Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi
Fen ve Mühendislik Dergisi
Cilt 19 Sayı 55 Ocak 2017

Dokuz Eylul University-Faculty of Engineering
Journal of Science and Engineering
Volume 19 Issue 55 January 2017

DOI: 10.21205/deufmd. *2017195501*

IEEE 802.11 Kablosuz Ağları için Bir Gerçek Zamanlı İletişim Protokolü

Tolga AYAV[*1]

[1]İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 35430, İzmir

(Alınış / Received: 25.01.2016, Kabul / Accepted: 01.11.2016,
Online Yayınlanma / Published Online: 09.01.2017)

Anahtar Kelimeler
Gerçek Zamanlı İletişim,
IEEE 802.11,
Zamanlama,
Sistem Kararlılığı

Özet: 802.11 kablosuz ağları gerçek zamanlı uygulamaların gereksiniminlerini karşılayabilecek sağlıklı mekanizmalardan yoksundur. Bu çalışma, uygulama katmanında kolaylıkla gerçekleştirilebilen ve iletişim verimliliğini artırarak sistemi gerçek zamanlı uygulamaların beklenti seviyesine çıkartan bir protokol sunmaktadır. Protokol, seçilen bir merkez düğümün diğer düğümleri sorgulaması esasına dayanmakta olup, trafiğin zamanlaması En Yakın Zaman Sınırı İlk algoritması tarafından sağlanmaktadır. Değişken trafik yükleriyle baş edebilmek amacıyla, kanal kullanımını istenen seviyede tutacak bir geri beslemeli kontrol döngüsü de protokole eklenmiştir. İletişimin matematiksel modeli oluşturularak, kontrol döngüsünün kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Ağın NS-3 benzetimleri, protokolün değişken trafik yüklerinde kanal kullanım oranını istenen seviyede tutabildiğini ve daha az paket kaybına ulaştığını göstermektedir.

A Real-Time Communication Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks

Keywords
Real-Time Communication,
IEEE 802.11,
Scheduling,
System Stability

Abstract: 802.11 wireless networks do not have proper mechanisms to fulfil the requirements of real-time applications. This study presents a real-time communication protocol that can be implemented in the application layer. The proposed protocol is based on a preselected master node interrogating other nodes, using the Earliest-Deadline-First algorithm for scheduling the network traffic. In order to cope with the highly variable traffic load, the protocol is also augmented with a feedback control loop to keep the channel utilization at a predefined level. The stability analysis of the control loop is performed through the mathematical model of the communication. The NS-3 simulations show that the protocol is able to keep the utilization at the desired level and achieve a less packet loss.

**Sorumlu yazar: tolgaayav@iyte.edu.tr*

1. Giriş

Günümüzde mobil araçlar, robotlar, tehlikeli ortamlarda çalışan cihazlar gibi birçok gömülü sistem artık sabit bir sistem olmaktan çıkmış, dolayısıyla da ağa bağlı, otonom ve daha karmaşık bir hale gelmiştir [1][2]. Açıktır ki, bu sistemlerin çoğunda sistemin doğası gereği kablolu ağ bağlantısı çok zor ve bazen imkânsız olabilmektedir. Kablosuz ağlar mobil gömülü sistemlerin ağ bağlantısı ihtiyacını başarılı bir şekilde çözmektedir. Günümüzde Sınai Bilimsel ve Tıbbi cihaz Bandında (SBT) çalışan ve yaygın olarak kullanılan ağlar arasında IEEE 802.11 (WiFi), 802.11ah (Düşük güçlü WiFi), 802.15.1 (Bluetooth), 802.15.4a (UWB) ve 802.15.4 (ZigBee) sayılabilir. Yine bunlar arasında 802.11 (WiFi) hiç kuşkusuz tüm dünyada en kabul görmüş ve geniş kullanım alanına sahip kablosuz ağdır.

Yukarıda anılan alanlarda karşılaşılan uygulamalarda sistem bileşenleri olan sensörleri, erişim düzeneklerini ve bilgisayarları kablosuz olarak birbirlerine bağlarken karşılaşılan en önemli problemlerden biri de sistemin gerçek zaman ölçütlerinin sağlanabilmesidir. Gerçek zamanlı sistemler, işlevsel doğruluğun yanısıra önceden tanımlanmış zaman kıstaslarına da uyulması gereken sistemlerdir [3]. Gerçek zamanlı sistemler geleneksel olarak katı ve gevşek olmak üzere iki grupta incelenebilirler. Zaman kısıtlarına uyulmamasının tehlikeli sonuçlar doğurabildiği emniyet kritik sistemler katı gerçek zamanlı olarak sınıflanırlar. Gevşek gerçek zamanlı sistemlerde ise zaman kısıtlarının ihlali arzu edilmeyen bir performans kaybı olarak yorumlanır ancak hayati boyutta bir sonuç doğmaz. Ağ üzerinde gerçek zamanlı trafiğin zamanlama teknikleri ise statik ve dinamik olarak ayrılabilir. Statik zamanlama daima ortam ve trafik yükü hakkında tam bir bilgiye sahip olunmasını gerektirir. Bu zamanlama bir eniyileme problemi olarak modellenerek elde edilebilir ve sistemin çalışması esnasında değiştirilmez. Statik zamanlama kullanıldığında önceden tanımlanmış bir trafik elde edilir, böylelikle rastgele çoklu erişim mekanizmasına sahip kablosuz ağlarda bile çarpışmasız bir ortam yaratılmış olur. Diğer yandan statik zamanlamanın kullanılması trafiğin ve yükün tam belirli olmadığı durumlarda olası değildir. Sistemlerin büyük çoğunluğu önceden kestirilemez ortamlarda çalışmakta ve dinamik iletişim yüklerine sahip olmaktadırlar. Dinamik zamanlamada ise bir zamanlayıcı belirli aralıklarla çalışarak tüm zamana bağlı koşulların sağlanması için en uygun önceliklendirmeyi sağlamaya çalışır.

802.11 üzerinde gerçek zamanlı iletişim uzun bir süredir araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Bell Laboratuvarları'ndan çıkan ve gerçek-zamanlı iletişim için yeni çoklu erişim teknikleri öneren çalışma bu konuda ilklerden biridir [4]. 802.11'de gerçek zaman karakteristiklerini elde etmek için birçok çalışma MAC (Medium Access Control) alt katmanında zaman bölmeli çoklama vb. yöntemler önermişlerdir [1]. Heusse vd., ağın matematiksel modelini oluşturarak, düğümlerin gecikme yaşamamaları için paket gönderim oranlarının sınırını hesaplamış ve bu sınırı aşmadıkça düğümlerin gecikme yaşamayacağını göstermiştir [5]. 802.11 MAC protokolü DCF (Distributed Coordination Function) ve PCF (Point Coordination Function) olarak bilinen iki ortam erişim metoduna sahiptir. DCF, CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) stratejisince çalışan bir asenkron iletişim protokolüdür ve gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir. PCF ise gerçek zamanlı iletişim için önerilmiş bir yöntemdir ancak standartta birçok parametrenin ne olacağı açıklanmamıştır. PCF modu ve

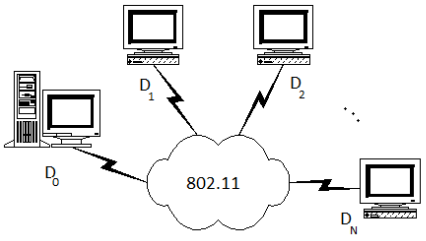
parametrelerin hesabı birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır [6][7] ancak PCF gerek yaygın olmaması gerekse de standartta açık tanımlanmayan bazı özelliklerinden ötürü çoğu üründe yer almamıştır. Bu nedenle bu çalışmada olduğu gibi diğer birçok araştırma DCF üzerinde çeşitli yöntemler geliştirmiştir ve bu yöntemler daha çok MAC alt katmanı için önerilen bir takım eklentiler şeklinde olmuştur [8][9][10][11]. Özetle, IEEE 802.11 ağları ve cihazları gerçek zaman kriterlerini sağlayabilecek mekanizmalardan yoksundur ve 802.11'in gelişigüzel çoklu erişim (Randomized Multiple Access) mekanizmasından dolayı gecikmeler çok fazla olabilmekte veya en azından önceden kestirilememektedir.

Bu makalede 802.11 ağları için bir Gerçek Zamanlı İletişim Protokolü (GZİP) önerilmektedir. Yukarıda anılan çalışmaların aksine GZİP 802.11'e herhangi bir eklenti önermeyip iletişim protokolünü uygulama katmanında tanımlamaktadır. OSI modeline göre 2. katmanın üzerinde tanımlanacak bir protokolün katı gerçek zaman kısıtlarını garanti etmesi beklenemez. Örneğin ses ve video gibi gerçek zamanlı çoklu ortam verilerinin iletimi için kullanılan RTP ve RTCP (Real-Time Transport Protocol, Real-Time Transport Control Protocol) protokolleri iletim katmanında tanımlanmış olup servis kalitesini garanti etmez ancak iletişim performansını önemli ölçüde yükseltirler [12]. Benzer şekilde önerilen GZİP de katı zaman kısıtlarını garanti etmeyip benzetim sonuçlarında da gösterileceği gibi 802.11 iletişim performansını yükseltmekte, diğer bir deyişle gevşek gerçek zamanlı iletişim sağlamaktadır.

İletim ve İnternet katmanlarında TCP/IP veya UDP/IP protokolleri kullanılabilir olsa da bu çalışmadaki model ve hesaplamalar ek yükü daha az olduğu için UDP/IP protokolünün kullanımını öngörmektedir. Önerilen protokol sorgulama tabanlı olup, bir merkez düğümün diğer düğümleri sorgulayarak tüm trafiği yönetmesi esasına dayanmaktadır. Merkez düğüm ağdaki diğer tüm düğümlere bir sorgu paketi göndererek onlardan karşılığında bir onay paketi alır. Bu onay paketinde düğümler merkez düğüme iletişim gereksinimlerini ve zaman sınırlarını bildirir. Merkez düğüm zaman koşullarının sağlanacağı en uygun trafik planlamasını yaparak hangi düğümün ne zaman iletime başlayacağını söyler. Merkez düğüm izin vermedikçe hiç bir düğüm kendiliğinden iletişime başlayamaz. Böylelikle çarpışmalı bir ortamda çarpışmasız bir trafik elde edilerek önceden kestirilmesi olası olmayan gecikmelerin önüne geçilmiş olur. İletişimdeki önceliklendirmeyi sağlamak için En Yakın Zaman Sınırı İlk algoritması kullanılmaktadır. Önerilen protokol kanal kullanımını en yüksekte tutmak için merkez düğümün sorgulama aralığını uyarlamacı bir yaklaşımla kapalı döngü kontrol kullanarak ayarlamaktadır. Yine bu çalışmada gerçekleştirilen kontrol sisteminin kararlılık analizi de bize sistemin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için gerekli koşulların neler olduğunu söylemektedir. Tanımlanan bir iş yükü altında sistemin NS-3 benzetimleri yapılmış ve çalışma esnasında sistem parametrelerinin değişimi grafiklerle sunulmuştur.

Çalışma şu bölümlerle ele alınmıştır: Bölüm 2'de önerilen GZİP detaylı olarak anlatılmaktadır. Bölüm 2.1'de 802.11'de kanal kullanımı matematiksel olarak modellenmekte, Bölüm 2.2'de ise değişken trafik yükünde kararlı bir sistem elde edebilmek için bir geri besleme kontrol döngüsü tasarımı sunulmaktadır. Aynı bölümde sistemin kararlılık analizi ve kararlılık için gerekli koşullar verilmektedir. Bölüm 3'te oluşturulan matematiksel model üzerinde sistemin NS-3 benzetimleri

yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. Çalışma, son olarak Bölüm 4 ile sonuçlandırılmaktadır.



Şekil 1. 802.11 iletişimi. D_0 merkez düğümü, D_1,D_2,…,D_n ise diğer düğümleri göstermektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde makalede önerilen gerçek zamanlı iletişim protokolünün detayları sunulmaktadır. Gerçek zamanlı dağıtık bir uygulamada N+1 adet düğüm olduğunu ve tüm düğümlerin 802.11 kablosuz ağ üzerinden bağlı olduğunu kabul edelim. Söz konusu sistem, Şekil 1'de görülmektedir. Gerçek zamanlı iletişimden bahsedilen bir sistemde düğümlerin birbirlerine gönderdiği her bir paket için zaman sınırı tanımlanmaktadır. İstenilen, paketlerin tanımlanan bu zaman sınırları aşılmadan hedeflerine ulaştırılmasıdır.

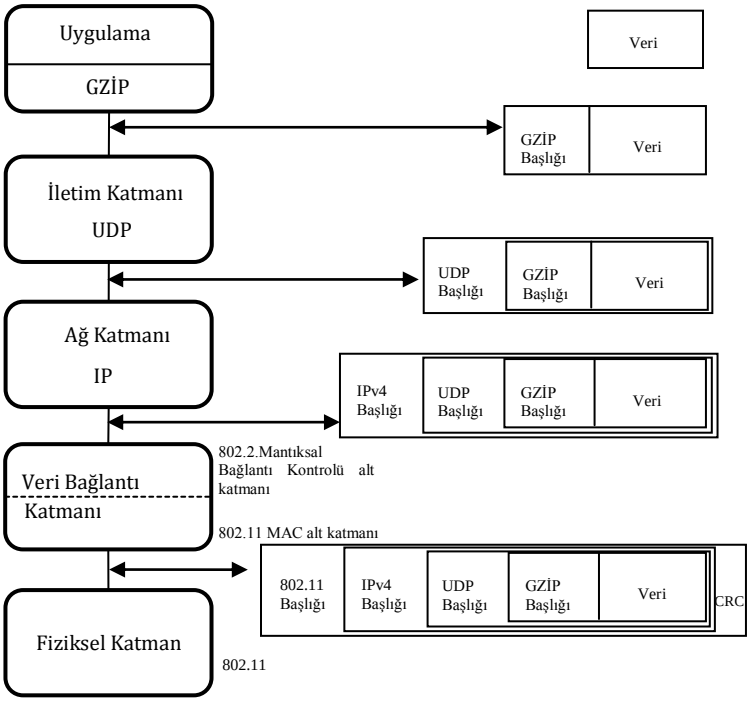
GZİP, uygulama katmanında tanımlanmış olan bir protokoldür ve UDP/IP üzerinde çalışmaktadır. Şekil 2'de Internet veya TCP modeli olarak bilinen 5 katmanlı ağ modeli gösterilmektedir. Bu şekilde GZİP'in katmanlar arasındaki yeri de belirtilmiştir. Yine her bir katmandaki protokolün pakete ekledikleri başlıklar da şekilde üzerinde gösterilmiştir. Buna göre uygulama katmanındaki veri yukarıdan aşağı doğru ilerleyerek ilgili başlıklar pakete eklenmekte, en alt katman olan fiziksel katman tarafından paket hedef düğüme ulaştırılmaktadır. Hedefe ulaşan paket bu sefer ters yönde ilgili başlıklar katmanlarca değerlendirilerek fiziksel katmandan uygulama katmanına doğru yukarı çıkmakta ve hedef uygulamaya varmaktadır.

GZİP sorgulama mekanizmasına sahiptir. Böyle bir sistemde düğümlerden biri merkez düğüm olarak tanımlanır ve iletişimi yönetir. Protokol sadece merkez düğümün izin verdiği düğümlerin konuşmasına izin verir. Merkez düğümün amacı uygun zamanlamayı sağlayarak düğümlerin paketlerini zaman sınırlarından önce hedeflerine ulaştırmalarını sağlamaktır. Burada D_0 merkez düğümü, D_1, D_2, …,D_n ise geri kalan düğümleri göstermektedir. Merkez düğüm diğer düğümlerden fiziksel olarak farklı olmak zorunda değildir, düğümlerden herhangi biri merkez düğüm olarak seçilebilir ve bu düğüm, zamanlama algoritmasını çalıştırarak iletişimi yönetir. Seçilen merkez düğümün bir şekilde devre dışı kalması durumunda başka bir düğüm de bu görevi üstlenebilir. Sorgulama, iletişimi planlama ve yönetme işlerinin merkez düğüme istenmeyen bir ek yük getirmesi beklenmektedir. Bu ek yük merkez düğümdeki işlemci gücüne bağlı olmakla birlikte, sadece paket gönderme ve alma ağırlıklı işlemlerden oluştuğundan ihmal edilebilir düzeyde olacaktır.

Düğüm D_k'nin başka bir düğüme göndermek istediği veri olduğunu varsayalım. Bunu aşağıdaki parametrelerle karakterize edeceğimiz bir iş olarak ele alacağız:

$$\langle k, h, i_k, t_k, m_k, d_k \rangle \qquad (1)$$

Burada k kaynak düğümün numarasını, h hedef düğüm numarasını, i_k iş numarasını, t_k işin yaratıldığı zamanı, m_k gönderilecek paket sayısını ve d_k işin tamamlanması için düğüm tarafından tanımlanmış olan zaman sınırını ifade etmektedir. Zaman sınırından önce bir işin tamamlanmasını sağlamak ana düğümdeki zamanlayıcının görevidir.



Şekil 2. 5 katmanlı ağ yapısı modeli ve GZİP'in bu yapıdaki yeri.

Sistemin gerçek zamanlı çalışabilmesi, diğer bir deyişle, paketlerin zaman sınırlarından önce hedeflerine ulaşabilmeleri için iki temel şart bulunmaktadır. Bunlardan ilki zaman sınırlarının veri gönderme süresinden daha kısa olmaması gerektiğini söyler:

$$t_k + T_{veri_k} \leq d_k\,, \quad \forall k \in \{1,2,\cdots,N\} \qquad (2)$$

Diğeriyse toplam kanal kullanım oranının %100'ü geçmemesi gerektiğini söyler:

$$\sum_{k=1}^{N} f_k m_k T_{veri_k} \leq 1 \qquad (3)$$

Burada f_k işin yaratılma sıklığını, $Tveri_k$ ise bir paketin ağ üzerindeki gönderilme süresini vermektedir. Bir diğer önemli varsayım ise kablosuz ağdaki tüm düğümlerin çalışabilir durumda olması ve ağ üzerinden birbirleriyle bağlantı kurabilmeleridir.

Veri paketlerinin boyutu değişken olabilmekle birlikte bu protokolde veri paketlerinin boyutlarının küçük ve sabit olması önerilmektedir. Sabit uzunluğa sahip veri paketlerindeki verinin *n* byte olduğu varsayımıyla, bu parametrenin sistem kurulurken tanımlanması gereken ve çalışma zamanında değişmeyen bir sistem parametresi olduğu düşünülebilir. Paket boyutlarının küçük olması zamanlayıcının gerektiğinde o anki veri gönderimini yarıda keserek sorgulama fazına geçişine izin verilmesini sağlayacaktır. Zamanlayıcı olarak En Yakın Zaman Sınırı İlk (EZİ) algoritması kullanılmaktadır. EZİ dinamik öncelik tabanlı bir zamanlama algoritmasıdır [13]. İşlerin öncelikleri dinamik olarak değiştirilir ve öncelikler işlerin zaman sınırlarına bağlı olarak ayarlanır. Öyle ki, zaman sınırı en yakın olan işin önceliği en yüksek olacak şekilde belirlenir ve bu iş ilk olarak tamamlanmaya çalışılır. Örneğin, belirli bir anda iş kümesi aşağıdaki gibi olsun:

$K = \{\langle 1,5,120,10,4,13\rangle, \langle 1,6,121,10,4,15\rangle, \langle 3,5,340,10,4,14\rangle\}$

Sorgu sırasında, 120, 121 ve 340 numaralı işlerin zaman sınırları 13, 15 ve 14 olarak verilmiştir. Bu durumda zamanlayıcı işleri 120, 340 ve 121 olarak sıralayacaktır.

Önerilen gerçek zamanlı iletişim protokolünde beş farklı tipte paket bulunmaktadır. Bunlar *sorgu*, *onay*, *başla*, *veri* ve *bitir* paketleri olup birden beşe kadar numaralandırılmıştır. Bu paketlerin içeriği, boyutu ve iletim süreleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. GZİP protokolünde iletişimde kullanılan paket tipleri ve başlık yapıları.

Paket No	Paket Tipi (X)	GZİP başlığı	Veri Boyutu (s_X)	İletim Süresi (T_X)
1	sorgu	| 1 | 0 | h |	68	312 µs
2	onay	| 2 | k | 0 | i_k | m_k | d_k |	68	312 µs
3	başla	| 3 | 0 | h | i_h |	68	312 µs
4	veri	| 4 | k | h | n byte veri |	68+n	(68+n)8/11+262 µs
5	bitir	| 5 | 0 | h | i_h |	68	312 µs

```
Düğüm 0 (Merkez Düğüm):
 Her T aralığında çalıştır:

        Döngü: j= 1'den N'e kadar:

                P_sorgu(1|0|j) paketini gönder
                P_onay( 2 | k | 0 | i_k | m_k | d_k ) paketini bekle ve al
                Eğer i_k≠0 ise i_k'yı iş kuyruğu Q'ya ekle
        Döngü sonu

        Döngü: EZİ(Q)≠0 ise:

                P_başla(3 | 0 | h | i_h) paketini gönder
                P_bitir(5 | 0 | h | i_h) paketini bekle
                i_k'yı iş kuyruğu Q'dan çıkar

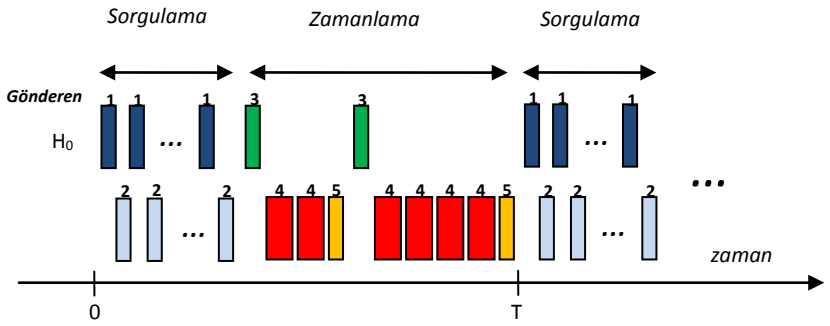
        Döngü sonu

        f_sorgu+=PID()
        T=1/f_sorgu
        Başa dön
```

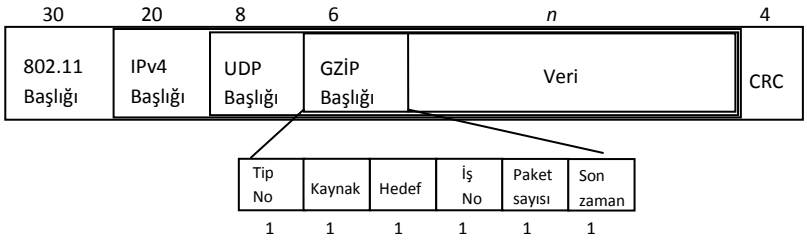
Şekil 3. Merkez düğümde çalışan protokol.

Protokole göre, merkez düğüm D_0 her bir T zaman aralığında sorgulama ve zamanlama evrelerini gerçekleştirir. İlk evre olan sorgulama evresinde merkez düğüm ağ üzerindeki düğümlere sırasıyla 1 numaralı sorgu paketini göndererek her birinden 2 numaralı onay paketini alır. Onay paketinin içerisinde bir düğüm eğer varsa iletişim gereksinimini çizelgeden de okunacağı üzere i_k, m_k ve d_k parametreleriyle bildirir. Onay paketinde $i_k=m_k=d_k=0$ olarak verilmesi düğümün herhangi bir iletişim gereksinimi olmadığını gösterir. Sorgulama evresi sona erdiğinde merkez düğümün iletişimi planlaması için gerekli bilgiler elinde toplanmış olur. Zamanlama evresindeyse düğümler paketlerini

hedeflerine gönderirler. Bir düğüm ancak merkez düğümden kendisine gönderilecek bir başla paketinin ardından verisini göndermeye başlayabilir. Başla paketinin içerisinde merkez düğüm ilgili düğüme hangi iş numaralı iletişimi gerçekleştirmesi gerektiğini bildirir. Veri paketleri sorgulama evresinde merkez düğüme bildirildiği gibi bir veya daha fazla olabilir. Veri paketlerinin gönderimi tamamlandığında gönderen düğüm merkez düğüme belirtilen işin tamamlandığını bildiren bir bitir paketi gönderir. Merkez düğüm elindeki iş kümesinin tümüyle tamamlanmasını beklemek zorunda olmaksızın T süresi tamamlandığında tekrar sorgulama evresine girer ve protokol bu şekilde devam eder. Merkez düğüm EZİ uyarınca işlerin zaman sınırlarından önce tamamlanmasını sağlamaya çalışır. Merkez düğümde protokol uyarınca çalışmakta olan program sözde kod olarak Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 4. Gerçek zamanlı trafiğin zaman diyagramı. T sorgulama periyodunu göstermektedir.



Şekil 5. Bir 802.11 paketinin iç yapısı.

Sözkonusu evreleri ve iletişimi gösteren bir zaman diyagramı Şekil 4'te sunulmaktadır. Şekil 5 ise bir 802.11 paketinin iç yapısını göstermektedir. Görüldüğü gibi katmanlı modele göre, uygulama katmandaki bir veri gönderilirken sırasıyla GZİP başlığı, iletim katmanından UDP başlığı, ağ katmanından IP başlığı ve veri bağlantı katmanından 802.11 başlığı veriye eklenerek bir paket oluşturulmaktadır.

2.1. Sistemin Modellenmesi

Bu bölümde 802.11 paket yapısı ve GZİP matematiksel olarak modellenecektir. Geliştirilen protokol uygulama katmanında tanımlandığından 802.11 ailesinin tümünde kullanılabilmekle birlikte, matematiksel model 802.11b ağı gözönünde bulundurularak oluşturulmuştur. Buna bağlı olarak da NS-3 benzetimleri yine bu ağ üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aynı analiz ve benzetimler bu makaledeki yöntem takip

edilerek 802.11a veya 802.11g ağları için de gerçekleştirilebilir.

Her bir istasyonun saniyede x paket hızıyla, s byte boyutuna sahip P_X olarak adlandırdığımız paketleri gönderdiğini kabul edelim. Paket iletim hızının s/R olduğu bilinmektedir (Nominal hız değeri R için Tablo 2'ye bakınız). Diğer yandan DCF erişim metodu, tanımlanmış bir süre (DIFS-Distributed Inter Frame Space) kadar bekler ve ortam hala serbest ise paketi gönderir. Eğer paket karşı taraftan doğru bir şekilde alınırsa alıcı başka bir tanımlı süre (SIFS-Shorter Inter Frame Space) kadar bekleyip bir onaylama paketi gönderir. Tüm bu bekleme süreleri iletişime sabit bir ek yük getirir. Böylece, Paket P_X için toplam iletim zamanı aşağıdaki formülle hesaplanabilir [5]:

$$T_{X_i}=\text{DIFS} + t_{pr} + \text{SIFS} + t_{pr} + t_{ack} + \frac{(S_{X_i} + 62)}{R} \quad (4)$$

Tablo 2. 802.11 ağ parametreleri

Parametre	Değer
DIFS	50 µs
SIFS	10 µs
t_{pr}	96 µs
t_{ack} (Onay paketi uzunluğu: 112 bit)	10 µs
R (802.11b için)	11 Mbit/s

Formül (4)'te t_{pr} paket başlığının (Kısa PLCP başlığı) iletim süresini ve $X \in \{sorgu, onay, basla, veri, bitir\}$ ise paket tipini göstermektedir. Formüldeki 62 sayısı 30 byte 802.11 başlığı, 4 byte CRC, 20 byte IP ve 8 byte UDP başlıklarının toplamıdır. Tipik bir 802.11 paketinin yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna göre, GZİP başlığı 6 byte'tır ve UDP paketinde veri kısmının en başında yer almaktadır. Veri boyutu sıfır olsa bile paketin boyutunun en az 62 byte olduğu görülmektedir. Bu durumda kanal kullanım oranı u, $((k-1)T,kT)$ zaman aralığında kanalın meşgul olduğu süre olarak aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir. Formül (5) sorgulamanın yaratmış olduğu kanal kullanım oranını vermektedir.

$$u_{sorgulama} = f_{sorgu} N (T_{sorgu} + T_{onay}) \quad (5)$$

Burada sorgulama frekansı f_{sorgu}, $1/T$'dir ve N düğüm sayısını göstermektedir. Zamanlama evresine ilişkin kanal kullanım oranı ise aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$u_{zamanlama} = \sum_{i=1}^{N} x_{veri_i}(T_{basla} + T_{veri_i} + T_{onay}) \quad (6)$$

Sorgulama ve zamanlama evrelerine ilişkin kullanım oranlarının toplamı bize toplam kanal kullanım oranını verir:

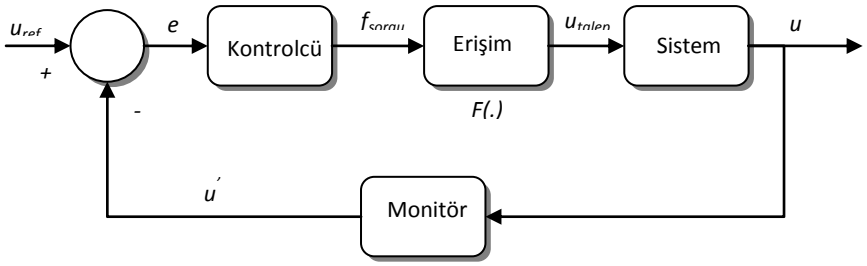
$$u = u_{sorgulama} + u_{zamanlama} \quad (7)$$

Önerilen metot çarpışmayı önlediği için formüllerde olası çarpışmalardan kaynaklanacak ek yükler hesaba katılmamıştır.

2.2. Geri Beslemeli Kontrol Mekanizması

Sorgu frekansının (f_{sorgu}) dinamik olarak ayarlanması ve performansın yükseltilmesi için bir geri beslemeli kontrol döngüsü tasarlanmıştır. Geri beslemeli kontrol döngüsü bir hata terimi tanımlayarak, bu hatayı ölçer ve sürekli olarak hatayı en aza indirgeyecek ve performansı yükseltecek şekilde ilgili parametreleri ayarlar. Tipik bir kontrol döngüsü, bir kontrolcü, kontrol edilecek sistem, erişim düzenekleri ve algılayıcılardan oluşur. Kontrol edilen değişken (u), ölçülen ve kontrol edilen sistem çıkışının niceliğini ifade eder. Referans değeri (u_{ref}) kontrol edilen değişkenin ulaşması istenen değerini gösterir. Bu değer ile kontrol edilen değişkenin ölçülen anlık değeri

arasındaki fark hatayı verir. Manipüle edilen değişken, kontrolcü tarafından üretilir ve kontrol edilen değişkene müdahale etmede kullanılan bir değerdir. Bu sistemde manipüle edilen değer sorgulama frekansı f_{sorgu}'dur ve kontrol edilen değişken de talep edilen kanal kullanım oranı u_{talep}'tir. u_{ref}, kanal kullanım oranı için tanımlanan hedefi göstermektedir. Kontrol döngüsü Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Kapalı döngü kontrol mekanizması

Sorgulama fazından hemen sonra ana düğüm diğer düğümlerin iletişim gereksinimleriyle ilgili tüm veriye sahip durumdadır. Bu veriye dayanarak kontrol döngüsünü bir kere çalıştırır ve döngüdeki tüm sinyaller hesaplanır. $t \in \mathbb{N}$ kesikli zaman indisi olsun. Bu durumda gerçek zaman $\tilde{t} = Tt$ olarak hesaplanabilir. Bu durumda erişim düzeneğinin çıkışı olan talep edilen kanal kullanım oranı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} u_{talep}(t) &= F\left(f_{sorgu}(t)\right) \\ &= \sum_{k} \frac{m_k\left(\frac{(68+n)8}{11} + 262\right)}{d_k} \\ &+ N f_{sorgu}(t)\left(T_{sorgu} + T_{onay}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Formül (8)'de, $k \in$ {iş kümesi} olmak üzere, d_k iş k'nin tamamlanması gereken zaman sınırını µs cinsinden, m_k ise iş k'ye ait paket sayısını göstermektedir. Gerçekte kanal kullanım oranı ortamdaki girişim ve gürültü nedeniyle talep edilenden farklılık gösterebilecektir. Hatalı iletim durumunda paketin tekrar gönderilmesi istenecektir. Ortamdaki hata oranı BER (Bit Error Rate) parametresi ile ifade edilecek olursa, yeniden gönderimlerden dolayı kanal kullanımı aşağıdaki şekilde olacaktır:

$$G = \frac{1}{(1 - BER)^n} \quad (9)$$

$$u(t) = G u_{talep}(t) \quad (10)$$

G parametresi IEEE 802.11 tanımlarına göre paket başarı oranıdır. Kanal kullanım oranının tam doğrulukla ölçüldüğü varsayılmaktadır, bu durumda:

$$u'(t) = u(t) \quad (11)$$

$$e(t) = u_{ref} - u'(t) \quad (12)$$

Kontrolcü hatayı bulur ve hataya bağlı olarak manipüle edilen değişkenin değerini hesaplar. Bu değer [$f_{sorgu,alt}$, $f_{sorgu,üst}$] aralığında olacak şekilde alt ve üst değerlere sahiptir. Tablo 1 ve 2'de verilen değerlere göre sorgulama frekansının üst sınırı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Kanal kullanım oranı 1.0 olarak ve ağdaki iş yükü de sıfır olarak alınırsa Formül (5) aşağıdaki hale gelir:

$$N f_{sorgu,\text{üst}}\left(T_{sorgu} + T_{onay}\right) = 1 \quad (5)$$

N=10 için ve Tablo 1'de verilen T_{sorgu}=T_{onay}=312µs değerlerine göre sorgulama frekansının üst sınırı yaklaşık 160 Hz olarak hesaplanır. Alt sınır ise uygulamanın gerçek zaman gereksinimlerine göre belirlenmelidir. Alt sınırın çok düşük olması sorgulamanın çok geç yapılabilmesine ve kuyrukta bekleyen işlerin zaman sınırlarının kaçırılabilmesine neden olacaktır.

2.2.1. Kontrol Stratejisi

Kontrolcü yaygın olarak kullanılan P (Oransal), PI (Oransal-Integral) veya PID (Oransal-Integral-Türev) kontrol stratejilerinden birine sahip olabileceği gibi H_∞ gibi gürbüz kontrol stratejilerinin de kullanılması mümkündür. Bu çalışmada PID kontrol stratejisi sözkonusu kontrol döngüsü için kapsamlı ve yeterli görünmektedir. PID uyarınca, kontrolcü sorgulama frekansını aşağıdaki şekilde hesaplar:

$$f_{sorgu}(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{i=0}^{t} e(i) + K_d(e(t) - e(t-1)) \quad (13)$$

Her sorgulama periyodunda kontrol döngüsü bir kere çalıştırılacağından, örnekleme periyodu doğal olarak sorgulama periyoduyla aynı olacaktır:

$$T(t) = \frac{1}{f_{sorgu}(t)} \quad (14)$$

Kontrol döngüsü kanal kullanımını u_{ref}'te veya ona yakın tutacak şekilde görev yapacaktır. PID kontrolcünün oransal, integral ve türev terimlerine ilişkin katsayıları olan K_p, K_i ve K_d'ye uygun değerler atanabilmesi için kontrol teorisi tabanlı bir kararlılık analizi aşağıda sunulmaktadır.

2.2.2. Sistem Kararlılığı

Kararlılık analizi için öncelikle kapalı döngü sistem denklemleri durum uzayı formunda elde edilir. Kontrolcü için durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$x_1(t+1) = x_1(t) + e(t) = x_1(t) - Gu_{talep}(t) + u_{ref} \quad (15)$$

$$x_2(t+1) = e(t) = -Gu_{talep}(t) + u_{ref} \quad (16)$$

$$x_3(t+1) = x_2(t) \quad (17)$$

$$f_{sorgu}(t) = K_i x_1(t) + K_p x_2(t) + K_d(x_2(t) - x_3(t)) \quad (18)$$

$$u_{talep}(t) = \sum \frac{k_j \left(\frac{(68+n)8}{11} + 262\right)}{d_j} + Nf_{sorgu}(t)(T_{sorgu} + T_{onay}) \quad (19)$$

Gösterimi sadeleştirmek amacıyla u_{talep}'i aşağıdaki gibi yazarsak,

$$u_{talep}(t) = NT_{onay} f_{sorgu}(t) + C \quad (20)$$

Kapalı döngü sistem denklemleri formül (21)'de verildiği şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{bmatrix} x_1(t+1) \\ x_2(t+1) \\ x_3(t+1) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} u_{ref} - GC \\ u_{ref} - GC \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - GNT_{onay}K_i & -GNT_{onay}(K_p + K_d) & GNT_{onay}K_d \\ -GNT_{onay}K_i & -GNT_{onay}(K_p + K_d) & GNT_{onay}K_d \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}.$$

Tablo 3. Değerler tablosu

Parametre	Değer
N (Düğüm sayısı)	10
K_p	2
K_i	0.02
K_d	0.001
u_{ref}	0.70
β	100 ms
β	30 ms
β	50 ms
$d_{k,min}$, $d_{k,max}$	1 s, 5 s
$m_{k,min}$,$m_{k,max}$	10, 15
G	1.0

Kararlılık için **A** dizeyinin öz değerlerinin mutlak değerleri 0 ile 1 arasında olmalıdır [14]:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0 \Rightarrow \max|eig(\mathbf{A})| < 1 \quad (22)$$

Karakteristik denklem daha açık olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\lambda^3 + \left(1 - GNT_{onay}\left(K_p + K_i + K_d\right)\right)\lambda^2 + GNT_{onay}K_p\lambda - GNT_{onay}K_d = 0 \quad (23)$$

3. Bulgular

Bu bölümde önerilen protokol benzetimlerle sınanmaktadır. Benzetim aracı olarak NS-3 kullanılmıştır. NS-3, özellikle araştırma, geliştirme çalışmaları ve eğitim için tasarlanmış bir kesikli zaman ağ benzetim aracıdır [15].

Benzetimlerde GZİP aşağıda detayları verilen iş yükü ile sınanmıştır. Benzetimde kullanılan parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre, ağ üzerinde 10 adet düğüm olduğu varsayılmıştır. Her bir düğümde yaratılan işlerde ağın yükünü etkileyecek olan üç parametre işin geliş zamanı t_k, paket sayısı m_k ve zaman sınırı d_k'dır. Ardışıl iki paketin geliş zamanları arasındaki fark aşağıda gösterildiği şekilde bir üstel dağılıştan türetilmektedir:

$$\Delta t_k \sim \text{üstel}(\beta) \quad (24)$$

Burada β üstel dağılışa ilişkin ortalama değeri göstermektedir. Paket sayısı ve işin zaman sınırı ise yine aşağıda gösterildiği şekilde birörnek dağılıştan türetilmektedir:

$$m_k \sim \text{birörnek}(m_{k,min}, m_{k,max}) \quad (25)$$

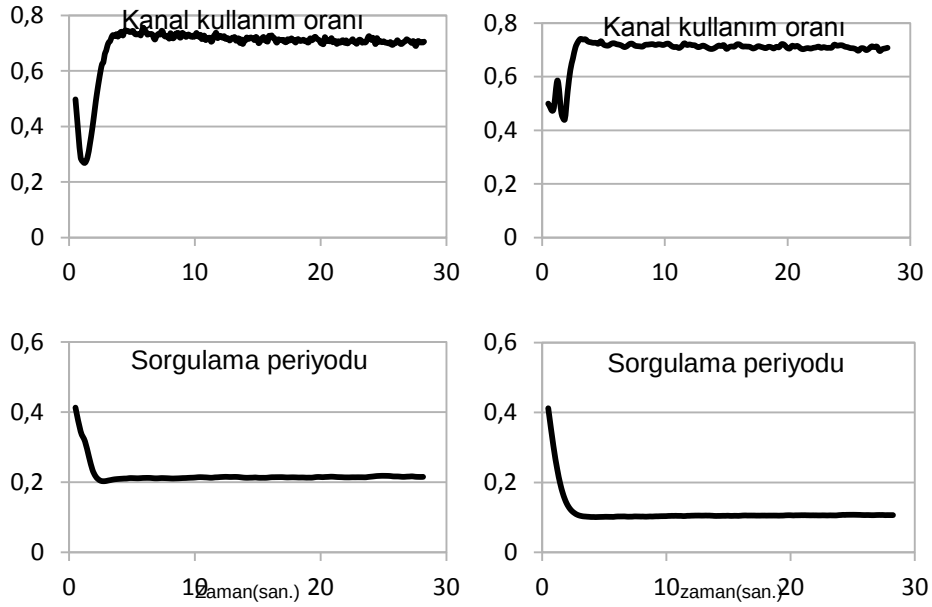
$$d_k \sim \text{birörnek}(d_{k,min}, d_{k,max}) \quad (26)$$

Kararlılık analizi için simülasyon değerleri Eşitlik (23)'te yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\lambda^3 + 0.96724\lambda^2 + 0.02496\lambda - 0.00156 = 0 \quad (23)$$

Denklemin çözüm kümesi λ∈{-0.93899, -0.057334, 0.028980} olarak hesaplanır. Buna göre Eşitsizlik (22)'de verilen koşula göre öz değerlerin mutlak değerleri birden küçük olduğundan söz konusu kontrol parametreleriyle sistemin kararlı olduğu sonucuna varılır.

İlk olarak, Şekil 7'de sonuçları sunulan benzetimlerle protokolün sorgu mekanizmasının sisteme getirdiği ek yük gösterilmektedir. Bu benzetimlerde protokol, düğümlere sorgu gönderip onay almaya ve PID kontrolcü kanal kullanım oranını 0.7'de tutacak şekilde sorgu periyodunu ayarlamaya devam etmekte ancak düğümlerde hiçbir veri paketi yaratılmamaktadır. Şekildeki sol üst ve sol alt grafikleri 50 düğümlü bir sistem için sırasıyla kanal kullanım oranı ve sorgu periyodunu göstermektedir. Benzer şekilde sağdaki grafikler de 100 düğümlü bir sistem içindir. Görüldüğü gibi sorgu periyotları 50 ve 100 düğümlü sistemler için yaklaşık olarak sırasıyla



Şekil 7. NS-3 benzetim sonuçları -1. Sol taraf N=50 için, sağ taraf N=100 için hesaplanmıştır.

200 ms ve 100 ms olarak otomatik olarak belirlenmektedir.

Şekil (8)'de sonuçları görülen diğer benzetimde kapalı döngü kontrol sistemi çalıştırılmamış, sorgu aralığı sabit 0.5 saniye olarak verilmiştir. Kanal kullanım oranı üzerinde herhangi bir ayarlama olmadığından bu oran benzetimde yaratılan iş yüküne bağlı olarak şekillenmiştir. Diğer yandan, önemli sayıda paketin zaman sınırlarından önce hedefe ulaştırılamadığı gözlenmektedir.

Şekil (9)'da sonuçları görülen son benzetimdeyse kapalı döngü kontrol sistemi çalıştırılarak sorgu aralığı dinamik olarak ayarlanmıştır. Bu benzetimde Çizelge 3'te verilen değerlere göre, iş yükü için 0 ile 50. saniye arası $\beta = \beta_1$, 50. saniye ile 100. saniye arası $\beta = \beta_2$, 100. saniye ile 150. saniye arası $\beta = \beta_3$ olarak belirlenmiştir. Böylelikle 50. ve 100. saniyelerde iş yükünde adım değişikliği uygulanmıştır ve her adımda iletişim yükü biraz daha artırılmıştır. Bu benzetim sonuçlarına göre, kanal kullanım oranını istenen seviye olan 0.7'de tutabilmek amacıyla sistem sorgu aralığının değiştirildiği grafikten gözlenmektedir. Gerçek zaman koşulunun sağlanamadığı tek yer yaklaşık 130. saniye civarında olmuştur. Bu noktada 1 paketin zaman sınırı aşılmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada 802.11 kablosuz ağlar için bir gerçek zamanlı iletişim protokolü tasarlanmıştır. Protokol daha yüksek performans için UDP/IP tabanlı önerilmektedir. Değişken trafik yüklerinde sistemin istenen performansı sağlayabilmesi için uyarlamacı bir yaklaşım düşünülmüş, sorgulama sıklığının otomatik olarak ayarlanmasını sağlayan bir geribeslemeli kontrol döngüsü tasarlanmıştır. Geribeslemeli sistemin kararlılığı matematiksel olarak analiz edilmiştir ve kararlılık için gerekli koşullar hesaplanmıştır. Sistemin çalışması ve başarısı benzetimlerle

gösterilmiştir. Tasarlanan bu protokol, gerçek zamanlı iletişimin gerekli olduğu kablosuz ağlarda kolaylıkla uygulanabilir.

Kaynakça

[1] Cunningham R., Cahill V. 2002. Time bounded medium Access control for ad hoc networks, ss. 1-8. Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing

[2] Danilo Tardioli, Luis Villarroel, Grupo De Rob, Instituto De Investigaci. 2007. Real Time Communications over 802.11. s. 1–11. IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems.

[3] Hermann Kopetz. 2011. Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. 2. Basım. Springer Verlag.

[4] Joao L. Sobrinho, a. S. Krishnakumar. 1996. Real-time traffic over the IEEE 802.11 medium access control layer, Bell Labs Technical Journal. Cilt 1(2), ss. 172-187.

[5] Heusse M., Starzetz P., Rousseau F., Sabbatel G.B., ve Duda A.. 2003. Scheduling Time-sensitive Traffic on 802.11 Wireless LANs, Lecture Notes in Computer Science. Cilt. 2811, ss. 162-171.

[6] Feng H., Shu Y.. 2008. Performance Analysis of Real-Time Traffic In wireless lans. Second UKSIM European Symposium on Computer Modeling and Simulation, s. 1013-1016.

[7] Zhu R., Yang Y. 2006. Adaptive Scheme to Support Real-time Traffic in IEEE 802.11 Wireless LANs. 8th International Conference on Signal Processing (Volume 3).

[8] Moraes R., Portugal P., Vitturi S., Vasques F., ve Souto P.F.. 2007. Real-Time Communication in IEEE 802.11 Networks: Timing Analysis and a Ring Management Scheme for the VTPCSMA Architecture. 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007), ss. 107-116.

[9] Moraes, R., Vasques, F., Portugal, P., Fonseca, J.A. 2006. Real-Time Communication in 802.11 Networks: The Virtual Token Passing VTPCSMA Approach. 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, ss. 389-396.

[10] Boggia G., Camarda P., Grieco L.A., ve Mascolo S. 2007. Feedback-based control for providing real-time services with the 802.11e MAC, IEEE/ACM Transactions on Networking. Cilt. 15(2), ss. 323-333.

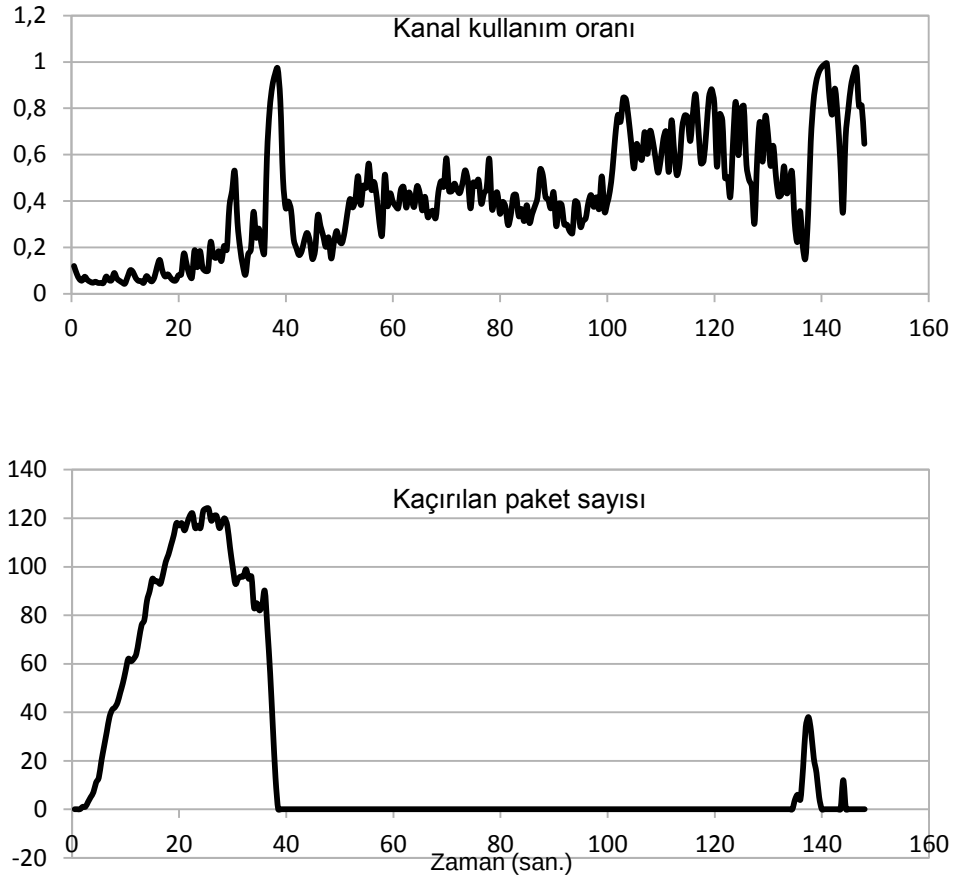
[11] Trsek H., Schwalowsky S., Czybik B., ve Jasperneite J. 2011. Implementation of an advanced IEEE 802.11 WLAN AP for real-time wireless communications. IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), s. 1–4.

[12] Zurawski R. 2004. "RTP, RTCP and RTSP protocols". The industrial information technology handbook. CRC Press.

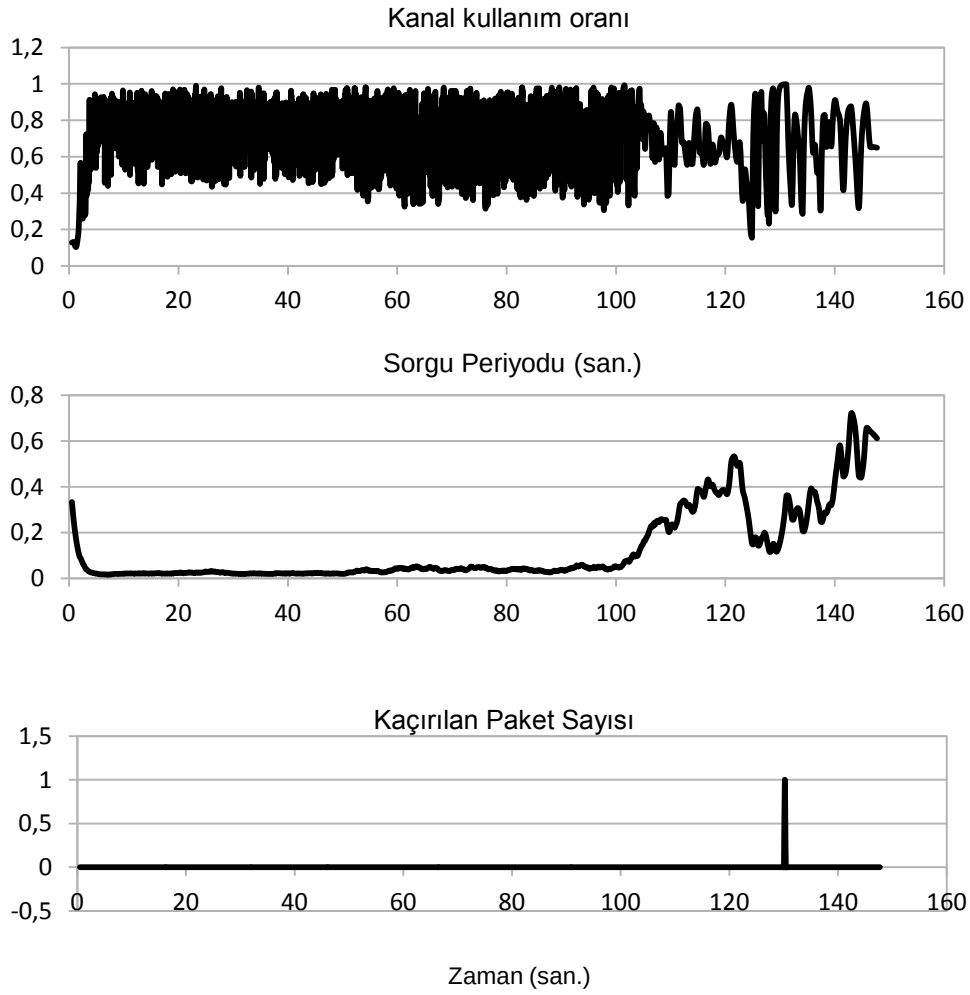
[13] Brun, A., Chunhui Guo, Shangping Ren. 2015. A Note on the EDF Preemption Behavior in “Rate Monotonic Versus EDF: Judgment Day”, Embedded Systems Letters, IEEE. Cilt. 7 (03), ss. 89 – 91.

[14] Gene F. Franklin, David J. Powell, ve Abbas Emami-Naeini. 2001. Feedback Control of Dynamic Systems (4. Basım). Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.

[15] NS-3 Discrete-event Network Simulator: https://www.nsnam.org/. (Erişim Tarihi: 30.11.2016.



Şekil 8. NS-3 benzetim sonuçları - 2.



Şekil 9. NS-3 benzetim sonuçları - 3.