Ayrıca sağlık uygulamaları, akıllı ev ve ofis uygulamaları, doğal afetlerde hasar tespiti ve mahsur kalanlara ulaşılması gibi birçok alanda da WSN yapısından faydalanılmaktadır.

Sensör ağları geniş kullanım alanlarına rağmen verilerin merkeze ulaşması yani merkezi alıcıya yönlendirilmesi açısından birçok problemle karşı karşıyadır. Sensörlerin düşük iletişim, depolama ve hesaplama kapasitesine sahip olması ve en önemlisi sınırlı ve düşük enerjiye sahip olmaları WSN için yeni yönlendirme protokollerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. WSN’in günümüzde kullanılan ağlardan ve ad-hoc ağlardan farkı aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Sensörler kısıtlı enerjiye sahip olduklarından ve birçok durumda enerjileri tükendikten sonra yeniden kullanılmaları mümkün olmadığından yönlendirme işlemi sırasında enerji göz önünde bulundurulması gereken en önemli etkidir.
- WSN’ de bulunan sensör sayılarının çok fazla olabilmesi ve düzenli bir ağ yapısının olmamasından dolayı (Birçok uygulamada tekdüze (uniform) bir dağılım yerine rastgele bir dağılım söz konusudur.), IP tabanlı yönlendirme protokollerinin WSN için kullanılması uygun değildir.
- Genel ağlardaki istemci-sunucu yapısının tersine bir şekilde WSN’ de binlerce sensörden merkezi alıcıya doğru bir trafik akışı söz konusudur.
- WSN’ de sensörler yoğun bir şekilde ortama dağıtıldıklarından aynı bölgede bulunan sensörlerin algıladıkları veriler benzerlik göstermektedir. Yönlendirme yaparken bu benzerlik göz önünde bulundurularak veri tümleştirme veya veri toplama işlemleri uygulanmalıdır.

- Farklı uygulamalar ve uygulama alanları için protokoller aynı performansı veremeyebilirler. Çünkü uygulama alanlarının fiziksel yapısı, veri hızı ve süresi gibi birçok etken uygulamadan uygulamaya farklılık göstermektedir. Bu nedenle bütün uygulamalar için optimal bir protokol geliştirmek mümkün değildir ve uygulamaya özel geliştirilen protokoller de mevcuttur.

Bu nedenlerden dolayı WSN için birçok yönlendirme protokolü önerilmiştir [Akkaya and Younis, 2003]. Bu yöntemler veri merkezli, hiyerarşik ve konum tabanlı yöntemler olarak 3'e ayrılabilir. Tüm bu yöntemler:

- WSN' de bulunan sensörlerin statik mi yoksa hareketli sensör oldukları,
- Sensörlerin rastgele mi yoksa belli bir dağılıma göre mi ortama dağıtıldıkları,
- Sensörlerin merkezi alıcıya olan uzaklıklarına göre direkt iletişimi mi yoksa çoklu atlamalı iletişimi mi (harcanacak enerjiyi göz önünde bulundurarak) tercih edecekleri,
- Veri akışının sürekli mi, belli aralıklarla mı yoksa bir olay gerçekleştiğinde mi olacağı,
- Veri birleştirme ve toplama işlemlerinin uygulanıp uygulanmayacağı uygulanacaksa hangi sensörlerde uygulanacağı,

kriterlerinin hepsini veya bir kısmını göz önünde bulundurularak geliştirilmişlerdir.

Veri merkezli protokollerde genel yapı merkezi alıcının sorgular göndermesi kaynak sensörün de bu sorgulara cevap vermesine dayanır. Bu tip protokoller sensörlerin hepsinin veri göndermesini engellemeyi, sadece merkezi alıcının ilgi duyduğu verinin sorgular vasıtasıyla WSN'nin belirli bölgelerinden elde edilmesini amaçlamaktadır. Sınırlı tüme gönderim veya tüme gönderim (broadcast) şeklinde sorgular belirli alanlara gönderilir. Sorgulama yapılabilmesi için veriler özelliklerine göre adlandırılıp (toplanan veri, toplama zamanı vb.) sorgular oluşturulur. Bu sorguları alan sensörler eğer sorgulara uyan veriye sahiplerse verilerini merkezi alıcıya göndermeye çalışırlar. Veriler gönderilirken veri birleştirme işlemleri

uygulanır. SPIN [Heinzelman et al., 1999], Directed Diffusion [Estrin et al., 1999], Rumor Routing [Braginsky and Estrin, 2002] bu protokollerden bazılarıdır.

Veri merkezli protokollerdeki var olan ölçeklenebilirlik ve gecikme problemlerinden yola çıkılarak sensörleri gruplara ayıran hiyerarşik protokoller geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde sensörler genellikle konumlarına göre gruplara ayrılmakta her grup için bir grup lideri seçilmektedir. Sensörler topladıkları veriyi grup liderlerine göndermekte, grup lideri de verileri veri birleştirme veya veri toplama işlemi gerçekleştirerek merkezi alıcıya ulaştırmaktadırlar. Böylece hem iletişim mesafelerini düşürmek hem de veri birleştirme işlemini çok daha etkin bir şekilde gerçekleştirmek mümkün olmaktadır. Yöntemler birbirlerinden grup liderlerini seçmek için kullandıkları fonksiyonlar, grup büyüklükleri, grup içi ve gruplar arası iletişim gibi açılardan farklılık göstermektedirler. LEACH [Heinzelman et al., 2000], HEED [Younis and Fahmy, 2004], TEEN [Manjeshwar and Agrawal, 2001] gibi protokoller bu grupta geliştirilen protokollerin temelini oluşturmaktadır.

Coğrafi yönlendirme protokolleri ise GPS ve benzeri sistemlerle elde ettikleri konum bilgisini direkt olarak yönlendirme işlemi için kullanılmaktadırlar. Yani bir IP yapısı olmadığından, konum bilgisi ile sorguları ve verileri yönlendirmektedirler. Bu tip protokoller daha çok mobil sensör kullanan WSN'ler için geliştirilmekle beraber statik sensörlerden oluşan ağlarda da kullanılabilmektedir (GEAR[Yu et al., 2001], GAF [Xu et al., 2001]).

Kablosuz sensör ağları yapısı, çalışma ortamı, veri akış hızı ve uygulamanın türüne göre çok farklı özellikler göstermektedir. Tek bir protokolün veya yukarıda bahsedilen türlerden birinin tüm uygulamalar için iyi sonuç vermesi mümkün değildir. Bu nedenle yönlendirme protokolleri uygulama temelli de geliştirilmektedir ve protokollerin performansı uygulamadan uygulamaya değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle trafik yoğunluğunun çok olduğu durumlarda sensörler arası yük dengelemesini göz önünde bulunduran ve efektif bir şekilde yük dengelemesi yapan protokollere ihtiyaç vardır. Ayrıca hiyerarşik yaklaşımlarda görülmesi muhtemel olan tek nokta hatasının protokoller geliştirilirken göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

1.1 Kablosuz Sensör Ağlarında Yük Dengelenmesi Problemi

Bahsedilen yönlendirme protokolleri ve diğer birçok protokol yönlendirme yaparken en kısa yolu bulmayı, en az enerji harcamayı ve böylece ağın yaşam süresini artırmayı amaçlamıştır. Fakat bunu gerçekleştirirken en kısa yol üzerinde bulunan sensörlerin enerjilerinin daha hızlı tükeneceğini göz ardı etmişlerdir. Bunun sonucunda bu sensörler kısa sürede fonksiyonlarını yitirmekte bu bölgelerden veri algılanamamakta daha ileri aşamalarda ise ağ parçalara ayrılmakta ve merkezi alıcıyla bağlantısı kalmayan sensörler verileri algılasa bile bu algıladıkları verileri merkezi alıcıya gönderememektedirler.

Ayrıca birçok protokol bir sonraki adımdaki sensörün trafiğini göz önünde bulundurmamıştır. Sensörler kısıtlı depolama kapasitesine sahip olduğu için çok tercih edilen yollarda bulunan sensörlerin tampon belleklerinin kısa sürede dolması ve bunlara gönderilen bazı paketlerin kaybolması çok sık rastlanan bir durumdur. Bu yaşanan paket kayıpları yeniden gönderimlere dolayısıyla daha fazla enerji harcanmasına sebep olmakta ve ağın yaşam süresi hızla düşmektedir.

Bu olumsuzlukları engellemek için yönlendirme yaparken sensörler arası yük dengelenmesini de göz önünde bulunduran protokoller de geliştirilmiştir (TAR[Fyffe et al., 2007], COBRA[Ramaswamy et al., 2007] vb.) . Bu protokoller paketin iletimi için seçilecek bir sonraki sensörün enerjisi, trafik durumu gibi metrikleri göz önünde bulundurarak yönlendirme yapmaktadırlar. Diğer bir grup protokoller ise grup oluşturma aşamasında dengeli bir grup oluşturmaya çalışarak grup liderlerinin yükünü dengeleme yoluna gitmekte böylece ağın yaşam süresini uzatmaktadırlar.

1.2 Gruplama Yöntemlerinde Oluşması Muhtemel Problemler

Hiyerarşik protokoller WSN' deki sensörleri gruplara ayırmaya dayanan ve her grup için grup lideri belirleyen yöntemlerdir. Grup liderleri grup içerisinde toplanan

veriyi merkezi alıcıya ulaştırmaktan, veri birleştirme işlemleri uygulamaktan ve protokole göre diğer birçok işlemde sorumludurlar.

Bu durum gruplama yöntemleri için bazı sorunlar doğurmaktadır. Sensörlerin zorlu çevre koşullarında kolaylıkla fonksiyonunu yitirebilecek olması, gruplama yöntemleri için tek arıza noktası problemini doğurmaktadır. Eğer herhangi bir grup lideri bir nedenden dolayı fonksiyonunu yitirecek olursa o gruptan toplanan hiçbir veri merkezi alıcıya ulaştırılamayacaktır. Klasik gruplama yöntemlerinin bu durumlar için bir çözümü bulunmamaktadır. Bir dahaki gruplandırma aşamasına kadar bu gruptaki veriler merkezi alıcıya ulaşamayacaktır.

Ayrıca bir grubun gözlemlediği bölgede ani bir olay yaşandığında veya başka sebeplerden sensörlerin algıladığı olay sayısı arttığında o grubun liderine bir anda aşırı bir yük binecektir. Bu da paket kayıplarına, çakışmalara hatta grup liderinin enerjisinin çok hızlı bir şekilde tükenmesine yol açabilmektedir.

Bu durumların önüne geçmek için geliştirilen bazı yöntemler yedek grup lideri atama fikrini getirmiştir (FTEP [Bansal et al., 2008]). Bazıları ise CH sayısını ve yerleştirileceği konumları göz önünde bulundurarak sensörlerin erişebileceği grup lideri sayısını belirleyerek, bu sorunu çözmeye çalışmışlardır ([Younis et. al, 2005], [Yang et al., 2005] vb.).

1.3 Tez Çalışmasında Yapılanlar

1.3.1 Oransal Yük Dengelemesi

Bu çalışmada kablosuz sensör ağlarında görülen yük dengelenmesi problemi için, oransal yük dengelemesi yapan bir yönlendirme protokolü geliştirilmiştir (PLB [Tellioglu and Mantar, 2009]). Protokol yönlendirme yaparken enerji ve uzaklık metriklerini göz önünde bulundurmakta ve yük dengelemesi için bunların yanında sensörlerin üzerinden geçen trafiği de dikkate almaktadır.

Literatürde yük dengelemesi yapan ve bunu yaparken uzaklık, enerji ve trafik bilgilerinin hepsini veya bunlardan bazılarını göz önünde bulunduran birçok protokol önerilmiştir. Fakat bu protokoller yük dengelenmesi nedeniyle oluşacak “salınım” problemini dikkate almamışlardır. Paketleri iletirken eğer bir sonraki sensör enerji veya trafik durumu bakımından gerekli koşulları sağlamıyorsa tüm paketleri diğer bir alternatif yola yönlendirmişlerdir. Bu bölgedeki birkaç sensörün daha bu durumda davrandığı düşünülecek olursa yönlendirme yapılmak için seçilen bu yeni sensörde de tıkanıklık olması kaçınılmazdır. Bu durumda sensörler tekrardan yeni bir rota arayacak ve paketlerini o yoldan belki de çok daha fazla maliyetle göndermeye çalışacaklardır.

Geliştirilen yöntemde salınım problemini önlemek için, yol üzerindeki bir sensörde tıkanıklık saptandığında paketi iletmek için alternatif tek bir sensör belirlemekten kaçınılmaktadır. Bu durumda birden fazla (uygulamaya göre belirlenecek şekilde “ m ” adet) alternatif sensör bulunmakta ve paketler bu sensörler üzerinden gönderilmektedir. Bu gönderim işlemi yapılırken “ m ” sensöre paketler sensörlerin trafik yüküyle ters orantılı olacak şekilde dağıtılmaktadır. Böylece yol değişikliği sonucunda yaşanacak olası yeni bir tıkanıklık önlenmiş ve salınımlardan kaçınılmış olmaktadır. Bu da daha az paket kaybına, daha az enerji harcanmasına ve daha uzun ağ yaşam süresine olanak sağlamaktadır. Tezin ilerleyen bölümlerinde yöntem detaylı biçimde açıklanacak ve benzetim sonuçları ile yöntemin etkinliği gösterilecektir.

1.3.2 Dinamik, Sağlam, Yük Dengelemeli Sınıflandırma

Bu çalışmada dinamik olarak WSN’ i gruplara ayıran, oluşabilecek grup lideri hatalarını göz önünde bulunduran, ayrıca grubun yükünü de göz önünde bulundurarak dinamik olarak yük dengelemesi yapan bir yöntem geliştirilmiştir.

Gruplama işlemi sensörlerin kalan enerjileri ve komşu sayıları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Grup liderlerinde oluşacak hataları tespit etmek ve tüm ağı yeniden gruplandırma işlemine tabi tutmadan bu hatadan grubu kurtarmak için, dinamik bir yedek grup lideri kullanılmıştır. Daha önce geliştirilen ve yedek grup lideri fikrini kullanan birçok yöntem statik bir yedek belirlemiş, zaman içinde

belirlenen yedeğin enerjisinde görülecek değişimleri düşünmemişlerdir. Bu yöntemde grup lideri belli aralıklarla yedek sensörü güncellemektedir. Hata tespiti için grup lideri ve yedeği arasında birbirlerine canlı olduklarını belirten bilgilendirme paketleri kullanılmıştır. Belli bir süre yedek grup lideri bu paketi alamazsa grup liderinin fonksiyonunu kaybettiğini varsayıp hatadan kurtarma işlemine başlamaktadır.

Gruplar arası yük dengelemesi için ise yine dinamik bir yöntem geliştirilmiştir. Grup lideri yükünün arttığını fark ettiğinde grubundaki başka grup liderleriyle de iletişim kuran sensörlere mesaj yollayarak diğer gruplara geçmelerini istemekte ve grupların yükü eşit tutulmaya çalışılmaktadır.

Bu yöntem de tezin ilerleyen kısımlarında detaylı olarak açıklanacak ve deneysel sonuçlar sunulacaktır.

2. KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1 Yük Dengelemesi Problemi ile İlgili Çalışmalar

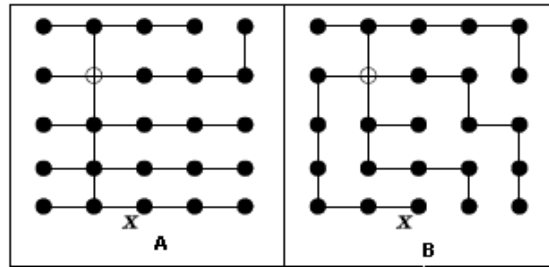
Kablosuz sensör ağlarında yük dengeleme amaçlı birçok protokol geliştirilmiştir. Geliştirilen bu protokollerin bir kısmı enerji, trafik, mesafe bilgilerini kullanarak yönlendirme sırasında dinamik bir yük dengelemeyi amaçlarken, diğer bir bölümü de gruplandırma yaparken veya merkezi alıcıya ulaşılacak yolları belirlerken yük dengeleme yapmaya ve gruplara ve yollara eşit yükler dağıtmaya çalışmışlardır.

2.1.1 Grup veya Yol Oluşturma Aşamasında Yük Dengeleme Uygulayan Protokoller

- Enerji duyarlı yönlendirme “Energy-Aware Routing in Cluster Based Sensor Networks” [Younis et al., 2002], merkezi yapıya dayanan bir protokoldür. Gruplandırma yapıldıktan sonra her grubun grup lideri belli aralıklarla üyelerine iletim işlemi için bir sonraki adımda hangi sensörleri kullanacağını bildirmektedir. Bunu yaparken sensörlerden topladığı, sensörlerin durumlarını bildiren mesafe, kalan enerji, trafik yükü, enerji tüketim hızı vb. parametreleri kullanarak sensörler arası bağlantıların maliyetini hesaplamaktadır. Çıkan sonuca göre her sensör için hangi bağlantı en az maliyetliyse o bağlantıyı kullanmasını hangi aralıklarda gönderim yapabileceğini bildirmektedir. Böylece enerjisi az veya trafiği yoğun olan sensörleri yönlendirmede kullanmamayı tercih ederek yükü diğer sensörlere de dağıtmakta ve ağın yaşam süresini uzatmaktadır. Fakat bu yöntemde tüm kararlar merkezi olarak verilmektedir. Hem grup liderlerine aşırı bir ek yük oluşturulmakta hem de tek arıza noktası (single point of failure) durumundan etkilenmesi daha muhtemel bir yapı oluşmaktadır. Ayrıca bu hesaplamaların grup liderinde yapılıp tekrar sensörlere geri gönderilmesi de ağda yaşanabilecek ani değişikliklere cevap verme hızını düşürmektedir.

- DECHP [Moussaoui et al., 2007] yönteminde ise gruplandırma yapılmadan önce her sensör dahil olabileceği grupları belirlemekte, daha sonra bu gruplara dahil olması durumunda ortaya çıkacak maliyeti kendi kalan enerjisi ve grubun eleman

sayısı kriterlerini göz önünde bulundurarak hesaplamaktadır. Böylece eşit yüklü gruplar oluşturulmaya çalışılmaktadır. Yöntemin grup içi yük dengelemesi için bir önerisi bulunmamaktadır. Fakat gruplar arası iletişimde grup lideri topladığı bilgileri merkezi alıcıya iletirken çoklu atlamalı iletişim kullanmaktadır. Burada veriyi ileteceği bir sonraki grup liderinin hangi sensör olacağını belirlemek için grup liderlerinin kalan enerjisini ve uzaklık bilgisini kullanarak bir maliyet hesaplamakta maliyeti en düşük olan grup lideri üzerinden iletim yapmaktadır. Bu yöntem grup liderleri arasında dinamik ve etkili bir yük dengelemesi uygulamış ve eşit yüklü gruplar oluşturulmaya çalışmıştır, fakat grup içi iletişim için bir yük dengelemesi yöntemi önermemiştir.



Şekil 2.1 A) Dengelenmemiş en kısa yol ağacı, B) Dengeli ağaç

- Dai and Han tarafından önerilen “A node centric load balancing algorithm for wireless sensor networks [Dai and Han, 2004]” yönteminde ise sensör ağında dengeli bir ağaç oluşturmaya çalışılmıştır. Bunu sağlamak için sensörlerin en kısa yolla merkezi alıcıya ulaşmasını sağlayacak yapıdan ödün verilmektedir (Şekil 2.1). Merkezi alıcı ağacın kökü, en uzaktaki sensörler de ağacın yaprakları olarak düşünülerek kökten yapraklara doğru olan yolların dengesini eşitlemeye çalışmışlardır. Bunu başarmak için kökten başlayarak dallara (yol) sensörler eklenmiştir. Her adımda dallar içinden ağırlığı en az olan, en az trafik yükü olan seçilmiş ve buna komşu sensörleri arasından en fazla yükü üreten sensör eklenmiştir. Böylece dengeli yollar oluşturularak merkezi alıcıya yakın sensörlerin yükü eşitlenmeye çalışılmıştır. Bu yöntem dengeli yollar üreterek WSN’nin en büyük yük dengeleme problemlerinden biri olan merkezi alıcıya yakın sensörlerin dengeli kullanılamaması ve bazılarının çok çabuk ölmesi sorununa etkili bir çözüm getirmiştir. Fakat, bu yöntemde de bu ağacın oluşturulması için gereken tüm

hesaplamalar merkezi alıcı tarafından yapılmaktadır, bu nedenle merkezi yapılarda görülen sorunlar bu yöntem içinde geçerlidir. Ayrıca bir sensör öldüğünde veya ağ topolojisinde bir değişim olduğunda bu yolların yeniden hesaplanması hem enerji hem de zaman açısından büyük kayıptır.

- Dengeli yüke sahip grup oluşturan diğer bir yöntemde [Gupta and Younis, 2003] her grup lideri önce sadece kendisiyle iletişim kurabilecek sensörleri kendi grubuna dahil etmekte diğer sensörlerin gruplara dahil edilmesi ise her grup için hesaplanan ağırlık fonksiyonuna göre yapılmıştır. Ağırlık fonksiyonunda gruba dahil edilecek sensörün ürettiği yük ve o sensörle kurulacak iletişimin maliyeti göz önünde bulundurulmuştur. Böylece her grup liderinin yükünün eşit olması sağlanmaya çalışılmıştır.

2.1.2 Merkezi Yapıya Dayanmayan Yöntemler

- COBRA [Ramaswamy et al., 2007] yönteminde ağda oluşabilecek tıkanıklık noktalarını aşmak ve yük dengelemesini sağlamak için sensörlerin merkezi alıcıya olan uzaklık bilgisini ve sensörlerin tampon belleklerindeki paket sayısı bilgisini kullanılmıştır. Komşu sensörler belli aralıklarla birbirlerine bilgilendirme (beacon) paketleri yollamakta böylece komşularının uzaklığı ve trafik durumları hakkında bilgi sahibi olmaktadır. Daha sonra paket gönderecek sensör her komşusu için bu bilgileri kullanarak bir yönlendirme ihtimali hesaplamaktadır (2.1).

$$F_i(j; a, b) = [f_1\left(\frac{d_j}{D}\right)]^a [f_2\left(\frac{q_j}{Q}\right)]^b \quad (2.1)$$

Burada d_j ve q_j sırasıyla komşu sensörün merkezi alıcıya uzaklığını ve yük bilgisini D ve Q ise ağdaki maksimum uzaklık ve sensörlerin sahip olduğu maksimum tampon bellek büyüklüğünü temsil etmektedir. a ve b ise karar aşamasında yük dengelemesine ve minimum yola ne kadar önem verileceğini belirlemek için kullanılan parametrelerdir ve uygulamaya göre değişebilir. COBRA bu fonksiyonu kullanarak hesapladığı olasılık değeri sonucunda hangi komşusundan göndermesi daha az maliyetliyse yani hangi sensör için fonksiyon minimum sonucu veriyorsa paketi o sensöre iletir. Merkezi alıcıya kadar tüm sensörler bunu

uygulayarak paketi hedefe ulaştırırlar. Bu yöntem trafiği dikkate aldığı için iyi bir yük dengelemesi yapmaktadır. Ayrıca kararların merkezi olmayan bir yapıda verilmesi yöntemi tek nokta hatasından kurtarmıştır ve ağdaki ani değişikliklere daha kolay adapte olmasını sağlamıştır. Yöntemin en önemli dezavantajlarından biri yönlendirme kararı verirken sensörlerin enerji bilgilerini kullanmamasıdır.

- Coğrafik enerji bilinçli yönlendirme yöntemi (GEAR) [Yu et al., 2001] ise sensörlerin kalan enerjisi ve hedefe olan uzaklık bilgisini kullanarak bir maliyet hesaplaması yapmakta ve her sensör paketi hangi sensör üzerinden hedefe ileteceğine bu maliyet fonksiyonuna göre karar vermektedir. Her sensör komşusundan öğrendiği hedefe ulaşma maliyetinin üstüne kendisinden komşusuna gönderme maliyetini eklemek suretiyle toplam maliyeti bulur ve maliyeti minimum yapan komşuya paketi iletmektedir. GEAR direk olarak hedefe olan maliyeti değil de hedefin bulunduğu belli bir alana olan maliyeti hesaplar ve paket o bölgeye ulaşınca kadar bu yöntemi kullanır. Paket bölgeye ulaştıktan sonra özyinelemeli olarak bölgeyi alt bölgelere ayırmakta ve paket hedefe ulaşınca kadar paketi bu bölgelere yollamaktadır. GEAR formül (2.2)' de görüldüğü gibi hem kalan enerji ($e(N_i)$) hem de uzaklık ($d(N_i, R)$) bilgisini kullanmaktadır.

$$c(N_i, R) = ad(N_i, R) + (1 - a)e(N_i) \quad (2.2)$$

Enerji bilgisini kullanarak yük dengelemesi yapmakta enerjinin dengeli bir biçim de kullanılmasını sağlamakta, uzaklık bilgisini kullanarak da daha efektif yollar bulmaya çalışmaktadır. Her iki bileşenin de formüldeki ağırlıkları a değeri ile oynayarak değiştirilebilmekte, böylece yük dengelemesinin mi yoksa uzaklığın mı ön planda tutulacağı belirlenebilmektedir. GEAR enerjinin dengeli kullanımı açısından etkili bir yöntem ortaya koymaktadır. Fakat sensörlerin trafik durumunu dikkate almayarak gerçek bir yük dengelemesi ortaya çıkaramamaktadır. Trafik durumunun dikkate alınmaması, tıkanıklık olan sensörlerin kullanımına ve dolayısıyla paket kayıplarına yol açmaktadır.

- Trafik bilinçli coğrafik yönlendirme (TAR) [Fyffe et al., 2007] ise tüm coğrafik yönlendirme protokolleri için genel bir yük dengeleme çözümü sunmuştur. TAR iki eşik değerli bir çözüm önermektedir. TAR'a göre TAR'ın uygulandığı

coğrafiik yöntemde paket iletimi için seçilen bir sonraki sensörün trafik durumu belirlenen ilk eşik değeriinden (uygulamalar arası değışiklik gösterebilir) daha düşükse paket o sensöre iletilir. Eğer minimum maliyetli sensörün trafik değeri ilk ve ikinci eşik değeri arasında ise gönderici başka alternatiflere yönelir. Bu alternatifin maliyeti, trafiğı yoğun olan sensörün maliyeti ve gönderici sensörün kendi maliyetinin yarısının toplamından fazla olmamalıdır. Eğer minimum sensörün trafik durumu ikinci eşik değeriinden de fazla ise bu kez bir önceki maliyet koşulu daha esnetilerek alternatif sensör bulunmaya çalışılır. Her iki durumda da alternatif sensör bulunursa paket bu sensörlere yönlendirilir. TAR trafiğı göz önünde bulundurarak etkili bir yük dengelemesi gerçekleştirmektedir. Ayrıca trafik aralıkları belirleyerek de salınım probleminin önüne geçmeyi amaçlamıştır. Küçük trafik değışimleri (eşığı aşmayan) göndericinin tercihlerini etkilememekte salınım engellenmektedir. Fakat, bunun etkili bir şekilde çalışması için eşik değeriilerinin uygun seçilmesi çok önemlidir.

2.2 Dinamik Sınıflandırma ve Hata Durumları İçin Geliştirilen Yöntemler

- CMATO (Cluster-member based fault tolerant mechanism) [Lai and Chen, 2007] grup liderleri için önceden belirlenmiş yerlere ihtiyaç duymayan, hata durumunu grup içi sensörlerin tespit ettiğı dinamik bir yöntemdir. Her sensör kendi grubundaki komşuları ve ulaşabildiğı diğeri grup liderlerini bilmektedir. Bu bilgiler gruptandırma aşamasındaki mesajlaşmalar sayesinde elde edilmektedir. Grup liderinde oluşacak hatayı belirlemek gruptaki tüm sensörlerin ortak görevidir.

Hata tespiti için sensörler grup içi mesajlaşmalarda rastlantısal olarak duydukları grup liderlerinin yolladığı mesajları kullanmaktadırlar. Eğer bu mesajı belli bir süre duyamazlarsa komşu sensörlere bunu bildiren mesaj yollamaktadır. Mesajda grup liderini duyamayan sensörlerin kimlikleri bulunmakta, mesajı her alan sensör eğer kendisi de grup liderini belli bir süre boyunca duymamışsa kendisini bu listeye ekleyerek mesajı komşularına yollamaktadır. Eğer listenin boyutu grubun üye sayısının belli bir yüzdesini geçerse grup lideri fonksiyonunun yitirmiş olarak düşünölüp hatadan kurtarma aşamasına geçilmektedir.

Hatadan kurtarma aşamasında sensörler grup lideri olmak için 2.3 fonksiyonunu kullanarak yarışmaktadır. Burada c_{im} grubun m . üyesini, $|C_i|$ grubun eleman sayısını, $|INbr|$ fonksiyonun hesaplandığı sensörün grup içi komşu sayısını E_{cur} ve E_{max} ise sırasıyla sensörün enerjisini ve grup içindeki en yüksek enerjili sensörün enerjisini temsil etmektedir. Bu fonksiyona göre en yüksek $f(c_{im})$ değerine sahip olan sensör grup lideri olarak seçilir ve buna göre gruplandırma işlemi yapılır ve grup hatadan kurtarılmış olmaktadır.

$$f(c_{im}) = r * \frac{|INbr|}{|C_i|} + (1 - r) * \frac{E_{cur}(c_{im})}{E_{max}(C_i)} \quad (2.3)$$

Bu yöntem dinamik olarak hatayı belirleyebilmekte fakat bunu yaparken çok fazla grup içi mesajlaşmaya ihtiyaç duymaktadır. Bu da hem daha fazla enerji harcanmasına hem de hatanın geç tespit edilmesine yol açabilmektedir.

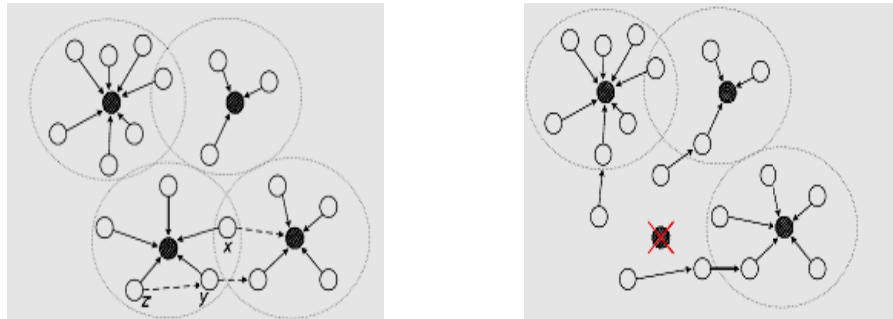
- Genel olarak “k en az egemen olan küme (k minimum dominating set)” prensibine dayanan yöntemler [Younis et. al, 2005], [Yang et al., 2005], ise bir sensörün en az “k” tane grup lideri ile iletişim kurabilmesine dayanmaktadır. Bu sayede sensör bir grup liderinde sorun çıktığında, diğerini kullanmaya başlayarak bu sorunu çözmektedir. Fakat bu tip yöntemlerde “k” sayısının büyüklüğüne göre belirlenecek grup lideri sayısı artmakta, ayrıca grup liderlerinin yerlerini belirlemek gibi ek yükler ortaya çıkmaktadır.

- FTEP (A fault tolerant election protocol) [Bansal et al., 2008], yedek grup lideri yöntemini uygulayan protokollerden biridir. Yöntem iki kademeli hiyerarşik bir gruplama uygulamaktadır. İlk kademede sensörler gruplanmakta, ikinci kademe de ise ilk kademede belirlenen grup liderleri arasında yeni gruplar oluşturulmaktadır. Gruplardaki grup liderinden sonraki en yüksek enerjili sensör yedek grup lideri olmakta, grup liderinin enerjisi belli bir eşik değerinin altına düştüğünde veya grup lideri fonksiyonunu yitirdiğinde bu yedek grup lideri devreye girmektedir.

- Fault-Tolerant Clustering of WSN [Gupta and Younis,2003] yönteminde ise grup lideri hataları diğer grup liderleri tarafından belirlenmektedir. Her veri gönderme aşamasından sonra grup liderleri birbirlerine fonksiyonlarını

sürdürdüklerini bildiren paketler göndermektedirler. Eğer bir grup liderinden diğer grup liderlerine bu paket iki durum bildirme periyodu boyunca ulaşmazsa bu grup liderinin fonksiyonunu yitirdiği kabul edilir. Bu durumda diğer grup liderleri, bu gruptan kendilerine yakın olan sensörleri kendi gruplarına almaktadırlar. Böylece bu sensörlerin de topladıkları veriyi merkezi alıcıya ulaştırmaları sağlanmaktadır. Bu yöntemde varsayılan grup liderlerinin normal sensörlerden daha farklı özelliklere sahip olması, dinamik gruplandırmaya olanak sağlamamakta ve her hata durumunda diğer grup liderlerinin yükleri artmaktadır.

- DED [Hassan and Jue, 2007] yönteminde ise grup liderinin görev yapamaması durumunda hiçbir şekilde yeniden gruplandırma veya yedek grup lideri kullanılmamaktadır. İlk gruplandırma aşamasında her sensör kendisi için bireysel bir yedek belirlemektedir. Bu yedek eğer sensör kendi grup lideri dışında bir grup lideri ile iletişim kurabiliyorsa, iletişim kurabildiği grup lideridir. Eğer başka grup liderleri ile iletişim kuramıyorsa, iletim alanı içinde olan fakat başka gruba ait bir sensörü yedek olarak belirlemektedir. Eğer bu iki durum da söz konusu değilse, sensör kendi grubundan olan sensörlerden yedek belirlemiş bir komşunu kendi yedeği olarak belirlemektedir. Şekil 2.2’de grup liderinde herhangi bir hata meydana geldiğinde “x” direk olarak iletişim kurduğu diğer grup liderine üye olmakta, “y” iletişim kurabildiği diğer grubun üyesi üzerinden iletimini sağlamakta, “z” ise y üzerinden verilerini göndermektedir. DED ayrıca gruplamanın başlangıç aşaması için ve sensörlerin yedeklerini belirleyebilmeleri içinde dinamik bir gruplama yöntemi sunmaktadır.



Şekil 2.2 Grup lideri hatası durumunda DED algoritmasının çalışması.

- LEACH [Heinzelman et al., 2002] protokolü ise geliştirilen ilk gruplandırma protokollerinden biridir. Bu çalışmayı temel alarak geliştirilen birçok yöntem bulunmaktadır. LEACH protokolünde her sensör grup lideri olabilmek için eşit şansa sahiptir. Gruplandırma aşamasında daha önce grup lideri olmayan her sensör sıfır ile bir arasında bir rastgele sayı seçer, eğer bu sayı formül 2.4 kullanılarak hesaplanan eşik değerinden küçükse sensör o tur için grup lideri olarak belirlenir. Bu formülde p istenilen grup lideri yüzdesini, r ise tur sayısını belirtmektedir. Daha sonra grup lideri olduğunu diğer sensörlere mesajlar yoluyla ilan eder. Sensörler hangi grup lideri kendilerine yakınsa ona üye olurlar.

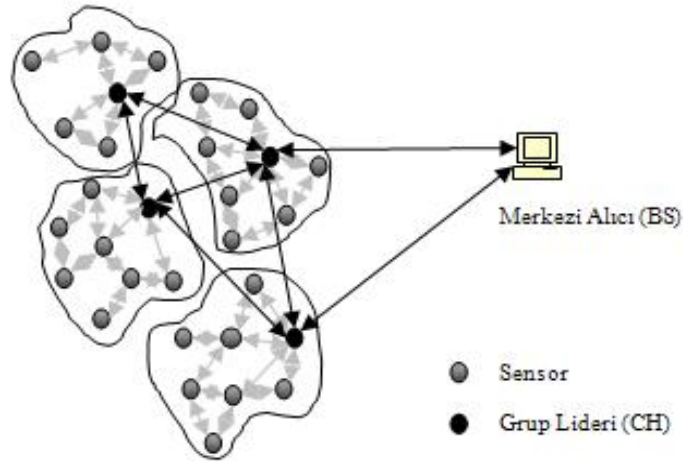
$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p*(r \bmod 1/p)} & \text{eğer sensör CH olmamışsa} \\ 0 & \text{eğer sensör daha önce CH olmuşsa} \end{cases} \quad (2.4)$$

LEACH' in her sensörün direk merkezi alıcıya ulaşabildiğini varsayması bir dezavantajdır ve WSN için gerçekçi bir yaklaşım değildir. Ayrıca LEACH gruplamalı yapılarda gözlemlenen CH hataları durumunu ele almamıştır. Bir hata meydana geldiğinde yeniden gruplandırma aşamasına kadar o grup merkezi alıcıya veri gönderememektedir. LEACH' in yük dengelemesi için önerdiği yöntem ise grup liderlerinin periyodik olarak değişmesidir. Bu önerinin de yeniden gruplandırma işleminin maliyeti düşünüldüğünde pek verimli olmayacağı açıktır.

3. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARINDA ORANSAL YÜK DENGELEME YÖNTEMİ (PLB)

3.1 Sistem Modeli

Çalışma kapsamında kabul edilen WSN modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir. WSN’ de bulunan sensörler gruplara ayrıldığı kabul edilmiştir. Her sensör kendi topladığı veriyi direk olarak veya çoklu atlamalı iletişim kullanarak kendi grup liderine (CH) iletmektedir. Daha sonra toplanan bu veriyi CH’ler merkezi alıcıya (BS) iletir. Gruplandırma işlemi için birçok protokol önerilmiştir [Akkaya and Younis, 2005] ve gruplandırma işlemi bu çalışmanın kapsamına girmediğinden, herhangi bir metot kullanılarak WSN’nin gruplara ayrıldığı kabul edilmiştir. Çalışma gruplandırma tabanlı bir WSN üzerinde gerçekleştirilmiş olsa da, önerilen metot gruplama temeline dayanmamaktadır ve diğer WSN yapılarında da uygulanabilir.



Şekil 3.1 Ağ modeli.

Ağ modelinin ve ağdaki sensörlerin diğer özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ağdaki tüm sensörler statiktir ve aynı başlangıç enerjisine ve iletim kabiliyetine sahiptirler. Tüm sensörlerin sınırlı tampon belleği vardır.
- Grup liderlerinin diğer sensörlere göre daha fazla enerjisi ve daha uzun mesafeli iletişim kabiliyeti vardır.
- Komşu sensörler arası her bağlantı çift yönlüdür.
- Her sensör kendi yerini, grup liderinin yerini ve merkezi alıcının yerini bilmektedir. Aynı şekilde her grup lideri kendi yerini ve merkezi alıcının yerini bilmektedir. Sensörler kendi yerlerini GPS sistemi sayesinde elde etmektedir [Estrin et al., 2000]. GPS sistemi çok fazla güç harcadığı için yer belirleme işleminden sonra devre dışı bırakılmaktadır. Sensörler CH, BS ve komşularının yerini ise bir kereye mahsus olmak üzere gönderilen bilgilendirme paketleri sayesinde öğrenmektedirler.
- Ayrıca bilgilendirme paketleri komşu sensörler arasında, maliyet hesaplamak ve yük dengelemesi yapmak için kullanılmak üzere enerji ve trafik seviyesi hakkında bilgi paylaşımı için kullanılmaktadır. Sensörler periyodik olarak komşularına bu bilgilendirme paketlerini göndermektedir.

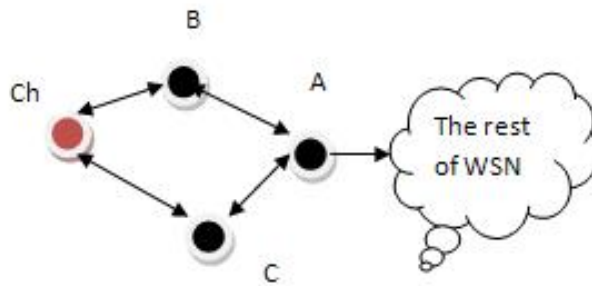
3.2 Hedefe Olan Maliyetin Hesaplanması

Geliştirilen yöntemde WSN' deki her sensör öncelikle paketini ileteceği hedefe olan maliyetini hesaplamalıdır. Bu hesaplama işlemi için komşularından aldığı bilgilendirme paketlerini kullanır ve her komşusu için paketi o komşu üzerinden iletmek için maliyetini bulur. Maliyet fonksiyonunda kullanılan metrikler komşu sensörler arası fiziksel uzaklık ($d(i, j)$) ve paket gönderecek sensörün başlangıç enerji seviyesinin o anki enerji seviyesine oranıdır ($\frac{E_{ini}}{E_{cur}}$).

$$C_1(i, j) = a * d(i, j)^\beta + (1 - a) \left(\frac{E_{ini}}{E_{cur}} \right) \quad (3.1)$$

$$C_2(i, s) = \min\{C_1(i, j) + C_2(j, s)\}, j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

Yukarıdaki formüller maliyet fonksiyonunun hesaplanması için kullanılmaktadır. Burada C_1 paketin sensör i 'den komşularından biri olan sensör j 'ye gönderiminin maliyetini yansıtmaktadır. C_2 ise paketin sensör i 'den merkezi alıcıya gönderilmesinin toplam maliyetini hesaplamak için kullanılır. α maliyet fonksiyonunda WSN'nin durumuna göre enerji ve uzaklığa verilecek ağırlığı ayarlamak için kullanılan bir pozitif bir katsayıdır. β ise WSN'nin bulunduğu fiziksel ortamın koşullarına göre uzaklığın paket göndermek için harcanan enerjiye etkisini belirlemek için kullanılan pozitif katsayıdır. Kablosuz iletişimin zor olduğu, engellerin bulunduğu ortamlarda paketi daha uzağa göndermek, daha engebesiz bir ortama göre çok daha fazla enerji harcayacaktır. Bu katsayı genellikle 2 olarak kabul edilmekle beraber, ortamın durumuna göre 2 ve 5 arasında bir değer alabilir. E_{cur} sensörün o anki enerjisini, E_{ini} ise sensörün başlangıç enerjisini temsil etmektedir. Formül (3.1) ve (3.2)'yi kullanarak ve dolayısıyla enerjiyi dikkate alarak yük dengelenmesi problemlerinden biri olana enerjisi az olan sensörlerin kullanımı engellenmektedir. Böylece enerjisi az olan sensörlerin ölmesi gecikmekte ve WSN'nin efektif bir şekilde çalışma süresi uzatılmaktadır. Ayrıca maliyet fonksiyonunda başlangıç enerjisinin kalan enerjiye oranının kullanılmasıyla enerji seviyesi kritik seviyelere ulaştığında maliyet fonksiyonuna enerji daha fazla etki etmektedir. Böylece enerjisi kritik seviyede olan sensörün kullanılması engellenmektedir.



Şekil 3.2 Örnek bir ağ yapısı.

Maliyet hesaplanması işlemini Şekil 3.2'deki gibi bir basit ağ yapısında anlatacak olursak ilk olarak B ve C sensörleri direkt olarak hedef ile iletişim kurabildikleri için formül (3.1)'i kullanarak paket iletim maliyetlerini hesaplarlar.

Daha sonra bilgilendirme paketleri ile hem B hem de C kendi maliyetlerini, enerji seviyelerini ve trafik bilgilerini A sensörüne gönderirler. A sensörü her iki komşusu içinde formülleri kullanarak paket iletim maliyetini hesaplar. Bu değeri komşusundan aldığı maliyete kendisinin komşusuna gönderme maliyetini ekleyerek bulur. Minimum değeri kendi paket iletim maliyeti olarak belirler ve bu değeri sağlayan komşusunu paketin iletileceği bir sonraki sensör olarak belirler. Paket iletimlerini bir sonraki bilgilendirme paketi dolayısıyla maliyet güncellemesine kadar bu sensör üzerinden gerçekleştirir. A sensörü kendi maliyetini belirledikten sonra bu değeri komşularına bilgilendirme paketleriyle göndermekte, böylece komşuları da kendi maliyetlerini hesaplayabilmektedir.

Bu yöntem sadece bölgesel bilgi değişimi gerektirmekte sensörlerin sadece komşuları hakkında bilgi sahibi olması gerekmektedir. Sensörler sadece yerel bilgiye sahip olarak hedefe olan toplam maliyeti hesaplayabilmektedirler. Bu sayede sensörler arası bilgilendirme gönderilen bilgilendirme mesajlarının sayısını azaltarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ayrıca sadece yerel bilgi tutulduğu için sensörlerin kısıtlı olan bellek kapasiteleri daha etkin bir biçimde kullanılmaktadır.

3.3 Oransal Yük Dengelenmesi

Bahsedilen maliyet hesaplama yöntemi paket iletimi sırasında enerjisi düşük olan sensörlerin kullanılmasını önlemekte ve paketin iletimi için en uygun maliyetli yolu seçmektedir. Fakat tezin önceki bölümlerinde de değinildiği gibi bazı sensörler birden fazla yolun kesişim noktasında olabilmekte ve bu yüzden aşırı derecede trafiğe mazur kalabilmektedir. Bazı sensörler de grup liderlerine yakın olmaları dolayısıyla çok fazla trafikle karşı karşıya kalmaktadır. Sensörler sınırlı tampon bellek büyüklüğüne sahip olduğu için bu durum paket kayıplarına dolayısıyla hem enerjinin gereksiz harcanmasına hem de paket iletiminde gecikmelere sebep olmaktadır. Şekil 3.3'deki algoritma, yönlendirme sırasında trafiği de göz önünde bulundurarak bu sensörlerin aşırı derecede trafiğe maruz kalmasını önlemek için geliştirilmiştir.

Algoritmada i paket gönderecek olan sensörü, n_x ise paket gönderecek sensörün komşusunu temsil etmektedir. E_{th} ve T_{th} sırasıyla minimum enerji ve maksimum trafik hızı eşik değerini temsil etmektedir. m ise paketlerin oransal olarak paylaştırılacağı sensör sayısıdır. E_{th} , T_{th} , m değerleri uygulamaya ve sensörlerin özelliklerine göre ayarlanmalıdır. Paket gönderecek sensör ilk olarak anlatılan maliyet hesaplama yöntemini kullanarak minimum maliyetli komşusunu belirler. Eğer belirlenen sensörün trafik seviyesi (tampon belleğindeki paket sayısı) T_{th} değerinden az ve enerji seviyesi de E_{th} değerinden yüksek ise sensör paketlerini bu belirlenen komşuya iletir (Şekil 3.3, 2 - 4).

```

1   for node  $i$ ;
2    $n_0 = \{ n_0: C_2 = \min ( C_1(i, n_0) + C_2(n_0, s) ), n_0 \in \text{neighbors of } i \}$ 
3   if  $(n_0.E_{cur} / n_0.E_{ini} > E_{th} \ \&\& \ n_0.T < T_{th})$ 
4   Send packet to  $n_0$ 
5   if  $(n_0.E_{cur} / n_0.E_{ini} > E_{th} \ \&\& \ n_0.T \geq T_{th})$ 
6   while (number of selected neighbors  $< m$ )
7       find  $n_j = \{ n_j: C_1(i, n_j) + C_2(n_j, s) \in m \text{ minimum cost and } n_j.E_{cur} / n_j.E_{ini} > E_{th} \ \&\& \ n_j.T < T_{th} \}$ 
8       send packets to  $m$  neighbor proportionally
9   if  $(n_0.E_{cur} / n_0.E_{ini} \leq E_{th})$ 
10  while (number of selected neighbors  $< m$ )
11      find  $n_j = \{ n_j: C_1(i, n_j) + C_2(n_j, s) \in m \text{ minimum cost and } n_j.E_{cur} / n_j.E_{ini} > E_{th} \ \&\& \ n_j.T < T_{th} \}$ 
12  send packets to  $m$  neighbor proportionally

```

Şekil 3.3 Oransal yük dengeleme algoritması.

Eğer paket iletimi için belirlenen minimum maliyetli sensörün enerji seviyesi E_{th} değerinden yüksek, fakat tampon belleğindeki paket sayısı maksimum paket sayısını belirleyen T_{th} değerinden yüksek ise iletim yapacak sensör diğer komşuları arasından alternatif aramaktadır (Şekil 3.3 5-8). Bu komşuların maksimum sayısı uygulamaya bağlı olarak değişebilmektedir. Alternatif olarak bulunan tüm komşuların hem enerji seviyelerinin E_{th} değerinden yüksek, hem de trafik seviyelerinin T_{th} değerinden düşük olması gerekmektedir. Bu şartları sağlayan komşular bulunduktan sonra gönderilecek paketler bu komşular arasında, komşuların trafik yüküyle ters orantılı olarak dağıtılır. m bulunan alternatif komşuların sayısı olmak üzere bu oransal dağıtım aşağıdaki gibi yapılır:

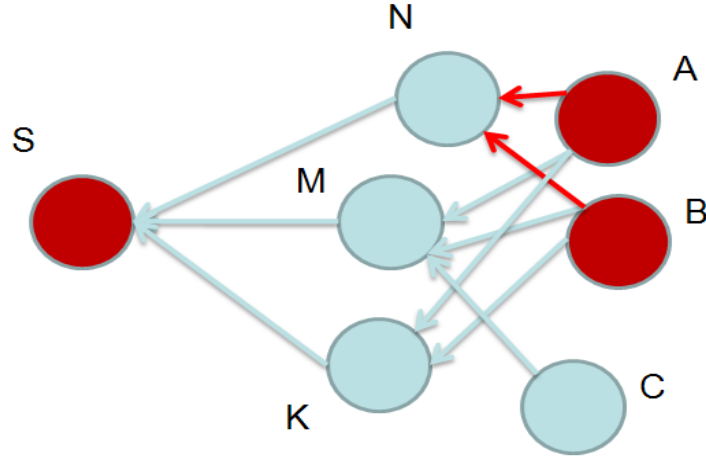
$T_1, T_2, T_3, \dots, T_m$ 'nin bulunan komşuların trafik hızlarını, $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ 'nin bu sensörlere düşen trafik yüzdesini temsil ettiğini ve T_{sum} 'ında gönderilecek toplam paket sayısı olduğunu düşünürsek;

$$T_1 * P_1 = T_2 * P_2 = \dots = T_m * P_m \quad (3.3)$$

ve

$$P_1 + P_2 + \dots + P_m = 1 \quad (3.4)$$

olmalıdır. Çünkü paketler mevcut trafik yüküyle ters orantılı bir şekilde dağıtılmalı ve bu oranların toplamı 1 olmalıdır. 3.4 numaralı denklem, 3.3'teki eşitlikleri kullanarak çözülürse her bir sensör için P_i oranı hesaplanabilir. Daha sonra $P_i * T_{sum}$ uygulanarak her bir komşudan gönderilecek paket sayısı belirlenmektedir. Bu orantı ile yükü az olan sensörlerden daha çok paket gönderileceği, yükü fazla olanlara daha az paket iletileceği açıktır. Böylece hem yük dengelenmesi yapılmakta sensörlerin enerjisi eşit bir biçimde kullanılmakta hem de tampon belleğin dolmasından kaynaklanacak paket kayıplarından kaçınılmaktadır.



Şekil 3.4 Salınım problemi.

Bu yöntemin bir diğer faydası da salınım problemini önlemesidir. Bunu bir örnekle açıklayacak olursak, Şekil 3.4'te iletim yapacak sensörler A ve B N 'nin paket yükünün fazla olduğunu fark ettiklerinde tüm yükü M üzerinden göndermeye çalışacaklardır. M 'de kısa bir süre sonra kendisinden birçok sensör iletim yaptığı için tıkanıklık problemi ile karşı karşıya kalacaktır. A ve B tekrar yollarını değiştirmek

zorunda kalacak bunun da ötesinde bunu yapmadan önce gönderdikleri bazı paketlerde de paket kaybı yaşanacaktır. Bunu engellemek için önerilen yöntem M 'in yanı sıra K sensöründen de iletim yapmakta, yükü oransal olarak paylaşmaktaki salınım ve dolayısıyla gerçekleşecek paket kaybı probleminin önüne geçmektedir.

Ayrıca PLB trafik durumu uygun olsa bile enerjisi E_{th} 'nin altına düşmüş sensörlerden iletim yapmamaktadır (Bkz. Şekil 3.3 9-12). Yine aynı yöntemle alternatif yollar bularak yükü bu sensörler üzerinden oransal olarak dağıtarak göndermeyi tercih etmektedir. Böylece enerjisi az olan sensörlerin kullanımını önlemekte onların yaşam süresini uzatarak o bölgeden daha uzun süre veri alınmasını sağlamaktadır.

Önerilen yöntem sadece tek tek sensörlerin yaşam sürelerini artırmakla kalmayıp, ortalama enerji tüketimini de azaltarak WSN'nin yaşam süresini uzatmaktadır. Hem enerjisi az olan sensörlerin kullanımı, hem de trafik yükü fazla olan sensörlerin kullanımı engellenmekte, yük diğer sensörlere de dağıtılmaktadır. Bunu yaparken de oransal dağıtım uyguladığı için salınım probleminin büyük oranda önüne geçmektedir.

4. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN, SAĞLAM ve YÜK DENGELLEMELİ GRUPLANDIRMA YÖNTEMİ (DRLC)

Bu çalışmada dinamik olarak gruplandırma yapan bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca giriş bölümünde bahsedilen hiyerarşik yöntemlerin problemlerinden biri olan CH'nin fonksiyonunu yitirmesi durumunda, hızlı bir şekilde o grubu kurtarabilmek için dinamik yedek CH yöntemi önerilmiştir. Buna ek olarak da gruplardan bazılarının yüklerinin artması durumunda, dinamik olarak grupların yüklerinin dengelenebilmesi için bir çözüm sunulmuştur.

4.1 Sistem Modeli

Yöntem aşağıdaki WSN ortamı ve sensör özellikleri düşünülerek geliştirilmiştir:

- Ağda bulunan tüm sensörler aynı özelliklere sahiptir ve her sensör üç veya daha fazla farklı seviye de iletim yapma yeteneğine ve sınırlı bir tampon belleğe sahiptir
- Sensörler GPS sistemi kullanarak kendi konumlarını belirleyebilmektedirler. Ayrıca daha sonra sinyaller göndererek komşularını belirleyebilmektedirler.
- Her iletim seviyesindeki komşular için aradaki bağlantıların çift yönlüdür, yani bir sensör komşusuna veri gönderebiliyorsa komşusunun da sensöre veri gönderebildiği düşünülmektedir.

4.2 Dinamik Gruplandırma

Gruplandırma işlemi iletim seviyesi göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. En düşük iletim seviyesi sadece grup içi sensör iletişimi ve grup liderleri için yedek belirlemek için kullanılmaktadır. En düşük iletim seviyesi ve en yüksek iletim seviyesi arasında seçilen iletim seviyesi ise (2. iletim seviyesi) grup boyutunu

belirlemektedir. En yüksek iletim seviyesi ise sadece grup liderleri arasındaki iletişim ve grup liderleri ile merkezi alıcı arasındaki iletişim için kullanılmaktadır.

Gruplandırma işlemi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada (Şekil 4.1 1-7) sensörler 2. iletim seviyesini kullanarak ulaşabildikleri sensörleri belirlemektedirler. Daha sonra ulaşabildikleri sensör sayısı ($|N_{12}|$) ve enerjilerini göz önünde (E_{cur}) bulundurarak, formül 4.1 ile normalize edilmiş bir bekleme süresi belirlemektedirler. A ve B bu normalizasyonu gerçekleştirmek ve enerji ve komşu sayısına verilecek ağırlığı belirlemek için kullanılacak pozitif katsayıları temsil etmektedir.

$$T \leftarrow \frac{A}{E_{cur} + 1} + \frac{B}{|N_{12}|} \quad (4.1)$$

Bu süre her sensörün grup lideri olmak için ilan mesajı (CH_{adv}) yollamadan önce ne kadar bekleyeceğini belirlemektedir. Bu formül sayesinde enerjisi daha çok olan ve daha çok sensörle iletişim kurabilen sensörlerin daha önce bu mesajı yollamakta, grup lideri olma şansları artmaktadır. Enerjisi çok olan sensörün grup lideri olması, grup liderlerinin üyelere göre daha çok enerji tüketimine maruz kaldığını düşünürsek, grup liderinin daha geç enerjisini tüketmesine dolayısıyla daha uzun aralıklarla yeniden gruplandırma işlemine gerek duyulmasına olanak sağlamaktadır. Komşu sayısı çok olan sensörlerin seçimi ise WSN'in uç bölgelerinde olan sensörlerin CH olmasını engelleyerek, grup üyelerinin verileri iletirken daha az enerji harcamalarını sağlamaktadır.

İkinci aşamada sensörler gruplandırma işleminin başlamasından sonra belirledikleri süre dolana kadar başka sensörlerden gelecek CH_{adv} mesajları için beklerler. Bu mesajlar mesajı gönderen sensörün *id* numarasını, fiziksel konumunu ve enerji seviyesini içermektedir. CH_{adv} mesajı alan her sensör eğer kendisi de o ana kadar CH adaylığını ilan etmemişse bekleme süresini iptal etmekte ve kendi alanında başka CH adayları olduğu için, kendisi grup liderliği için mesaj yollamamaktadır. Eğer bekleme süresi dolan sensör hiçbir CH_{adv} almamışsa kendi CH_{adv} mesajını oluşturarak bunu N_{12} listesinde bulunan tüm komşularına yollamaktadır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra ağdaki tüm sensörler ya bir veya daha fazla CH_{adv} mesajı almış ya da kendisi CH_{adv} mesajı yollayarak bu tur için grup lideri olmaya hak

kazanmıştır. CH_{adv} alan sensörler eğer tek bir CH adayından bu mesajı alırlarsa direk olarak bu sensöre katılma isteği göndermektedirler. Eğer birden fazla mesaj alırlarsa gelen mesajdaki bilgiler ve formül 4.2'yi kullanarak her CH'ye olan maliyeti belirlemekte ve en az maliyetli sensöre katılma isteği göndermektedirler. Maliyeti hesaplarken mesajı yollayan CH'ye olan uzaklık ($d(i, CH_{cand})$) ve CH'nin o anki enerji bilgisi ($(CH_{cand} \cdot E_{cur})$) dikkate alınmaktadır. WSN'in özelliklerine göre bu iki etkenin ağırlığını değiştirmek için α sabitinin değeri değiştirilebilmektedir.

$$C = \alpha * d(i, CH_{cand}) + (1 - \alpha) * (CH_{cand} \cdot E_{cur}) \quad (4.2)$$

```

// Initialization process
1.  foreach sensor in WSN {
2.       $N_{12} \leftarrow$  Find neighbors in level 2 transmission range
3.       $T \leftarrow \frac{A}{E_{cur} + 1} + \frac{B}{|N_{12}|}$  // Calculate a time value for waiting
                                     // before cluster head advertisement
4.       $CH_{cand} \leftarrow$  Null
5.       $N_{in} \leftarrow$  Null
6.  }

// Cluster Formation
7.  while ( T > 0 ) {
8.      wait  $CH_{adv}$ 
9.      if ( receive  $CH_{adv}$  )
10.         add  $CH_{cand} \leftarrow CH_{adv}$ 
11.  }
12. if (  $CH_{cand}$  is not empty ) {
13.     wait until end of  $T_{max}$ 
14.     foreach (  $CH_{adv}$  in  $CH_{cand}$  )
15.         calculate  $CH_{cost} \leftarrow \alpha * d(i, CH_{cand}) + (1 - \alpha) * (CH_{cand} \cdot E_{cur})$ 
16.         send join request to least costly CH candidate
17.          $CH_{id} \leftarrow$  least costly CH's id
18.     }
19. else {
20.     send  $CH_{adv}$  message to sensors in  $N_{12}$ 
21.      $CH_{id} \leftarrow$  my own id
22.     wait for join requests
23.     send reply to join requests and add to member list
24. }

// Back up and within cluster neighbor discover phase
25. foreach sensor i {
26.      $i.N_{in} \leftarrow j, j.CH_{id} = i.CH_{id} \ \&\& \ d(i, j) \leq \text{level 1 transmission range}$ 
27.     if (  $i.CH_{id} == i.id$  ) // i is already a CH
28.          $CH_{back\_up} \leftarrow$  most residual energy one hop neighbor in  $i.N_{in}$ 
29. }

```

Şekil 4.1 Dinamik gruplandırma algoritması.

CH adayı olan sensörler ise kendilerine gelecek olan katılma isteklerini beklemekte ve bu katılma isteklerine cevap göndererek sensörleri üye listesine

eklemektedir. Katılma istekleri sonraki aşamada yedek CH belirlemek için kullanılmak üzere sensörlerin konumunu ve enerji bilgilerini içermektedir.

Üçüncü ve son aşamada ise sensörler en düşük iletim seviyesi içinde olan ve kendileriyle aynı grupta olan sensörleri(N_{in}), belirlemektedirler. Enerji tasarrufu açısından grup içi iletişim için sadece en düşük iletim seviyesi kullanıldığından, sensörler belirledikleri bu komşuları çoklu atlamalı iletişim için kullanacaklardır. Grup liderleri ise katılma isteğinden elde ettiği verilerden faydalananarak en düşük iletim seviyesi içinde olan ve en yüksek enerjiye sahip olan üyesini yedek grup lideri olarak belirlemektedir. Yedek grup liderinin en düşük iletim seviyesi içindeki sensörlerden belirlenmesinin sebebi, bir hata durumu söz konusu olduğunda, yedek grup lideri görevi devralırken grupta mümkün olduğunca az değişime yol açmaktır. Ayrıca grup liderleri en yüksek iletim seviyesini kullanarak komşu grup liderlerini belirlemektedir. Grup liderinin BS' ye direk ulaşamadığı durumlarda daha yakın komşu grup liderleri üzerinden verilerini göndermektedirler.

4.3 Hatadan Kurtarma İşlemi

Geliştirilen yöntemde CH'nin herhangi bir nedenle fonksiyonunu (dış etkenler veya enerji tükenmesi) yitirmesi durumunda yedek CH görevi üstlenmektedir. Yedek CH grup oluşturma aşamasında ve daha sonra belirli periyotlarda CH tarafından belirlenmektedir. CH en düşük iletim seviyesi içinde olan grup üyelerinden en yüksek enerjiye sahip olan sensörü yedek CH olarak seçmektedir. Üyelerinin enerji seviyelerini, üyelerden gelen paketlere ek olarak gönderilen enerji bilgisinden elde edebilmektedir. Yedek grup lideri olarak belirlenen sensöre bu görevi bildirmekte ve o anki üyelerin listesini de yedek grup liderine göndermektedir. CH ve yedek CH birbirlerinin fonksiyonunu yitirmediğini belli aralıklarla gönderilen bilgilendirme paketleriyle öğrenmektedirler. Bu paketlerin boyutunun küçük olması ve sadece tüm grubun iletim periyodu sonrasında bir kereye mahsus olarak gönderilmesi, bu paket için harcanan enerjiyi düşürmektedir.

Eğer yedek grup lideri belirlenen iletim periyodu sonunda bu bilgilendirme paketlerini CH' den alamazsa grup liderinin fonksiyonunu yitirdiğini kabul ederek

hatadan kurtarma işlemine başlamaktadır. Grup liderinden aldığı tüm üyelere CH_{adv} yollamakta bunu alan üyelere grup liderinin fonksiyonunu yitirdiğini anlamaktadır. Sensörler, diğer CH'lerden aldıkları en son CH_{adv} mesajı ve yedek grup liderinden gelen CH_{adv} mesajını göz önünde bulundurarak, gruplandırma aşamasında olduğu gibi her bir adaya olan maliyeti ve formül 4.2'yi kullanarak hesaplamakta ve yine bu maliyeti minimum yapan CH'ye üye olmaktadır. Yapılan deneylere göre, yedek grup liderinin eski CH'ye yakın seçilmesi grup yapılarında çok daha az değişiklik meydana gelmesini sağlamakta, dolayısıyla daha az ek yük getirmektedir. Sensörler yeni grup liderlerini seçtikten sonra grup içi komşu bilgilerini (N_{in}) güncellemektedirler. Grup lideri görevini devralan sensörde kendisi için yeni yedek belirlemektedir.

Bu işlemler sayesinde grup liderinin fonksiyonunu yitirmesi sonucunda kısa sürede ve ağıın tümünde bir yeniden gruplandırma işlemine gerek duymadan ağ hatadan kurtulmaktadır. Yedek grup liderinin dinamik olarak güncellenmesi de yeni grup liderinin yüksek enerjiye sahip olma olasılığını artırmakta, dolayısıyla enerjisini tüketmeden daha uzun süre grup lideri olarak görev yapmasını sağlamaktadır.

4.4 Dinamik Yük Dengeleme

Gruplandırma temelli ağlarda bazı durumlarda gruptaki sensörlerin ürettiği veri normal hızın çok üstüne çıkabilir. Mesela, yangın durumlarını gözlemlemek için geliştirilen bir ağı düşünürsek; sensörler belli aralıklarla ortamın durumu ve sıcaklığı hakkında bilgi gönderirken, bir yangın durumu oluştuğunda o bölgedeki sensörler aşırı derecede trafik üretmeye başlayacaklardır. Bu da o gruptaki trafik yoğunluğunu artıracak paket kayıplarına, grup liderinde tıkanıklığa ve grup liderinin enerjisini hızla tüketmesine sebep olacaktır. Bunu engellemek için geliştirilen yöntemde dinamik bir yük dengeleme sistemi sunulmuştur.

Eğer bir grup lideri grup içinden gelen trafikte aşırı derecede bir artış sezerse, bu durumda, bir tüme gönderim mesajı ile gruptaki sensörleri haberdar etmektedir. Bunu alan sensörlerden başka grup lideri ile iletişim kurabilenler yani birden fazla CH_{adv} mesajı almış olan sensörler, komşu grup liderlerine katılma isteği

göndermektedirler. Eğer komşu grup liderinin trafik durumu uygunsa yani belirlenmiş bir eşik değerinin altındaysa bu katılma isteği onaylanmakta ve sensör bu gruba üye olmakta aksi takdirde katılma isteği reddedilmektedir. Bu işlem sonucunda her iki grup lideri üye listelerini ve grup değiştiren sensörler de komşu listelerini güncellemektedirler. Enerji harcanmasını azaltmak için daha önce komşu grup liderine katılma isteği gönderip de reddedilen sensörler ikinci bir yoğunluk mesajı aldıklarında tekrar katılma isteği göndermemektedirler.

Bu önerilen yöntem sayesinde yoğunluk olan gruptaki trafik azaltılmış, yoğunluktan kaynaklanacak olan paket kaybı problemlerinin dolayısıyla boşa harcanacak enerjinin önüne geçilmiş olmaktadır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 PLB İçin Elde Edilen DeneySEL Sonuçlar

Geliştirilen yöntemin deneySEL gerçeklenmesi 100 m² lik bir alana rastgele olarak dağıtılmış 500 sensör üzerinde yapılmıştır. Sensörlerin tümü aynı özelliklere sahiptir. Sensör sayısının %4'ü kadar CH alana yine rastgele olarak dağıtılmıştır ve her sensör kendisine en yakın CH'nin grubuna katılmıştır. Bu rastgele dağıtımlar genelde WSN uygulamaları için uygundur. Çünkü birçok WSN uygulaması erişimi mümkün olmayan (düşman alanı gözetlenmesi, afet alanı gözetlenmesi) uygulamalardır. Diğer bir kısım uygulama da ise ortam olarak WSN'i tekdüze bir şekilde dağıtılmasına olanak sağlarken, sensörlerin sayısının çokluğu ve bu işin maliyeti nedeniyle rastgele dağıtımını tercih etmektedirler. BS benzetim ortamının merkez noktasına konumlandırılmıştır. Deneylerde her sensörün 10 m iletim kapasitesine sahip olduğu ve başlangıç enerjisinin 1 joule olduğu kabul edilmiştir. Veri paketlerinin büyüklüğü 10 Kbit, bilgilendirme paketlerinin büyüklüğü ise 2 Kbit'dir [Younis et al.,2002] ve bilgilendirme paketler 3 saniye aralıkla gönderilmektedir. Her sensör 15 paketi tampon belleğinde tutabilmektedir ve 0.5 paket/saniye hızla paket üretmektedir. CH'lerin 25m iletim kabiliyeti vardır ve sensörlere göre daha fazla tampon bellek kapasitesine sahiptirler.

DeneySEL çalışmada formül 5.1 ve 5.2'deki enerji modeli uygulanmıştır [Bhardjaw, et al., 2001]. Hem veri paketleri hem de bilgilendirme paketleri için harcanan enerji göz önünde bulundurulmuştur.

$$E_{tx} = (\alpha_1 + \alpha_2 d^2) * k \quad (5.1)$$

$$E_{rx} = \alpha_1 * k \quad (5.2)$$

Burada E_{tx} k bit veriyi göndermek için harcanan enerjiyi, E_{rx} ise k bit veriyi almak için harcanan enerjiyi temsil etmektedir. α_1 ve α_2 sırasıyla 50 nJ/bit ve 100 pJ/m² olan sabitleri, d uzaklığı, k ise paketteki bit sayısını temsil etmektedir.

Deneylerde sensörlerin ideal bir ortama erişim kontrolü (MAC) yapısı kullandıkları, paketler arasında çakışma olmadığı kabul edilmiştir. Bu kabul benzetimi yapılan tüm yöntemler için yapıldığından birbirlerine karşı gösterdikleri performansı etkilememektedir. Ayrıca sensörlerin paket göndermedikleri veya almadıkları durumda kendilerini uyku moduna alarak enerji harcamadıkları kabul edilmiştir.

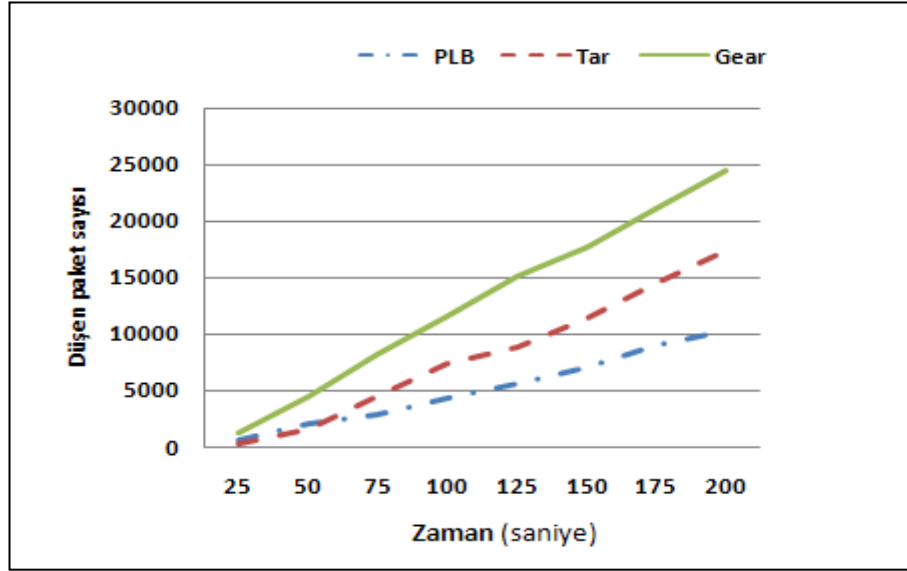
5.1.1 Performans Sonuçları

Yukarıda tanımlanan deneysel ortam ve bölüm 3.1’de bahsedilen varsayımlar altında PLB, GEAR ve TAR algoritmaları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. TAR tüm coğrafik yöntemler üzerine genel bir yöntem olduğu için yönlendirme tabanında GEAR kullanan, TAR algoritmasının benzetimi yapılmıştır.

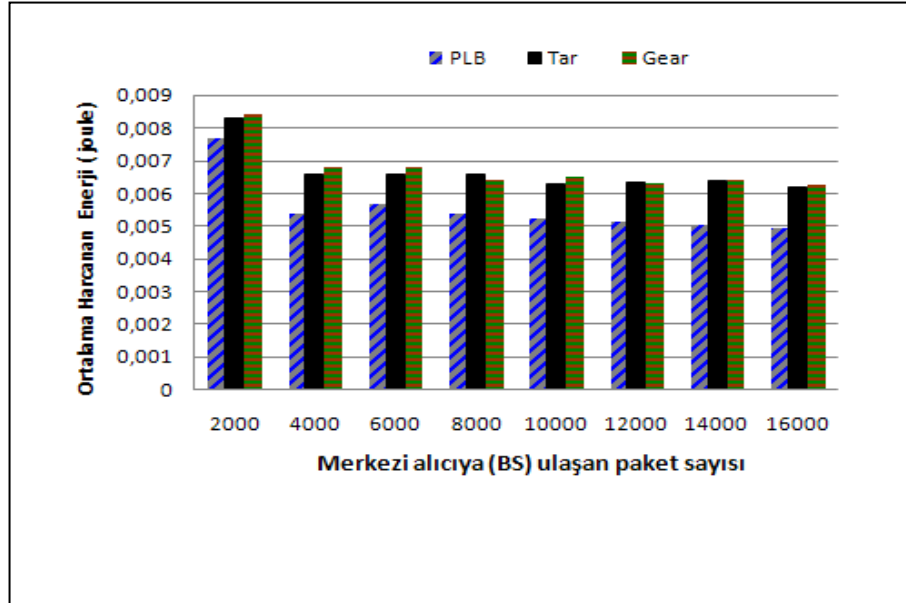
İlk karşılaştırma yöntemlerin paket kaybı sayısı açısından yapılmıştır. Şekil 5.1 bu kriter için performans sonuçlarını göstermektedir. Şekilden de gözlemleneceği gibi düşen paket sayısı açısından PLB hem TAR hem de GEAR’ dan çok daha iyi sonuç vermiştir. GEAR en kötü sonuçlara sahiptir, çünkü GEAR yönlendirme yaparken bir sonraki adımdaki sensörün trafik yükünü hesaba katmamaktadır. Bu da tampon belleği dolu fakat enerjisi yüksek olan bir sensöre paket gönderimini mümkün kılmakta ve paket kayıplarına sebep olmaktadır. PLB, TAR’a göre de daha iyi performans vermiştir. TAR yönlendirme yapılırken bir sonraki sensörün trafiğini hesaba katmakta fakat rota değişimlerinden dolayı yaşanacak salınım problemine etkin bir çözüm getirememektedir. PLB daha öncede bahsedildiği gibi trafiği sensörlere oransal olarak dağıtarak salınım probleminin önüne geçmektedir. Sonuçlarda da görüldüğü gibi bu sayede çok daha az paket kaybı yaşanmaktadır. Deneyin başlarında PLB ve TAR’ın benzer performans sergilemeleri ağdaki paket sayısının azlığından kaynaklanmakta, ağdaki trafik arttıkça PLB çok daha iyi performans göstermektedir.

Şekil 5.2 ise yöntemlerin paket başına ortalama enerji performanslarının karşılaştırmasını göstermektedir. PLB yine merkezi alıcıya ulaşan paket başına düşen ortalama enerji açısından da hem GEAR hem de TAR’dan daha iyi performans göstermektedir. Bunun nedeni düşen paket sayısı diğer iki yöntemle göre daha az

olduğu için, PLB daha az yeniden göndermeye ihtiyaç duymakta ve dolayısı ile BS'ye ulaşan paket başına harcanan enerji düşmektedir. Bu grafikten de anlaşılabileceği gibi PLB harcanan toplam enerji bakımından da her iki yönteme göre çok daha iyi performans gösterecektir. Böylece ağın daha uzun süre canlı kalmasına ve daha uzun süre veri toplanmasına olanak sağlayacaktır.

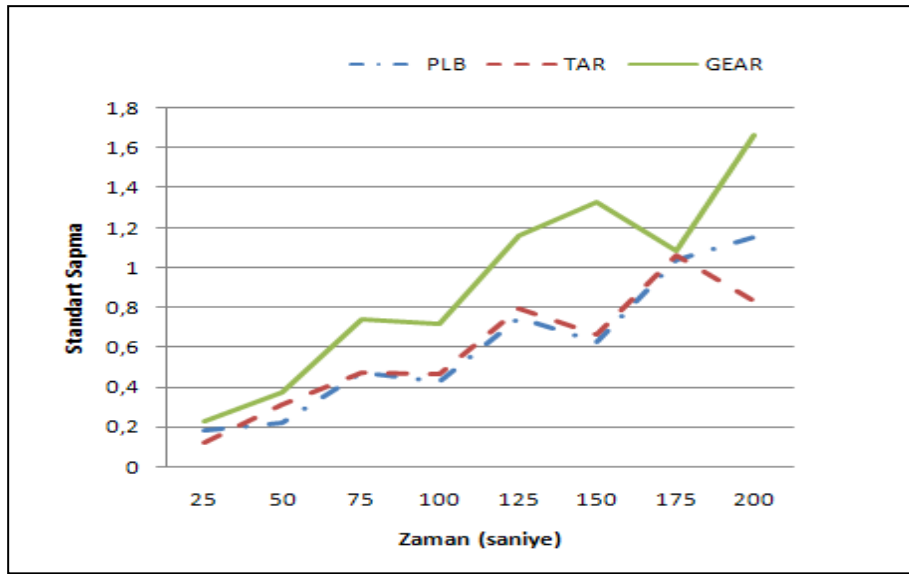


Şekil 5.1 Paket kaybı performans karşılaştırması.



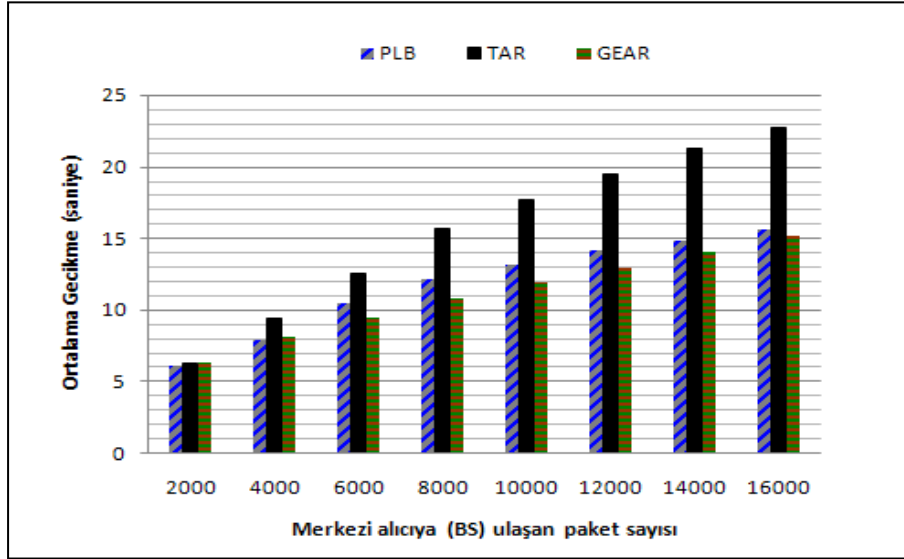
Şekil 5.2 BS'ye ulaşan paket başına harcanan ortalama enerji.

Şekil 5.3 ise hangi yöntemin sensörleri daha dengeli bir şekilde kullandığını göstermektedir. Bu kriterdeki performansı ölçebilmek için WSN’ de her gruptaki grup liderine yakın ve çok kullanılan sensörler seçilmiştir. Seçilen sensörlerin sayısı tüm ağdaki sensörlerin %20’si kadardır. Dengeli kullanımı ölçebilmek için belli aralıklara, seçilen sensörlerin enerjileri arasındaki standart sapma hesaplanmıştır. Standart sapma ortalamadan harcanan enerjiden sapma değerini gösterdiği için elde edilen değerin düşük olması sensörlerin enerjisinin dengeli kullanıldığını manasına gelmektedir. Deneysel sonuçlara göre PLB genellikle en iyi performansı gösteren yaklaşımdır, fakat bazı aşamalarda TAR’ın da iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. GEAR yine üç yöntem içinde en kötü performansı sergilemiştir.



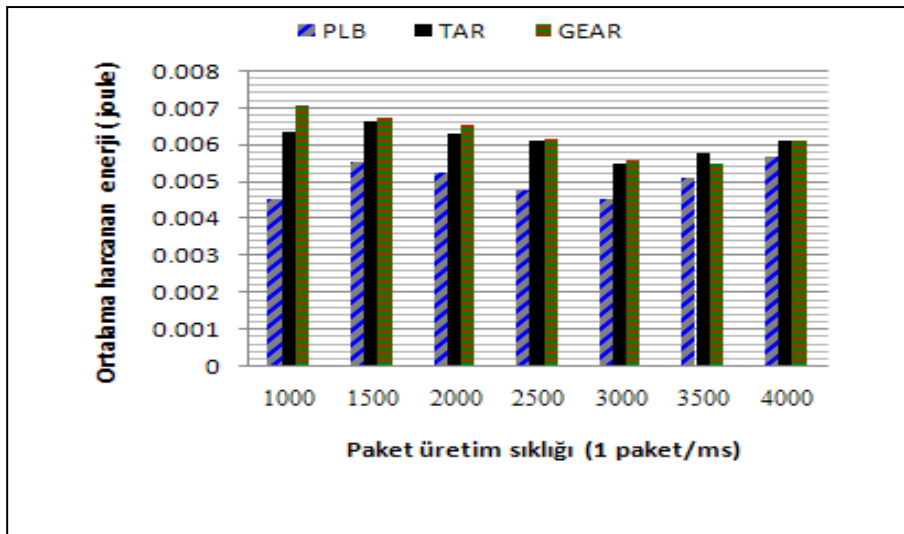
Şekil 5.3 Enerji kullanımının standart sapması.

Şekil 5.4 ise PLB, TAR ve GEAR’ın, paketlerin BS’ ye ulaşmasında gözlemlenen ortalama gecikme açısından karşılaştırmaları sunulmuştur. GEAR bu alanda en başarılı yöntem olarak gözükmemektedir. Çünkü GEAR, diğer iki yönteme göre daha az maliyetli ve daha kısa yolu tercih etmektedir. Fakat bunu yaparken paket kayıplarına sebep olduğu için daha az maliyetli yolu tercih etmesi enerji açısından avantaj getirmemektedir. Grafikte de gözlemlendiği gibi PLB çok az bir ekstra gecikme getirmektedir. Buna karşın ortalama enerjide büyük kazanç sağlamaktadır (Şekil 5.2). TAR ise gecikme performansı açısından en kötü sonucu vermiştir. Çünkü hem trafik durumuna göre daha maliyetli yolları tercih etmekte hem de salınım probleminden dolayı paket kayıplarını yeterince azaltamamaktadır.



Şekil 5.4 Ortalama paket gecikmesi.

Şekil 5.5'te ise yöntemlerin farklı paket hızlarındaki performansları karşılaştırılmıştır. PLB tüm paket hızlarında ve ağır trafik koşullarında en iyi performansı göstermiştir. Bu da PLB'nin performansının bilgilendirme paketi aralığı doğru ayarlanırsa paket hızına bağlı olmadığını göstermektedir. Şekilden de gözlemlenebileceği gibi tüm yöntemlerin paket başına harcadığı enerji oranı paket hızı 1 paket /3 saniye'nin altına düştüğünde artmaktadır. Bunun sebebi deneyde bilgilendirme paketi gönderme aralığının 3 saniye olması ve bazı bilgilendirme paketlerinin, sensörlerin trafik durumu yavaş değiştiği için gereksiz yere enerji harcamasıdır. Bu nedenle tüm seçilen algoritmalar için paket gönderim aralığının doğru ayarlanması çok önemlidir.



Şekil 5.5 Farklı paket hızları için gösterilen performans.

5.2 DRLC İçin Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Bu yöntem için gerçekleştirilen deneyde 100 m²'lik bir alana 100 sensör rastgele dağıtılmıştır. Dağıtılan her sensör aynı özelliklere sahiptir. Sensörlerin en düşük iletim seviyeleri 10m, ikinci seviye iletim alanları 35m, en yüksek iletim alanı ise 50m düşünülerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Yük dengelemesi yönteminin performans ölçümü için yapılan deneyler hariç her sensörün ağda saniyede bir paket ürettiği düşünülmüştür. Veri paketlerinin büyüklüğü 10 Kbit, grup liderliği adaylığı bildirim paketi (CH_{adv}) ve diğer tüm bilgilendirme paketlerinin büyüklüğü ise 2 Kbit'dir. Her sensör 30 paketi tampon belleğinde tutabilmektedir.

Enerji tüketim modeli bir önceki metodun değerlendirmesi için kullanılan modelle aynıdır.

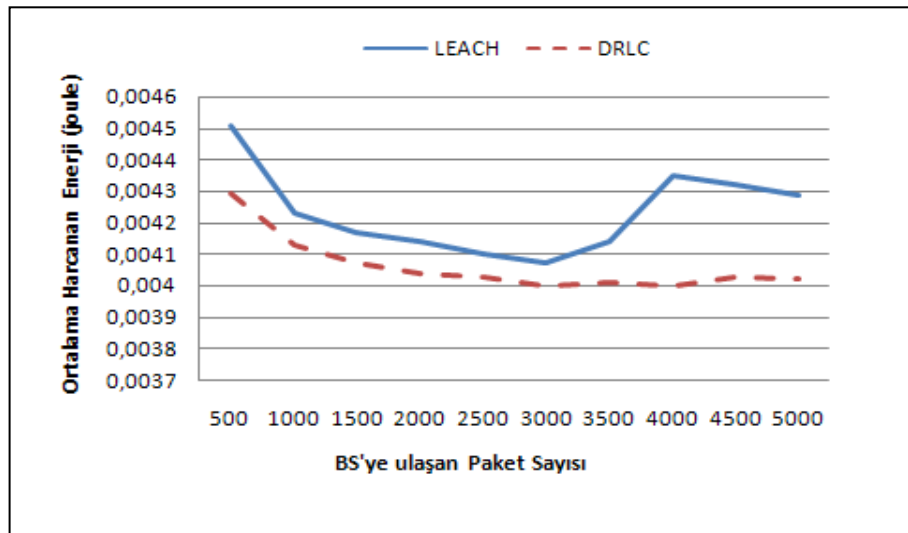
5.2.1 Performans Sonuçları

Yöntem paket başına harcanan enerji bakımından LEACH yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Yük dengelemesi ve CH hataları durumları içinse hem LEACH ile hem de önerilen yöntemin hata kurtarma ve yük dengeleme fonksiyonları devre dışı bırakılarak oluşturulan versiyonu ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde LEACH algoritmasının yapısı gereği sensörler direkt olarak paketlerini CH' ye göndermekte, geliştirilen yöntemde ise sensörler coğrafik yönlendirme kullanarak paketlerini CH' ye ulaştırmaktadırlar.

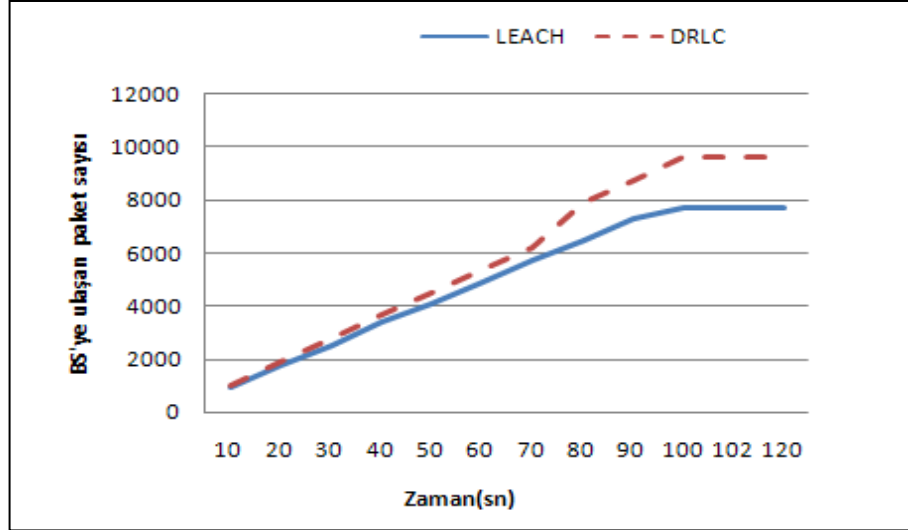
Şekil 5.6'da sınırlı sayıda üretilen paket (5000 adet) için LEACH ve geliştirilen yöntemin paket başına harcanan ortalama enerji açısından karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi DRLC performansların en yakın olduğu nokta da bile LEACH algoritmasına göre paket başına %2,5'luk bir enerji kazanımı göstermiştir. Algoritmanın yapısı gereği WSN'in uç bölgelerindeki grup liderlerini seçmemesi ve böylece grup içi iletim maliyetini düşürmesi ve direk iletişim yerine çoklu atlamalı iletişimi tercih etmesi enerji tüketim performansının daha iyi olmasına olanak sağlamıştır.

Şekil 5.7’de ise iki algoritmanın ilk CH enerjisini tüketene kadar BS’ ye ulaştırabildikleri paket sayısı açısından performansları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi geliştirilen yöntem DRLC %30’a yakın daha iyi performans göstermiştir. Her iki yöntemde hemen hemen aynı sürede ilk CH’lerinin enerjisini tüketmişken geliştirilen yöntemin çok daha fazla paket gönderebilmesi, paket gönderirken çok daha az gecikmeye sebebiyet verdiğini göstermektedir. Ayrıca daha fazla paket gönderebilmesi, paket başına daha düşük enerji harcadığını da bir kez daha göstermektedir.

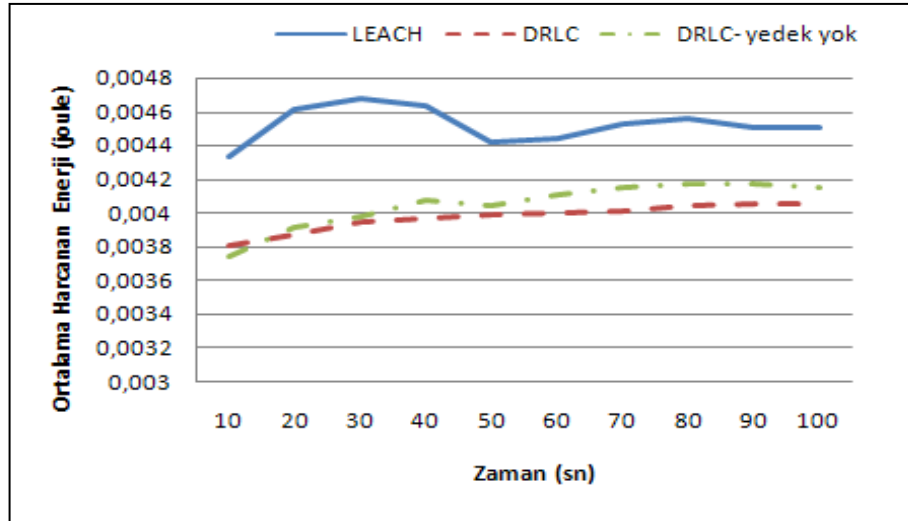
Şekil 5.8 ise CH hataları durumunda LEACH, DRLC ve geliştirilen yöntemin yedek CH olmayan versiyonu, paket başına harcanan ortalama enerji açısından karşılaştırılmıştır. CH hataları rastgele olarak fakat belirli aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi LEACH algoritmasının performansı hatalar sonucu çok düşmüş ve paket başına harcanan enerji artmıştır. En iyi sonucu DRLC göstermiş, hataların yoğunlaştığı anlarda yedek CH kullanmayan versiyona göre paket başına %3-4 daha az enerji harcamıştır. Diğer iki yöntem CH hatası durumunda tüm ağı yeniden gruplandırmaya tabi tutarken DRLC yedek grup lideri kullanarak sadece hatanın meydana geldiği alanlardaki sensörleri yeniden gruplandırmakta ve çok daha az enerji kaybına yol açmaktadır. Bu sonuçlar yöntemin CH hataları için getirdiği çözümün başarısını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.6 BS’ ye ulaşan paket başına harcanan ortalama enerji.



Şekil 5.7 Grup lideri enerjisini tüketene kadar BS'ye ulaşan paket sayısı.



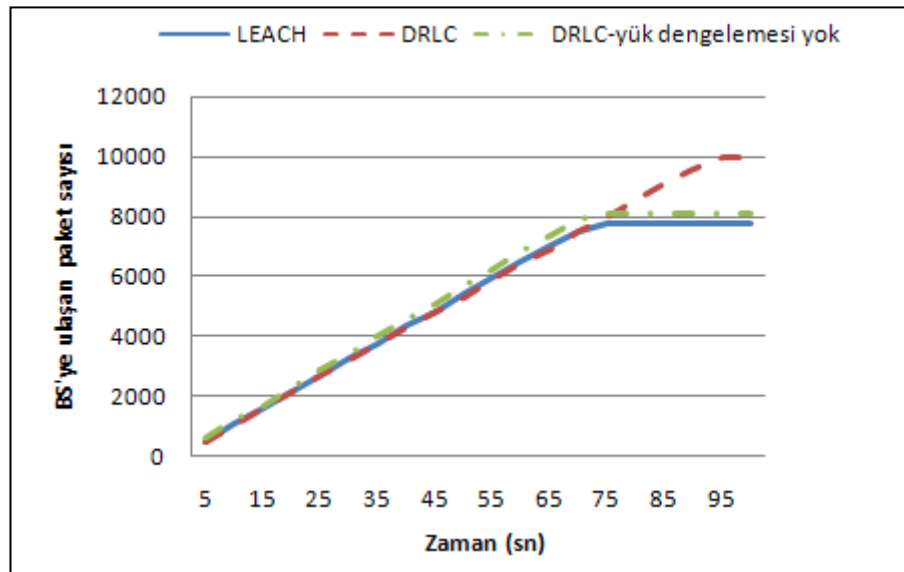
Şekil 5.8 Grup lideri hatalarının olduğu durumlarda gösterilen performans.

Çizelge 5.1 ise geliştirilen yöntem ve yine bu yöntemin yedek grup liderini dinamik olarak güncellemeyen versiyonu arasındaki karşılaştırmalar verilmiştir. Tüm durumlarda dinamik yedek belirleme yöntemi daha az ortalama enerji harcamıştır. Bunun yanında dinamik olarak en yüksek enerjili yedeğin seçilmesi sayesinde yedek CH görevi devraldıktan sonra enerjisini tüketmeden gönderebileceği paket sayısı da her durumda dinamik yöntem için daha fazladır. Bu sonuçlar yedek grup liderinin dinamik olarak güncellenmesinin ağırlık yaşam süresini artıracaklarını ortaya koymaktadır.

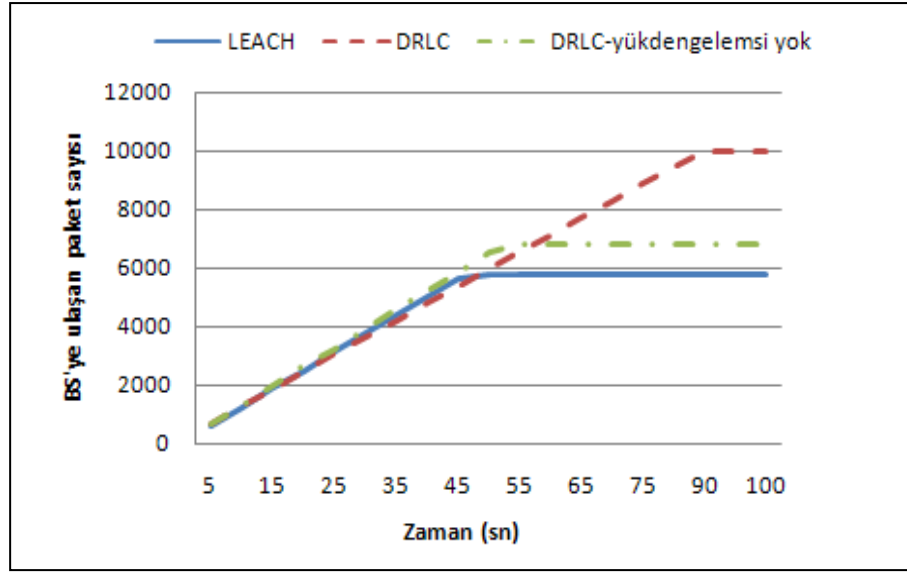
Çizelge 5.1 Dinamik ve durağan yedek CH karşılaştırması.

Ch hata sayısı	Harcanan ortalama enerji (DRLC)	Harcanan ortalama enerji (DRLC-statik yedek)	Gönderilebilecek paket sayısı (DRLC)	Gönderilebilecek paket sayısı (DRLC-statik yedek)
1	0,00408	0,00415	1187	1167
2	0,0041	0,00418	1206	1135
3	0,00413	0,0042	1162	1141
4	0,00415	0,00422	1188	1131
5	0,00416	0,00425	1176	1152
6	0,00418	0,00426	1088	1067
7	0,0042	0,00429	1159	1096
8	0,00422	0,00431	1143	1114
9	0,00423	0,00432	1154	1134
10	0,00425	0,00434	1151	1127

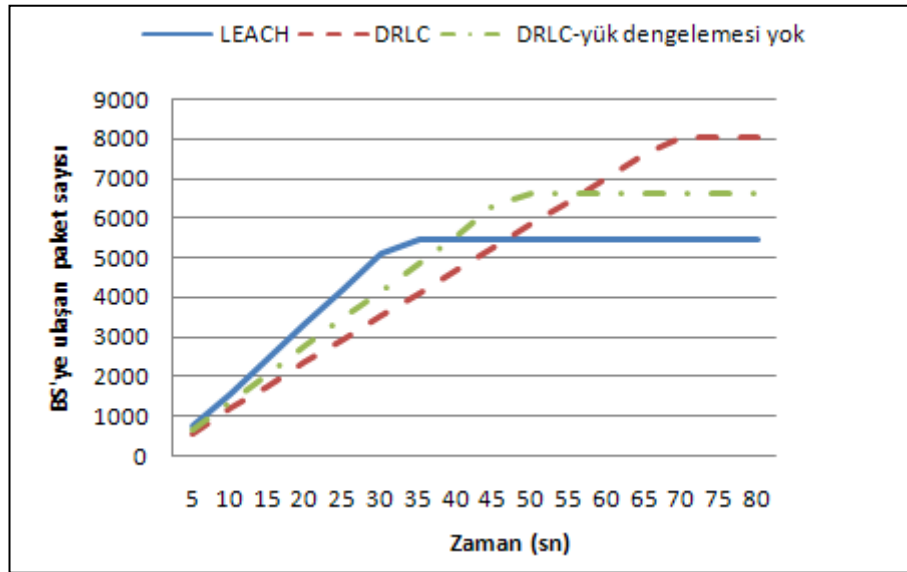
Dinamik yük dengeleme yaklaşımının sonuçları ise Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de sunulmuştur. Sırasıyla veri hızı 1,5 paket/ saniye, 2 paket/saniye ve 3 paket/saniye olduğu durumlarda üç algoritma karşılaştırılmıştır. Deneyler ilk CH enerjisini tüketene kadar devam etmiştir. Şekillerden de gözlemlendiği üzere her durumda önerilen yöntem daha iyi sonuç vermiştir. Hem CH enerjisini daha geç tüketmiş hem de bu süre içinde çok daha fazla paket BS’ ye ulaştırılmıştır. Çünkü yükü fazla olan grup lideri bunu diğer grup liderleriyle paylaşmış, yoğunluktan oluşabilecek paket kayıplarını önlemiş, enerjisinin de daha çabuk tükenmesini engellemiştir. Bu da dinamik olarak yapılan yük dengelemesinin ağırlık performansını artırdığını göstermektedir. Dinamik yük dengelemenin gözlemlenen olumsuz etkisi ise paket hızı 3 paket/saniye olduğunda diğer iki yönteme göre paket gecikmelerini artırmasıdır.



Şekil 5.9 Paket hızı 1,5 paket/saniye iken gözlemlenen performans.



Şekil 5.10 Paket hızı 2 paket/saniye iken gözlemlenen performans.



Şekil 5.11 Paket hızı 3 paket/saniye iken gözlemlenen performans.

6. SONUÇLAR

Kablosuz sensör ağları gün geçtikçe kullanım alanı artan ve önem kazanan bir teknolojidir. Fakat kablosuz sensörlerin kısıtlı enerji kapasitesi, düşük işlem gücü ve düşük belleğe sahip olmaları kablosuz sensör ağları için yeni yaklaşımlar ve yeni protokollere olan gereksinimi artırmaktadır.

Bu çalışmada da WSN için ilk olarak yük dengelemeli bir yönlendirme protokolü PLB önerilmiştir. PLB basit ve işlemsel yoğunluğu olmayan bir protokoldür. PLB çok kullanılan yollar üzerinde olan sensörlerin durumunu dikkate alarak enerjiyi dengeli bir şekilde kullanmayı sağlamış, paket başına harcanan enerjiyi düşürmüş böylece ağın yaşam süresini uzatmıştır. Ayrıca bunu yaparken salınım problemini de dikkate alarak yük dengelemesinin etkinliğini artırmıştır.

İkinci çalışmada ise kablosuz sensör ağlarında çok kullanılan ve ağın yaşam süresi ve etkinliği artıran gruplandırma tekniği için bir yöntem (DRLC) önerilmiştir. Önerilen protokol gruplandırma temelli yöntemlerde görülen tek nokta hatası problemini dikkate alarak dinamik bir yedek grup lideri seçimi yaklaşımı getirmiştir. Bu sayede deneysel sonuçlarda da görüldüğü gibi sistem, hatadan tüm sistemi yeniden gruplandırmaya gerek kalmadan kurtarılmış ve böylece harcanan enerji açısından kazanç sağlanmıştır. Dinamik olarak yedeğin güncellenmesi sayesinde hatadan kurtarma işlemi sonucunda enerjisi en yüksek olan üyenin yeni grup lideri olması sağlanmıştır. Ayrıca gruplar arası, grup liderlerinin yükünü dikkate alarak dinamik bir yük dengeleme çözümü önerilmiştir. Bu yöntemle trafik yoğunluğu artan grup liderlerinin bazı üyeleri diğer uygun gruplara aktararak grubun yaşam süresi uzatılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Edoardo Biagioni and Kent Bridges, "The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species.", In Special issue on Distributed Sensor Networks for the International Journal of High Performance Computing Applications, Vol. 16, N. 3, August 2002.
- [2] Kemal Akkaya, Mohamed Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Network", Elsevier Ad Hoc Network J. 3/3 (2005) On pages:325-349.
- [3] W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks", Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_99), Seattle, WA, August 1999.
- [4] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks", Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_00), Boston, MA, August 2000.
- [5] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor routing algorithm for sensor networks", Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.
- [6] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks", Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.
- [7] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, "TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.
- [8] Ossoma Younis and Sonia Fahmy, "HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks", IEEE Transactions on mobile computing, Vol. 3, No. 4, October- December 2004
- [9] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_01), Rome, Italy, July 2001.
- [10] Y. Yu, D. Estrin, R. Govindan, "Geographical and energyaware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.
- [11] Mohamed Younis, Moustafa Yousef, Khaled Arisha, "Energy Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks", Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS 2002) Page: 129.
- [12] Moussaoui O. , Ksenrini, A. , Djoudi M. , Nai'mi M., "Efficient Energy Saving in Wireless Sensor Networks Through Hierarchical-based Clustering", Global Information Infrastructure Symposium, 2007, On page(s): 226-229 .

- [13] Hui Dai Han, R., “A node-centric load balancing algorithm for wireless sensor Networks”, Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE, Publication Date: 1-5 Dec.2003 Volume: 1, On pages: 548- 552 Vol.1.
- [14] Gaurav Gupta, Mohamed Younis, “Performance Evaluation of Load Balanced Clustering of Wireless Sensor Networks”, ICT 2003. 10th International Conference on Publication Date: 23 Feb.-1 March 2003 Volume: 2, On pages: 1577- 1583.
- [15] Ramaswamy, V.; Hansson, A.; Eidenbenz, S. , “COBRA A Multi-path Adaptive Local Load Sensing Routing Protocol for Wireless Sensor Networks”, Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2007. WiMOB 2007.
- [16] Fyffe, M. Min-Te Sun Xiaoli Ma , “Traffic-Adapted Load Balancing in Sensor Networks Employing Geographic Routing”, Wireless Communications and Networking Conference, 2007,WCNC 2007.
- [17] Nirupama Bulusu, John Heidemann and Deborah Estrin, “Gps-less low cost outdoor localization for very small devices”, IEE Personal Communications Magazine, 7(5):28-24, October 2000.
- [18] M. Bhardjaw, et. Al., “Upper Bound on the Lifetime of Sensor Networks”, Proceedings of ICC 2001, June 2001.
- [19] Yongxuan Lai, Hong Chen, “CMATO:Energy-efficient fault tolerant mechanism for clustered wireless sensor networks”, Computer Communications and Networks, ICCCN 2007. Proceedings of 16th International Conference on 13-16 Aug. 2007, On page(s): 272-277.
- [20] O. Younis, S. Fahmy, and P. Santi, “An Architecture for Robust Sensor Network Communications”, Int’l Journal of Distributed Sensor Networks (IJDSN), vol. 1, no. 3/4, pp. 305–327, 2005.
- [21] M. Yang, J. Wang, Z. Gao, Y. Jiang, and Y. Kim, “Coordinated Robust Routing by Dual Cluster Heads in Layered Wireless Sensor Networks”, IEEE Proc. of the 8th Int’l Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 2005, pp. 454–461.
- [22] M. M. Hasan and Jason P. Jue, “ Resource efficient survivable clustering for wireless sensor networks”, Global Telecommunications Conference, 2007, IEEE on 26-30 Nov. 2007 On page(s): 1154-1158.
- [23] Gaurav Gupta and Mohamed Younis, “Fault-Tolerant clustering of wireless sensor networks”, Wireless Communications and Networking, 2003, on 20 March 2003, On page(s): 1579-1584 vol.3
- [24] Nidhi Bansal, T. P. Sharma, Manoj Misra and R. C. Joshi, “ FTEP : Fault tolerant election protocol for multi-level clustering in homogeneous wireless sensor networks”, ICON 2008,16th IEEE International Conference on 12-14 Dec. 2008 On page(s): 1-6
- [25] İsmail Tellioğlu and Hacı Ali Mantar, “A proportional load balancing algorithm for wireless sensor networks”, The Third International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM 2009,on 18-23 June 2009

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Sivas Divriği’de doğdu. Liseyi 1999-2003 yılları arasında Sivas Selçuk Anadolu Lisesi’nde tamamladı, 2007 yılında Başkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.