

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Yakalama Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Capture Effect in Wireless Sensor Networks

Selahattin Koşunalp¹, İbrahim Öztürk¹

¹Department of Electronics
The University of York
sk772@york.ac.uk, io517@york.ac.uk

Özet

Bu bildiri, kablosuz algılayıcı ağlarda yakalama etkisi (capture effect) iris algılayıcı düğümleri kullanılarak incelenmiştir. 2 yada daha fazla verici aynı anda bilgi gönderdikleri zaman bilgi çarpışması (packet collision) alıcı biriminde meydana gelir. Bu yüzden eş-zamanlı veri iletimi bilgi kaybına ve çarpışan bilgilerin başarısız olmasına sebep olabilmektedir. Eğer çarpışan paketler arasından birinin taşıdığı güç miktarı diğer paketlerin toplam güç miktarından yeteri kadar fazlaysa o paket bozulmaksızın alınabilir. Yakalama etkisi eş-zamanlı gönderilen birden fazla veri paketleri arasından birinin başarılı bir şekilde alınması olarak tanımlanır. Bilgi çarpışmasının farklı oranlarda olabileceği göz önüne alınıp, belli miktarda bir vericide paketler üretilip alıcıya gönderilmiştir. Ayrıca, yakalama etkisinin gerçekçi bir ortam erişim protokolü, Aloha, üzerinde meydana getirdiği performans artışı farklı paket uzunlukları göz önüne alınarak çalışılmıştır. Olay-güdümlü ve bileşen-tabanlı bir işletim sistemi olarak, TinyOS algılayıcı düğümleri programlamak ve iletim ortamındaki veri akışını bir bilgisayar üzerinde gözlemleyebilmek için kullanılmıştır.

Abstract

In this paper, the capture effect is studied in wireless sensor networks using iris sensor nodes. When two or more senders start transmitting simultaneously over the same channel, a packet collision occurs at the receiver. Therefore, concurrent transmissions may result in packet loss and the failure of all the collided packets. It is relatively widely believed that a packet can survive a collision and be successfully received (captured) if its power is sufficiently larger than the sum of the powers of all the other simultaneous packets. Capture effect is defined as an ability to successfully receive a packet among simultaneous packets. With the consideration of different rates of collision, a certain number of packets is generated and transmitted to the receiver. To further understand the capture effect, a mac protocol' (Aloha) performance change is considered. As an event-based and component-based operating system, TinyOS-2.x is used to program the nodes and to observe data-exchange on a computer through a base-station.

1. Giriş

Kablosuz algılayıcı ağlarda yeni bir ortam erişim kontrol protokolü tasarlanırken yüksek kanal kullanımı (channel throughput), düşük iletişim gecikmeleri ve enerji verimliliği önemli tasarım kriterleri arasındadır. Algılayıcı düğümlerin gerçek hayatta erişimi zor veya imkansız bir alana rastgele bir şekilde dağıtıldıkları beklenen bir durumdur. Bu yüzden, algılayıcı düğümlerin enerji kaynağını (basit bir pil) değiştirmek yada yeniden şarj etmek mümkün olmayabilir. Enerjisi biten algılayıcı düğüm ağ içerisinde hayatını kaybeder. Algılayıcı düğümlerin halen pahalı oldukları göz önüne alındığında ve bir ağın yüzlerce hatta binlerce algılayıcıdan oluştuğu varsayılarak, ağın mümkün olan en uzun süre hayatta kalması önemli bir konudur. Herhangi bir algılayıcının zaman içerisinde ölmesi yada yeni bir algılayıcının ağa katılması ağ yapısında bazı değişiklikler meydana getireceği için örneğin ağ genişliği ve algılayıcı yoğunluğu, bu değişikliklere çok iyi karşılık veren enerji verimliliğini göz önünde bulunduran stratejiler halen geliştirilmektedir.

Enerji verimliliğini en üst seviyede tutabilmek için enerji kaynaklarını tüketen etkenleri azaltmak gerekir. Bir algılayıcı düğümünde enerji tüketim kaynakları kulak misafiri olmak (overhearing), kontrol paket fazlalığı (control packet overhead), boş dinleme (idle listening) ve paket çarpışması (collision) olarak verilir. Bir algılayıcı düğümü kapsamı alanı içerisindeki diğer algılayıcılardan kendisine gönderilmeyen paketleri alabilmektedir ve bu kulak misafiri olmak olarak tanımlanır. Kontrol paket fazlalığı ise asıl bilgiyi göndermeden önce iletim ortamını ve alıcıyı kontrol etmek için gönderilen öncü paketlerdir. Geleneksel olarak bir algılayıcı düğüm paket gönderimi yapmadığı durumlarda olası gelebilecek yeni paket için dinleme modunda bekler. Dinleme modunda ve paket alımı anında bir algılayıcının neredeyse aynı enerjisi tükettiği söylenmektedir. Enerji tüketim kaynaklarının sonucusu ve bu çalışmanın temelini aldığı etken paket çarpışmasıdır. Eğer 2 veya daha fazla gönderici aynı anda iletişime başlarsa alıcı biriminde paket çarpışması meydana gelir hatta paket çarpışması bütünüyle değil kısmen de olsa değişen bir şey olmamaktadır. Literatürde yapılan

kabül ise çarpışan paketlerin bozulduğu ve yeniden gönderilmesi gerekliliğidir [1].

Paket çarpışmasını önlemek için tasarılan çoğu ortam erişim kontrol protokolleri IEEE802.11 standardını temel almışlardır [2]. Buna göre algılayıcı bir düğüm gönderime başlamak için öncelikle bir RTS (RequestToSend) paketi gönderir. Eğer alıcı düğüm meşgul değil ise geriye bir CTS (ClearToSend) paketi göndererek isteği kabul ettiğini söyler. Bu işlem tamamlandıktan sonra verici düğüm bilgi paketini gönderir. Alıcı düğüm başarılı bir şekilde veri paketini aldıktan sonra geriye bir onay mesajı (ACK) gönderir. Özetle bu süreç RTS-CTS-DATA-ACK olarak bilinir. Çarpışan paketlerin (tamamen yada kısmen) bozulduğu ve belli bir zaman beklemeden sonra tekrar gönderilmesi kabulü çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, çarpışan bazı paketlerin bozulmadan alınabileceği bazı şartlar altında vurgulanmıştır [3].

Yakalama etkisi aynı anda gönderilen birden fazla veri paketi arasından birinin bozulmadan alınabilmesi olarak tanımlanır. Yapılan pratik gözlemler neticesinde, başarılı bir paket alımı bir çarpışmada 2 koşul altında gerçekleşmektedir: (1) bozulmaksızın alınacak olan paket diğer paketlerden daha erken alıcıya ulaşmalı, ve (2) bu paketin taşıdığı güç miktarı yeteri kadar fazla olmalı. Bu çalışmada, iris algılayıcı düğümleri, AT86RF230 radyo vericileri ile donatılmış, kullanılmıştır. Bir önceki cümlede belirtilen 2 koşulun nedeni ise bu radyo vericilerin tasarım özelliğinden oluşmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, başarılı bir veri alımı 2 aşamada gerçekleştirilir: geçerli bir öncü (preamble) paketi algılanması radyo vericinin senkronize olması için (paketin erken varması gerekliliği) ve paketin CRC doğruluğundan başarılı şekilde geçmesi (paketin bozunuma uğramaması için yeteri kadar güç taşınması).

öncü (preamble)	Senkronize (Synch)	Adresler (Headers)	Veri kısmı (Data Payload)	CRC
--------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------------	-----

(a) IEEE 802.15.4 - uyumlu paket formatı.

öncü (preamble)	Senkronize (Synch)	Adresler (Headers)	Veri kısmı (Data Payload)	CRC
--------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------------	-----

öncü (preamble)	Senkronize (Synch)	Adresler (Headers)	Veri kısmı (Data Payload)	CRC
--------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------------	-----

(b) Paket çarpışmasına örnek bir durum.

Şekil 1: Paket formatı ve örnek bir paket çarpışması.

Bu çalışmanın temel amacı çarpışan paketlerin iletim güçlerinin aynı seviyede ayarlandığı ve aynı mesafeden bir alıcıya ulaştıkları durumunda yakalama etkisinin nasıl olacağıdır.

Bu bildirinin geri kalan kısımları şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm-2 de ilgili çalışmalar özellikle yapılan pratik çalışmalar ve Aloha ağları üzerine yapılan bazı çalışmalar verilmiştir. Bölüm-3 de ise çalışmada kullanılanlar ve uygulama platform üzerine kullanılan donanımsal ve yazılımsal ortamlar daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Elde edilen pratik sonuçlar ise bölüm 4 'te sunulmaktadır. Son olarak sonuçlar ve konu ile alakalı ilerde yapılması hedeflenen çalışmalar bölüm 5'te bahsedilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar

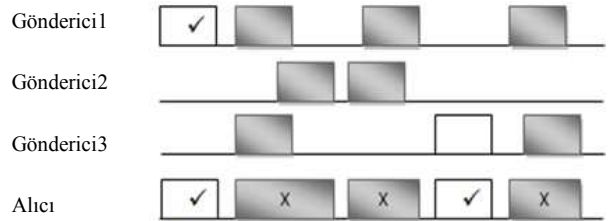
Yakalama etkisi tamamıyla kullanılan radyo alıcı-verici biriminin tasarım özelliklerine bağlıdır. Bu alandaki teorik çalışmalar bir alıcıda işaret-bozunum-gürültü-oranı (signaltointerferenceplusnoise)'nın belli bir eşik seviyesini geçtiği sürece (1-3 dB) yakalama etkisinin gerçekleşeceğini belirtir [4-5]. Ancak gerçek uygulamalarda eşik seviyesinin sabit olmadığı değişkenlik gösterdiği ve daha yüksek bir seviyede olduğu (4-10 dB) ortaya konulmaktadır [6]. En yeni çalışmalardan biri olan [7] eşik seviyesinin 1.3dB itibaren yakalama etkisine izin verdiğini hem matematiksel olarak hemde deneysel olarak göstermiştir. Sonuç olarak eşik değerinin sabit olmadığı donanımsal mimariye bağlı olarak değiştiğini görmekteyiz.

Yapılan çalışmaların önemli bir kısmı yakalama etkisinin literatürde önerilen protokollerin performanslarında ne gibi değişikliklere neden olacağını göz önüne almamışlardır. Yapılan çalışmaları geniş bir şekilde inceledikten sonra, yakalama etkisinin Aloha sistemlerindeki performans değişiklikleri etrafında toplandığını görüyoruz. Örneğin slotted-Aloha [8] en fazla %36 kanal kullanımına izin verirken, [9]'da yapılan çalışmada yakalama etkisi göz önüne alınarak bu değer %53'e çıkmaktadır. StandardAloha'da ise maksimum kanal kullanımı %18 seviyelerinde iken, [10]'da yapılan çalışmada iki farklı güç seviyesi kullanarak %26 oranında ideal bir kanal kullanımına erişilmektedir.

3. Çalışmada Kullanılanlar

3.1. Temel Aloha Protokolü

Aloha 1968 yılında Abramson tarafından keşfedilen ve bu alandaki ilk ortam erişim kontrol protokolüdür [11]. Bu protokoldeki kullanıcılar poisson trafik modeline göre veri paketleri üretip anında gönderirler. İletişim ortamına erişmede kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona gereksinim yoktur. Eğer birden fazla kullanıcı eş-zamanlı iletişime başlarsa paket çarpışması meydana gelir ve çarpışan paketler kaybedilir. Bu protokolün yaygın olarak kullanılmasının sebebi çok basit ve kolay uygulanabilir olmasıdır. Ancak, sistemdeki trafik yoğunluğu arttığı sürece paket çarpışma olasılığında artacağından sistem performansı çok düşük kalmaktadır. Aloha protokolünün çalışma mantığı şekil-2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Aloha paket kabulü ve bir dizi çarpışan paketler.

3.2. TinyOS İşletim Sistemi

TinyOS işletim sistemi yüksek enerji verimliliğini amaçlayan kablosuz haberleşen algılayıcılar için özel olarak tasarlanmıştır [12]. Bileşen tabanlı bir mimariye sahip olan bu işletim sistemi olay güdümlü çalışma mantığını temel alır. Bu mantıkta, yapılmak istenen her işlem bir olayla (event) sisteme bildirilir aksi durumda bütün işlemler uyku modunda bekler. Bütün bileşenler birbirlerine kendi arayüzleri

(interface) ile bağlanır ve tekrar kullanılabilirler. TinyOS sahip olduğu basit ve kolaylıkla anlaşılabilir mimarisi ile her geçen yıl daha da artan bir ilgiye sahip olmaktadır. Açık-kaynak kodlu ücretsiz bir şekilde kullanılabilir olması ve sunduğu birçok örnek uygulamasıyla 1 gün içerisinde bile kurulup kullanıma hazır hale gelebilmektedir. Bu işletim sistemi C dilinin bir genişletilmiş hali olan NesC[13] dilinde yazılmıştır ve ayrıca programlar yine bu dilde derlenmektedir.

3.3. İris Algılayıcı Dügümleri

İris algılayıcıları 2.4Ghz ISM bandında çalışan IEEE 802.15.4-uyumlu düşük güç kablosuz algılayıcı ağları oluşturmada kullanılırlar [14]. Temel olarak bu algılayıcılar bir ATmega1281 mikrodenetleyicisi ve AT86RF230 radyo vericisinden oluşmaktadır [15]. Bu radyo vericisi gönderilecek yada alınacak mesajları arabelleğe alabilmek için dahili bir 128-bayt uzunluğunda arabelleğe sahiptir. Arabellek mesaj gönderme ve almada ortak kullanıldığından arabelleğin içeriği yeni gelen bir mesaj ile güncellenir. Dolayısıyla bir iletişim anında sadece tek yönlü iletişim yapılabilmektedir. Bu verici 250 kbit/s hızında iletişime olanak tanımaktadır.

3.4. Ağ Topolojisi

Bu çalışmadaki bütün uygulamalar bir ofis ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulama ortamı bir alıcı ve 10 tane göndericiden oluşmaktadır. Göndericiler vericiye eşit mesafede çok yakın bir şekilde yerleştirildiğinden birbirlerinin kapsama alanı içerisindedirler. Vericilerin eş-zamanlı olarak sisteme dahil olabilmelerini sağlamak için, alıcı genel bir mesaj yayımlar. Bu sırada, vericiler alıcı modda bu mesajın gelmesini beklerler. Bu mesajın alınmasıyla vericiler iletişime aynı anda geçerler. ATmega128'in genel çalışma mantığında, olası bir veri alımı için her zaman radyo vericisi alıcı modda bekler. Veri gönderimi olacağı sırada alıcı moddan çıkılarak verici moda geçilir ve veri gönderimi bitirildiğinde tekrardan alıcı moda döner. Ancak bu durumda yeni bir paket üretilip gönderime hazır olduğunda ortamdan diğer algılayıcılardan veri alımı yapıyorsa gönderime başlanılamaz. Aloha protokolü tek-atlamalı (single-hop) tabanlı olduğundan yani vericiler sadece alıcıya bilgi gönderdiğinden vericilerin alıcı modda beklememesi çok önemli bir husustur. Aksi takdirde, trafik yoğunluğu arttığı sürece bir algılayıcı ortamdan sürekli veriler alacağından gönderime başlaması çok zor olacaktır. Gönderilen veri adedinde çok ciddi azalmalar gözlenmiştir. Uygulama test-yatağında bir görüntü şekil-3'de verilmiştir.

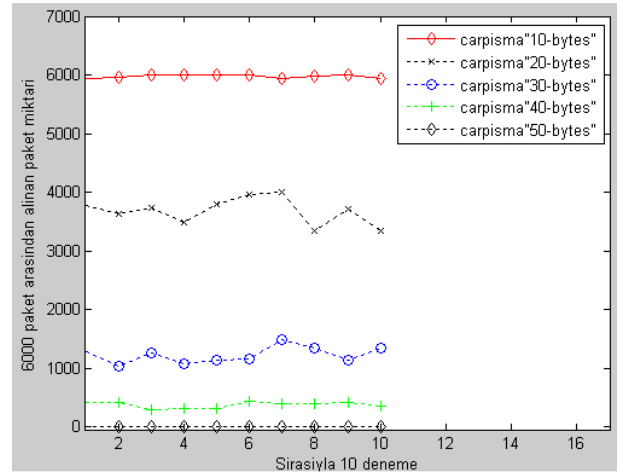


Şekil 3: Uygulama alanı, 10 verici ve 1 alıcı (ortada)

4. Uygulama Sonuçları

4.1. Yakalama Etkisi

Pratik bir algılayıcı ağda eğer paket gönderimi dilimlenmiş zaman aralıklarında belli anlarda yapılmıyorsa paket çarpışması farklı oranlarda meydana gelmektedir. Tam bir paket çarpışması olabileceği gibi kısmi oranlarda da olması yüksek bir ihtimaldir. Dolayısıyla bu çalışmada çarpışan paketlerde çarpışmanın ne uzunlukta olduğu göz önüne alınarak sistemli bir şekilde bu uzunluk artırılmıştır. Bu artırım çarpışan paketlerde yakalama etkisinin kaybolmasına kadar yapılmıştır. Bir paket göndermek için gerekli sürenin yaklaşık 4.5ms civarlarında olduğu gözlemlendikten sonra, minimum çarpışma için 10 bayt seçilmiştir. Yapılan gözlemler sırasında çarpışma miktarı 50 bayt seviyesine gelene kadar yakalama etkisi devam etmektedir. Toplamda 6000 adet paket gönderilip, alıcıda alınan paket miktarı göz önüne alınmıştır. Yakalama etkisinin zamanla ne oranda değişeceği konusunda fikir sahibi olabilmek için her uygulama adımı 10 defa gerçekleştirilmiştir. Şekil-4 farklı çarpışma oranlarında sırasıyla 10 denemede alınan paket miktarını sunmaktadır.

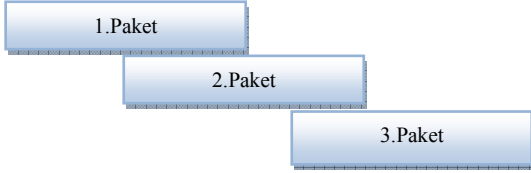


Şekil 4: Farklı çarpışma oranlarında yakalama etkisi.

Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere, 10-bayt çarpışma gerçekleştiğinde neredeyse bütün paketlerin bozunumsuz bir şekilde alındığı açıktır. Çarpışma baytların miktarı arttığı sürece alınan paket miktarı da önemli oranda azalmıştır. Şekil-3 açık bir şekilde 50-bayt uzunluğunda ve yukarisında çarpışma olduğunda yakalama etkisinin olmadığını göstermektedir.

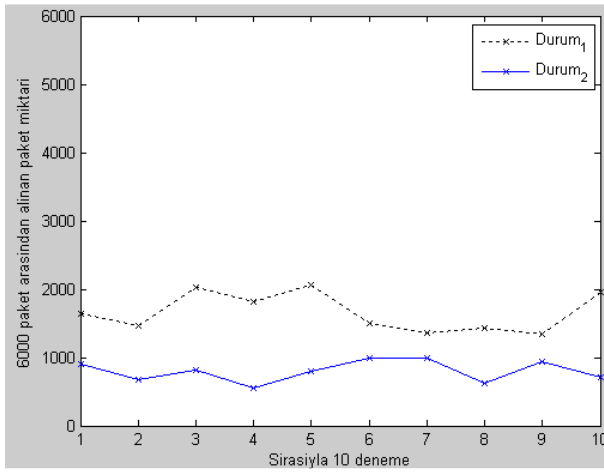
4.2. 3-paket Çarpışma Senaryosu

Tipik bir algılayıcı ağda çarpışma senaryosu çok farklı şekillerde olabilmektedir. En temel olan 2-paket çarpışması bir önceki başlıkta ele alınmıştır. Paket çarpışmasındaki paket adedi daha fazla olabileceği gibi çarpışmanın şeklide farklı oluşabilmektedir. Bu bölümde en muhtemel 3-paket çarpışması adı verilen durum incelenmiştir. Bu durum basit bir şekilde şekil-5'te tasvir edilmiştir.



Şekil 5: 3-paket çarpışma senaryosu.

Şekildende anlaşılacağı üzere 2-paket çarpışması gerçekleştiği sırada eğer 3.paket 1.paket alımı bittikten sonra alıcıya ulaşırsa ne oranda alıcıda çözülecektir. Bu senaryoda 2 durum söz konusudur: (1) eğer 2.paket sadece 3.paketin *preamble* süresinde etkili olursa, (2) eğer 2.paket hem *preamble* hemde veri kısmında etkili olursa. 1. durumda alıcı kısım 3.paketin *preamble*'ını yakaladığı sürece 3.paketi alacaktır. Ancak 2.durumda hem *preamble* hemde *CRC* doğruluğu gerekmektedir. Her iki durumda da alınan paket miktarı şekil-6'da verilmiştir.



Şekil 6: 3-paket çarpışma sonuçları.

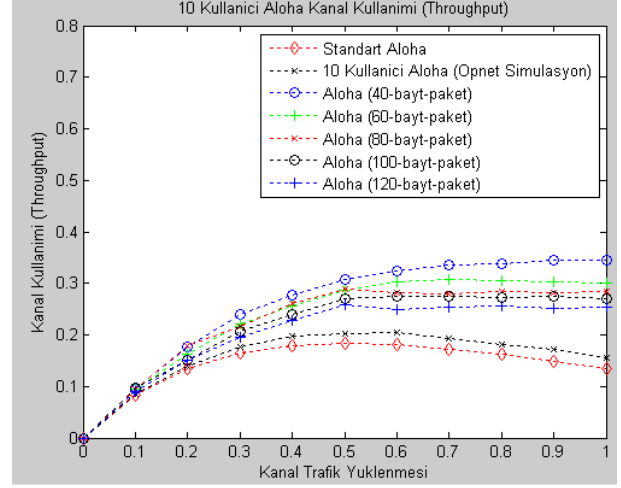
1.durumda alınan paket miktarı 2.durumdan neredeyse 2 kat daha fazla gerçekleşmiştir. Dolayısıyla *preamble* aşamasına başarıyla geçen paketlerin yarısı 2.durumda bozunuma uğrayıp *CRC* doğruluğundan geçememişlerdir.

4.3. Yakalama Etkisi ve Aloha

Yakalama etkisi en belirgin bir şekilde Aloha gibi veri iletiminin zamanın herhangi bir anında olduğu, paket çarpışmasının her oranda olabileceği protokoller üzerinde görülebilir. Çünkü bütün göndericiler alıcıya eşit mesafede, aynı paket uzunluğunda ve aynı güç seviyesinde iletim yaparlar. Yakalama etkisinin ne oranda gerçekleşeceği çarpışan bayt uzunluğuna bağlı olduğundan, toplam paket uzunluğunun çok önemli bir etkiye sahip olduğu aşikardır. Dolayısıyla bu bölümdeki asıl amaç farklı uzunlukta paketler gönderildiğinde sistem performansında ne gibi değişiklikler olacağını göstermektir.

Radyo verici 128-bayt uzunluğunda arabirime sahip olduğundan paket uzunluğu esnek bir şekilde değiştirilmiştir. Belirgin bir şekilde paket uzunluğu yükseldiği sürece çarpışan bayt miktarında artacağından sistem performansının da azalması öngörülmektedir. 40-bayt çarpışmadan daha fazla değerlerde yakalama etkisi oluşmamaya başladığından en küçük paket uzunluğu 40-bayt olarak seçilmiştir. Sistemli bir şekilde bu uzunluk artırılmıştır, 40, 60, 80, 100 ve 120-bayt. Aloha kanal kullanımının teorik değeri hesaplanırken

sistemdeki kullanıcı sayısının çok fazla olduğu varsayılmıştır. Bu yüzden, kullanıcı sayısının sınırlı bir değer olduğu, bu çalışmada 10 kullanıcı, durumlarda kanal kullanımının teorik olarak nasıl bir değişkenlik gösterdiği Opnet ortamında simülasyon yapılarak gözlemlenmiştir. Şekil-7 elde edilen sonuçlarla birlikte teorik değerleride sunmaktadır.



Şekil 7: Aloha kanal kullanımı farklı paket uzunluklarında.

Teorik olarak kanal kullanımı kanal trafiğinin 0.5 olduğu durumda maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Ancak yakalama etkisiyle maksimum değere kanal trafiğinin 1 olduğu zamanda erişilmektedir. Paket uzunluğunun 40-bayt olduğu durumda yakalama etkisi çok yoğun bir şekilde gerçekleşmektedir ve maksimum kanal kullanımı %50 oranında bir artış göstermektedir. Paket uzunluğu arttıkça yakalama etkisi birbirine çok yakın seviyelerde oluşmaktadır.

5. Sonuçlar ve İleriki Çalışmalar

Bu çalışmada, aynı iletim gücü ile yüklenmiş paket çarpışmasında çarpışma uzunluğuna bağlı olarak bozunumsuz alınabilecek paket adedi ortaya konmuştur. Çarpışma uzunluğunun 10-bayt ve altında olduğu durumlarda alıcıya önce varan paketin sürekli çözülebileceği, 50-bayt üzerinde olduğu durumlarda ise çözülemeyeceği sonucuna pratik olarak erişilmiştir. Yakalama etkisinin bir geçerli protokol olan Aloha üzerinde farklı paket uzunluklarında ne derece bir performans artışına sebep olacağı sunulmuştur. Algılayıcı ağ programlamaya büyük esneklik getiren TinyOS işletim sistemi ile algılayıcılar programlanmış ve uygulama alanı bir bilgisayar üzerinde TinyOS yardımıyla gözetlenmiştir (gönderilen paketler, çarpışmada alınan-alınmayan paketler). Bu çalışma bir çarpışmada başarılı bir paket alınmasının alıcı biriminde 2 aşamada gerçekleştiğini gösterir: (1) geçerli bir *preamble* alımı, (2) *CRC* doğruluk aşaması.

Bazı ağlarda belli kullanıcılar daha önemli bir bilgiye sahip olabilmektedirler buldukları konuma ve işlevlerine bağlı olarak. Dolayısıyla ileriki çalışmalarda, Aloha sistemindeki kullanıcılardan bazılarının iletim gücü artırılarak bu kullanıcılardan alınabilecek maksimum miktarda paket sayısına ulaşılmaya çalışılacaktır. Bu durumda sistem performansının nasıl etkileneceği de incelenecektir.

Farklı iletim güç seviyelerinin kullanımının Aloha sisteminin bir geliştirilmiş versiyonu olan slotted-Aloha üzerindeki etkileride incelenecektir. Slotted-Aloha'da zaman belli

dilimlere ayrılıp ve paket iletimi bu zaman dilimlerinin başlangıçlarında yapıldığından paketler tamamıyla çarpışmaktadır. Bu durumda yakalama etkisi paket uzunluğunun yüksek olduğu durumlarda gerçekleşmeyeceğinden ne derece yüksek iletim gücü kullanımına ihtiyaç olduğu araştırılacaktır.

6. Kaynaklar

- [1] W. Ye, J. Heidemann ve D. Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 493–506, 2004.
- [2] M. Çakıroğlu ve A.T. Özcerit, "Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Hizmet Engelleme Saldırılarına Dayanıklı Ortam Erişim Protokolü Tasarımı", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, vol. 22, pp. 697–707, 2007.
- [3] İ. Demirkol, C. Ersoy ve F. Alagöz, "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, pp. 115–121, Apr. 2006.
- [4] L.G. Roberts, "Aloha Packet Systems with and without Slots and Capture," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 5, pp. 28–42, Apr. 1975.
- [5] K. Whitehouse, A. Woo, F. Jiang, J. Polastre, D. Culler, "Exploiting The Capture Effect For Collision Detection and Recovery," In *IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors*, pp. 45–52, 2005.
- [6] D. Son, B. Krishnamachari, J. Heidemann, "Experimental Study of Concurrent Transmission in Wireless Sensor Networks," In *Proc. SenSys*, pp. 237–250, May. 2006.
- [7] C. Gezer, A. Vasan, C. Buratti, ve R. Verdona, "Capture Effect in IEEE 802.15.4 Networks: Modelling and Experimentation," In *Proc. ISWPC*, Modena, Italy, May. 2010.
- [8] L. Kleinrock ve S. S. Lam, "Packet-switching in a slotted satellite channel", In *Proc. AFIBS*, Montvale, June, 1973.
- [9] J. J. Metzner, "On improving utilization in Aloha networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 24, pp.447-448, 1976.
- [10] R.L. Borchart ve T.T. Ha, "Capture Aloha with two random power levels", *Computer Communications*, vol. 17, pp. 67-71, 1994.
- [11] N. Abramson, " THE ALOHA SYSTEM: Another Alternative for Computer Communications", In *Proc. AFIBS*, pp. 281-285, 1970.
- [12] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer & D. Culler. "TinyOS: An operating system for wireless sensor networks", *Ambient Intelligence*, Springer-Verlag, 2005.
- [13] D. Gay, P. Levis, R.V. Behren, M. Welsh, E. Brewer & D. Culler. "The nesC Language: A holistic approach to networked embedded systems", *Proceedings of SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI)*. 2003.
- [14] "Iris wireless measurement system datasheet". http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/IRIS_Datasheet.pdf. Crossbow Technology, Doc No 6020-0124-01 Rev A.
- [15] 'Data Sheet for AT86RF230 2.4 GHz IEEE 802.15.4-compliant RF Transceiver'. <http://www.atmel.com/Images/doc5131.pdf>.