Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

AKÜ FEMÜBİD 16 (2016) 025101(265-275) AKU J. Sci. Eng. 16 (2016) 025101(265-275)
DOI: 10.5578/fmbd.27776

Araştırma Makalesi / Research Article

IEEE 802.11 Kablosuz Ağlarda Güç-Tasarruf-Modunu Etkin Kullanan Yaklaşımlar ve Benzetim Ortamında Mukayeseleri

Mehmet Fatih Tüysüz
Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa
e-posta: ftuysuz@harran.edu.tr

Geliş Tarihi: 21.04.2016; Kabul Tarihi: 25.08.2016

Özet

IEEE 802.11 kablosuz ağları sağladığı esneklik, uygun fiyatlandırma ve kolay kurulum avantajları ile akıllı cihazlar tarafından günümüzde en çok kullanılan kablosuz ağ erişim teknolojilerinden biri haline gelmiştir. Yalnız kablosuz bir ağ arayüzünün akıllı cihazlarda aktif olarak kullanılması, bataryanın hızlı tüketimine ve etkin kullanım süresinin önemli derecede azalmasına sebep olmaktadır. IEEE 802.11 kablosuz ağ standardları (IEEE 802.11a/b/g/n/ac) kullanıcıların ağa erişiminde Çarpışmadan Kaçınmalı Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)) yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşım cihazlar arası paket gönderim işlemlerinin çarpışmaması için ağın dinlenmesine dayanır. Bu dinleme işlemi sırasında cihazlar önemli derecede güç tüketirler. Bu sorunun çözümü için kablosuz ağ standardında tanımlanan Güç-Tasarruf-Modu (PSM) kulanılabilir. Kablosuz ağ standardında bu kısım tanımlansa da, kabul edilen herhangi bir standard algoritma bulunmamaktadır. Dolayısıyla, optimal enerji verimliliği için literatürde sunulan bir çok PSM temelli yaklaşım mevcuttur. Bu çalışma kapsamında öncelikle literatürde sunulan ve PSM protokolünü etkin kullanan güncel PSM önerileri incelenmektedir. Sonrasında ise bahsi geçen öneriler OMNET benzetim ortamına aktarılarak enerji verimliliği mukayese edilmektedir.

Anahtar kelimeler
Enerji verimliliği; PSM; IEEE 802.11 Kablosuz ağları; Ağ Erişim Kontrolü; CSMA/CA

Energy-efficient IEEE 802.11 PSM Approaches and Their Comparison

Abstract

IEEE 802.11 wireless networking technology is now one of the most utilized Radio Access Technologies (RAT) as it provides mobility, low cost and easy deployment. However, activating Wi-Fi interface of a smart mobile device causes reduction on active use-time of the battery with rapid power consumption. IEEE 802.11 wireless network standards let devices perform Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) to access the channel. This method is based on sensing the medium and scheduling channel access to reduce probability of collision. Yet, it results in high amount of power consumption. In order to address this problem, Power Save Mode (PSM) has been declared in the amendment, but procedure of the PSM left open to researchers. Therefore, there have been many PSM-based energy-efficient channel access approaches proposed in the literature. Throughout this paper, we first examine existing well-performed state of the art PSM approaches. Second, we evaluate and compare energy efficiency ratios of these approaches via OMNET network simulator.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Keywords
Energy efficiency; PSM; IEEE 802.11 Wireless Networks; Medium Access Control; CSMA/CA

1. Giriş

IEEE 802.11 kablosuz ağ teknolojisi son yıllarda önemli bir evrim geçirmiş ve günümüzün en sık kullanılan kablosuz ağ erişim standartlarından biri haline gelmiştir. Bu süreç içerisinde hızla büyüyen ağ trafiğinin ve paket iletim/alımının hızlı bir şekilde sağlanabilmesi için, IEEE 802.11a/b/g/n ve son olarak da 802.11ac standartları hayata geçirilmiştir. Wi-Fi arayüzü aktif olan bir cihaz temel olarak dört farklı güç tüketim durumuna sahiptir; (i) çerçeve iletimi, (ii) çerçeve alımı, (iii) boşta çalışma ve (iv) uyku. Bir çerçevenin kanalda iletilebilmesi için, cihazın son bite kadar her bir biti tek tek ağ kartı üzerinden bir güç harcayarak kablosuz sinyallere

dönüştürmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, en fazla güç tüketimi çerçeve iletimi durumunda gerçekleşir. Kablosuz ağın yapısı gereği cihazlar çerçeve alımı ve boşta çalışma durumlarında da önemli derecede güç tüketirler (bakınız Tablo 2). Cihazların en düşük güç tüketim modu uyku durumudur. Yalnız, yüksek performans için, uygulamalar mümkün olan en çok sayıda çerçeve iletimi/alımı yapabilmek için tasarlanırlar ve haliyle cihazların uyku durumuna nadiren geçebildikleri veya genellikle uyanık kaldıkları söylenebilir.

Yapılan araştırmalar (Kravets and Krishnan 1998, Anastasi, Conti et al. 2004) akıllı cihazlar tarafından tüketilen enerjinin neredeyse yarısının kablosuz ağ arayüzleri (örneğin GSM, Wi-Fi, 3G ve LTE) tarafından tüketildiğini göstermektedir. Akıllı bir cihazın enerji tüketeceği bir çok komponentin (LCD ekran, sensöler, alt donanımlar, iletişim ve hesaplamada gerekli devreler) olduğu düşünülürse, bahsi geçen oranın ne denli büyük bir oran olduğu anlaşılabilir. Ayrıca, kablosuz ağlarda enerji verimliliği üzerine yapılmış diğer çalışmalar (Rozner, Navda et al. 2010, Manweiler and Roy Choudhury 2011) cihazların ağa erişim hakkı kazanabilmek için ortamdaki diğer cihazlarla yarışırken önemli derecede güç tükettiklerini ortaya koymuştur. Kısacası, günümüzde kullanılan mevcut batarya teknolojisinin kapasite artış oranı Moore Kanunu ile belirtilen işlemci kapasite oranı ile uyuşmadığı için, yüksek güç tüketimi gerek kablosuz ağ kartı, gerekse de mobil cihaz tasarımı için önemli bir odak noktasıdır. Bu kapsamda araştırmacılar artık hem ağ erişim teknolojilerini, hem de ağ desteği sağlayan uygulamaları daha enerji verimli bir hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Kablosuz ağlarda cihazların ağa erişimi Ağ Erişim Kontrolü (MAC) protokolü ile sağlanır. Bu protokol ile cihazların ağı çarpışmalardan kaçınma prensibi ile paylaşması sağlanmaktadır. Ağ üzerinde birden fazla cihazın varlığı durumunda, çarpışmadan kaçınma tekniği her ne kadar çarpışma olasılığını azaltsa da tam olarak çarpışmalar önlenemez. Çarpışmalara ek olarak, ağ üzerinde birden fazla cihazın aktif olmasıyla (i) uzun süreli alım durumu veya boşta bekleme[1], (ii) hedef-dışı çerçeve alımı[2], (iii) protokol ek-yükü[3] gibi sorunlar da oluşur ve güç tüketimi önemli derecede artar. Yukarıda bahsi geçen sorunlara çözüm bulacak bir yaklaşım kablosuz mobil cihazlara enerji verimliliği sağlayabilir ve bu cihazların iletişim sürelerini önemli derecede artırabilir. Bahsi geçen sorunlara karşı literatürde önerilen en temel yöntem kablosuz ağ standardında belirtilen Güç-Tasarruf-Modunun (PSM) geliştirilmesi ve bu sayade, cihazların boşta kalma sürelerinin, çarpışma ihtimalinin ve diğer ek yüklerin azaltılmasıdır.

Bu çalışma, literatürde sunulan güncel ve enerji verimliği yüksek PSM önerilerinin incelenmesini ve bir çatı altında toplanmasını amaçlamaktadır. Ayrıca, incelenen öneriler çalışma kapsamında OMNET benzetim ortamına aktarılarak, enerji verimliliği mukayesesi gerçekleştirilmektedir.

2. IEEE 802.11 Kablosuz Ağları ve PSM

2.1. IEEE 802.11 Kablosuz Ağlarda Ağa Erişim

Kablosuz yerel ağ standardında cihazların ağa erişimini sağlayan yöntem Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonu (DCF) yöntemidir. DCF CSMA/CA yaklaşımını geri çekilme (backoff) algoritması ile gerçekleştirir. DCF yaklaşımında, ağa erişmek isteyen bir cihaz iletim öncesi ağı bir DIFS (Distributed Interframe Space) süresi kadar bekler. Bu süre zarfında kanalın meşgul olduğu algılanırsa, cihaz iletimini kanalın boşalacağı süreye kadar beklemeye alır. Birden fazla cihazın bulunduğu bir ağda, ağın meşgul olduğunu anlayan cihazların tamamı ağ boşalana kadar iletimlerini ötelerler. Ağın boşaldığı algılanınca cihazlar aynı anda iletim yapmaya kalkışırlarsa, iletilen çerçeveler çarpışır.

[1] Cihazlar kendilerine bir çerçevenin nezaman geleceğini kestiremedikleri için uzun müddet alım durumunda kalabilirler. Ayrıca, birden fazla cihazın aynı anda ağa erişim için yarışması da cihazların uyku durumunda kalması yerine boşta çalışmalarına sebep olur. Bu iki durumda da cihaz daha fazla güç tüketecektir.

[2] Bir cihazın aynı ağdaki başka cihazların gönderdikleri paketleri alıp, paketin kendine gelmediğini anlaması ve kuyruğundan atması işlemi.

[3] Cihazların göndereceksleri her çerçeveye başlık ve kontrol bilgilerinin eklenmesi, bunun da çerçeve boyutunu ve haliyle ağ trafiğini artırmasıdır.

Aynı ağdaki farklı cihazların aynı anda çerçeve iletme ihtimalinin azaltılması için DCF cihazlar üzerinde rassal bir geri çekilme algoritması çalıştırır. Bu algoritma cihazların çerçeve iletimlerini DIFS sonrası belirli bir süre daha beklendikten sonra iletme prensibine dayanır. Kablosuz ağlarda zaman dilimi slotlara ayırılmıştır ve cihazların beklemesi gereken toplam slot sayısı her cihaz tarafından rassal olarak belirlenir.

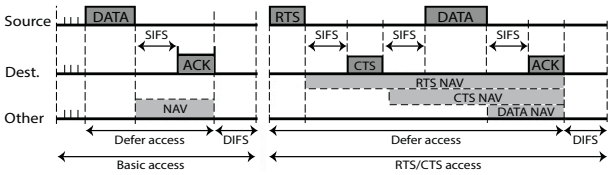
$$Backoff = rassal(1, CW) \times slot\ süresi$$

Bu yöntem ile ağın boşaldığını aynı anda algılayan cihazlar geri çekilme değerlerini rassal olarak seçerek iletim zamanlarını farklılaştırırlar ve çerçevelerin çarpışma ihtimalini azaltırlar. Bir cihaz çerçevesini ilk defa iletmek için hatta yarışıyorsa, cihaz o çerçeve için 1 ile CW_{min} (31) arası bir geri çekilme değeri seçer ve toplam geri çekilme süresini belirler. İletilen çerçevenin başka bir çerçeve ile çarpışması durumunda ise, cihaz o çerçeve için daha büyük bir geri çekilme aralığı seçerek, çerçevenin tekrar çarpışma ihtimalini azaltır. İletilmeye çalışılan çerçeve başka çerçevelerle çarpıştıkça, geri çekilme slot aralığı büyütülür. Yalnız, çerçeve aralığı CW_{max} 1024 değerinden büyük olamaz. DCF protokolü tarafından kullanılan ikili üssel geri çekilme prosedürü Algoritma_1'de gösterilmektedir. İletilen çerçevelerin başarılı olması durumunda ise alıcı tarafından ileticiye çerçevenin başarıyla alındığını bildiren ACK çerçevesi yollanır.

Algorithma 1: İkili Üssel Geri Çekilme Prosedürü (Backoff)

```
if ( Rc == 0 ) then            // ilk iletim
    CW = CWmin                 // CWmin = 32
else                           // tekrar iletim
    CW = 2(CW + 1) – 1
    CW = min(CW, CWmax)        // CWmax = 1024
Backoff = rand(1, CW) x (slot)
```

Ayrıca Şekil 1'de gösterildiği gibi, ağdaki çarpışmaların önlenmesi için Request to send ve Clear to send (RTS/*CTS*) ağ erişim metodu da kullanılabilir (Langendoen and Halkes 2005). Yalnız bu yöntemde, özellikle de ağda çok sayıda cihaz bulunmuyor iken, ek RTS/CTS çerçeve gönderimlerinden dolayı, data çerçevelerinin iletimleri daha uzun süreler alır ve bu da ağın iş-yükü performansının düşmesine ve enerji tüketiminin artmasına sebep olur.



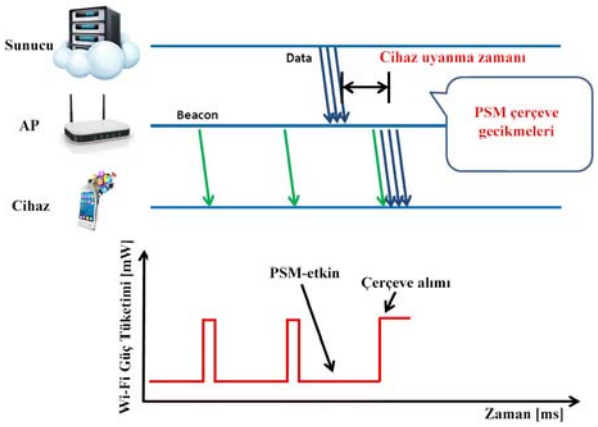
Şekil 1. IEEE 802.11 Ağa Erişim Metodları (IEEE Std 802.11, 1997).

2.2. IEEE 802.11 Güç Tasarruf Modu (PSM)

IEEE 802.11 kablosuz ağlarında kullanılan PSM protokolünün amacı, cihazların Wi-Fi arayüzünün sadece çerçeve alımı/gönderiminin gerekli olduğu durumlarda aktif olması, diğer durumlarda ise mümkün oldukça cihazların uyku moduna alınarak güç tüketiminin en aza indirilmesidir. Kablosuz ağlarda cihazların uyku moduna alınması işleminde kilit rolü erişim noktaları (AP) üstlenmektedir. Ağdaki her cihaz uyku moduna geçmeden önce uyku moduna geçeceği bilgisini bağlı olduğu erişim noktasına bildirir. Bir cihaz uyku modundayken erişim noktasına o cihaz için gelen çerçeveler erişim noktasının hafızasında tutulur. Erişim noktaları belirli aralıklarla, genellikle her 100 milisaniyede bir, ortama beacon çerçeveleri yollarlar. Bu sayede kablosuz ağlarda cihazlar ve erişim noktası arası senkronizasyon sağlanır. Ayrıca, zaman kavramı beacon aralıkları ile ifade edilir. Her bir beacon aralığı Announcement Traffic Indication Message (ATIM) penceresi ve data penceresi olmak üzere iki kısıma ayırılır. Beacon çerçeveleri içerisinde erişim noktasının hafızasında tuttuğu ve cihazlara iletilecek en az bir çerçevenin olduğunu bildiren Traffic Indication Map (TIM) bilgisi bulunur. Erişim noktasının beacon gönderim sıklığına (süresine) göre cihazlar uyku sürelerini ayarlarlar ve beacon çerçeveleri gönderilirken çerçeveyi kaçırmamak için belirlenen sürelerde cihazlar uyanık durumda kalırlar. Uyanan bir cihaz TIM içerisinde kendisine iletilecek bir çerçeve olduğunu öğrenince, bağlı olduğu erişim noktasına bir PS-Poll çerçevesi yollayarak, uyandığını ve kendisine iletilecek çerçeveleri beklediğini erişim noktasına bildirir. Bu süreçte cihaz ve erişim noktası arasındaki çerçeve

alımı/gönderimi işlemleri DCF protokolü ile gerçekleştirilir. Cihaz erişim noktasında tutulan tüm çerçevelerini aldıktan sonra bir sonraki beacon çerçevesine kadar tekrar uyku moduna geçer ve güç tüketimini minimuma indirir.

Kısacası, PSM durumundaki bir cihaz üç temel operasyon için uyanık kalmalıdır: (i) beacon çerçeveleri alımı sırasında (ii) erişim noktasından çerçeve alımı sırasında, ve (iii) erişim noktasına ACK veya data çerçevesi gönderimi sırasında. Şekil 2'de bir cihazın Güç-Tasarruf-Modu (PSM) ve tahmini güç tüketim miktarı özetlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, cihaz temel olarak beacon çerçeveleri alımı öncesinde uyanıp, kendisine ait bir çerçeve olup olmadığını kontrol etmekte ve bir çerçeve alımı öngörülmüyor ise, bir sonraki beacon çerçevesine kadar uyumaktadır. Başka bir beacon çerçevesi ile kendisine iletilecek çerçevelerin olduğunu öğrendiğinde ise, cihaz çerçeve alım durumuna geçer, çerçevelerinin erişim noktasından iletilmesini sağlar. PSM prosedürü cihaza önemli derecede enerji verimliliği sağlarken, şekilde de görüldüğü gibi çerçevelerin geç gönderimi/alımına sebep olduğundan iş-yükü performansının düşmesine ve gecikmelere sebep olabilir.



Şekil 2. IEEE 802.11 Güç-Tasarruf-Modu ve Güç Tüketim Miktarı.

3. Literatürde Sunulam PSM Yaklaşımları

Literatürde kablosuz ağlardaki Güç-Tasarruf-Modu ile alakalı çok sayıda yaklaşım bulunmaktadır. Bu çalışmalar temel olarak çekişme (contention) süresinin kısaltılması, PSM-etkin ve PSM-pasif cihazların ayrıştırılması, erişim noktası destekli uyku süresi hesabı, ATIM-merkezli uyku süresi hesabı, boşta çalışma süresinin minimizasyonu, enerji-gecikme takası, RTS/CTS-temelli uyku süresi hesabı ve erişim noktasının uyku durumuna geçirilmesi gibi alt sınıflara ayırılabilir. Bu çalışmada bahsi geçen sınıflara ait güncel olan veya güncelliğini koruyan, önemli derecede enerji verimliliği sağlayan PSM yaklaşımlarının incelenmesi ve kıyaslanması amaçlanmaktadır.

Literatürde PSM'in performans ve enerji açısından verimliliğini inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin Tauber ve Bhatti (2012) standart PSM'i geniş çaplı deneylerle (farklı yük miktarı, hız ve çerçeve boyutları ile) analiz etmiş ve tüketilen enerji miktarını PSM-pasif kablosuz ağlarla kıyaslamıştır. Bu çalışmanın sonucunda ise yazarlar standart PSM'in kullanılmasıyla enerji açısından önemli bir kazanım elde edilemeyeceğini bildirmektedirler. Yapılan deneysel çalışmalardan farklı olarak; Swain, Chakraborty *et al.* (2014) ideal ve hata-meyilli (error-prone) kanal koşullarında PSM aktifken kablosuz ağlardaki güç tüketim miktarını, beklenen iş-yükü değerini ve çerçevelerin gecikme sürelerini analitik olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmadaki sonuçlarda da PSM ile enerji verimliliği sağlanırken, iş-yükü kaybı ve gecikmelerin de gerçekleştiğini ve dolayısıyla iletilen/alınan bit-başına-tüketilen-güç açısından PSM'in çok da başarılı olmadığı gösterilmiştir.

Standart PSM'in eksikliklerini gidermek adına literatürde sunulan bir çok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri cihazların maruz kaldığı toplam çekişme sürelerinin azaltılmasıdır. Kablosuz ağda hizmet veren bir erişim noktasına bağlı çok sayıda cihazın olması, cihazlararası çekişme sürelerini artırıp hattı ele geçirme sürelerini ise azaltacağından dolayı, cihazların uyuyamaması veya az uyuyabilmesine sebep olur. Bu problemin çözümü için cihazların almayı bekledikleri paket sayısına ve büyüklüğüne göre bir önceliklendirme yapılarak, cihazların farklı zamanlarda çekişmeye girmelerini ve uyku

sürelerini artırmayı amaçlayan çalışmalar mevcuttur.

Stine ve De Veciana (2002) TIM çerçevelerini genişleterek cihazların ağa erişim planlamasını da beacon çerçeveleri içerisine eklemektedir. Böylece, beacon çerçevesi alan bir cihaz hizmet alma sırasını önceden öğrenebilmektedir. Eğer planlama işleminde hattı uzun süre işgal edecek cihazlara öncelik verilirse (Longenst-Job-First), diğer cihazlar ağda daha uzun süre uyanık kalarak daha fazla güç tüketebilirler. Dolayısıyla, yazarlar hizmet planlamasında en kısa işin en önce tamamlanmasının (Shortest-Job-First) cihazların toplam bekleme süreleri açısından daha avantajlı olacağını bildirmişlerdir.
Cihazlar için daha ayrıntılı bir ağ erişim planlaması çalışması He ve Yuan (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yazarlar ağ erişim planlaması için spesifik zaman slotları tahsisi yaparak TDMA benzeri bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşım cihazlara hangi zaman slotunda iletim yapacağı bilgisini paylaştığı için çarpışmalar önlenir ve önemli ölçüde enerji verimliliği sağlanır. Cihazlara sanal olarak slot tahsisi veya zaman dilimi tahsisi yapan benzer yaklaşımlar (Suh, Ko *et al.* 2005, Jung and Vaidya 2008) literatürde başka yazarlar tarafından da sunulmuştur. Bu çalışmalarda ATIM çerçeveleri içerisinde slot tahsisleri gerçekleştirilir ve data penceresinde cihazlar ne zaman iletim/alım yapacaklarını bilirler. Yalnız, yukarıda bahsi geçen bu çalışmalar erişim noktasının hafızasında tuttuğu tüm paketlerin bir beacon aralığında alınabileceği düşünülerek tasarlanmıştır. Ağdaki cihaz sayısının fazla olması durumunda, çekişme sürelerinin uzaması ve cihaz başına düşen ağ erişim zamanının azalması nedeniyle, cihazların alacağı çerçeveler bir sonraki beacon aralığına kayabilir.

Bilindiği üzere, beacon aralıkları ATIM ve data penceresi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Cihazların data çerçeveleri gönderimleri/alımları sadece data penceresinde gerçekleşmektedir. ATIM penceresinin amacı ise alıcı istasyonara kendileri için tutulan paketlerin olup olmadığını bildirmektir. Ağın performansını artırmak adına Jung ve Vaidya (2002) NPSM adlı bir yaklaşım önermektedir. Bu yaklaşımda ATIM penceresi kaldırılmıştır; cihazlar bir hedefe çerçeve gönderirken, paket içerisine iletim için bekleyen çerçeve sayısı bilgisini de eklerler ve böylece ATIM penceresinde yapılan işlemler paket içerisinde tanımlanmış olur. Yalnız, bu yaklaşım hem modem hem de cihaz tarafında ciddi yazılımsal güncellemelere ihtiyaç duymaktadır ve uygulanabilirliği güçtür.

PSM'nin cihazlara sağladığı enerji kazancını artırmanın bir başka yolu ise PSM-etkin ve PSM-pasif cihazların ayrıştırılmasıdır. Zhu ve Niu (2008) bu iki tipe farklı ağ erişim öncelikleri atayarak, ağı önce PSM-etkin cihazların ele geçirmesi, iletişimlerini gerçekleştirmesi ve sonrasında uyku moduna geçerek enerji tasarrufu yapmalarını sağlamıştır. Bu yaklaşımda, uyku moduna geçmek isteyen cihazların ortalama enerji tüketimi azalırken, PSM kullanmayan cihazların ise enerji tüketimleri artmaktadır. Ağdaki tüm cihazlar bir bütün olarak düşünüldüğünde, toplam enerji tüketimi azaltılmamaktadır.

Literatürde PSM'in performans artırımı için erişim noktası destekli uyku süresi hesabı yapan yaklaşımlar da mevcuttur. Örneğin Jang, Hao *et al.* (2011) Snooze adlı bir enerji yönetim sistemi önermektedirler. Bu çalışmada erişim noktaları ağdaki trafiğin yönetilmesi ve her cihazın uyku süresinin hesaplanmasından sorumludur. Uyku süresi hesabı cihazın toplam iş-yükü miktarını ciddi oranda azaltmadan ve cihazların çerçeve iletimlerini mümkün oldukça geciktirmeden gerçekleştirilmelidir. Çalışma kapsamında gerek multimedya gerekse de data çerçeveleri üzerinde testler gerçekleştirilmiş ve önerilen çalışmanın standart PSM yaklaşımına göre yüzde 30-85 arası daha verimli olduğu benzetim ortamındaki testlerle gösterilmiştir.

Kablosuz ağlarda alım veya boşta çalışma sürelerinin azaltılarak, uyku sürelerinin

artırılmasına yardımcı olan bir başka yaklaşım ise cihazların kendilerine ait olmayan çerçeveler için alım moduna geçmemeleridir. Bu mantığı kullanan Übersleep adlı bir çalışma (Sudarshan, Prasad *et al.* 2014) ve buna benzer bir diğer çalışma (Balaji, Tamma *et al.* 2010) literatürde sunulmuştur. Übersleep yaklaşımında, cihazlar gelen çerçevelerin ilk 14 bitini okuyarak, çerçevelerin kendilerine ait olup olmadıklarını anlarlar. Çerçeveler kendilerine ait değil ise alım modundan çıkıp, paket gönderimi artı DIFS süresi kadar uyku modunda kalarak enerji tasarrufu sağlarlar.

Boşta kalma ve alım durumlarından uyku durumuna geçiş sağlayan farklı tipte çalışmalar da mevcuttur. Örneğin Pefkianakis, Chandrashekar *et al.* (2014) WiFi-ies adlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda her cihaz ağın yoğunluğunu, çerçeve iletim/alım sıklığı ve aralıklarını, uygulamaların kullanım yoğunluğunu, lokasyonu, ekranın açık olmadığını vs. bilgileri kullanarak yeni bir trafiğin olup olmayacağını kestirmeye çalışır ve trafik akışı beklenmeyen durumlarda cihazı uyku moduna alarak enerji tasarrufu sağlar. Yakın zamanda tarafımızca gerçekleştirilen çalışmalarda (Tuysuz, Ucan et al. 2015, Tuysuz, Ucan et al. 2015), cihazlara enerji tasarrufu sağlayan EEMAC adlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışmaların birinde doygun trafik, diğerinde ise doygun ve doygun olmayan trafik akışının iç içe olduğu hetorojen ağlar düşünülerek, (i) cihazların ard arda gönderecekleri her iki çerçeve arasında geçmesi muhtemel zamanın dinamik olarak hesaplanması, (ii) bu aralıktan biraz daha kısa bir süre uyku moduna geçilmesi, ve (iii) cihazların uyandırılarak, çok daha küçük bir bakoff aralığı arasından slot seçimi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kablosuz ağlarda enerji verimli iletişimin bir diğer yöntemi ise enerji-gecikme takası temelli çerçeve iletimi/alımıdır. Qiao ve Shin (2005) SPSM adlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım trafik yoğunluğunu analiz ederek, uygulamanın ve kullanıcının kabul edebileceği bir gecikmeye kadar çerçevelerin iletiminin/alımının programlanmasıdır. Bu sayede cihazın kabul edilebilir bir süreye kadar uyku durumunda kalması sağlanarak, ortalama güç tüketimi azaltılır. Benzer şekilde Jung, Kim *et al.* (2014) ağdaki uyanık durumda olan cihaz sayısını ve ağın yoğunluğunu analiz ederek, harcanacak güç ile çerçeve iletim/alım sürelerinin gecikme oranını dengeleyen bir çalışma yürütmüşlerdir.

Li, Zhang *et al.* (2015) DW (Delayed Wake-up) adlı bir yaklaşım önermiştir. Eğer ağda tıkanıklık temelli bir problem varsa ve varolan trafik azaltılmadan ağda bir rahatlık sağlanamayacaksa, önerilen yaklaşım uyuyan cihazların daha fazla uyumasını sağlar ve uyanma zamanlarını ağ yoğunluğuna göre dinamik olarak planlar. Bu sayede, hem cihaz daha fazla uyutularak enerji kazancı sağlanır, hem de tıkanıklık durumunda aktif olan cihaz sayısı artırılmayarak olası çarpışmaların önüne geçilir. Bir başka çalışmada (Zhu, Luan *et al.* 2015) ise, gecikmeye toleranslı olmayan çerçevelerin mümkün olan en kısa sürede hatta iletimi için, cihazın kuyruğuna yeni bir çerçeve eklendiği gibi derhal cihazı uyku durumundan çıkaran ve çekişmeye sokan bir protokol; E-TPM önerilmiştir.

Omori, Tanigawa *et al.* (2015) RTS/CTS mekanizması aktifken, hangi cihazın hattı kullanacağı bilgisinden yararlanarak Network Allocation Vector (NAV) süresi boyunca cihazları uyku durumuna sokan bir yaklaşım önermiştir. Başka bir çalışmada (Ding, Pathak *et al.* 2012) ise erişim noktası aynı zamanda bir vekil sunucu haline getirilmiş ve detaylı trafik analizlerine imkan sağlanmıştır. Bu kapsamda geliştirilen erişim noktası kısa ve uzun trafik akışlarına göre farklı PSM parametreleri belirleyerek, enerji verimliliği sağlar.

Çalışma kapsamında şimdiye kadar incelenen tüm yaklaşımlarda cihazların uyku moduna alımı öngörülmektedir. Literatürde enerji verimliliği sağlanabilmesi için erişim noktasını uyutmaya çalışan yaklaşımlar da mevcuttur. Örneğin Zhang, Todd *et al.* (2006) PSAP adlı yeni bir erişim noktası geliştirmişlerdir. Bu çalışmada erişim noktası üç farklı alt modda çalışabilmektedir. Bu modlardan

ilki uyku modudur ve bu mod aktifken erişim noktası cihazlar gibi uyutulur. Diğer mod Relay modudur; erişim noktası komşusundan/komşusuna trafik akışı gerçekleştirir. Son mod ise çekişme modudur. Bu modda ise erişim noktası standart DCF protokolü ile cihazlarla çerçeve iletimi/alımı işlemlerini gerçekleştirmektedir. Aynı lokasyonda birden fazla erişim noktasının bulunması durumunda bu çalışma ile erişim noktalarının farklı zaman dilimlerinde çalıştırılması sağlanarak, sinyal çakışmaları, çarpışmalar önlenebilir ve erişim noktasıtası uykudayken cihaz da uyuyacağından enerji verimliliği sağlanabilir. Yalnız, bu yaklaşım dezavantaj olarak iş-yükü performansının düşmesine ve çerçevelerin gecikme sürelerinin artmasına sebep olabilir.

Çalışma kapsamında şimdiye kadar zikredilen PSM yaklaşımları ile ilgili aktivasyon tarzı, kullanılan yöntem ve parametreler, enerji kazanım oranları, yaklaşımın yüklenmesiyle ortaya çıkabilecek olası sorunlar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde sunulan PSM yaklaşımları ve enerji kazanç oranları.

Ref. No	Başlama	Yöntem	Kullanılan parametreler	Standart PSM	Olası sorunlar	Enerji kazancı
(Tauber and Bhatti 2012)	Cihaz temelli	Deneysel	Yük miktarı, hız, çerçeve boyutu	Evet	Çerçeve gecikme sürelerinde artış	Çok az
(Swain, Chakraborty et al. 2014)	Cihaz temelli	Analitik	İş-yükü, gecikme süresi	Evet	İş-yükü kaybı ve çerçeve gecikme sürelerindeki artış	Çok az
(Stine and De Veciana 2002)	AP destekli	TIM çerçeve değişimi	ATIM, hizmet alma süresi, paket planlama	Yeni PSM	Toplam bekleme süresi düşerken, en yoğun cihaz en arkaya atılıyor	Yüksek
(He and Yuan 2009)	AP destekli	TIM çerçeve değişimi	Slot ve zaman tahsisi	Yeni PSM	tüm paketlerin bir beacon aralığında alınacağı düşünülmüş	Yüksek
(Suh, Ko et al. 2005)	AP destekli	TIM çerçeve değişimi	Slot ve zaman tahsisi	Yeni PSM	tüm paketlerin bir beacon aralığında alınacağı düşünülmüş	Yüksek
(Jung and Vaidya 2008)	AP destekli	TIM çerçeve değişimi	Slot ve zaman tahsisi	Yeni PSM	tüm paketlerin bir beacon aralığında alınacağı düşünülmüş	Yüksek
(Jung and Vaidya 2002)	AP destekli	ATIM iptali	İletim için bekleyen çerçeve sayısı	Yeni PSM	modem ve cihaz tarafında ciddi yazılımsal güncellemelere ihtiyaç var	Yüksek
(Zhu and Niu 2008)	AP destekli	Cihaz ayrıştırma	PSM-aktif ve PSM-pasif cihazların ayrıştırılması	Evet	Cihazlar sürekli PSM-aktif veya PSM-pasif modunda kalmazlar	Orta
(Jang, Hao et al. 2011)	AP destekli	Uyku süresi hesabı	Uyku süresi hesabı, toplam iş-yükü miktarı	Yeni PSM	Çerçeve gecikme sürelerinde artış	Yüksek
(Sudarshan, Prasad et al. 2014)	AP destekli	Boşta durma yerine uyku	Başlık bilgisi okunarak uyuma sresi hesabı	Yeni PSM	Çok sık enerji tüketim durumu (alım, uyku) değişikliği	Orta
(Balaji, Tamma et al. 2010)	AP destekli	Boşta durma yerine uyku	Başlık bilgisi okunarak uyuma sresi hesabı	Yeni PSM	Çok sık enerji tüketim durumu (alım, uyku) değişikliği	Orta
Pefkianakis, Chandrashekar, 2014	AP destekli	Kestirim temelli	Ağ yoğunluğu, iletim/alım sıklığı, lokasyon	Yeni PSM	Anlık değişimlere geç adaptasyon	Yüksek
(Tuysuz, Ucan et al. 2015)	AP destekli	Boşta durma yerine uyku	Doygun trafik, iki çerçeve arası bekleme zamanı	Yeni PSM	Düşük backoff seçimi çarpışmaları ağ yoğunken artırabilir	Yüksek
(Tuysuz, Ucan et al. 2015)	AP destekli	Boşta durma yerine uyku	Heterojen trafik, çerçeve arası bekleme zamanı	Yeni PSM	Düşük backoff seçimi çarpışmaları ağ yoğunken artırabilir	Yüksek
(Qiao and Shin 2005)	AP destekli	Enerji-delay takası	Tarfik yoğunluğu, trafik tipi, mak. Gecikme süresi	Yeni PSM	Gecikmemek adına enerji kazancını sınırlandırma	Orta
(Jung, Kim et al. 2014)	AP destekli	Enerji-delay takası	Cihaz sayısı, ağ yoğunluğu	Yeni PSM	Gecikmemek adına enerji kazancını sınırlandırma	Orta
(Li, Zhang et al. 2015)	AP destekli	Enerji-delay takası	Tıkanıklık, hizmet gecikme süresi planlama	Yeni PSM	Tıkanıklık durumunda PSM-pasif, PSM-aktif cihaz ayrımı yok	Orta
(Zhu, Luan et al. 2015)	AP destekli	Enerji-delay takası	Uygulama bağımlı gecikme süresi hesabı	Yeni PSM	Bazı çerçeveleri hatta erken sokarak diğerlerinin geciktirilmesi	Orta
(Omori, Tanigawa et al. 2015)	AP destekli	RTS/CTS temelli	NAV süreleri	Yeni PSM	Kablosuz ağlarda varolan standart çalışma modu RTS/CTS değildir	Orta
(Ding, Pathak et al. 2012)	AP destekli	Vekil sunucu	Detaylı trafik analizi, kısa uzun trafik akışı tespiti	Yeni PSM	Cihaz ile modem arası çerçeve alış veriş sıklığı	Yüksek
(Zhang, Todd et al. 2006)	AP destekli	Modemin uyutulması	Modemler arası senkronizasyon,	Yeni PSM	İş-yükü kaybı ve çerçeve gecikme sürelerindeki artış	Orta

4. Tahmini Güç Tüketim Miktarı Hesabı

Kablosuz ağlarda PSM-etkin cihazların güç tüketimlerini incelerken üzerinde durulması gereken iki temel faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin ilki uyanan bir istasyonun ne kadar süre uyanık kalacağı ve hattı ele geçirip alımı gereken tüm çerçeveleri alacağıdır. İkinci faktör ise cihazların beacon çerçeveleri arasındaki uyku sürelerinin nasıl kararlaştırılması gerektiğidir. Çok uyuyan bir istasyon haliyle az enerji tüketir. Yalnız, bu da çerçeve iletim/alım sürelerinin gecikmesine ve iş-yükü performansının düşmesine sebep olabilir. Çalışma kapsamında PSM-etkin ve PSM-pasif cihazların ne kadar güç tükettiği bu iki faktöre ve bir de cihazların her enerj tüketim durumunda (iletim, alım, boşta çalışma ve uyku) ne kadar kaldıkları ve birim zamanda ne kadar güç tükettikleri bilgisiyle hesaplanmaktadır. Daha önceden yapmış olduğumuz bir çalışmada (Tuysuz 2014), IEEE 802.11 cihazların Wi-Fi arayüzünün güç tüketim analizi tarafımızca sunulmuştur. Bu çalışmada da cihazların güç tüketimi hesabı için benzer işlemler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, Wi-Fi arayüzü tarafından harcanan toplam güç miktarı aşağıda kabaca hesaplanmıştır.

$$P_{total} = P_t(i,j) \times t_t + P_{idle}(i,j) \times t_{idle} + P_r(i,j) \times t_r + P_{doze}(i,j) \times t_{doze}.$$

burada $P_t(i,j)$, $P_{idle}(i,j)$, $P_r(i,j)$ ve $P_{doze}(i,j)$ ifadeleri i ağındaki j tipli trafiğe sahip bir cihazın sırasıyla iletim, boşta çalışma, alım ve uyku durumlarında Wi-Fi arayüzü tarafından tüketilen güç miktarıdır. Ayrıca, t_t, t_{idle}, t_r ve t_{doze} ise cihazın iletim, boşta çalışma, alım ve uyku durumlarında kalış sürelerini ifade eder. t_t değeri çerçeve sayısına N_f, iletim hızına R_{up}, çerçeve boyutuna $s(j)$, hata oranına (FER) ve çarpışma olasılığına P_c bağlıdır. Dolayısıyla, t_t süresi hesabı aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$t_t \cong \frac{s(j)}{R_{up}} \times N_f \times (1 + FER) \times (1 + P_c)$$

P_{t_NIC} iletim durumunda harcanan birim gücü ifade ederse, bu durumda iletim durumunda Wi-Fi arayüzü tarafından tüketilen toplam güç miktarı hesabı aşağıda verilmiştir.

$$P_t(i,j) \times t_t \cong P_{t_NIC} \times \frac{s(j)}{R_{up}} \times N_f \times (1 + FER) \times (1 + P_c)$$

Benzer şekilde, cihazın alım durumunda kalacağı süre t_r, çerçeve alım hızına, çerçeve boyutuna, çarpışma olasılığına ve trafik tipine (doygun, doygun olmayan trafik) bağlıdır. Doygun trafik (TCP) durumunda t_r hesabı aşağıdaki gibidir,

$$t_r \cong \frac{s(j)}{R_{down}} \times N_{fACK} \times (1 + P_c)$$

Bu kapsamda, alım durumunda Wi-Fi arayüzü tarafından tüketilen toplam güç miktarı hesabı ise aşağıda verilmiştir.

$$P_r(i,j) \times t_r \cong P_{r_NIC} \times \frac{s(j)}{R_{down}} \times N_{fACK} \times (1 + P_c)$$

Doygun olmayan (UDP) trafikte iletişimin iki taraflı olabileceği düşünüldüğünde (örneğin VoIP), t_r hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$t_r \cong \frac{s(j)}{R_{down}} \times N_{fACK} \times (1 + P_c) + N_{rcv_fr.} \times t_{as} \times (1 + FER)$$

burada $N_{rcv_fr.}$ cihazın iletişimde bulunduğu karşı tarafın gönderdiği toplam çerçeve sayısıdır. t_{as} karşı tarafın bir çerçeve iletimi için gerekli süredir. Dolayısıyla, doygun olmayan bir trafiğe sahip cihazın alım durumundaki toplam güç tüketimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_r(i,j) \times t_r \cong P_{r_{NIC}} \times \left(\frac{s(j)}{R_{down}} \times N_{fACK} \times (1 + P_c) + N_{rcv_fr.} \times t_{as} \times (1 + FER)\right)$$

Cihazların uyku durumunda kalış süresi t_{doze} beacon aralıklarındaki ortalama uyku süresine (*sleep_time*) ve kaç defa uykuya dalındığını belirten sayaca (c_{st}) göre belirlenebilir.

$$t_{doze} \cong \sum_{i=1}^{c_{st}} Sleep_Time_i$$

Cihazın uyku durumunda tüketeceği toplam güç miktarı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{doze}(i,j) \times t_{doze} \cong P_{doze_NIC} \times \sum_{i=1}^{c_{st}} Sleep_Time_i$$

Son olarak, cihazın boşta kalacağı süre t_{idle} ise, cihazın Wi-Fi arayüzünün açık kaldığı toplam süreye t_s ve cihazın iletim, alım ve uyku durumlarında kaldığı sürelere bağlıdır.

$$t_{idle} \cong t_s - t_t - t_r - t_{doze}$$

Bu kapsamda, WiFi arayüzü tarafından cihazın boşta kaldığı durumlarda tüketilen toplam güç miktarı hesabı aşağıda verilmiştir.

$$P_{idle}(i,j) \times t_{idle} \cong P_{idle_NIC} \times (t_s - t_t - t_r - t_{doze})$$

5. PSM Yaklaşımlarının Mukayesesi

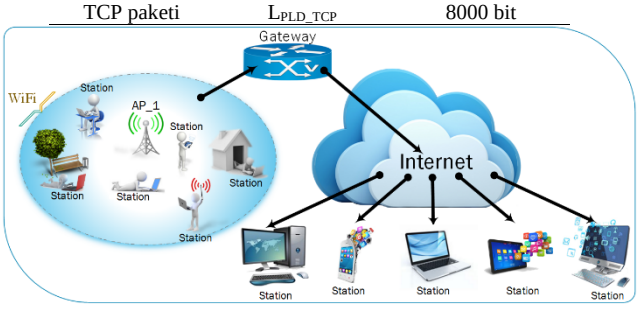
Kablosuz ağlardaki PSM temelli enerji verimli yaklaşımlar bu çalışma kapsamında OMNET benzetim ortamına aktarılarak farklı trafik yoğunluklarında testlere tabi tutulmuştur. Benzetim ortamına aktarılan yaklaşımların farklı güç tüketim durumlarında harcadıkları güç miktarı ve kablosuz ağ standardında belirtilen parametre değerleri Tablo-2 ve Tablo-3'te gösterilmiştir. Bu bölümde elde edilen veriler benzetim ortamındaki her testin 10 kere çalıştırılıp, sonuçların ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir.

Tablo 2. IEEE 802.11b kablosuz ağlarındaki güç tüketim miktarları (Tuysuz, 2014).

Ad	Değer	Birim
İletim durumu	1300	mW
Boşta çalışma durumu	740	mW
Alım durumu	900	mW
Uyku durumu	45	mW

Tablo 3. Benzetim ortamında kullanılan parametre değerleri (Tuysuz, 2014).

Ad	Simge	Değer
DIFS	T_{DIFS}	50 µs
SIFS	T_{SIFS}	10 µs
Slot süresi	T_{Slot}	20 µs
Min. CW	CW_{min}	15
Max. CW	CW_{max}	1024
PHY data hızı	R_{Data}	1 – 11 Mbps
TCP paketi	L_{PLD_TCP}	8000 bit

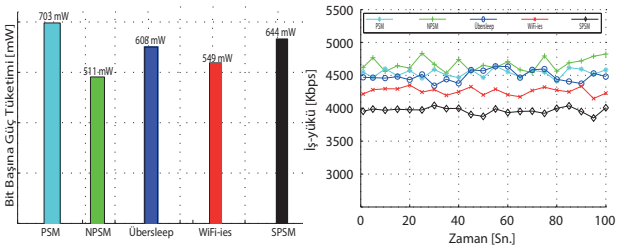


Şekil 3. IEEE 802.11 Kablosuz Ağ Simülasyon Senaryosu

Şekil 3'te ise benzetim ortamına aktarılan senaryo resmedilmiştir. Bu senaryoda bir erişim noktası ve bu erişim noktasına bağlı farklı sayılarda cihaz bulunmaktadır. Bu cihazlar erişim noktası üzerinden İnternete açılarak farklı cihazlar ile iletişim halindedirler. Bu senaryo üzerinden; erişim noktasına bağlı farklı sayıdaki cihaz sayısına göre (az, orta, çok) standart PSM ve tarafımızca seçilen[4] 4 farklı yaklaşım (NPSM, Übersleep, WiFi-ies, SPSM) mukayese edilmiştir.

Şekil 4'te kanaldaki kullanıcı yoğunluğu az iken standart PSM ve önerilen diğer yaklaşımların senaryo gereği tükettikleri ortalama güç tüketim miktarları ve iş-yükü performansları gösterilmiştir. Çalışma kapsamında da bahsedildiği üzere standart PSM yaklaşımının enerji verimliliği literatürde sunulan diğer yaklaşımların gerisindedir. NPSM yaklaşımında ATIM pencereleri kaldırılarak paket iletim/alım işlemlerinin her zaman yapılabilmesi, ayrıca alımı beklenen çerçeve sayılarının önceden bilindiğinden cihazların uyanık kalma sürelerinin programlanabilmesi nedeniyle yüksek enerji verimliliği ve iş-yükü performansı sağlanmıştır.

Önerilen diğer çalışmalarda enerji verimliliği genel olarak cihazların daha fazla uyutulması mantığı ile gerçekleştirildiğinden, çerçeveler arası gecikmeler iş-yükü performansının düşümüne sebep olmuştur. Kısacası, ağdaki cihaz yoğunluğu az iken literatürde önerilen yaklaşımlar standart PSM yaklaşımına göre daha enerji verimlidir. Yalnız, NPSM yaklaşımı hariç diğer yaklaşımlar, bu senaryoda standart PSM'den daha az çerçeve iletimi/alımı gerçekleştirmişlerdir.



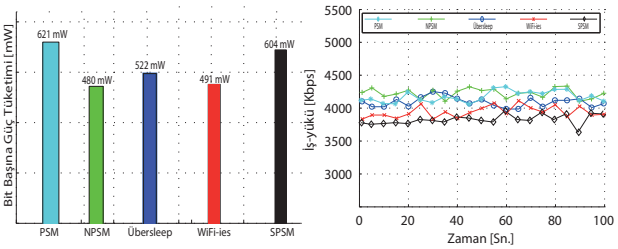
a) Yaklaşımaların güç tüketim oranları b) Yaklaşımların iş-yükü oranları

Şekil 4. Modeme bağlı kullanıcı sayısı 4 iken güç ve performans verileri

Şekil 5'te kanaldaki kullanıcı yoğunluğu orta düzeyde iken standart PSM ve önerilen diğer

[4] Farklı yaklaşımların benzetim ortamına aktarılması oldukça uzun süreler aldığından, çalışma kapsamında sadece 4 yaklaşım incelenmiştir.

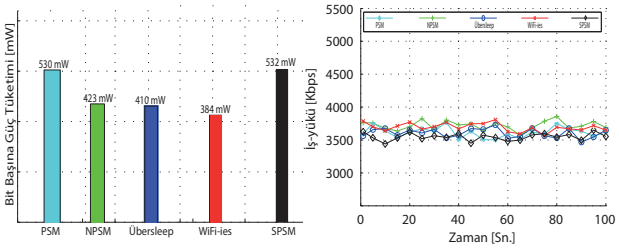
yaklaşımların senaryo gereği tükettikleri ortalama güç tüketim miktarları ve iş-yükü performansları gösterilmiştir. Bu senaryoda kullanıcı sayısı bir önceki senaryoya göre artış gösterdiğinden, cihazların hattı ele geçirme oranları (süresi) azalmış ve daha az iletim/alım gerçekleştirdiklerinden güç tüketim miktarları da genel manada düşmüştür. WiFi-ies yaklaşımında her cihaz ağın yoğunluğunu, çerçeve iletim/alım sıklığı ve aralıklarını, uygulamaların kullanım yoğunluğunu, lokasyonunu, ekranın açık olmadığını vs. bilgileri kullanarak yeni bir trafiğin olup olmayacağını kestirmeye çalıştığından ve trafik akışı beklenmeyen durumlarda cihazları uyku moduna alarak enerji tasarrufu sağladığından dolayı, ağdaki cihaz sayısının artmasıyla cihazları daha fazla uyku modunda tutarak yüksek enerji verimliliği sağlamıştır. Buna rağmen, iş-yükü performansı NPSM yaklaşımı kadar iyi değildir. Übersleep yaklaşımında cihazların başka cihazlar için gönderilen çerçeveleri anlayıp, bu süre zarfında uyku modunda kalmaları sağlanmıştır. Dolayısıyla, İş-yükü performansı açısından standart PSM ile herhangi bir farkı olmamasına karşın, enerji verimliliği standart PSM'den daha iyidir.



a) Yaklaşımarın güç tüketim oranları b) Yaklaşımların iş-yükü oranları

Şekil 5. Modeme bağlı kullanıcı sayısı 8 iken güç ve performans verileri

Son olarak, Şekil 6'da kanaldaki kullanıcı yoğunluğu yüksek iken standart PSM ve önerilen diğer yaklaşımların senaryo gereği tükettikleri ortalama güç tüketim miktarları ve iş-yükü performansları gösterilmiştir. SPSM yaklaşımı uygulamaların kaldırabilecekleri gecikme sürelerine göre tasarlandığından, ağdaki cihaz sayısının çok olduğu bu senaryoda cihazların çerçevelerinin daha fazla gecikmemesi için cihazları daha az uyutmuş ve enerji verimliliği şekilde de görüldüğü gibi standart PSM yaklaşımı kadar olmuştur. SPSM yaklaşımının düşük iş-yükü performansı da düşünüldüğünde, yoğun ağlarda bu yaklaşımın kullanılmaması gerektiği tarafımızca tespit edilmiştir.



a) Yaklaşımarın güç tüketim oranları b) Yaklaşımların iş-yükü oranları

Şekil 6. Modeme bağlı kullanıcı sayısı 16 iken güç ve performans verileri

6. Sonuç

Kablosuz ağlarda kullanılan Çarpışmadan Kaçınmalı Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim yaklaşımı sırasında cihazlar önemli derecede güç tüketirler. Bu sorunun çözümü için kablosuz ağ standardında tanımlanan Güç-Tasarruf-Modu (PSM) ile ilgili herhangi bir standard algoritma bulunmadığından, optimal enerji verimliliği için literatürde sunulan bir çok PSM temelli yaklaşım mevcuttur. Bu çalışma kapsamında literatürde sunulan ve PSM protokolünü etkin kullanan güncel PSM önerileri detaylıca incelenmiştir. Ayrıca, bahsi geçen önerilerin bir kısmı OMNET benzetim ortamına aktarılarak enerji verimliliği ve iş-yükü performansları mukayese edilmiştir.

Benzetim ortamında farklı yoğunluk durumlarında testleri gerçekleştirilen yaklaşımlar için bir kıyas yapılması gerekir ise; yoğun olmayan ağlar için NPSM yaklaşımının, yoğun ağlarda ise WiFi-ies yaklaşımının bit başına güç tüketimi açısından daha verimli olduğu söylenebilir. İş-yükü performansı açısından düşünüldüğünde ise; kanal ister az ister çok yoğun olsun NPSM yaklaşımı diğer yaklaşımlara oranla daha iyi iş-yükü performansı sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 114E251 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/wireless-communications/wlan-wifi/in-focus/technology-introduction_106713 .html., (17.02.2012)

802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi., (01.08 2012)

IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications., (01.05.1997)

Anastasi, G., Conti M., Gregori E. and Passarella A., 2004. Saving energy in wi-fi hotspots through 802.11 psm: an analytical model. *Workshop on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks,* Cambridge (UK).

Balaji B., Tamma B.R., and Manoj B., 2010. A novel power saving strategy for greening IEEE 802.11 based wireless networks. *GLOBECOM*, Florida, USA.

Ding N., Pathak A., Koutsonikolas D., Shepard C., Hu Y.C., and Zhong L., 2012. Realizing the full potential of psm using proxying. *INFOCOM*, Orlando, FL.

He, Y. and Yuan R., 2009. A novel scheduled power saving mechanism for 802.11 wireless LANs. *Mobile Computing, IEEE Transactions on* **8**(10): 1368-1383.

Jang K.Y., Hao S., Sheth A., and Govindan R., 2011. Snooze: energy management in 802.11 n WLANs. *Conference on emerging Networking Experiments and Technologies,* New York, USA.

Jung D., Kim R., and Lim H., 2014. Power-saving strategy for balancing energy and delay performance in WLANs. *Computer Communications* **50**: 3-9.

Jung E.S., and Vaidya N., 2002. A power saving mac protocol for wireless networks. *INFOCOM*, NY, USA.

Jung E.S., and Vaidya N.H., 2008. Improving IEEE 802.11 power saving mechanism. *Wireless Networks* **14**(3): 375-391.

Kravets R., and Krishnan P., 1998. Power management techniques for mobile communication. *ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, Dallas, Texas.

Langendoen K., and Halkes G., 2005. Energy-efficient medium access control. *Embedded systems handbook*, **34**, 31-34.

Li Y., Zhang X., and Yeung K.L., A novel delayed wakeup scheme for efficient power management in infrastructure-based IEEE 802.11 WLANs. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, New Orleans, USA.

Manweiler J., and Choudhury R.R., 2011. Avoiding the rush hours: WiFi energy management via traffic isolation. *International conference on Mobile systems, applications and services*, Washington, USA.

Omori K., Tanigawa Y., and Tode H., 2015. A study on power saving using RTS/CTS handshake and burst transmission in wireless LAN. *Information and Telecommunication Technologies (APSITT)*, Sri Lanka.

Pefkianakis I., Chandrashekar J., and Lundgren H., 2014. User-Driven Idle Energy Save for 802.11 x Mobile Devices. *Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, Philadelphia, USA.

Qiao D., and Shin K.G., 2005. Smart power-saving mode for IEEE 802.11 wireless LANs. *IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM*, Miami, USA.

Rozner E., Navda V., Ramjee R., and Rayanchu S., 2010. NAPman: network-assisted power management for wifi devices. *International conference on Mobile systems, applications and services*, San Francisco, CA.

Stine J.A., and De Veciana G., 2002. Improving energy efficiency of centrally controlled wireless data networks. *Wireless Networks* **8**(6): 681-700.

Sudarshan S., Prasad R., Kumar A., Bhatia R., and Tamma B.R., 2014. Ubersleep: An innovative mechanism to save energy in IEEE 802.11 based WLANs. *Electronics, Computing and Communication Technologies (IEEE CONECCT)*, Bangalore, India.

Suh C., Ko Y.B., and Kim J.H., 2005. Enhanced power saving for ieee 802.11 wlan with dynamic slot allocation. *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Wuhan, China.

Swain P., Chakraborty S., Nandi S., and Bhaduri P., 2014. Performance modeling and evaluation of IEEE 802.11 IBSS power save mode. *Ad Hoc Networks*, **13**: 336-350.

Tauber M., and Bhatti S.N., 2012. The effect of the 802.11 power save mechanism (PSM) on energy efficiency and performance during system activity. *Green Computing and Communications (GreenCom)*, Besançon, France.

Tuysuz M.F., Ucan M., and Ayneli D., 2015. A novel energy-efficient medium access control over saturated IEEE 802.11 WLANs. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Dubrovnik, Croatia.

Tuysuz M.F., 2014. An energy-efficient QoS-based network selection scheme over heterogeneous WLAN – 3G networks. *Computer Networks,* **75**(A), 113-133.

Tuysuz M.F., Ucan M., and Ayneli D., 2015. Energy-Efficient Medium Access Control over IEEE 802.11 Wireless Heterogeneous Networks. *International Conference on Communications in China (ICCC2015)*, Shenzhen, China.

Zhang F., Todd T.D., Zhao D., and Kezys V., 2006. "Power saving access points for IEEE 802-11 wireless network infrastructure. IEEE Transactions on Mobile Computing, **5**(2): 144-156.

Zhu F., and Niu Z., 2008. Priority based power saving mode in WLAN. *IEEE GLOBECOM*, New Orleans, USA.

Zhu Y.H., Luan S., Leung V., and Chi K., 2015. Enhancing timer-based power management to support delay-intolerant uplink traffic in infrastructure IEEE 802.11 WLANs. IEEE Transactions on Vehicular Technology, **64**(1): 386-399.