İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN ÖZGÜN ÇOK KANALLI MAC PROTOKOLÜ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Turgay Pamuklu

Anabilim Dalı : Bilgisayar Mühendisliği

Programı : Bilgisayar Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN ÖZGÜN ÇOK KANALLI MAC PROTOKOLÜ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Turgay Pamuklu
504051531

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Deniz Turgay Altılar (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. A. Emre Harmancı (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Müjdat Soytürk (DHO)

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm; çalışmalarımın yönlendirilmesinde ve sonuçlandırılmasında büyük emeği geçen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Deniz Turgay Altılar' a, çalışmalarım sırasında beni maddi açıdan destekleyen TÜBİTAK'a, hayatımın her anında olduğu gibi tez yazma sürecimde de sonsuz desteğinden ötürü aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2010 Turgay Pamuklu

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ... **iii**
İÇİNDEKİLER ... **v**
KISALTMALAR ... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xi**
ÖZET ... **xiii**
SUMMARY ... **xv**
1. GİRİŞ ... **1**
1.1 Telsiz Duyarga Ağlarının Temel Özellikleri ... 1
1.1.1 Donanım özellikleri ... 1
1.1.2 Haberleşme örüntüleri ... 2
1.2 MAC Katmanı ... 3
1.3 MAC Katmanı Tasarımında Başarım Ölçütleri ... 4
1.3.1 Transfer oranı ("throughput") ... 4
1.3.2 Gürbüzlük ("Robustness") ... 4
1.3.3 Ölçeklenirlik ("Scalability") ... 4
1.3.4 Kararlılık ("Stability") ... 5
1.3.5 Adaletlilik ("Fairness") ... 5
1.3.6 Verimli enerji kullanımı ... 5
1.3.7 Gecikme ... 6
1.4 Tezin Amacı ... 7
1.5 Hipotez ... 8
2. MEVCUT TEK KANALLI MAC KATMANI PROTOKOLLERİ ... **9**
2.1 Zaman Bölmeli Erişim Yöntemleri ... 9
2.2 Sanal Zaman Paylaşımlı Protokoller ... 9
2.2.1 S-MAC ... 9
2.2.2 D-MAC ... 12
2.2.3 DSMAC ... 13
2.2.4 T-MAC ... 14
2.2.5 SCP-MAC ... 15
2.3 Zaman Paylaşımı Gerçekleştirilmemiş Protokoller ... 16
2.3.1 B-MAC ... 16
2.3.2 X-MAC ... 17
2.3.3 WiseMAC ... 18
2.3.4 CSMA-MPS ... 19
2.4 Sonuç ... 20
3. MEVCUT ÇOK KANALLI MAC KATMANI PROTOKOLLERİ ... **21**
3.1 MMAC ... 21
3.2 HYMAC ... 24
3.3 TMCP ... 25

3.4 “A Practical MAC Protocol for WSN” 26
3.5 Y-MAC 27
3.6 MC-LMAC 28
3.7 “Self Organizing, Collision Free, Multi-Channel Convergecast” 30
3.8 Sonuç 31
4. MC–PSMAC PROTOKOLÜ 33
4.1 Protokolün Oluşturulmasında Dikkat Edilen Hususlar 33
4.2 Protokolün Tasarım Temelleri 34
4.2.1 Uyku / dinleme çerçeve yapısı 35
4.2.2 Başlangıç sinyali 36
4.2.3 Paket türü başlangıç sinyali 37
4.2.4 Kulak kabartma 37
4.2.5 Sanal senkronizasyon 39
4.2.6 Çok kanallı yapı 40
4.3 Kanal Seçimi 41
4.3.1 Ortogonal kanal sayısı 41
4.3.2 Kanal seçme yapısı 42
4.4 Gecikme Analizi 43
4.5 Sonuç 44
5. BENZETİM 47
5.1 Benzetim Üzerinde Oluşturulan Mimari 47
5.1.1 Duyarga cihazı yönetimi 49
5.1.2 Uygulama modülü 49
5.1.3 Ağ modülü 49
5.1.4 MAC modülü 50
5.1.5 Radyo modülü 50
5.1.6 Kaynak yönetimi modülü 50
5.2 MAC Katmanı Durum Diyagramı 51
5.3 Kontrol Paketleri 54
5.4 Tek Hoplamalı Benzetim 55
5.5 Çok Hoplamalı Benzetim 57
5.6 Karmaşık Topolojili Benzetim 60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 65
6.1 Gelecek Çalışmalar 65
KAYNAKLAR 67
EKLER 71

KISALTMALAR

CSMA **:** Carrier Sense Multiple Access
CTS **:** Clear To Send
FDMA **:** Frequency Division Multiple Access
MC-PSMAC **:** Multi Channel – Preamble Sampling MAC
MAC **:** Media Access Control
OSI **:** Open System Interconnection
RTS **:** Request To Send
TDA : Telsiz Duyarga Ağları
TDMA **:** Time Division Multiple Access

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : CC2420 Akım Değerleri 35
Çizelge 4.2 : Gecikme Analizi Parametreleri 43
Çizelge 5.1 : Radyo Modülü Dönüşüm Süreleri..... 50
Çizelge 5.2 : Kaynak Yönetimi Parametreleri..... 50
Çizelge A.1 : Türkçe – İngilizce Terimler Sözlüğü..... 72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tipik Duyarga Düğüm Yapısı 2
Şekil 1.2 : Genel Yayımlama 2
Şekil 1.3 : Yakınsayan Yayımlama 3
Şekil 2.1 : DMAC Protokolünün Veri Toplama Ağacına Uygulanması12
Şekil 2.2 : T-MAC Protokolü 14
Şekil 2.3 : SCP-MAC Protokolü 15
Şekil 2.4 : X-MAC Protokolü 18
Şekil 2.5 : WiseMAC Protokolü 19
Şekil 2.6 : CSMA-MPS Protokolü 19
Şekil 3.1 : MMSN Paket Dinleme 22
Şekil 3.2 : MMSN Genel Yayılım Paketi Aktarımı 23
Şekil 3.3 : MMSN Teke Gönderim Paketi Aktarımı 23
Şekil 3.4 : HYMAC Sıralama Algoritması 25
Şekil 3.5 : TMCP Protokolü 25
Şekil 3.6 : Y-MAC Çerçeve Yapısı 27
Şekil 3.7 : Y-MAC Hoplama Mekanizması 28
Şekil 3.8 : MC-LMAC Yeni Düğüm Eklenmesi 29
Şekil 3.9 : MC-LMAC Zaman Bölmesi 30
Şekil 4.1 : Uyku / Dinleme Çerçeve Yapısı 35
Şekil 4.2 : Başlangıç Sinyaliyle Gönderici ve Alıcı Anlaşması 36
Şekil 4.3 : Paket Türü Başlangıç Sinyali 37
Şekil 4.4 : Kulak Kabartma Özelliği 38
Şekil 4.5 : Sanal Senkronizasyon Özelliği 40
Şekil 4.6 : Çok Kanallı Yapı 41
Şekil 5.1 : Benzetim Genel Mimari 48
Şekil 5.2 : Duyarga Düğümü Mimarisi 49
Şekil 5.3 : Durum Diyagramı 51
Şekil 5.4 : Kontrol Paketleri 55
Şekil 5.5 : Durum Sekizlisi 55
Şekil 5.6 : Tek Hoplama Topolojisi 56
Şekil 5.7 : Tek Hoplama Gecikmesi 56
Şekil 5.8 : Çok Hoplamalı Benzetim Topolojisi 57
Şekil 5.9 : Çok Hoplamalı Benzetimin Uçtan Uca Gecikmesi 58
Şekil 5.10 : Çok Hoplamalı Benzetimin Transfer Oranı 59
Şekil 5.11 : Çok Hoplamalı Benzetimin Enerji Tüketimi 60
Şekil 5.12 : Karmaşık Topoloji 61
Şekil 5.13 : Karmaşık Topoloji Gecikme Karşılaştırması 62
Şekil 5.14 : Karmaşık Topoloji Düşen Paket Karşılaştırması 63
Şekil 5.15 : Karmaşık Topoloji Transfer Oranı Karşılaştırması 64

TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN ÖZGÜN ÇOK KANALLI MAC PROTOKOLÜ TASARIMI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, öncelikle MAC protokolü tasarımı ölçütleri üzerinde durulmuş, daha sonra mevcut MAC protokolü tasarımları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde görüldüğü üzere enerji tüketiminin minimize edilmesi MAC protokolünün öncelikli başarım ölçütü olmaktadır. Bunun yanında gecikmenin azaltılması ve transfer oranının arttırılması çoklu ortam uygulamaları gibi çeşitli uygulamalar için önem arz etmektedir.

Bu ölçütlerden ve mevcut tasarımlardan yola çıkılarak yeni bir MAC protokolü tasarımı olan MC-PSMAC protokolü gerçeklenmiştir. Çok kanallı yapıya sahip olan bu protokol, aynı anda birden fazla kanalda haberleşme sağlayarak transfer oranını arttırmakta, aynı zamanda trafik yoğunluğu ve çarpışmalardan kaynaklanan gecikmeleri azaltmaktadır. Bunun yanında tek kanallı protokollerde olduğu gibi uyku / dinleme çerçeve yapısını kullanarak güç tüketiminin düşük kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca protokolün herhangi bir senkronizasyon işlemi gerektirmemesi ölçeklenebilirlik ve başarım artışını da sağlamaktadır.

Protokolün gerçeklenmesi Omnet++ benzeteci ile yapılmıştır. Benzeteç üzerinde telsiz duyarga ağlarına özel tasarlanmış Castalia mimarisi kullanılmıştır. Gerçek bir duyarga düğümü ve telsiz kanal yapısına göre tasarlanan bu mimari çok kanallı yapıya uygun hale getirilmiştir. Daha sonra tasarlanan protokol eklenmiş ve protokolü tek kanallı yapı ile karşılaştırmak için senaryolar oluşturulmuştur.

Çıkan sonuçlardan gecikmenin azaldığı ve transfer oranının arttığı görülmüştür. Ayrıca enerji tüketiminin de artmadığı hatta gecikmenin azalmasıyla birlikte azalma yönünde olduğu görülmüştür. Tüm bunlardan yola çıkılarak çoklu ortam uygulamaları gibi yüksek veri aktarımına sahip olan ve yüksek yoğunluklu ağlar için uygun bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır.

A MULTI CHANNEL MAC PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

SUMMARY

First of all, MAC protocol design criterias and existing MAC protocols are surveyed in this Project. Results are shown that energy consumption minimization is the most important performance criteria in wireless sensor networks. However, some applications like multimedia also need the other criterias like delay minimization and throughput maximization.

Secondly, a new MAC protocol MC-PSMAC is designed as a result of this survey. MC-PSMAC, which is a multi–channel protocol, provides multi data communication. Hence, not only throughput is increased, but also delay is minimized which occurs from traffic density and collision. Moreover, energy consumption is reduced by the sleep / listen frame characteristics. Also, protocol does not need any synchronization. So, it is more compatible for scalability. Moreover, decreasing of protocol performance by the synchronization process is eliminated.

Thirdly, protocol is developed on the Omnet++ discrete event simulator. Castalia architecture, which is designed especially for wireless sensor networks, is used for simulation architecture. Castalia has a realistic node and wireless channel model. However these models are not compatible with multi-channel applications. Firstly, Castalia is modified for multi-channel applications, then MC-PSMAC protocol is implemented. Finally, several scenarios are formed to compare MC-PSMAC and single channel protocol.

The simulation results are shown that delay decreases and throughput increases with the MC-PSMAC protocol. Also, protocol does not cause any additional energy consumption. Moreover, energy consumption decreases as a result of delay decreasing. Hence, simulation results are shown that MC-PSMAC protocol is a good choice for dense networks and high amounts of data like multimedia applications.

1. GİRİŞ

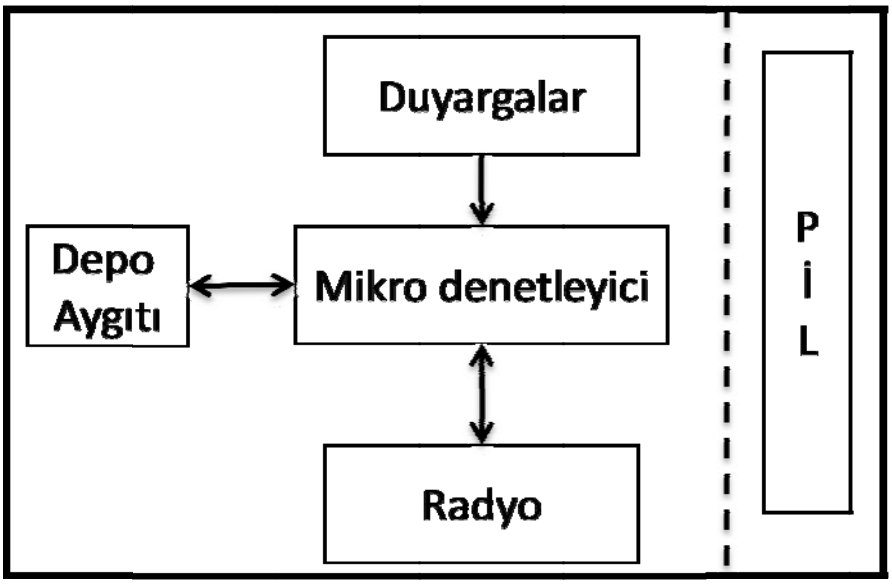
Telsiz duyarga ağları (TDA), askeri uygulamalardan çevresel gözlem uygulamalarına, sağlık uygulamalarından akıllı ev uygulamalarına kadar birçok alanda kendine yer bulmaktadır [1]. Gelişen donanım teknolojisiyle telsiz duyarga ağları gün geçtikçe daha az yer kaplayan, daha az enerji harcayan yapılara dönüşmektedir. Donanım teknolojilerindeki gelişime paralel olarak yukarıda belirtilen uygulamaların isterlerini karşılayacak yazılım çözümleri de üretilmektedir. Bu çözümlerden bir tanesi de bu tezin kapsamında çalışılan ortama erişim alt katmanı ("Media Access Control (MAC)") tasarımıdır.

1.1 Telsiz Duyarga Ağlarının Temel Özellikleri

Öncelikle tez kapsamında sistem tasarımına esas olacak şekilde duyarga ağlarının donanım özellikleri ve ağdaki haberleşme örüntüleri incelenmiştir.

1.1.1 Donanım özellikleri

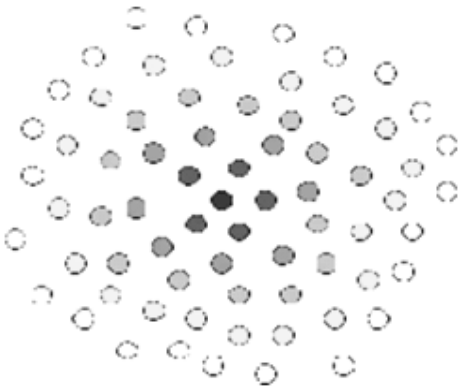
Telsiz duyarga ağlarında kullanılan tipik bir duyarga düğümü elemanı şekil 1.1'de gösterilmiştir. Bu yapının temel özelliği tüm elemanlarının mümkün olduğunca ucuz ve düşük güç tüketimli olmalarıdır. Dolayısıyla bu elemanların başarımları da düşük olmaktadır. Örneğin duyarga düğümlerinde kullanılan mikro denetleyiciler küçük bellek kapasitesine sahiptirler ve düşük frekanslarda çalışmaktadır. Radyo yongaları da kısa menzil ve dar band genişliğine sahip olmaktadırlar. Dolayısıyla tasarımda bu nitelikler dikkate alınmıştır.



Şekil 1.1 : Tipik Duyarga Düğüm Yapısı

1.1.2 Haberleşme örüntüleri

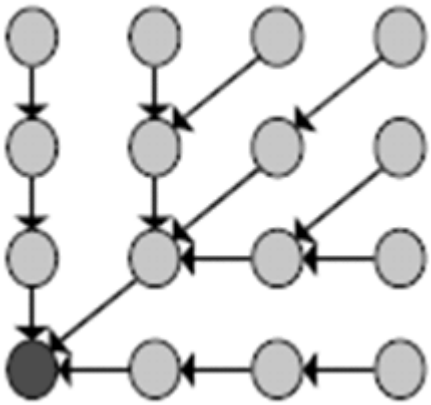
Telsiz duyarga ağlarında üç temel haberleşme örüntüsü yer almaktadır. Bunlar literatürde genel yayımlama ("broadcast"), yakınsayan yayımlama ("convergecast") ve yerel yayımlama ("local gossip") olarak sıralanırlar [2]. Genel yayımlamada mesajlar tüm ağa gönderilmektedir. Genellikle kurulum ve güncelleme aşamalarında kullanılan haberleşme örüntüsüdür. Şekil 1.2'de bu haberleşme biçimine örnek verilmiştir. Örnekte de görüldüğü gibi merkezde bulunan bir düğümden başlamak üzere tüm düğümler komşularına paket yollama işlemiyle veri aktarımı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.2 : Genel Yayımlama

Yerel yayımlamada ise düğümler mesajlarını sadece komşularına yollamaktadırlar. Son olarak yakınsayan yayımlamada ise düğümler mesajlarını toplayıcı ("sink") denilen tüm mesajların toplandığı bir (ya da birden fazla) düğüme göndermektedir. Genellikle duyarga ağlarında sıklıkla yakınsayan yayımlama kullanılmaktadır. Şekil

1.3'de bu yapıyı belirten bir örnek gösterilmiştir. Tüm düğümler veri aktarımını sol alttaki düğüme doğru yapmaktadırlar. Görüldüğü gibi bu modelde veri aktarımı yoğunluğu toplayıcı düğüme yaklaştıkça artmaktadır. Tasarımda göz önünde tutulması özellikle sistemin uzun süre ayakta kalması açısından önemlidir.



Şekil 1.3 : Yakınsayan Yayımlama

Öte yandan yerel yayımlama ve yakınsayan yayımlama haberleşmeleri uygulama yönünden periyodik veri aktarma ve durum tetiklemeli olarak iki çatı altında toplanır. Her iki durumda da uzun süre haberleşmenin olmadığı fakat haberleşme başladığında yoğun bir veri akışının olduğu bir trafik gözlemlenir. Tez kapsamında gerçekleştirilen tasarımda da özellikle bu tür haberleşme örüntülerini göz önüne alınarak tasarım yapılmıştır.

1.2 MAC Katmanı

MAC Katmanı OSI ("Open Systems Interconnection") başvuru modelinin ikinci katmanında bulanan DLL ("Data Link Layer") katmanında yer almaktadır. Bu katmanda yer alan bir diğer kısım olan LLC ("Logical Link Control") üst katmanlarla aşağıdaki fiziksel katman arasında arayüz sağlamakta, farklı protokollerin aynı fiziksel katmanla uyumlu çalışmasını sağlamakta ve kullanım alanı kısıtlı olmaktadır. MAC katmanı ise kullanılan ortamın (telsiz sistemlerde hava) nasıl kullanılacağını belirler ve şimdiye dek varolan protokoller incelendiğinde tasarım çeşitliliği gösterir. Özetle görevi:

- Verinin çerçevelere ("frame") bölünmesi, bu çerçeveye adres bilgisinin (verinin gönderileceği birim) ve hata sezme bitlerinin yerleştirilmesi

- Gelen paketlerin adres bilgisinin ve hata sezme bitlerinin incelenmesi
- Ortamın kullanımının uygulama ve başarım ölçütlerine göre değerlendirilmesi

şeklinde tanımlanabilir. Özellikle son madde telsiz duyarga ağlarında uygulamaya özgü farklı birçok MAC katmanının tasarlanmasına neden olmuştur [3].

1.3 MAC Katmanı Tasarımında Başarım Ölçütleri

MAC katmanının tasarımında dikkate alınan ölçütler aşağıda belirtilmiştir.

1.3.1 Transfer oranı ("throughput")

Kanal kapasitesinin veri aktarımı için kullanılan oranı belirtir. Transfer oranı veri aktarım miktarının artmasıyla artar, fakat bazı durumlarda belli bir seviyeden sonra azalmaya başlar. MAC katmanının tasarımında transfer oranını yüksek tutarken gecikmeyi en aza indirmek, çoklu ortam gibi çeşitli uygulamalar için önemli bir ölçüttür [3]. Ayrıca transfer oranı ile gecikme arasında doğru orantı da kurabiliriz [4]. Protokolün veri miktarı aktarma başarımının artması daha sonra belirtilecek olan çeşitli gecikme kaynaklarının etkisini azaltacak ve verinin hedefe daha çabuk ulaşmasını sağlayacaktır.

1.3.2 Gürbüzlük ("Robustness")

Çeşitli koşullarda sistemin güvenir biçimde çalışması, hata sezme, tekrar kurulumunun veya başlatılması işlemlerinin gerçekleştirilebilmesidir. Telsiz duyarga ağlarında gürbüzlük sağlamak ağın durumunun zamana bağlı olarak da değişmesinden dolayı zordur.

1.3.3 Ölçeklenirlik ("Scalability")

Ağdaki birimlerin sayısından bağımsız olarak başarım ölçütlerinin sağlanması ağın ölçeklenebilir olduğunu göstermektedir. Yüzlerce hatta binlerce birimden oluşabilen telsiz duyarga ağlarında ölçeklenirlik büyük çaplı uygulamalar düşünüldüğünde kritik bir faktördür. Birimleri kümelere ayırmak, bilgiyi kombine bir şekilde farklı birimlerden almak MAC katmanında ölçeklenirlik sağlamak için yapılan yöntemlerdendir [3]. TDMA tabanlı protokollerde ölçeklenebilirliğin sağlanması daha da zorlaşmaktadır [4]. Bunun başlıca sebebi zaman dilimlerinin düğümlere has

atanmasıdır. Bu da farklı sayıdaki düğümlerden oluşan topolojiler için farklı davranış biçimi demektir.

1.3.4 Kararlılık ("Stability")

Belli bir zaman dilimindeki trafik yükündeki dalgalanmaların kotarılmasına denir. Bir MAC protokolünde ortamdaki yük belirlenen tepe değerinden düşük olmak kaydıyla arttıkça transfer oranı düşmüyorsa bu protokol kararlı demektir [3].

1.3.5 Adaletlilik ("Fairness")

Adaletli bir MAC protokolü tasarımında, haberleşen birimlere eşit haberleşme kapasitesi verilmektedir. Bu işlem transfer oranı gereksiz bir biçimde düşürülmeden yapılmalıdır. Bu tür bir MAC tasarımında ortama erişimin koordinasyonu için genel bir bilgi gerekebilmektedir. Ayrıca ortamın zamana bağlı değişimi de ortamın adaletli kullanımı sorununu daha da karmaşıklaştırır. Örneğin bir birime verdiğimiz zaman aralığında gürültünün yoğun olması bu düğüm için adaletsizlik olacaktır. Bu gibi durumlar telsiz sistemlerde adaletlilik ölçütünü olumsuz yönde etkilemektedir [3]. Öte yandan bir duyarga ağında tüm birimlerin ortak bir amacı bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında adaletliliğin birim bazında olmasından çok uygulama bazında olması daha da önemlidir [4].

1.3.6 Verimli enerji kullanımı

Duyarga düğümü birimleri enerji kaynağı olarak çoğunlukla pil kullanırlar ve bu pillerin değiştirilmesi veya tekrar doldurulması çoğu duyarga ağı uygulaması için çok zor hatta imkansızdır. Bu yüzden kısıtlı olan bu enerji kaynağının verimli kullanımı düğümler için oldukça önemlidir.

Bir telsiz duyarga düğümü düşünüldüğünde haberleşme birimi enerji tüketiminde en büyük paya sahiptir. Dolayısıyla bunun en aza indirgenmesi sistemin yaşam süresinin artmasını sağlar. MAC katmanı incelendiğinde gereksiz enerji tüketim sebepleri şöyle sıralanabilir:

- Çarpışma ("Collision"): Örtüşen bir zaman aralığında aktarılan iki paket çarpıştığında, paketler kullanılmaz hale gelirler, dolayısıyla paketlerin tekrar gönderilmesi gerekir. Tekrar gönderme ek enerji tüketimi demektir. Çarpışma aynı zamanda gecikmeyi de arttırır.

- Raslantısal İşitme (“Overhearing”): Düğüm biriminin kendisine gönderilmeyen bir paketi alması durumudur.
- Kontrol Paketleri: Tasarımda gereğinden fazla kontrol paketinin olması güç tüketimini olumsuz yönde etkileyecektir. Ayrıca küçük veri paketlerinde protokol başlıklarının (MAC, Ağ vs.) büyük olması da güç tüketimini artıracaktır.
- Atıl dinleme (“Idle Listening”): Düğüm birimi paketleri alabilmesi için radyo yongalarının alıcı kısmını sürekli açık tutmak zorundadır. Bu da herhangi bir haberleşme olmamasına rağmen önemli bir tüketime yol açmaktadır [3]. Deneysel veriler dinleme ve göndermenin yaklaşık aynı enerji harcamasına neden olduğunu göstermektedir. İleride bu soruna detaylı olarak değinilecektir.
- Trafik Dalgalanması (“Traffic Fluctuation”): TDA’ larda trafik genellikle inişli çıkışlı olmaktadır. Kararlılığın konusu olan bu durum aynı zamanda enerji tüketimini de olumsuz etkilemektedir [5].

1.3.7 Gecikme

Bir paketin vericiden alıcıya varması sırasında geçen süre gecikme olarak belirtilmektedir. Gecikme, ortamın kullanım yoğunluğunun yanında MAC tasarımıyla da doğrudan alakalıdır. İki birim arasında gecikmenin hesaba katılmasının yanında, tüm ağda dolaşacak olan paketin toplam gecikmesinin de hesaba katılması gerekmektedir.

Gecikmenin hesaplanmasında dikkate alınan parametreler şunlardır:

1) Paketin ortama verilmesinden önceki gecikmeler:

a) Taşıyıcı Sezinlemesi (“Carrier Sense”) Gecikmesi: Paket gönderen düğümün ortamın müsait olduğunu algılaması için taşıyıcı sezinlemesi işlemini yapması gerekmektedir. Bu da ek bir gecikmeye neden olmaktadır. Değeri çekişme penceresine (“contention window”) ’ a eşittir.

b) Geri Çekilme (“Backoff”) Gecikmesi : Taşıyıcı sezinlemesi işlemi olumsuz sonuçlanırsa düğümün geri çekilme işlemi denilen rasgele bir süre bekleme işlemini gerçekleştirmesi gerekmektedir. Böylece ortama kendisi gibi sahip

olmak isteyen düğümlerle çarpışması engellenmiş olur. Sonuçta bu işlem de ek bir süre kaybına yol açar.

c) Uyku Periyodu Gecikmesi: Alıcı tarafın uyku periyodundan dinleme periyoduna geçişine kadar geçen süredir. Özellikle TDA' larda gecikmenin baş sebeplerindendir.

d) Hattın Kullanılıyor Olmasından Dolayı Oluşan Gecikmeler: Paket aktarımını gerçekleştirmemiz için ortamın başka düğümler tarafından kullanılmıyor olması gerekmektedir. Aksi halde ortamın boşaltılmasına kadar beklememiz gerekmektedir. Bu da ciddi bir gecikmeye neden olmaktadır.

2) Paketin alıcıya ulaşmasından önceki gecikmeler:

a) Transmisyon Gecikmesi: Vericinin toplam veriyi ortama verme süresine eşittir. Bir başka deyişle paket uzunluğunun bant genişliğine oranıdır.

b) Propagasyon Gecikmesi: Uzaklığa bağlıdır. Telsiz duyarga ağlarında haberleşen birimler birbirine çok yakın olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir.

c) Çarpışma : Çarpışma sonucu paketin tekrar gönderilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak bu durum da bir gecikmeye yol açar.[7]

3) Alıcı tarafında oluşan gecikmeler:

a) İşlem Gecikmesi: Alıcının paketi bir sonraki düğüme aktarmadan önce gerçekleştirildiği işlemlerin süresine bağlıdır.

b) Kuyruklama Gecikmesi: Yüksek trafik yükü olan ağlarda alınan / gönderilen paketler işlenmeden önce kuyruklarda tutulur ve sırası geldikçe işlenir. Alıcı kuyrupuğunda oluşan bu gecikmeye kuyruklama gecikmesi denir. [3,6].

1.4 Tezin Amacı

Telsiz duyarga ağlarında, kısıtlı güç kaynağından dolayı MAC protokolü tasarımlarında öncelikli ölçüt güç tüketiminin düşük tutulması olmaktadır. Bu ölçütün yanında diğer tasarım ölçütleri olan transfer oranının arttırılması ve gecikmenin azaltılması da çeşitli uygulamalar için öncelikli olarak değerlendirilebilir. Örneğin çoklu ortam uygulamalarında gecikmenin azaltılması önemli bir ölçüttür. Bu tez kapsamında mevcut MAC katmanı tasarımları

incelendikten sonra bu tasarımlardan ve tasarım ölçütlerinden yola çıkarak güç tüketiminin düşük tutulduğu, transfer oranının arttırıldığı ve gecikmenin azaltıldığı yeni bir MAC protokolü tasarımı amaçlanmıştır. Tasarımda özellikle senkronizasyon işlemine ihtiyaç duyulmaması hedeflenmiştir. Böylece hem tasarımın karmaşıklığı azaltılmış, hem ölçeklenebilirlik arttırılmış, hem de senkronizasyondan doğacak ek maliyetlerin önüne geçilmiştir.

1.5 Hipotez

Telsiz duyarga ağları yaşam sürelerinin büyük bir kısmını haberleşme yapmadan atıl dinlemede geçirmektedirler. Haberleşme başladığında (hem periyodik veri aktarımı hem durum tetiklemeli yerel yayımlama ve yakınsayan yayımlamada) yoğun bir trafik oluşmaktadır. Dolayısıyla haberleşmenin gerçekleşmediği zamanda güç tüketiminin düşük tutulduğu, haberleşmenin başladığı anda ise veri transfer oranını arttıracak, gecikmeyi azaltacak bir tasarım, amaç kısmında bahsedilen ölçütleri yerine getirecek bir tasarım olacaktır. Bu amaçla haberleşmenin başlamadığı uzun zaman aralığında sadece kontrol kanalının kullanıldığı yani tek kanallı bir yapı enerji tüketiminin düşük kalmasını sağlayacaktır. Haberleşme başladığında ise tek bir kanalda kalmak yerine çok kanallı bir yapıya geçilmesi hem aynı anda birden fazla veri akışını sağlayacak hem kanalın kullanılıyor olmasından ve çarpışmalardan kaynaklanan gecikmelerin de azalmasına katkıda bulunacaktır. Tasarımda senkronizasyon gerektirmeyen protokoller esas alınarak tasarım senkronizasyon işleminden bağımsız kılınacaktır.

2. MEVCUT TEK KANALLI MAC KATMANI PROTOKOLLERİ

Bu kısımda protokol tasarımı öncesinde incelenen telsiz duyarga ağları için geliştirilmiş tek kanal kullanan MAC protokolleri hakkında bilgi verilmiştir.

Protokolleri ortama erişimleri yönünden üç sınıfta toplayabiliriz. Bunlar: zaman bölmeli erişim yöntemleri, sanal zaman paylaşımı yapılmış yöntemler ve zaman paylaşımı yapılmamış yöntemlerdir. Ayrıca bu yöntemlerin birleşiminden oluşturulmuş hibrit yöntemler de bulunmaktadır.

2.1 Zaman Bölmeli Erişim Yöntemleri

Bu yöntemde belli bir zaman periyodu parçalara bölünmüş ve her bir parça bir duyarga düğümünün kullanımına atanmıştır. Böylelikle çakışma durumunun olması dolayısıyla güç tüketiminin artması engellenmiştir. Bu yapıların dezavantajları gelişmiş zaman senkronizasyonuna ihtiyaç duymaları, trafik değişimine adaptasyon zorlukları ve ölçeklenebilirliklerinin zor olmasıdır. Zaman bölmeli erişim, ad-hoc ağlardan çok merkezi yönetimin olduğu sistemlere daha uygundur. Senkronizasyon gerektirdiklerinden tez araştırmasında bu yöntemler üzerinde fazla durulmamıştır.

2.2 Sanal Zaman Paylaşımlı Protokoller

Bu yöntemi benimseyen protokollerin ortak özelliği, duyarga düğümlerinin ortak bir uyku / dinleme periyodunu seçmelerini sağlayarak dinleme durumu zamanını en aza indirebilmektir. Bu protokollerde çarpışma olasılığı oldukça yükseldiğinden el sıkışma (RTS/CTS) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Ayrıca bu yöntemler zaman bölmeli paylaşım yöntemleri kadar hassas olmasa da ek bir senkronizasyon işlemine ihtiyaç duymaktadırlar.

2.2.1 S-MAC

Bu protokolün yoğunlaştığı temel konu enerji tüketimi kaynakları olan, çarpışma, rastlantısal işitme ve atıl dinlemeyi azaltmaktır. Bunu gerçekleştirirken aynı zamanda

kontrol paketi yoğunluğunu düşük tutma ve protokolden kaynaklanan gecikme problemini azaltmak için de çeşitli yöntemlere başvurulmuştur.

Protokoldeki en önemli özellik atıl dinlemedeki kaybı azaltma amaçlı birimlerin periyodik olarak dinleme ve uyku moduna girmeleridir. Çarpışmayı azaltmak için 802.11 de bulunan RTS/CTS mekanizması eklenmiştir. Ayrıca paketlere aktarım süresi bilgisi eklenerek, haberleşmeye kulak misafiri olan birimlerin ortamın ne kadar süre meşgul kalacağını öğrenerek bu süre zarfınca uyku moduna girmeleri sağlanmıştır. Böylece hem çarpışma engellenmiş hem atıl beklemeden kaynaklanan enerji tüketimi azaltılmıştır. Öte yandan haberleşme süresince kulak misafiri birimlerin uykuda olması raslantısal işitmeden dolayı kaynaklanacak kayıpları da engellemektedir.

Her birim çevresindeki birimlerle haberleşebilmek için bu birimlerin dinleme / uyku çerçeve zamanı bilgisini bir tabloda tutmaktadır. Bu tablonun oluşturulması şu şekildedir:

- Birim belli bir süre ortamı dinleyerek herhangi bir SYNC paketi (birimler tarafından belli bir periyotta gönderilen dinleme/uyku çerçeve zamanı bilgisini içeren kontrol paketi) almaya çalışır. Bu süre zarfında herhangi bir paket alamazsa kendine has dinleme/uyku çerçevesini belirleyerek tablosuna yazar ve bu çerçeveyi uygulamaya başlar. Aynı zamanda SYNC paketiyle bu çerçeve zamanını çevresine duyurur.
- Belirtilen süre zarfında birim bir SYNC paketi alırsa bu paketteki dinleme/uyku çerçeve zamanını tablosuna yazarak bu çerçeveyi uygulamaya başlar. Aynı zamanda SYNC paketiyle bu çerçeve zamanını çevresine duyurur.
- Eğer birim kendi dinleme/uyku çerçevesi varken bir SYNC paketi alırsa başka bir komşusu olup olmadığını kontrol eder. Yoksa eski çerçevesini iptal ederek yenisine geçer. Aksi durumda iki çerçeve zamanını da tablosuna dahil ederek iki dinleme zaman aralığında da dinleme moduna geçer.

Enerji tüketimini azaltan bu yöntem gecikmenin artmasını oldukça olumsuz yönde etkilemektedir. Bunu engellemek amacıyla adaptif dinleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde haberleşmeye kulak misafiri olan birim, paketin aktarım bitiş süresini paketteki aktarım süresi bilgisinden elde etmektedir. Bu süre zarfında uykuda

durduktan sonra sürenin bitmesiyle dinleme konumuna geçmektedir. Böylece paketin bir sonraki adresi kendisi ise uyku periyodundan kaynaklanan gecikme engellenmiş olmaktadır.

Son olarak makalede bir paketin tamamının araya başka paket sokmadan bir birime aktarılmasının o birimde paketin daha az gecikmeyle işlenmesini sağlayacağı belirtilmiştir. Aynı zamanda radyo biriminin açılıp / kapanmasının da belli bir sürenin geçmesine yol açtığı belirtilmiştir. Tüm bunlardan yola çıkarak tasarımda paketin bir başka birime aktarılmasının bölümlemeli fakat araya başka bir paket sokulmaksızın aynı dinleme süresi içinde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir [4].

Sonuç olarak güç tüketimi konusunda özellikle paket aktarımı düşük orandaysa önemli kazançlar sağlanmaktadır. Gecikme ise çeşitli iyileştirmeler yapılmış olmasına rağmen IEEE802.11 'e göre yüksektir.

S-MAC'teki ana gecikme sebebi, bir düğümden diğer düğüme paket aktarılacağı zaman bir sonraki düğümün uyanma zamanının beklenmesinden ileri gelmektedir. Denklem 2.1' de aynı uyku periyoduna sahip düğümler için hesaplanan gecikme değeri belirtilmiştir. T_f uyku ve dinleme çerçevesinin toplam süresi, N toplam hoplama ("hopping") sayısı olmaktadır. Beşin üzerinde hoplamanın olduğu durumlarda diğer gecikmeleri ihmal edebiliriz. Hoplama başına yaklaşık bir çerçeve süresi kadar gecikme oluşmaktadır.

$$E[D(N)] = NT_f - T_f / 2 + t_{cs} + t_{tx} \quad \textbf{(2.1)}$$

Adaptif dinlemede ise ikinci hoplamanın olacağı düğüm alıcı düğümün CTS paketini duyduğunda uyku periyodunu değiştirdiğinden ikinci hoplama birinci hoplamadan hemen sonra gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla bir çerçeve zamanı içinde iki hoplama gerçekleşebilmektedir. Denklem 2.2' de gecikmenin yarı yarıya azaldığı görülmektedir.

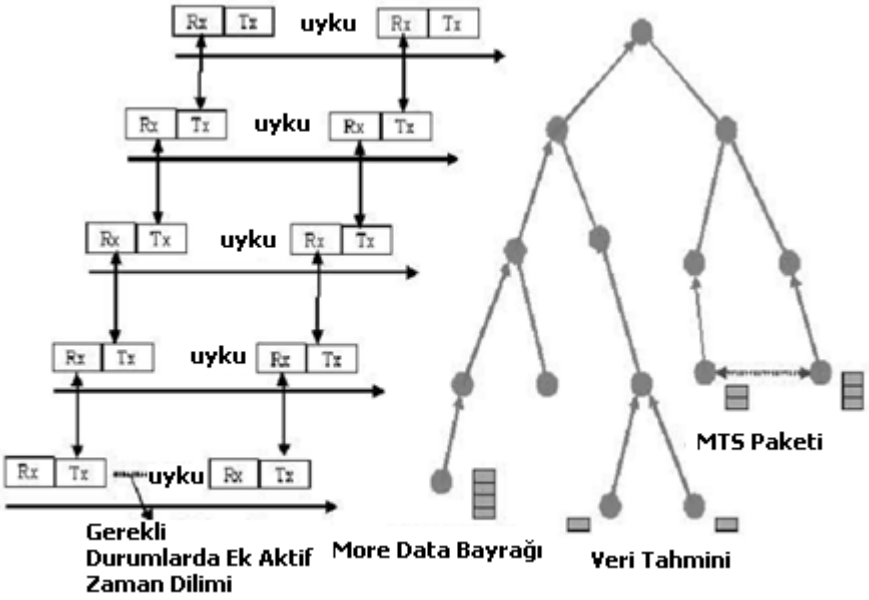
$$E[D(N)] = NT_f / 2 - T_f / 2 + 2t_{cs} + 2t_{tx} \quad \textbf{(2.2)}$$

Üçüncü hoplamanın olacağı düğüm ikinci hoplama sırasında uykuda bulunduğundan üçüncü hoplama ancak bu düğüm uyandığında gerçekleştirilebilmektedir. Yukarıdaki denklemler uyanma periyodu aynı olan düğümler için ve ancak bir sonraki hoplamadaki düğümün duyabildiği koşullar için geçerlidir. Standart algoritma için

farklı uyanma periyotlarına sahip düğümlerin olması gecikmeyi azaltan yönde bir etki yaratacaktır. Adaptif algoritma için değerlendirirsek bir sonraki hoplamadan daha ötesi CTS paketini duyduğu koşullarda gecikme azalacaktır. Uyanma periyodunun farklı olması ise gecikmeyi azalan veya artan yönde değiştirecektir.

2.2.2 D-MAC

DMAC, SMAC' teki gecikme problemini iyileştirme amacıyla veri toplama ağacı ("data gathering tree") [8] üzerinde uygulanan bir MAC tasarımıdır (Şekil 2.1). SMAC' teki gecikme problemini "veri iletme kesintisi" ("data forwarding interruption (DFI)") problemi olarak belirtmiştir. Bu problem, radyo yayımının kısıtlı olması dolayısıyla paketin aktarım yolunda aktarımdan habersiz birimlerin uyku konumuna geçerek gecikmeye yol açması olarak belirtilmiştir. SMAC'in adaptif dinleme özelliğiyle sadece gecikme eğimini azalttığı gecikmenin atlama sayısıyla lineer arttığı belirtilmiştir [8].



Şekil 2.1 : DMAC Protokolünün Veri Toplama Ağacına Uygulanması

Zaman aralığı Tx, Rx ve uyku modu olmak üzere üç kısıma ayrılmıştır. Gönderim süresince birim veri paketi göndermekte karşılığında ise ACK paketi almaktadır. Alım süresince veri paketi almakta karşılığında ACK paketi gönderilmektedir. Bu yapı sayesinde ağaç üzerindeki birimler senkron bir şekilde ayağa kalkmakta böylece uyku gecikmesi [4] düşürülmektedir. İkinci olarak aktarım süresinin aktarımı senkronizasyon sayesinde tüm ağaca aktarılabilmekte böylece tüm ağaçtaki

birimlerin yeni zaman sürelerine senkron olması sağlanabilmektedir. Üçüncü olarak alım ve verim süreleri ayrıldığından birimler arası çakışma azalmaktadır [8].

Protokolde, birden fazla paket gönderimi "daha veri var" bayrağıyla ("more data flag") ağaçtaki diğer birimlere bildirildikten sonra gerçekleştirilmektedir. Bir sonraki aktarım, [9] makalesinden yola çıkılarak 3 zaman aralığı sonra gerçekleştirilmektedir.

Normal tasarımda, ağaç yapısında anne düğüm, bir çocuğundan veri paketi aldıktan sonra uykuya yatmaktadır. Eğer başka bir çocuğundan da paket gelecekse uyku konumunda olduğundan gecikme oluşmaktadır. Bunu engellemek için anne düğümlerin paket aldıktan sonra bir sonraki aktarım periyodunda da hattı dinlemesi yoluna başvurulmuştur. Bu durum güç tüketiminin bir miktar artmasına yol açmıştır.

Son olarak farklı annelere sahip düğümlerin çakışması gecikmelere yol açmaktadır. Bunu engellemek için "daha gönderi var" ("More-to-Send" - MTS) kontrol paketi eklenmiştir. Böylece bir çocuk paket gönderemediğinde ağacın geri kalanı uyku konumuna yatmamakta, çocuk da hat boş kaldığında veri paketini gönderebilmektedir. MTS paketi başlatma ve sonlandırma olarak sadece aktarım öncesi ve bitişinde gönderilmektedir. Böylece kontrol paketi yoğunluğu düşük tutulmaktadır. Fakat bu paketlerin kaybolması durumu tam olarak çözümlenmemiştir.

Benzetim sonuçlarına baktığımızda, SMAC protokolüyle kıyaslarsak bu protokolün veri toplama ağaçlarında gecikmeyi önemli oranda iyileştirdiği, enerji tüketimininse fazla değişmediği görülmektedir.

2.2.3 DSMAC

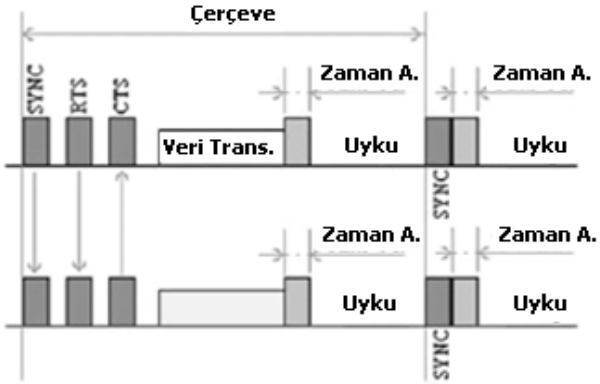
DSMAC de, DMAC gibi SMAC'teki gecikme sorunu iyileştirme amacıyla tasarlanmıştır. Bu protokoldeki temel değişiklik, SMAC'te sabit ve tüm birimlerde eşit olan uyku / dinleme çerçeve yapısının ağın yoğunluğuna göre adaptif olarak değişmesidir. Bu değişim aynı zamanda her birimde ayrı ayrı olmaktadır. Bu durum da birimlerin farklı uyku / dinleme çerçeve sürelerine sahip olmasına yol açmaktadır. Fakat çerçeve süresi kısalan birim eski dinleme süresinde hala dinlemede kaldığından süresi değişmeyen birimlerle halen kayıpsız haberleşebilmektedir. Bu da tasarımın ölçeklenebilir olmasını sağlamaktadır [10].

Birimdeki periyot süresinin adaptif değişimi yollanan paketlere zaman bilgisi eklenerek gerçekleştirilmektedir. Paketi alan birim kendisine gelen paketlerdeki zaman bilgilerinden ortalama gecikme değerini belirlemektedir. Ayrıca yolladığı paket başına harcadığı enerjiyi hesaplamaktadır. Bu değerleri eşik değerleri ile de karşılaştırarak çerçeve süresini artırmaya veya azaltmaya karar verir. Daha sonra SMAC'teki gibi SYNC paketleri yollar. Bu paketlerde yeni süre bilgisini komşularına iletir. Böylece band genişliğini arttırarak gecikmenin azalmasını sağlamış olur [10].

2.2.4 T-MAC

T-MAC, SMAC'teki dinleme süresini adaptif olarak değiştiren bir diğer protokol olarak yer almaktadır. Bu protokoldeki temel amaç ise dinleme süresini haberleşmenin olmadığı durumlarda daha da kısaltarak güç tüketimini azaltmaktır. Dinleme süresi ilk olarak çok kısa bir süre seçilerek ortamda herhangi bir paket olup olmadığına bakılmaktadır. Bu paket, RTS, CTS, veri paketi vs. olabilir. Eğer herhangi bir hareketlilik durumu sezilirse dinleme süresi normal süreye çekilerek SMAC' teki standart haberleşmenin yapılabilmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.2'de ilk kısımda normal dinleme zamanıyla haberleşmenin gerçekleştiği ikinci kısımda ise herhangi bir hareketlilik olmadığından dinleme süresinin kısa tutularak uyku konumuna geçildiği görülmektedir.

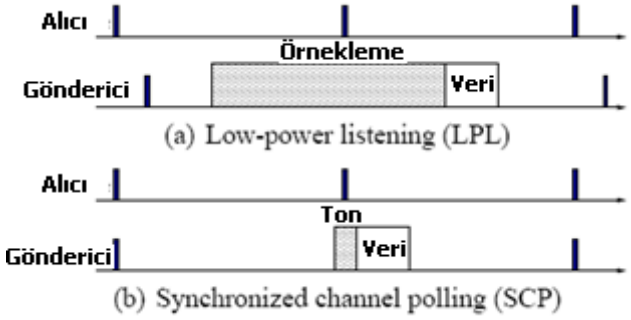
Bu protokolde ayrıca "ileride gönderme isteği" ("Future request to send - FRTS") kontrol paketi kullanılarak bir sonraki hoplamanın olacağı duyarga düğümünün hemen uykuya yatması engellenmektedir. Protokolün bir diğer özelliği de tamponu dolu olan düğümlerin önceliklerini arttırarak tampon taşmasını engellemeye çalışmasıdır [11].



Şekil 2.2 : T-MAC Protokolü

2.2.5 SCP-MAC

Tasarımın çıkış noktası mevcut protokollerden daha kısa dinleme süresine sahip olan ve değişen trafiğe adapte olabilen bir protokol oluşturmaktır. Bu amaçla başlangıç sinyali örneklemesi ("Low Power Listening – LPL" [14]) ile zaman senkronizasyonunu (SMAC) birleştirmiştir. Şekil 2.3' de görüldüğü gibi başlangıç sinyali alıcı ve vericinin senkron olduğu zaman aralığında gönderilmektedir. Bu tasarımda dinleme süresi sadece başlangıç sinyali kadar olmaktadır. Bu değer LPL ve SMAC'ten çok daha kısa bir süreye denk gelmektedir.



Şekil 2.3 : SCP-MAC Protokolü

Tasarımda SMAC'e ek olarak senkronizasyon paketlerinin veri paketiyle birlikte gönderilebilmesi eklenmiştir. Böylece senkronizasyon periyodundan daha kısa periyottaki haberleşmelerde ek olarak senkronizasyon paketi yollama ihtiyacı ortadan kalkmıştır.

Uçtan uca gecikmesini azaltma amaçlı haberleşme trafiğine adapte olabilen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yapıda alıcı duyarga düğümünün paket aldığında dinleme sıklığını arttırır. Alıcının dinleme sıklığını arttıracağını bilen verici düğüm de sonraki paketlerini bu zaman aralıklarında yollamaya başlar. Paket gelmesi durduğunda alıcı otomatik olarak eski dinleme sıklığına döner.

Duyarga düğümleri aynı zaman aralığında haberleşmeye senkron olduklarından tasarımda çarpışma olasılığı oldukça fazlalaşmaktadır. Tasarımda bu çarpışma oranını azaltma amaçlı iki fazlı yarış zaman aralığı oluşturulmuştur. Paket yollamak isteyen düğüm, ilk aralıkta rasgele bir zaman aralığında hattı dinler. Hattın boş olması durumunda alıcının dinleme aralığı süresince başlangıç sinyali yollar. İkinci aralıkta da rasgele bir süre sonra hattı dinler ve hattın boş olması durumunda başlangıç sinyali yollar. Böylece çakışma ancak iki aralıkta da aynı rasgele sürede

başlangıç sinyali yollayan düğüm olması durumunda oluşacaktır. Bu da olasılığın karesel olarak azalması demektir.

Bunların yanısıra, rastlantısal işitmeyi azaltma amaçlı MAC paketinin içerisine hedef düğüm adresi yerleştirilmiştir [12].

2.3 Zaman Paylaşımı Gerçekleştirilmemiş Protokoller

Bu yapıda ortamın kullanımı önceden tasarlanmamaktadır. Duyarga düğümü, ortamı kullanmak istiyorsa ve ortam da uygunsa kullanmaktadır. Böylelikle bu yöntemler 2.1 ve 2.2'de anlatılan yöntemlere göre ölçeklenebilirlik ve kararlılık konusunda daha avantajlıdır. Ayrıca herhangi bir senkronizasyon gerektirmediklerinden tasarımları ve donanıma yerleştirilmeleri daha basittir. Ancak bu durum güç tüketimini arttırmaktadır. Güç tüketiminin azaltılmasındaki temel mantık seyrek gerçekleşen paket aktarımı sürelerini arttırarak daha sık gerçekleşmesi beklenen dinleme sürelerinin azaltılmasıdır [6].

2.3.1 B-MAC

B-MAC protokolü iki temel yapı üzerine oturtulmuştur. Bunlardan ilki temiz kanal değerlendirmesi ("clear channel assesment" (CCA)), diğeri ise düşük güç tüketimli dinlemedir ("low power listening" (LPL)). CCA' de sinyal gürültü ayrımı daha iyi duruma getirilerek, ortamın kullanımda olup olmadığı bilgisinin daha doğru olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Böylece hem paket yollamada hem hattın dinlenmesi sırasında gereksiz zaman kayıpları azaltılmıştır. Dolayısıyla güç tüketimi de azaltılmıştır. Ortam gürültüsünün sürekli değişken, paket aktarımının ise belirli seviyede bir sinyal olmasından yola çıkarak, tek örnek alıp gürültü eşiği ile karşılaştırmak yerine birden çok örnek alıp bir filtreden geçirilerek karşılaştırılmıştır [13].

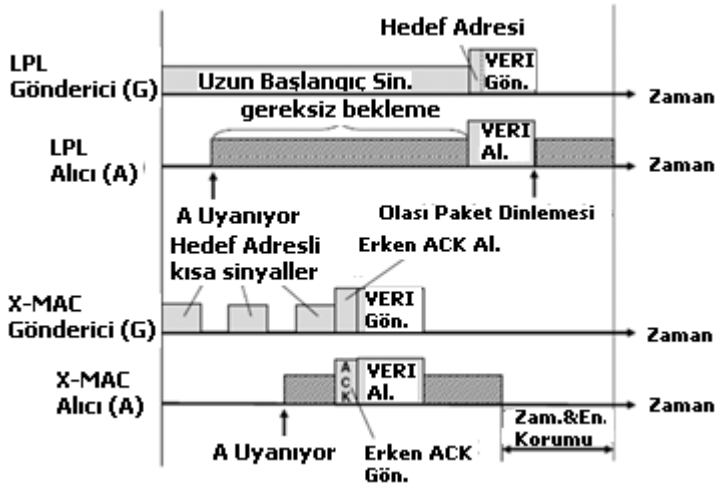
LPL [14] yapısı ise ALOHA' da kullanılan başlangıç örneklemesi ("preamble sampling") yapısına benzemektedir. Duyarga düğümü periyodik olarak uyanarak ortamın kullanılıp kullanılmadığını sınar. Eğer hat kullanılmıyorsa tekrar uykuya dalar. Aksi durumda paketi değerlendirir. Paket aktarmak istediği zamansa tekrar ortam kullanımını sorgular, eğer kullanılmıyorsa düğümlerin uyku periyodu kadar başlangıç sinyali gönderir. Böylece düğümlere paketin geleceği bilgisini kesin olarak aktarmış olur. Sinyalin sonunda paketi yollar.

B-MAC yapısı ağ katmanıyla ilgili herhangi bir özellik içermemekte, dolayısıyla bu katmanda her türlü tasarımın gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır. Fakat bu haliyle, saklı uçbirim probleminin çözümü, paketlerin parçalara bölünmesi gibi özellikleri içermemektedir [13].

Polastre ve diğerleri [13], gecikmenin hesaplanmasını deneysel yöntemlerle yapmıştır. Gecikme, duyarga düğümlerinin uyanma zamanına göre değişkenlik göstermektedir. Hoplama başına ortalama yarı çerçeve zamanı kadar olmaktadır. Adaptif S-MAC (%10 dinleme süresi) ile yapılan deneysel karşılaştırmada B-MAC'in uçtan uca gecikmesinin daha az olduğu görülmüştür.

2.3.2 X-MAC

X-MAC, B-MAC algoritmasındaki rastlantısal işitme ve aşırı uzun başlangıç sinyali problemlerini çözme amaçlı geliştirilmiştir. Başlangıç sinyali parçalara ayrılmış ve başlangıç olarak sadece basit bir sinyal yerine her parçaya hedef birimin ID numarasını içeren bir paket yollanmıştır. Sinyali alan duyarga düğümü paketteki ID numarasına bakarak yollanacak paketin kendisine ait olup olmadığını anlar. Eğer hedef kendisi değilse bir sonraki uyanma zamanına kadar uykuya döner. Ayrıca başlangıç sinyalinin parçalı olması B-MAC' teki gibi bütün bir periyodun sonunun beklenmesi zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır (Bu aynı zamanda gecikmeyi de azaltan bir özelliktir.). Paketin hedefi olan düğüm başlangıç sinyalini aldıktan sonra gönderici düğüme alındı ("ack") paketi yollar. Alındı paketini alan gönderici düğüm de göndermek istediği paketi çerçeve zamanının sonunu beklemeden dinlemede olan alıcı düğüme yollar. Buettner ve diğerleri [15], özellikle yoğunluğun ve gönderici düğümlerin arttığı ortamlarda X-MAC'in LPL'ye göre başarımın ciddi oranda arttığını belirtmektedir. Bunun sebebiyse düğümlerin LPL tasarımında tüm periyot boyunca süren preamble sinyalinin sonuna kadar ayakta kalma zorunluluğudur.



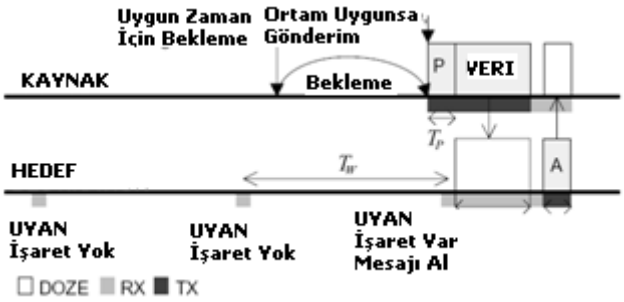
Şekil 2.4 : X-MAC Protokolü

Tasarımın bir başka özelliği ise aynı alıcıya birden fazla göndericinin olduğu veri akışlarına uygun yapısıdır. Göndericiler alıcının alındı paketini aldıktan sonra geri çekilme algoritmasını uygulayarak göndermek istedikleri paketi alıcıya gönderirler. Alıcı tarafında ise bir paket alındıktan sonra maksimum geri çekilme algoritması süresi kadar bekleme yapılır. Böylece diğer göndericilerin paketlerinin alımı da garantilenmiş olur.

2.3.3 WiseMAC

Bu tasarım başlangıç aşamasında LPL' deki olduğu gibi başlangıç sinyali ile alıcı düğümleri veri paketini alacak konuma getirir. Veri paketini alan hedef düğümler cevap olarak "alındı" paketi yollarlar. Bu "alındı" paketi verinin düzgün alındığı bilgisinin ötesinde düğümün bir sonraki örnekleme zamanı bilgisini de taşır. Böylelikle paket yollayan düğüm bir sonraki başlangıç sinyalini bu süre ve olası saat sapmalarını hesaplayarak düğüm örneklemeye başlamadan hemen önce yollamaya başlar ve düğümü uyardığından emin olduktan hemen sonra da normal veri paketini göndermeye başlar (Şekil 2.5). Böylelikle hem alıcı hem verici tarafındaki güç tüketimi azaltılmış, hem de farklı örnekleme zamanlarına sahip diğer düğümlerin başlangıç sinyalini alarak gereksiz güç tüketmeleri engellenmiş olmaktadır.

Aynı alıcıya birden fazla göndericinin olduğu durumlarda, veri paketlerinde çarpışmalar oluşabilir. Bunu engellemek için gönderici düğümler uyandırma amaçlı gönderdikleri başlangıç sinyalinden hemen sonra rasgele uzunlukta başlangıç sinyali yollarlar. En uzun süreli sinyali gönderen veri paketi gönderme hakkını kazanır.

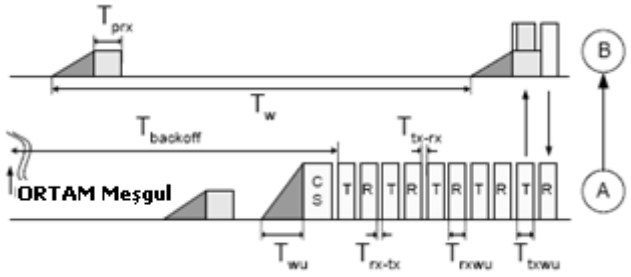


Şekil 2.5 : WiseMAC Protokolü

Bu tasarımın bir başka özelliği de gönderici veri paketiyle birlikte başka paket gönderip göndermeyeceğini "devam biti" ("more bit") ile alıcıya bildirir. Böylece alıcı "uyandım" paketini gönderdikten sonra dinlemeye devam ederek bir sonraki paketi alabilir. Böylelikle hem gecikme azaltılmış olmakta hem veri paketlerin parçalanabilmesi sağlanabilmektedir [16].

2.3.4 CSMA-MPS

STEM [17] ve WiseMAC tasarımlarından yararlanılarak oluşturulmuştur. WiseMAC' de olduğu gibi düğümler, periyodik olarak bir süre uyanarak ortamı dinleyerek örnek alır. Veri yollamak isteyen düğüm geri çekilme algoritmasını uyguladıktan sonra STEM tasarımındaki gibi aralıklı olarak başlangıç sinyali gönderir. Ara zamanlarda ise onay paketinin gelmesini bekler. Onay paketini aldıktan sonra hedefe veri paketini yollar (Şekil 2.6). Eğer gönderilecek veri 2 sekizliden ("byte") küçükse başlangıç sinyali içerisinde de aktarılabilir [18].



Şekil 2.6 : CSMA-MPS Protokolü

Bu tasarımda da WiseMAC'te olduğu gibi "parça biti" ("fragment bit") kullanılmıştır. Yapının WiseMAC'e göre avantajı başlangıç sinyalinin parçalı hale getirilmesi ile iki düğüm arasında ilk haberleşmenin daha çabuk olmasının sağlanmasıdır. Tasarım paket biçiminde başlangıç paketi gönderimiyle X-MAC ile de benzerlikler taşımaktadır. Fakat hedef düğümünün bir sonraki uyanma zamanına uygun başlangıç sinyalini çıkarma özelliği (WiseMAC ile ortak yönü) ile

ayrılmaktadır. X-MAC'de böyle bir hesaplama yapılmamakta, ortam uygunsa gönderici düğüm başlangıç sinyalini yollamaktadır.

2.4 Sonuç

Tüm tasarımlara baktığımızda temel hedefin güç tüketiminin düşük tutulmasının yanında diğer başarım ölçütlerinin arttırılması olduğu görülmüştür. Tez kapsamında gerçekleştirilecek tasarım açısından baktığımızda ise herhangi bir senkronizasyon işlemi gerektirmeyen LPL tabanlı bir tasarımın uygun olacağı düşünülmüştür. Bu tasarımlar zaman içerisinde LPL → BMAC → X-MAC olarak gelişim göstermişlerdir. Diğer yandan CSMA-MPS tasarımı WiseMAC protokolündeki sanal senkronizasyon yöntemi ile X-MAC tasarımını birleştirerek yeni bir tasarım ortaya koymuştur. Bu özellik tez kapsamında gerçekleştirilen MC-PSMAC protokolünde de bulunmaktadır.

3. MEVCUT ÇOK KANALLI MAC KATMANI PROTOKOLLERİ

İkinci bölümde tek kanallı protokoller incelenmiş olmasına karşın literatürde çok kanallı MAC katmanı protokolleri de vardır. Tezde ana hedef çok kanallı bir MAC protokolü tasarlamak olduğundan bu protokoller de incelenmiştir. Bu protokollerden güncel olarak literatürde yer alanlar aşağıda açıklanmıştır.

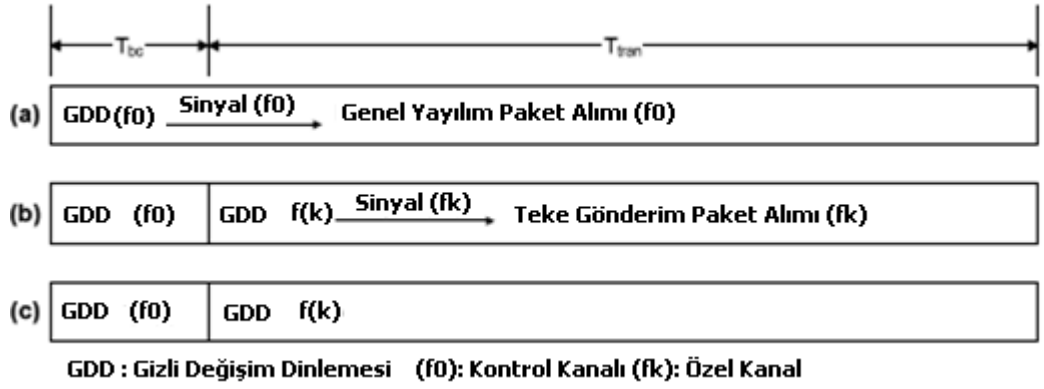
3.1 MMAC

Telsiz duyarga ağlarındaki ilk çok kanallı protokol örneğidir. Frekans kanallarının dağıtımı ve ortamın kullanımı tasarımının iki temel taşıdır. Frekans kanallarının dağıtımı 4 şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

- Düğüme Has Kanal Atama ("Exclusive Frequency Assignment"): İki hoplama içerisindeki tüm düğümler birbirine ID bilgilerini genel yayılım biçiminde aktarırlar. ID bilgisine dayanarak her düğüm farklı frekans kanalı seçer. Sonuç olarak her düğüme has bir kanal seçilmiş olur. Bu yapının sağlanması için her bir düğüme yetecek kadar frekans kanalı olmak zorundadır. Bu durum genel yayılım için sorun yaratmaktadır.
- Dengeli Seçim ("Even-Selection"): Düğüme has kanal atama yapısına benzer. Fakat tüm kanallar seçilmişse, en az seçilmiş kanalı seçerek yoğunluğun tüm kanallara yayılmasını sağlar.
- Kulak Kabartma ("Eavesdropping"): Bu yapı dengeli seçim yapısına geri çekilme zamanlayıcısı eklenmesi ile sağlanmıştır. Dengeli seçimde olduğu gibi kanal seçimine hemen karar verilmemekte rasgele bir geri çekilme süresi sonrasında ortam dinlenmekte ve daha sonra en az seçilmiş olan kanallardan biri seçilmektedir. Böylece birden fazla düğümün aynı anda aynı kanalı seçerek o kanalda yoğunlaşmanın önüne geçilmektedir. Fakat bu seçimin handikapı geri çekilme sırasında gelen bilginin sadece bir hoplama öteden ibaret olmasıdır.

- Örtülü Uzlaşı (“Implicit Consensus”): Bu seçimde de düğüme has kanal atamada olduğu gibi tüm iki hoplama ötedeki düğümlerin ID bilgileri düğümlerde toplanır. Daha sonra Bao ve Garcia-Luna-aceves’in [19] belirttiği sözde rasgele üreticinin kullanıldığı bir algoritmayla kanallar radyolara dağıtılır.

Ortamın kullanımına gelecek olursak, zaman T_{bc} ve T_{tran} olarak iki kısıma bölünmüştür. Duyarga düğümleri T_{bc} zaman aralığında genel yayılım için çekişme yapmakta, T_{tran} zamanında ise aynı kanalı kullanan düğümler teke gönderim “unicast” paketleri için çekişme yapmaktadırlar. Şekil 3.1’ de sadece paket dinlemesi yapan bir düğümün davranışı görülmektedir. A şıkkında genel yayılım paketi alımı sonrası davranış görülmektedir. Burada f_o frekansında kalıp genel yayılım paketi alınmaktadır. B şıkkında ise genel yayılım paketi gelmemekte sonuç olarak düğüm teke gönderim paketlerini aldığı kendi frekans kanalına geçmektedir. Daha sonra teke gönderim paketi almaktadır. C şıkkında ise ne genel yayılım ne de teke gönderim paketi almaktadır. Dolayısıyla teke gönderim paketi alabileceği süre geçtikten sonra uykuya yatmaktadır.



Şekil 3.1 : MMSN Paket Dinleme

Şekil 3.2’ de genel yayılım paketi aktarımı görülmektedir. a şıkkında geri çekilme işlemi sonunda ortamda genel yayılım paketinin olduğu sezilmektedir. Dolayısıyla genel yayılım paketi göndermekten vazgeçilip bu paket alınmaktadır. b şıkkında ise ortam herhangi bir paket sezilmediğinden genel yayılım paketi gönderilmektedir.



Şekil 3.2 : MMSN Genel Yayılım Paketi Aktarımı

Şekil 3.3' te teke gönderim paket aktarımı yapacak düğümün davranışı görülmektedir. a şıkkında genel yayılım paketinin geldiğini görerek bu paketi almaktadır. b şıkkında ise kendi kanalında dinleme yaparken kendisine genel yayılım paket geldiğini fark eder. Dolayısıyla bu paketi alır. c şıkkında ise paket göndermek istediği düğüme başka birinin paket attığını fark eder. Dolayısıyla sadece kendi frekansında dinleme yapmaya devam eder. Sonuç olarak kendisine paket gelirse bu paketi alır. Aksi durumda yani kendisine teke gönderim paketi gelmiyorsa d şıkkında olduğu gibi uykuya yatar. e şıkkında ise ne kendi kanalında ne de hedefte paket sezmemektedir. Dolayısıyla hedefe paketini yollar.



Şekil 3.3 : MMSN Teke Gönderim Paketi Aktarımı

Tasarımda teke gönderim paket atacak olan düğüm, hem paket aktarımı yapacağı düğümün kanalına geçmek zorunda öte yandan kendi kanalında da dinleme yapmak zorundadır. Bunu sağlamak için gizli değişim dinlemesi ("toggle snooping") denilen yapı tasarlanmıştır. Bu yapıda düğüm periyodik olarak frekansını iki kanal arasında değiştirerek yukarıda belirtilen paket yollama / dinleme işlemini gerçekleştirebilir [20].

3.2 HYMAC

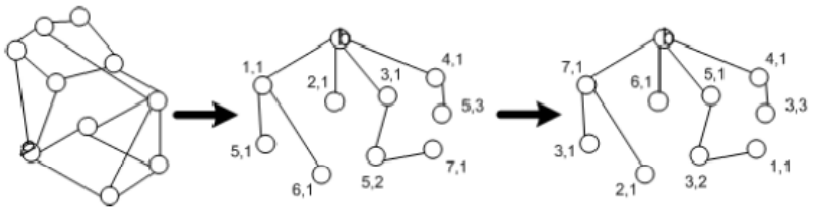
HYMAC[21]' de, bir toplayıcıya sahip veri toplama ağacına özel, başarımı yüksek bir TDMA / FDMA protokolü gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle ana kanal TDMA yapısına göre zaman parçalarına bölünmüştür. Bu parçalar düğümlere tahsis edilmiş paylaştırılmış dilimler ("slot") ve toplayıcıya HELLO paketinin gönderildiği ve toplayıcıdan SCHEDULE paketinin alındığı çekişme dilimleri olarak ikiye bölünmüştür. Bir düğüm sisteme dahil olduğunda HELLO paketini selbasma ("flooding") yoluyla yayar. Bu paketi alan bu düğümün komşuları komşuluk bilgisini güncelleyerek bu paketi tekrar yollar. Sonuç olarak düğümlerden gelen HELLO paketleri toplayıcıya kadar ulaşır. Toplayıcı HELLO paketlerinden düğümlerin dizilişi ve komşuluk ilişkileri hakkında bilgi sahibi olur. Daha sonra bir önce genişlik arama ("breadth first search") algoritmasıyla düğümlere en iyi başarım için kullanmaları gereken zaman aralığı ve frekans kanalını bildirir.

Algoritma aşağıdaki adımlarla çalışır:

- Algoritma öncelikle x düğümüne varsayılan zaman ve frekansı atar.
- Daha sonra bu düğümle aynı seviyedeki bir ve iki hoplama yapan düğümler kontrol edilir.
- Eğer varsa aynı anneye sahip olup olmadıklarına bakılır.
- Aynı anneye sahiplerse x düğümünün zaman dilimi bir arttırılır. Böylece x düğümü bir sonraki zaman aralığında paketi anne düğüme aktarabilecektir.
- Farklı annelere sahiplerse x düğümünün frekans kanalı bir arttırılır. Böylece iki düğüm de aynı zaman aralığında anne düğümlerine paket gönderebilecektir.
- Aynı seviyedeki düğümler bitince bir üst seviyeye geçilir. Zaman aralığı ise bir önceki seviyeden bir fazla olarak seçilir.

Böylelikle çoklu kanal kullanımı, tüm ağaç seviyelerinde zaman dilimlerinin minimum seviyede arttırılmasını sağlamış olmaktadır. Şekil 3.4' te yukarıda belirtilen algoritmanın bir ağaca uygulanması görülmektedir. Sayılardan ilki zaman dilimi ikincisi frekans kanalıdır.



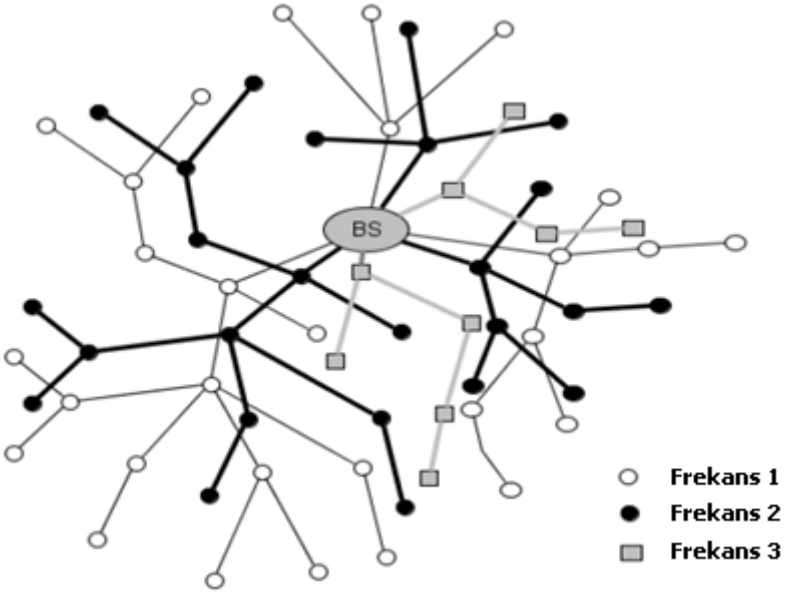
Şekil 3.4 : HYMAC Sıralama Algoritması

3.3 TMCP

Bu protokolde, düğüm başına bir frekans kanalı atamak yerine Şekil 3.5'deki gibi tek bir toplayıcıya sahip birbirine ortogonal ağaçlar yaratılmaktadır. Wu ve diğerleri [22] de böyle bir tasarımın diğer çok kanallı tasarımlara göre:

- Daha az frekans kanalı gerektireceği
- Zaman senkronizasyonu gerektirmeyeceği
- Çalışma esnasında radyonun kanalları arasında geçiş gerektirmeyeceği, dolayısıyla kanallar arası geçiş maliyetinin kalkacağı

belirtilmiştir. Ayrıca tek kanallı tasarımlara göre avantajı ise yoğunluğu yüksek ağlarda çakışmaların ve yoğunluktan dolayı beklemelerin azalması olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.5 : TMCP Protokolü

Şekilden de anlaşılacağı üzere tasarım BS ile belirtilen toplayıcı düğümüne doğru yakınsayan yayımlama veri akışı için uygundur. Fakat düğümler arası genel yayılım paketler için sorun teşkil etmektedir.

Tasarım üç ana parçadan oluşmaktadır. Kanal Bulma, Kanal Atama ve Veri Haberleşmesi.

- Kanal Bulma: İki düğüm radyonun sahip olduğu kanallarda (Örneğin CC2420 yongasında 16 kanal bulunmaktadır.) birbirine paket yollayarak hangi kanalların kullanım için uygun olduğunu belirler.
- Kanal Atama: Bu kısımda kanal bulma kısmında tespit edilmiş kanal sayısı kadar alt ağaç yaratılmaktadır. Sonuç olarak ağaçlar arasında çakışma kanal bulma sırasında bulunan ortogonal kanallar sayesinde oluşmamaktadır. Fakat aynı ağaç içerisinde çakışma problemi halen devam edebilmektedir. Bu yüzden ağaçların seçimi ağaç içi çakışmayı minimize edecek biçimde tasarlanması gerekmektedir. Bu problemin Referans 22'de NP karmaşıklığına sahip PMIT problemi olduğu belirtilmiştir. Çözüm olarak ise bir açgözlü "greedy" algoritması tasarlanmıştır [22].
- Veri Haberleşmesi: Bu kısımda ağaçlar oluşturulmuş olduğundan normal çalışma gerçekleştirilmektedir. Veri aktarımı yapacak düğüm toplayıcıya paketini aktarır. Bunun yanında toplayıcının aynı anda birden fazla kanalı dinlemesi gerektiğinden kanal kadar radyoya sahip olması zorunludur.

3.4 "A Practical MAC Protocol for WSN"

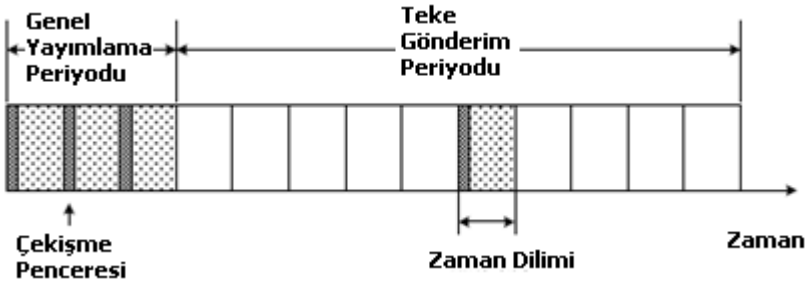
TMCP ile benzer tasarıma sahiptir. Kanal atama işlemi geri beslemeli kontrol teorisi ile sağlanmaktadır. Başlangıçta tüm düğümler aynı kanalı kullanmakta gerekmedikçe diğer kanallar kullanılmamaktadır. Böylece çok kanallı yapının gerekmediği durumlarda ek maliyet getirmesi engellenmiş olmaktadır.

Düğümler toplam paket gönderimi ve toplam paket kayıplarını komşularına yollarlar. Tüm komşularından gelen paketleri birleştiren düğüm belli bir eşikle sonucu karşılaştırır. Sonuç eşikten düşük çıkarsa kanalın verimsiz olduğunu yeni kanala atlamanın başarımı arttıracağına karar verir ve yeni kanala geçer. Düğümlerin kanallar arası geçişleri Le ve diğerleri [23] tarafından "K-way cut" problemi kapsamında değerlendirilerek çözülmüştür.

3.5 Y-MAC

Protokolün temeli TDMA protokolüne dayanmaktadır. Ana kanal, Şekil 3.6' da gösterilen eşit zaman parçalarına bölünmüştür. Her parça da genel yayılım ve teke yayılım olarak iki kısıma ayrılmıştır. Protokolde paket alımı şu şekilde gerçekleşmektedir:

- Genel yayılım periyodunda tüm düğümler dinleme için uyanmaktadır. Genel yayılım paketleri içerisinde paketin gönderileceği düğümün adresi yer almaktadır.
- Düğümler genel yayılım paketleri içerisinde kendilerine gönderilecek bir paket görmezlerse bir sonraki genel yayılım periyoduna kadar uykuya yatmaktadırlar.
- Aksi durumda tekrar uykuya yatarlar fakat kendilerine tahsis edilmiş teke yayılım zaman aralığında tekrar uyanarak aktarılacak paketi alırlar.



Şekil 3.6 : Y-MAC Çerçeve Yapısı

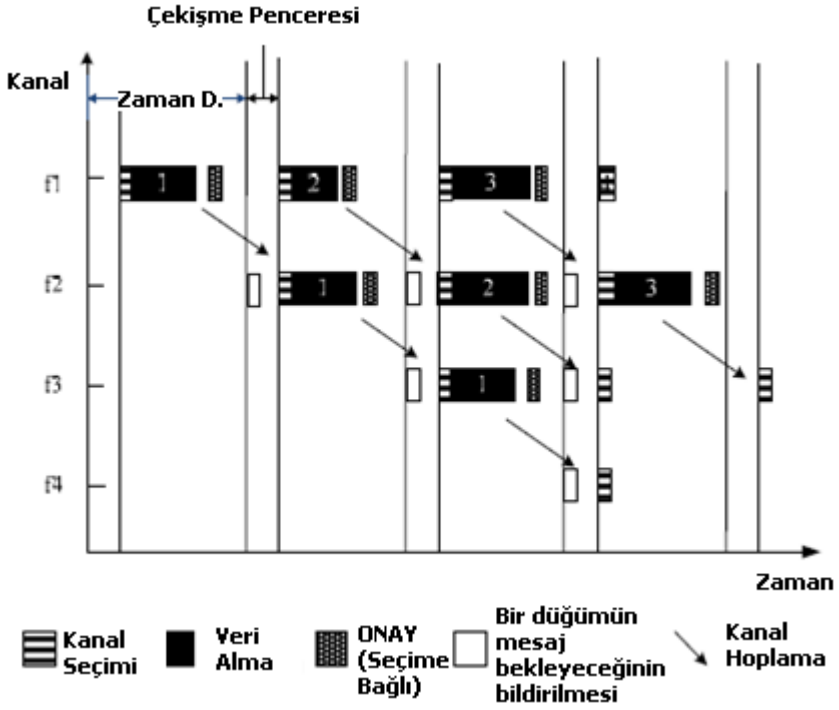
Paket yollama ise şu şekilde gerçekleşmektedir.

- Paket atacak düğümler genel yayılım zaman aralığında rasgele geri çekilme bekleme süresinden sonra ortamı dinlerler.
- Ortamı kazanamazlarsa bir sonraki genel yayılım zaman aralığında tekrar denerler.
- Ortam boş ise ortamı kazanarak paketi göndermek istedikleri düğümlerin adresini yazarak, düğümün teke yayılım zaman aralığına kadar beklerler.
- Bir duyarga düğümüne birden çok düğüm paket göndermek isteyebilir. Böyle bir durumda çakışmayı engellemek için genel yayılımda belirtilen çekişme işlemi teke yaılım periyodunda da aynı şekilde tekrarlanır.

Şimdiye kadar bahsedilen yapı LMAC [24]' de belirtilen TDMA tabanlı tek kanallı MAC yapısıdır. Bu yapının band genişliğinin çok sayıda veya büyük miktarda paketin aktarılması gereken durumlarda denklem 3.1'deki gibi düştüğü belirtilmektedir [25].

$$\frac{ToplamBand\,Genisligi}{Duy\,\arg\,aSayisi} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Band genişliğini arttırmak içinse şekil 3.7'deki gibi diğer kanallara geçişin yapıldığı tasarım verilmiştir. Bu yapıda düğüm ana kanalda paket alımını gerçekleştirdikten sonra bir sonraki kanala atlayarak geri kalan paketleri almayı beklemektedir. Aynı şekilde bu düğüme paket aktaracak düğümler de diğer kanala geçerek bir sonraki çerçeve zamanını beklemeye gerek kalmadan bu kanalda paket aktarabilmektedirler. Düğümlerin hangi kanala atlayacakları atlama dizisi algoritması ile belirlenmektedir [25]. Protokoldeki en büyük sorun toplayıcı düğümündeki yoğunlaşmanın engellenememesidir.



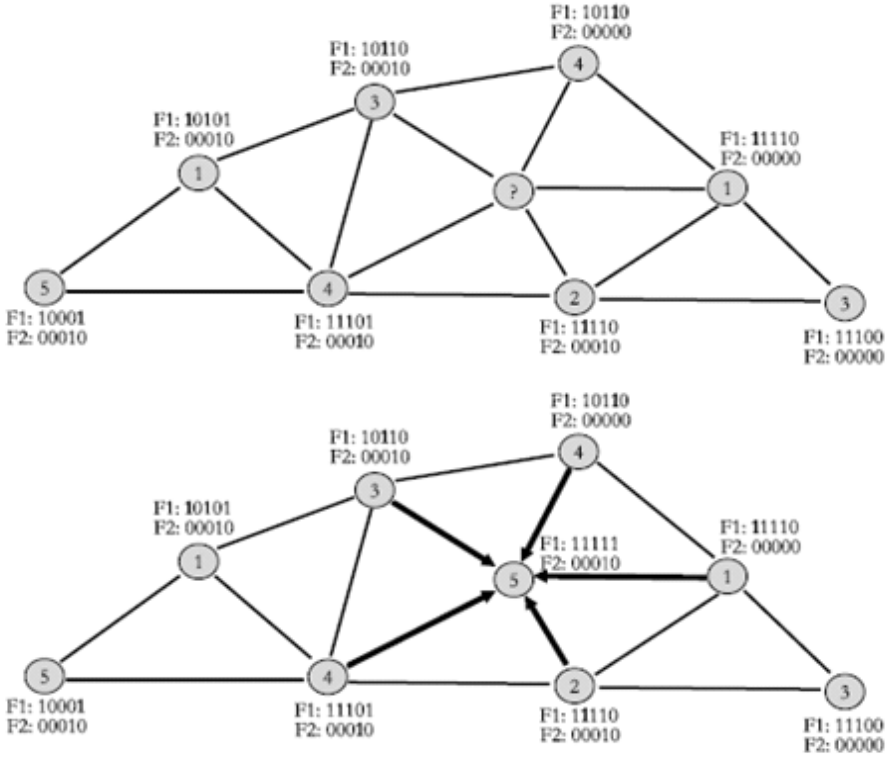
Şekil 3.7 : Y-MAC Hoplama Mekanizması

3.6 MC-LMAC

Bu protokol de Y-MAC'de olduğu gibi LMAC [24] tasarımına dayanmaktadır. Fakat Y-MAC'ten farklı olarak zaman bölmelerinin alıcılara göre değil aktarıcılara göre

ayarlanmasıdır. Bu da düğümlerin her zaman bölmesinde uyanarak göndericinin kendilerine paket gönderip göndermeyeceğini dinlemesi demektir. (LMAC'deki yapı aynen aktarılmıştır.) Bu yapının avantajı ise göndericinin aynı anda birden fazla düğüme paket atabilmesidir. Fakat genel yayılım işlemi için ayrı zaman bölmesi gerekmektedir.

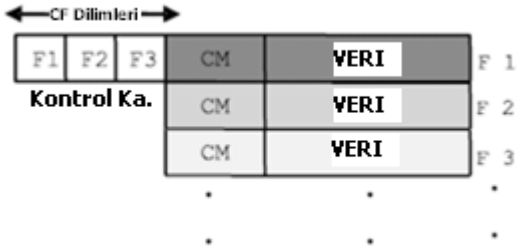
Bir diğer temel fark ise çok kanallı yapının LMAC üzere inşa edilmesi biçimidir. MC-LMAC' de kanalların kullanılması zaman bölmelerinin tükenmesi üzerine gerçekleştirilmektedir. Bir diğer çözüm zaman bölmelerinin arttırılması şeklinde gerçekleştirilebilirdi. Fakat bu durum Y-MAC'de de belirtildiği gibi düğüm başına düşen band genişliğini azaltmaktadır. Şekil 3.8' de yeni bir düğümün eklenmesi görülmektedir. "?" işaretli düğüm yeni eklenmektedir. Komşulardan her kanalın zaman bölmelerinin kullanım bilgisi bu düğüme gelmektedir. "1" zaman bölmesinin kullanımda "0" ise boş olduğunu belirtmektedir [26].



Şekil 3.8 : MC-LMAC Yeni Düğüm Eklenmesi

Şekil 3.8'de soru işaretli düğüm kendisine gelen bilgilerden yola çıkarak F2'den boşta olan 5. zaman dilimini seçmiştir. Düğümlerin paket aktaracakları düğümü bilgilendirmeleri ise şu şekilde gerçekleşmektedir:

- Şekil 3.9' da paket atacak bir düğümün zaman bölmesi belirtilmiştir. Standart LMAC'e ek olarak daha kısa sürelere sahip olan "CF Slots" zaman bölmecikleri yer almaktadır. Kullanılan her kanal için bir tane olan bu zaman bölmesinde, o kanalı kullanan düğüm hedeflediği düğümün adresini belirtir.
- Bütün düğümler "CF Slots" zaman aralığında kendilerini bu düğüm tarafından paket gönderilip gönderilmediğine bakar.
- Kendilerine herhangi bir paket gelmiyorsa bir sonraki düğümün "CF Slots" 'una kadar uykuya yatarlar.
- Eğer hedef kendileriyse belirtilen frekans kanalına geçerek paketin gelmesini beklerler.



Şekil 3.9 : MC-LMAC Zaman Bölmesi

Tasarımın en önemli problemi aynı düğüme, aynı zaman dilimi - farklı frekans kanalını kullanan iki düğüm paket göndermek isterse alıcının bunlardan sadece birini seçmek zorunda kalması, diğer vericinin bir sonraki zaman çerçevesini beklemesidir. Ayrıca zaman bölmelerinin vericiye göre dağıtılması radyo biriminin çok fazla açılıp kapanmasına yol açmaktadır. Radyonun açılıp-kapanması sırasında geçen fazladan süre de hem güç tüketimi hem gecikme açısından maliyeti arttırmaktadır.

3.7 "Self Organizing, Collision Free, Multi-Channel Convergecast"

Voigt [27], DMAC [8] veri toplama ağacına dayanan bir tasarım gerçekleştirmiştir. Bu tasarımda girişimler yüzünden kayıpların oluştuğu belirtilmiş ve bunu engellemek için çok kanallı yapı tasarıma eklenmiştir. Tasarım IEEE802.15.4 fiziksel standartının üzerine kurulmuştur. Dolayısıyla frekans kanalları olarak 2.4Ghz bandındaki 16 kanal kullanılmıştır. Protokolde standart DMAC algoritması işlemekte, DMAC algoritmasında yer alan ACK paketlerinde alıcı bir sonraki paket alımını hangi kanaldan yapacağını çocuklarına duyurmaktadır. Veri gönderecek çocuk düğümler de belirtilen kanalda paketleri göndermektedirler.

3.8 Sonuç

Bu kısımda telsiz duyarga ağları için tasarlanmış çok kanallı MAC protokolleri incelenmiştir. Tasarımların genelinde TDMA/FDMA hibrit yapıları kullanılmış geri kalanında ise ağaç yapısında frekans kanallarına göre gruplama gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda temel başarım kazanımı transfer oranının arttırılmasıdır. Tasarımlar özellikle tek radyo, çok kanallı düşük güç tüketimine sahip radyo yongalarıyla yapılacak gerçeklemelere uygundur (Örnek: CC1100, CC2420). Çok radyolu ve yüksek güç tüketimli radyolar için uygun değildir.

Tasarımların çoğu güçlü senkronizasyon mekanizmalarına ihtiyaç duymaktadır. Yapılan incelemede herhangi bir CSMA/FDMA hibrit yapısına rastlanmamıştır. Oysa incelemeler ışığında vardığımız sonuç, böyle bir yapının hem çok kanallı olmanın yararlarını kullanabilecek olması, hem senkronizasyon ihtiyacını ortadan kaldırabilecek olması nedeniyle etkin bir tasarım olacağı yönündedir.

4. MC–PSMAC PROTOKOLÜ

MC-PSMAC (Multi Channel - Preamble Sampling MAC), düşük güç tüketimini öncelikli yapan, bunun yanında yüksek veri aktarımı gerektiren uygulamalarda gecikmenin azaltılması ve veri transferi oranının yükseltilmesini sağlayan çok kanallı bir MAC protokolüdür. Bu kısımda tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen MC–PSMAC protokolü detaylı olarak açıklanmıştır.

4.1 Protokolün Oluşturulmasında Dikkat Edilen Hususlar

- Öncelikle protokolde güç tüketimini göz önüne alan bir tasarımın gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Telsiz duyarga ağlarındaki uygulamalarda duyarga düğümlerinin uzun süre herhangi bir haberleşme yapmadığını, seyrek periyodik zamanlarla ya da bir durumun tetiklemesi koşullarında başlayan haberleşmenin yoğun olarak sürdüğünü görürüz. Dolayısıyla haberleşmenin gerçekleşmediği bu zaman aralıklarında güç tüketimini en azda tutmak önemli olmaktadır.
- Duyarga ağları düşük maliyetli hassas olmayan saat devrelerine sahiptirler. Bu yüzden senkronizasyon gerektiren tasarımlarda sık aralıklarla toplayıcı düğümden senkronizasyon paketlerinin aktarılmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu haberleşme, güç tüketimine ve tasarımın karmaşıklaşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden senkronizasyon işlemi gerektirmeyen bir tasarım önemlidir.
- Zaman paylaşımı gerçekleştirilmemiş yani CSMA tabanlı tasarımlarda saklı uçbirim (“hidden terminal”) ve korunmasız uçbirim (“exposed terminal”) problemleri RTS ve CTS kontrol paketleri ile çözülmektedir. Fakat bu paketlerin yollanması hem güç tüketimini hem gecikmeyi arttırmaktadır. Ayrıca düğümlerin de kontrol paketlerinin gönderimi sırasında dinleme konumunda olması gerekmektedir. Dolayısıyla çok kanallı yapının avantajını

kullanarak bu paketlere ihtiyaç duymadan yukarıda belirtilen problemlere çözüm getiren bir yöntem belirlenmiştir.

- Özellikle yüksek yoğunluklu ağlarda aynı anda merkeze birden fazla düğümden paket gönderimi gerçekleştirilmek istenmektedir. Bunun sonucunda da düğümlerin telsiz ortamın kullanımı için birbirini beklemesi gerekmektedir. Daha da kötüsü bu yoğun ortamda çarpışma sonucu paket kayıplarının da artmasıdır. Tüm bunlar hem güç tüketimini arttırmakta hem paketlerin merkeze ulaşmasını geciktirmektedir.
- Piyasada yoğun olarak kullanılan radyo yongaları (Örnek: CC2420 [28]) paket haberleşmeye uygun durumdadır. Ayrıca bu paketlere hedef adresi de eklenebilmektedir. Dolayısıyla bu özellikleri kullanan bir protokol tasarlayarak güç tüketimi ve gecikme azaltılabilir.
- WiseMAC [16] tasarımında kullanılan yöntem sayesinde paket yollamak isteyen düğümün ortamda gereksiz uzunlukta başlangıç sinyali yollaması engellenmektedir. Böylece hedef düğümden farklı uyanma zamanına sahip düğümlerin başka düğümlerden paket alması engellenmemiş olmaktadır.

Bütün hususları birleştirdiğimizde en uygun protokolün senkronizasyona ihtiyaç duymayan bir CSMA / FDMA tasarımı olduğuna karar verilmiştir. Bu amaçla WiseMAC [16], X-MAC [15], CSMA-MPS [18] ve Y-MAC [25] tasarımlarından yola çıkılarak yeni ve özgün bir MAC protokolü oluşturulmuştur.

4.2 Protokolün Tasarım Temelleri

Bu kısımda adım adım protokol tasarımının parçaları anlatılmıştır. Yakınsayan yayımlama ve yerel yayımlama haberleşme örüntüsünde haberleşmenin kurulması aşaması kontrol kanalında çekişme tabanlı (“contention-based”) yapıya sahip olmaktadır. Gerçek veri haberleşmesi ise düğümlerin diğer kanallara geçerek bu kanallarda haberleşmeyi gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. Haberleşme işlemi sona eren düğümler tekrar kontrol kanalına geçmektedirler. Genel yayımlama işlemi ise tüm komşu düğümlere paket aktarımı gerektirdiğinden baştan sona kontrol kanalında gerçekleştirilmektedir.

4.2.1 Uyku / dinleme çerçeve yapısı

Giriş kısmında belirtildiği gibi MAC protokolü tasarımında öncelikli ölçüt güç tüketiminin en aza edilmesi olmaktadır. MC-PSMAC protokolünün dayandığı çekişme tabanlı yapılarda temel güç tüketimi ortamın herhangi bir paket gelip gelmediğini algılaması için gerekli olan atıl dinleme süreci içerisinde geçmektedir. Mevcut radyo yongalarını incelediğimizde dinleme ve gönderim aşamalarında yongaların çektiği akım hemen hemen aynı olmaktadır. Öte yandan uyku konumunda çekilen akım çok düşüktür. Örneğin CC2420 [28] yongasının beş konumda çektiği akımlar çizelge 4.1' de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : CC2420 Akım Değerleri

Konum	Akım Değeri (mili amper)
Gönderme	17.4
Dinleme	18.8
Uyku Seviye 1 (Atıl)	0.42
Uyku Seviye 2 (Kristal Osilatör Kapalı)	0.02
Uyku Seviye 3 (Gerilim Regülatörü Kapalı)	0.00002

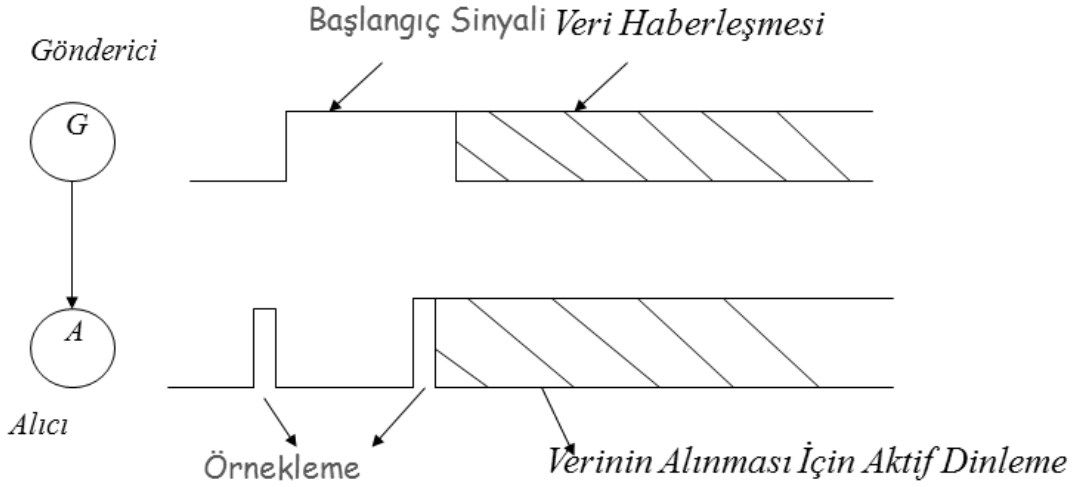
Bu sonuçlardan yola çıkılarak mevcut CSMA tabanlı protokollerde olduğu gibi sürekli ortamın dinlenmesi yerine uyku / dinleme çerçeve yapısına geçilmiştir. Şekil 4.1' den görülen bu yapıda dinleme zamanı düğümün genel yaşam sürecinde daha küçük bir zamanı oluşturduğundan dinlemeden kaynaklanan güç tüketimi de azalmaktadır. Örneğin uyku / dinleme oranını 9 / 1 olarak ayarlarsak dinlemeden kaynaklanan tüketim gerçek değerinin %10 'nuna düşecektir. Bunun yanında yonganın uyku konumundan dinleme konumuna geçişinde anlık yüksek akım çekme durumu söz konusu olmaktadır [6]. Bu yüzden zaman parametrelerinin belirlenmesinde uyku / dinleme oranının yanında, konumlar arası geçiş sıklığına da dikkat etmek gerekmektedir. Ayrıca çizelge 4.1'de görüleceği üzere yongaların farklı uyku seviyeleri olabilmektedir. Bu konumlar arasındaki geçiş sürelerini de dikkate alarak en uygun uyku seviyesi seçilmelidir.



Şekil 4.1 : Uyku / Dinleme Çerçeve Yapısı

4.2.2 Başlangıç sinyali

Uyku / dinleme çerçeve yapısından ve senkronizasyon işleminin yapılmamasından dolayı gönderici düğümler hedef düğümün ne zaman dinleme konumuna geçtiği hakkında herhangi bir bilgiye sahip olmamaktadır. Dolayısıyla gönderici hedef düğüme gerçek veri aktarımına başlamadan önce bir başlangıç sinyali ile haberleşmenin başlayacağını belirtmesi gerekmektedir. ALOHA, LPL [14] ve BMAC[13] protokollerinde kullanılan bu yaklaşım MC-PSMAC protokolünde de kullanılmıştır. Şekil 4.2' de bu yaklaşımın nasıl çalıştığı görülmektedir.



Şekil 4.2 : Başlangıç Sinyaliyle Gönderici ve Alıcı Anlaşması

Düğümler uyku / dinleme çerçeve yapısında dinleme zamanları geldiğinde ortamdan örnekleme alarak herhangi bir sinyal olup olmadığını sınarlar. Eğer bir sinyal sezinlerseler bir haberleşmenin başlayacağını algılayıp dinleme konumunda kalırlar. Aksi halde tekrar uyku konumuna dönerler. Paket göndermek isteyen bir düğüm ise tüm çerçeve yapısı süresince ortama bir başlangıç sinyali gönderir. Böylece hedefi olan düğümün sinyali aldığını garantiler. Süre sonunda da gerçek veri haberleşme süreci gerçekleştirilir.

4.2.3 Paket türü başlangıç sinyali

X-MAC[15] ve CSMA-MPS[18] protokollerinde tüm çerçeve süresi boyunca başlangıç sinyali göndermek yerine parçalı başlangıç paketi gönderimi gerçekleştirilmiştir.MC-PSMAC protokolünde de bu yaklaşımından esinlenilmiştir. Şekil 4.3' de görülen bu yapıda gönderici, içerisinde hedef düğümün adresi bulunan UYAN isimli başlangıç paketini göndermektedir. Daha sonra belli bir süre hedef düğümden cevap paketinin gelmesini bekler. Eğer hedef düğüm dinleme sürecinde ise paketi alır ve cevap olarak UYANDIM paketini gönderir. Cevabı alan gönderici düğüm veri haberleşmesine çerçeve süresinin sonuna kadar beklemeden hemen başlar. Aksi halde hedef düğüm hala uyku konumundadır. Gönderici tekrar başlangıç paketini gönderir. UYAN paketinin gönderilmesi işlemi hedef düğümün UYANDIM paketini yollamasına kadar sürer.



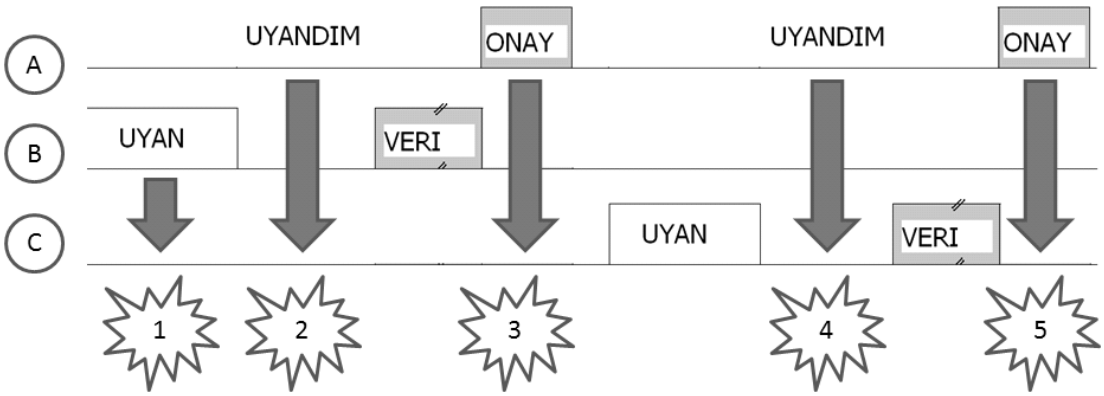
Şekil 4.3 : Paket Türü Başlangıç Sinyali

Bu yaklaşımın getirdiği avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

- Gecikmenin Azaltılması : Çerçeve süresinin sonuna kadar beklemeden hedef düğüm uyandığı anda haberleşme başlayabilmektedir.
- Rastlantısal İşitmenin Engellenmesi : Paketin içeriğinde yer alan hedef adresi sayesinde paket ile ilişkili olmayan düğümler tekrar uyku konumuna dönebilirler.
- Kulak Kabartma Özelliği : Aynı hedefe başka bir düğüm de paket gönderecekse haberleşme sürecini izleyerek haberleşme sona erdikten hemen sonra kendi paketini de hedefe gönderebilir. Bir sonraki kısımda kulak kabartma detaylı olarak anlatılmıştır.

4.2.4 Kulak kabartma

Bu yöntem X-MAC [15] algoritmasından yola çıkılarak düzenlenmiştir. Şekil 4.4' te kulak kabartma özelliği görülmektedir. A düğümü hedef düğüm, B göndericisi ortamı kazanan gönderici düğüm, C düğümü ise yine A düğümüne paket yollamak isteyen başka bir düğüm olsun.



Şekil 4.4 : Kulak Kabartma Özelliği

C düğümünde, öncelikle MAC katmanına ağ katmanından belli bir hedefe paket göndermesi için komut gelir. Bunun üzerine ortamı dinleyen düğüm ortamın kullanılıyor olduğunu görür. Bu konumda doğrudan geri çekilme algoritmasını gerçekleştirmek yerine ortamda hedef ile ilgili bir paket olup olmadığını dinlemeye başlar. Eğer 1 numaralı aşamada olduğu gibi hedefe başka bir düğüm tarafından UYAN paketi aktarılıyorsa ortamı dinlemeye devam eder. Hedef dinleme periyoduna geçtiğinde 2 numaralı aşamada olduğu gibi UYANDIM paketini yollar. Bu aşamada A ve B düğümleri VERI / ONAY haberleşmesine başlar. C düğümü ise UYANDIM paketi içinde yer alan haberleşme süresi kadar bekler. 3 numaralı aşamada olduğu gibi ONAY paketi geldikten sonra geri çekilme algoritmasını uygulayıp tekrar ortamı dinler. Bunun sebebi aynı anda birden fazla kulak kabartma düğümünün olabilmesinden gelmektedir. Böylece ortamı kazanan kulak kabartma düğümü hedefe UYAN paketini gönderir ve 4. aşamada olduğu gibi UYANDIM paketini alır. Ortamı kazanan C düğümü hedef düğüm A ile veri haberleşmesini gerçekleştirirken diğer kulak kabartma düğümleri (D, E vs.) 4. Aşamadaki UYANDIM paketini alarak haberleşmenin sonlanacağı süreye kadar bekler. Son olarak ortamı kazanan C düğümü 5. aşamada ONAY paketini alarak işlemini tamamlar, diğer kulak kabartma düğümleri (D, E vs.) ortam için tekrar yarışır. Tüm süreç boyunca hedef düğüm A, ONAY paketini gönderdikten sonra yeni bir haberleşme olasılığı için bir süre daha ortamı dinler. MC-PSMAC protokolünde diğer protokollerden farklı olarak kulak kabartma işlemi çok kanallı yapı ile tümleşik hale getirilmiştir.

4.2.5 Sanal senkronizasyon

MC-PSMAC içindeki sanal senkronizasyonu yaklaşımı,WiseMAC [16] protokolünden esinlenerek gerçekleştirilmiştir. Düğümlerin oluşturduğu sistemde standart bir senkronizasyon yaklaşımı bulunmamaktadır. Dolayısıyla gönderici düğüm, hedef düğümünün ne zaman dinleme periyoduna girdiğini kesin olarak bilmemektedir. Fakat düğümler arasında daha önceden gerçekleştirilmiş bir haberleşme söz konusu olabilir. Bu haberleşmeden kazanılan bilgilerden yola çıkılarak hedef düğümün ne zaman uyanacağı hakkında tahmin yürütebiliriz. Bu bilginin hesaplanması denklem 4.1' de görülmektedir.

$$BZ = L - (2\theta L + UYANTxTime + BOTime + CSTime) \quad \textbf{(4.1)}$$

Denklem 4.1'de,

BZ : Başlama zamanını,

L : İki haberleşme arasında geçen süreyi,

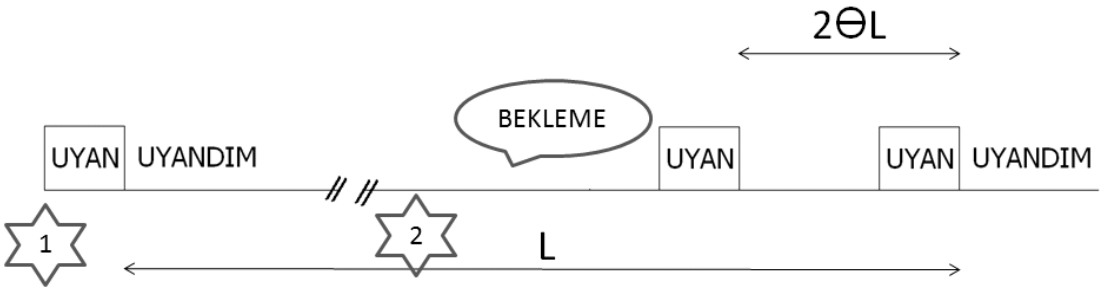
Θ : Kristal sapma oranını,

UYANTxTime : UYAN paketi aktarım süresini,

BOTime : Geri çekilme maksimum süresini,

CSTime : Taşıyıcı sezinleme süresini göstermektedir.

Formülü değerlendirirken öncelikle ideal saat sapmasının olmadığı bir duyarga ağının incelendiğini kabul etmeliyiz. Böyle bir ağda hedef düğüme paket aktarımına bir önceki UYAN paketini gönderdiğimizde başlarsak yine aynı zamanda uyanacağından ilk denememizde haberleşmeye başlayabiliriz. Elbette ortamı kazanmak için yaptığımız geri çekilme ve taşıyıcı sezinleme sürelerini ve UYAN paketini atarken geçen süreyi de hesaba katmalıyız. Fakat düğümlerde kullanılan saat devreleri ideal değildir ve kullanılan kristallerin belli bir sapma oranı bulunmaktadır. Eğer biz bu kristallerin saniyedeki maksimum sapma oranı Θ'yı da geçen süre ile çarpıp bu değer kadar önce paket aktarmaya başlarsak saat sapmasından kaynaklanan hataları da gidermiş oluruz. Θ'nın diğer çarpanı 2 ise hem göndericinin zamanda ileriye doğru (pozitif yönde) Θ, hem dinleyicinin zamanda geriye doğru (negatif yönde) Θ sapma olasılığından dolayı eklenmiştir. Şekil 4.5'te sanal senkronizasyon örneği görülmektedir. 1 ve 2 ağ katmanından paket gelmesini simgelemektedir.



Şekil 4.5 : Sanal Senkronizasyon Özelliği

Bu yöntemin sağladığı avantajlar aşağıda yer almaktadır:

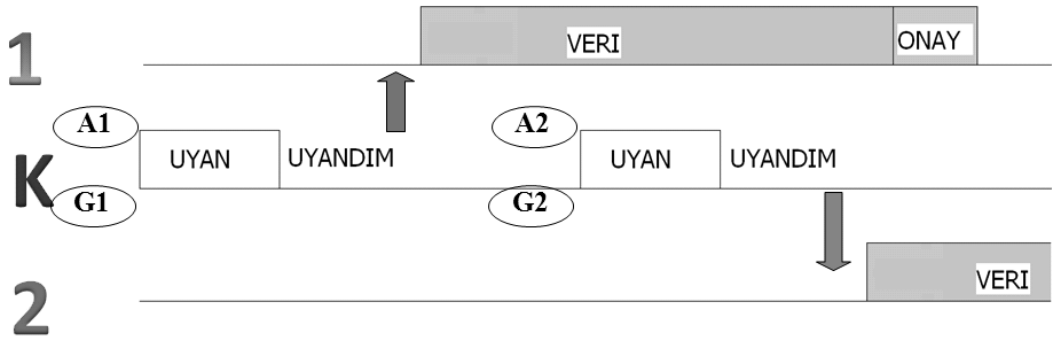
- Ortamın gereksiz yere "UYAN" paketleri ile meşgul edilmesinin engellenmesi
- Bu süre içerisinde diğer düğümlerin kontrol kanalını kullanarak haberleşme başlatabilmesi
- Gönderme işlemini gerçekleştiren düğümde ek enerji tasarufu

Sanal senkronizasyon sayesinde sık aralıklarla yapılan haberleşmelerde sapma oranı da düşük olacağından başarım yüksek olacaktır. Fakat bu zaman aralığı seyrekleştikçe sapma oranı artacak hatta belli bir süre sonra çerçeve süresiyle eşitlenecektir. Bu aşamadan sonra sapma süresine bakılmadan klasik yöntem olan ortama beklemeden paket aktarımı yöntemine dönülmektedir.

4.2.6 Çok kanallı yapı

MC-PSMAC protokolünde, mevcut tasarımların aksine VERI / ONAY haberleşmesi kontrol kanalı dışında bir kanalda gerçekleştirilmektedir. Bu yapı şekil 4.6' da gösterilmiştir. K ile gösterilen ortadaki kanal kontrol kanalı, 1 ve 2 ile gösterilen kanallar ise veri haberleşmesinin yapıldığı kanallardır.

Öncelikle G1 düğmü haberleşmeyi başlatmak için kontrol kanalında UYAN paketlerini göndermeye başlar. A1 düğümü uyandığında kendisine UYAN paketi geldiğini görür haberleşmeyi gerçekleştirebilmek için ortamdaki kullanılmayan kanallardan birini seçer. İleride kanal seçme kısmı detaylı olarak açıklanacaktır. Kanalı seçtikten sonra UYANDIM paketi ile birlikte seçtiği kanal bilgisini de gönderir. Daha sonra G1 ve A1 1. kanala geçerek VERI / ONAY haberleşmesine başlarlar.



Şekil 4.6 : Çok Kanallı Yapı

1. Kanalda VERI / ONAY haberleşmesi sürerken kontrol kanalı diğer düğümlerin kullanımına açık hale gelmiştir. G2 kontrol kanalını sınar ve uygun olduğunu görerek UYAN paketi yollamaya başlar. A2 dinleme periyoduna geldiğinde kendisine UYAN paketi geldiğini görür ve A1 gibi kanal seçimi yaparak UYANDIM paketi ile bunu bildirir. Böylece G2 ve A2' de haberleşmeye 2. kanalda devam ederler. Böylece aynı anda birden fazla VERI / ONAY haberleşmesi sağlanmış olur. Gönderici düğümler paket gönderimini sonlandırdıktan sonra kontrol kanalına geri dönerler. Alıcı düğümler ise kulak kabartma özelliğinden dolayı ONAY paketini gönderdikten sonra belli bir süre daha kanalı dinlemeye devam ederler.

Çok kanallı yapının getirdiği avantajlar şunlardır:

- Aynı anda farklı düğümlerin haberleşebilmesi sayesinde gecikmenin azalması ve transfer oranının artması
- Haberleşmenin kanallara dağıtılması sonucunda saklı uçbirim ve korunmasız uçbirim sorunlarının zayıflatılması
- Ek kanalların sadece haberleşme sürecinde kullanılmasından dolayı atıl dinlemede ek bir enerji tüketiminin oluşmaması

4.3 Kanal Seçimi

Bu kısımda kanal seçimi sırasında dikkat edilen hususlara değinilmiştir.

4.3.1 Ortogonal kanal sayısı

Tezin yazıldığı tarih itibariyle telsiz duyarga ağlarında en sık kullanılan yongaların başında CC2420 [28] gelmektedir. 802.15.4 standartına uygun olarak tasarlanmış

olan bu yonga 5 Mhz aralıklı 16 adet kanal sunmaktadır. Fakat referans 22' de belirtildiği üzere bu kanallar arası girişim konusunda telsiz duyarga ağlarında çok az çalışma bulunmaktadır. Aynı makalede empirik yöntemlerle kanalların girişim etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak komşu kanalların seçilmesinin olumsuz sonuçlar doğuracağı belirtilmiştir. Bu açıdan 16 kanalın hepsini kullanmak yerine birer kanal atlayarak 8 kanal kullanmak protokolün fiziksel ortamda gerçeklenirken başarımını artıracaktır.

4.3.2 Kanal seçme yapısı

İki temel yapı üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki MMSN [20] makalesinde açıklanan komşuluk bilgisinden yola çıkarak kurulum aşamasında düğümlere kanal tahsis edilmesidir. Böylece eğer yeterli kanal sayısı mevcutsa tüm düğümlere özel kanal tahsis edilebilmektedir. Fakat bu yapı tasarımı karmaşıklaştırmakla kalmayıp topoloji değişimlerinde de tekrar kurulum gerçekleştirme ihtiyacını yaratmaktadır. Ayrıca yeterli kanalın bulunmadığı durumlarda düğümlere aynı kanalların verilmesini gerektirmektedir. Bu durumda bir haberleşme sürecinde kullanılmayan kanallar olsa bile aynı kanalların atandığı düğümler tek bir kanala bağımlı kalmaktadırlar.

Bir diğer yöntem ise şu anda protokolde mevcut olan kanalların haberleşmeye başlamadan hemen önce alıcı düğüm tarafından en az dolu olma olasılığı olan kanalın seçilmesi ile oluşmaktadır. Bu yapı adım adım aşağıda anlatılmıştır :

- Alıcı düğüm UYAN paketini aldıktan sonra eğer ilk kanal seçimi ise rasgele bir kanala geçerek bu kanalda taşıyıcı sezinleme işlemini gerçekleştirir.
- Eğer herhangi bir sinyal sezinlemezse UYANDIM paketi ile gönderici ve kulak kabartma düğümlerini bu kanala haberleşmek için çağırır.
- Bir sonraki haberleşmede de öncelikli olarak bu kanalı sınayarak başlar.
- Eğer kanal dolu ise kanalların doluluk durumu ile ilgili tuttuğu tabloda kanalın doluluk değerini bir arttırır. Kontrol kanalına geçerek UYANDIM paketini yollar. Fakat paket içerisinde kanal bilgisi değerini "-1" olarak yollar. Böylece gönderici ve kulak kabartma düğümleri kanal seçimi sürecinin devam ettiğini anlarlar.

- Tekrar doluluk tablosuna bakarak en az değere sahip olan kanala geçerek tekrar sınama yapar.
- Bu işlemi boş bir kanal bulana kadar tekrarlar. Boş kanal bulduğunda tabloda kanalın doluluk değerini sıfırlar.
- Ek olarak yapıya yaşlandırma özelliği de eklenerek kullanılmayan kanalların ortaya çıkması engellenmiştir.

Bu yapı sayesinde benzer haberleşme örüntülerinde boş kanal seçme olasılığı arttırılmış olur. Yapının dezavantajlı yanı ise iki alıcı düğümünün aynı anda boş kanalı seçtiği durumlarda çarpışmanın meydana gelebilmesi olasılığıdır. Kanalların dolu olmasından kaynaklanan gecikme ise tek kanallı bir yapı ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür.

4.4 Gecikme Analizi

Tasarımın başarımını görmek için teorik olarak gecikmenin hesaplanması gerekmektedir. Çizelge 4.2'de bu hesaplama için kullanılan parametreler ve bu parametrelerin açıklamaları bulunmaktadır.

Çizelge 4.2 : Gecikme Analizi Parametreleri

Parametre	Açıklama
$t_{gç}$	Geri Çekilme Gecikmesi
t_{ts}	Taşıyıcı Sezinlemesi Gecikmesi
t_{mesgul}	Meşgul Kanal Gecikmesi
p_{mesgul}	Aynı Anda Gerçekleştirilen Aktarım
t_{uyku}	Uyku Gecikmesi
t_{veri}	Veri Aktarım Süresi
t_{onay}	ONAY Paketi Aktarım Süresi
n_{tva}	Toplam Veri Aktarım Miktarı
T_{uyku}	Uyku Periyodu

Tek hoplama gecikmesi :

$$\text{Gecikme} = t_{gç} + t_{ts} + t_{mesgul}*(p_{mesgul}-1) + t_{uyku} + (t_{veri} + t_{onay})*n_{tva} \quad \textbf{(4.2)}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Tüm göndericiler daha önce de belirtildiği gibi öncelikle geri çekilme ve taşıyıcı sezinleme işlemlerini yapmaları gerekmektedir. Bu da ek bir gecikmeye neden

olmaktadır. Uyku gecikmesi ise dinleme / uyku periyodundan kaynaklanmaktadır. Bu değer 0 ile T_{uyku} arasında değişmektedir. Haberleşmenin kurulumundan sonraki toplam veri haberleşme süresi ise $(t_{veri}+ t_{onay})*n_{tva}$ olarak hesaplanmaktadır. Belirtilen tüm bu değerler tek kanallı (CSMA-MPS protokolünün düzenlenmiş bir versiyonu) ve çok kanallı (MC-PSMAC) protokoller için aynıdır. Asıl fark meşgul kanal gecikmesinde (t_{mesgul}) ortaya çıkmaktadır. Tek kanallı protokolde meşgul kanal gecikmesi haberleşmenin kurulum aşaması ve veri haberleşmesi süreçlerinin toplamına eşit olmaktadır $(t_{uyku}+ (t_{veri}+ t_{onay})*n_{tva})$. Öte yandan çok kanallı yapıda bu değer sadece haberleşmenin kurulum aşamasındaki gecikmeye eşdeğerdir (t_{uyku}). Aşağıdaki denklem bu iki protocol arasındaki gecikme oranını vermektedir.

$$\frac{Multi-Ch.}{Single-Ch.} = \frac{t_{gç} + t_{ts} + t_{uyku} * p_{mesgul} + (t_{veri} + t_{onay}) * n_{tva}}{t_{gç} + t_{ts} + t_{uyku} * p_{mesgul} + (t_{veri} + t_{onay}) * n_{tva}) * p_{mesgul}} \qquad \textbf{(4.3)}$$

Denklemde başarımı belirleyen üç önemli parametrenin bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki uyku gecikmesidir. Uyku gecikmesi azaldıkça kurulum aşamasındaki gecikmede azalmaktadır. Bu da çok kanallı (MC-PSMAC) protokolün gecikmesinin tek kanallı yapıya göre daha ciddi bir biçimde azalması anlamına gelmektedir. Yani çok kanallı yapı için kısa süreli uyku periyotları bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. İkinci parametre ise toplam veri haberleşmesi süresidir. Bu sürenin artışı ise tek kanallının gecikmesini arttıracağından, büyük miktarlardaki veri aktarımlarının MC-PSMAC için daha uygun olduğunu görebiliriz. Son olarak aynı anda gerçekleştirilen aktarım miktarını belirten p_{mesgul} parametresindeki artış da çok kanallı için avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu da yoğun trafik ve düğüm ortamlarında çok kanallı protokolün başarımının artışı demektir.

MC-PSMAC protokolünde hoplamalar arasında herhangi bir bağıntı bulunmamaktadır. Dolayısıyla birden fazla hoplamanın ayrıca analizinin yapılmasına gerek yoktur. Gecikme miktarı her hoplamada toplanarak artmaktadır.

4.5 Sonuç

Tasarımın getirdiği avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

- Aynı anda birden fazla kanaldan veri akışı sağlanmıştır. Böylece veri transfer oranı arttırılmış, gecikme azaltılmıştır.
- Uyku / Dinleme çerçeve yapısı sayesinde en büyük enerji tüketimi kaynağı olan atıl dinlemedeki enerji tüketimi minimize edilmiştir.
- Kulak kabartma özelliği sayesinde hedef düğüme birden fazla düğümün arka arkaya paket gönderebilmesi sağlanmıştır. Örnek olarak aynı anne düğüme sahip çocuk düğümlerinin olduğu bir ağaç ağ yapısında başarım artışı sağlanmıştır.
- Paket türü başlangıç sinyali ve sanal senkronizasyon sayesinde kontrol kanalının kullanımı minimize edilmiştir.
- Kurulum aşamasında veya daha sonra herhangi bir kurulum işlemi ve senkronizasyon işlemi gerçekleştirilmemektedir. Bu da yapının değişen topolojilere uyumlu olmasını ve başarımının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca uzun süreli haberleşmenin olmadığı yapılarda senkronizasyonun yaratacağı ciddi enerji tüketimi de engellenmiştir.
- Kanal seçiminin dinamik olarak yapılması farklı kanalların seçilmesinin yolunu açmıştır.

Dezavantajlı yanları ise şunlardır:

- Diğer başlangıç sinyali gönderme protokollerinde olduğu gibi (BMAC, X-MAC vs.) saklı uçbirim ve korunmasız uçbirim sorunları mevcuttur. Referans 13' te bu soruna çözüm olarak ağ katmanı referans gösterilmiştir. MC-PSMAC' in bu protokollere göre avantajlı yanı ise farklı bir kanalda veri haberleşmesini gerçekleştirdiğinden bu sorunlarla karşılaşma olasılığını daha düşük hale getirmesidir.
- Başlangıç sinyali yerine paket türü başlangıç sinyali göndermek bu aşamada da karşılaşılan saklı uçbirim sorununda çarpışmaya neden olabilmektedir.
- Çoğa gönderim ("multicast") için herhangi bir ek destek bulunmamaktadır.

5. BENZETİM

Protokolün benzetimi Omnet++ [29] üzerinde gerçekleştirilmiştir. Omnet++ haberleşme ağları için geliştirilmiş ayrık zamanlı durum benzetim programıdır ve sadece benzetim için bir alt yapı oluşturmaktadır. Öncelikle Omnet++ için tasarlanmış NED topoloji dili ile sistem modüller halinde tasarlanmıştır, modüllerin içini işlevselliğe yönelik C++ dili ile yazılmıştır.

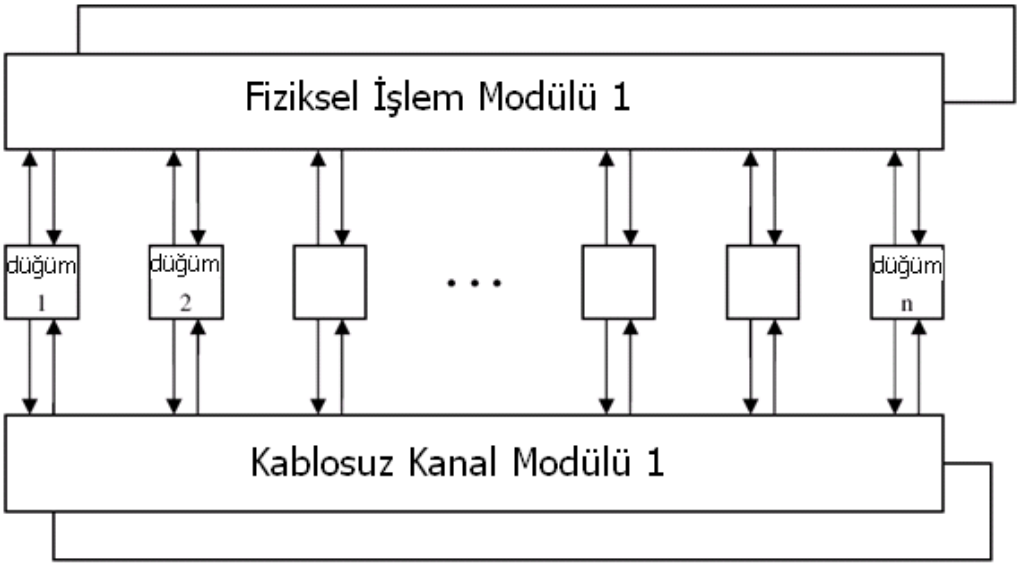
MC-PSMAC protokolünün tasarımında tamamen yeni bir mimari tasarlamak yerine ile telsiz duyarga ağları için tasarlanmış Castalia [30] mimarisi üzerinden geliştirme yapılmıştır. Castalia'nın seçilme nedenleri şunlardır:

- Telsiz duyarga ağlarına özel mimari
- Gelişmiş telsiz fiziksel katman tasarımı
    - Yol kaybının hesaplanması
    - Çarpışmanın hesaplanması
- İdeal Olmayan Saat Kullanımı

5.1 Benzetim Üzerinde Oluşturulan Mimari

Şekil 5.1' de sistemin genel mimarisi görülmektedir. Fiziksel işlem modülü sıcaklık, ses vs. gibi fiziksel olguları belirtmektedir. Düğümler bu modül ile haberleşerek gerçek dünyadaki olguların ölçümünün benzetimini yapmaktadır. Kendi aralarında haberleşmeleri de doğrudan gerçekleşmemektedir. Süreç şu şekilde olmaktadır:

1. Ortam ile iletişime geçecek düğüm (veri yayımı, dinleme, taşıyıcı sezinleme vs.) telsiz kanal modülüne mesaj gönderir.
2. Telsiz kanal modülünde yol kaybı, çarpışma vs. hesaplamaları gerçekleştirilir.
3. Telsiz kanal modülünden sonuçlar düğüme ve iletişimden etkilenen diğer düğümlere gönderilir.



Şekil 5.1 : Benzetim Genel Mimari

Böylelikle gerçek dünya benzetimi gerçeklenmiş olur.

Mevcut Castalia mimarisi sadece tek telsiz kanal için tasarlandığından sadece tek kanallı benzetimlere izin vermektedir. Bu yüzden tez süreci içerisinde üç aşamada mimari çok kanallı benzetime uygun hale getirilmiştir. Bu aşamalar:

1. Telsiz kanal modülleri toplam kanal sayısı kadar derlenecek hale getirilmiştir.
2. Tüm telsiz kanal modülleri ile düğümler arasında ayrı kanallar yaratılarak, telsiz kanal modülleriyle düğümlerin bu kanallar üzerinden bağımsız haberleşmeleri sağlanmıştır.
3. Mevcut Castalia mimarisinde telsiz kanal modüllerinin iç tasarımında (yol kaybı, çarpışma, taşıyıcı sezinleme hesaplanması vs.) duyarga düğümlerinin etkileşiminde sadece coğrafi konuma bakılmaktadır. Kanal sayısı birden fazla olduğunda düğümlerin aynı kanalda olup olmadığı da etkileşim için hesaba katılması gerekmektedir. Bu amaçla düğümlerin her kanal değiştirmesinde, radyo modülünden çıktığı ve giriş yaptığı telsiz kanal modüllere komut gönderilerek etkileşim tablolarının güncellenmesi sağlanmıştır.

Düğümlerin tasarımı şekil 5.2’ de yer almaktadır. Haberleşmenin her bir katmanı ayrı bir modül olarak tasarlanmıştır.

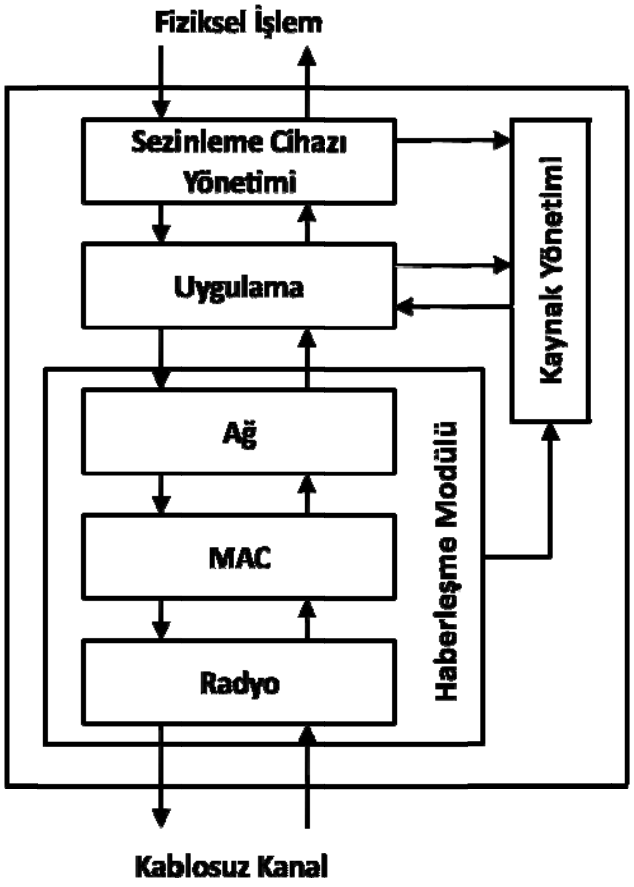
5.1.1 Duyarga cihazı yönetimi

Bu modülde duyarga cihazlarının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Castalia tasarımı üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

5.1.2 Uygulama modülü

Bu modülde gerçekleştirilen işlemler şunlardır:

- Duyarga cihazı yönetimi modülüne fiziksel işlemden örnekleme alması komutunun yollanması ve sonucunun alınması
- Sonuçlar doğrultusunda ağ modülüne paket gönderimi
- Ağ modülünden paket alımı



Şekil 5.2 : Duyarga Düğümü Mimarisi

5.1.3 Ağ modülü

Ağ modülü olarak Castalia' da hazır bulunan basit ağaç yönlendirme modülü kullanılmıştır.

5.1.4 MAC modülü

MC-PSMAC ve bu protokolün tek kanallı halinin tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tek kanallı tasarımda CSMA-MPS [18] protokolünden yararlanılmıştır. Bu protokole parçalama gibi özellikler eklenerek MC-PSMAC ile düzgün olarak karşılaştırılabilmesi sağlanmıştır. Durum makinesi şeklinde gerçekleştirilen tasarım başlık 5.2' de detaylı olarak açıklanmıştır.

5.1.5 Radyo modülü

Radyo modülü olarak CC2420 yongasının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Mevcut modül üzerinde değişiklikler yapılarak çok kanallı benzetim ve MC-PSMAC protokolü ile uyumluluğu sağlanmıştır. Veri transfer oranı 250 kbps olarak seçilen modülün enerji parametreleri çizelge 4.1' de, dönüşüm süreleri ise Çizelge 5.1' de yer almaktadır.

Çizelge 5.1 : Radyo Modülü Dönüşüm Süreleri

Açıklama	Değer (mili saniye)
Dinleme → Gönderme	0.01
Gönderme → Dinleme	0.01
Uyku → Dinleme	1
Dinleme → Uyku	0.05
Gönderme → Uyku	0.05
Uyku → Gönderme	1
Kanal Değiştirme	0.01

5.1.6 Kaynak yönetimi modülü

Bu modülde harcanılan enerjinin periyodik olarak hesaplanması gerçekleştirilmektedir. Ayrıca maksimum kristal sapma oranından yola çıkılarak rasgele saat sapma oranı belirlenir. Böylece her bir düğüm için ayrı kaynak yönetimi modülü olduğundan her bir düğümün saat sapma oranı farklı olur. Mevcut modül üzerinde bir değişiklik yapılmasına gerek kalmamıştır. Kullanılan değerler çizelge 5.2' de yer almaktadır.

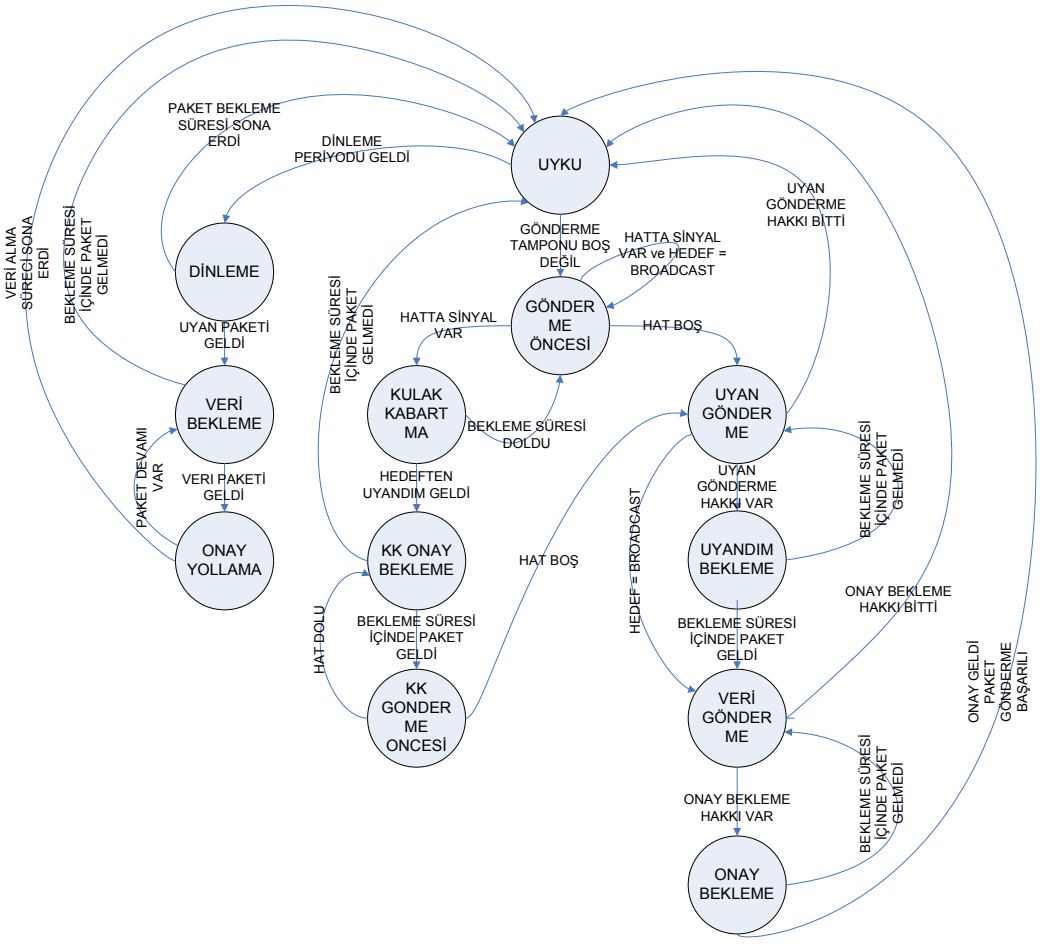
Çizelge 5.2 : Kaynak Yönetimi Parametreleri

Açıklama	Değer
Toplam Enerji	18720 Joules (iki adet alkaline pil [31])
Maksimum kristal sapma oranı	0.03 µs / 1 saniye

5.2 MAC Katmanı Durum Diyagramı

Protokolün durum diyagramı Şekil 5.3'de yer almaktadır. Sistem çoğunlukla *UYKU* konumunda bulunmaktadır. Bu durum aynı zamanda radyo yongasının da uyku konumunda bulunduğu zamandır. Bu açıdan duyarga düğümünün yaşam süresini uzatmaktaki ana ilke MAC katmanının da bu konumdaki süresini arttırmaktan geçmektedir. Bu konumdan başka bir konuma geçiş ancak iki hadise ile olmaktadır. Bunlardan ilki duyarga düğümünün dinleme periyodunun gelmesi diğeri ise gönderme tamponunda paket bulunması yani ağ katmanından yeni bir paket gelmesi ya da hali hazırda bir paket bulunması durumudur.

DİNLEME konumu düğümün uykudan sonra en çok bulunduğu ikinci konumdur. Çünkü herhangi bir haberleşmenin olmadığı bir zamanda bile düğümün bu konumda belli bir süre bekleyerek kendisine UYAN paketi gönderilip gönderilmediğinin sınaması gerekmektedir. Bu konumdayken radyo da dinleme konumunda bulunmaktadır.



Şekil 5.3 : Durum Diyagramı

Duyarga düğümüne UYAN paketi gelmesi halinde paketin hedef adresine bakılır. Adres kendi adresi ise kanal seçim tablosuna bakarak en uygun kanal seçilir ve radyoya bu kanala geçmesi için mesaj gönderilir. Bu kanalda taşıyıcı sezinlemesi işlemi gerçekleştirilir. Eğer kanal müsaitse radyoya kontrol kanalına geçmesi komutu gönderilir ve paketin gönderildiği duyarga düğümüne UYANDIM paketi gönderilir. Bu paketin içeriğinde aynı zamanda haberleşmenin yapılacağı kanalın numarası yer almaktadır. Aksi halde yine UYANDIM paketi gönderilir fakat kanal değeri -1 olarak gönderilir. Daha sonra tekrar kanal tablosuna bakılarak bir başka kanal seçilmeye çalışılır. Kanal seçimi 4.3.2 başlığında detaylı olarak açıklanmaktadır. UYANDIM paketi gönderildikten sonra pakette belirtilen kanala geçmesi için radyoya komut gönderilir ve bu kanalda *VERİ BEKLEME* konumunda veri paketinin gelmesi beklenir.

Göndericinin yolladığı pakette adresin genel yayımlama (-1) olması durumunda frekans değiştirilmeden doğrudan *VERİ BEKLEME* konumuna geçilir. Böylece genel yayılım paketlerinin kontrol kanalında alınması sağlanmış olur.

VERİ BEKLEME konumundayken bekleme süresi içerisinde VERİ paketinin gelmesi beklenir. Eğer bu süre içerisinde paket gelmezse bir sorun oluşmuş demektir. Ağ katmanına hata mesajı gönderilerek uyku konumuna dönülür. Paketin gelmesi durumunda paketin adresi kendisi ise paketin alındığına dair paket sahibine ONAY paketi gönderilir ve belli bir süre daha bu konumda kalarak başka bir düğümden VERİ paketi alımı beklenir. Bu yapı sayesinde gönderici düğümünün göndermek istediği bilgiyi birden çok VERİ paketine parçalayarak gönderebilmesi de sağlanmaktadır. Bu döngü VERİ paketi gelmesi durana kadar devam eder. Ayrıca kulak kabartma işleminin de gerçekleştirilebilmesi sağlanmış olur. Daha sonra düğüm, kontrol kanalına geçerek radyoyu uyku konumuna sokar ve *UYKU* konumuna girer.

Paket gönderme kısmına gelecek olursak, *UYKU* konumundan *GÖNDERME ÖNCESİ* konumuna daha önce de belirtildiği gibi gönderme tamponunda paket bulunması koşulunda geçilir. Bu konumda öncelikle aktarılacak paketin adresinin genel yayımlama olup olmadığı sınanır. Eğer genel yayımlama ise doğrudan geri çekilme ve taşıyıcı sezinleme işlemi gerçekleştirilir. Aksi halde paketin gönderileceği hedefin uyanma zamanı sanal senkronizasyon yöntemi ile belirlenerek bu süre kadar beklenilir ve daha sonra geri çekilme fonksiyonunun sonucu kadar beklenir. Süre sona erdiğinde radyoya dinleme konumuna geçme komutu yollanır. Radyo dinleme konumuna geçince ortamda taşıyıcı sezinlemesi yapılır. Radyo modülünden gelen cevap HAT BOŞ ise *UYAN GÖNDERME* konumuna geçilir. Gönderilecek paketin hedef adresi genel yayımlama ise geri çekilme fonksiyonunun sonucu kadar *GÖNDERME ÖNCESİ* konumunda beklenilir, süre sona erince taşıyıcı sezinleme işlemi tekrarlanır. Eğer adres genel yayımlama değilse *KULAK KABARTMA* konumuna geçilir.

UYAN GÖNDERME konumunda öncelikle yollanacak paketin genel yayımlama olup olmadığı sınanır. Eğer genel yayımlama ise radyo yongası gönderme konumuna geçirilir ve duyarga düğümlerinin dinleme+uyku süresi boyunca UYAN paketi yollanır. Böylece tüm komşu düğümlerin UYAN paketini almaları garantilenmiş olur. Periyot sona erdiğinde *VERİ GÖNDERME* konumuna geçilir. Eğer paket özellikle bir düğüme gönderiliyorsa öncelikle paketin UYAN paketini gönderme hakkı olup olmadığı sınanır. Gönderme hakkı bir dinleme + uyku çerçeve süresinden yola çıkılarak ayarlanmaktadır. Eğer bu süre içerisinde hedeften UYANDIM paketi alınamazsa ağ katmanına hata mesajı yollanılarak *UYKU* konumuna geçilir. Eğer bu hak dolmamışsa radyo yongası gönderme konumuna getirilir ve UYAN paketi gönderilir. Son olarak *UYANDIM BEKLEME* konumuna geçilir.

UYANDIM BEKLEME konumunda öncelikle radyo yongası tekrar dinleme konumuna getirilir ve belli bir süre hedef düğümden UYANDIM paketinin gelmesi beklenir. Paket gelmezse tekrar *UYAN GÖNDERME* konumuna geçilir. Paket gelirse radyo yongasına arka arkaya pakette belirtilen kanala ve gönderme konumuna geçmesi için komutlar gönderilir. Son olarak *VERİ GÖNDERME* konumuna geçilir.

KULAK KABARTMA konumunda ise amaç hattaki iletişimin bizim paket yollamak istediğimiz düğüm ile ilintili olup olmadığını sınamaktır. Belli bir süre içerisinde paket alınamazsa tekrar *GÖNDERME ÖNCESİ* konumuna geçilir. Hedef düğüme gönderilen bir UYAN paketi alınması durumunda bekleme süresi tekrar düzenlenir. Hedeften UYANDIM sinyali alınması durumunda ise pakette belirtilen kanal değeri radyo yongasına yollanılarak bu kanala geçilmesi sağlanır. Ayrıca yine pakette yer alan haberleşme süresinden yola çıkılarak zamanlayıcı "timer" kurulur. Son olarak konum *KK ONAY BEKLEME* olarak ayarlanır.

KK ONAY BEKLEME konumunda hedef düğümümüz başka bir düğümle haberleşme konumundadır. Dolayısıyla bu haberleşmenin sona erdiğini algılamak için hedeften ONAY paketinin gelmesi beklenir. Paketin belli bir süre içerisinde gelmemesi durumunda *KULAK KABARTMA* konumunda kurulan zamanlayıcı sonlanır. Ağ katmanına hata mesajı gönderilerek uyku konumuna geçilir. Paketin gelmesi durumunda *KK GÖNDERME ÖNCESİ* konumuna geçilir.

KK GÖNDERME ÖNCESİ konumuna bizim gibi hedefe paket yollamak isteyen başka düğümler de geçmiş olabilir. Bu yüzden bu konumda geri çekilme algoritması kadar beklenerek taşıyıcı sezinleme yapılır. Ortamda taşıyıcı sezilirse ortamı başka bir düğüm kazanmış demektir. Yeni UYANDIM paketi alınarak tekrar *KK ONAY BEKLEME* konumuna geçilir. Ortamın uygun olması durumda ise *UYAN GÖNDERME* konumuna geçilir.

VERİ GÖNDERME konumunda öncelikle ONAY paketi bekleme hakkı dolup dolmadığına bakılır. Eğer dolmuşsa ağ katmanına hata mesajı gönderilerek *UYKU* konumuna geçilir. Aksi durumda VERİ paketi hedefe yollanır. Radyo yongası dinleme konumuna geçirilir ve ONAY paketini almak için *ONAY BEKLEME* konumuna geçilir.

ONAY BEKLEME konumunda belirli bir süre hedeften ONAY paketinin gelmesi beklenir. Paket geldiğinde parçalama işlemi yapıyorsak tekrar *VERİ GÖNDERME* konumuna geçilir. Aksi durumda *UYKU* konumuna geçilir.

5.3 Kontrol Paketleri

Şekil 5.4' te kullanılan kontrol paketleri yer almaktadır. Tüm paketlerde ortak olarak bulunan kısımlar paket tipi, kaynak adresi ve hedef adresleridir.



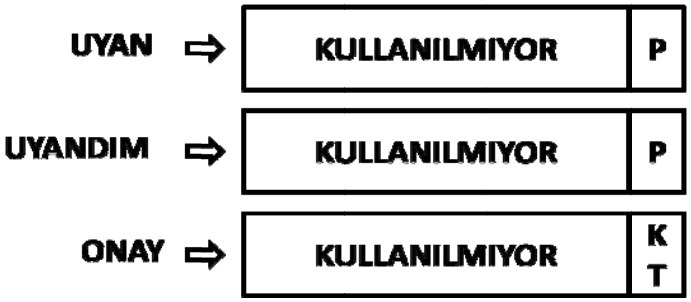
Şekil 5.4 : Kontrol Paketleri

UYAN paketinde bulunan "haberleşme süresi" ise haberleşmenin ne kadar süreceğini alıcı düğüme bildirmek için kullanılmaktadır. UYANDIM paketinde ise bu değer ortama tekrar yollanarak haberleşmeyi izleyen kulak kabartma düğümlerinin de haberdar olması sağlanmaktadır.

UYANDIM paketinde bulunan "çerçeve başlama zamanı" değeri ise sanal senkronizasyon için kullanılmaktadır.

UYANDIM paketinde yer alan "K" ise VERİ / ONAY haberleşmesinin yapılacağı kanalın, gönderici ve kulak kabartma düğümlerine bildirilmesi için kullanılmaktadır.

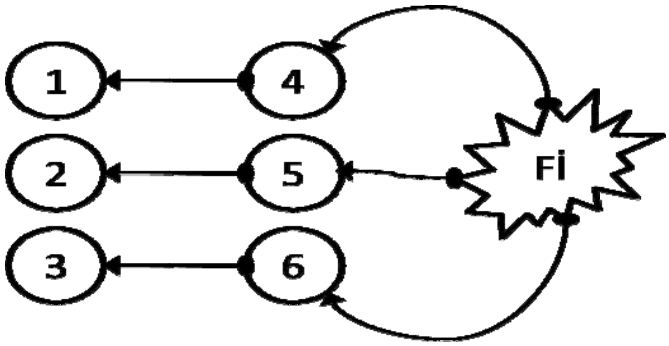
Son olarak "D" ise durum sekizlisidir (Şekil 5.5). "P" parçalama durumunu, "KT" ise kanal tutma isteğini belirtmektedir. "Kullanılmıyor" kısmı ileride kullanım için boş bırakılmıştır.



Şekil 5.5 : Durum Sekizlisi

5.4 Tek Hoplamalı Benzetim

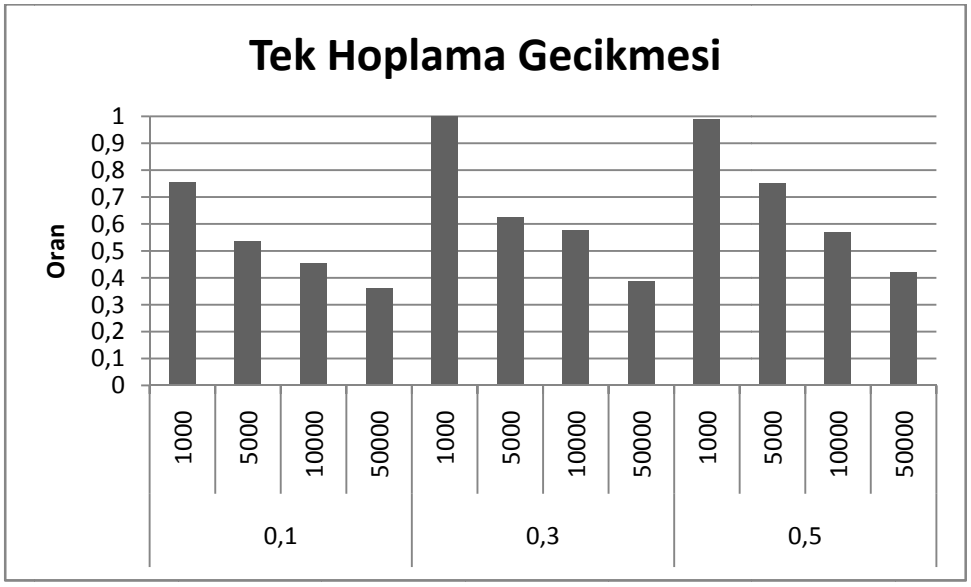
Tek hoplamalı yapının topolojisi şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6 : Tek Hoplama Topolojisi

Bu topoloji ile 4.3 denkleminin benzetim sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Tüm düğümler birbirlerinin aktarım menzilinde yer almaktadır. Öncelikle fiziksel işlem modülü aynı anda gönderici düğümleri uyarmaktadır. Bunun üzerine gönderici düğümler oklarla belirtilen alıcı düğümlere paket yollamaya çalışmaktadırlar. Diğer yandan alıcı düğümler ise rasgele zamanlarda uyku/dinleme periyotlarını gerçekleştirmektedir. Benzetim 10 kere farklı başlangıç değerlerine sahip rasgele sayı üreteçleri ile koşturulmuştur. Ayrıca her koşturmada fiziksel işlem modülü 200 tane işaret üretmiştir. Benzetim sonuçları tüm bu işlemlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Böylece gerçeğe daha yakın bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

Benzetim, 128 sekizli parçalara ayrılmış 4 adet veri boyu (1, 5, 10 and 50k sekizli) ve 3 uyku periyodu (0.1, 0.3 ve 0.5 saniye) için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7'de benzetim sonucu görülmektedir.

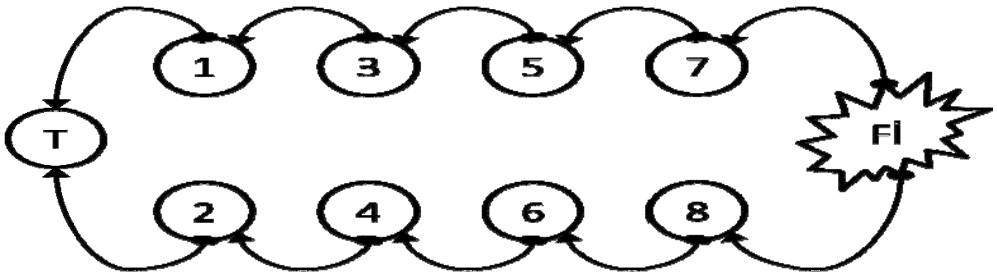


Şekil 5.7 : Tek Hoplama Gecikmesi

Teorik sonuçta da belirtildiği gibi, veri boyunun artışı ile MC-PSMAC'in başarımında artış olmaktadır. Öte yandan uyku periyodunun artışı MC-PSMAC'in başarımını düşürmektedir.

5.5 Çok Hoplamalı Benzetim

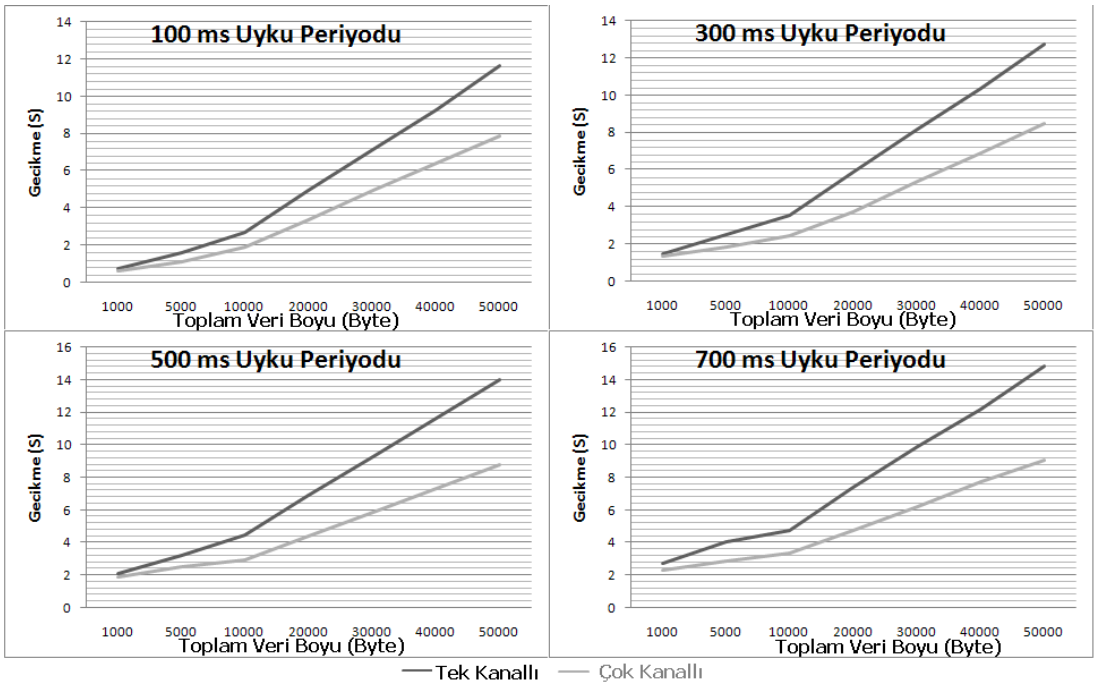
Benzetim için kullanılan topoloji şekil 5.8' de yer almaktadır. Bu benzetimde MC-PSMAC'in enerji tüketimi, gecikme ve transfer oranı başarımı ölçülmüştür. Benzetimdeki zaman parametreleri (dinleme zamanı başlangıçı, saat sapması vs.) için farklı başlangıç değerlerine sahip rasgele sayı üreteçleri kullanılmıştır.



Şekil 5.8 : Çok Hoplamalı Benzetim Topolojisi

Öncelikle 7. ve 8. düğüm fiziksel işlem modülü tarafından aynı anda tetiklenmektedir. Daha sonra bu düğümler birbiriyle etkileşimli iki kol üzerinden "T" ile belirtilen toplayıcı düğüme veri aktarımına başlamaktadırlar.

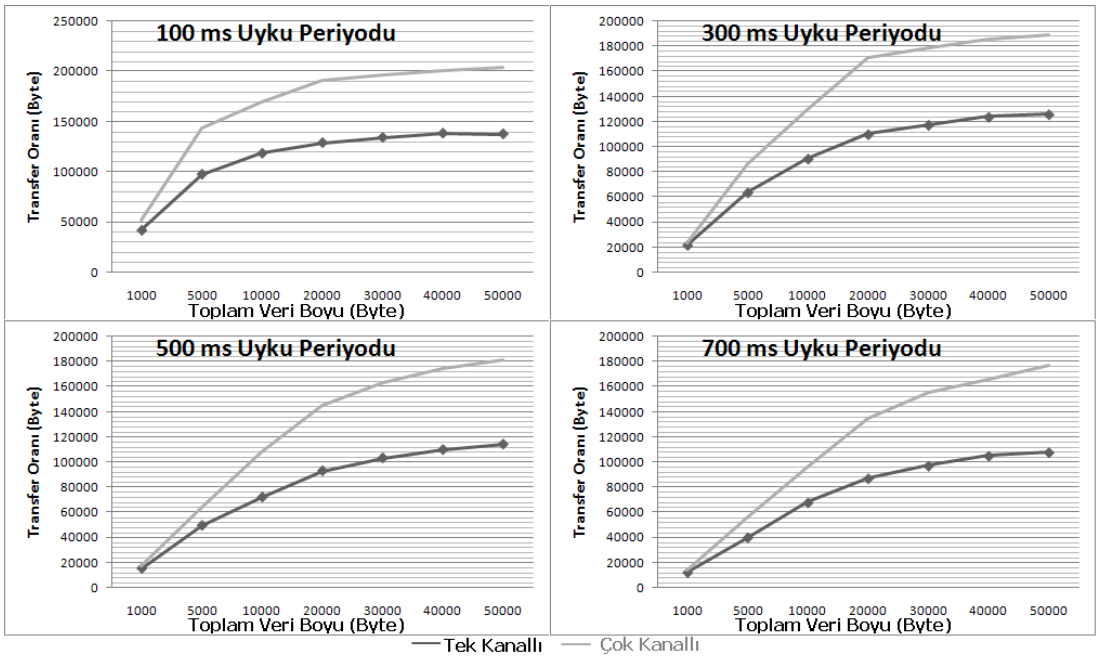
Sonuçlar toplam 180 aktarımın ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Şekil 5.9' da uçtan uca gecikmenin tek kanallı (CSMA-MPS*) ve çok kanallı (MC-PSMAC) protokollerde karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.9 : Çok Hoplamalı Benzetimin Uçtan Uca Gecikmesi

Uyku periyodu 100 milisaniyeden 500 milisaniye arasında değiştirilmiştir. Ayrıca 128 sekizli parçalara ayrılmış farklı veri boyları için karşılaştırma yapılmıştır. Tüm uyku periyotlarında tek kanallı protokolün başarımı veri boyu ile düşmektedir. Bunun iki nedeni vardır. Birinci neden meşgul kanal gecikmesinin artması diğer neden ise çarpışmadır. Öte yandan MC-PSMAC veri aktarımını kontrol kanalından farklı kanalda gerçekleştirdiğinden diğer koldaki aktarım kontrol kanalını kullanabilmektedir. Ayrıca farklı kanalda haberleşme çarpışma oranını da azaltmaktadır.

Transfer oranı karşılaştırması şekil 5.10' da görülmektedir. Tek kanallı yapı ile karşılaştırdığımızda MC-PSMAC protokolünün transfer oranının veri miktarı ile daha hızlı arttığı görülmektedir. Bunun sebebi aynı anda farklı kanallardan veri transferinin gerçekleştirilebilmesidir. Ayrıca sonuçlara baktığımızda tüm uyku periyotlarında MC-PSMAC'in başarımının daha iyi olduğu açıkça görülmektedir.

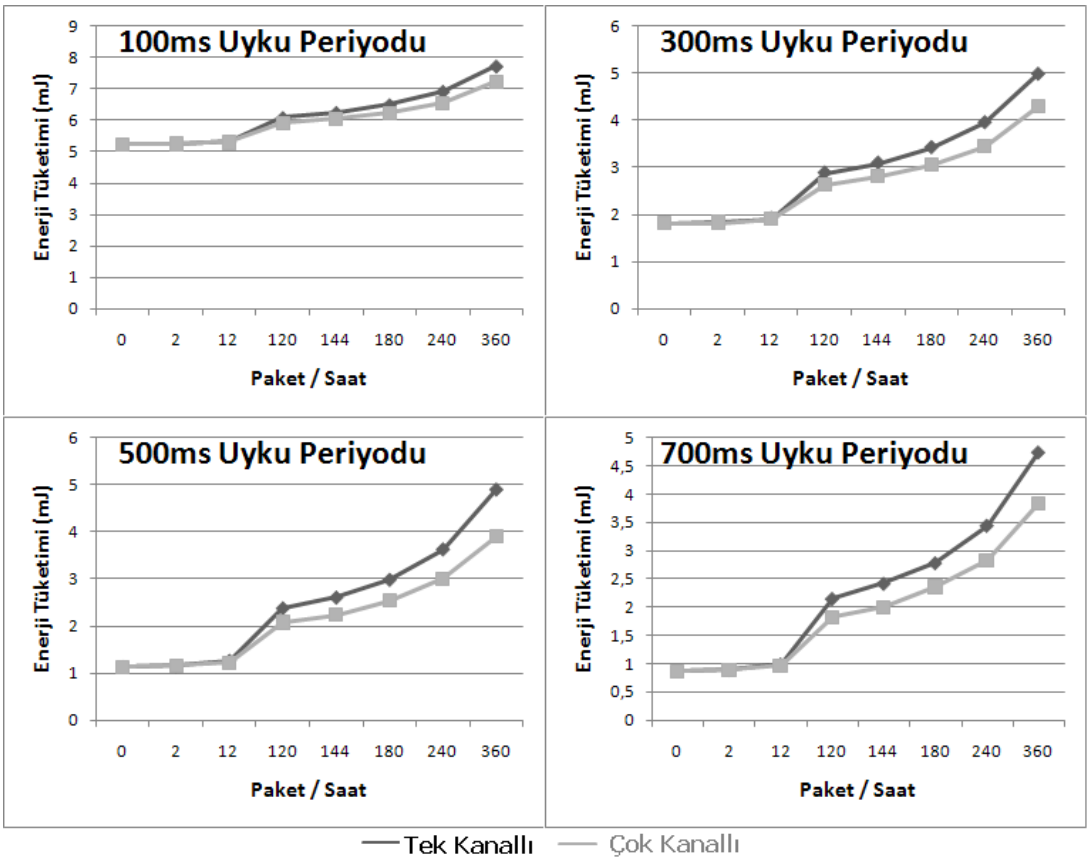


Şekil 5.10 : Çok Hoplamalı Benzetimin Transfer Oranı

Son olarak, sonuçlara baktığımızda küçük veri boylarında tek kanallı ve çok kanallı protokollerinin transfer oranlarının birbirine çok yakın olduğu görülmktedir. Bu yüzden veri boyunun küçük olduğu durumlar için çok kanallı protokolde veri transferinin kontrol kanalında yapılabilmesi seçeneği de protokole eklenmiştir.

Enerji tüketimini iki ayrı zaman diliminde değerlendirmek gerekmektedir. İlk zaman dilimi herhangi bir haberleşmenin yapılmadığı dinleme işleminin yol açtığı enerji tüketimidir. Bu zaman diliminde her iki protokol için de enerji tüketimi aynıdır. İkinci zaman dilimi ise aktarım sırasında hem veri yollayan gönderici düğümler hem paket alımını gerçekleştiren alıcı düğümler tarafından gerçekleştirilen enerji tüketimidir.

Şekil 5.11 ’de iki protokolün farklı uyku periyotlarındaki enerji tüketimi görülmektedir. Veri boyu seçimi 128 sekizli parçalama yapılmış 10k sekizli olarak seçilmiştir. Benzetim bir saat içerisinde farklı sayılarda aktarımlar gerçekleştirilerek yapılmıştır. Sonuçlardan görüleceği üzere saatte 12 aktarıma kadar ikinci zaman diliminde gerçekleştirilen tüketim ihmal edilebilir düzeydedir. Fakat aktarım sayısı bu değerden sonra arttıkça enerji tüketimi de ciddi bir biçimde artmaktadır.

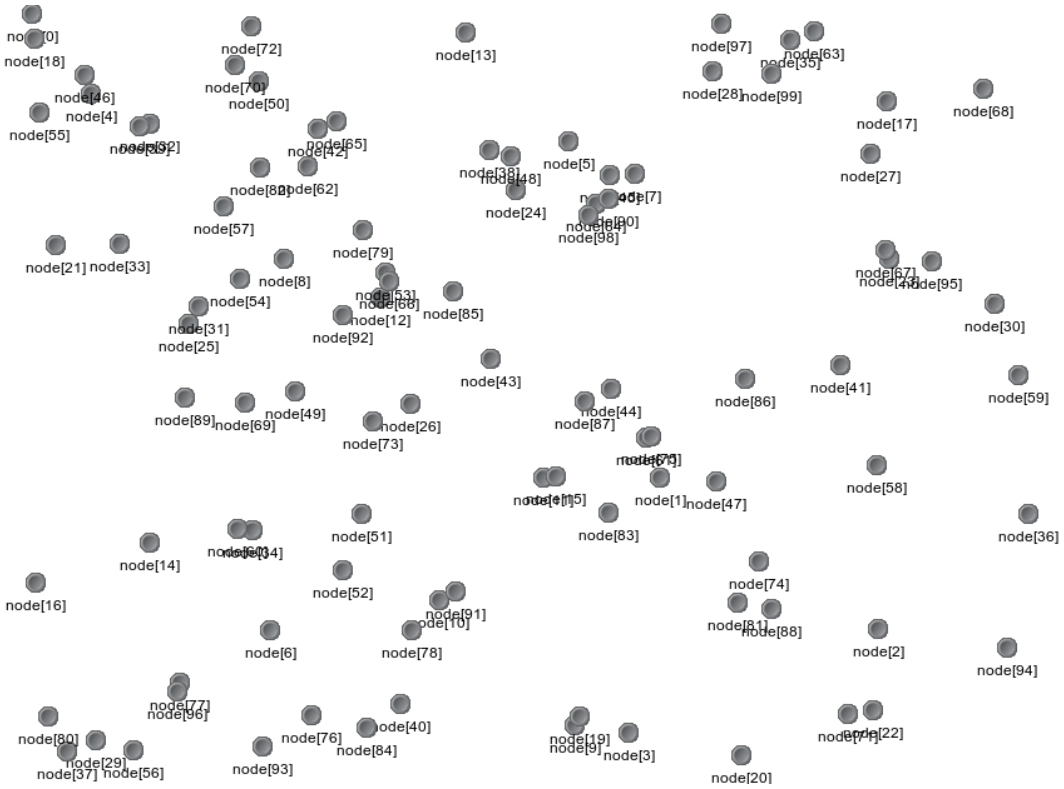


Şekil 5.11 : Çok Hoplamalı Benzetimin Enerji Tüketimi

Şekil 5.9'a baktığımızda tüm uyku peiyotlarında MC-PSMAC'in gecikmesinin daha az olduğu görülmektedir. Bu yüzden MC-PSMAC protokolünde paket aktarımı süreci daha kısa halde sonlanarak düğümlerin atıl konuma daha çabuk geçmeleri sağlanmaktadır. Şekil 5.11'de MC-PSMAC'in enerji tüketimi eğiminin daha küçük olması bundan kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak enerji tüketimi açısından da MC-PSMAC az da olsa tek kanallı protokole göre daha avantajlıdır.

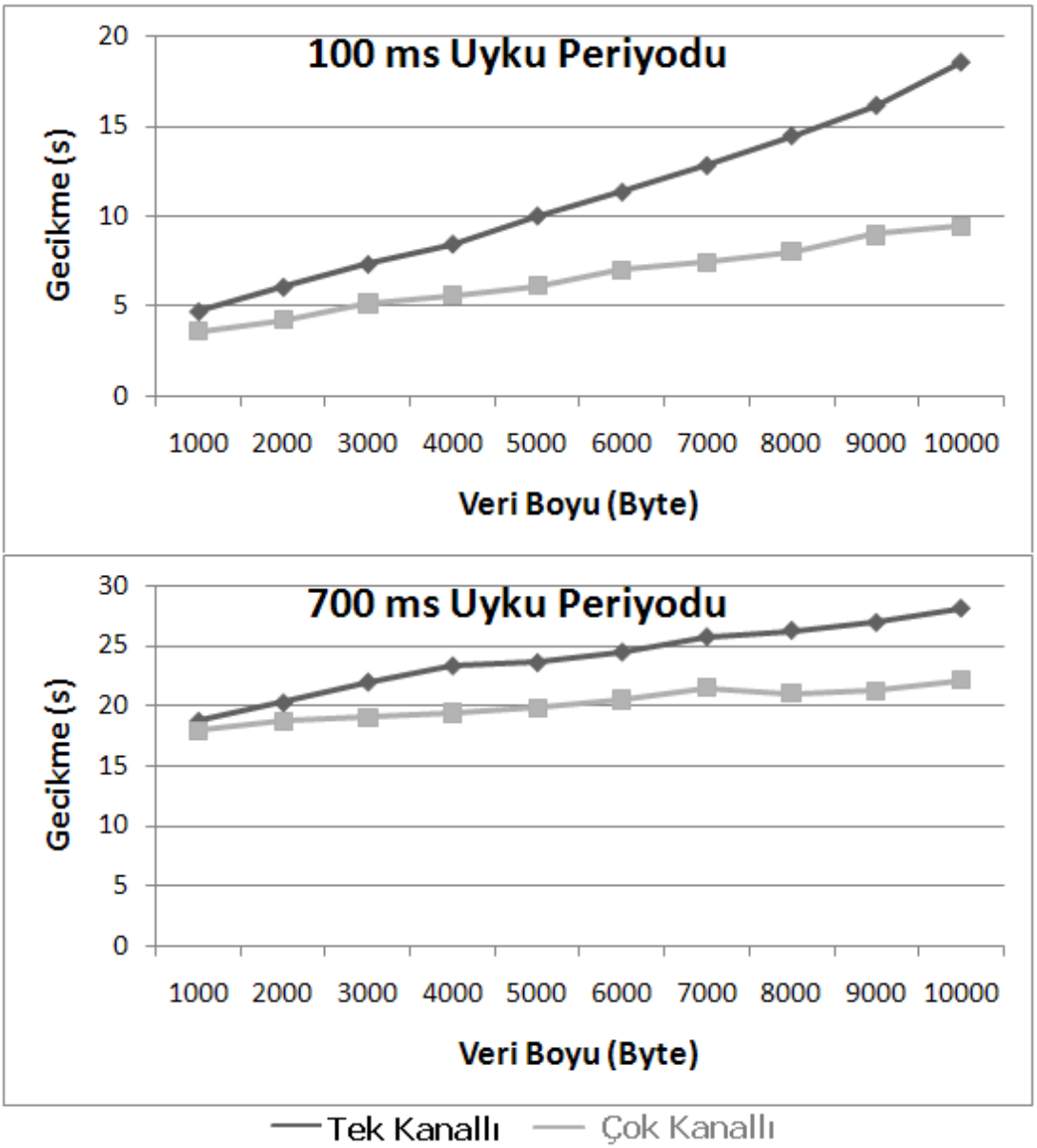
5.6 Karmaşık Topolojili Benzetim

Şekil 5.12'de benzetim için kullanılan topoloji görülmektedir.



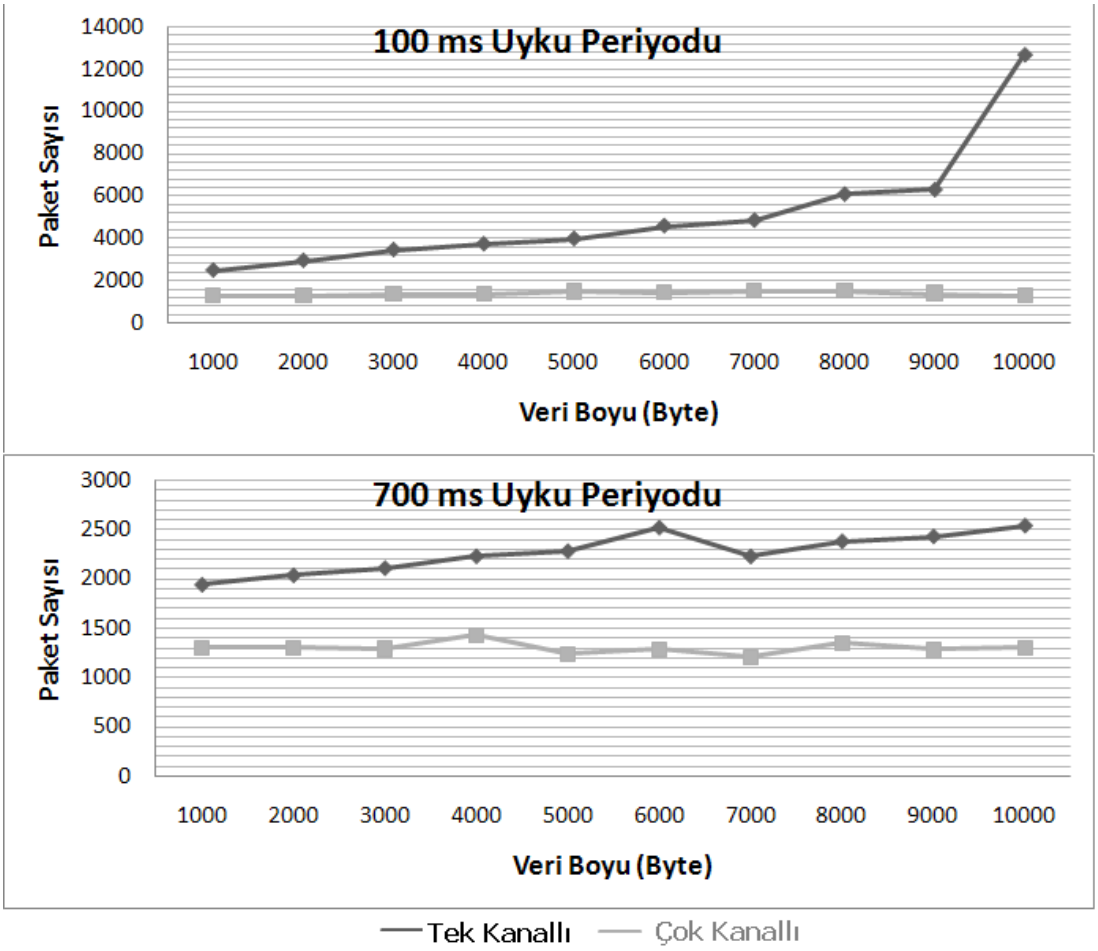
Şekil 5.12 : Karmaşık Topoloji

Topolojide toplam 100 tane düğüm bulunmakta, 100 saniye aralıklarla bu düğümlerden rasgele 10 tanesi fiziksel işlem modülüyle tetiklenerek merkez düğüme çeşitli veri boylarında veri aktarmaya çalışmaktadır. Her aktarım sırasında da ayrıca 29 numaralı düğümden merkez düğüme 12 hoplamalı bir kol üzerinden çeşitli veri boylarında aktarım yapılmaktadır. Gecikme ölçümü 29 numaralı düğümün merkeze paketi eriştirme süresi üzerinden yapılmıştır. Böylece MC-PSMAC protokolünün yoğun topoloji ve trafiklerdeki başarımı gözlemlenmiş olmaktadır. Ölçümler toplam 35 tane aktarımının ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13'de tek kanallı ve çok kanallı yapının 0.1 ve 0.7 saniye uyku periyotlarındaki gecikme karşılaştırması yer almaktadır. Bulunan sonuçlar basit topolojilerdeki sonuçlar ile benzerdir. Ayrıca karmaşık topoloji sonuçlarında çarpışmanın etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Çok kanallı yapının çarpışmaları azalttığı görülmüştür.



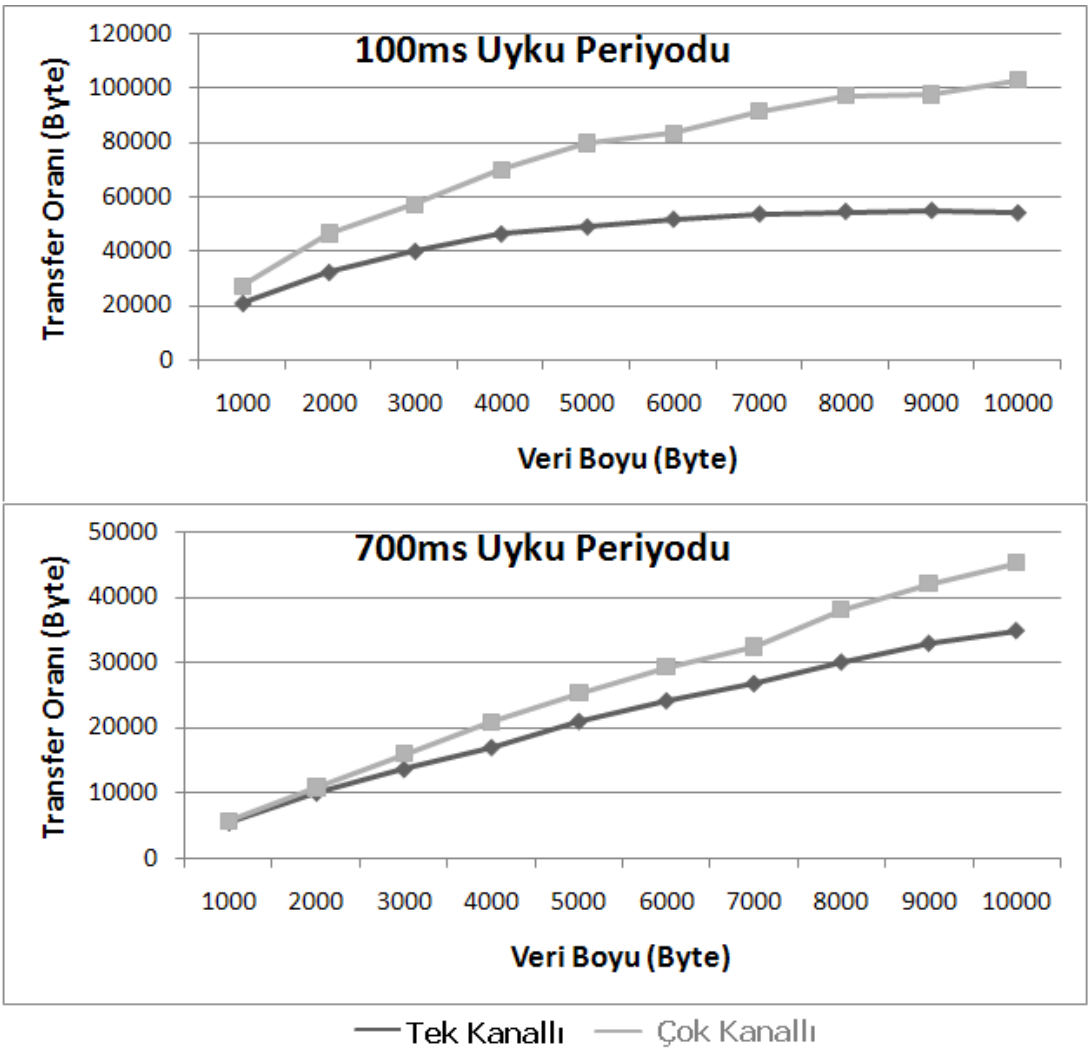
Şekil 5.13 : Karmaşık Topoloji Gecikme Karşılaştırması

Şekil 5.14'te düşen paket sayısı karşılaştırması verilmiştir. Çok kanallı yapı çarpışmayı azalttığından düşen paket sayısı daha az olmuş böylelikle paket tekrarı azalarak gecikmenin de azalması sağlanmıştır. Ayrıca grafiklere baktığımızda veri boyu büyüdükçe çok kanallı yapıda paket düşüşünün artmadığı görülmektedir. Bu da veri haberleşmesinin kontrol kanalının dışında yapılmasının sağladığı bir avantajdır. Paketlerde parçalama uygulansa bile veri boyunun artışı tek kanalda çarpışma olasılığını arttırmaktadır. Fakat MC-PSMAC'te bağımsız bir kanalda haberleşme yapıldığından böyle bir sorunla karşılaşmamaktayız.



Şekil 5.14 : Karmaşık Topoloji Düşen Paket Karşılaştırması

Şekil 5.15'te de karmaşık topolojinin transfer oranı görülmektedir. Tek kanallı yapıda 100 milisaniye uyku periyodunda büyük veri boylarında çarpışmanın artması paket tekrarlarını meydana getirmiş dolayısıyla transfer oranının düşmesine yol açmıştır. Öte yandan MC-PSMAC protokolünde ayrı kanalda haberleşme çarpışmayı engellediğinden böyle bir düşüş görülmemektedir. 700 milisaniyelik uyku periyodunda da çok kanallı yapının (MC-PSMAC) başarımının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15 : Karmaşık Topoloji Transfer Oranı Karşılaştırması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması sürecinde gerçekleştirilen işlemler sırasıyla detaylı olarak verilmiştir. Her tasarımda olduğu MAC protokolü tasarımda da öncelikli olarak tasarımın yapılacağı ortam tahlil edilmiş ve bu ortamın ihtiyaçları ortaya çıkartılmıştır. Daha sonra mevcut tek kanallı ve çok kanallı MAC protokolleri tasarımları incelenmiştir. Tüm bu sonuçlardan yola çıkılarak mevcut tasarımlar geliştirilerek telsiz duyarga ağlarının ihtiyaçları giderilmeye çalışılmıştır.

Tasarımda temel ölçütler olarak transfer oranın arttırılması ve gecikmenin azaltılması seçilmiştir. Bunun yanında diğer tasarımlarda olduğu gibi enerji tüketiminin düşük tutulması da göz önünde bulundurulmuştur. Çıkan sonuçlardan tasarlanan protokolün bu amaçlara hizmet ettiği görülmüştür. Ayrıca senkronizasyon ve kurulum aşamalarına ihtiyaç duyulmaması protokole ölçeklenebilirlik özelliği sağlamakla kalmamış aynı zamanda topolojideki değişimlerle uyumlu olmasını sağlamıştır. Ayrıca protokolün karmaşıklığı azalmış ve gerçek bir duyarga düğümünde gerçeklenmesinin yolunu açmıştır.

Sonuçlara baktığımızda protokolün duyarga düğümü yoğunluğu yüksek olan ve yüksek miktarlarda veri aktarımı gerektiren uygulamalar için uygun olduğu görülmektedir. Bu tarz uygulamalara örnek olarak çoklu ortam uygulamalarını ve yapısal sağlık izleme uygulamalarını verebiliriz.

Protokolün dezavantajlı yanlarına gelecek olursak, güç tüketimini azaltan en önemli etken olan uyku/dinleme çerçeve yapısı ciddi bir gecikme kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca diğer başlangıç sinyali protokollerinde olduğu gibi saklı uçbirim ve korunmasız uçbirim sorunları çok kanallı yapı sayesinde zayıflatılsa bile etkisini korumaktadır.

6.1 Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Senkronizasyon işlemi gerçekleştirilmeyen başlangıç sinyalli bir yapıda saklı uçbirim ve korunmasız uçbirim sorunlarını çözmek mümkün görülmemektedir. Bu sorunları ortadan kaldırabilecek ya da azaltabilecek ağ katmanı destekli bir yapının önerilmesi gerekmektedir.
- Çoğa gönderim türündeki paket aktarımı gerektiren uygulamalar için bu özelliğin protokole eklenmesi gerekmektedir.
- Benzetim her ne kadar gerçek dünyaya yakın bir benzetim sahip olsa da protokol gerçek bir duyarga ağı üzerine kurularak protokolün başarımının ölçülmesi gerekmektedir.
- Duyarga düğümleri küçük belleklere sahiptirler. Dolayısıyla büyük veri miktarlarında tampon dolma sorun ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bu durumda uçtan uca sanal bir kanal yaratılması haberleşmenin tekrar kurulum aşamasına gerek kalmadan verinin hızlı bir şekilde merkeze iletilebilmesini sağalaycaktır. Fakat bu işlemi gerçekleştirebilmek için ağ katmanı desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. Hem tampon dolma problemine çözüm getirmek hem protokolün performansını arttırmak için katmanlar arası tasarımların incelenerek mevcut protokolle tümleştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.,** 2002: Wireless sensor networks: a survey.

[2] **Kulkarni, S.S., 2004: TDMA Services for Sensor Networks**, *Proc. 24th Int'l. Conf. Distrib. Comp. Sys. Wksps.*, pp. 604-09.

[3] **Sohraby, K., Minoli, D. and Znati, T.,** 2007: *Wireless sensor networks: Technology, Protocols, and Applications*.

[4] **Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.,** 2004: Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. IEEE/ACM Trans. Net., vol. **12**, no. 3, June 2004, pp. 493–506.

[5] **Langendoen, K.,** 2007: Medium Access Control in Wireless Sensor Networks. In H. Wu and Y.Pan, editors, *Medium access control in wireless networks, volume **II**: practive and standards*.

[6] **Yahya, B. and Ben-Othman, J.,** 2009: Towards a classification of energy aware MAC protocols for wireless sensor Networks.

[7] **Demirkol, I., Ersoy, C. and Alagoz, F.,** 2006: MAC Protocols For Wireless Sensor Networks: A Survey. In: IEEE Communications Magazine, **44(4)**, pp. 115–121, April 2006.

[8] **Lu, G., Krishnamachari, B. and Raghavendra, C. S.,** 2004: An Adaptive Energy Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks, *Proc. 18th Int'l. Parallel and Distrib. Processing Symp.*, p. 224.

[9] **Li, J., Blake, C., Couto, D., Lee, H. and Morris, R.,** 2001: Capacity of Ad Hoc Wireless Networks, *ACM Mobicom*.

[10] **Lin, P., Qiao, C. and Wang, X.,** 2004: Medium Access Control with a Dynamic Duty Cycle for Sensor Networks, *IEEE WCNC, vol. **3***, pp. 1534–39.

[11] **Dam, T., Langendoen, K.,** 2003: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *ACM Sensys.*

[12] **Ye, W., Silva, F. and Heidemann, J.,** 2006: Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling, *4th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 321-334.

[13] **Polastre, J., Hill, J. and Culler, D.,** 2004: Versatile low power media access for wireless sensor Networks, *2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 95-107.

[14] **Hill, J. and Culler, D.,** 2002: Mica: a wireless platform for deeply embedded networks, *IEEE Micro, **22***, pp. 12-24.

[15] **Buettner, M., Yee, G., Anderson, E. and Han, R.,** 2006: X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty cycled wireless networks, *4th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 307-320.

[16] **El-Hoiydi, A. and Decotignie, J. D.,** 2004: WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks, *First Int. Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (AlgoSensors),* pp.18-31.

[17] **Schurgers, C., Tsiatsis, V., Ganeriwal, S. and Srivastava, M.,** 2002: Optimizing sensor Networks in the energy-latency-density design space, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 70-80.

[18] **Mahlknecht, S. and Boeck, M.,** 2004: CSMA-MPS: A minimum preamble sampling MAC protocol for lowpower wireless sensor networks, *IEEE Int. Workshop on Factory Communication Systems*, Vienna, Austria, pp. 73-80.

[19] **Bao, L. and Garcia-Luna-aceves, J. J.,** 2001 : A New Approach to Channel Access Scheduling for Ad Hoc Networks, *ACM MobiCom*, pp. 210–221.

[20] **Zhou, G., Huang, C., Yan, T., He, T., Stankovic, J. and Abdelzaher, T.,** 2006: Mmsn: Multi-frequency media access control for wireless sensor networks, *Infocom '06: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1–13.

[21] **Mastooreh, S., Hamed, S. and Antonis, K.,** 2007: Hymac: Hybrid tdma/fdma medium access control protocol for wireless sensor networks, *PIMRC 2007: The proceedings of the 18th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium*, pages 1–5.

[22] **Wu, Y., Stankovic, J.A., He, T. and Lin, S.,** 2008: Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks, *Infocom '08: Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1193–1201.

[23] **Le, H. K., Henriksson, D. and Abdelzaher, T.,** 2008: A practical multi-channel media access control protocol for wireless sensor networks, *IPSN '08: Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 70–81.

[24] **Hoesel, L. and Havinga, P.,** 2004: A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks, *INSS04*.

[25] **Kim, Y., Shin, H. and Cha, H.,** 2008: Y-mac: An energy-efficient multi-channel mac protocol for dense wireless sensor networks. *IPSN '08: Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 53–63.

[26] **Incel, O. D.,** 2009: *Multi-Channel Wireless Sensor Networks: Protocols, Design and Evaluation.*

[27] **Voigt, T.,** 2008: Self-organizing, collision-free, multi-channel convergecast. *European Conference on Wireless Sensor Networks (Poster Proceedings)*, Bologna, Italy.

[28] **CC2420 DataSheet,** *<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>*, alındığı tarih 24.12.2009

[29] **Omnet++ internet sitesi,** *<http://www.omnetpp.org> ,* alındığı tarih 24.12.2009

[30] **Castalia internet sitesi,** *<http://castalia.npc.nicta.com.au/>,* alındığı tarih 24.12.2009

[31] **Url-1** *<http://www.allaboutbatteries.com/Energy-tables.html>,* alındığı tarih 24.12.2009

EKLER

EK A.1 : Türkçe – İngilizce Terimler Sözlüğü

EK A.1

Çizelge A.1 : Türkçe – İngilizce Terimler Sözlüğü.

Türkçe	İngilizce
Adaletlilik	Fairness
Atıl dinleme	Idle listening
Başlangıç sinyali	Preamble signal
Çarpışma	Collision
Çekişme tabanlı	Contention-based
Çekişme Penceresi	Contention window
Çerçeve	Frame
Çoğa gönderim	multicast
Dilim	Slot
Flooding	Sel Basma
Genel yayımlama	Broadcast
Geri çekilme	Backoff
Kararlılık	Stability
Korunmasız uçbirim	Exposed terminal
Ölçeklenirlik	Scalability
Parçalama	Fragmentation
Rastlantısal işitme	Overhearing
Sağlamlık	Robustness
Saklı uçbirim	Hidden terminal
Sekizli	Byte
Taşıyıcı sezinlemesi	Carrier sense
Teke gönderim	Unicast
Toplayıcı	Sink
Trafik dalgalanması	Traffic fluctuation
Transfer Oranı	Throughput
Veri toplama ağacı	Data gathering tree
Yakınsayan yayımlama	Convergecast
Yerel yayımlama	Local gossip
Zamanlayıcı	Timer

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Turgay Pamuklu

Doğum Yeri ve Tarihi: Hamburg 1982

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği

Yayın Listesi:

- T. Pamuklu, G. Dogangil, E. Ozcicek, A. Kuzucu, 2005: Kablosuz Haberleşmeli Bir Robot Yunusun Mikrodenetleyici İle Geri Beslemeli Kontrolü. TOK Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı, Istanbul, Türkiye. pp. 279-285.