

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YARDIMLAŞAN NESNE AĞLARI İÇİN TELSİZ ORTAM  
ERİŞİM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

Bilgisayar Yük. Müh. Turgay KARLIDERE

**FBE Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 22 Aralık 2006  
**Tez Danışmanı** : Prof.Dr. Oya KALIPSIZ (YTÜ)  
**İkinci Tez Danışmanı:** Doç.Dr. Erdal ÇAYIRCI (Stavanger Ü.)  
**Jüri Üyeleri** : Prof.Dr. Emre HARMANCI (İTÜ)  
: Prof.Dr. Şebnem BAYDERE (Yeditepe Ü.)  
: Yard.Doç.Dr. Albert LEVİ (Sabancı Ü.)  
: Yard.Doç.Dr. A.Tevfik İNAN (YTÜ)

**İSTANBUL, 2006**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ .....	ix
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Tezin Katkısı .....	2
1.2 Tezin Yapısı .....	3
2. SUALTI GÖZETLEME SİSTEMLERİ VE KISITLARI .....	5
2.1 Sabit ve Gezgin Sualtı Gözetleme Sistemleri .....	5
2.2 Taktik Sualtı Gözetleme Sistemi .....	6
2.3 Taktik Sualtı Gözetleme Sistemlerinin Kısıtları .....	7
2.3.1 Enerji tüketimi ve gecikme .....	8
2.3.2 Gezginlik .....	8
3. DİĞER MAC PROTOKOLLERİNİN İNCELENMESİ .....	9
3.1 Planlı Erişim MAC Protokolleri .....	10
3.2 Çekişmeli Erişim MAC Protokolleri .....	14
3.3 Güç Kontrollü MAC Protokolleri .....	23
4. PCLS MAC PROTOKOLÜ .....	26
4.1 Gevşek Eşzamanlama .....	26
4.2 HELO Mesajları .....	28
4.3 İletim Gücü Kontrolü .....	29
5. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ .....	32
5.1 Protokol Parametreleri .....	32
5.2 Protokol Parametrelerinin Analitik Yöntemle İncelenmesi .....	33
5.3 Protokol Parametrelerinin Benzetim Çalışmasıyla İncelenmesi .....	46
5.4 PCLS Protokolünün Taktik Sualtı Gözetleme Sistemindeki Performansı .....	49

5.5	PCLS Protokolünün Diğer MAC Protokolleriyle Karşılaştırılması .....	52
5.5.1	Enerji tüketimi testlerinin sonuçları .....	54
5.5.2	Gecikme testlerinin sonuçları .....	56
6.	SONUÇLAR.....	59
6.1	Öneriler.....	61
KAYNAKLAR.....		62
INTERNET KAYNAKLARI.....		65
EKLER .....		66
Ek 1	PCLS MAC protokolü durum ve akış çizimeleri .....	67
Ek 2	OMNet++ ve Mobility Framework benzetim sistemi.....	71
Ek 3	RPGM (Reference Point Group Mobility) gezginlik modeli.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....		80

## SİMGE LİSTESİ

$B$	bit hızı
$c$	maksimum saat kayıklığı
$c_s$	saat sapma oranı
$c_w$	çekişme penceresi süresi
$GM$	grup hareket vektörü
$h$	HELO gönderme aralığı katsayısı
$k$	protokol yükü
$l_d$	veri paketi uzunluğu
$l_H$	HELO paketi uzunluğu
$n$	1-sekme menzilindeki komşu sayısı
$n_c$	ağ bağlantılılık eşiği
$P_{lpl}$	LPL'de çekilen güç
$P_{rx}$	almada çekilen güç
$P_{sleep}$	uykuda çekilen güç
$P_{tx}$	göndermede çekilen güç
$r$	rasgele geriçekme süresi
$RN$	referans noktası
$RM$	rassal hareket vektörü
$t_d$	veri paketi iletim süresi
$T_d$	veri paketi üretme aralığı
$t_H$	HELO paketi iletim süresi
$T_H$	HELO paketi gönderme aralığı
$t_{lpl}$	bir kerelik LPL süresi
$t_p$	maksimum öncül süresi
$T_r$	çizelge yenileme aralığı
$t_s$	dinleme aralığı
$z$	güç bölgeleri sayısı

## **KISALTMA LİSTESİ**

CCA	Clear Channel Assesment
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	CSMA/Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
GSGS	Gezgin Sualtı Gözetleme Sistemi
LPL	Low Power Listening
MAC	Medium Access Control
MF	Mobility Framework
nm	Nautical Mile (deniz mili) (1852 m)
OMNet++	Objective Modular Network Testbed in C++
PCLS	Power Controlled Loosely Synchronized
ppm	Part Per Million
RF	Radyo Frekansı
RoBoat	Robot Bot
RTS	Request To Send
SDD	Sualtı Duyara Düğümü
SSGS	Sabit Sualtı Gözetleme Sistemi
Tcl	Tool Command Language
TDA	Telsiz Duyarga Ağı
TDMA	Time Division Multiple Access
TSGS	Taktik Sualtı Gözetleme Sistemi
YNA	Yardımlaşan Nesne Ağı

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Sabit Suallı Gözetleme Sistemi (SSGS).....	5
Şekil 2.2 Gezgin Suallı Gözetleme Sistemi (GSGS).....	6
Şekil 2.3 Taktik Suallı Gözetleme Sistemi (TSGS). ....	7
Şekil 3.1 EMACS protokolünde zaman dilimlerinin yapısı. ....	12
Şekil 3.2 IEEE 802.15.4 standardında bir zaman çerçevesinin yapısı. ....	13
Şekil 3.3 TRAMA ve MMAC protokollerinde zaman çerçevesinin yapısı. ....	13
Şekil 3.4 Z-MAC protokolünde zaman dilimlerinin belirlenmesi.....	14
Şekil 3.5 ALOHA ve slotted ALOHA protokollerinde çarpışma aralıkları. ....	15
Şekil 3.6 “Hidden terminal” problemi.....	16
Şekil 3.7 “Exposed terminal” problemi.....	16
Şekil 3.8 IEEE 802.11 protokolü.....	17
Şekil 3.9 S-MAC protokolü.....	19
Şekil 3.10 T-MAC protokolü. ....	20
Şekil 3.11 DMAC protokolü. ....	21
Şekil 3.12 B-MAC protokolünde LPL ve öncül sinyali kullanımı.....	21
Şekil 3.13 WiseMAC protokolü. ....	22
Şekil 3.14 SCP-MAC protokolü.....	22
Şekil 3.15 PARO ve PCM protokolleri. ....	25
Şekil 4.1 Gevşek eşzamanlama. ....	27
Şekil 4.2 HELO mesajları.....	28
Şekil 4.3 Güç bölgeleri tablosu. ....	29
Şekil 4.4 Vericinin güç bölgeleri.....	30
Şekil 5.1 Protokol yükü ( $k=t_p/t_s$ ) için çözüm kümesi. ....	38
Şekil 5.2 Protokol yükünün ( $k=t_p/t_s$ ) en düşük değerleri. ....	38
Şekil 5.3 HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ). ....	39
Şekil 5.4 RPGM modeline göre ortalama bağlantı kopma süreleri.....	41
Şekil 5.5 Dinleme aralığı ( $t_s$ ). ....	42
Şekil 5.6 Birim zamanda harcanan enerji miktarı (analitik).....	42
Şekil 5.7 Paket başına düşen gecikme (analitik). ....	45
Şekil 5.8 Birim zamanda harcanan ortalama enerji miktarı (benzetim).....	47

Şekil 5.9	Paket başına düşen ortalama gecikme (benzetim).....	48
Şekil 5.10	PCLS protokolünde ortalama enerji tüketimi (TSGS). ....	51
Şekil 5.11	PCLS protokolünde ortalama gecikme (TSGS). ....	51
Şekil 5.12	LMAC protokolünde zaman dilimlerinin yapısı. ....	53
Şekil 5.13	PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama enerji tüketimi (100 SDD). ....	55
Şekil 5.14	PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama enerji tüketimi (150 SDD). ....	55
Şekil 5.15	PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama enerji tüketimi (200 SDD). ....	56
Şekil 5.16	PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama gecikme (100 SDD). ....	57
Şekil 5.17	PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama gecikme (150 SDD). ....	57
Şekil 5.18	PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama gecikme (200 SDD). ....	58
Şekil Ek 1.1	Başlangıç konumu.....	67
Şekil Ek 1.2	Kapalı konumda durum değişikliği.....	68
Şekil Ek 1.3	Açık konumda durum değişikliği.....	69
Şekil Ek 1.4	Açık konumda durum değişikliği (devamı). ....	70
Şekil Ek 2.1	OMNet++ grafik arayüzü.....	72
Şekil Ek 2.2	Mobility Framework modülleri.....	73
Şekil Ek 2.3	PCLS protokolünün geliştirilmesinde kullanılan modüller. ....	74
Şekil Ek 3.1	RPGM gezginlik modeli. ....	78
Şekil Ek 3.2	RPGM gezginlik modelinde nesnelerin bağımsız hareketleri. ....	78
Şekil Ek 3.3	RPGM gezginlik modelinde nesnelere arasındaki mesafeler. ....	79

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Telsiz (duyurga) ağlarda kullanılan MAC protokolleri .....	9
Çizelge 5.1 Analitik çalışmadaki radyo parametreleri .....	32
Çizelge 5.2 PCLS protokol parametreleri ve kabul edilen değerleri .....	33
Çizelge 5.3 RPGM gezginlik modeli parametreleri .....	40
Çizelge 5.4 Benzetim çalışmasındaki parametreler .....	46
Çizelge 5.5 Ağ bağlantılılık eşik değerleri .....	50



## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde danışmanım Prof.Dr.Oya Kalıpsız'a ve değerli katkılarını esirgemeyerek çalışmanın çok daha verimli bir şekilde tamamlanmasını sağlayan ikinci danışmanım Doç.Dr.Erdal Çayırıcı'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme jürimde bulunarak değerli katkılarıyla tezime yön veren Yrd.Doç.Dr.Albert Levi ve Yrd.Doç.Dr.A.Tevfik İnan'a ayrıca teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince çeşitli aşamalarda katkıları bulunan değerli öğretim üyelerine, çalışma arkadaşlarıma ve Yrd.Doç.Dr.Vedat Coşkun'a teşekkür ederim.

Çalışmalarımnda desteklerini esirgemeyen ve özverileriyle rahat çalışmamı sağlayan başta eşim ve kızlarım olmak üzere meslektaşım Metin Yavaş'a gösterdikleri anlayıştan dolayı çok teşekkür ederim.

## ÖZET

Yardımlaşan nesnelere, ortamda gömülü çok sayıda duyarlıdan aldıkları bilgileri ve diğer nesnelere gelen istekleri gerçek zamanlı işleme ve iletmeleri gerekmektedir. Ayrıca nesnelere, genellikle gözetimsiz ve özerk çalışmak zorunda olduklarından güç kaynaklarının yenilenmesi çok zor ya da imkansızdır. Bu nedenle iletim gecikmesi ve enerji tüketimi, yardımlaşan nesne ağları için iki önemli hizmet kalitesi ölçütüdür. Özellikle nesnelere gezgin olduğu uygulamalarda sık ilinge değişimleri nedeniyle bu önem daha da artmaktadır.

Yardımlaşan nesne ağlarının özelliklerine uygun olarak geliştirilen PCLS (power controlled loosely synchronized) MAC protokolünde, nesnelere dinleme zamanları gevşek eşzamanlı olduğundan komşuların dinleme-uyuma çizelgelerini takip etmek gerekmez. Bu sayede daha kısa öncül sinyali kullanılarak protokol yükü azaltılmaktadır. PCLS protokolünde gevşek eşzamanlı dinlemenin yanı sıra açık döngü iletim gücü kontrolü uygulanmaktadır. Ağda yeterli bağlantılılığı sağlayan iletim gücünün belirlenmesinde periyodik olarak yayınlanan HELO mesajlarından yararlanılmaktadır. HELO mesajlarına dayalı güç kontrol yöntemi komşu kimliklerine bağlı değildir. PCLS protokolünün bu özellikleri, arıza ve gezginlikten kaynaklanan ilinge değişikliklerinden etkilenmeksizin, iletişimde enerji tüketimini ve veri bağı katmanı gecikmesini azaltmaktadır.

PCLS protokol parametrelerinin enerji tüketimi ve gecikmeye etkileri analitik yöntemle incelenmekte ve geçerlilikleri benzetim yoluyla da gösterilmektedir. PCLS MAC protokolünün performansı OMNet++ benzetim ortamında değerlendirilmektedir. Benzetimlerde Taktik Suallı Gözetleme Sistemi (TSGS) senaryosu esas alınarak nesnelere referans nokta grup gezginlik (RPGM) modeline göre hareket ettikleri kabul edilmektedir. PCLS protokolü, B-MAC ve LMAC protokolleriyle karşılaştırıldığında hem enerji tüketimi hem de gecikme ölçütleri açısından daha iyi performans elde edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** MAC protokolleri, yardımlaşan nesnelere, suallı gözetleme sistemleri, gezginlik modelleri, OMNet++.

## ABSTRACT

Cooperating Objects (COs) are mobile and sentient entities that react the real time sensed data coming from large number of sensors embedded into the environment as well as the requests coming from the other COs in the vicinity. Therefore, the delay in conveying the data is an important quality of service (QoS) requirement. Moreover, COs generally run unattended and autonomously for extended period of times which makes the energy consumption another important QoS parameter. To fulfill the requirements related to these parameters is a challenging task especially when COs are mobile.

We introduce power controlled and loosely synchronized (PCLS) MAC protocol for COs. PCLS protocol employs loosely synchronized listen-sleep schedules. Therefore the objects do not need to learn the schedules of their neighbors, and shorter preambles, which lower the protocol overhead, become possible. In addition to loose synchronization, PCLS protocol employs open-loop transmission power control. This power control scheme makes use of the periodic HELO messages to determine the transmission power level that satisfies the network connectivity. It does not depend on the neighbor IDs. These features of PCLS protocol reduce the energy consumption and the link layer delay, and also make PCLS resilient against topology changes due to node failures and mobility.

Effects of the protocol parameters on the energy consumption and delay are studied analytically, and verified through simulations. Performance evaluation is performed in OMNet++ simulation environment based on the Tactical Underwater Surveillance System in which the objects are assumed to move according to the reference point group mobility (RPGM) model. PCLS protocol is also compared with B-MAC and LMAC protocols. Simulation results reveal better performance than both protocols for energy consumption as well as delay.

**Keywords:** MAC protocols, cooperating objects, underwater surveillance systems, mobility models, OMNet++.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda mikro-elektromekanik sistemlerde yaşanan gelişmeler sonucunda, sadece algılama yapabilen ve büyük boyutlu duyargalar yerine çok küçük boyutlarda ve çok işlevli duyargalar geliştirilmiştir. Yeni duyargalar farklı tip verileri (ısı, nem, hareket, ses vb.) algılama, depolama, işleme ve diğer duyargalara iletme özelliğine sahiptir. Daha akıllı ve daha yetenekli hale gelen bu duyargaların birlikte oluşturdukları telsiz duyarga ağları (TDA), tasarsız ve gözetimsiz ortamlarda kullanılabilmekte ve insansız çalışma gerektiren durumları desteklemektedir. Duyargaların çevreye kattığı bu yeteneklerden daha fazla yararlanma fikri Yardımlaşan Nesne Ağları (YNA) çalışmalarını [1] ortaya çıkarmıştır. Duyargalarla birlikte tetikleyiciler ve mini-robotlar da kullanılarak, insanlara zor, sıkıcı, pis ve tehlikeli gelen ve bu nedenle de istenmeyen işler insansız yapılabilir hale gelmektedir.

Yardımlaşan Nesne Ağları; ortak bir amacı gerçekleştirmek üzere, ortamla ve birbirleriyle etkileşebilen, telsiz ortamda haberleşerek yardımlaşan ve aynı zamanda kendi başlarına özerk çalışabilen nesnelere topluluğudur. Ağdaki nesnelere; gözetimsiz duyargalar, tetikleyiciler ya da denetleyiciler olabileceği gibi özyineli olarak birden fazla yardımlaşan nesnenin biraraya gelmesiyle oluşan karmaşık nesnelere de olabilir. Bu nedenle YNA, klasik duyarga-tetikleyici ağlarına göre daha heterojen bir yapıya sahiptir. Ayrıca YNA'ların kullanım alanlarından ana kara güvenliği, askeri sistemler, yıkım onarımı ve arama kurtarma gibi birçok uygulama, nesnelere gezgin olmasını gerektirmektedir.

Gezgin YNA'ların ana kara güvenliği alanında uygulamasına bir örnek olan Taktik Suatlı Gözetleme Sistemi (TSGS) ikinci bölümde anlatılmaktadır. TSGS gibi bir YNA'da çok sayıda nesnenin, ortamdan ve birbirlerinden aldıkları bilgileri gerçek zamanlı işleme ve iletmeleri gerekmektedir. Bu nedenle iletim gecikmesi YNA'lar için önemli bir hizmet kalitesi ölçütüdür. Ayrıca nesnelere, genellikle gözetimsiz ve özerk çalışmak zorunda olduklarından güç kaynaklarının yenilenmesi çok zor ya da imkansızdır. YNA'nın uzun ömürlü olabilmesi için enerji tüketimini azaltan çalışma yöntemleri tercih edilmelidir. Bu açıdan bakıldığında ise YNA'lar için diğer bir hizmet kalitesi ölçütü enerji tüketimidir. Bu iki ölçüt, nesnelere haberleşmede kullandıkları telsiz ortam erişim yöntemi (MAC protokolü) ile yakından ilgilidir.

MAC protokolleri, aynı iletişim ortamını paylaşan istasyonların, iletişim ortamını kullanırken uymaları gereken kuralları belirlemektedir. Bu sayede istasyonlar arasındaki çekişmeler giderilerek, kanaldan daha fazla faydalanılması sağlanmaktadır. Çekişmenin azaltılması, hem

çarpışmaları hem de tekrar göndermeleri azaltarak enerji tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Enerji tüketimini azaltmanın diğer bir yolu da belli aralıklarla alıcı-vericiyi kapatmaktır. Alıcı-vericiyi belli aralıklarla kapatmak, bir yandan enerji tasarrufu sağlarken diğer yandan iletişimde gecikme yaratmaktadır. Bu nedenle, alıcı-vericinin hangi aralıklarla ve sürelerle kapatılacağına karar veren MAC protokolü, enerji tüketimini ve gecikmeyi doğrudan etkilemektedir. YNA'larda kullanılacak MAC protokolü, enerji tüketimini ve gecikmeyi azaltırken, YNA'lardaki yüksek nesne yoğunluğuna, gezginliğe ve duyargaların kısıtlı kaynaklarına da uygun olmalıdır.

### 1.1 Tezin Katkısı

TDA'lar ile YNA'lar benzer özelliklere sahiptir. TDA'lar için geliştirilmiş MAC protokollerindeki eşzamanlama, enerji kısıtı, protokol yüklerini azaltma ihtiyacı, yoğunluk gibi güçlükler YNA'lar için geliştirilecek protokoller için de geçerlidir. Fakat TDA'lar için geliştirilmiş yöntemlerde birinci öncelik enerji tüketimini azaltmaya verilirken, gecikme ikinci öncelikle ele alınmakta, gezginlik ise çoğunlukla dikkate alınmamaktadır.

Tezde, yardımlaşan nesne ağları için PCLS (power controlled, loosely synchronized) MAC protokolü geliştirilmiştir. Geliştirilen MAC protokolünde periyodik ve eşzamanlı dinleme-uyuma uygulanmaktadır. Eşzamanlamanın neden olacağı çarpışmaları önlemek üzere saat kayıklığından faydalanılmaktadır. Ayrıca maksimum saat kayıklığıyla orantılı kısa öncül sinyali kullanılmakta ve belli aralıklarla yayınlanan HELO mesajlarıyla da saat kayıklığının artması engellenmektedir. Bu sayede komşuların kimliklerinden ve dinleme-uyuma çizelgelerinden bağımsız hareket edilerek gezginlik nedeniyle komşulardaki değişimin protokole etkileri azaltılabilmektedir.

PCLS protokolünde enerji tüketimini azaltmak için periyodik dinleme-uyuma yöntemine ilaveten iletim gücü kontrol edilmektedir. Diğer MAC protokollerinde iletim gücü kontrolü için ya kontrol paketleri kullanılmakta ya da ayrı bir frekans kanalından faydalanılmaktadır. Ayrı bir frekans kanalı kullanılması veya protokol yükünü arttıran kontrol paketlerinin kullanılması, kısıtlı kaynaklara sahip nesnelere uygun olmadığından, PCLS protokolü, HELO mesajlarına dayalı açık döngü ve basamaklı güç kontrolü uygulamaktadır.

Geliştirilen MAC protokolünün parametreleri, protokol yükünü en aza indirecek şekilde analitik yöntemle belirlenmektedir. Protokol parametreleri, uygulamanın ihtiyaçlarına göre gecikme ve enerji tüketimini dengeleyecek şekilde ayarlanabilmektedir. Analitik çalışmanın

geçerliliği benzetim yoluyla da doğrulanmaktadır. YNA'ların yapısına uygun geliştirilen PCLS protokolünün performansı, TDA'lar için geliştirilmiş B-MAC ve LMAC protokolleriyle, TSGS senaryosu kullanılarak karşılaştırılmaktadır.

## 1.2 Tezin Yapısı

Tezin bundan sonraki bölümlerinin yapısı aşağıda verilmektedir.

İkinci bölüm, YNA'ların daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacağı düşünülen sualtı gözetleme sistemlerine ayrılmıştır. Sualtı gözetleme sistemlerinin kullanım alanları, faydaları, mevcut uygulama şekilleri tanıtarak sınıflandırma yapılmaktadır. Daha sonra, tezde geliştirilen MAC protokolünün testlerinde kullanılan TSGS senaryosu açıklanmakta ve taktik sualtı gözetleme sistemlerinde iletişimi etkileyen kısıtlar ele alınmaktadır.

Üçüncü bölümde telsiz ağlar ve telsiz duyurga ağlar için geliştirilmiş MAC protokolleri incelenmektedir. Bugüne kadar telsiz ağlar için geliştirilmiş çok sayıda MAC protokolü olduğundan sadece TDA'ların incelenmesinde faydalı olacak protokoller ele alınmıştır. Çekişmeli erişim ve planlı erişim protokolleri olmak üzere iki sınıfa ayırdığımız protokollerin, YNA'larda uygulanabilirliğini engelleyen özellikleri üzerinde durulmaktadır.

PCLS MAC protokolünün çalışma şekli ve özellikleri dördüncü bölümde yer almaktadır. İlk olarak PCLS protokolünde periyodik dinleme-uyuma aralıkları, saat kayıklığı, gevşek eşzamanlama ve öncül sinyali üzerinde durulmaktadır. Daha sonra HELO mesajları ve çizelge yenileme işleminin nasıl yapıldığı ele alınmaktadır. Son olarak iletim gücünün kontrolünde kullanılan yöntem anlatılmaktadır.

Beşinci bölüm PCLS protokolünün performans değerlendirmesine ayrılmıştır. PCLS protokolünün performansı, enerji tüketimi ve veri bağı katmanı gecikmesi ölçütleri yönünden değerlendirilmektedir. Değerlendirmede kullanılan protokol parametreleri tanıtarak, parametrelerin performans ölçütleri üzerine etkileri analitik yöntemle incelenmektedir. Analitik yöntemle belirlenen parametrelerin değerleri, benzetim çalışmasında da kullanılarak, parametrelerin performans ölçütleri üzerine etkileri benzetim yoluyla da doğrulanmaktadır. Daha sonra, PCLS protokolü TSGS senaryosu kullanılarak OMNet++ benzetim ortamında B-MAC ve LMAC protokolleriyle karşılaştırılmaktadır.

Altıncı bölüm, tezde elde edilen sonuçları ve bundan sonra yapılacak çalışmalar için önerileri içermektedir.

PCLS protokolünün geliştirilmesinde esas alınan durum ve akış çizenekleri, benzetimlerde kullanılan OMNet++ ortamının tanıtımı ve testlerde esas alınan RPGM gezginlik modelinin anlatıldığı kısımlar Ek bölümlerde yer almaktadır.

## 2. SUALTI GÖZETLEME SİSTEMLERİ VE KISITLARI

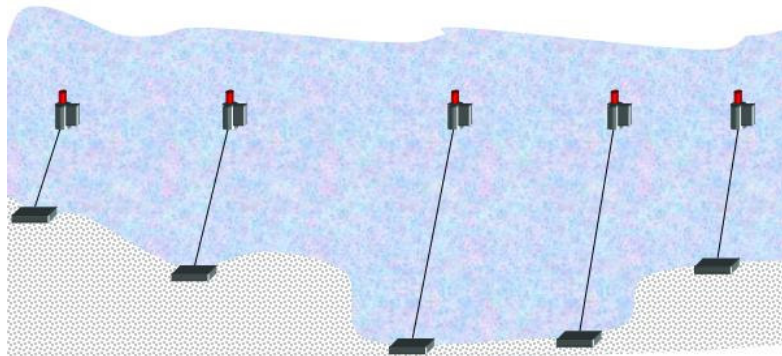
Körfezler, boğaz ve liman girişleri gibi sahile yakın bölgeler, kötü amaçlı sızmalara karşı korunması gereken hassas alanlardır. Denizaltılar, insansız sualtı vasıtaları, dalgıçlar ve mayınlar bu bölgelerde beklenebilecek olası tehditlerdir. Kıyıya yakın deniz alanlarındaki bu tehditleri tespit ve teşhis ederek sualtı güvenliğini sağlamak için, açık deniz hareketlerinde yer alan fırkateyn, denizaltı ve helikopter gibi değerli ve kısıtlı savunma unsurlarını kullanmak uygun bir çözüm değildir. Dahası, bütün kıyı sularını devriye botları, denizaltı ve karakol gemileriyle kaplamak birçok ülke için mümkün olmayabilir.

Günümüzde sualtı gözetleme maksatlarıyla sonobuoy'lar ve hidrofon'lar da kullanılmaktadır. Uzak mesafelerden algılama yapabilen fakat pahalı bu cihazları atmak, uzun süre gözetimsiz işletmek ve daha sonra toplamak oldukça zor ve masraflıdır.

Telsiz duyurga ağlarına dayalı Sualtı Gözetleme Sistemleri, değerli ve kısıtlı kaynaklar üzerindeki bu yükü alarak çok daha geniş alanların daha maliyet-etkin şekilde ve uzun süre gözetlenmesini sağlayacak sistemlerdir. Böylece değerli savunma unsurları diğer ihtiyaç duyulan bölgelerde görevlendirilebilir.

### 2.1 Sabit ve Gezgin Sualtı Gözetleme Sistemleri

Sualtı gözetleme sistemleri, gözetlenecek bölgenin derinliğine ve kıyıya yakınlığına bağlı olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Şekil 2.1'de görülen Sabit Sualtı Gözetleme Sistemi (SSGS), kıyıya çok yakın liman ve liman niteliğindeki körfezler gibi sınırlı büyüklükte, sığ ve orta derinlikte, sürekli korunması gereken sularda kullanıma uygundur. SSGS, askeri bölgelerde su altı güvenliğinin yanısıra, sivil limanların veya deniz kıyısındaki tesislerin su altı güvenliği için de kullanılabilir.

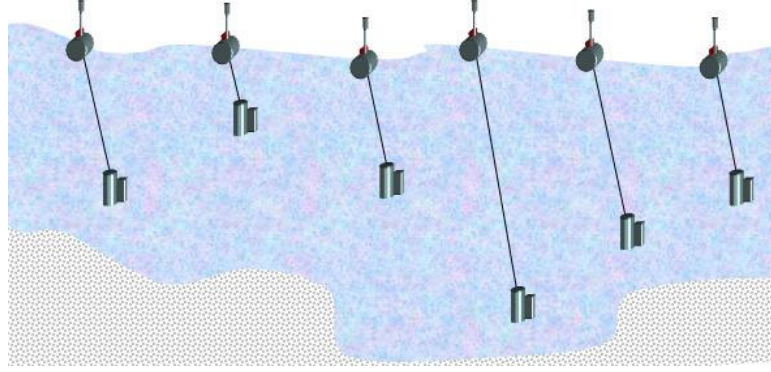


Şekil 2.1 Sabit Sualtı Gözetleme Sistemi (SSGS).



Bu sistemdeki düğümler, deniz dibinde sabit bir noktaya yerleştirilmekte ve düğümlere bağlı duyarga öbeklerinin derinlikleri bu sabit noktadan yükseltilmek suretiyle ayarlanmaktadır. Sahile yakın sabit sistemlerde duyarga öbeklerinin algıladığı veriler, duyurgalar arasında kablolu bağlantı yapılarak iletilebilir.

Körfezler, liman ve boğaz girişleri gibi derin ve sahile uzak bölgelerde ise sabit sistemler yerine gezgin sistemler gerekmektedir. Gezgin sistemler, yabancı sularda gemilerin sualtı çevre güvenliği için de kullanılabilir. Gezgin Sualtı Gözetleme Sisteminde (GSGS) duyarga düğümleri suüstünde yüzmektedir. Şekil 2.2’de görülen duyarga öbekleri, düğümlerden aşağı sarkıtılarak istenilen derinliğe indirilmektedir. Düğümler, teknelerden veya hava araçlarından rasgele atılarak dağıtılabilir. Sualtında algılanan veriler, suüstünde telsiz ortamda iletilmektedir.

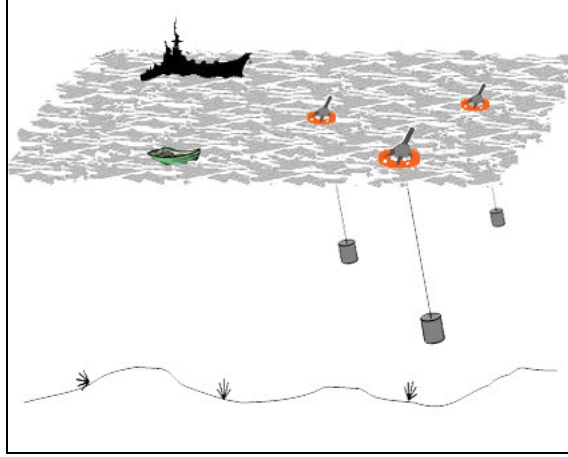


Şekil 2.2 Gezgin Sualtı Gözetleme Sistemi (GSGS).

## 2.2 Taktik Sualtı Gözetleme Sistemi

PCLS protokolünün testlerinde, askeri amaçlı gezgin sualtı gözetleme sistemi olan Taktik Sualtı Gözetleme Sistemi (TSGS) senaryosu esas alınmıştır. Şekil 2.3’te görülen TSGS, sualtı duyarga düğümlerinin (SDD) yanısıra suüstü gemisi ve robot botlar (RoBoat) gibi yardımcı nesnelere oluşmaktadır.

En üst seviye yardımcı nesne olan suüstü gemisi, üzerinde bulunan robot botların taşınması, dağıtılması ve toplanmasının yanında uzun mesafe iletişime de aracılık etmektedir. Robot botlar ise benzer görevleri SDD’ler için yaparlar. Herbir SDD, su üstünde yüzen bir can simidine monte edilmiş telsiz duyarga düğümüdür ve üzerindeki duyarga demedini hesaplanan belli bir derinliğe indirebilecek düzeneğe sahiptir (Çayırıcı vd., 2006). SDD’ler, üzerlerindeki RF alıcı-vericileri sayesinde komşu nesnelere haberleşerek birlikte çalışırlar.



Şekil 2.3 Taktik Sualtı Gözetleme Sistemi (TSGS).

Suüstü gemisi bölgeye ait fiziki oşinografik bilgileri (akıntı, sıcaklık, tuzluluk, dalga vb.) değerlendirerek en iyi kaplamayı sağlayacak şekilde SDD'lerin atılacağı yerleri belirler ve buna göre robot botları bölgenin yakınına bırakır. Robot botlar ise üzerlerindeki SDD'leri belirlenen mevkilere dağıtırlar. Yayılma safhasının ardından SDD'ler etkinleşip kendi aralarında ve robot botlarla haberleşerek bir YNA oluştururlar. Herbir SDD kendi sorumluluk sahasında en iyi kaplamayı sağlayacak şekilde duyurga demedini yeterli derinliğe indirerek ortamdaki sesi, ısıyı, basıncı ve manyetik verileri örneklemektedir (Çayırıcı vd., 2006). Bu verileri değerlendirerek tehdit tespit ettiğine karar veren bir SDD'nin bulguları, komşu nesnelere üzerinden robot botlara ve suüstü gemisine iletilmektedir.

### 2.3 Taktik Sualtı Gözetleme Sistemlerinin Kısıtları

Taktik sualtı gözetleme sistemlerinde nesnelere atılması, gerektiğinde toplanması veya yenilerinin atılması, deniz suyunun etkileri, bakım ve onarım zorlukları dışında kalan özellikle iletişimi etkileyen kısıtlamalar bu bölümde ele alınmaktadır.

Gözetimsiz ve özerk çalışan çok sayıda nesnenin telsiz ortamdaki iletişimi, telsiz duyurga ağlarındakine benzer kısıtlamalara sahiptir. Çünkü TDA'lar gibi YNA'larda da “*en güçsüz halka*” duyurgalarıdır. Duyurgaların, yenilenmesi çok zor ve sınırlı kaynakları iletişimin her safhasında enerji tüketimini dikkate almayı gerektirmektedir. Enerji tüketiminin yanı sıra iletişimde gecikme, TSGS gibi bir YNA'da TDA'lardan daha önemlidir. Ayrıca, TSGS içinde yer alan nesnelere gezgin olduklarından kullanılacak iletişim yöntemleri, gezginlik ve arızalardan kaynaklanan ilinge değişimlerine karşı dayanıklı olmalıdır.

### **2.3.1 Enerji tüketimi ve gecikme**

Gecikme ve enerji tüketimi birbiriyle çelişen iki hizmet kalitesi ölçütüdür. İletişimde enerji tüketimini azaltmak için belli aralıklarla alıcı-verici kapatıldığı takdirde gecikme artmaktadır. Gecikmeyi azaltmak için daha sık aralıklarla dinleme ve gönderme yapıldığında ise daha fazla enerji harcanmaktadır. Bu nedenle iletişimde kullanılacak yöntemlerin parametreleri, uygulamanın ihtiyaçlarına göre gecikme ve enerji tüketimini dengeleyecek şekilde ayarlanabilir olmalıdır.

### **2.3.2 Gezinlik**

Taktik sualtı gözetleme sistemi gibi yardımlaşan nesnelerin ortak bir amacı gerçekleştirmek üzere biraraya getirildiği bir sistemde nesnelere, hem grup halinde hem de grup içinde özerk hareket etmektedirler. Diğer taraftan, deniz ortamında çalışmaktan dolayı nesnelerin arıza sıklığı artmaktadır. Bu nedenle gezinlik ve arızalardan kaynaklanan sık ilinge değişimlerine dayanıklı iletişim yöntemleri kullanılmalıdır.

### 3. DİĞER MAC PROTOKOLLERİNİN İNCELENMESİ

*ALOHA*'dan (Abramson, 1970) bugüne kadar 35 yılı aşkın sürede telsiz ağlar için çok sayıda MAC protokolü önerilmiştir. Bu MAC protokolleri değişik çalışmalarla farklı özelliklerine göre sınıflandırılarak incelenmiştir (Jurdağ vd., 2004) (Kumar vd., 2006) (Zhai vd., 2006). Çalışma şekline göre çekişmeli erişim, planlı erişim ve karma protokoller; ilinge yapısına göre tek-sekmeli, çok-sekmeli, kümeli (clustered), merkezi kontrollü protokoller; tek veya çok kanallı protokoller; yönlü veya yönsüz anten kullanan protokoller; sabit veya değişken iletim gücü uygulanan protokoller ve gezginliği destekleyenler gibi değişik sınıflandırmalar yapılmıştır. Genel olarak bakıldığında telsiz ağ MAC protokollerinde hedef, kanaldan faydalanma oranını ve başarımı yükseltmek, gecikmeyi azaltmak ve istasyonlar arasında dengeli erişim sağlamaktır (Kumar vd., 2006) (Zhai vd., 2006). TDA'larda kısıtlı kaynaklar nedeniyle enerji tüketimi en önemli parametre olduğu için, geliştirilen diğer protokoller yeterli gelmemiş ve TDA'lar için enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen yeni MAC protokolleri geliştirilmiştir (Demirkol vd., 2006).

Çizelge 3.1 Telsiz (duyarga) ağlarda kullanılan MAC protokolleri

Çekişmeli erişim protokolleri			Planlı erişim protokolleri		
ALOHA (1970)	MACA (1990)	MACAW (1994)	Distributed TDMA (1996)		
MACA-BI (1997)	PICONET (1997)		Bluetooth (1999)	SMACS (2000)	
PAMAS (1998)	IEEE 802.11 (1997 / 1999)		NAMA, LAMA, PAMA (2001)	LEACH (2000)	
RBAR (2001)	ARC (2001)	SEEDEX (2001)			
OAR (2002)	S-MAC (2002)	LPL/Pre.Samp. (2002)	ER-MAC (2003)	TRAMA (2003)	EMACS (2003)
T-MAC (2003)	SIFT (2003)	WiseMAC (2003)			
B-MAC (2004)	DMAC (2004)	IEEE 802.15.4 (2003)	LMAC (2004)		
SEESAW (2005)	SCP-MAC (2006)	Z-MAC (2005)	MMAC (2005)	BitMAC (2005)	

TDA'lar gibi YNA'larda da “*en güçsüz halka*” duyurgalar olduğundan, YNA'larda kullanılacak MAC protokolü, işlem ve haberleşme gücü sınırlı bu nesnelere uygun olmalıdır. Örneğin, duyurga düğümlerinde yönlü anten kullanımı veya çok kanallı iletişim çözümleri henüz kabul edilebilir seviyede değildir. Ayrıca, TDA'larda karşılaşılan

eşzamanlama, enerji kısıtı, protokol yüklerini azaltma ihtiyacı ve yoğunluk gibi güçlükler YNA'lardaki nesnelere için de geçerlidir. YNA'ların TDA'lardan en önemli farkları gecikme kısıtları ve gezginlikten kaynaklanmaktadır. Bu nedenlerle tezimizde, TDA'lar için geliştirilen MAC protokolleri daha detaylı incelenmiştir.

İncelemeye esas MAC protokolleri Çizelge 3.1'de listelenmiştir. Çalışma şekline göre çekışmeli erişim ve planlı erişim olarak ayırdığımız MAC protokolleri öncelikle bu iki grupta incelenmektedir. (Ortada bulunan IEEE 802.15.4 ve Z-MAC protokolleri ise karma protokollerdir.) Listede koyu çizginin üst tarafı telsiz ağlar için tasarlanmış; alt tarafı ise TDA'lar için tasarlanmış MAC protokollerini kapsamaktadır. Çizelgedeki sınıflandırmanın dışında bu bölümde ayrıca, MAC protokollerinde iletim gücü kontrolü üzerine yapılan çalışmalara yer verilmektedir.

### 3.1 Planlı Erişim MAC Protokolleri

Planlı erişim MAC protokolleri, istasyonlar arasında zaman, frekans ve kod bölüşümü yapılmasına bağlı olarak değişik gruplara ayrılmaktadır. TDA'lar için geliştirilen planlı erişim MAC protokolleri, duyargaların kısıtlı kaynakları nedeniyle daha çok zaman bölüşümlü çoklu erişim (TDMA) esasına dayanmaktadır.

TDMA MAC protokollerinde zaman bölüşümü yapılarak çarpışmalar engellenmekte, boş dinleme ve gereksiz almalar azaltılmakta ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Ancak, zaman dilimlerinin atanması ve eşzamanlama ihtiyaçları, ilave protokol yükü getirmektedir. İlk kurulumun uzun sürmesi yanında, ağa katılanlar veya ağdan ayrılanlar ve gezginlik nedeniyle ilinge değişimlerinde zaman dilimlerinin yeniden düzenlenmesi gerektiğinden, bu yük daha da artmaktadır. Büyük ağlarda tek bir zaman çizelgesi yerine küme çizelgeleri kullanılmaktadır. Bu durumda da kümeler arası iletişim sorunları ortaya çıkmaktadır.

En fazla sekiz istasyondan oluşan ve *piconet* adı verilen *Bluetooth* kümeleri arasında kod bölüşümlü çoklu erişim (CDMA) kullanılmaktadır. TDA'lardaki nesne sayılarına göre çok küçük sayılabilecek bir piconet içindeki TDMA çizelgesi ise bir *master* istasyon tarafından belirlenmektedir. Büyük bir ağda tek bir çizelgeyi merkezi olarak üretmek ve istasyonlara duyurmak kolay değildir. Bu nedenle *Distributed TDMA*'de (Shepard, 1996) istasyonlar kendi gönderme-alma zamanlarını (çizelgelerini) özerk olarak belirleyip sadece komşularına bildirirler. Buna göre göndermesi olan bir istasyon ancak alıcının çizelgesini biliyorsa haberleşebilir. Hatta gönderenin zaman dilimi ile alıcının dinleme zaman dilimi çakışması

gerekir. Gönderme olmadan boş geçen zaman dilimleri, kanalın etkin kullanımını azaltıp gecikmeyi arttırır. Bu nedenle NAMA (node-activation multiple access) protokolünde bir zaman dilimi birden fazla istasyona tahsis edilmektedir (Bao vd., 2001). NAMA’da bir zaman diliminde ortaklar arasından hangisinin gönderme yapabileceği, 2-sekme menzilineki komşuların bilinmesini gerektiren NCR (neighborhood-aware contention resolution) algoritması ile dinamik olarak belirlenmektedir. Eşzamanlama ihtiyacının ise başka yöntemlerle çözülmüş olduğu kabul edilmektedir.

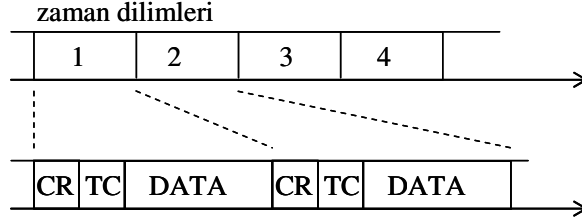
*SMACS* (self-organizing MAC for sensor networks), hem zaman bölüşümlü hem de frekans bölüşümlü bir protokoldür (Sohrabi vd., 2000). İki düğüm arasındaki alma-gönderme zamanları, başlangıçtaki komşu tanıma safhasında belirlenirken iletişim frekansı rasgele saptanmaktadır. İki komşunun zaman aralığı diğerleriyle çakışsa da farklı frekanslar kullanılarak çarpışmaların önlenmesi amaçlanmaktadır. Bir zaman aralığında ancak bir alıcıya gönderme yapılabilmesi ve gönderme yapılmadığında zaman diliminin boşa geçmesi gibi dezavantajları yanında birden fazla kanalda haberleşmeyi destekleyecek radyo donanımı gerektirmesi, TDA’larda kullanılabilirliğini engellemektedir.

*LEACH* (low-energy adaptive clustering hierarchy), küme tabanlı bir protokoldür (Heinzelman vd., 2000). Kümeler sabit olmayıp belli aralıklarla yenilenir. Küme içi veri toplama, birleştirme ve iletme görevleri küme liderlerine ait olduğundan, enerji seviyesi yüksek düğümler küme lideri seçilirler. Kümeler oluşturulurken CSMA, küme içinde ise TDMA ve CDMA kullanılmaktadır.

Herbir düğümün enerji tüketimini azaltmak yerine ağ genelinde enerji seviyelerini dengelemeyi amaçlayan *ER-MAC* (energy and rate based MAC) protokolünde (Kannan vd., 2003) düğümlerin, kendi TDMA kümelerindeki komşularının enerji seviyelerini ve trafik yüklerini bildikleri kabul edilmektedir. Bu sayede enerji seviyesi en düşük düğüm kendini küme lideri ilan eder ve diğer düğümlerin zaman dilimleri azaltılarak küme liderlerine daha fazla zaman dilimi ayrılır. Periyodik dinleme-uyuma uygulandığından, göndermesi olmayan bir düğüm kendi zaman diliminde uyku moduna geçmektedir. Diğerleri bundan habersiz olacağı için boş dinlemeden kaynaklanan enerji tüketimi artar.

*TRAMA* (traffic adaptive medium access) protokolü (Rajendran vd., 2003) TDMA protokollerde kullanılmayan (boş geçen) zaman dilimlerini azaltmayı hedeflemektedir. Bu nedenle, NAMA gibi, 2-sekme menzilineki komşuların bilinmesini gerektirir. Komşu bilgileri belli aralıklarla yenilenip Şekil 3.3’te görülen çekişmeli erişim safhasında duyurulur.

Çekişmeli erişim safhasında buna ilaveten, göndermesi olan düğümler alıcılarının listesini yayınlarlar. Bu bilgiler AEA (adaptive election algorithm) algoritmasında değerlendirilip, bir sonraki zaman çerçevesinin planlı erişim safhasındaki gönderenleri ve alıcıları belirlenir. Seçilemeyen düğümler, NAMA'da dinlemeye devam ederken, TRAMA'da uyku moduna geçerler. Düğümlerin, her zaman diliminde AEA çalıştırıp seçimi yenilemesi protokol yükünü arttırmaktadır.

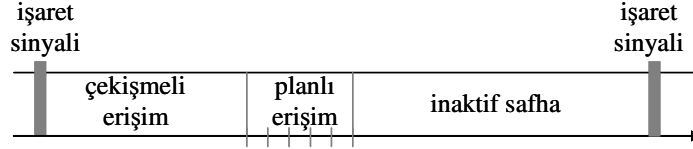


Şekil 3.1 EMACS protokolünde zaman dilimlerinin yapısı.

*EMACS* (Dulman vd., 2003), üst katmanlarla birlikte çalışan küme tabanlı bir protokoldür. Aynı kümedeki düğümler başlangıçta çekişmeli erişimle komşularını tanıyıp zaman dilimlerini belirlerler. Bir zaman dilimi Şekil 3.1'de görüldüğü gibi üç safhaya ayrılmıştır. İlk safha olan CR (communication request) safhasında, zaman dilimi sahibine göndermesi olanlar bu niyetlerini çekişmeli erişimle bildirirler. Zaman diliminin sahibi hangi komşularına göndermesi olduğunu veya hangi komşularının göndermesine izin verdiğini TC (traffic control) safhasında duyurup son DATA safhasında da göndermelerini veya almalarını tamamlar. Özellikle uyku modunda olmayan tüm düğümler TC safhasını dinlemek zorundadır çünkü TC mesajları aynı zamanda eşzamanlamayı sağlamak için kullanılır. Bir zaman diliminin sadece bir düğüme ait olmasından kaynaklanan gecikmeyi azaltmak için *LMAC* (Leightweight MAC) protokolünde (Hoesel vd., 2004) aynı dilim, en az 3-sekme menziline olmak şartıyla, birden fazla düğüme tahsis edilebilir. Her iki protokolda de komşu düğümlere tahsisli zaman aralıklarının bilinmesi ve alıcının gönderenle eşzamanlı dinleme yapması gerekmektedir. Ayrıca ilinge değişimlerinde dilimler yenilenmelidir.

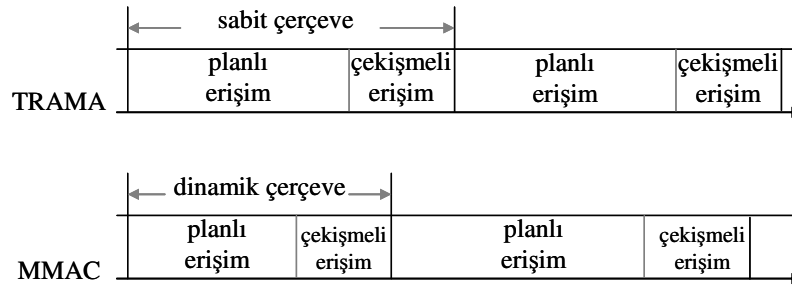
*IEEE 802.15.4* (2003) hem fiziki katman hem de MAC katmanı standartlarını belirleyen karma bir protokoldür. Enerji sorunu olmadığı kabul edilen bir koordinatör düğüme ihtiyaç vardır. Koordinatör tarafından yayınlanan iki işaret sinyali arasında kalan bir zaman çerçevesi, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi aktif ve inaktif safha olarak ikiye ayrılabilir. Aktif safhadaki zaman dilimlerinin bir kısmı veya tamamı çekişmeli erişime, kalanı da planlı erişime tahsis edilmektedir. Koordinatör tarafından işaret sinyali yayınlanmazsa tamamen çekişmeli erişim

uygulanır. İletişimin koordinatör üzerinden yapıldığı yıldız topoloji yanında TDA'lar için önerilen eşler arası topoloji de desteklenmektedir. Eşler arası iletişimde eşlerin sürekli dinlemede kalması ya da birbirleriyle eşzamanlı olması gerekmektedir. Eşzamanlama ise bu standart kapsamında ele alınmamaktadır.



Şekil 3.2 IEEE 802.15.4 standardında bir zaman çerçevesinin yapısı.

*BitMAC* (Ringwald vd., 2005) protokolünde ağın ağaç yapısında olduğu kabul edilerek sadece bağlılar arasında alt/üst iletişime izin verilmektedir. Her üst, direk bağlıları için geçerli TDMA çizelgesini belirler ve alt bağlılarına yayımlar. Ağda farklı dalların aynı anda çalışabilmesi için çok kanallı frekans yapısı kullanıldığı kabul edilmektedir.



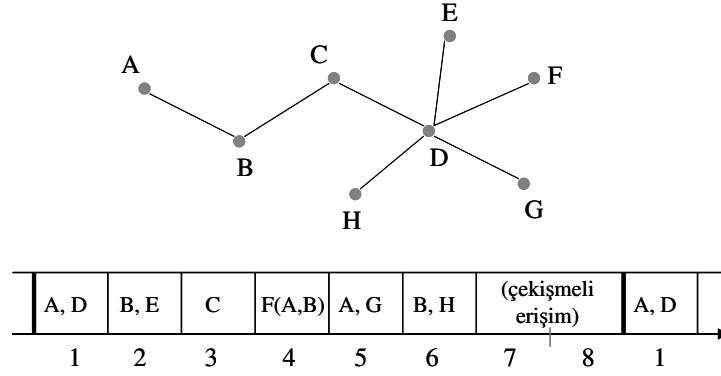
Şekil 3.3 TRAMA ve MMAC protokollerinde zaman çerçevesinin yapısı.

*MMAC* (mobility-adaptive MAC) protokolü (Ali vd., 2005), *TRAMA* protokolünde sabit büyüklükte olan TDMA çerçevesini, gezginlik ve trafik yüküne bağlı olarak belli aralıklarla dinamik belirlemektedir. Kümeleme uygulanan *MMAC* protokolünde küme liderleri, *LEACH* protokolüne benzer şekilde dönüşümlü seçilir. TDMA çerçevesini belirlemek için 2-sekme menzilineki komşu hareketleri ve trafik bilgisi gerektiğinden, her düğüm kendine ait konum ve trafik bilgilerini küme liderine iletir. Düğümlerin, buldukları konumu bildiği kabul edilmektedir. Küme liderinin genel duyurusunun ardından belirlenen çerçeve süresinin bir bölümü TDMA zaman dilimlerine, kalanı da çekişmeli erişime ayrılır.

Sadece TDMA veya sadece CSMA çalışma yerine her ikisini birleştiren *Z-MAC* (Rhee vd., 2005) karma bir protokoldür. Trafik yoğunluğunun arttığını tespit eden bir düğüm 2-sekme menzilineki komşularını ikaz eder ve CSMA çalışma bırakılıp TDMA zaman dilimlerine



uyulur. Zaman dilimlerinin herbiri, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi birbirine en az 3-sekme menzilineki birden fazla düğüme tahsis edilmektedir. Bu sayede bir TDMA çerçevesinde boş kalan diğer dilimler ise çekişmeli erişim için kullanılmaktadır. Düğümler başlangıç safhasında zaman dilimlerini kendileri belirlemektedir. Bu amaçla kullanılan dağıtık algoritmanın başlangıçta getirdiği ilave yükün daha sonraki çalışmada artan başarımla ve enerji tasarrufuyla karşılandığı savunulmaktadır. Ancak gezginlik sonucu zaman dilimlerinin yenilenme ihtiyacı, trafik yükü değişince çalışma şeklinin birlikte değiştirilme ihtiyacı ve eşzamanlama ihtiyacı nedenleriyle protokol yükü artmaktadır.



Şekil 3.4 Z-MAC protokolünde zaman dilimlerinin belirlenmesi.

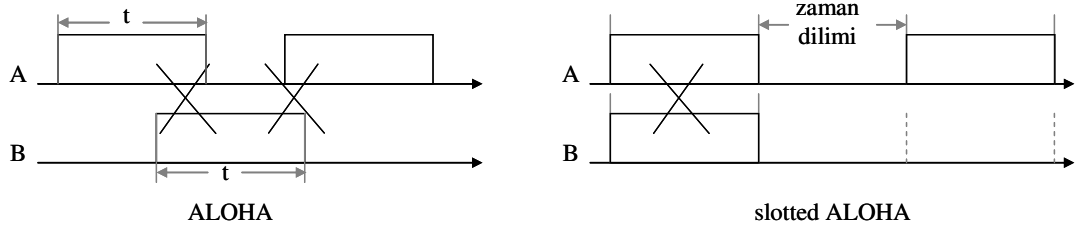
Planlı erişim yöntemleri, merkezi bir yönetimin olmadığı gözetimsiz ve özerk çalışma yapılan ağlarda, uzun hazırlık ve kurulum süresi gerektirirler. Ağa eklenen veya arıza gibi nedenlerle ağdan ayrılan istasyonların neden olacağı ilinge değişimlerine karşı dayanıklı değildir. Dayanıklı ve ölçeklenebilir olmalarını sağlamak için gerekli protokol yükleri fazladır. Dinamik planlama yapılamadığı sürece gecikmeyi arttırırlar. Nitekim bu dezavantajları nedeniyle bazı protokoller planlı ve çekişmeli erişimi birlikte kullanacak şekilde tasarlanmışlardır.

### 3.2 Çekişmeli Erişim MAC Protokolleri

Çekişmeli erişim kullanılan MAC protokollerinde merkezi bir koordinatöre ihtiyaç yoktur. Telsiz ortama erişim sırasının önceden düzenlenmesi sözkonusu olmadığından hazırlık ve kurulum gerektirmezler. Bu nedenle çekişmeli erişim MAC protokolleri, planlı erişim yöntemlerine göre daha basittirler ve YNA'ların gerektirdiği tasarsız, gözetimsiz ve özerk çalışmaya daha uygundur.

Telsiz ortam erişimi için en basit yöntem *ALOHA* (Abramson, 1970) protokolüdür.

Göndermeye başlamadan önce istasyonlar arasında herhangi bir koordinasyon gerekmez ve istenen her an gönderme yapılabilir. Bu sayede başarıyla gönderilen paketler için tek-sekme gecikmesi azalır. Ancak bir paketin başarıyla gönderilebilmesi için, gönderme başladığı anda devam eden başka bir gönderme olmaması ve gönderme bitene kadar yeni bir gönderme başlamaması gerekmektedir. Şekil 3.5'te B istasyonunun paketi, A istasyonundan gönderilen her iki paketle de çarpışacaktır. B istasyonu paketini çarpışmasız gönderebilmesi için  $2 \times t$  süresince B'den başka bir istasyonun gönderme yapmaması gerekmektedir.



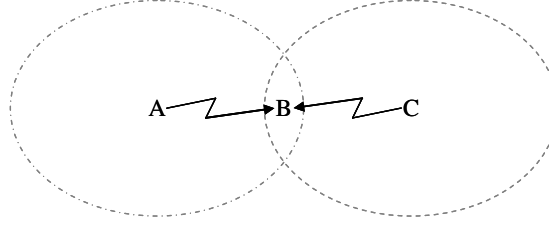
Şekil 3.5 ALOHA ve slotted ALOHA protokollerinde çarpışma aralıkları.

Sadece belli zaman dilimleri başında göndermeye izin verilen *slotted-ALOHA* (Roberts, 1972) protokolünde, bir gönderme başladığında, devam eden başka bir gönderme olmaması garanti edilmektedir.  $2 \times t$  süresi yerine bir  $t$  süresinde çarpışma görüleceğinden, ALOHA protokolüne göre çarpışma olasılığı yarı yarıya azalarak başarımları iki kat artmaktadır. Fakat Şekil 3.5'te olduğu gibi, aynı anda yayına başlayan komşular arasındaki çarpışmaları önlemek mümkün değildir. Ayrıca, slotted ALOHA protokolü, istasyonların birbirine eşzamanlı çalışmasını gerektirmektedir.

Göndermeye başlamadan önce kanalı dinleyip boşa gönderme yapılan CSMA (carrier sense multiple access) protokolünde (Kleinrock vd., 1975a) eşzamanlama gerekmez. CSMA protokolünde, kanal boş değilse *persistent* ve *non-persistent* olmak üzere iki farklı çalışma yöntemi uygulanmaktadır. *Persistent CSMA* yönteminde, devam eden göndermenin bitmesi ısrarla beklenir ve biter bitmez gönderme kararı verilir. Karar;  $p$  olasılıkla gönderme ve  $1-p$  olasılıkla bir sonraki zaman diliminde yeniden deneme şeklinde olursa *p-persistent CSMA*; kesin gönderme şeklinde olursa *1-persistent CSMA* olarak adlandırılmaktadır. *Non-persistent CSMA* yönteminde ise kanalın boşalması için ısrarla beklenmez ve rasgele bir süre sonra tekrar gönderme denemesi yapılır.

CSMA protokolünde göndermeden önce kanalı dinlemek, gönderen tarafındaki çarpışmaları azaltsa da alıcı tarafındaki çarpışmalar için bir çözüm değildir. “*Hidden terminal*” olarak

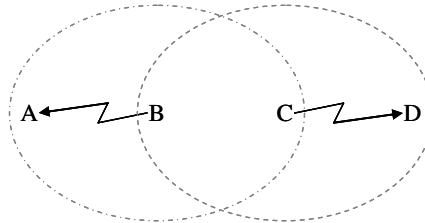
bilinen bu sorun Şekil 3.6’da görülmektedir. Göndermeden önce kanalı dinleyen ve boş olduğunu algılayan birbirine uzak A ve C istasyonlarının göndermeleri, her iki istasyonun da menziline giren B alıcısında çarpışma yaratmaktadır.



Şekil 3.6 “*Hidden terminal*” problemi.

“*Hidden terminal*” problemi, MACA (multiple access with collision avoidance) (Karn, 1990) protokolündeki RTS/CTS el sıkışması\* ile önlenabilmektedir. A istasyonu veri paketini göndermeden önce yayınlacağı RTS paketi ile B istasyonuna bir gönderme yapacağını duyurur. Ardından B istasyonu CTS yayınlarak, C ve diğerlerini A’dan gelecek veri trafiği hakkında bilgilendirir. Bu sayede A’dan B’ye gönderme yapıldığı süre içinde C istasyonu gönderme yapmayarak B’deki çarpışmayı önler.

CSMA protokolü, “*hidden terminal*” problemi yanında “*exposed terminal*” problemi de yaratmaktadır. Şekil 3.7’de B istasyonu A’ya gönderme yapmaya başladığında kanalı dinleyen C istasyonu, kanal dolu olduğu için D’ye gönderme yapmayı beklemesi gerekmektedir. Ancak C’nin göndermesini ertelemesine gerek yoktur, çünkü C ile D arasındaki trafik, A ile B arasındaki iletişimi engellemez. Kanalın kullanım oranını düşüren “*exposed terminal*” sorunu, MACA protokolündeki RTS/CTS el sıkışması kullanılarak önlenmektedir.



Şekil 3.7 “*Exposed terminal*” problemi.

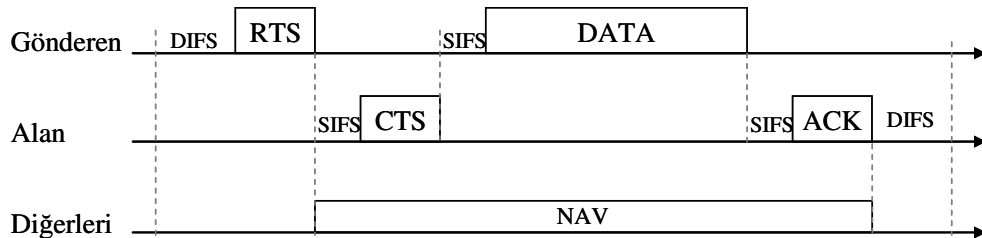
\* RTS/CTS el sıkışması esasen Apple LocalTalk ağlardaki CSMA/CA (collision avoidance) protokolünde, veri paketini göndermeden önce alıcının donanımını hazırlaması için bir uyarı amacıyla kullanılmaktadır.

B istasyonundan yayınlanan RTS paketini alan C istasyonu, A'dan gönderilecek CTS paketini alamazsa, A'nın kendi menzili dışında olduğunu kabul eder ve bu sayede C'nin D'ye göndermesi gereksiz yere ertelenmemiş olur.

Aslında MACA protokolü “*hidden terminal*” ve “*exposed terminal*” sorunlarını kısmen çözmektedir. Çünkü RTS/CTS kontrol paketleri de diğer veri trafiği gibi çarpışma yaratabilir. Ancak veri paketlerine göre daha küçük olan RTS/CTS paketlerinin çarpışmasından kaynaklanan gecikme ve enerji kaybı, büyük veri paketlerinin çarpışmasından doğacak gecikme ve enerji kaybına tercih edilmektedir. Veri paketlerinin çarpışma olasılığı azaltılırken, RTS/CTS kontrol paketlerinin çarpışma olasılığı devam etmektedir. Bu nedenle RTS/CTS el sıkışması, küçük veri paketleri kullanıldığında, protokole ilave yük getirerek çarpışmaları, enerji tüketimini ve gecikmeyi arttırmaktadır.

Telsiz ortamda RTS/CTS el sıkışması, veri paketinin başarıyla alındığını garanti etmemektedir. Bu nedenle MACAW (MACA wireless) protokolünde (Bharghavan vd., 1994), RTS-CTS-DATA haberleşmesinin ardından veri paketi başarıyla alınmışsa ACK paketi gönderilir. Bu sayede, veri paketlerinde yaşanan çarpışmalar üst katmanlardan önce veri bağı katmanında daha çabuk belirlenerek tekrar gönderme yapılabilir. MACAW protokolünde ayrıca, CSMA/CA protokolünü esas almasına rağmen göndermeden önce dinleme (carrier sense) yöntemini uygulamayan MACA'nın aksine, RTS paketini göndermeden önce kanal dinlenir ve boşsa RTS gönderilir.

PAMAS (power aware multi-access with signalling) protokolü (Singh vd., 1998), kontrol paketlerinden kaynaklanan trafiği azaltmak için iletişimi iki ayrı kanalda sürdürmektedir. Belli aralıklarla kontrol kanalını dinleyen bir istasyon, diğer kanaldaki göndermeler ve süreleri hakkında bilgi alabilir. İki kanal kullanmanın zorluğu yanında kontrol kanalındaki çarpışmalar da tamamen engellenmiş değildir.



Şekil 3.8 IEEE 802.11 protokolü.

IEEE 802.11 (1999) telsiz yerel alan ağı standardında iki ayrı çalışma şekli tanımlanmıştır; bir

erişim noktasına tek-sekme menzilineki istasyonlardan oluşan PCF (point coordination function) ile dağıtık ve tasarsız çalışan DCF (distributed coordination function). Her iki şekilde de RTS-CTS-DATA-ACK düzeninde haberleşilmektedir. Ancak veri paketleri standartta tanımlı *dot11RTSThreshold* değerinden küçükse veya tüme/çoğa gönderim yapılıyorsa RTS/CTS kullanılmaz. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi RTS paketi gönderilmeden önce DIFS (distributed interframe space) süresi kadar kanal dinlenir. Benzer olarak CTS, DATA ve ACK paketleri gönderilmeden önce de SIFS (short inter frame space) süresi kadar dinleme yapılmaktadır. Haberleşmenin ne kadar süreceği bilgisi kontrol paketleri içinde bulunduğundan, bu paketleri alan diğer istasyonlar ne kadar beklemeleri veya uyumaları gerektiğini öğrenerek NAV (network allocation vector) sayaçlarını ayarlarlar ve NAV süresi bitmeden gönderme girişiminde bulunmazlar. IEEE 802.11 standardında ayrıca, enerji tasarrufu sağlamak için istasyonların belli aralıklarla uyku moduna geçmesini destekleyen PS (power saving) modu tanımlanmıştır. Uyku modunda bekleyen istasyonlara gönderilecek veriler, erişim noktasında tamponlanır ve istasyon uyandıığında kendisine ait verileri erişim noktasından talep eder. PS çalışma şekli merkezi erişim noktasının kontrolünü gerektirdiği için PCF çalışma için geçerlidir. DCF çalışmada, ağ tek-sekmeli değilse PS modu kullanılmaz.

SEEDEX (Rozovsky vd., 2001) protokolünde her istasyon kendi gönderme-alma çizelgesini sözde-rasgele sayı üretici kullanarak belirler ve bu çizelgeyi komşularıyla paylaşır. Ancak komşularına çizelgeyi değil, üreteçte kullandığı tohumu gönderir. Bu sayede göndermeden önce el sıkışmaya gerek kalmaz. Tohumların gönderilmesinde yaşanacak çarpışmalar, çizelge çakışmaları ve uzun süreli çalışmada komşuların değişmesi gibi durumlar protokol yükünü arttırmaktadır.

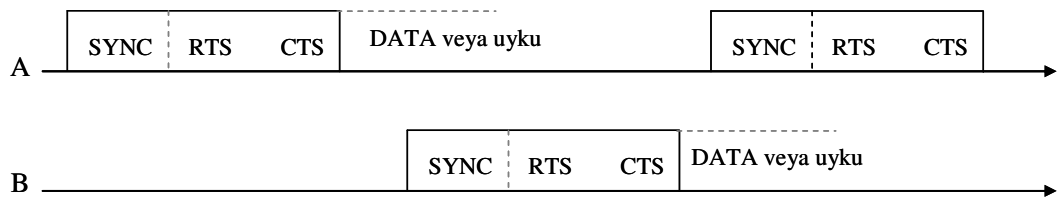
Kanal kalitesine bağlı olarak veri hızını ayarlayan *RBAR* (receiver-based auto-rate) protokolü (Holland vd., 2001), RTS/CTS kullanan bir MAC protokolüyle birlikte çalışmaktadır. Alıcı, kendi tarafındaki kanal şartlarında RTS paketini değerlendirip gönderenin hızının ne olması gerektiğini belirler ve CTS paketiyle bildirir. *OAR* (opportunistic auto rate) protokolü (Sadeghi vd., 2002) ise kanal kalitesinin iyi olduğu anlardan yararlanıp çok sayıda paketin yüksek hızda ardışık gönderilmesini önermektedir. Her iki protokol de farklı hızları destekleyen verici gerektirmektedir.

*ARC* (adaptive rate control) yönteminde (Woo vd., 2001) paket kayıpları arttığında gönderme sıklığı azaltılarak trafik yoğunluğu dengede tutulmaktadır. Duyarga ağlarda olaylar eşzamanlı algılanıp gönderilmeye çalışıldığından, duyurgalar aynı anda kanalı dinleyip boş kabul

edebilirler. Bu nedenle ARC yönteminde, eşzamanlı gönderme girişimlerini engellemek için kanalı dinlemeden önce rasgele geriçekme uygulanmaktadır. Ayrıca, RTS/CTS kontrol paketlerinin kullanımı, enerji tüketimini arttırdığı için tavsiye edilmemektedir.

TDA'larda çekişme çoğunlukla birbirine yakın duyargalar arasında yaşanmaktadır. Bu duyargalar genellikle aynı veriyi göndermeye uğraştıklarından, yeterli sayıda düğüm gönderdikten sonra çekişmeyi kaybedenlerin devam etmesine gerek yoktur. Bu nedenle *Sift* (Jamieson vd., 2003) protokolü, çekişme penceresinin değişken değil sabit olmasını ve birörnek olmayan dağılımla çekişme diliminin belirlenmesini gerektirir. Bu yöntem, çekişmeli erişim uygulanan herhangi bir protokolle birlikte kullanılabilir.

Duyarga ağlarda enerji tasarrufu sağlamanın en etkin yolu alıcı-vericiyi belli aralıklarla kapatmaktır. Fakat, düğümlerin özerkliği nedeniyle komşu nesnelere birbirinden bağımsız farklı dinleme-uyuma çizelgeleri belirleyebilirler. Farklı çizelgeye sahip komşuların birbirleriyle haberleşebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemleri iki gruba ayırabiliriz. S-MAC, T-MAC ve DMAC protokolleri ilk gruptadır. Buna göre, bir duyarga düğümü komşularının çizelgesini öğrenip kendi çizelgesi dışında komşularının çizelgesine de uyması gerekir. Örneğin tümegönderme yapacaksa, herbir komşusunun uyanma zamanında aktif hale gelip tekegönderme yapacaktır. Ya da tümegöndermesini uzun süre ardarda tekrarlayacaktır. Komşuların çizelgelerinin doğru takip edilmesini gerektiren bu yöntem, ilinge değişimlerine ve saat kayıklıklarına karşı hassas olmasının yanında enerji tüketimini de arttırmaktadır. İkinci grupta LPL/Preamble Sampling ve B-MAC protokolleri bulunmaktadır. Buna göre, tüm komşular aynı sıklıkta ve uzunlukta fakat bağımsız uyanma zamanlarına sahiptir. Bu çalışma şeklinde her bir gönderme, bir periyot uzunluğunda öncül sinyalini takiben gerçekleştirilir. Böylelikle, uyandığında öncül sinyalini duyan komşular veri paketini alana kadar dinlemede kalırlar.

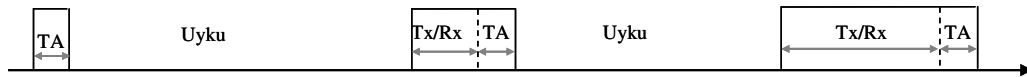


Şekil 3.9 S-MAC protokolü.

S-MAC (sensor MAC) protokolü (Ye vd., 2002) CSMA/CA tabanlı bir protokoldür, ancak enerji tasarrufu sağlamak için alıcı-verici periyodik olarak dinleme-uyuma moduna geçirilir.

Dinleme süresinin uyuma süresine oranına “*çalışma oranı*” denir ve sabittir. Dinleme safhası üç kısma ayrılmıştır. Şekil 3.9’da görülen SYNC, RTS ve CTS alma veya gönderme için kullanılan bu kısımlardan sonra trafik yoksa alıcı-verici kapatılır. Her duyarga kendi dinleme-uyuma çizelgesini belirleyerek komşularına bildirir. Gönderme yapabilmek için alıcının çizelgesini bilmek gerekmektedir. Saat sapmasından kaynaklanan kayıklığı düzeltmek için her bir duyarga, 10 saniye aralıklarla SYNC yayınlamakta ve komşularında olabilecek değişiklikleri algılamak için 2 dakikada bir 10 saniye süreyle dinleme yapmaktadır. Görüldüğü gibi düğümlerin bağımlı çizelgeleri olması protokol yükünü çok arttırmaktadır. Bu nedenle sanal kümeler oluşturulup aynı kümedeki düğümler ortak çizelge kullanmaktadırlar. Fakat bazı düğümlerin birden fazla kümeye ait olmaları gerektiğinden, birden fazla çizelgeye uymaları sonucunda enerji tüketimleri artmaktadır. Kümelemenin getirdiği yükü azaltmak için tüm ağda tek bir çizelge uygulanmasını sağlayacak GSA (global scheduling algorithm) (Li vd., 2005) yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca periyodik uyumadan kaynaklanan gecikmeyi azaltmak üzere ilave tedbirler alınmıştır. Örneğin uzun mesajlar parçalara ayrılıp “*message passing*” yöntemiyle bir kerede topluca gönderilirler. “*Adaptive listening*” (Ye vd., 2004) yönteminde ise komşusunun gönderme yaptığını duyan bir düğüm, yönlendirmeye yardımcı olmak üzere, gönderme biter bitmez uyanıp dinlemeye başlar.

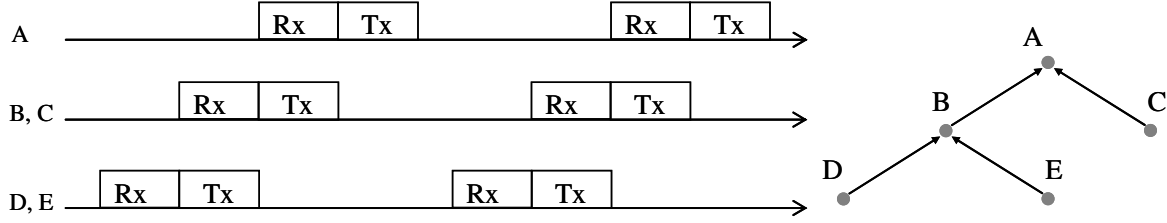
S-MAC’teki sabit dinleme süresinin farklı trafik yoğunluklarında yaratacağı enerji israfı nedeniyle *T-MAC* (timeout MAC) protokolünde (Dam vd., 2003) değişken dinleme süresi uygulanmaktadır. Dinleme süresi Şekil 3.10’da görüldüğü gibi en az *TA* kadar olabilir. *TA* süresi sabittir ve başlangıçta belirlenmektedir. *TA* süreyle herhangi bir trafik duyulmazsa uyku moduna geçilir. Ancak bunu kestirmek her zaman kolay olmadığından “*erken uyuma*” problemi yaşanmaktadır. T-MAC protokolü diğer açılardan S-MAC protokolüyle aynı şekilde çalışmaktadır.



Şekil 3.10 T-MAC protokolü.

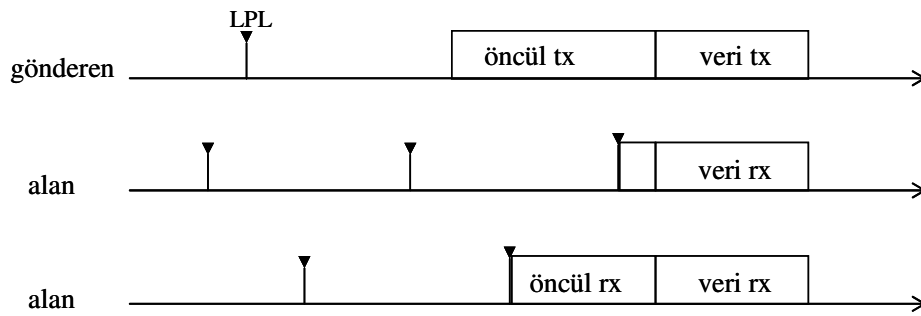
*DMAC* (data gathering MAC) (Lu vd., 2004) protokolü (Lu vd., 2004), duyarga ağlardaki veri akışının bir ağaç yapısında olduğunu ve ağaçtaki alt/üst bağlantılarının (yönlendirme yollarının) sabit ve önceden bilindiğini kabul etmektedir. Başlangıçta, alt bir düğümün gönderme zaman aralığı ile üst düğümün alma zaman aralığı çakıştırılmaktadır. Aynı seviyedeki düğümler ortak çizelge kullanırlar. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi B’nin alt

düğümüleri D ve E'nin dinleme-uyuma çizelgeleri aynıdır. Bu nedenle D ve E, üstleri olan B'ye aynı anda gönderme yapmaya çalışırlar. Belirtilen kabullenmelerin ve eşzamanlamanın sağlanması protokolün çalışmasını engelleyecek zorluklardır.



Şekil 3.11 DMAC protokolü.

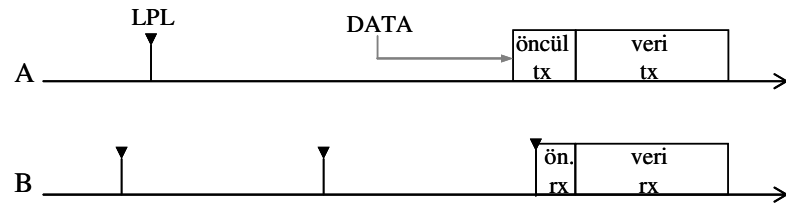
CSMA yöntemlerde taşıyıcı dinlemek için alıcı-vericinin sık açılıp kapatılması enerji tüketimi açısından istenmeyen bir durumdur. Ancak telsiz ortamın boş olup olmadığını anlamak için taşıyıcı dinlemek yerine farklı bir uyandırma sinyalinin varlığı kontrol edilebilir. Gönderme yapmadan önce uzun bir RF darbe şeklinde uyandırma sinyali gönderilirse, bu sinyalin 50  $\mu$ s'den daha az bir sürede algılanabileceği gösterilmiştir (*low-level wake up check*) (Hill vd., 2002). Aynı dönemde yapılan başka bir çalışmada (El-Hoiydi, 2002) "*preamble sampling*" olarak isimlendirilen bu yöntem, yeni nesil alıcı-vericilerdeki "*LPL - low power listening*" özelliğidir. *B-MAC* (Berkeley MAC) (Polastre vd., 2004) ve *Aloha with preamble sampling* (El-Hoiydi, 2002) protokolleri de LPL kullanırlar. Bu sayede daha sık aralıklarla dinleme yapılabilir ve komşuların dinleme-uyuma çizelgelerinin bilinmesine ihtiyaç kalmaz. Sadece, tüm komşular aynı sıklıkta ve uzunlukta fakat bağımsız uyanma zamanlarına sahip olmalı ve Şekil 3.12'de görüldüğü gibi her gönderme, bir periyot uzunluğundaki RF öncül sinyalini (preamble) takiben gerçekleştirilmelidir. Böylelikle, uyandığında öncül sinyalini duyan komşular veri paketini alana kadar dinlemede kalırlar.



Şekil 3.12 B-MAC protokolünde LPL ve öncül sinyali kullanımı.

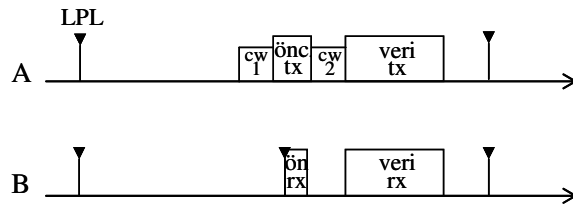


Uzun öncül sinyalinin gönderilmesi ve alınması, kontrol paketlerinde olduğu gibi fazladan enerji harcanmasına ve gecikmeye neden olmaktadır. *WiseMAC* (El-Hoiydi vd., 2004) protokolünde bu dezavantaja çözüm olarak, komşuların dinleme-uyuma çizelgeleri öğrenilmektedir. Bu sayede daha kısa öncül sinyali kullanılmaktadır. Şekil 3.13'teki A istasyonu B komşusuna göndereceği DATA paketini B'nin dinleme zamanına kadar bekletmektedir. Öncül sinyalinin süresi ise A'nın B ile son haberleşme zamanına ve saat sapma oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tüm komşuların dinleme-uyuma çizelgelerini öğrenmenin getireceği yük, gezginlikten kaynaklanan ilinge değişimlerinde protokol yükünü daha da arttırmaktadır. Ayrıca tümegönderimlerde öncül süresini kısaltmak mümkün değildir.



Şekil 3.13 WiseMAC protokolü.

LPL yönteminin “kanal yoklama” olarak isimlendirildiği *SCP-MAC* (scheduled channel polling MAC) protokolünde (Ye vd. 2006), ağ genelinde ortak bir dinleme-uyuma çizelgesi uygulanarak öncül sinyali süresi, saat sapma oranı ve duyarga sayısına bağlı olarak kısaltılmaktadır. Ancak Şekil 3.14'te görüldüğü gibi hem öncül sinyali göndermeden önce hem de öncül sinyali ile veri paketi arasında olmak üzere iki ayrı çekişme safhası (contention window 1 ve 2) uygulandığından, alıcı-vericinin sık ve kısa süreyle dinleme-gönderme modları arasında durum değiştirmesi gerekmektedir.



Şekil 3.14 SCP-MAC protokolü.

*Seesaw* (Braynard vd., 2005) protokolü ağ genelinde enerji tüketimini dengede tutmaya çalışmaktadır. Bu nedenle trafik yüküne bağlı olarak her düğüm kendi dinleme aralığını ve süresini dinamik olarak belirlemektedir. Alıcının dinleme zamanı dinamik olarak değiştiği için sık sık gönderme yapmak yerine, veri paketleri biriktirilerek tampon dolduğunda

gönderme yapılmaktadır. Bu nedenle gecikme artmaktadır. Ayrıca veri paketlerinden önce yayınlanan *Ad* paketleri, RTS kontrol paketleri gibi protokol yükünü arttırmaktadır.

### 3.3 Güç Kontrollü MAC Protokolleri

Dinleme-uyuma çizelgeleri kullanılması yanında, enerji tasarrufu sağlamanın bir yolu da iletim gücünü kontrol etmektir. Özellikle nesne yoğunluğunun yüksek olduğu ağlarda sadece alıcıya ulaşacak kadar iletim gücü kullanılması, gönderen ve dinleyenler tarafında enerji tüketimini azalttığı gibi ağ içerisinde trafiğin gereksiz mesafelere yayılmasını önleyerek bant genişliğinin daha efektif kullanılmasına da yardımcı olmaktadır.

İletim gücünün ayarlanması fiziki katmanın görevi olsa da alıcı-vericinin gönderme, dinleme, alma veya uyku modlarından birinde olmasına ve alıcıya uygun iletim gücünün ne olduğuna MAC katmanında karar verilmektedir.

Güç kontrol algoritmaları çalışma yöntemlerine göre açık veya kapalı döngü, merkezi veya dağıtım, RSSI/SIR/BER tabanlı, sabit veya uyarlanabilir adım, sürekli veya basamaklı, ortak veya bağımsız kontrol olmak üzere farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır (Nar vd., 2005).

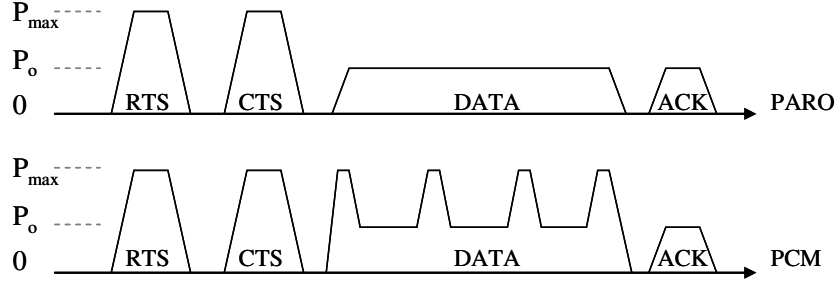
- Açık veya kapalı döngü sınıflandırması, alan tarafın geri besleme yapmasına dayanmaktadır. Verici gücünün, alışı gücüyle ters orantılı belirlendiği açık döngü güç kontrolünde, alan tarafın geri besleme yapması gerekmez. Fakat alan ve gönderen tarafındaki kanal şartları farklı olduğunda, açık döngü yöntemle belirlenen güç seviyesi hatalı olabilir. Kapalı döngü güç kontrolünde ise alan tarafta ölçülen alışı gücü seviyesi, gönderene geri beslenir ve bir sonraki göndermede verici gücü buna göre belirlenir. Bu sayede açık döngü yöntemine göre daha doğru bir güç seviyesi tespit edilmektedir.
- Merkezi güç kontrol yöntemlerinde tüm istasyonların güç seviyeleri merkezi olarak belirlenmektedir. Dağıtım yöntemlerinde ise istasyonlar lokal verileri kullanarak kendi güç seviyelerini tespit ederler.
- İletim gücünün hesaplanmasında faydalanılan RSSI (received signal strength indicator), SIR (signal to interference ratio) veya BER (bit error rate) gibi ölçümlere dayanan farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır.
- Başka bir sınıflandırma şekline göre ise iletim gücü, sabit artımlarla veya kanaldaki değişimlere göre uyarlanabilir adımlarla güncellenmektedir.

- İletim gücü değerleri, alıcı-vericinin özelliğine bağlı olarak, en düşük ve en yüksek iki değer arasında sürekli olabileceği gibi sabit veya sabit olmayan aralıklarla basamaklı değerler de kullanılabilir.
- CPC (common power control) yöntemlerinde tüm istasyonlar aynı iletim gücünü kullanması gerekirken, IPC (independent power control) yöntemlerinde istasyonlar için farklı güç seviyeleri belirlenebilmektedir.

Güç kontrollü MAC protokollerinde bu yöntemleri uygulamak için tek veya iki frekans kanalı kullanılabilir ve RTS/CTS kontrol paketlerinden yararlanılmaktadır.

*PCMA* (power controlled multiple access) protokolü (Monks vd., 2001) iki kanal kullanan bir protokoldür. RTS/CTS el sıkışmasına benzer şekilde, RPTS/APTS (request-power-to-send/acceptable-power-to-send) kontrol paketleri yardımıyla kapalı döngü güç kontrolü kullanılarak DATA paketlerinin güç seviyesi belirlenmektedir. A istasyonundan B'ye bir gönderme devam ederken, B istasyonu ikinci frekans kanalında periyodik olarak meşgul tonu yayınlamaktadır. Diğer istasyonlar bu kanalı dinleyerek, RPTS/APTS kontrol paketlerini gönderecekleri iletim gücü seviyesini belirlemektedir. *PCMAC* (power control MAC) protokolü de (Lin vd., 2003) iki frekans kanalı kullanmaktadır. RTS/CTS el sıkışmasının ardından alıcı, kendi tarafında izin verebileceği ilave gürültü seviyesini belirleyerek bu bilgiyi diğer kanaldan en yüksek güçle yayınlamaktadır. Komşu istasyonlar bu bilgiyi kullanarak, alıcının haberleşmesini engellemeyecek bir güç seviyesi belirleyip diğer istasyonlara gönderme yapabilirler.

İki kanal kullanan yöntemler, iki istasyon arasında iletişim devam ederken, bu iletişimi engellemeyecek şekilde diğerleri arasında kullanılması gereken güç seviyesini belirlemeyi sağlamaktadır. Tek kanallı yöntemler ise iki istasyonun birbirine erişiminde gerekli en düşük güç seviyesini belirlemeyi sağlar. RTS/CTS paketleri en yüksek güçle gönderilirken, kapalı döngü kontrol uygulanarak, DATA ve ACK paketlerini alıcıya ulaştırmaya yeterli en düşük güç seviyesi belirlenir. Fakat bu yöntemin uygulandığı *PARO* (power aware routing optimization) protokolünde (Gomez vd., 2001), RTS/CTS el sıkışmasını kaçırarak ve sonradan DATA paketlerini de daha düşük güçle gönderdikleri için duyamayan diğer istasyonların gönderimleri, devam eden DATA trafiğiyle çarpışma yaratmaktadır. Bu nedenle *PCM* (power control MAC) protokolü (Jung vd., 2002), Şekil 3.15'te görüldüğü gibi DATA gönderimi sırasında belli aralıklarla iletim gücünü en yüksek seviyeye çıkarmaktadır.



Şekil 3.15 PARO ve PCM protokolleri.

“*Distributed power control*” (Agarwal vd., 2001) yönteminde, gönderen ve alıcı tarafındaki kabul edilebilir en düşük güç seviyeleri CTS ve DATA paketleri içinde karşı tarafa bildirilmekte ve bu bilgiler herbir komşu için tabloda tutulmaktadır. *PC-SMAC* (Nar vd., 2005) protokolü ise benzer bir güç tablosunu S-MAC protokolüne uygulamıştır. S-MAC'teki SYNC paketleri kullanılarak açık-döngü bir yöntemle kontrol paketlerinin iletim gücü belirlenirken, DATA paketlerinin iletim gücü CTS paketlerinin içinde kapalı-döngü yöntemle belirlenmektedir.

İletim gücü kontrol yöntemlerinde kullanılan çok kanallı çalışma şekilleri ile RTS/CTS el sıkışmasına dayanan yöntemler YNA'lar için uygun değildir. Dağıtımli yöntemlerle belirlenen birbirinden bağımsız güç seviyeleri, YNA'ların tasarsız, gözetimsiz ve gezgin yapısına daha uygundur.

#### 4. PCLS MAC PROTOKOLÜ

PCLS MAC protokolü CSMA tabanlı bir protokoldür. PCLS protokolünde RTS/CTS kontrol paketleri kullanılmamaktadır. LPL yöntemi yanında kısa öncül sinyallerinden yararlanılmaktadır. Periyodik dinleme-uyuma uygulanmakla birlikte PCLS protokolü, komşuların kimlikleri ve dinleme-uyuma çizelgelerinden bağımsızdır. PCLS protokolünde dağıtımlı, basamaklı ve açık döngü yöntemle iletim gücü kontrolü uygulanmaktadır. YNA'ların tasarsız ve gözetimsiz yapısı ile nesnelerin özerk çalışmasına uygun olan bu özellikler sayesinde enerji tüketimi ve veri bağı katmanı gecikmesi, uygulamanın ihtiyaçlarına göre ayarlanabilmekte ve MAC protokolünün arıza ve gezginlikten kaynaklanan ilinge değişimlerinden etkilenmesi önlenmektedir.

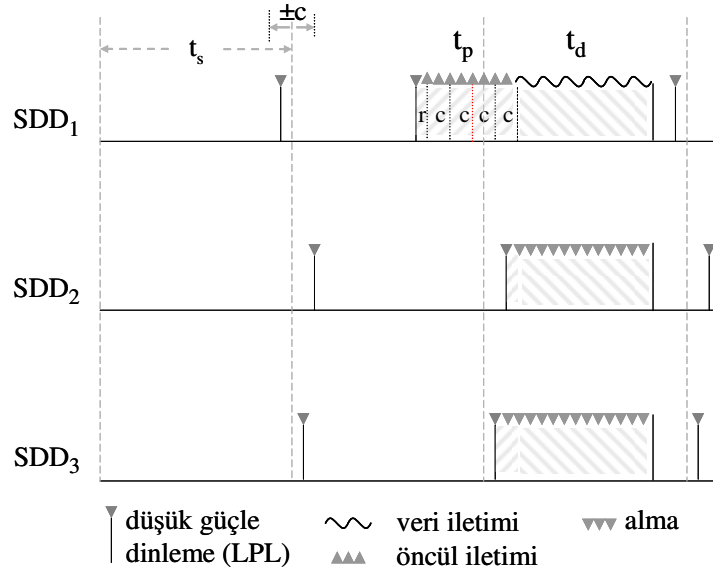
PCLS protokolünde periyodik dinleme-uyuma yöntemi uygulanmakla birlikte komşuların uyanma zamanları birbirine gevşek eşzamanlı tutulmaktadır. Eşzamanlamanın neden olacağı çarpışmaları önlemek için saat kayıklığından faydalanılmakta ve maksimum kayıklıkla orantılı kısa öncül sinyali kullanılmaktadır. Belli aralıklarla yayınlanan HELO sinyalleriyle de saat kayıklığının üst sınırı aşması engellenmektedir. HELO sinyalleri aynı zamanda, ağda yeterli bağlantılılığı sağlayacak iletim gücünün belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

PCLS MAC protokolünün ayrıntıları alt bölümlerde verilmektedir. Protokolün geliştirilmesinde esas alınan durum ve akış çizeneği Ek 1'de sunulmuştur. Ek 1'de bulunan çizenek, anlaşılabilir olması için dört parçada ifade edilmektedir. Alıcı-vericinin kapalı konumuyla başlayan Şekil Ek 1.1'deki OFF ve ON durumları, Şekil Ek 1.2, 1.3 ve 1.4 ile birlikte değerlendirilmelidir.

##### 4.1 Gevşek Eşzamanlama

Eşzamanlama gerektiren MAC protokollerinde saat kayıklığının dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü nesnelerin saatleri, kristal frekansındaki hassasiyet nedeniyle zaman içerisinde değişik miktarlarda kayarlar. PCLS protokolünde nesnelerin yerel saatlerinin, *saat sapma oranı* ( $c_s$ ) belirtimine bağlı olarak kaydığı kabul edilmektedir. Bu nedenle, *çizelge yenileme aralığı* ( $T_r$ ) olarak belirlenen süre içinde bir nesnenin saat kayıklığı ( $c$ ) en fazla  $|T_r \times c_s|$  kadar olabilir. *Maksimum saat kayıklığı* ( $c$ ) değeri sabit kabul edilmiş olmakla birlikte her bir nesne belli bir anda farklı yön (+ veya -) ve büyüklükte saat kayıklığına sahiptir. Dolayısıyla, komşu nesnelerin uyanma zamanlarının başlangıçta eşzamanlı olduğu kabul edildiğinde, bu komşuların daha sonra herhangi bir anda birbirlerine göre en fazla  $\pm c$

kayıklıkla uyanmaları gerekir (Şekil 4.1). (Başlangıç halinin nasıl sağlandığı sonraki alt bölümde açıklanmaktadır.)



Şekil 4.1 Gevşek eşzamanlama.

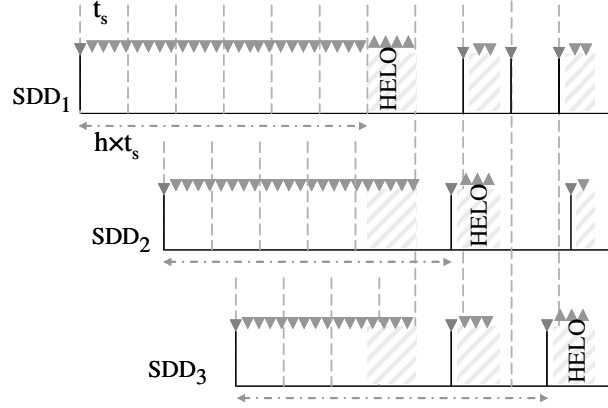
Enerji tüketimini azaltmak için nesnelere, belli aralıklarla uyku modunda çalıştırılmaktadır. Bu nedenle nesnelere, periyodik olarak uyanıp düşük güçle dinleme (LPL) yaparlar. Ardışık iki uyanma zamanı arasında geçen süreye ise *dinleme aralığı* ( $t_s$ ) denir. Dinleme aralığı başlangıçta belirlenen sabit bir süredir. Uyanan nesne LPL yaparken bir iletim duymuşsa (ki bu iletim, bir veri ya da HELO paketinin öncülü olabilir) dinlemeye devam eder; aksi halde uyuma moduna geri döner.

Göndermesi olan bir nesne normal uyanma zamanından  $2 \times c$  süre kadar önce uyanmalıdır. Hatta çarpışmaları önlemek için  $c_w$  kadarlık bir çekişme penceresinde *rasgele geriçekme süresi* ( $r$ ) kadar daha önce uyanır. Başka bir iletim duymazsa  $r + 4 \times c$  süreli öncül sinyali yayınlayıp ardından da veri paketini gönderir. Değişik saat kayıklıklarıyla uyanan komşu nesnelere ise uyandıklarında öncül sinyalini duyacakları için dinlemeye devam edip veri iletimini alabilirler. Gönderme denemesinde başka bir iletim duyan nesne bir sonraki dinleme aralığında farklı geriçekme süresi kullanarak tekrar göndermeyi dener.

Gevşek eşzamanlama sayesinde komşuların dinleme-uyuma çizelgelerini bilmeye gerek kalmaz. Ayrıca, dinleme-uyuma aralığından çok daha kısa öncül sinyali kullanılması, gecikmeyi ve enerji tüketimini azaltır.

## 4.2 HELO Mesajları

İlk yerleştirme, yayılma veya yenileme gibi nedenlerle nesnelerin çalışmaya başlama zamanları birbirinden farklıdır. Yerel saatlerin başlangıç halindeki bu farklılık ve daha sonraki kaymalar nedeniyle nesnelerin uyanma zamanları birbiriyle eşzamanlı olamaz. Uyanma zamanlarını başlangıçta ve daha sonra belli aralıklarla gevşek eşzamanlı tutabilmek için, nesnelerin  $h$  dinleme aralığında bir yayınladıkları HELO mesajlarından yararlanılmaktadır.



Şekil 4.2 HELO mesajları.

Çalışmaya yeni başlayan bir nesne, ilk HELO gönderme aralığı ( $T_H = h \times t_s$ ) süresince ortamı dinler. Bu süre içinde komşularından bir HELO mesajı alamazsa kendisi bir HELO mesajı yayınlamaya başlar; alabilirse kendi uyanma çizelgesini gönderenin zaman aralıklarına eşzamanlı hale getirir. Şekil 4.2'de görülen SDD<sub>1</sub> nesnesi  $h$  dinleme aralığı boyunca dinlemenin ardından kendi HELO mesajını yayınlamıştır. Bu süre içinde etkinleştirilen SDD<sub>2</sub> ve SDD<sub>3</sub> nesneleri ise yayınlanan HELO mesajını alarak SDD<sub>1</sub> ile eşzamanlı duruma gelirler.

Eşzamanlama için HELO gönderen nesnenin yerel saatini bilmek gerekmez. HELO mesajını alan nesne, HELO iletim süresini ( $t_H$ ) yerel zamandan çıkarır ve bundan  $2 \times c$  kadar öncesini, kendi son uyanma zamanı olarak kabul edip bir sonraki uyanma zamanını belirler. Bu işleme *çizelge yenileme* denir ve saat kayıklığının  $\pm c$  aralığında tutulabilmesi için dinleme-uyuma çizelgeleri belli aralıklarla yenilenir. Çizelge yenileme işleminde HELO mesajlarından yararlanıldığı için çizelge yenileme aralığının ( $T_r$ ) en düşük değeri bir HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) kadar olabilir. Ayrıca çizelge yenileme aralığı, maksimum saat kayıklığı ( $c$ ) ve ona bağlı öncül süresini ( $t_p$ ) de etkilediğinden,  $T_r$ 'nin belirlenmesinde  $t_p/t_s$  olarak tanımlanan protokol yükü de dikkate alınmalıdır.

### 4.3 İletim Gücü Kontrolü

Veri paketlerini gönderirken yüksek verici gücü kullanılması, gönderen tarafında enerji tüketimini arttırmaktadır. Diğer taraftan, daha fazla alıcıya ulaşan veri paketlerini almak için harcanan enerjinin de artmasına neden olur. Hatta gereğinden fazla güç kullanılması, uzak mesafelerdeki nesnelere arasında gereksiz çekişme yaratır. Bu nedenle, TSGS gibi nesne yoğunluğunun fazla olduğu sistemlerde verici gücü kontrol edilerek gereğinden fazla güçle iletim yapılması engellenmelidir.

PCLS protokolü, vericide kullanılacak iletim gücünün belirlenmesi için HELO mesajlarından yararlanmaktadır. En yüksek güçle yayınlanan HELO mesajları kullanılarak veri paketleri için gerekli güç seviyesi belirlenmektedir. Vericideki güç seviyelerinin basamaklı olduğu kabul edilerek basamaklı güç kontrolü uygulanan PCLS protokolünde, veri paketleri bu güç seviyelerinden biriyle iletilebilir. Hangi güç seviyesinin kullanılacağı ise o güç seviyesiyle ulaşılabilecek komşuların sayısının, *ağ bağlantılılık eşik* ( $n_c$ ) değerinin üzerinde olmasına bağlıdır. Ağda tam bağlantılılığı sağlayacak şekilde herbir nesnenin haberleşmesi gereken en az komşu sayısı olan  $n_c$ , başlangıçta belirlenen sabit bir değerdir. ( $n_c$  değerinin nasıl belirlendiği beşinci bölümde açıklanmaktadır.)

Güç bölgesi	Komşu sayısı
gb <sub>1</sub>	2
gb <sub>2</sub>	1
gb <sub>3</sub>	2
gb <sub>4</sub>	1
gb <sub>5</sub>	1

←  $n_c = 3$

Şekil 4.3 Güç bölgeleri tablosu.

Nesneler, herbir güç seviyesiyle kaç komşusuna ulaşabildiğini Şekil 4.3'te görüldüğü gibi *güç bölgeleri tablosunda* tutarlar. Vericinin her bir güç seviyesi, tabloda bir güç bölgesi ile temsil edilmektedir. HELO gönderme aralığı içinde alınan herbir HELO mesajı sonrasında tabloda uygun güç bölgesindeki komşu sayısı güncellenir. HELO mesajı gönderen komşunun, hangi güç bölgesinde olduğunu belirlemek için Denklem (4.1) kullanılır. Burada  $P_{max}$  ve  $P_r$ , HELO mesajının gönderilme ve alınma güçleri,  $R_{th}$  ise alıcı hassasiyetidir. Güç seviyeleri basamaklı olduğundan, Denklem (4.1)'den gerekli en az iletim gücü  $P_i$  olarak hesaplanır.

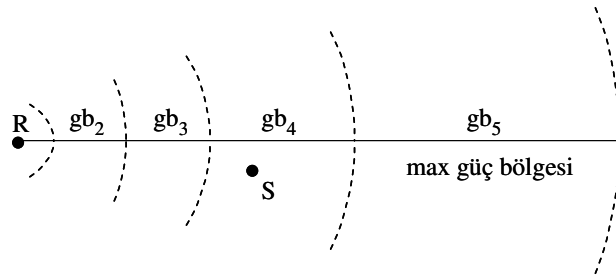


$$P_{i-1} < \frac{P_{\max}}{P_r} R_{th} < P_i \quad (4.1)$$

HELO gönderme aralığı sonunda, Denklem (4.2) uyarınca en düşük güç bölgesinden başlamak üzere erişilebilir komşu sayıları toplanarak  $n_c$  değerini sağlayan en düşük güç seviyesi ( $P_j$ ) belirlenmektedir. Denklem (4.2)'de güç bölgelerinin sayısı,  $z$  ile gösterilmiştir. Tablodaki komşu sayılarının toplamı  $n_c$  eşik değerini aşamazsa verici gücü en yüksek seviyeye ayarlanır ( $P_{\max}$  veya  $P_z$ ). Diğer taraftan, bu nesne için yeterli bağlantılılık sağlanamadığı için, dinleme aralıkları uzatılarak ya da sürekli dinleme yapılarak bağlantılılığı arttıracak yeni komşulara ulaşılması sağlanmalıdır.

$$P_{opt} = \begin{cases} P_j & \leftrightarrow \sum_{i=1}^j gb_i \geq n_c \wedge \min(j) \leq z \\ P_{\max} & \leftrightarrow \sum_{i=1}^z gb_i < n_c \end{cases} \quad (4.2)$$

Belirlenen güç seviyesi, bir sonraki HELO gönderme aralığı süresince veri paketlerinin iletiminde kullanılacak verici gücü seviyesidir. Gezginlik veya yeni katılan, bozulan, enerjisi biten nesnelere nedeniyle olası ilinge değişimleri dikkate alınarak güç bölgeleri tablosu her HELO gönderme aralığı sonunda sıfırlanarak yenilenir.



Şekil 4.4 Vericinin güç bölgeleri.

Şekil 4.3'te görülen güç tablosunu tutan R nesnesinin vericisi beş farklı güçle iletim yapabilmektedir ( $z=5$ ). Şekil 4.4'teki S nesnesinin en yüksek güç seviyesiyle gönderdiği HELO mesajını alan R nesnesi, Denklem (4.1)'i kullanarak bu komşusunun bulunduğu güç bölgesini  $gb_4$  olarak belirler ve tablosunu güncelleyerek  $gb_4$  bölgesindeki komşu sayısını bir artırır. Bir HELO gönderme aralığı boyunca komşularından aldığı HELO mesajlarına göre tablosunu güncelleyen R nesnesi, bağlantılılık eşik değeri 3 kabul edildiğinde Denklem (4.2)'ye göre  $j=2$  hesaplayarak veri paketlerini ikinci güç seviyesiyle iletmesi gerektiğini belirler.

HELO mesajlarına dayalı iletim gücü kontrol yöntemi, açık döngü bir yöntemdir. Açık döngü yöntemlerde karşılaşılan asimetrik bağlar TSGS senaryosunda beklenmemektedir. Çünkü nesnelere yakın mesafede, birbirlerinin görüş hattında ve aynı frekansta haberleşmektedirler. Aynı nedenden dolayı, gönderen ve alan tarafındaki kanal koşulları ile sinyal zayıflaması benzerdir ve güç bölgesi belirleme hesaplarını etkilemediği kabul edilmiştir.

## 5. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

PCLS protokolünün performansı, enerji tüketimi ve veri bağı katmanı gecikmesi ölçütleri yönünden değerlendirilmektedir. Çalışmada kullanılan protokol parametreleri tanıtıldıktan sonra bu parametrelerin performans ölçütleri üzerine etkileri analitik yöntemle incelenmekte ve değerleri belirlenmektedir. Analitik modelle belirlenen değerlerin geçerliliği benzetim yoluyla da doğrulanmaktadır. Daha sonra PCLS protokolünün performansı, OMNet++ benzetim ortamı [2] ve TSGS senaryosu kullanılarak diğer MAC protokolleriyle karşılaştırılmaktadır.

### 5.1 Protokol Parametreleri

Analitik modelde ve benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler iki gruba ayrılmaktadır. Birinci gruptaki parametrelerin değerleri seçilen alıcı-vericinin belirtilmelerine bağlıdır. Çalışmalarda esas alınan Chipcon firmasının CC2420 [3] alıcı-vericisine ait belirtilmelere göre belirlenen parametrelerin değerleri Çizelge 5.1’de listelenmiştir.

Çizelge 5.1 Analitik çalışmadaki radyo parametreleri

$P_{tx}$	göndermede çekilen güç	17.4 mA×3 V
$P_{rx}$	almada çekilen güç	18.8 mA×3 V
$P_{lpl}$	LPL’de çekilen güç	12.3 mW *
$P_{sleep}$	uykuda çekilen güç	1 $\mu$ A×3 V
$t_{lpl}$	bir kerelik LPL süresi	2 ms
$c_s$	saat sapma oranı	$\pm$ 40 ppm
$B$	bit hızı	250 Kbps

İkinci grup parametreler ise PCLS protokolüne ait parametreler olup Çizelge 5.2’de listelenmiştir. Bu parametrelerin bir kısmı sabit kabul edilerek belirlenen değerleri çizelgede gösterilmiştir. Çizelgede değerleri belirlenmemiş parametreler analitik çalışmayla incelenmekte ve benzetim çalışmasıyla da geçerlilikleri doğrulanmaktadır. PCLS protokolünün parametreleri arasındaki ilişkiler üçüncü bölümdeki şekillerde gösterilmiştir.

---

\* (Ye vd., 2006)

Çizelge 5.2 PCLS protokol parametreleri ve kabul edilen değerleri

Par.	Anlamı	Değeri
$l_d$	veri paketi uzunluğu	64 byte
$t_d$	veri paketi iletim süresi ( $l_d/B$ )	2 ms
$T_d$	veri paketi üretme aralığı	0.5-3 dk
$l_H$	HELO paketi uzunluğu	32 byte
$t_H$	HELO paketi iletim süresi ( $l_H/B$ )	1 ms
$c_w$	çekişme penceresi süresi	4 ms
$t_s$	dinleme aralığı	
$T_r$	çizelge yenileme aralığı	
$c$	maksimum saat kayıklığı ( $c = c_s \times T_r$ )	
$t_p$	maksimum öncül süresi ( $t_p = c_w + 4 \times c$ )	
$k$	protokol yükü ( $t_p/t_s$ )	
$h$	HELO gönderme aralığı katsayısı	
$T_H$	HELO gönderme aralığı ( $h \times t_s$ )	

TSGS gibi gözetleme sistemlerinde duyargalar tarafından algılanan ortama ait termal, akustik ve manyetik veriler kısa paketler halinde gönderilebilir. Ayrıca, PCLS protokolünün karşılaştırıldığı diğer protokollerde veri paketleri 36-64 byte arasında değişmektedir. Bu nedenle 64 byte'lık veri paketleri kullanıldığı kabul edilmiştir. Veri paketi üretme aralığının üst sınırı ise sık bildirimlere karşılık gelen 0.5 dakika ile daha seyrek bildirimlere karşılık gelen 3 dakika arasında değiştirilerek farklı değerler denenmiştir.

## 5.2 Protokol Parametrelerinin Analitik Yöntemle İncelenmesi

Analitik çalışmada amacımız protokol parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemek ve performans ölçütleri üzerindeki etkilerini görmektir. Bu nedenle basit ve yönetilebilir bir modelden yararlanılmıştır (Polastre vd., 2004)(Ye vd., 2006). Buna göre tek-sekmeli bir ağ içinde yer alan her bir nesnenin diğer  $n$  sayıdaki komşularıyla direk haberleşebildiği ve her bir nesnenin  $T_d$  aralıkla yaptığı tümegönderimlerin  $n$  sayıda komşusu tarafından alındığı kabul edilmiştir. Basitleştirilmiş bu model, protokol parametrelerinin enerji tüketimi ve gecikmeye etkilerini belirlememizi sağlayacak ve protokol parametrelerimizin ilk değerlerini elde

etmekte kullanılacaktır.

Enerji tüketimini MAC protokolü açısından incelediğimiz için bir nesnenin birim zamanda harcadığı enerjiyi hesaplarken, mikroişlemci ve duyargaların enerji tüketimi hesaba katılmamıştır. İletişimde harcanan enerji ise gönderme, alma, dinleme (LPL) ve uyuma sürelerinde harcanan enerjinin toplamıdır. Buna göre bir nesnenin birim zamanda harcadığı enerji, herbir durumda çekilen güç ve birim zamanın o durumda harcanan kısmına bağlı olarak Denklem (5.1) ile ifade edilebilir.

$$P = P_{tx} \cdot f_{tx} + P_{rx} \cdot f_{rx} + P_{LPL} \cdot f_{LPL} + P_{sleep} \cdot f_{sleep} \quad (5.1)$$

Gönderme için geçen süre, veri paketleri ile HELO mesajlarının iletimi için geçen sürelerdir (sırasıyla  $t_d$  ve  $t_H$ ). Veri paketleri ve HELO mesajlarından önce yayınlanan öncül sinyalleri nedeniyle bu sürelerin herbirine ayrıca öncül sinyali süresi ( $t_p$ ) de eklenmelidir. Buna göre, birim zamanın göndermeye ayrılan kısmı, paket üretme aralığının üst sınırı ( $T_d$ ) ve HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) değerlerine bağlı olarak, Denklem (5.2)'de verilmektedir.

$$f_{tx} = (t_p + t_d) \cdot \frac{1}{T_d} + (t_p + t_H) \cdot \frac{1}{T_H} \quad (5.2)$$

Analitik modelimizde herbir nesnenin  $n$  komşusundan gönderilen veri ve HELO paketlerini aldığı kabul edilmiştir. Ancak saat kayıklığı ve gevşek eşzamanlama nedeniyle öncül sinyallerinin tamamının alınması beklenemez. Bu nedenle, öncül sinyallerinin ortalama olarak yarısının alındığı kabul edilerek, birim zamanın alma için harcanan kısmı Denklem (5.3)'le ifade edilebilir.

$$f_{rx} = n \cdot \left( \frac{t_p}{2} + t_d \right) \cdot \frac{1}{T_d} + n \cdot \left( \frac{t_p}{2} + t_H \right) \cdot \frac{1}{T_H} \quad (5.3)$$

Göndermesi olsun olmasın herbir dinleme aralığında ( $t_s$ ) bir kere düşük güçle dinleme (LPL) yapan bir nesnenin birim zamanda LPL için harcadığı süre Denklem (5.4)'te verilmiştir.

$$f_{LPL} = \frac{t_{lpl}}{t_s} \quad (5.4)$$

Buradaki  $t_{lpl}$  süresi, tek seferlik LPL için geçen süre olup CC2420 radyosunda aşağıdaki sayfaları içermektedir. Bu sürelerin toplamı 1.92 ms etmekle birlikte hesaplamalarda yaklaşık olarak 2 ms kabul edilmiştir.

- Voltaj regülatörü çalıştırma süresi: 0.3~0.6 ms

- Kristal osilatör çalıştırma süresi: 1.0 ms
- Alma moduna geçiş süresi (PLL lock time): 192  $\mu$ s (12 sembol süresi)
- CCA için alma modunda kalma süresi: 128  $\mu$ s (en az 8 sembol süresi)

Gönderme, alma ve LPL süreleri dışında alıcı-verici kapatılarak enerji tüketimi kısıldığından, birim zamanın kalan kısmı uyku modunda geçirilmektedir. Sonuç olarak, birim zamanın uykuda geçirilen kısmı Denklem (5.5)'le ifade edilebilir.

$$f_{sleep} = 1 - f_{tx} - f_{rx} - f_{LPL} \quad (5.5)$$

Denklem (5.2)-(5.5)'i Denklem (5.1)'de yerine koyduğumuzda bir nesnenin birim zamanda harcadığı enerjiyi ya da diğer bir ifadeyle çekilen gücü, Denklem (5.6) ile elde edebiliriz.

$$\begin{aligned}
P &= P_{tx} \left[ (t_p + t_d) \cdot \frac{1}{T_d} + (t_p + t_H) \cdot \frac{1}{T_H} \right] + \\
&P_{rx} \left[ n \cdot (t_p / 2 + t_d) \cdot \frac{1}{T_d} + n \cdot (t_p / 2 + t_H) \cdot \frac{1}{T_H} \right] + P_{LPL} \left[ \frac{t_{lpl}}{t_s} \right] + \\
&P_{sleep} \left[ 1 - (t_p + t_d) \cdot \frac{1}{T_d} - (t_p + t_H) \cdot \frac{1}{T_H} - n \cdot (t_p / 2 + t_d) \cdot \frac{1}{T_d} - n \cdot (t_p / 2 + t_H) \cdot \frac{1}{T_H} - \frac{t_{lpl}}{t_s} \right] \\
P &= (P_{tx} - P_{sleep}) \left[ \frac{1}{T_d} \cdot (t_p + t_d) + \frac{1}{T_H} \cdot (t_p + t_H) \right] + \\
&n(P_{rx} - P_{sleep}) \left[ \frac{1}{T_d} \cdot (t_p / 2 + t_d) + \frac{1}{T_H} \cdot (t_p / 2 + t_H) \right] + \\
&(P_{LPL} - P_{sleep}) \left[ \frac{t_{lpl}}{t_s} \right] + P_{sleep}
\end{aligned} \quad (5.6)$$

Buna göre harcanan enerjiyi hesaplayabilmek için Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de değerleri verilen parametreler yeterli olmayıp öncül süresi ( $t_p$ ), dinleme aralığı ( $t_s$ ) ve HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) parametrelerinin değerlerinin de belirlenmesi gerekmektedir.

Dinleme aralığı ( $t_s$ ), dinleme-uyuma periyotları uygulanan MAC protokollerinde enerji tüketimini azaltmak açısından en önemli parametredir. Nesnelerin ne kadar sıklıkla uyanıp gönderme veya dinleme yapacağı gecikmeyi de etkiler. Bu nedenle öncelikle dinleme aralığının incelenmesi gerekmektedir.

$n$  sayıdaki komşulardan herbirinin  $T_d$  süre aralıklı veri paketi ve  $T_H$  süre aralıklı HELO paketi

gönderdiği durumda paketler arasındaki ortalama süre Denklem (5.7) ile elde edilebilir. Bu süre aynı zamanda bir nesnenin kendisine gönderilen trafiği kaçırmadan alabilmesi için gerekli optimum dinleme aralığıdır (Ye vd., 2006). Nesnelerin bu süreden daha sık aralıklarla uyanması gecikmeyi azaltsa da enerji tüketimini artırır. Diğer taraftan, daha az enerji harcamak için daha uzun aralıklarla dinleme yaparlarsa gecikme artar.

$$t_s = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{n} \left( \frac{T_d}{\frac{T_d}{T_H} + 1} \right) = \frac{T_d \times T_H}{n(T_d + T_H)} \leftrightarrow T_d \geq T_H \\ \frac{1}{n} \left( \frac{T_H}{\frac{T_H}{T_d} + 1} \right) = \frac{T_H \times T_d}{n(T_H + T_d)} \leftrightarrow T_H \geq T_d \end{array} \right\} = \frac{T_d \times T_H}{n(T_d + T_H)} \quad (5.7)$$

Öncül sinyali kullanılan ve LPL uygulanan MAC protokollerinde ikinci önemli parametre öncül süresidir ( $t_p$ ). *B-MAC* ve *Aloha with preamble sampling* protokollerinde olduğu gibi PCLS protokolünde de öncül süresi, protokol yükünü arttıran, ancak göndermeden önce komşuların uyandırılması için de gerekli bir parametredir. Denklem (5.8)'de olduğu gibi öncül süresinin ( $t_p$ ) dinleme aralığına ( $t_s$ ) oranı olarak tanımlayabileceğimiz protokol yükü ( $k$ ), diğer protokollerde %100 oranındayken PCLS'teki gevşek eşzamanlama nedeniyle çok daha düşük değerler alabilir.

$$k = \frac{t_p}{t_s} \quad (5.8)$$

Öncül süresinin ( $t_p$ ) nasıl belirlendiği Bölüm 4.1'de açıklanmıştır. Buna göre maksimum öncül süresi, Denklem (5.9)'da görüldüğü gibi aynı zamanda çizelge yenileme aralığı ( $T_r$ ) değerine de bağlıdır. Çünkü öncül süresi, bir çizelge yenileme aralığı süresince oluşacak maksimum saat kayıklığını ( $c$ ) karşılayabilecek büyüklükte olmalıdır.

$$t_p = c_w + 4 \times c = c_w + 4 \times c_s \times T_r \Rightarrow T_r = \frac{t_p - c_w}{4 \times c_s} \quad (5.9)$$

Çizelge yenileme aralığının ( $T_r$ ) değeri, en az HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) kadar olabilir. Çünkü çizelge yenileme işleminde HELO mesajlarından yararlanılmaktadır. Bu sonucu Denklem (5.8) ve (5.9)'la birleştirdiğimizde Denklem (5.10) elde edilir.

$$T_r \geq T_H \Rightarrow \frac{t_p - c_w}{4 \times c_s} \geq T_H \Rightarrow \frac{k \cdot t_s - c_w}{4 \times c_s} \geq T_H \quad (5.10)$$

LPL tabanlı protokollerde hem enerji tüketimini hem de gecikmeyi arttıran öncül süresini azaltmak için protokol yükünü düşürmek gerekmektedir. Protokol yükü ( $k$ ) alt seviyesi ise Denklem (5.7) ile (5.10) kullanılarak belirlenebilir.

$$k \geq \frac{4 c_s T_H + c_w}{t_s} \Rightarrow k \geq \frac{4 c_s T_H + c_w}{\frac{T_d \times T_H}{n(T_d + T_H)}} \quad (5.11)$$

Denklem (5.11)'in çözümlenmesiyle birlikte HELO gönderme aralığının ( $T_H$ ) sıfırdan büyük olması şartı da dikkate alınarak elde edilen karesel eşitsizlik Denklem (5.12)'de verilmiştir.

$$4 n c_s T_H^2 + [T_d (4 n c_s - k) + n c_w] T_H + (n c_w T_d) \leq 0 \quad \wedge \quad T_H > 0 \quad (5.12)$$

Denklem (5.12)'deki ifadeyi basitleştirerek yeniden yazdığımızda, HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) için elde edilecek çözüm aralığı Denklem (5.13)'te görülmektedir.

$$\left. \begin{array}{l} A = 4 n c_s \\ B = T_d (4 n c_s - k) + n c_w \\ C = n c_w T_d \end{array} \right\} 0 < \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 A C}}{2 A} \leq T_H \leq \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 A C}}{2 A} \quad (5.13)$$

Denklem 5.13'te eşitsizliğin sol tarafı ancak iki şartla doğru olabilir:

$$0 < \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 A C}}{2 A} \Leftrightarrow \begin{cases} 1.\text{şart} : B < 0 \quad \wedge \\ 2.\text{şart} : |B| > \sqrt{B^2 - 4 A C} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta = B^2 - 4 A C \geq 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

Yukarıda verilen 1.şartın sağlanabilmesi için protokol yükünün en az Denklem (5.15)'te elde edilen değer kadar olması gerekir.

$$B < 0 \Rightarrow T_d (4 n c_s - k) + n c_w < 0 \Rightarrow k > \frac{4 n c_s T_d + n c_w}{T_d} \quad (5.15)$$

Denklem (5.15) gösterimde kolaylık olması açısından aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir.

$$k > \frac{J}{T_d} \quad \wedge \quad J = 4 n c_s T_d + n c_w \quad (5.16)$$

Denklem (5.14)'teki 2. şartın sağlanabilmesi için gerekli protokol yükü değerleri ise Denklem



(5.17) ile verilmiştir.

$$B^2 - 4AC \geq 0 \Rightarrow \pm B \geq \sqrt{4(4nc_s)(nc_w T_d)} \Rightarrow \pm [T_d(4nc_s - k) + nc_w] \geq 4n\sqrt{c_s c_w T_d}$$

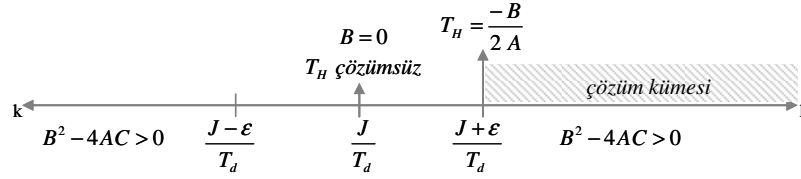
$$\Rightarrow \frac{4nc_s T_d + nc_w - 4n\sqrt{c_s c_w T_d}}{T_d} \geq k \geq \frac{4nc_s T_d + nc_w + 4n\sqrt{c_s c_w T_d}}{T_d} \quad (5.17)$$

Denklem (5.16)'daki ifadelerden yararlanarak Denklem (5.17) de yeniden yazılabilir:

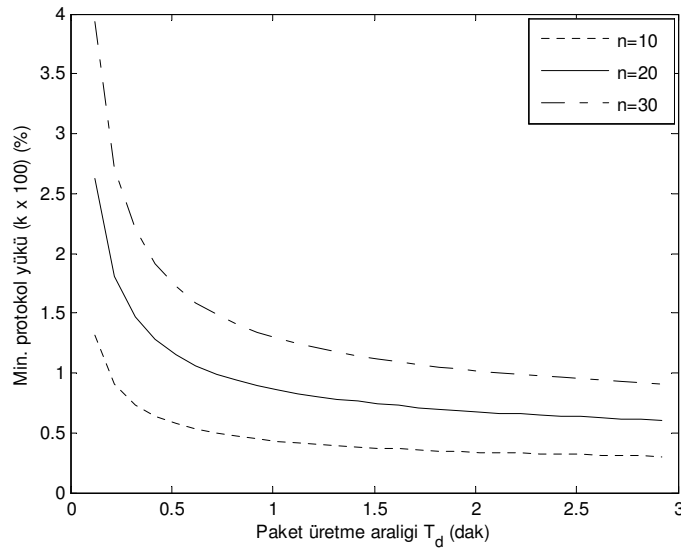
$$\frac{J - \varepsilon}{T_d} \geq k \geq \frac{J + \varepsilon}{T_d} \quad \wedge \quad \varepsilon = 4n\sqrt{c_s c_w T_d} \quad (5.18)$$

Denklem (5.14)'teki her iki şartın da sağlanabilmesi için protokol yükünün çözüm kümesi Şekil 5.1'de ve Denklem (5.19)'da görülmektedir.

$$k \geq \frac{4nc_s T_d + nc_w + 4n\sqrt{c_s c_w T_d}}{T_d} \quad (5.19)$$



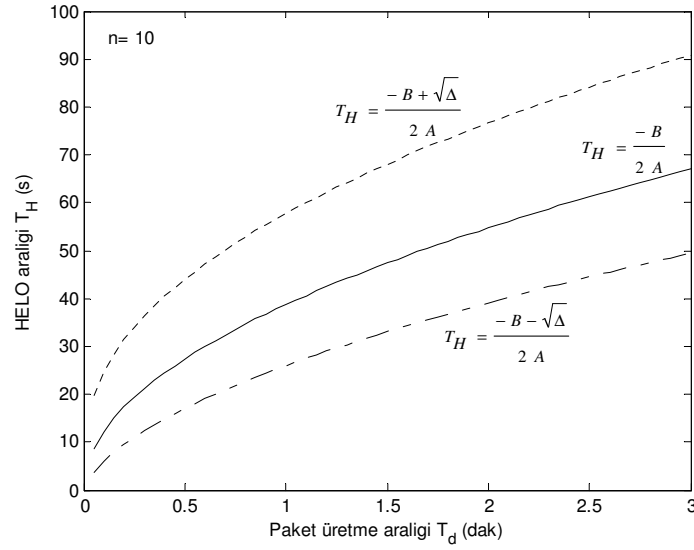
Şekil 5.1 Protokol yükü ( $k=t_p/t_s$ ) için çözüm kümesi.



Şekil 5.2 Protokol yükünün ( $k=t_p/t_s$ ) en düşük değerleri.

Veri paketi üretme aralığı ( $T_d$ ) ve 1-sekme menzilineki komşu sayısına ( $n$ ) bağlı olarak değişen protokol yükünün alt seviyesi Şekil 5.2’de görülmektedir. Veri trafiği sıklaştıkça öncül süreleri azalmasına rağmen dinleme aralıkları kısaldığından protokol yükü artmaktadır.

En düşük protokol yükü  $k = \frac{J + \varepsilon}{T_d}$  değerine karşılık gelen HELO göndeme aralığı Şekil 5.3’te düz çizgiyle gösterilmiştir. Artan protokol yükünde  $\psi = 0.01$  olmak üzere  $k = \frac{J + \varepsilon + \psi}{T_d}$  için HELO göndeme aralıklarındaki değişim ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 5.3 HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ).

Protokol yükü arttırıldığında HELO gönderme aralığının hem artabildiği hem de azalabildiği görülmektedir. Azalan değerlerden nasıl faydalanılacağı, gezginliğin  $T_H$  süresine etkisinin incelendiği benzetim çalışmasında açıklanacaktır.

HELO paketleri PCLS protokolünde sadece çizelge yenileme amacıyla kullanılmamaktadır. HELO paketleri iletim gücünün kontrol edilmesinde de kullanıldığından HELO gönderme aralığının ( $T_H$ ) çok büyük olması halinde, belirlenmiş çıkış gücü seviyesi güncelliğini kaybedebilir. Çünkü bu süre içinde gezginlik nedeniyle nesnenin komşularında değişiklikler olabilir (yeni gelenler ve ayrılanlar gibi) ve kullanılan çıkış gücü yetersiz veya aşırı seviyede kalabilir. Sonuç olarak  $T_H$  süresi nesnelerin gezginlik modeline de bağlıdır.

Seçilecek gezginlik modeli YNA’lardaki grup hareketine ve nesnelerin müstakil hareketlerine uygun olmalıdır. Bu nedenle çalışmalarımızda, detayları Ek 3’te anlatılan, RPGM (Reference

Point Group Mobility) gezginlik modeli kullanılmıştır.

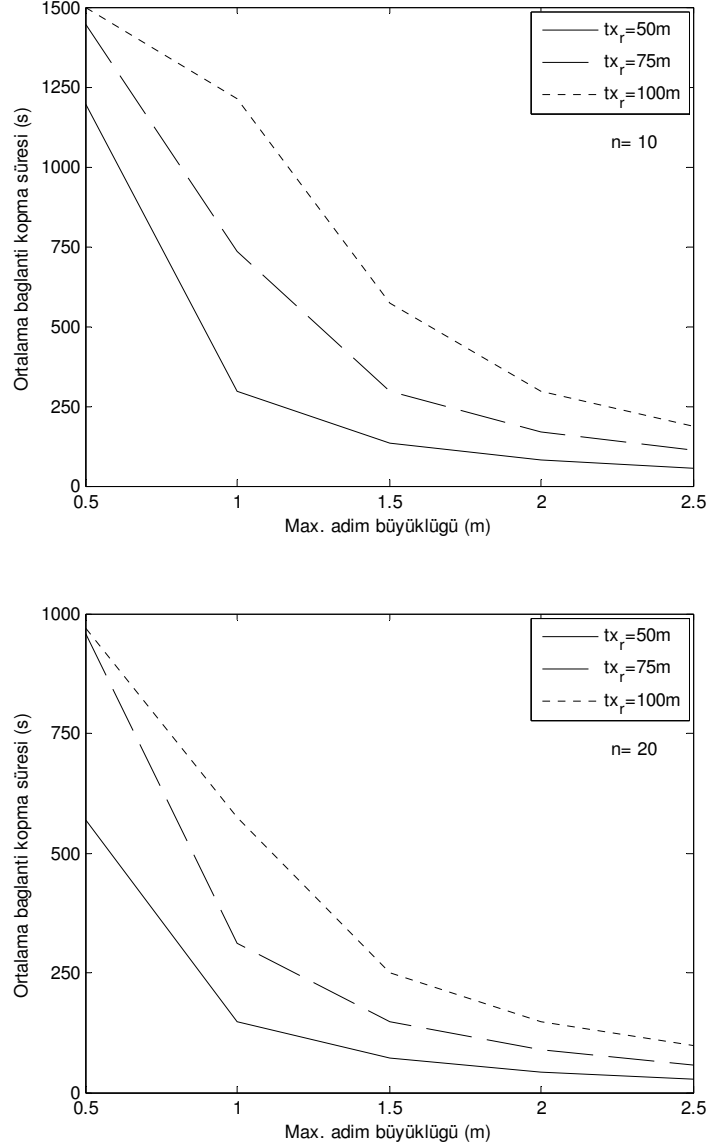
RPGM gezginlik modeline göre hareket eden nesnelerin grup hareketi ortak olduğundan, HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) grup hareket vektöründen ( $GM$ ) etkilenmez.  $T_H$  süresini etkileyen hareket, nesnelerin birbirinden bağımsız ve tamamen rassal ( $RM$ ) hareketleridir. Tek-sekme menzilinedeki komşulardan bu hareket sonucunda bağlantısını kaybeden ilk nesnenin kopma zamanını incelemek üzere ayrı bir benzetim çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, *lider* olarak belirlenen bir nesnenin belli bir gönderme menzili ( $tx_r$ ) içinde yer alan  $n=10$  ve  $n=20$  nesne başlangıçta rasgele yerleştirilmektedir. Daha sonra nesneler Çizelge 5.3'te verilen değerlerle RPGM gezginlik modeline göre hareket ettirilerek her adımda komşuların lidere olan mesafeleri izlenmiştir. Komşulardan herhangi biri liderin gönderme menzili dışına çıktığı ilk anda benzetim durdurularak bağlantı kopma süresi belirlenmiştir.

Çizelge 5.3 RPGM gezginlik modeli parametreleri

Gönderme menzili ( $tx_r$ )	50, 75, 100 m
GM	2 m/s (4 deniz mili)
GM yönü	$\pi/4$
Max. adım büyüklüğü ( RM )	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m
RM yönü	$0-2\pi$
Adım aralığı	1.0 s

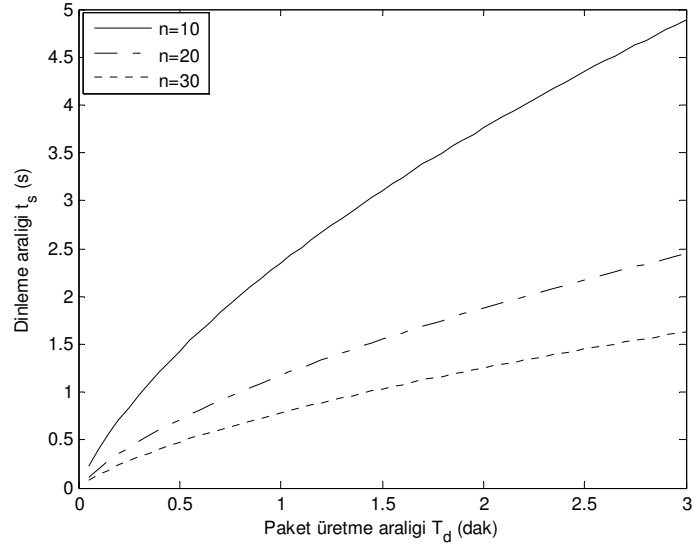
Üç farklı gönderme menzili ve beş ayrı adım büyüklüğü için yapılan testlerin her biri 1000 defa çalıştırılarak elde edilen ortalama bağlantı kopma süreleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Her denemede rasgele sayı üreticinin tohumu değiştirilerek nesneler farklı topolojilerde dağıtılmıştır. Ayrıca her adımdaki hareketin  $0-2\pi$  aralığındaki rasgele yönünü ve seçilen adım büyüklüğünü geçmeyecek şekilde rasgele miktarını belirlemek için nesne başına iki ayrı rasgele sayı üretici kullanılarak nesnelerin birbirinden bağımsız hareket etmeleri sağlanmıştır.

Şekil 5.3'te en düşük protokol yüküne karşılık elde edilen HELO gönderme aralıklarının, maksimum 0.5-1.5m/s adımlarla RPGM gezginlik modeline göre hareket eden nesneler için de yeterli olduğu görülmektedir. Adım büyüklüğünün artması ve nesnelerin daha hızlı hareket etmeleri halinde protokol yükü arttırılarak Şekil 5.3'te görüldüğü gibi azalan  $T_H$  süreleri kullanılabilir. Bu sayede HELO gönderme aralığı kısaltılarak, nesnelerin hızlı hareket etmesinden kaynaklanan hatalı iletim gücü kullanılması önlenmiş olur.



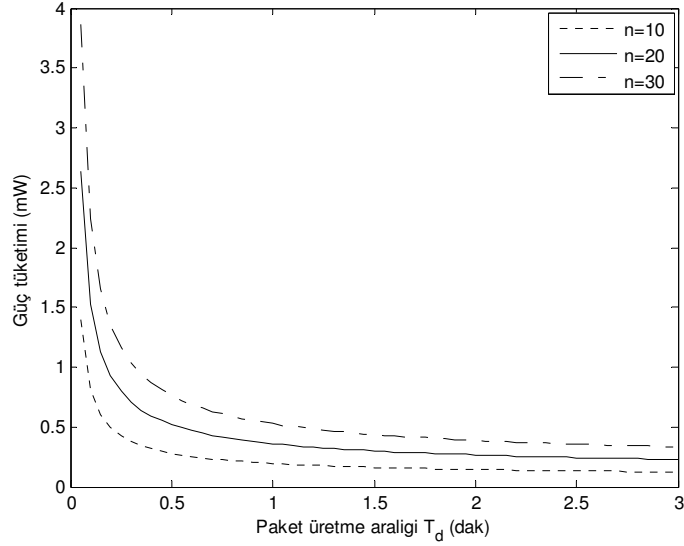
Şekil 5.4 RPGM modeline göre ortalama bağlantı kopma süreleri.

Buraya kadar elde edilen sonuçlarla, Denklem (5.19)'dan yararlanarak en düşük protokol yükü belirlenmekte ve Denklem (5.13) kullanılarak HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) tespit edilmektedir. Enerji tüketimini belirlemek için ihtiyacımız olan dinleme aralığı ( $t_s$ ) parametresi ise HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) değerleri Denklem (5.7)'de kullanılarak elde edilebilir. Buna göre dinleme aralığı değerleri Şekil 5.5'te görülmektedir. Dinleme aralıkları nesne sayısı ile ters orantılıdır. Nesne sayısı arttığında, dinleme zamanlarını artan trafiğe uygun hale getirmek için dinleme aralıkları kısaltılmaktadır. Paket üretme aralığı arttığında yani trafik yoğunluğu azaldığında ise dinleme aralıkları uzatılmaktadır.



Şekil 5.5 Dinleme aralığı ( $t_s$ ).

Sırasıyla Denklem (5.19), (5.13), (5.7) ve (5.9)'u kullanarak protokol parametrelerinin değerlerini belirledikten sonra Çizelge 5.1 ve 5.2'de verilen değerleri de kullanarak Denklem (5.6) ile PCLS protokolünün birim zamanda harcadığı enerji hesaplanabilir. Buna göre elde edilen enerji tüketimi Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6 Birim zamanda harcanan enerji miktarı (analitik).

Nesne sayısı arttığında dinleme aralıkları ( $t_s$ ) kısaldığından nesnelere daha sık uyanıp daha fazla enerji harcamaktadırlar. Veri trafiği sıklaştığında ise öncül süreleri ( $t_p$ ) kısılmasına

karşın dinleme aralıkları ( $t_s$ ) azaltıldığından enerji tüketimi artmaktadır. Ayrıca, hem nesne sayısı arttığında hem de trafik sıklaştığında birim zamanda alınan ve gönderilen paket sayısı da artarak enerji tüketimini arttırmaktadır. Diğer taraftan, Şekil 5.2 ile Şekil 5.6'nın benzerliği karşılaştırıldığında protokol yükü ile enerji tüketimi arasındaki yakın ilişki görülmektedir.

Protokol parametreleri enerji tüketimiyle birlikte gecikmeyi de etkilemektedir. Veri bağı katmanı gecikmesi, paketin üretildiği andan başarıyla alındığı ana kadar geçen süreyi kapsamaktadır. Buna göre paket başına ortalama gecikme ( $D$ ), Denklem (5.20)'de görüldüğü gibi, paketin üretilmesinden bir sonraki zaman dilimine kadar bekleme süresini (ortalama  $t_s/2$ ), başarısız gönderme denemeleri için geçen zamanı ( $f \times t_s$ ) ve son olarak paketin iletim süresini ( $T$ ) içerir. Yakın mesafede haberleşme nedeniyle yayılım gecikmesi ve ACK süresi dikkate alınmamıştır.

$$D = \frac{t_s}{2} + f \times t_s + T \quad (5.20)$$

Bir veri paketi gönderilirken veriyle birlikte öncül sinyali de yayınlandığından paket iletim süresi, öncül süresi ( $t_p$ ) ile veri paketi iletim süresinin ( $t_d$ ) toplamıdır ( $T = t_p + t_d$ ). PCLS protokolü temel olarak *non-persistent CSMA* çalışan ve bununla birlikte zaman dilimleri dışında gönderme yapılamayan *slotted* bir protokol olduğundan, başarısız gönderme denemelerinin sayısını ( $f$ ) belirlemek için (Kleinrock vd., 1975b) ve (Rom vd., 1990) çalışmalarındaki "*slotted non-persistent CSMA*" modelinden yararlanılmıştır. Bu çalışmalarda bir paketin başarıyla gönderilene kadar geçen ortalama deneme sayısı, trafik yoğunluğunun ( $G$ ) başarıma ( $S$ ) oranıyla ifade edilmektedir. Buna göre başarısız denemeler  $\left(\frac{G}{S} - 1\right)$  olacağından, Denklem (5.20) tekrar düzenlendiğinde Denklem (5.21)'deki gecikme eşitliği elde edilir.

$$D = \frac{t_s}{2} + \left(\frac{G}{S} - 1\right) \times t_s + T = \frac{G}{S} \times t_s + T - \frac{t_s}{2} \quad (5.21)$$

*Slotted non-persistent CSMA* için (Kleinrock vd., 1975b) çalışmasında verilen Denklem (5.22)'deki başarımla eşitliğinin geçerli olabilmesi için önemli bir kabullenme yapılmıştır.

$$S = \frac{a G e^{-aG}}{1 + a - e^{-aG}} \quad (5.22)$$

Tekrar gönderme gecikmesinin ortalama değerinin paket iletim süresi ( $T$ )'den büyük olması

gerekmektedir. PCLS protokolünde tekrar gönderme için beklenen en az bir dinleme aralığı süresi ( $t_s$ ) paket iletim süresinden ( $T$ ) oldukça büyüktür (en az 19, en çok 261 kat). Bu nedenle Denklem (5.22), PCLS protokolünün Denklem (5.21)'deki gecikme eşitliğinde kullanılarak Denklem (5.23) elde edilebilir.

$$D = \frac{G}{a G e^{-aG}} \times t_s + T - \frac{t_s}{2} = \frac{1+a-e^{-aG}}{a e^{-aG}} \times t_s + T - \frac{t_s}{2} \quad (5.23)$$

Bu denklemdeki  $a$  ve  $G$  parametreleri, sırasıyla, zaman diliminin ve kanaldaki toplam trafik yoğunluğunun ( $g$ ), paket iletim süresine ( $T$ ) göre normalize edilmiş halleridir. *Slotted non-persistent CSMA* çalışmasında bir zaman diliminin, yayılma gecikmesi kadar olduğu kabul edilmektedir. PCLS protokolünde ise göndermeye izin verilen zaman dilimleri  $t_s$  parametresiyle belirlendiğinden  $a$  ve  $G$  parametreleri aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$a = \frac{t_s}{T} \quad (5.24)$$

$$G = g T \quad (5.25)$$

Kanaldaki toplam trafik yoğunluğu ( $g$ ), yeni üretilen paketler ile daha önce gönderilemeyip tekrar gönderilmeye çalışılan paketlerin oluşturduğu trafiğin tamamıdır. Yeni üretilen paketlerden oluşan trafik yoğunluğu ( $\lambda$ ), Denklem (5.7)'nin elde edilmiş yöntemine benzer olarak aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$\lambda = n \times \left( \frac{T_d + T_H}{T_d \times T_H} \right) \quad (5.26)$$

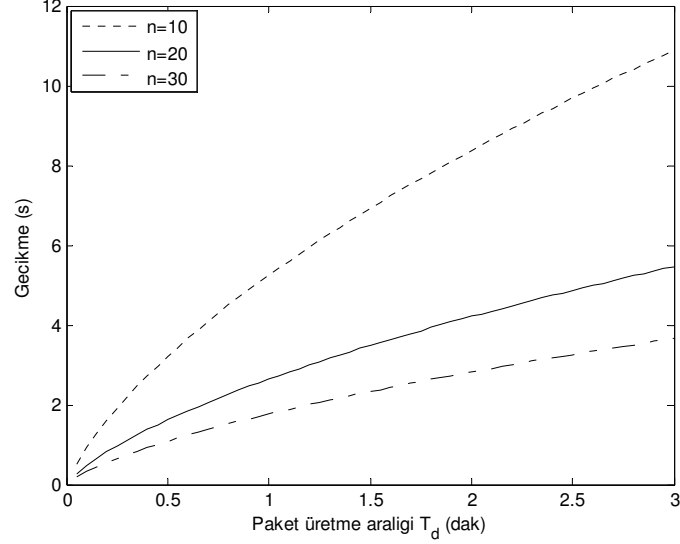
Bu trafiğin bir bölümü tekrar gönderme trafiğini oluşturacağı için  $m \geq 1$  olmak üzere kanaldaki toplam trafik yoğunluğu Denklem (5.27) ile ifade edilebilir. ( $m=1$  durumu, tekrar göndermelerin yoksayıldığı duruma karşılık gelmektedir.)

$$g = m \times \lambda = m \times n \times \left( \frac{T_d + T_H}{T_d \times T_H} \right) \quad (5.27)$$

Denklem (5.24), (5.25) ve (5.27)'deki ifadeler Denklem (5.23)'te yerine konduğunda, paket başına ortalama gecikme miktarını veren Denklem (5.28) elde edilir.

$$D = \frac{1+a-e^{-m}}{a e^{-m}} \times t_s + T - \frac{t_s}{2} = e^m (T + t_s) - \frac{t_s}{2} = e^m (t_p + t_d + t_s) - \frac{t_s}{2} \quad (5.28)$$

Kanaldaki trafiğin sadece yeni üretilen paketlerden oluştuğunu ( $m=1$ ) kabul ederek ve Denklem (5.7)-(5.19)'la belirlenen parametreleri kullanarak gecikme için elde edilecek alt seviye Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.7 Paket başına düşen gecikme (analitik).

Paket aralığı ( $T_d$ ) arttıkça gecikme artmaktadır. Bunun nedeni, trafik yoğunluğu azaldığında dinleme aralığının ( $t_s$ ) ve öncül süresinin ( $t_p$ ) uzamasıdır. Bu sayede protokol yükü ( $k=t_p/t_s$ ) dengede tutulabilmektedir. Trafik yoğunlaştıkça verinin daha çabuk iletilmesi önem kazandığından paket aralığı azaldığında gecikmenin de azalması tercih edilen bir çalışma şekli sağlamaktadır.

Şekil 5.7'de tekrar göndermelerden kaynaklanan trafik ihmal edildiği için nesne sayısı arttığında dinleme aralıkları kısaldığından gecikmenin azaldığı görülmektedir. Tekrar göndermelerin gecikmeye etkisi Bölüm 5.3'teki benzetim çalışmasında tekrar ele alınacaktır.

Analitik çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar göstermektedir ki protokol yükü ( $k=t_p/t_s$ ), dinleme aralığı ( $t_s$ ), öncül süresi ( $t_p$ ), HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) ve çizelge yenileme aralığı ( $T_r$ ) parametreleri birbiriyle uyumlu olmalı ve uygulamanın ihtiyaçlarına göre belirlenmelidir. Uygulamada beklenen 1-sekme menzilineki komşu sayısı ( $n$ ) ve istenen paket üretme aralığına ( $T_d$ ) bağlı olarak en düşük protokol yükü ( $k$ ) elde edilebilir. En düşük enerji tüketimi sağlayan bu  $k$  parametresi kullanılarak uygun HELO gönderme aralığı ( $T_H$ ) ve dinleme aralığı ( $t_s$ ) tespit edilebilir. Son olarak da öncül süresi ( $t_p$ ) ve çizelge yenileme aralığı ( $T_r$ ) belirlenir.

Enerji tüketimini azaltan bu parametreler kullanıldığında uygulamanın ihtiyaçlarına yeterli



olacak bir gecikme seviyesi elde edilemiyorsa, dinleme aralığı ( $t_s$ ) kısaltılmalıdır. Bu sayede gecikme azalacak, ancak protokol yükü artacağı için enerji tüketimi artmış olacaktır. PCLS protokolünde protokol yükü çok düşük seviyelerde olduğundan, dinleme aralığının kısaltılması ve protokol yükünün arttırılması enerji tüketimini çok fazla arttırmayacaktır. Bu durum, PCLS protokolünün diğer protokollerle karşılaştırıldığı testlerin sonuçlarında (Bölüm 5.6) görülmektedir.

### 5.3 Protokol Parametrelerinin Benzetim Çalışmasıyla İncelenmesi

Analitik yöntemle belirlenen protokol parametreleri benzetim çalışmasında kullanılarak performans ölçütleri üzerindeki etkileri incelenmektedir. Benzetim sonucunda elde edilen enerji tüketimi ve gecikmedeki değişim, analitik çalışmada varılan sonuçlarla karşılaştırılarak analitik yöntemle belirlenen parametre değerlerinin geçerliliği benzetim yoluyla da doğrulanmaktadır.

Benzetim çalışması için PCLS MAC protokolü, OMNet++ (Varga, 2002) [2] benzetim sistemi ve onun üzerindeki Mobility Framework (MF) [5] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (OMNet++ ve MF hakkında detaylı bilgi Ek 2’de verilmiştir.) Benzetimde kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4’te listelenmiştir.

Çizelge 5.4 Benzetim çalışmasındaki parametreler

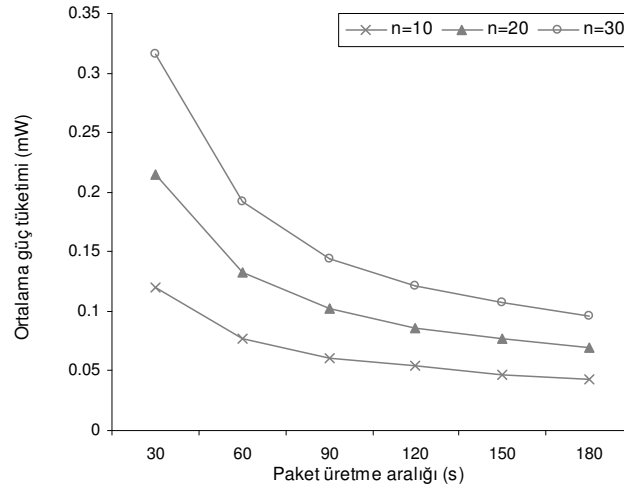
Radyo frekansı	2.4 Ghz	
Alıcı hassasiyeti	-95 dBm	
Verici gücü ve enerji tüketim seviyeleri	(dBm)	(mA)
	0	17.4
	- 5	14.0
	-10	11.0
	-15	9.9
	-25	8.5
Zayıflama katsayısı	2.5	
Adım büyüklüğü	$0 <  RMI  \leq 1$ m	
Adım aralığı	1.0 s	

Analitik modelde olduğu gibi benzetim senaryosunda da tek-sekmeli bir ağ içinde herbir nesnenin  $n$  sayıda komşusu bulunmaktadır. Bu nesnelere başlangıçta rasgele dağıtılmaktadır. 1-sekme menzilineki komşu sayısındaki değişimin performans ölçütlerine etkisini görmek açısından benzetimlerde komşu nesne sayısının 10, 20 ve 30 olarak alınması yeterli kabul edilmiştir. Benzetim süresi, nesne başına 20 adet veri paketinin  $T_d$  aralıklarla gönderilmesine

bağlı olarak değişmektedir. Veri paketi üretme aralığı ( $T_d$ ) olarak analitik çalışmada olduğu gibi 0.5-3 dakika arasında değişen değerler kullanılmaktadır. Bu değerlere karşılık gelen protokol parametreleri Denklem (5.7)-(5.19) kullanılarak belirlenmiştir. HELLO paketi gönderilecek zaman dilimlerini belirleyen  $h$  parametresi ise Denklem (5.29)'a göre hesaplanmıştır.

$$h = \left\lceil \frac{T_H}{t_s} \right\rceil \quad (5.29)$$

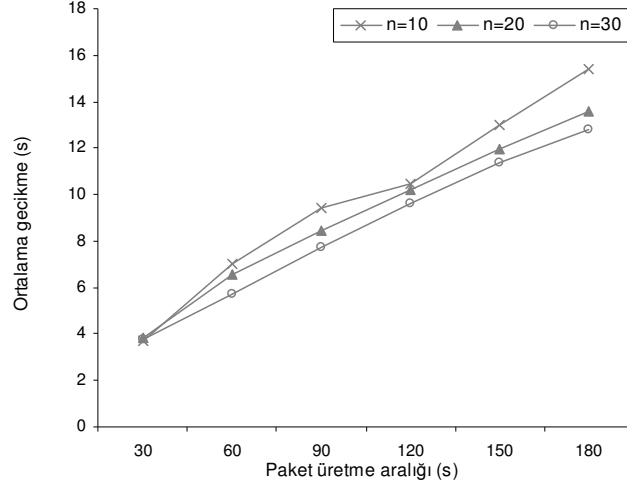
Nesnelerin gezgin olduğu kabul edildiğinden bütün nesnelere RPGM gezginlik modeline göre hem grup halinde grup hareket vektörüne ( $GM$ ) bağlı olarak hem de grup içinde rassal hareket vektörüne ( $RM$ ) bağlı olarak müstakil hareket etmektedirler. Deniz üstünde akıntı ve rüzgarın etkisiyle  $\pi/4$  yönünde ve saatte 4 deniz mili hızla grup halinde sürüklendiği kabul edilen nesnelerin yerleri 1 saniye aralıkla güncellenmektedir. Sürüklendiği yerde güncellenen her bir nesne ayrıca müstakil hareket ettirilmektedir. Bu hareketin ( $RM$ ) yönü  $0-2\pi$  aralığında, miktarı ise  $0-1m$  aralığında rasgele belirlenmektedir. Her bir nesne kendi  $RM$  vektörünün yönünü ve büyüklüğünü kendine ait iki farklı rasgele sayı üretici kullanarak tespit etmektedir.



Şekil 5.8 Birim zamanda harcanan ortalama enerji miktarı (benzetim).

Benzetim sonunda her bir nesnenin harcadığı enerji miktarının benzetim süresine bölünmesiyle elde edilen güç tüketimlerinin ortalaması Şekil 5.8'de verilmiştir. Birim zamanda harcanan enerji miktarı, analitik çalışma sonuçlarını içeren Şekil 5.6 ile karşılaştırıldığında, hem analitik hem de benzetim çalışmasında benzer değişim göstermektedir. Analitik çalışmada iletim gücü kontrolü uygulanmadığından ve maksimum

öncül süresi kullanıldığından, enerji tüketim miktarları daha yüksektir. Paket üretme aralığı ( $T_d$ ) artıp trafik yoğunluğu azaldığında enerji tüketimi azalmaktadır. Çünkü Denklem (5.7) ve (5.8) gereği  $T_d$  büyüdüğünde dinleme aralığı ( $t_s$ ) büyümekte ve protokol yükü azalmaktadır. Diğer taraftan nesne sayısı arttığında enerji tüketimi de artmaktadır. Bunun nedeni dinleme aralığının ( $t_s$ ) azalması ve nesnelerin sık uyanması sonucunda alıcının daha fazla enerji tüketimi yaratmasıdır.



Şekil 5.9 Paket başına düşen ortalama gecikme (benzetim).

Benzetim çalışmasında paket başına düşen ortalama gecikme miktarını bulmak için her bir nesnedeki toplam gecikme süresi gönderilen paket sayısına bölünerek elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Benzetim çalışmasının sonuçları Şekil 5.9'da görülmektedir. Analitik çalışma sonuçlarını içeren Şekil 5.7 ile karşılaştırıldığında, benzetim çalışmasında da paket aralıkları arttıkça gecikme artmaktadır. Daha sık veri gönderildiğinde ise gecikmenin azalması, analitik çalışmada olduğu gibi, verinin daha çabuk iletilmesi açısından tercih edilen bir çalışma şekli sağlamaktadır.

Analitik çalışmadaki gecikme değerlerini gösteren Şekil 5.7'de nesne sayısı arttığında dinleme aralığı kısaldığından gecikme azalmaktadır. Çünkü Şekil 5.7'de tekrar göndermeler ihmal edilmektedir ( $m=1$ ). Oysa ki nesne sayısı arttığında, artan çekişme nedeniyle tekrar göndermeler de artacak ve dinleme aralıkları kısaltılmış olmasına rağmen gecikmenin artmasına katkıda bulunacaktır. Bu nedenle benzetim çalışmasında nesne sayısı arttığında gecikmedeki azalma analitik çalışmadaki kadar yüksek değildir. Ancak nesne sayısı daha fazla artarsa, aynı oranda olmasa da gecikmede artış görülecektir.

Analitik yöntemle belirlenen protokol parametrelerinin kullanıldığı benzetim çalışmasında elde edilen enerji tüketimi ve gecikme değerleri, analitik çalışmada elde edilen sonuçlarla benzer değişim göstermektedir. Paket üretme aralığı ve nesne sayısı, enerji tüketimi ile gecikmeyi her iki çalışmada da benzer şekilde etkilediğinden, analitik yöntemin geçerliliği benzetim yoluyla da doğrulanmaktadır.

#### 5.4 PCLS Protokolünün Taktik Sualtı Gözetleme Sistemindeki Performansı

PCLS MAC protokolünün ikinci bölümde tanımlanan TSGS senaryosu üzerindeki performansı, OMNet++ benzetim ortamında ve Bölüm 5.2’de analitik yöntemle belirlenen protokol parametreleri kullanılarak değerlendirilmektedir. Buna göre, 500 m×500 m bir alanın değişik sayılarda (50, 100, 150, 200, 250) sualtı duyurga düğümü (SDD) kullanılarak kaplandığı ve 50 SDD için bir robot bot kullanıldığı kabul edilmiştir. Rasgele yerleştirilen robot botlar taşıdıkları SDD’leri ızgara yapısında dağıtmakta ve herbir SDD atılma anında etkinleştirilmektedir.

TSGS senaryosunun testinde nesnelere gezgin olduğu kabul edilmektedir. Bütün nesnelere hem grup halinde (*GM*) hem de grup içinde müstakil (*RM*) olarak RPGM gezginlik modeline göre hareket etmektedirler. Gezinlik için Bölüm 5.3’te verilen parametreler, TSGS üzerindeki performans değerlendirmesinde de kullanılmıştır.

TSGS senaryosunda SDD’ler tarafından tespit edilecek olaylar, zaman ve mekan yönünden ilişkilidir. Örneğin kaplanan alan içinde bir denizaltı bulunması halinde birbirine yakın SDD’ler çok yakın zaman aralıklarıyla tespitlerini bildirmeye başlarken uzaktaki SDD’ler henüz bir ileti gönderme ihtiyacı duymazlar. Bu benzetimi sağlamak açısından, senaryoda üretilen olayların, merkezdeki 150 m×150 m’lik bölgede bulunan tüm SDD’ler tarafından aynı anda algılandığı ve herbir SDD tarafından 20 paket üretildiği kabul edilmiştir. Ayrıca, farklı trafik yoğunluklarını denemek üzere 30-180 saniye arasında değişen bildirim sıklıkları test edilmiştir.

PCLS protokolü, veri paketlerinin iletiminde kullanılacak verici gücünü belirlemek için ağ bağlantılılık eşik ( $n_c$ ) değerinden yararlanmaktadır. Bölüm 4.3’te açıklanan ağ bağlantılılık eşik ( $n_c$ ) değeri, ağda tam bağlantılılığı sağlayacak şekilde herbir nesnenin haberleşmesi gereken en az komşu sayısıdır.  $n_c$  değerinin belirlenmesinde diğer çalışmaların sonuçlarından yararlanılmıştır.

Telsiz ağlarda bağlantılılık için gerekli komşu sayısı hakkında çeşitli çalışmalar farklı eşik

değerleri öne sürmektedir. Bu “sihirli sayının”, ağın büyüklüğüne bağlı olmaksızın 6 veya 8 olması gerektiğini öne süren eski çalışmaları hatalı bulan (Xue vd., 2004), ağdaki nesne sayısı arttıkça herbir nesnenin bağlanabildiği en yakın komşularının da artması gerektiğini savunmaktadır.  $c \log n$  olarak belirledikleri eşik değeri hakkında yaptıkları incelemede  $0.074 \leq c \leq 5.1774$  şartına bağlı olarak değişik bağlantılılık seviyeleri elde etmişlerdir. Benzetimlerle elde ettikleri sonuçlara göre  $c \approx 1$  olduğunda %95’e yakın bağlantılılık sağlansa da ispatı yoktur. Ancak,  $c \geq 1.5$  için bağlantılılığın %100’e yakın oranda sağlandığını öne sürmektedirler.

Buna göre, Çizelge 5.5’te verilen nesne sayıları için  $n_c = 3$  kabul edilebileceği görülmektedir. Bu nedenle benzetimlerimizde eşik değeri olarak 3 kullanılmıştır.

Çizelge 5.5 Ağ bağlantılılık eşik değerleri

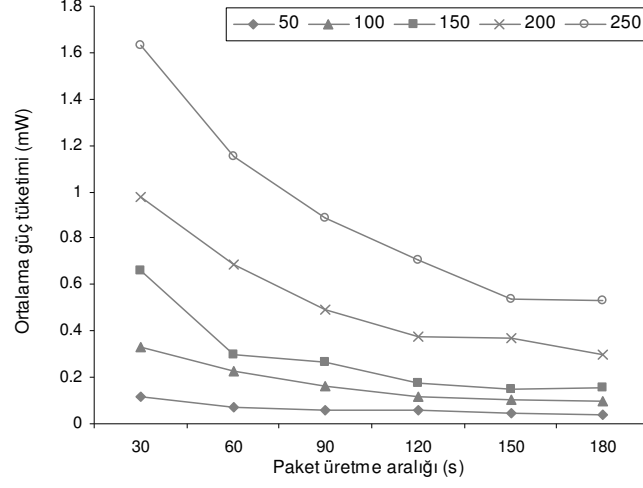
n	log n	1.5 log n
50	1.70	2.55
100	2.00	3.00
150	2.17	3.25
200	2.30	3.45
250	2.40	3.60

Testlerde, alıcı-verici özellikleri olarak Chipcon CC 2420’nin [3] Çizelge 5.1 ve 5.4’teki belirtileri kullanılmıştır. PCLS protokol parametrelerinin değerleri ise Bölüm 5.2’deki analitik yöntemle belirlenmiştir.

Bu şartlar altında PCLS protokolünün birim zamandaki ortalama enerji tüketimi için Şekil 5.10’da verilen sonuçlar elde edilmiştir.

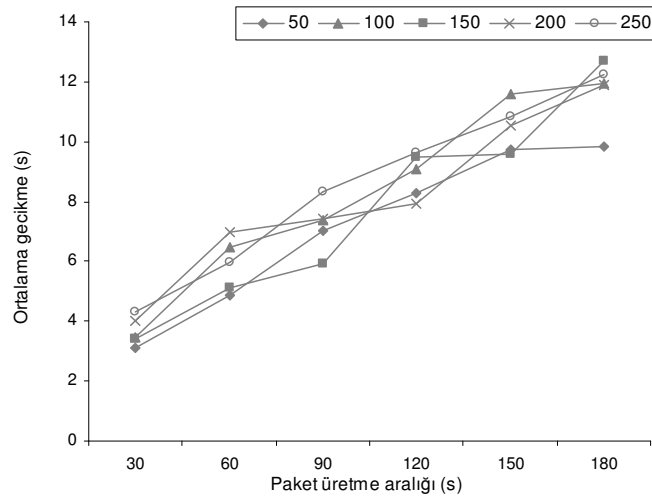
Buna göre PCLS protokolünde nesne yoğunluğu arttıkça ve paket üretme aralıkları kısaldıkça daha fazla enerji harcanmaktadır. Diğer taraftan trafik yoğunluğu azaldıkça birim zamanda daha az enerji harcanarak nesnelerin daha uzun ömürlü olmaları sağlanmaktadır. Nesne yoğunluğunun artması, kanaldaki birim zamanda gönderilen paket sayısını arttırarak dinleme için daha fazla enerji harcanmasına neden olur. Fakat PCLS protokolü, nesne yoğunluğu arttığında iletim gücünü ayarlayarak trafiğin gereksiz mesafelere yayılmasını önler. Bu sayede alıcıların sayısı azalmakta ve enerji tüketimindeki artış, gönderilen paket sayısındaki artıştan

daha az etkilenmektedir. PCLS protokolünde uygulanan iletim gücü kontrolünün, nesne yoğunluğu artırıldığındaki bu kazancı, PCLS protokolünün Bölüm 5.5'te diğer protokollerle karşılaştırılmasında daha açık şekilde görülmektedir.



Şekil 5.10 PCLS protokolünde ortalama enerji tüketimi (TSGS).

Enerji tüketimi testleriyle aynı şartlar altında elde edilen paket başına düşen ortalama gecikme miktarı değerleri Şekil 5.11'de verilmektedir. Buna göre PCLS protokolünde paket üretme aralıkları uzayıp trafik yoğunluğu azaldığında veri bağı katmanı gecikmesi artmaktadır. Çünkü paket üretme aralıkları arttığında dinleme aralığı uzatılmaktadır. Diğer taraftan, paket üretme aralıkları sıklaştığında verinin daha çabuk iletilmesi önem kazandığından, dinleme aralığının kısaldığı ve bu sayede gecikmenin azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.11 PCLS protokolünde ortalama gecikme (TSGS).

Nesne yoğunluğu arttığında ise çekişme arttığından PCLS protokolü dinleme aralığını kısaltmakta ve daha sık gönderme denemesine izin vermektedir. Nitekim Bölüm 5.2'deki analitik çalışmada, tekrar göndermeler dikkate alınmadığında, nesne yoğunluğu artışına karşın kısalan dinleme aralıkları nedeniyle gecikmenin azaldığı belirtilmektedir. Ancak kısaltılan dinleme aralıklarının gecikmeyi düşürmesi gerekirken, Şekil 5.11'de görüldüğü gibi gecikme çok fazla değişmemektedir. Gecikmede en fazla 2.8 saniyelik bir artış görülmektedir. PCLS protokolü dinleme aralıklarını kısaltarak çekişmeden kaynaklanan tekrar gönderme denemelerinin gecikmeye etkisini azaltmaktadır.

Testlerde kullanılan en yüksek nesne yoğunluğu ve en düşük trafik sıklığı değerleri, Taktik Sualtı Gözetleme Sistemine uygun sınır değerler olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle daha fazla nesne yoğunluğu ve paket üretim aralıkları test edilmemiştir.

### 5.5 PCLS Protokolünün Diğer MAC Protokolleriyle Karşılaştırılması

PCLS MAC protokolü, OMNet++ benzetim ortamında ve Bölüm 5.4'te verilen TSGS senaryosu kullanılarak, bir CSMA ve bir TDMA MAC protokolüyle karşılaştırılmıştır. Her iki protokolde de enerji tüketimini kısmak için uyku modu kullanılmaktadır. CSMA yöntem olarak LPL uygulayan ve öncül kullanan B-MAC protokolü, TDMA yöntem olarak da LMAC protokolü seçilmiştir.

PCLS protokolünü B-MAC ve LMAC protokolleriyle karşılaştırdığımız testlerde 100, 150 ve 200 SDD kullanılmış ve trafik yoğunluğu olarak 30, 60, 90, 120, 150 ve 180 saniyelik bildirim sıklıkları denenmiştir. Karşılaştırmalarda her bir protokolün veri bağı katmanı gecikmesi ile enerji tüketimi seviyesi incelenmiştir.

B-MAC protokolü için dinleme aralığı (LPL sıklığı), (Polastre vd., 2004) çalışmasında paket üretme aralığı 5 dakika sabit kabul edilerek değişik nesne yoğunlukları için verilmiştir. Diğer taraftan, paket üretme aralığı değiştiğinde dinleme aralığının da değişmesi gerektiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, (Polastre vd., 2004) çalışmasında verilen dinleme aralığı değerleri, karşılaştırma testlerimizde kullanılan paket üretme aralıkları ( $T_d$ ) ve nesne sayıları için uygun değildir. Bu nedenle B-MAC protokolü için karşılaştırma çalışmasında kullanılacak dinleme aralığı değerleri analitik yöntemle ayrıca belirlenmiştir.

PCLS protokol parametrelerinin incelenmesinde kullanılan analitik model, (Polastre vd., 2004) çalışmasında verilen LPL modele dayanmaktadır. Bu nedenle B-MAC protokolündeki dinleme aralıklarını belirlemek için aynı yöntemden yararlanılmıştır. Ancak B-MAC

protokolünde HELO mesajları olmadığından, PCLS protokolünün analizinde kullanılan Denklem (5.6)'da değişiklik yapmak gerekmektedir. Denklem (5.6)'dan, HELO mesajları için harcanan güç çıkarıldığında ve B-MAC protokolünde öncül süresinin bir dinleme aralığı kadar olduğu ( $t_p=t_s$ ) dikkate alındığında, B-MAC protokolünün birim zamandaki enerji tüketimi Denklem (5.30) ile ifade edilebilir.

$$P = (P_{tx} - P_{sleep}) \left[ \frac{1}{T_d} (t_s + t_d) \right] + n (P_{rx} - P_{sleep}) \left[ \frac{1}{T_d} (t_s / 2 + t_d) \right] + (P_{LPL} - P_{sleep}) \left[ \frac{t_{lpl}}{t_s} \right] + P_{sleep} \quad (5.30)$$

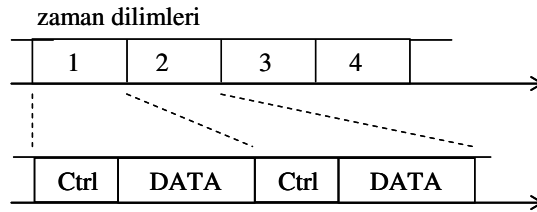
B-MAC protokolünde belirli sayıda nesne ve paket üretme aralığına karşılık en düşük enerji tüketimini sağlayan dinleme aralığı ( $t_s$ ) değeri, Denklem (5.31)'in çözümlenmesiyle bulunur.

$$\frac{\partial P}{\partial t_s} = \frac{P_{tx} - P_{sleep}}{T_d} + \frac{n (P_{rx} - P_{sleep})}{2 T_d} - \frac{t_{lpl} (P_{LPL} - P_{sleep})}{t_s^2} = 0 \quad (5.31)$$

Denklem (5.31)'in çözümü Denklem (5.32)'de verilmektedir. B-MAC protokolünün testlerinde Denklem (5.32) ile belirlenen dinleme aralığı değerleri kullanılmıştır.

$$t_s = \sqrt{\frac{2 T_d t_{lpl} (P_{LPL} - P_{sleep})}{2 (P_{tx} - P_{sleep}) + n (P_{rx} - P_{sleep})}} \quad (5.32)$$

Şekil 5.12'de görülen LMAC protokolünde ise bir zaman diliminin 12 byte'lık kontrol mesajı ile 64 byte'lık veri paketinin iletimi için yeterli uzunlukta olması gerekmektedir (Hoesel vd., 2004). Testlerde kullanılan CC 2420 radyosunun bit hızı 250 Kbps olduğundan, LMAC protokolünde bir zaman dilimi, toplam 76 byte'ın iletilmesi için 3 ms olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12 LMAC protokolünde zaman dilimlerinin yapısı.

TDMA tabanlı bir protokol olan LMAC protokolü, 2-sekme menzilineki komşu nesnelere bir TDMA çerçevesi içinde birbiriyle çakışmayan zaman dilimlerine sahip olmasını gerektirmektedir. Zaman dilimlerinin komşular arasında paylaşılması ise özerk ve rasgele yapılan bir işittir. Ancak bizim uygulamamızda; (Langendoen vd., 2005), MacSimulator-0.1.1



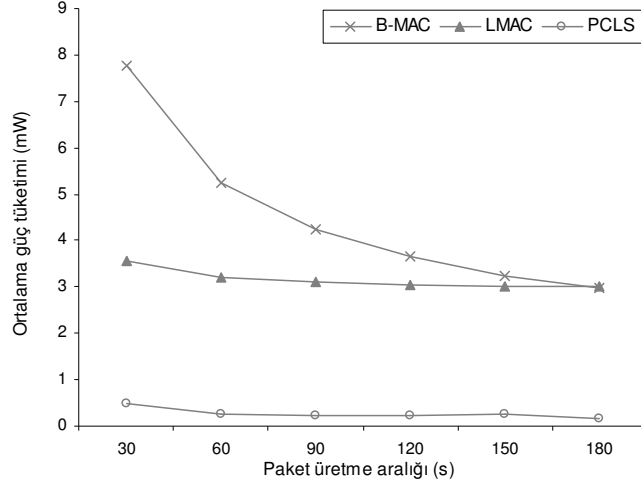
[6] ve EyeSim3 çalışmalarında da olduğu gibi, bir TDMA çerçevesi içindeki zaman dilimleri 2-sekme menzilineki komşu nesnelere başlangıçta rasgele dağıtılmış ve benzetim süresince değişmediği kabul edilmiştir. Bu nedenle testlerde kullanılan LMAC protokolü, orjinaline göre protokol yükü azaltılmış daha basit bir sürümdür. Basitleştirilmiş LMAC protokolünün bu avantajı, test sonuçları değerlendirilirken dikkate alınmaktadır.

PCLS protokolünde, nesne yoğunluğu ve trafik sıklığına uygun olarak belirlenen düşük protokol yükü sayesinde enerji tüketimi azaltılabilmektedir. PCLS protokolünün protokol yükü Bölüm 5.4'teki testlerde % 0.3 ile % 5 arasındadır. Oysa ki PCLS gibi LPL tabanlı olan ve öncül sinyali kullanan B-MAC protokolünde protokol yükü % 100 seviyesindedir. Bu nedenle B-MAC protokolü, enerji tüketimini azaltabilmek için, düşük trafik yoğunluğunda bile dinleme aralıklarını çok kısaltmak zorundadır. Dolayısıyla PCLS ve B-MAC protokolleri aynı nesne yoğunluğu ve paket üretme aralığına karşın farklı dinleme aralıkları kullanmaktadırlar. LPL tabanlı bu iki protokolü eşit şartlarda karşılaştırmak için dinleme aralığı değerleri aynı yapılmıştır. Ancak PCLS protokolünün değerlerini B-MAC'te kullanmak, B-MAC'in dinleme aralıklarını daha da uzatarak enerji tüketimini arttıracığından, bunun yerine B-MAC'in dinleme aralığı değerleri PCLS protokolünde kullanılmıştır. PCLS protokolünün diğer parametreleri değiştirilmemiştir. Böylece PCLS'te protokol yükü en fazla % 41 olmuştur. LMAC protokolünde ise 3 ms'lik zaman dilimlerini uzatarak B-MAC'teki dinleme aralıklarıyla aynı yapmak LMAC protokolünde gecikmeyi çok arttıracığı için LMAC'in zaman dilimleri değiştirilmemiştir.

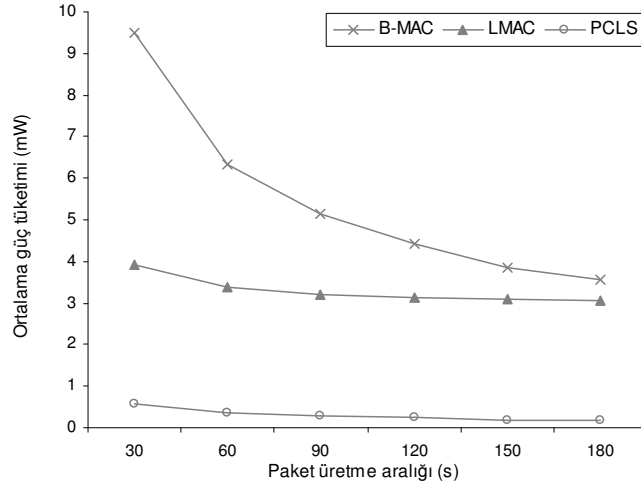
### 5.5.1 Enerji tüketimi testlerinin sonuçları

PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinin birlikte değerlendirildiği 100, 150 ve 200 SDD kullanılarak yapılan testlerde elde edilen ortalama enerji tüketimi değerleri sırasıyla Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15'te verilmektedir.

En yüksek enerji tüketimi B-MAC protokolünde görülmektedir. Hatta nesne sayısı arttıkça diğer protokollerle arasındaki fark daha da açılmaktadır. Çünkü göndermelerden önce yayınlanan uzun öncül sinyalleri, hem gönderen hem de alanlar tarafında enerji tüketimini arttırmaktadır. Ayrıca, nesne yoğunluğu artıp nesnelere arası mesafeler daralmasına rağmen iletim gücü kısılmayıp en yüksek güçle gönderme yapıldığı için gönderilen paketlerin ulaştığı nesne sayısı artmakta ve bu alıcıların *gereksiz alışları* da enerji tüketimini arttırmaktadır.



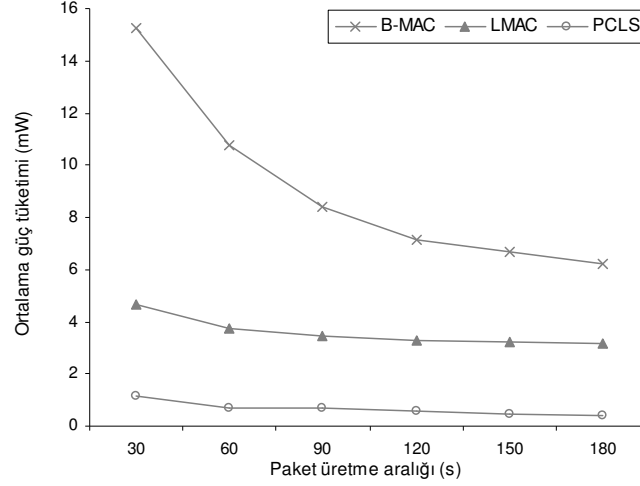
Şekil 5.13 PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama enerji tüketimi (100 SDD).



Şekil 5.14 PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama enerji tüketimi (150 SDD).

LMAC protokolünde enerji tüketiminin belli bir seviyeden başladığı görülmektedir. Bunun nedeni, bir nesnenin göndereceği veri paketi olmasa bile kendine ait her bir zaman diliminde en azından 12 byte'lık bir kontrol mesajı göndermek zorunda olmasıdır.

Diğer taraftan LMAC protokolünü gerçeklerken yaptığımız basitleştirme de dikkate alındığında LMAC protokolünün enerji tüketimi daha da artacaktır. Bu artışın nedeni, 2-sekme menzilineki komşu nesnelerin zaman dilimlerinin başlangıçta dinamik belirlenmesinin ve daha sonra gezginlikten kaynaklanan yer değişimleri nedeniyle sık sık yenilenmesinin getireceği ilave protokol yüküdür. Gezginlikten kaynaklanan yer değişimleri, PCLS ve B-MAC protokollerini etkilemez. Çünkü bu protokollerde, komşuların tanınmasına ve komşuların dinleme çizelgelerinin bilinmesine ihtiyaç yoktur.



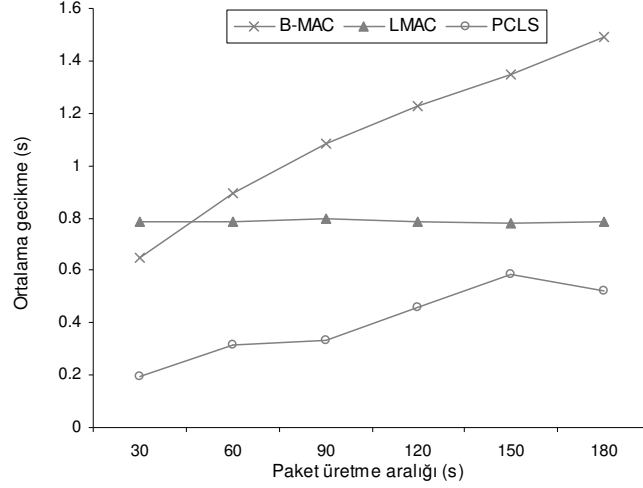
Şekil 5.15 PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama enerji tüketimi (200 SDD).

Enerji tüketimi açısından en iyi değerlerin PCLS protokolünde olduğu görülmektedir. Birim zamanda harcanan enerji miktarı B-MAC protokolünde 14-18 kat, LMAC protokolünde ise 6-12 kat daha fazladır. PCLS protokolünde dinleme aralığına göre öncül süresinin kısa olması enerji tüketimi açısından avantaj sağlamaktadır. B-MAC protokolünün dinleme aralığı değerleri kullanıldığında bile PCLS'teki protokol yükü % 12 ile % 41 arasında kalmıştır. Ayrıca PCLS protokolünde uygulanan iletim gücü kontrolü sayesinde, nesne yoğunluğu artıp nesnelere arası mesafeler daraldığında verici gücü kısılarak hem gönderen hem de alanlar tarafında enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Diğer taraftan, iletim gücü kontrolü için kullanılan HELO mesajlarının getirdiği ilave yük, LMAC protokolündeki kontrol mesajlarından kaynaklanan protokol yükünden daha azdır. Çünkü LMAC protokolündeki kontrol mesajları her bir zaman diliminde yayınlanırken, PCLS protokolünün testlerinde en az 583, en fazla 1332 dinleme aralığında bir HELO mesajı gönderilmektedir.

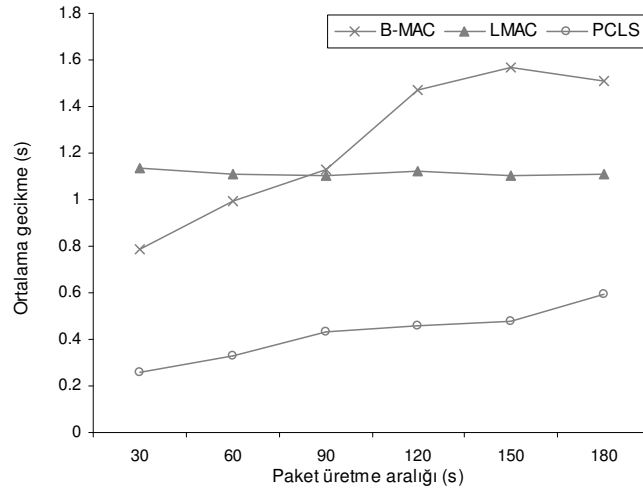
### 5.5.2 Gecikme testlerinin sonuçları

Periyodik dinleme-uyuma mekanizması bir yandan enerji tasarrufu sağlarken diğer yandan gecikmeye neden olur. Bu nedenle uygulamanın ihtiyaçlarına bağlı olarak enerji tüketimi ve gecikme ölçütleri arasında bir dengenin kurulması gereklidir.

PCLS protokolünün veri bağı katmanı gecikmesini B-MAC ve LMAC protokolleriyle karşılaştırdığımız testlerde, enerji tüketimi testlerine benzer olarak 100, 150 ve 200 SDD kullanılmış ve trafik yoğunluğu olarak 30-180 saniyelik bildirim sıklıkları denenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 5.16, 5.17 ve 5.18'de görülmektedir.



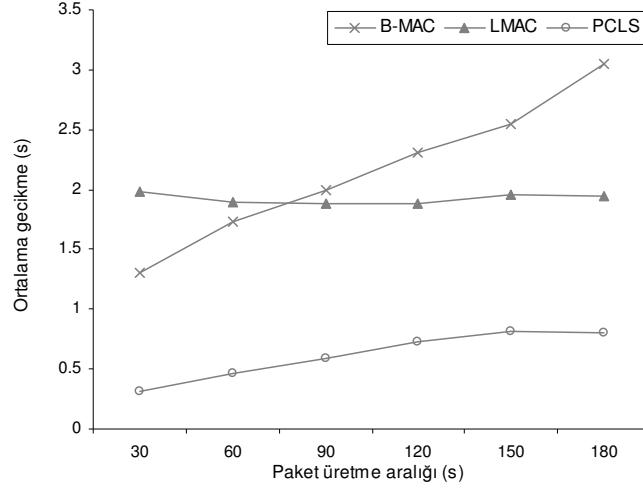
Şekil 5.16 PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama gecikme (100 SDD).



Şekil 5.17 PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama gecikme (150 SDD).

Gecikme seviyeleri, PCLS protokolüyle karşılaştırıldığında, B-MAC protokolünde 2.5-3 kat, LMAC protokolünde ise 2-5 kat daha fazladır. Paket üretme aralığı sıklaştıkça PCLS ve B-MAC protokollerindeki gecikme azalmaktadır. Çünkü trafik yoğunlaştıkça verinin daha çabuk iletilmesi önem kazandığından her iki protokolde de paket üretme aralığı kısaldığında dinleme aralığı daraltılarak gecikme seviyesi düşürülmektedir. LMAC protokolünün çekişmesiz zaman dilimleri, testlerde kullanılan paket aralıklarında gecikmeyi arttırmayıp sabit tutmaktadır. Enerji tüketimi yönünden değerlendirildiğinde B-MAC protokolünden daha iyi olan LMAC protokolü, kısa paket üretme aralıklarında B-MAC'ten daha yüksek gecikme seviyesi göstermektedir. Diğer taraftan, gezginlikten kaynaklanan ilinge değişimleri nedeniyle 2-sekme menzilineki komşu nesnelere zaman dilimlerinin yeniden tahsisi için harcanacak

süreler ve bu esnada oluşacak çarpışmalar LMAC protokolünde gecikmeyi daha da arttıracaktır.



Şekil 5.18 PCLS, B-MAC ve LMAC protokollerinde ortalama gecikme (200 SDD).

Nesne yoğunluğunun artması B-MAC ve LMAC protokollerinde gecikmeyi arttırmaktadır. CSMA tabanlı B-MAC protokolünde artan çekişme ve uzun öncül sinyalleri gecikmeyi daha fazla etkilemektedir. LMAC protokolünde ise nesne yoğunluğu arttığında 2-sekme menzilineki komşu nesnelere için birbiriyle çakışmayan daha fazla zaman dilimi tahsis edilmesi gerekmekte ve böylece bir zaman çerçevesi daha da uzayarak gecikmeyi arttırmaktadır. PCLS protokolünde gecikmenin nesne sayısından fazla etkilenmediği görülmektedir. Kısaltılan dinleme aralıkları yanında iletim gücünün kontrol edilmesi ve kısa öncül sinyali kullanılması çekişmeyi azaltarak gecikme seviyesini düşürmektedir. Bu sayede PCLS protokolü enerji tüketimi ve gecikme arasında daha dengeli bir çalışma şekli sağlamaktadır.

## 6. SONUÇLAR

Yardımlaşan nesne ağları için PCLS MAC protokolü geliştirme çalışmasında elde edilen sonuçlar üç kısımda incelenmektedir. İlk olarak PCLS protokolünün diğer MAC protokollerinden farkları ve bu sayede elde edilen kazanımlar ele alınmaktadır. Daha sonra, PCLS protokolünün enerji tüketimi ve gecikme ölçütleri açısından diğer protokollerle karşılaştırma sonuçları üzerinde durulmaktadır. Son olarak da benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar aktarılmaktadır.

PCLS MAC protokolü, yardımlaşan nesne ağlarındaki tasarsız, gözetimsiz ve gezgin çalışma ihtiyaçları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Diğer MAC protokollerinde uygulanan LPL ve öncül sinyali kullanımı, periyodik dinleme-uyuma, çizelge yenileme gibi yöntemler PCLS protokolünde de uygulanmaktadır. Fakat, nesnelerin dinleme-uyuma çizelgeleri birbirinden bağımsız olduğunda komşuların çizelgelerini takip etmek gerekmektedir. Özellikle gezgin uygulamalarda ve saat kayıklıkları nedeniyle komşuların dinleme zamanlarını takip etme zorluğu protokol yükünü arttırmaktadır. Komşu kimlikleri ve çizelgelerinden bağımsız çalışabilmek için sık dinleme yapıp uzun öncül sinyali kullanıldığında ise enerji tüketimi artmaktadır. Bu nedenlerle PCLS protokolünde gevşek eşzamanlı dinleme uygulanmaktadır. Bu sayede komşu kimlikleri ve çizelgelerinden bağımsız çalışarak protokol yükünün azaldığı ve daha kısa öncül sinyali kullanılarak enerji tüketiminin düştüğü görülmüştür.

Yardımlaşan nesne ağları gibi nesne yoğunluğunun yüksek olduğu ağlarda gereğinden fazla iletim gücü kullanılması hem gönderen tarafında hem de alanlar tarafında enerji tüketimini arttırdığı gibi uzak mesafelerdeki nesnelere arasında gereksiz çekişme yaratarak gecikmeyi de artırır. Bu nedenle PCLS protokolünde gevşek eşzamanlı dinleme yanında iletim gücü kontrolü de uygulanmaktadır. Diğer MAC protokolleriyle karşılaştırıldığında, nesne yoğunluğundaki artışın, PCLS protokolündeki veri bağı katmanını gecikmesini ve enerji tüketimini daha az etkilediği görülmüştür. İletim gücünün belirlenmesinde, her paket için RTS/CTS paketleri kullanmak yerine periyodik HELO mesajlarından yararlanıldığı için kontrol paketlerinden kaynaklanan protokol yükü azaltılmıştır. PCLS protokolünün HELO mesajlarına dayalı güç kontrol yöntemi, komşu kimliklerine bağlı olmadığından, gezginlik nedeniyle komşuların değişmesinden etkilenmez. Fakat gezginlik, ağdaki bağlantılılığı etkilediğinden, belirlenen iletim gücü periyodik olarak yenilenmektedir.

PCLS protokol parametreleri arasındaki ilişki ve performans ölçütleri üzerine etkileri analitik yöntemle de incelenmiştir. LPL uygulanan ve öncül kullanılan MAC protokollerinde protokol

yükü olarak tanımladığımız öncül süresinin dinleme aralığına oranı, enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Değişen nesne yoğunluğu ve trafik sıklığına karşı protokol yükündeki değişimin, enerji tüketimindeki değişimi de belirlediği görülmüştür. Gecikmedeki değişim ise en fazla dinleme aralığı parametresinden ve tekrar göndermelerden etkilenmektedir. Nesne sayısı ve trafik arttığında tekrar göndermeler artacağından, gecikmedeki artışı hızlandırmamak için dinleme aralığı kısaltılmalıdır. Bu nedenle PCLS protokolünde dinleme aralığı, nesne sayısı ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak tespit edilmiştir.

PCLS protokolünü CSMA ve LPL tabanlı B-MAC protokolüyle ve TDMA tabanlı LMAC protokolüyle benzetim yoluyla karşılaştırdığımızda, PCLS protokolünün birim zamandaki enerji tüketiminin B-MAC protokolünden 14-18 kat, L-MAC protokolünden ise 6-12 kat daha az olduğu görülmüştür. B-MAC protokolünde enerji tüketimi en yüksek seviyededir, çünkü nesnelerin dinleme-uyuma çizelgeleri birbirinden bağımsızdır ve uzun öncül sinyali kullanılmaktadır. Ayrıca B-MAC protokolünde nesne yoğunluğu arttığında iletim gücünün kısılmaması da enerji tüketimini arttırmaktadır. LMAC protokolündeki kontrol mesajlarının, PCLS protokolündeki HELO mesajlarından daha fazla protokol yükü yarattığı görülmüştür. Çünkü LMAC protokolünde trafik sıklığı azalmasına rağmen, herbir zaman diliminde gönderilen kontrol mesajları nedeniyle, enerji tüketimi azalmamaktadır. Her üç protokol veri bağı katmanı gecikmesi açısından değerlendirildiğinde en düşük gecikme seviyesi PCLS protokolünde elde edilmiştir. PCLS protokolünde gecikme, B-MAC protokolüne göre 2.5-3 kat, LMAC protokolüne göre ise 2-5 kat daha azdır. Diğer MAC protokollerinde nesne yoğunluğu arttığında gecikme artarken PCLS protokolünde gecikme, nesne yoğunluğundan fazla etkilenmemektedir. Çünkü nesne yoğunluğu arttığında PCLS protokolünde dinleme aralıklarını kısaltmanın yanı sıra iletim gücü kontrolü uygulanması ve kısa öncül sinyali kullanılması çekişmeyi azaltarak gecikmenin hızlı artışını önlemektedir. Diğer yandan, trafik yoğunlaştıkça verinin daha çabuk iletilmesi önem kazandığından, PCLS protokolü dinleme aralığını daraltarak gecikme seviyesini düşürmektedir.

PCLS protokolünün benzetim çalışmalarında gezgin sualtı gözetleme sistemlerinin askeri bir uygulaması olan TSGS senaryosu esas alınmıştır. TSGS senaryosunda belli bir amacı gerçekleştirmek üzere biraraya gelen nesnelerin hareketini ifade edebilecek gezginlik modelinin RPGM modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü nesnelerin, hem suüstünde grup halindeki sürüklenme hareketinin hem de denizdeki dalga ve çarpıntı etkisiyle grup içinde rassal hareketlerinin benzetimi RPGM modeliyle yapılabilmektedir. Fakat yapılan incelemede, MAC protokollerinin benzetiminde RPGM modelini kullanan bir çalışmaya veya

araca rastlanmamıştır. Ancak, OMNet++ benzetim aracı üzerindeki Mobility Framework'ün, hareketli nesnelere arasındaki bağlantıları kısa zamanda güncelleyen bir altyapı sunduğu belirlenmiştir. Bu nedenle PCLS protokolünün testlerinde benzetim aracı olarak OMNet++ kullanılmasına ve RPGM modelinin de OMNet++ üzerindeki Mobility Framework kullanılarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Nitekim Mobility Framework kullanıldığında, ağdaki nesne sayısı arttırıldığında bile benzetimlerin beklenen sürede tamamlandığı görülmüştür.

## 6.1 Öneriler

PCLS protokolü ve TSGS üzerinde bundan sonra yapılacak çalışmalarda faydalı olacağı değerlendirilen öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Deniz ortamında suüstüne yakın ve kısa mesafe iletişim şartları, farklı zamanlarda ve iklim koşullarında incelenerek PCLS protokolünün çalışmasına etkileri araştırılabilir.
- TSGS sistemindeki nesnelere deniz üstündeki gözetimsiz hareketleri incelenebilir ve gerçek hareketlerin izleri elde edilerek PCLS protokolünün testlerinde bu veriler kullanılabilir.
- Gelecekte üretilecek alıcı-verici donanımlarının çalışma frekansı, bit hızı, saat sapma oranı ve diğer yeni özellikleri dikkate alınarak PCLS protokolüne etkileri ve yapılabilecek iyileştirmeler üzerinde çalışılabilir.



## KAYNAKLAR

- Abramson, N. (1970), "The ALOHA system - Another alternative for computer communications", in AFIPS Conference Proceedings, 1970.
- Agarwal, S., Krishnamurthy, S., Katz, R. H. ve Dao, S. K. (2001), "Distributed Power Control in Ad-hoc Wireless Networks", PIMRC, 2001.
- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. ve Çayırıcı, E. (2002), "Wireless sensor networks: A survey", *Computer Networks* 38 (4) (2002) 393–422.
- Ali, M., Suleman, T. ve Uzmi Z. (2005), "MMAC: A Mobility-Adaptive, Collision-Free MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", 24th IEEE Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC'05), 2005.
- Bao, L. ve Garcia-Luna-Aceves, J.J. (2001), "A new approach to channel access scheduling for ad hoc networks", in the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 210-221, 2001.
- Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S. ve Zhang, L. (1994), "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs", *Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, pp. 212–225, August 1994.
- Braynard, R. , Ravi, S. ve Ellis, C. (2005), "Exploring the Design of an Asynchronous and Asymmetric MAC Protocol", 3rd Int. Workshop on Measurement, Modeling and Performance Analys of Wireless Sensor Networks (SenMetrics), 2005.
- Camp, T., Boleng, J. ve Davies, V. (2002), "A Survey of Mobility Models for Ad hoc Network Research", *Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad hoc Networking: Research, Trends and Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
- Çayırıcı, E., Tezcan, H., Doğan, Y. ve Coşkun, V. (2006), "Wireless Sensor Networks For Underwater Surveillance Systems", *Ad Hoc Networks Journal (Elsevier)*, vol. 4, issue 4, pp. 431-446, July 2006.
- Dam, T.van ve Langendoen, K. (2003), "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *ACM SenSys*, November 2003.
- Demirkol, İ., Ersoy, C. ve Alagöz, F. (2006), "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 4, April 2006.
- Dulman, S., Hoesel, L.van, Nieberg, T. ve Havinga, P. (2003), "Collaborative Communication Protocols for Wireless Sensor Networks", *IEEE ISADS, Italy*, April 2003.
- El-Hoiydi, A. (2002), "Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad-hoc Wireless Sensor Networks", *International Communications Conference (ICC)*, April 2002.
- El-Hoiydi, A., Decotignie, J. ve Hernandez, J. (2004), "Low Power MAC Protocols for Infrastructure Wireless Sensor Networks", *5th European Wireless Conference*, February 2004.
- Gomez, J., Campbell, A.T., Naghshineh, M. ve Bisdikian, C. (2001), "Conserving Transmission Power in Wireless Ad Hoc Networks", *IEEE Conference on Network Protocols (ICNP)*, November 2001.

- Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. ve Balakrishnan, H. (2000), “Energy-efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks”, in Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences, January 2000.
- Hill, J. ve Culler, D. (2002), “Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks”, IEEE Micro, vol 22(6), pp 12-24, Nov/Dec 2002.
- Hoesel, L. van ve Havinga, P. (2004), “A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks”, in the poster session of the 1st International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2004), Japan, June 2004.
- Holland, G., Vaidya, N. ve Bahl. P. (2001), “A rate-adaptive MAC Protocol for Multi-hop Wireless Networks”, ACM MobiCom, 2001.
- IEEE Standard 802.11-1999 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification.
- IEEE Standard 802.15.4-2003 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
- Jamieson, K., Balakrishnan, H. ve Tay, Y.C. (2003), “Sift: A MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks”, Technical report, MIT, May 2003.
- Jung, E.S. ve Vaidya, N.H. (2002), “A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks”, ACM MobiCom, September 2002.
- Jurdak, R., Lopes, C.V. ve Baldi, P. (2004), “A survey, Classification, and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc Networks”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 1, pp. 2-16, 2004.
- Kannan, R., Kalidindi, R., Iyengar, S.S. ve Kumar, V. (2003), “Energy and Rate Based Mac Protocol for Wireless Sensor Networks”, SIGMOD Record, 32(4), December 2003.
- Karn, P. (1990), “MACA - a new channel access method for packet radio”, in 9th ARRL Computing Networking Conference, pp. 134–140, September 1990.
- Kleinrock, L. ve Tobagi, F. A. (1975a), “Random Access Techniques for Data Transmission Over Packet-Switched Radio Channels”, Nat. Computer Conference, AFIPS Press, pp. 187-201, 1975.
- Kleinrock, L. ve Tobagi, F. A. (1975b), “Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics”, IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-23, No. 12, December 1975.
- Kumar, S., Raghavan, V.S. ve Deng, J. (2006), “Medium Access Control Protocols for Ad-Hoc Wireless Networks: A Survey”, Elsevier Ad-Hoc Networks Journal, Vol. 4(3), pp. 326-358, May 2006.
- Langendoen, K. ve Halkes, G. (2005), “Energy-Efficient Medium Access Control”, Book chapter in the Embedded Systems Handbook, R. Zurawski (editor), CRC press, August 2005.
- Li, Y., Ye, W. ve Heidemann, J. (2005), “Energy and Latency Control in Low Duty Cycle MAC Protocols”, IEEE WCNC, March 2005.
- Lin, X., Kwok, Y. ve Lau, V.K.N. (2003), “Power Control for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks: Issues and a New Algorithm”, International Conference on Parallel Processing

(ICPP), 2003.

Lu, G., Krishnamachari, B. ve Raghavendra, C. (2004), "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Sensor Networks", Int. Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN), 2004.

Monks, J., Bharghavan, V. ve Hwu, W. (2001), "A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks", IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), April 2001.

Nar, P.Ç. ve Çayırıcı, E. (2005), "PCSMAC: A Power Controlled Sensor-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks, January 2005.

Polastre, J., Hill, J. ve Culler, D. (2004), "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", ACM SenSys, November, 2004.

Rajendran, V., Obraczka, K. ve Garcia-Luna-Aceves, J.J. (2003), "Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", ACM SenSys, Los Angeles, CA, November, pp. 181-192, 2003.

Rhee, I., Warrier, A., Aia, M. ve Min, J. (2005), "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", Third ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), November, 2005.

Ringwald, M. ve Roemer, K. (2005), "BitMAC: A Deterministic, Collision-Free, and Robust MAC Protocol for Sensor Networks", IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN) , 2005.

Roberts, L. G. (1972), "ALOHA Packet System With and Without Slots and Capture", ARPA Satellite System Note 8, 1972 and ACM SIGCOMM, Computer Communication Review, vol. 5, no. 2, 1975.

Rom, R. ve Sidi, M. (1990), "Multiple Access Protocols – Performance and Analysis", Springer-Verlag, 1990.

Rozovsky, R. ve Kumar, P.R. (2001), "Seedex: A MAC Protocol for Ad Hoc Networks", 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2001.

Sadeghi, B., Kanodia, V., Sabharwal, A. ve Knightly, E. (2002), "Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks", ACM MobiCom, 2002.

Shepard, T.J. (1996), "A channel access scheme for large dense packet radio networks", in Proceedings of ACM SIGCOMM, 1996.

Singh, S. ve Raghavendra, C.S. (1998), "PAMAS - Power Aware Multi-Access Protocol with Signalling for Ad Hoc Networks", ACM Computer Communications Review, July 1998.

Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V. ve Pottie, G.J. (2000), "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network", IEEE Personal Communications, October 2000.

Varga, A. (2002), "OMNet++", In Software Tools for Networking, IEEE Network Interactive, vol.16, no.4, July 2002.

Woo, A. ve Culler, D. (2001), "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks," ACM MobiCom, 2001.

Xue, F. ve Kumar, P. R. (2004), "The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks", *Wireless Networks*, Vol 10, No. 2, pp.169-181, 2004.

Ye, W., Heidemann, J. ve Estrin, D. (2002), "An Energy-efficient Mac Protocol for Wireless Sensor Networks", *IEEE Infocom*, June 2002.

Ye, W., Heidemann, J. ve Estrin, D. (2004), "Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004.

Ye, W., Silva, F. ve Heidemann, J. (2006), "Ultra-Low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling", *ACM SenSys*, November 2006.

Zhai, H., Wang, J., Chen, X. ve Fang, Y. (2006), "Medium Access Control in Mobile Ad Hoc Networks: Challenges and Solutions", (invited paper) *Wireless Communications and Mobile Computing* (Special issue on Ad Hoc Networks), vol. 6, issue 2, pp. 151-170, March 2006.

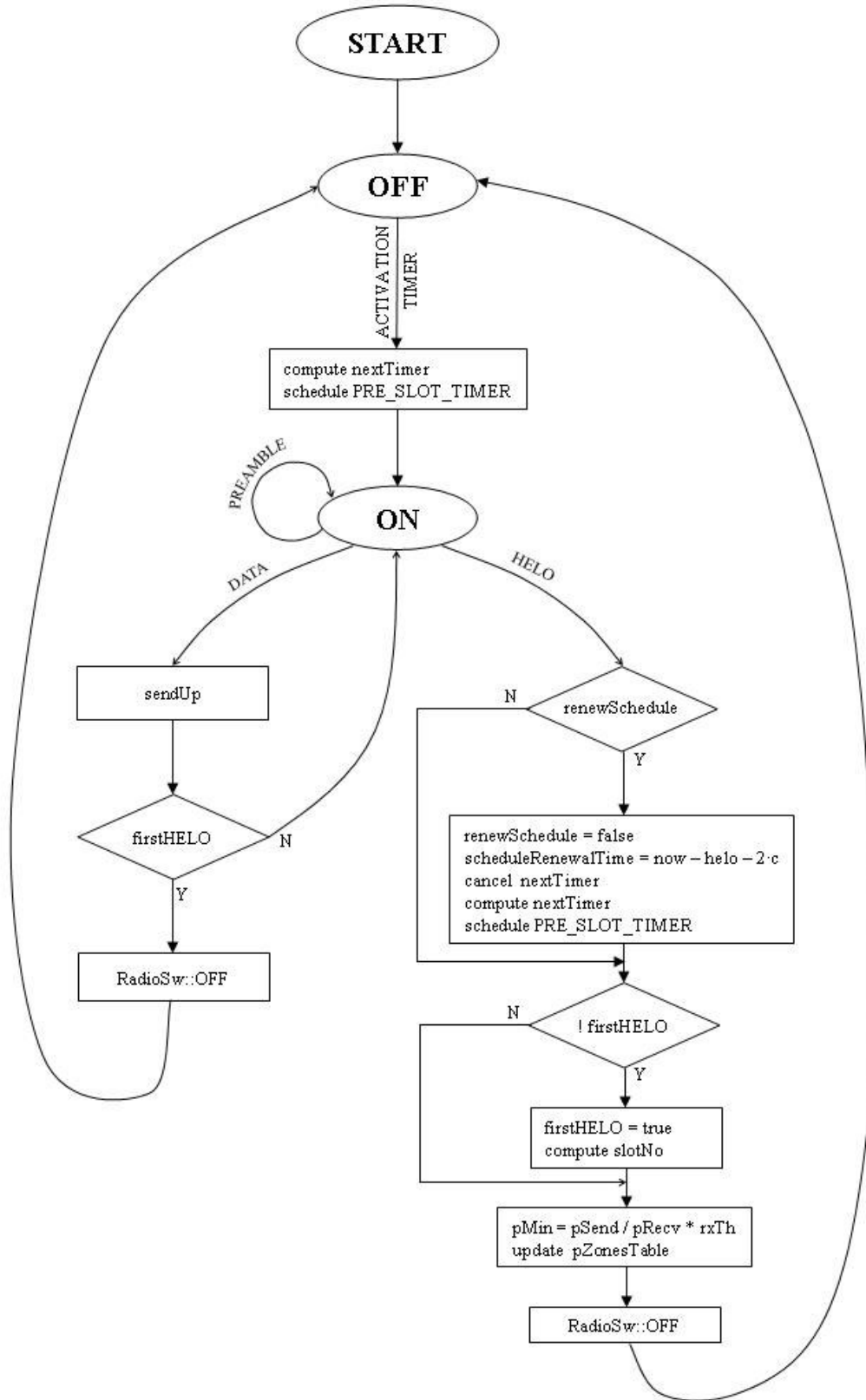
## **INTERNET KAYNAKLARI**

- [1] Embedded WiSeNts: Cooperating Embedded Systems for Exploration and Control Featuring Wireless Sensor Networks, Project FP6-004400, <http://www.embedded-wisents.org>
- [2] OMNet++ Community Site, <http://www.omnetpp.org>
- [3] Chipcon CC2420 Data Sheet, <http://www.chipcon.com>
- [4] Network Simulator (ns-2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [5] Mobility Framework (MF), <http://mobility-fw.sourceforge.net>
- [6] Consensus MacSimulator, <http://www.consensus.tudelft.nl/software.html>
- [7] EYES WSN Simulation Framework, <http://wwwes.cs.utwente.nl/ewnsim/>
- [8] Ad-hoc Network Simulator (adHocSim), <http://www.cs.unibo.it/~concer/adHocSim.html>
- [9] Sensor Simulator (SenSim), [http://csc.lsu.edu/sensor\\_web/sensim.html](http://csc.lsu.edu/sensor_web/sensim.html)

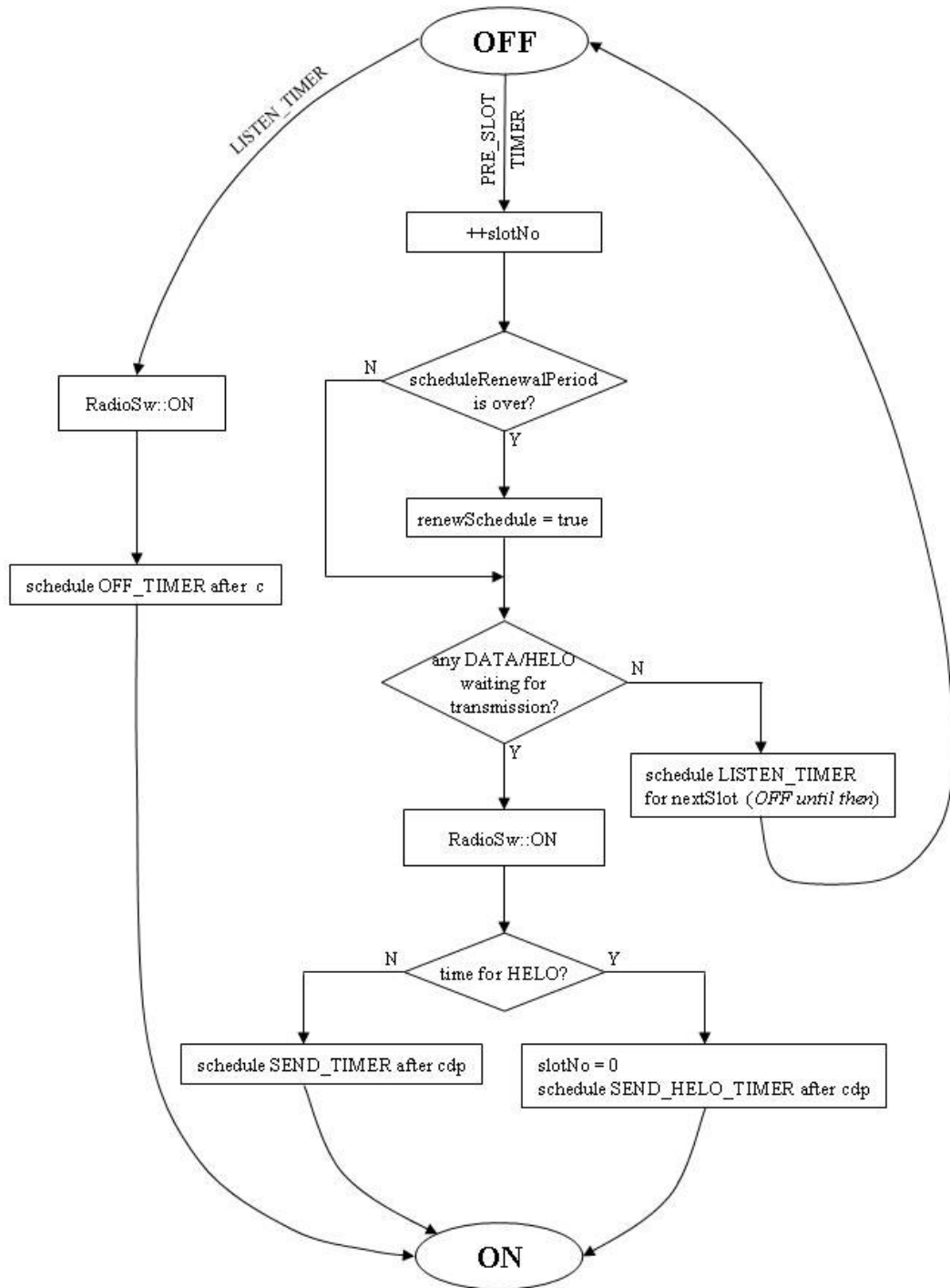
**EKLER**

- Ek 1 PCLS MAC protokolü durum ve akış çizenekleri
- Ek 2 OMNet++ ve Mobility Framework (MF) benzetim sistemi
- Ek 3 RPGM (Reference Point Group Mobility) gezginlik modeli

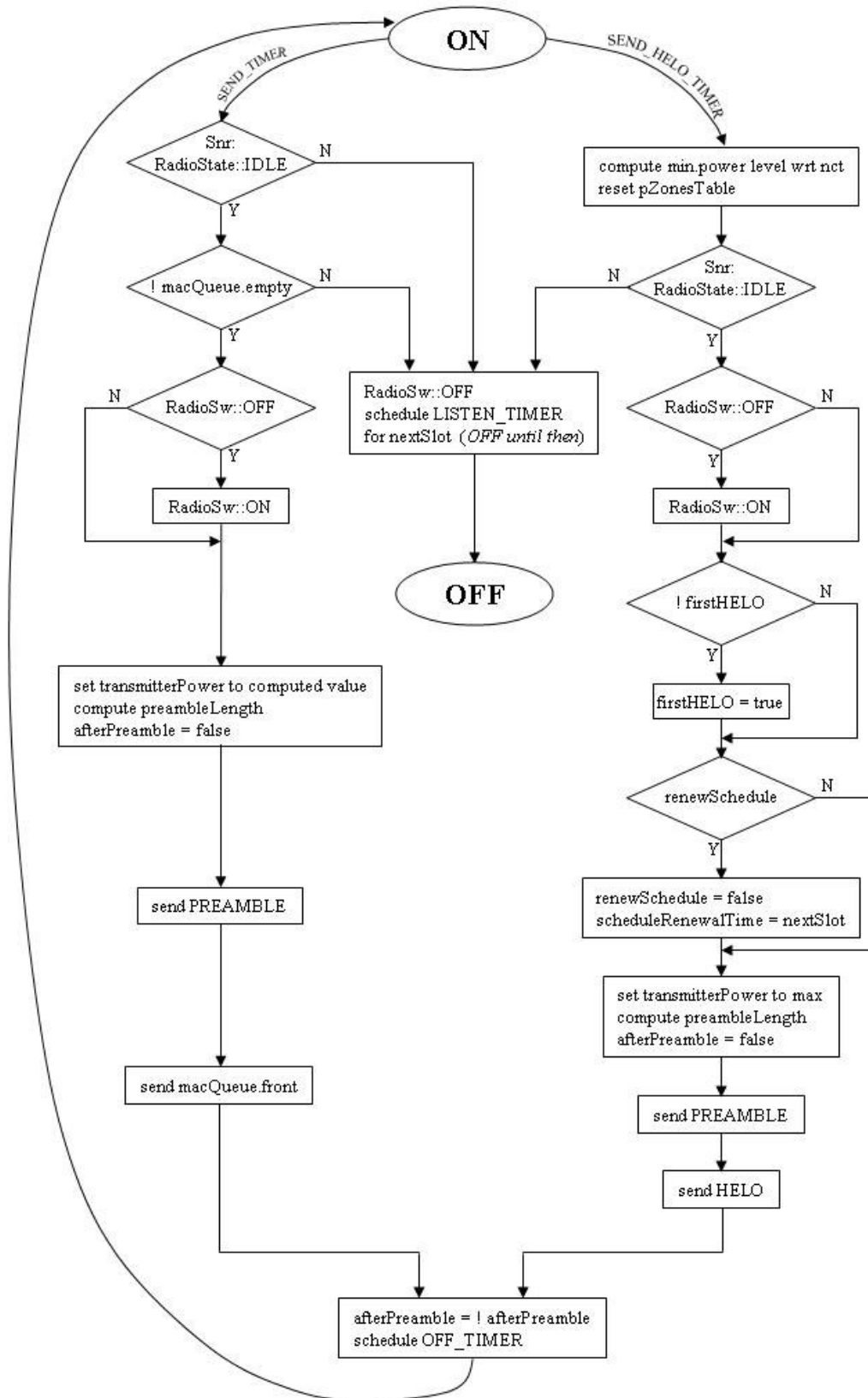
## Ek 1 PCLS MAC protokolü durum ve akış çizenekleri



Şekil Ek 1.1 Başlangıç konumu.

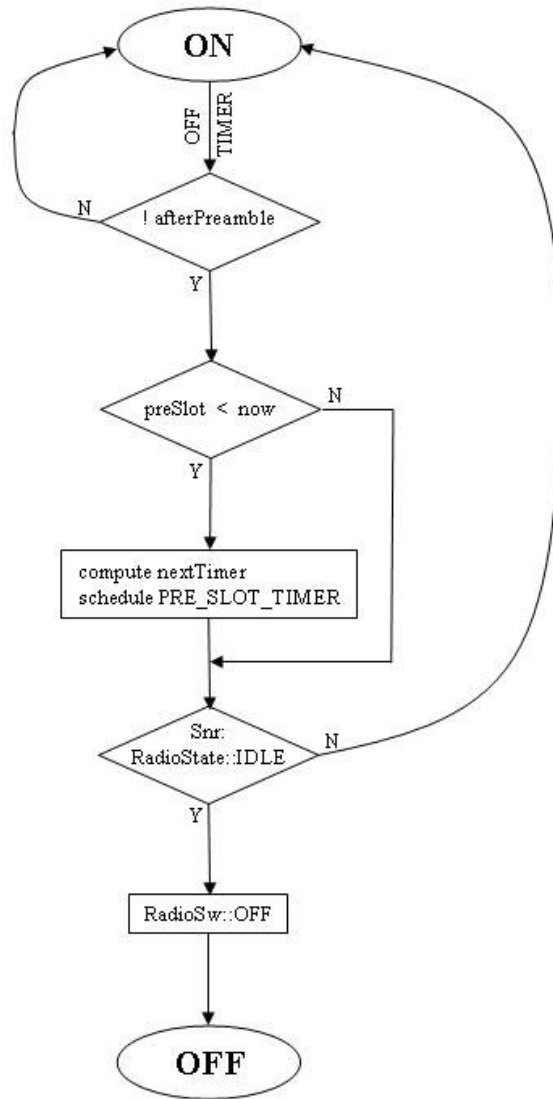


Şekil Ek 1.2 Kapalı konumda durum değişikliği.



Şekil Ek 1.3 Açık konumda durum değişikliği.





Şekil Ek 1.4 Açık konumda durum değişikliği (devamı).

## Ek 2 OMNet++ ve Mobility Framework benzetim sistemi

PCLS MAC protokolünün benzetim yoluyla gerçekleştirilmesi için ns-2 [4] ve OMNet++ [2] yazılımları incelenmiştir. Ns-2 üzerinde MAC çalışmaları daha fazla olmakla birlikte, geliştirme için Tcl kullanımı gerektirmesi, buna karşın OMNet++'ta C++ ile geliştirme yapılabilmesi ve OMNet++'ın daha etkin bir desteğe sahip olması nedenleriyle OMNet++ 3.1 tercih edilmiştir.

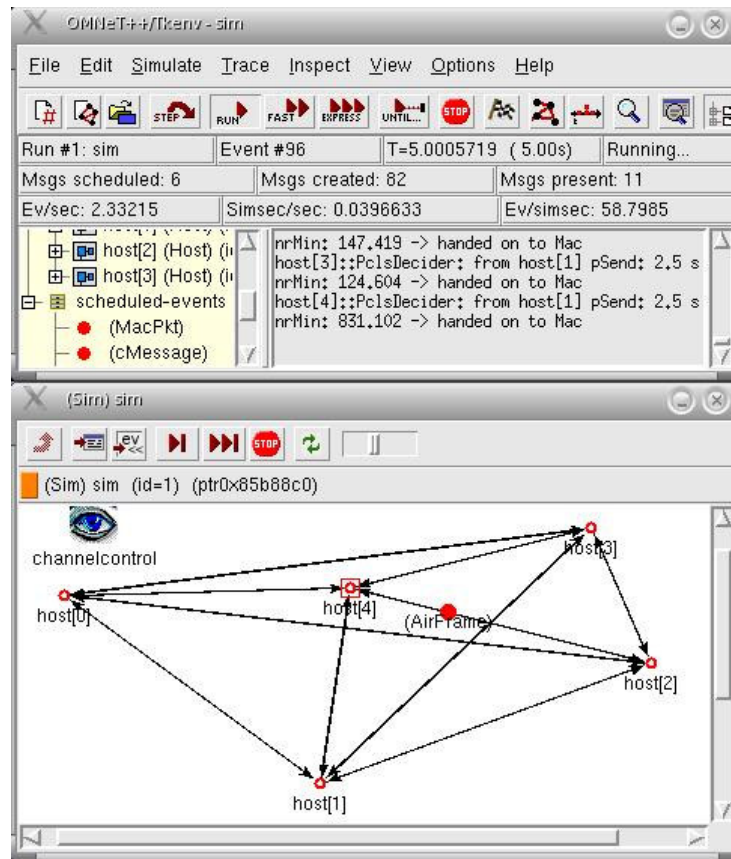
OMNet++ üzerinde yapılmış diğer MAC protokolü çalışmalarında nesnelerin gezginliği dikkate alınmamaktadır. Oysa ki YNA'larda ve özellikle TSGS senaryosunda nesneler için gezginlik modeli önemlidir. Bu nedenle, Technical University of Berlin tarafından geliştirilmiş ve OMNet++ üzerinde çalışan Mobility Framework (MF) 1.0a5'ten [5] yararlanılmıştır.

OMNet++ üzerinde MAC protokolleri ile ilgili MF dışındaki diğer çalışmalar da incelenmiş olup sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Delft University of Technology'den Consensus MacSimulator-0.1.1 [6]: OMNet++ sürüm 2.3'te CSMA, S-MAC, LMAC ve T-MAC karşılaştırması için geliştirilmiştir. Daha sonra sürüm 3.1'de çalışan 0.2.2 sürümü yayınlanmış olsa da gezginlik desteklenmemektedir.
- University of Twente'den Eyes WSN simulator [7]: TinyOS'te geliştirilmiş uygulamaları OMNet++'ta çalıştırmak için NesCT aracına sahiptir. Ancak benzetimde paket kayıplarını yok kabul etmektedir.
- University of Twente'den EyeSim3: TDA'larda kullanılan S-MAC, B-MAC ve LMAC protokollerinin karıştırma ataklarına karşı denenmesi için geliştirilmiştir. Ancak gezginlik desteklenmemektedir.
- Bologna University'den Ad-hoc Network Simulator [8]: Random walk, random direction, random waypoint, pursuit ve markovian gibi gezginlik modelleri üzerinde AODV routing protokolünün benzetimi için geliştirilmiştir.
- Louisiana State University'den LSU-SensorSimulator [9]: 802.11, directed diffusion ve GEAR çalışacak şekilde Omnet++ sürüm 2.3'te geliştirilmiştir. Uzun süre üzerinde çalışan kalmadığı için destek alınamazken daha sonra yeni sürümü yayınlanmıştır.

Mobility Framework, diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, OMNet++'a iyi entegre edilmiş, sürekli geliştirilen ve telsiz ağlardaki gezginliğin benzetimi için son zamanlarda çok yaygın

kullanılan bir araç olduğu görülmüştür. MF 1.0a5'in gezginlik için sağladığı altyapı üzerinde *BasicMobility* ve *ConstSpeedMobility* olmak üzere sadece iki gezginlik modeli hazır halde gelmektedir. Bu modellere benzer olarak diğer gezginlik modelleri, MF üzerinde kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Nitekim RPGM (reference point group mobility) gezginlik modeli, MF kullanılarak kısa sürede gerçekleştirilmiş ve PCLS protokolüyle çalışır hale getirilmiştir. Gezinlik için MF'in tercih edilmesindeki diğer neden, MF'in sunduğu altyapının hareketli nesnelere arasındaki bağlantıları kısa zamanda güncelleyen bir çalışma şekli sağlamasıdır. Ağdaki nesne sayısı artırıldığında nesnelere arasındaki bağlantı sayısı daha fazla artmasına rağmen, MF üzerindeki benzetimlerin beklenen sürede tamamlandığı görülmüştür.

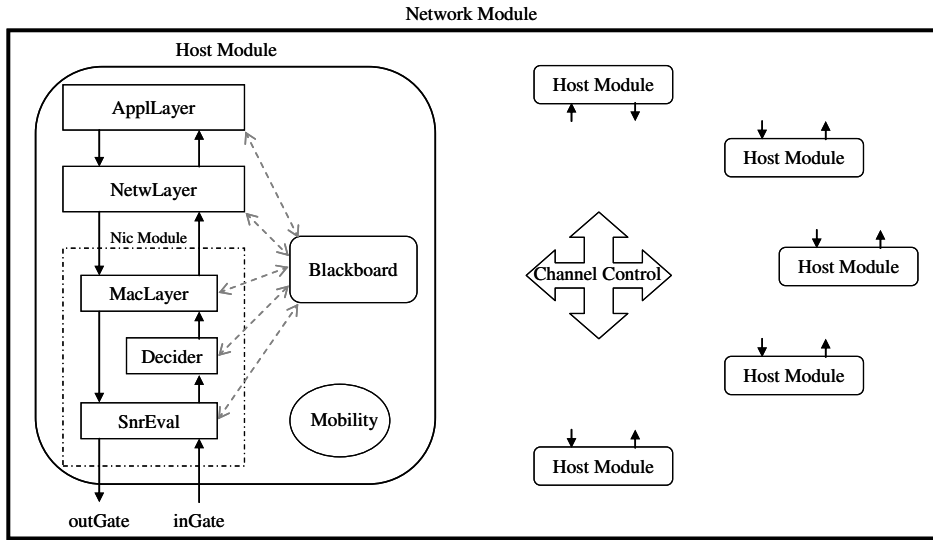


Şekil Ek 2.1 OMNet++ grafik arayüzü.

OMNet++'ta modül tanımlamaları Network Description (NED) dili kullanılarak .ned uzantılı dosyalarla yapılmaktadır. Modüllere ait parametrelerin değerleri ise .ini uzantılı dosyadan okutulmaktadır. Modül tanımlamalarının yapıldığı .ned dosyaları modüle ait basit veya birleşik diğer modül veya bileşenleri içermektedir. NED derleyicisi tarafından C++ diline çevrilen bu tanımlamalar derlenip bağlanabilir. Benzetimin grafik arayüzle (Tkenv) çalışması veya komut satırında (Cmdenv) çalışması derleme sırasında belirlenmektedir. Grafik arayüz

seçildiğinde, Şekil Ek 2.1’de görüldüğü gibi benzetim iki farklı pencerede çalışır. Üstteki kontrol penceresinin sol tarafı, host modülleri ve planlı olayları listelemektedir. Kontrol penceresinin sağ tarafı, benzetim esnasında üretilen mesajları göstermektedir. Grafik arayüzde nesnelere hareketleri, nesnelere arasındaki bağlantılılık ve gönderilen/alınan paketler ise alttaki pencerede canlandırılmaktadır.

MF üzerinde bir benzetim yapmak için Şekil Ek 2.2’de görüldüğü gibi bir *network module* yaratılır. Bu modül, ağdaki nesnelere karşılık gelen *host module*’lerden ve bir *channel control* modülünden oluşmaktadır. Nesnelere birbirlerine bağlantılılığı ve *in/out gate*’leri arasında paket iletimi, channel control modülü tarafından sağlanmaktadır. Channel control modülü nesnelere arasındaki bağlantıları; en yüksek iletim gücü, frekans ve mesafe gibi genel ağ parametrelerine bağlı olarak kontrol eder. Buna göre aralarında bağlantı yapılmayan nesnelere birbirlerine girişimi yok sayılır.

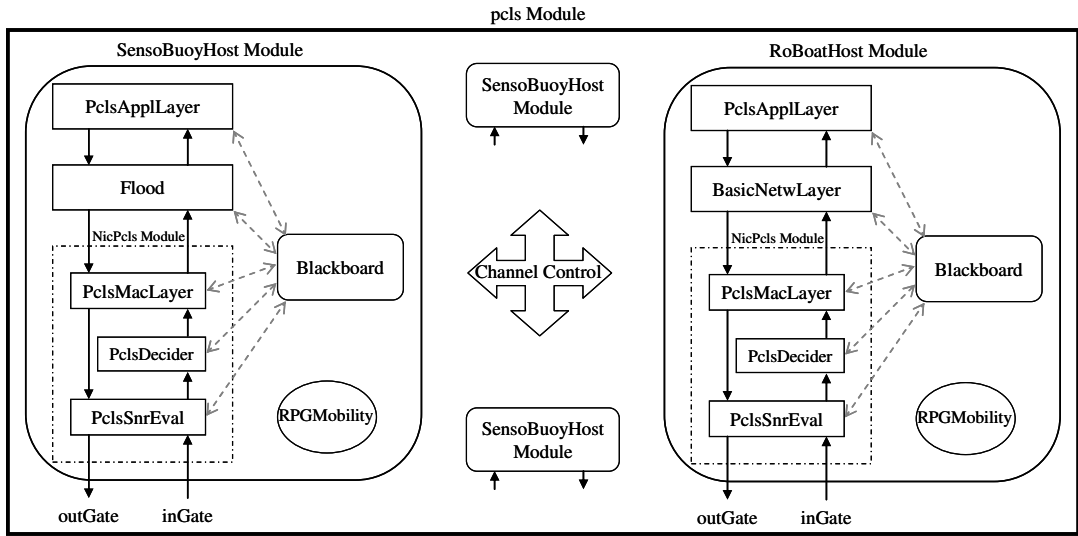


Şekil Ek 2.2 Mobility Framework modülleri.

Bir host modül, çeşitli ağ katmanları ile bu katmanlar arasında parametre geçişi için kullanılan *blackboard* modülünü ve nesnenin gezinliğini kontrol eden *mobility* modülünü içermektedir. MF’de her bir ağ katmanı birer C++ sınıfıyla temsil edilmektedir. Ancak fiziki katman, SnrEval ve Decider olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Ayrıca, fiziki katman ile MAC katmanı biraraya getirilerek tanımlanan *nic module* sayesinde farklı *nic* arayüzlerine sahip nesnelere oluşturulabilir. Benzer şekilde, farklı uygulama ve ağ katmanlarına sahip, farklı gezinlik modeli uygulayan nesnelere üretmek de mümkündür.

Her bir nesnenin benzetim alanındaki yeri, mobility modüller tarafından channel control

modülüne bildirilir. Channel control modülü bu bilgileri kullanarak nesnelere arasındaki mesafeleri hesaplar. Mesafe, iletim gücü ve frekansa bağlı olarak da nesnelere birbirlerine bağlantılı olup olmadıkları belirlenir. Bağlantılı olan nesnelere arasında gönderilen bir paketin başarıyla alınabilmesi için öncelikle SnrEval katmanı tarafından değerlendirme yapılmaktadır. Alış gücü ve alıcı hassasiyeti değerlerine bağlı olarak değerlendirilen paket, SnrEval tarafından kabul edilirse, hata kontrolü için Decider katmanına gönderilir. Decider katmanında hatasız olduğu belirlenen paketler MAC katmanına iletilirken, bit hataları bulunanlar gürültü kabul edilmektedir.



Şekil Ek 2.3 PCLS protokolünün geliştirilmesinde kullanılan modüller.

MF’de temel olarak BasicSnrEval, BasicDecider, BasicMacLayer, BasicNetwLayer ve BasicAppLayer sınıfları bulunmaktadır. Bu sınıflar kullanılarak hazırlanmış CSMAMacLayer ve 80211MacLayer örnekleri ile Flooding routing örneği mevcuttur. PCLS protokolü geliştirilirken CSMAMacLayer sınıfından yararlanılarak PclsMacLayer katmanı oluşturulmuştur. Fiziki katmanda radyo uykuya alınmadığı için SnrEval sınıfı kullanılarak PclsSnrEval katmanı türetilmiştir. İlave olarak, TSGS senaryosunda gerekli trafiği (tehdit tespit edilmesi) üretmek üzere PclsAppLayer sınıfı yaratılmıştır. Testlerde routing için MF’de hazır bulunan Flooding sınıfı kullanılmıştır. MF’deki *constant speed* gezginlik modülü yerine ise RPGM gezginlik modeli oluşturulmuştur. PCLS protokolünün testleri için benzetimde kullanılan modüller ve katmanlar Şekil Ek 2.3’te görülmektedir.

PCLS protokolü testlerde diğer MAC protokolleriyle de karşılaştırılmıştır. Ancak OMNet++ benzetim ortamında MF üzerinde B-MAC ve LMAC protokolleri hazır olmadığından bu

protokoller yeniden geliştirilmiştir. B-MAC ve LMAC protokollerinin geliştirilmesinde (Polastre vd., 2004) ve (Hoesel vd., 2004) ile MacSimulator-0.1.1 [6] ve EyeSim3 çalışmalarından yararlanılmış ve PCLS protokolünde kullanılan modüllerde sadece MAC ve SnrEval katmanlarının değiştirilmesi yeterli olmuştur. Benzer şartlar altında yapılan testler nedeniyle diğer ağ katmanları ve gezginlik modülü yeniden kullanılabilmiştir.

### Ek 3 RPGM (Reference Point Group Mobility) gezginlik modeli

PCLS MAC protokolünün benzetim ve testlerinde nesnelerin hareketli olması gerektiğinden doğru gezginlik modelinin tespit edilmesi önemlidir. Gerçek hareketlerin izleri elimizde olmadığından YNA'lar gibi tasarsız ağların benzetiminde şimdilik sentetik modeller kullanılabilir.

Sentetik gezginlik modelleri iki sınıfa ayrılmaktadır (Camp vd., 2002); nesnelerin birbirinden bağımsız hareket ettiği ortamlar için geliştirilen *varlık gezginlik modelleri* ve nesnelerin bir grup içinde birlikte hareketlerine dayanan *grup gezginlik modelleri*.

Varlık gezginlik modelleri olan *random walk*, *random waypoint*, *random direction*, *Boundless simulation area*, *Gauss-Markov* ve *city section* gibi modeller nesnelere birbirinden bağımsız ele almaktadır.

- Random walk gezginlik modelinde bir nesnenin konumu, önceden belirlenen sabit zaman aralıklarıyla veya sabit mesafe ilerlediğinde güncellenir. Buna göre nesne bulunduğu yerden bir sonraki konumuna giderken izleyeceği yönü  $[0, 2\pi]$  aralığında; hızını da  $[\text{min hız}, \text{max hız}]$  aralığında olmak üzere rasgele seçer. Benzetim alanının sınırlarına ulaşıldığında ise nesne, geldiği yöne bağlı bir açıyla tekrar alan içine yönlendirilir.
- Random waypoint gezginlik modelinde nesne, yönünü ve hızını değiştirme anlarında önceden belirlenen bir süre kadar bekler. Daha sonra, benzetim alanı içinde rasgele belirleyeceği hedef bir noktaya doğru,  $[\text{min hız}, \text{max hız}]$  aralığında bir örnek dağılımla rasgele seçtiği bir hızla ilerler.
- Random direction gezginlik modelinde nesne, izleyeceği yönü  $[0, 2\pi]$  aralığında; hızını da  $[\text{min hız}, \text{max hız}]$  aralığında olmak üzere rasgele seçer ve benzetim alanının sınırlarına çarpana kadar ilerler. Benzetim alanının sınırına ulaşan nesne, bir süre bekledikten sonra yönünü  $[0, \pi]$  aralığında seçerek hareketine devam eder.
- Boundless simulation area gezginlik modelinde ise sınıra ulaşan nesne, benzetim alanının ters yöndeki diğer sınırından devam ettirilir.
- Gauss-Markov gezginlik modeli, gezginlikteki rassallığı ayarlamak için, yön ve hız değerlerini tamamen rassal seçmek yerine bir önceki yöne ve hıza bağlı olarak belirler.
- City section gezginlik modelinde benzetim alanı, bir şehrin caddelerinden oluşan ağ yapısındadır. Şehrin içinde rasgele bir hedef noktaya, caddeleri kullanarak ve hız

kısıtlamalarına uyarak ulaşan nesne burada bir süre bekler. Daha sonra, yeni hedef noktasını belirleyerek benzer şekilde hareket ettirilir.

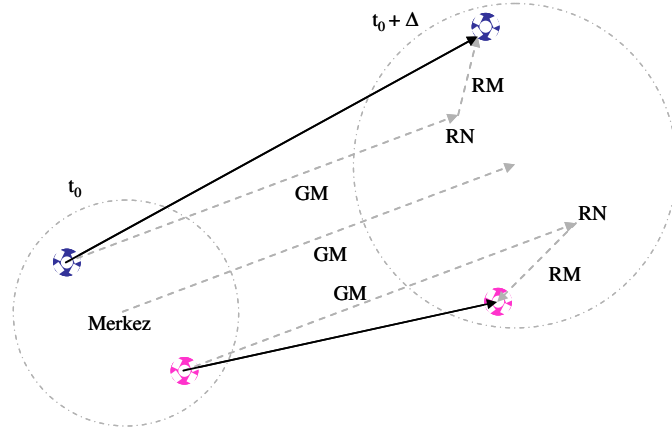
Varlık gezginlik modellerinde her nesne kendi hareketini modelde belirlenen kurallara göre müstakil belirlemektedir. Yardımlaşan nesnelerin birbirinden kopuk hareket etmeleri sözkonusu olmadığından benzetimde varlık gezginlik modellerini kullanmamız uygun değildir.

Grup gezginlik modellerinde ise nesnelere küme halinde hareket ederken aynı zamanda kümenin içinde bağımsız hareket edebilirler. Bu sınıftaki gezginlik modelleri *column*, *nomadic community*, *pursue* ve *reference point grup* gezginlik modelleridir.

- Column gezginlik modelinde nesnelere, askeri düzende olduğu gibi bir hat şeklinde sıralanarak grup halinde ileri hareket ederler. Başlangıçta belirlenen referans hattı  $[0, \pi]$  aralığında rasgele yön ve mesafede ilerletilir. Nesnelere ise bu referans hat üzerindeki referans noktaları etrafında bir varlık gezginlik modeline göre de ayrıca hareket ettirilirler.
- Nomadic community gezginlik modelinde nesne kümesinin referans hattı yoktur. Referans hat yerine tüm küme için bir referans nokta vardır. Göçebe gruplarda olduğu gibi nesnelere, referans noktanın bir yerden başka bir yere hareket ettirilmesinden sonra bu nokta etrafında bir varlık gezginlik modeline göre gezinirler.
- Pursue gezginlik modeli, kaçak takip eden polislerin hareketi gibidir. Takip eden gruptaki nesnelere hareketleri, takip edilenin hareketlerine bağlı olarak belirlenir.
- Reference point grup gezginlik modeliyle hem grubun hem de grup içindeki nesnelere rassal hareketleri ifade edilebilmektedir. Şekil Ek 3.1'de görülen RPGM modelinde nesnelere toplu hareketi *grup hareket vektörü* (GM) ile gösterilmektedir. GM kullanılarak, her bir nesnenin yeni *referans noktası* (RN) tespit edilmektedir. Bu noktaya nesnenin kendi *rassal hareket vektörü* (RM) eklenerek yeni konumu belirlenmektedir. RM vektörünün yönü ve büyüklüğü, sabit zaman aralıklarıyla, varlık gezginlik modellerinden *random walk*'ta olduğu gibi belli limitler dahilinde rasgele tespit edilir.

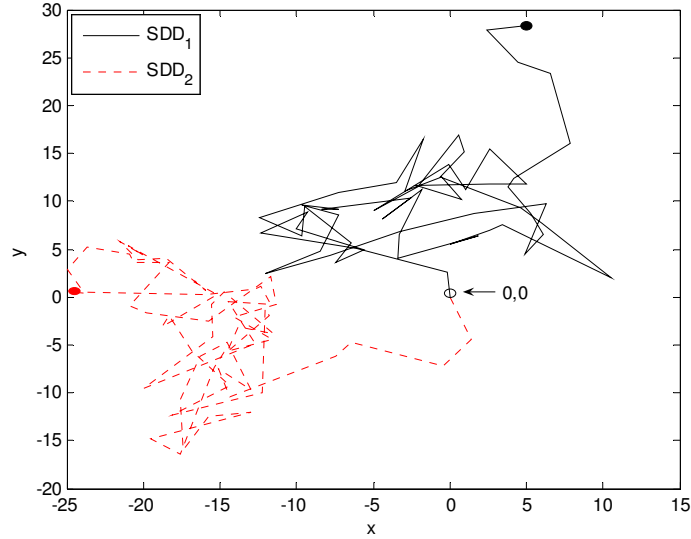
Reference Point Group Mobility (RPGM) modeli, grup gezginlik modellerinin en genel halidir. Diğer grup gezginlik modellerini, RPGM modeliyle ifade etmek mümkündür. Bu nedenle benzetimde RPGM modeli kullanılmıştır.





Şekil Ek 3.1 RPGM gezginlik modeli.

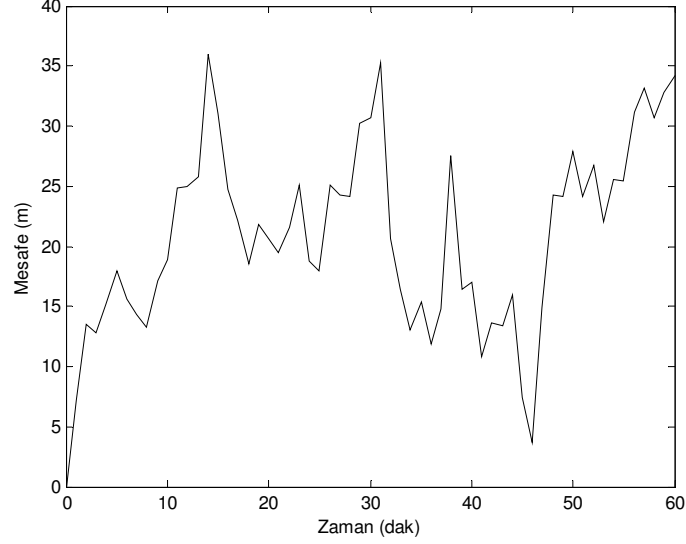
TSGS senaryosunda yer alan nesnelerin deniz üstündeki hareketleri için RPGM gezginlik modeli kullanıldığında; GM vektörü, nesnelerin suüstünde akıntıyla sürüklenmelerini gösterirken, dalga ve sudaki çarpıntı nedeniyle nesnelerin müstakil yer değiştirmeleri RM vektörüyle ifade edilmektedir. Nesnelerin birbirlerine göre konumlarını etkileyen RM vektörünün yönü  $[0, 2\pi]$ , büyüklüğü ise  $(0, \text{max mesafe}]$  aralığında belli zaman aralıklarıyla rasgele belirlenmektedir. Rasgele hareket nedeniyle nesnelerin birbirlerine göre yerlerinin nasıl etkilendiği benzetimle incelenmiştir.



Şekil Ek 3.2 RPGM gezginlik modelinde nesnelerin bağımsız hareketleri.

Başlangıçta aynı noktada ( $x=0$ ,  $y=0$ ) bulunan  $SDD_1$  ve  $SDD_2$  nesnelere 1 saniye aralıklarla birbirinden bağımsız ve rasgele belirledikleri yön ve mesafede 60 dakika süreyle hareket

ettirilmektedir. RM vektörünün büyüklüğü (0, 1m] aralığında rasgele belirlenmektedir. Buna göre her iki nesnenin x-y koordinatları Şekil Ek 3.2’de, aralarındaki mesafeler ise Şekil Ek 3.3’te görülmektedir.



Şekil Ek 3.3 RPGM gezginlik modelinde nesnelere arasındaki mesafeler.

Nesneler, aynı noktadan harekete başlamalarına rağmen birbirlerinden ayrılarak dağılmışlardır. Sadece bir defa çok yakınlaştıkları görülse de benzetim sonunda çok farklı konumlara ulaşmışlardır. TSGS senaryosu için 60 dakikalık benzetim süresince nesnelere arasındaki mesafelerin yeterli dağılma sağladığı görülmektedir.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	19.07.1965	
Doğum yeri	Balıkesir	
Lise	1979-1983	Deniz Lisesi, Heybeliada, İstanbul
Lisans	1983-1987	Deniz Harp Okulu, Tuzla, İstanbul Kontrol Sistemleri Bölümü
Yüksek Lisans	1991-1993	Naval Postgraduate School, Monterey, A.B.D. Computer Science Programı
Doktora	2002-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

**Çalıştığı kurumlar**

1987-1989	TCG Savaştepe K.lığı
1989-1990	TCG Işın K.lığı
1990-1991	I.Karakol Filotillası Kmd.luğu
1991-1993	Deniz Kuvvetleri K.lığı
1993-1995	Genelkurmay Başkanlığı
1995-Devam ediyor	Deniz Harp Okulu K.lığı