



Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETs

Muhammet Ali Karabulut¹, A. F. M. Shahen Shah², Hacı İlhan^{1*}

¹Department of Electronics and Communication Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, 34220, Turkey

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Istanbul Gelisim University, Istanbul, 34310, Turkey

Highlights:

- CSMA/CA and RTS/CTS based MAC protocol for VANETs
- Markov chain model based analytical analysis
- Throughput, packet dropping rate (PDR) and delay analysis

Keywords:

- CSMA/CA
- IEEE 802.11
- MAC
- RTS/CTS
- VANETs

Article Info:

Research Article
Received: 14.03.2019
Accepted: 26.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.539985

Acknowledgement:

This work is supported by the Scientific Research Projects Coordinators of Yıldız Technical University under Project FDK-2018-3405 and Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Project 118E701.

Correspondence:

Author: Hacı İlhan
e-mail: ilhanh@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 5913

Graphical/Tabular Abstract

In IEEE 802.11, distributed coordination function (DCF) is the fundamental access technique, which employs a carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) mechanism to access the medium. In addition, request to send (RTS)/ clear to send (CTS) mechanism is used to overcome hidden vehicular nodes problem. In the figure A, CSMA/CA mechanism in (a) and RTS/CTS mechanism in (b) are shown.

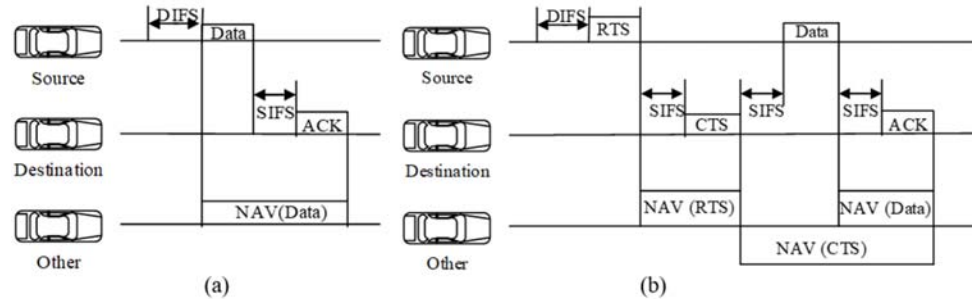


Figure A. CSMA/CA mechanism (a) and RTS/CTS mechanism (b)

Purpose: In this paper, an analytical model is developed to evaluate the performance of the IEEE 802.11 MAC for VANETs. Markov chain model based analytical analysis is presented to investigate the performance.

Theory and Methods:

The algorithm of CSMA/CA and RTS/CTS mechanism are presented. An analytical model based on Markov chain is developed to scrutinize the performance of IEEE 802.11 MAC Protocol for VANETs. Relationship among performance metrics and the IEEE 802.11 MAC parameters, such as the contention window, retransmission limit, number of vehicles, velocity of vehicles, etc. are provided. Successful transmission probability, collision probability, throughput, PDR and delay expressions are derived. Numerical results are demonstrated to verify the accuracy of the analytical model and to investigate the IEEE 802.11 DCF performance in VANETs. Comparison between CSMA/CA and RTS/CTS access mechanisms is presented.

Results:

When the number of vehicles increases, throughput increases until a point then starts to decrease because more collisions will occur due to contention in the channel for the transmission of packet. When the number of vehicles is high, the RTS/CTS access technique is more successful than the CSMA/CA technique because it helps to solve the hidden node problem. Throughput decreases with the increment of vehicles velocity because topology changes rapidly which makes communication unstable. The reliability of data transmission depends on PDR which depends on successful transmission probability and maximum retransmission limit. If the PDR is low, the reliability of the transmission is high. Delay increases with increase of the number of vehicles because more packets will contend to transmit which will increase the probability of channel busy and collision.

Conclusion:

In this paper, we modeled and analyzed the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETs. We considered both CSMA/CA and RTS/CTS access mechanisms. The algorithm of both access mechanisms are provided. Markov chain model based analytical analysis and numerical results are presented. Mobility is the key characteristics of VANETs, which is considered. To improve the communication quality, throughput should be increased and delay should be decreased; and PDR should be increased to increase the reliability of communication which can be achieved by increasing successful transmission probability, and decreasing channel busy probability and collision probability. Future studies include optimization and details performance analysis under channel fading and capture effect.



IEEE 802.11 MAC Protokolünün VANET ağlardaki performans modellemesi ve analizi

Muhammet Ali Karabulut¹ , A. F. M. Shahen Shah² , Hacı İlhan^{1*} 

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34220, Türkiye

²İstanbul Gelişim Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34310, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- VANET ağlar için CSMA/CA ve RTS/CTS tabanlı MAC protokolü
- Markov zincir modeli tabanlı analitik analiz
- Veri hızı, paket bırakma oranı (PDR) ve gecikme analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.03.2019

Kabul: 26.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.539985

Anahtar Kelimeler:

CSMA/CA,
IEEE 802.11,
MAC,
Markov zincir modeli,
RTS/CTS,
VANETS

ÖZET

IEEE 802.11 standardı, araçsal tasarsız ağlar (Vehicular Ad Hoc Networks, VANETs) için ortam erişim kontrolü (Medium Access Control, MAC) ve fiziksel (PHY) katmanının özelliklerini tanımlamaktadır. IEEE 802.11 standardında, dağıtılmış koordinasyon işlevi (Distributed Coordination Function, DCF) MAC katmanında kullanılan bir tekniktir. DCF, ortama erişmek için çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı duyarlı çoklu erişim (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) tekniğini kullanmaktadır. Ayrıca, gönderim isteği (Request To Send, RTS)/ gönderime uygun (Clear To Send, CTS) mekanizması gizli araç düğümleri problemlerinin üstesinden gelmek için kullanılır. CSMA/CA ve RTS/CTS mekanizmalarının algoritmaları sunulmuştur. Markov zincir modeline dayalı analitik analiz, performansı araştırmak için sunulmuştur. Araç hızı, araç yoğunluğu, çekişme penceresi (Contention Window) ve yeniden iletim limiti (Maximum Retransmission Limit) gibi performansı etkileyebilecek parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Performans ölçüleri ve parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Veri hızı, paket bırakma oranı (Packet Dropping Rate, PDR) ve gecikme ifadeleri elde edilmiştir. Ayrıca, benzetim sonuçları ile performans analizi doğrulanmıştır. CSMA/CA ve RTS/CTS mekanizmalarının karşılaştırılması sunulmuştur.

Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETs

H I G H L I G H T S

- CSMA/CA and RTS/CTS based MAC protocol for VANETs
- Markov chain model based analytical analysis
- Throughput, packet dropping rate (PDR) and delay analysis

Article Info

Research Article

Received: 14.03.2019

Accepted: 26.02.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.539985

Keywords:

CSMA/CA,
IEEE 802.11,
MAC,
Markov chain model,
RTS/CTS,
VANETS

ABSTRACT

The IEEE 802.11 standard defines the specifications of the media access control (MAC) and physical (PHY) layers for vehicular ad hoc networks (VANETs). In IEEE 802.11, distributed coordination function (DCF) is the fundamental access technique, which employs a carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) mechanism to access the medium. In addition, request to send (RTS)/ clear to send (CTS) mechanism is used to overcome hidden vehicular nodes problem. In this paper, an analytical model is developed to evaluate the performance of the IEEE 802.11 MAC for VANETs. The algorithm of CSMA/CA and RTS/CTS mechanism are presented. Markov chain model based analytical analysis is presented to investigate the performance. Parameters that can influence the performance such as vehicles velocity, vehicle density, contention window size, maximum retransmission limit etc. are considered. The relationship between the performance metrics and parameters are derived. Throughput, packet dropping rate (PDR) and delay expressions are obtained. Moreover, numerical results are demonstrated to verify the analysis. The comparison between CSMA/CA and RTS/CTS access mechanisms is presented.

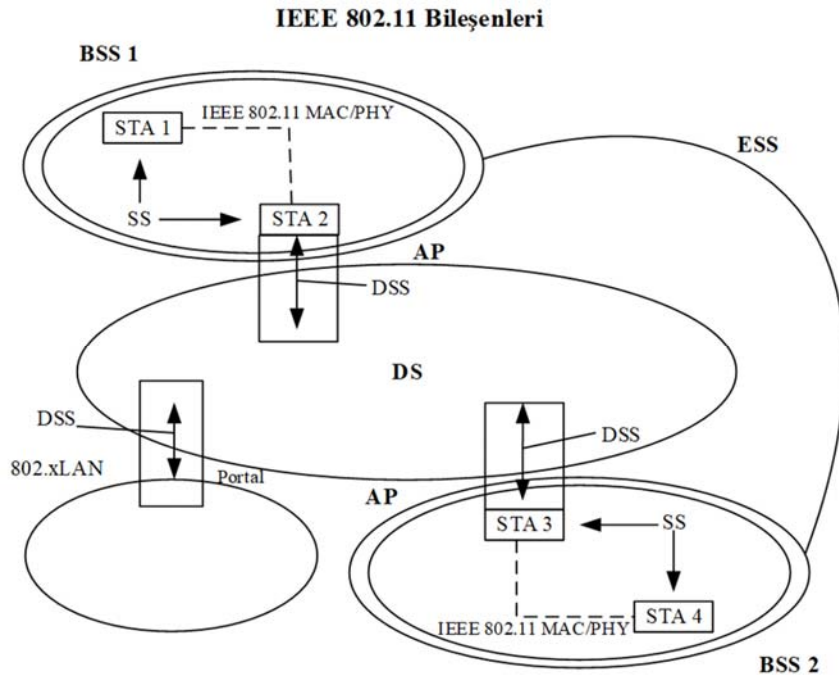
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, VANET ağlardaki akıllı ulaşım sistemlerinin (Intelligent Transportation System, ITS) performansı araştırmacıların büyük oranda ilgisini çekmektedir. ITS, karayolu güvenliğini ve nakliye verimliliğini arttırmaktadır. VANET ağlar araç içi iletişim ile araç ve altyapı arasındaki iletişimi de içermektedir. Yüksek düğüm hareketliliği, VANET ağları diğer geçici ağlardan farklı kılar. Ortam erişim kontrolü (Medium Access Control, MAC) katmanı, VANET ağların performans kriterlerini karşılayan en önemli katmandır. Araç ağları için MAC ve fiziksel (PHY) katmanların teknik gereksinimleri IEEE 802.11 standardında [1] ve verimli çok kanallı çalışma için IEEE 1609.4-2016 standardında [2] tanımlanmıştır. Ford, Google, Mercedes-Benz, Tesla ve Uber gibi firmalar, 2021'de Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD) insansız otomobiller ve kamyonların yollarda olacaklarını ifade etmişlerdir [3]. VANET ağlar, bu insansız araçların iletişiminin gerçek hayatta uygulanmasını sağlar [4]. Bu makaledeki amacımız IEEE 802.11 standardındaki MAC protokolünün VANET ağlardaki performansını analiz edip performans kriterlerinin sistem için yeterli olup olmadığını kontrol etmektir.

IEEE 802.11 standardına göre, dağıtılmış koordinasyon işlevi (Distribution Coordination Function, DCF) protokolü, MAC katmanının temel erişim sürecidir. DCF, ortama çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı duyarlı çoklu erişim (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) tekniği kullanarak ve meşgul bir ortam koşulunu takiben rastgele bir geri sayım süresine erişim hakkı verir. Kablosuz yerel alan ağlarında (Local Area Network, LAN),

çarpışma tespit mekanizması olarak CSMA/CA tekniği geliştirilmiştir. CSMA/CA tekniği, bir istasyonun iletme yetiyle ilgili kararını belirlemek için radyo istasyonunu bir *konuşmadan önce dinle* sistemi uygular. Ayrıca, CSMA/CA tekniği bir paketin başarılı bir şekilde alınmasını sağlamak için hemen olumlu bir onaylama sistemi kullanmaktadır. Burada alıcı istasyon, kısa bir zaman aralığından sonra aldığı bilgisinin iletimini başlatır. Alındı bildirimi alınmazsa, veri paketinin kaybolduğu kabul edilir ve yeniden iletim planlanır. Şekil 1'de IEEE 802.11 mimarisi verilmektedir. Burada kablosuz ortam, dağıtım sistemi (Distributed System, DS), erişim noktası (Access Point, AP) ve istasyonlar (Stations, STAs) olmak üzere 4 temel fiziksel eleman içermektedir. Bu önerilen çalışmada istasyonlar araç olarak kabul edilecektir. IEEE 802.11 standartlarında DS uygulamalarının ayrıntıları belirtilmez ve bunun yerine, servis hizmetleri belirtilir. Bu hizmetler, mimarinin farklı bileşenleri ile ilişkilidir. IEEE 802.11 standardındaki servisin iki kategorisi vardır: istasyon servisi (Station Service, SS) ve dağıtım sistemi servisi (Distributed System Service, DSS). Her iki hizmet kategorisi de IEEE 802.11 standardındaki MAC alt katmanı tarafından kullanılır. DS, genişletilmiş servis seti (Extended Service Set, ESS) oluşturmak için, LAN ile temel servis setini (Basic Service Set, BSS) birleştirir. STA birimleri ise IEEE 802.11 standardındaki MAC ve PHY katmanlarını kullanarak, kablosuz olarak haberleşebilen cihazlardır [5]. Bu konudaki ayrıntılı literatür araştırması aşağıdaki gibi verilebilir.

IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performans analizi [6]'da verilmiş ve burada sadece veri hızı analizi yapıp gecikme analizi ele alınmamıştır. [7, 8] nolu



Şekil 1. IEEE 802.11 mimarisi (IEEE 802.11 architecture)

çalışmalarda yazarlar VANET ağlar için IEEE 802.11p standardı altında geliştirilmiş dağıtılmış kanal erişiminin (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA) etkinliği sunulmuştur. EDCA, hizmet kalitesini (Quality of Service, QoS) sağlamak için kullanılır. VANET ağlar için IEEE 802.11 standardında EDCA etkinliğini, Markov zincir modeline dayalı analitik çalışma yoluyla elde edilerek benzetim sonuçları [9]'da sunmuşlardır. [10]'da, kısa menzilli haberleşme (Dedicated Short-Range Communications, DSRC) için MAC protokolünün kapasitesi incelenmiş ve IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün MAC katmanı için yeni bir model geliştirilmiştir. [10]'da eksiklik olarak yazarların yeniden iletim mekanizmasını dikkate almadıkları ve veri hızı analizini yapmadıkları görülmektedir. Yazarlar, [11]'de, düğüm nodu, komşu dağılımı, küme numarası ve bağlantı süresini hesaba katarak bir otoyol senaryosu için VANET ağlarının topoloji özelliklerini zaman ve mekân açısından analiz etmişlerdir. Çok hareketli araç ağlarında IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün etkinliği [12]'de incelenmiş ve burada, yazarlar gecikme analizini dikkate almadan, sadece veri hızı analizini incelemişlerdir. [13]'te yazarlar, VANET ağlarında hareketliliğin artması durumunda MAC katmanı optimizasyonunu incelemişlerdir. Ancak yazarlar [13]'te sadece veri hızını inceleyip gecikme analizini dikkate almamışlardır. IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansı, çekişme penceresine bağlı olduğu [14-16] nolu çalışmalarda görülmektedir. [14]'de, yazarlar VANET ağlarında kontrol kanalı üzerindeki periyodik yayın için analitik bir Markov modeli önermişlerdir. [15]'te çekişme penceresinin veri hızını nasıl etkilediği incelenmiştir. Ancak, [15]'te, gecikme ve hız analizi incelenmemiştir. [16]'da, geri sayım parametreleri, çekişme seviyesi ve kanal bit hata oranı (Bit Error Rate, BER) arasındaki ilişkiyi tanımlamak için, istasyonun kanal durumunun zamana bağlı ölçümüne dayanarak çekişme penceresi uzunluğunu ayarlayabilmesini sağlayan bir çekişme penceresi optimizasyonu algoritması önerilmiştir. [17]'de yazarlar, araç ortamlarında güvenli olmayan uygulamaların performansını artırmak için yeni bir veri hızına duyarlı MAC protokolü önermişlerdir. [18]'de yazarlar, çeşitli protokol türleri DCF ve EDCA gibi çekişme içermeyen ve doymuş kanal koşulları altında çekişme tabanlı iletimin performansını incelemişlerdir. [19]'da, yazarlar IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün doymamış durumdaki etkinliğini araştırmışlardır. [20]'de [19]'a ek olarak veri hızı gecikme analizi incelenmiştir. Ancak burada erişim mekanizmaları açıklanıp karşılaştırılmamıştır. IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansını etkileyebilecek tüm önemli unsurları göz önüne alarak, VANET ağlar için IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün daha doğru performans analizini modellemek gerekir. Hareketliliğin sürekli olması VANET ağların temel özelliklerinden biri olduğundan, performans modellemesinde araç düğümünün hareketliliği dikkate alınmalıdır. Ayrıca, türetilmiş performans modeli ve analizi düşük karmaşıklıkla doğru olmalıdır. Bu makalenin literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Farklı hareketlilik koşulları altında tek noktaya (unicast) yayın

yapan VANET ağlar için IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansını incelemek için sistematik bir model sunulmuştur. Markov zincir modeline dayalı analitik bir model sunulmuştur. VANET ağların performansını etkileyebilecek parametrelerden başarılı iletim olasılığı (successful transmission probability), çarpışma olasılığı (collision probability), veri hızı (throughput), paket bırakma oranı (packet dropping rate, PDR), gecikme ve çekişme penceresi (contention window) ile performans ölçütleri arasındaki ilişki elde edilmiştir.

Araç hızı, araç yoğunluğu, iletim aralığı, çekişme penceresi ve yeniden iletim limiti arasındaki ilişki sunulmuştur. Ayrıca elde edilen performans modeli benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır.

IEEE 802.11 standardı için gönderim isteği/gönderime uygun tekniği (Request To Send, RTS/ Clear To Send, CTS) ve CSMA/CA erişim mekanizmaları karşılaştırılmıştır.

Bu makalede, [6]'da ele alınmayan Markov zincir modeline dayalı sistemde kanalın meşgul olması durumunda zamanlayıcı durdurma mekanizması incelenmiştir. [6-8]'de hareketliliğin dikkate alınmadığı durumlarda [1]'de verilen IEEE 802.11 protokolünün performansı araştırılmıştır. Bu makalede bu çalışmalardan farklı olarak araçların hareketli olduğu durumlar incelenmiş ve RTS/CTS ve CSMA/CA karşılaştırılması ele alınmıştır. [8-12]'de hareketli araç düğümleri üzerinde durulmuştur ancak erişim teknikleri karşılaştırılmamıştır. [14-17]'de çekişme penceresi uzunluğunun sistem performansı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gecikme analizi, PDR ve araç hareketliliği incelenmemiştir. Bu makalede araç hızı, gecikme analizi ve PDR farklı erişim teknikleri ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

Bu makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır. Bölüm II, sistem modeli ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Veri hızı ve PDR analizi, Bölüm III'te verilmiştir. Gecikme analizi, Bölüm IV'te incelenmiş ve Benzetim sonuçları ve tartışmalar, Bölüm V'de ortaya konmuştur. Son olarak, Bölüm VI'da sonuçlar üzerinde durulmuştur.

2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

2.1. IEEE 802.11 Standardı DCF Protokolü (IEEE 802.11 DCF Protocol)

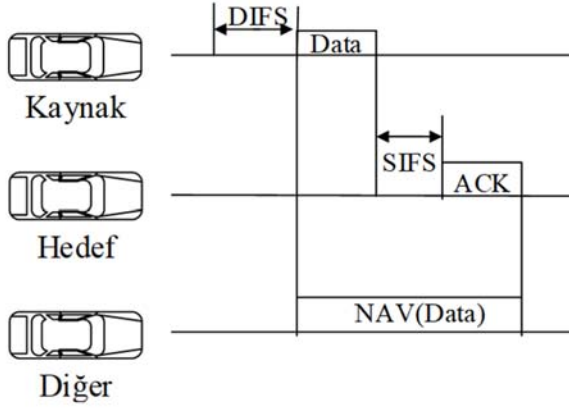
IEEE 802.11 standardındaki MAC [1] protokolü, birden fazla istasyonun ortak bir kanala erişimini koordine etmek için kullanılır. IEEE 802.11 standardındaki MAC mimarisi iki erişim yöntemi içerir: DCF adı verilen temel bir erişim yöntemi ve nokta koordinasyon işlevi (Point Coordination Function, PCF) olarak adlandırılan isteğe bağlı bir erişim yöntemi. PCF, kanal erişimini kontrol etmek için bir erişim önceliği mekanizması tarafından desteklenen sanal bir taşıyıcı algı mekanizması kullanan, yoklama tabanlı bir erişim yöntemidir. Erişim noktasına ve erişim noktasından çekişmesiz bir çerçeve teslimatı sağlar, ancak kanal erişimini

yönetmek için bir erişim noktasına ihtiyaç duyduğundan, yalnızca altyapı ağı yapılandırmalarını destekler. Ancak, DCF, her bir istasyonun herhangi bir altyapı desteği olmadan iletimi başlatabildiği rastgele bir erişim yöntemi kullanan çekişmeli bir erişim yöntemidir. Böylece, bu yöntem hem altyapı tipi kablosuz yerel ağı (Wireless LAN, WLAN) hem de geçici kablosuz ağları destekleyebilir.

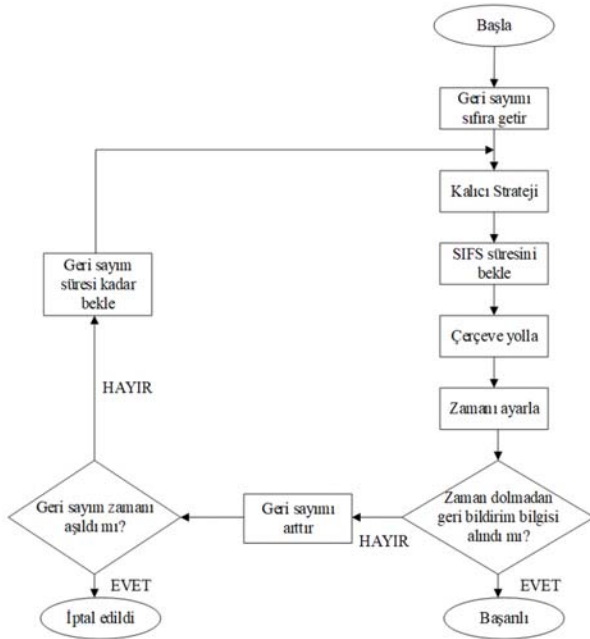
2.1.1. Çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı duyarlı çoklu erişim tekniği

(Carrier sense multiple access with collision avoidance, csma/ca technique)

IEEE 802.11 standardındaki MAC katmanının temel erişim yöntemi, CSMA/CA tekniği olarak bilinen bir çeşit DCF protokolüdür. Kablosuz ağlarda CSMA/CA tekniği kullanılır çünkü çarpışmayı algılayamazlar, böylece tek çözüm çarpışmadan kaçınmadır. CSMA/CA tekniği, aşağıda verilen yöntemleri kullanarak çarpışmaları önler.



Şekil 2. CSMA/CA tekniği (CSMA/CA technique)



Şekil 3. CSMA/CA akış diyagramı (CSMA/CA flow chart)

• Dahili çerçeve mesafesi

Kanal boşta bulunduğunda, araç düğümü hemen iletimi gerçekleştirmez. Dahili çerçeve mesafesi (Inter-Frame Space, IFS) denilen bir süre bekler. Kanalin boşta olduğu algılandığında, aynı uzaklıktaki araç daha önce yayın yapmaya başlamış olabilir ve bu uzak aracın işareti henüz başka araçlara ulaşmamış olabilir. Dolayısıyla, IFS zamanının amacı, bu iletilen işaretin diğer istasyonlara ulaşmasına izin vermektir. Eğer bu IFS süresinden sonra, kanal hala boştaysa, araç bilgisini gönderebilir, ancak yine de çekişme penceresine eşit bir süre beklemek zorundadır. IFS değişkeni, bir aracın veya bir çerçevenin önceliğini tanımlamak için de kullanılabilir.

• Çekişme penceresi

Çekişme penceresi, dilimlere ayrılabilen bir süreçtir. Bilgi iletmeye hazır olan bir araç bekleme süresi için çekişme penceresindeki bir dilimi rastgele seçer. Penceredeki dilim sayısı, ikili üstel geri çekme stratejisine göre değişir. Bu durum, ilk kez bir zaman dilimi ayarlandığı ve daha sonra aracın IFS süresinden sonra boş bir kanalı algılayamadığı her zaman ikiye katlandığı anlamına gelir. Bu, rastlantısal bir sonucun bekleme istasyonu tarafından alınan zaman dilimi sayısını tanımlaması haricinde, kalıcı yöntemle çok benzerdir. Çekişme penceresinde, aracın her zaman diliminden sonra kanalı algılaması gerekir. Araç kanalı meşgul bulursa, işlemi tekrar başlatmaz. Sadece zamanlayıcıyı durdurur ve kanal boşta olduğunu algılayınca yeniden başlatır.

• Alındı bilgisi

Tüm önlemlere rağmen, çarpışmalar meydana gelebilir ve veriler yok olabilir. Alındı bilgisi ve zaman aşımı zamanlayıcısı, alıcının çerçeveyi aldığını garantilemeye yardımcı olabilir.

DCF'in içerdiği iki erişim tekniğinden biri olan CSMA/CA, Şekil 2'de gösterilmektedir. DCF dahili çerçeve mesafesi (DCF Inter-Frame Space, DIFS) süresini bekledikten ve geri sayım prosedürünü tamamladıktan sonra kaynak, hedefe veri gönderir. Hedef, kısa dahili çerçeve mesafesi (Short Inter-Frame Space, SIFS) süresini bekler ve daha sonra kanalın meşgul ya da boş duruma bakılmaksızın bu başarılı iletimi onaylamak için bir alındı bilgisi (Acknowledgment, ACK) çerçevesi ile yanıt verir. Kaynak düğümü ile hedef düğümü iletişim durumunda iken kullanılan kanal bloke edilir ve diğer düğümlerin erişimine kapatılır. Şekil 3'te CSMA/CA tekniğinin akış diyagramı verilmektedir. Ayrıca Tablo 1'de CSMA/CA tekniğinin algoritması gösterilmektedir. Algoritmada, CH , CH_i sırasıyla kanalı ve kanalın boşta olduğunu ifade etmektedir. T_{wait} , T_{DIFS} ve T_{SIFS} sırasıyla bekleme süresi, DIFS ve SIFS sürelerinin temsil etmektedir. U_{ACK} ise başarıyla alınan ACK setini göstermektedir. Burada, m_r son geri sayım aşaması olan maksimum yeniden iletim limitini ifade etmektedir. CP_{min} çekişme penceresinin minimum değerini ifade etmektedir.

2.1.2. Gönderim isteği/gönderime uygun tekniği (Request to send/clear to send, RTS/CTS)

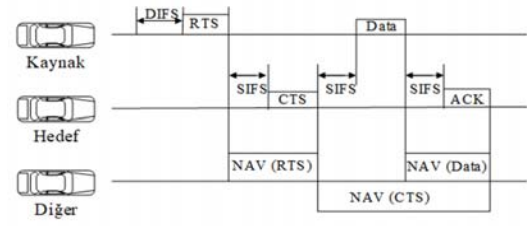
DCF'in içerdiği diğer bir erişim tekniği olan RTS/CTS mekanizması Şekil 4'te gösterilmektedir. Bir DIFS süresi bekledikten ve geri sayım prosedürünü tamamladıktan sonra, kaynak düğüm, kanalı ayırmak için bir RTS çerçevesi gönderir. Hedef düğüm RTS çerçevesini aldıktan sonra, bir SIFS süresi bekler ve kaynağa bir CTS çerçevesiyle cevap verir. Kaynak düğüm, CTS çerçevesini tespit eder ve bir SIFS süresi kadar bekler ve ardından bir veri çerçevesi gönderir. Hedef veriyi doğru alması durumunda, kendisine gönderilen iletimi onaylamak için bir ACK çerçevesi ile yanıt verir. RTS veya CTS çerçevelerini algılayan diğer herhangi bir istasyon, ağ tahsis vektörünü (Network Allocation Vector, NAV), ACK çerçevesinin sonuna kadar iletim işlemini erteleyecek şekilde ayarlar. Şekil 5'te RTS/CTS tekniğinin akış diyagramı verilmektedir. Tablo 2'de RTS/CTS tekniğinin algoritması gösterilmektedir.

Tablo 1. CSMA/CA algoritması (CSMA/CA algorithm)

1. if $CH=CH_i$
2. $T_{wait}=T_{DIFS}$ still $CH=CH_i$
3. yolla Data
4. end
5. if $T_{wait}>T_{DIFS}$
6. bekle $CH_i=T_{DIFS}$
7. geri sayım_i= ζP_{min}
8. if $CH=CH_i$ her bir zaman diliminde
9. geri sayım_i = geri sayım_i-1,
10. else geri sayım_i = geri sayım_i
11. end
12. end
13. if geri sayım_i = 0
14. yolla Data, $T_{wait}=T_{SIFS}$
15. if $ACK \in U_{ACK}$
16. end
17. end
18. if $m_r=m_r+1$
19. geri sayım_i = $2*\zeta P_{min}$
20. if geri sayım_i = 0
21. Data
22. end
23. end
24. if $m_r=m_{rmax}$, $m_{rmax}=2m_r*\zeta P_{min}$
25. iletim iptal
26. end

2.2. Markov Zincir Modeli (Markov Chain Model)

Önerilen sistem modelinde araçların yolda rastgele dağıldığı, çok şeritli bir yol üzerinde hareket ettiği ve ayrıca çalışılan ağın N araçtan oluştuğu kabul edilmektedir. Burada ele alınan araç düğümleri Şekil 6'daki istasyona (Station, STA) karşılık gelmektedir. Kullanılan ağdaki kaynak araç düğümü ile hedef araç düğümü arasındaki haberleşme ağını Markov zincir modeli ile modelleyebiliriz. Bu modelde, $b(t)$ ve $s(t)$ sırasıyla geri sayım (backoff) zaman sayacı ve aşaması olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4. RTS/CTS tekniği (RTS/CTS technique)

Şekil 6'da, geri sayım mekanizmasını açıklamak için oluşturulan ayrık zamanlı iki boyutlu (2D) Markov zincir modeli sunulmaktadır. Ele alınan Markov zincirinde, k geri sayım sayaç değerini temsil eder. Başlangıçta k değeri $[0, \zeta P_0 - 1]$ arasındaki bir değer almır. Kanalı boş olduğu algılandığında, k değeri 1 azaltılır. Kanal meşgul olduğunda, kanal o anki değerinde sabit kalır ve kanalı boş olduğu algılanırsa yeniden 1 azaltılır. k sıfır değerine geldikten sonra paket gönderilir. Ele alınan Markov zincirinde görülen tek aşamalı olasılık ifadeleri şöyledir [6]:

Tablo 2. RTS/CTS algoritması (RTS/CTS algorithm)

1. if $CH=CH_i$
2. $T_{wait}=T_{DIFS}$ still $CH=CH_i$
3. yolla DATA
4. end
5. if $T_{wait}>T_{DIFS}$
6. bekle $CH_i=T_{DIFS}$
7. geri sayım_i= ζP_{min}
8. if $CH=CH_i$ her bir zaman diliminde
9. geri sayım_i = geri sayım_i-1,
10. else geri sayım_i = geri sayım_i
11. end
12. end
13. if geri sayım_i = 0
14. yolla RTS, $T_{wait}=T_{SIFS}$, al CTS, $T_{wait}=T_{SIFS}$, DATA, $T_{wait}=T_{SIFS}$
15. if $ACK \in U_{ACK}$
16. end
17. end
18. if $m_r=m_r+1$
19. geri sayım_i = $2*\zeta P_{min}$
20. if geri sayım_i = 0
21. DATA
22. end
23. end
24. if $m_r=m_{rmax}$, $m_{rmax}=2m_r*\zeta P_{min}$
25. iletim iptal
26. end

$$P\{i, k | i, k+1\} = 1 - P_{km}; [i \in (0, m_r), k \in (0, \zeta P_i - 2)]. \quad (1)$$

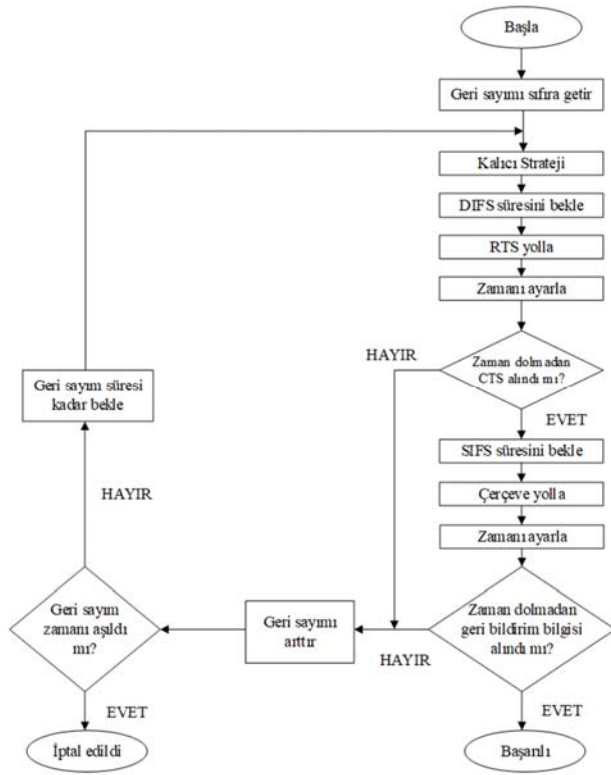
Eş. 1'deki ilk ifade, kanalı meşgul olmadığında, her zaman diliminin başlangıcında geri sayım süresinin azaltılacağı ifade eder. İkinci ifade, paketin geri sayım aşaması 0 olduğunda gönderileceğini ve daha sonra $(0, \zeta P_0 - 1)$ 'nin aralıklarında bir değere geri sayım yapıldığını belirtir ve Eş. 2'deki gibi ifade edilir:

$$P\{0, k | i, 0\} = (1 - P_{\text{car}}) / \zeta P_0; \quad (2)$$

$$[i \in (0, m_r), k \in (0, \zeta P_0 - 1)].$$

Çekişme penceresi olarak adlandırılan ζP değeri, iletilmeyen iletim sayısına bağlıdır. Minimum çekişme penceresi (ζP_{\min}) ilk iletimde P_{car} olasılık değeri ile ifade edilir. Hatalı bir iletim meydana geldiğinde, P_{car} ikiye katlanır ve maksimum çekişme penceresi olarak adlandırılır ($\zeta P_{\max} = 2^{m_r} \zeta P_{\min}$). m_r , 0 ile 9 arasında değer alabilmektedir [6].

$$P\{i, k | i-1, 0\} = P_{\text{car}} / \zeta P_i; [i \in (1, m_r), k \in (0, \zeta P_i - 1)]. \quad (3)$$



Şekil 5. RTS/CTS akış diyagramı (RTS/CTS flow chart)

Üçüncü eşitlik (Eş. 3) çarpışmanın gerçekleştiğini ve geri sayım aşamasının 1 yükseldiğini belirtir.

$$P\{m_r, k | m_r, 0\} = P_{\text{car}} / \zeta P_m; [k \in (0, \zeta P_m - 1)]. \quad (4)$$

Dördüncü ifade (Eş. 4) ise m_r 'nin maksimum değere ulaştıktan sonra geri sayım aşamasının arttırılamayacağını ifade eder. $\zeta P_i = 2^i \zeta P$ ifadesi geri sayım aşamasını temsil eder ($i \in (0, m_r)$). Bu makalede $m_r = 7$ alınmıştır. P_{car} ve P_{km} sırasıyla çarpışma ve kanalın meşgul olma olasılıklarıdır.

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, (i \in (0, m_r), k \in (0, \zeta P_0 - 1))$$

zincirin sabit dağılımıdır. Kaynak düğüm ile hedef düğüm iletişime geçtiği ilk anda yani Markov zincir modelinde backoff zaman sayacı ve aşaması 0 olduğu durumu Eş. 5'deki gibi ifade edilebilir [6]:

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - 2P_{\text{car}})(1 - P_{\text{car}})}{(1 - 2P_{\text{car}})(\zeta P + 1) + P_{\text{car}} \zeta P (1 - (2P_{\text{car}})^{m_r})}. \quad (5)$$

P_i rastgele seçilen bir zaman diliminde bir paketin iletilmesi olasılığı olmak üzere Eş. 6'daki gibi ifade edilebilir:

$$P_i = \sum_{i=0}^{m_r} b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - P_{\text{cek}}} \quad (6)$$

$$= \frac{2(1 - 2P_{\text{car}})}{(1 - 2P_{\text{car}})(\zeta P + 1) + P_{\text{car}} \zeta P (1 - (2P_{\text{car}})^{m_r})}.$$

$P_{\text{car}} = 0$, üstel geri sayım aşamasının dikkate alınması gerekmediğinde P_i , P_{car} 'a bağımlı değildir ve Eş. 6'daki ifade Eş. 7'deki biçimine dönüşür.

$$P_i = \frac{2}{\zeta P + 1} \quad (7)$$

$P_{\text{car}} = 1/2$, alındığında Eş. 8'deki gibi olur.

$$P_i = \frac{2}{1 + \zeta P + m_r \zeta P / 2} \quad (8)$$

İletim süresince kalan $N-1$ araç düğümünden en az biri paket gönderdiğinde paket çarpışmaya neden olur ve bu durumda P_{car} ifadesi, Eş. 9'daki biçimine dönüşür.

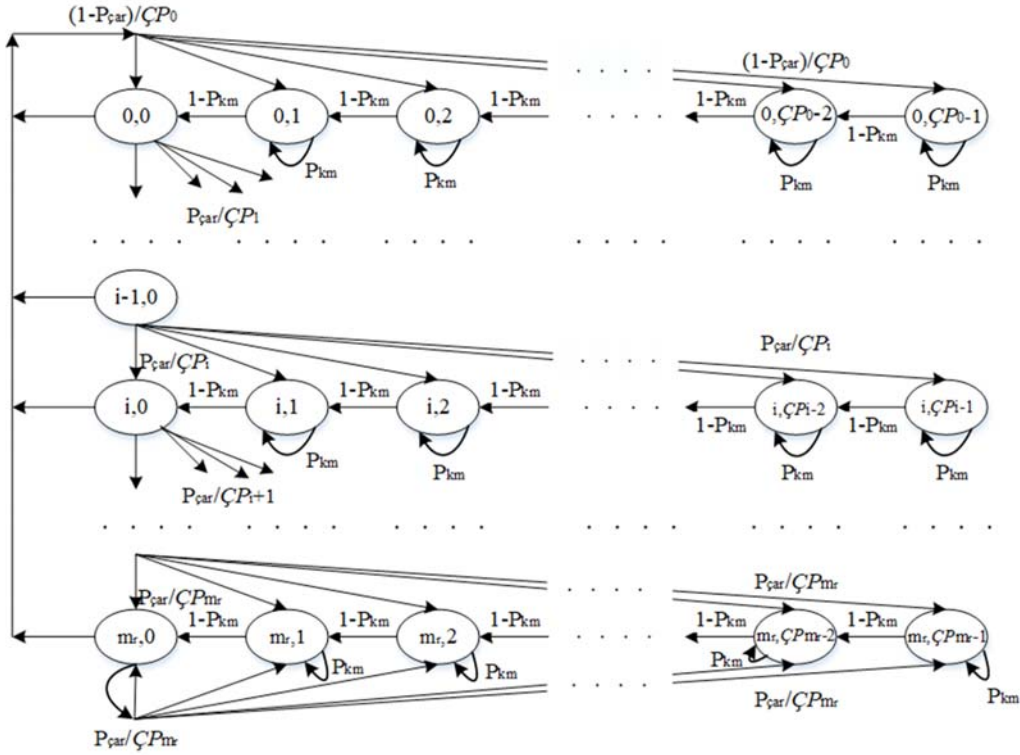
$$P_{\text{car}} = 1 - \left(\frac{\zeta P + m_r \zeta P / 2 - 1}{\zeta P + m_r \zeta P / 2 + 1} \right)^{N-1} \quad (9)$$

N araç düğümünden herhangi biri bir zaman diliminde bir paketi gönderirse, kanal meşgul olacaktır ve bu durumda kanalın meşgul olma olasılığı P_{km}

$$P_{km} = 1 - \left(\frac{\zeta P + m_r \zeta P / 2 - 1}{\zeta P + m_r \zeta P / 2 + 1} \right)^N \quad (10)$$

Eş. 10'daki gibi ifade edilebilir. Gönderilen bir paketin başarıyla teslim alındığı ve başarılı iletim olasılığı P_{bas}

$$P_{bas} = \frac{2N(\zeta P + m_r \zeta P / 2 - 1)^{N-1}}{(\zeta P + m_r \zeta P / 2 + 1)^N - 2^N} \quad (11)$$



Şekil 6. Geri sayım süreç prosedürü için Markov zincir modeli (Markov chain model for backoff procedure)

Eş. 11 biçiminde ifade edilebilir. İletilen paketlerin varış olasılığı, ortalama varış oranı λ_{ort} olan Poisson dağılımı ile ifade edilebilir. Bu dağılımın olasılığı [8]

$$P_p = 1 - e^{-\lambda_{ort} T_m} \quad (12)$$

Eş. 12'deki gibi gösterilir. Burada, T_m bir Markov zincir sürecinde bir araç düğümünün tahmini iletim süresidir ve

$$T_m = (1 - P_{km}) T_{slot} + P_{mk} P_{bas} T_{bas} + P_{km} (1 - P_{bas}) T_{car} \quad (13)$$

Eş. 13'deki gibi hesaplanabilir. T_{slot} zaman dilimi süresidir. Eş. 10'da verilen T_{bas} ve T_{car} sırasıyla başarılı ve çarpışan paket iletiminin zaman süresidir ve bu süreler RTS/CTS mekanizması için sırasıyla Eş. 14 ve Eş 15'deki gibi ifade edilebilir:

$$T_{bas}^{RTS/CTS} = T_{DIFS} + 3T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + \frac{L + L_H}{R} + T_{ACK} + 4T_{gec} \quad (14)$$

$$T_{car}^{RTS/CTS} = T_{DIFS} + T_{RTS} + T_{gec} \quad (15)$$

CSMA/CA için, Eş. 16 ve Eş. 17'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_{bas}^{CSMA/CA} = T_{DIFS} + T_{SIFS} + \frac{L + L_H}{R} + T_{ACK} + T_{gec} \quad (16)$$

$$T_{car}^{CSMA/CA} = T_{DIFS} + \frac{L + L_H}{R} + T_{gec} \quad (17)$$

Bu denklemlerde verilen $T_{DIFS}, T_{SIFS}, T_{RTS}, T_{CTS}, T_{ACK}$ DCF çerçeve aralığı (DCF Inter-Frame Space, DIFS), kısa çerçeve içi aralığı (Short Inter-Frame Space, SIFS), gönderme isteği (Request to Send, RTS), göndermek için hazır (Clear to Send, CTS), alındı bilgisi (Acknowledgement, ACK) süreleridir. L veri uzunluğunu, L_H veri ön ekinin uzunluğunu, R veri iletim hızını ve T_{gec} ise yayılım gecikmesini ifade eder. L en fazla 2304 byte olabilmektedir [1].

λ_{arac} araç düğümlerinin iletim menziline ortalama varış hızı ve araç hızı v olmak üzere birbirlerine doğrusal olarak ilişkilidir ve

$$\lambda_{arac} = y_s t_y v \quad (18)$$

Eş. 18'deki biçiminde gösterilebilir. Eş. 18'de verilen y_s yoldaki şerit sayısını ve t_y trafik yoğunluğunu temsil etmektedir [12]. Trafik yoğunluğu t_y ile ortalama hız v arasındaki ilişki Eş. 19'da verilen eşitlikteki gibidir:

$$t_y = t_a \left(1 - \frac{v}{v_s} \right). \quad (19)$$

Burada, t_a trafik sıklığı yoğunluğunu göstermektedir. v_s serbest akış oranını belirtir. v , v_{\min} ve v_{\max} arasında düzgün dağılıma sahiptir [21].

Araç sayısı, hızı ve iletim menzili M arasındaki ilişki

$$N = \frac{\lambda_{arac} M}{v} \quad (20)$$

Eş. 20 olarak ifade edilebilir. İletim aralığındaki ortalama araç sayısı [22]

$$E[N] = 2\beta M \quad (21)$$

Eş. 21 olarak verilebilir. Burada β araç yoğunluğunu göstermektedir. Belirli bir yol boyunca paket iletim oranı Poisson süreci ile hesaplanabilir. L_r yolun şerit sayısını ifade etmektedir. B_r uzunluklu yol boyunca haberleşen x tane aracın olma olasılığı [21]

$$P(x, B_r) = \frac{(\beta L_r)^x e^{-\beta B_r}}{x!} \quad (22)$$

Eş. 22'deki biçimde gösterilebilir.

3. VERİ HIZI ANALİZİ ve PAKET BIRAKMA ORANI ANALİZİ (THROUGHPUT AND PACKET DROPPING RATE ANALYSIS)

Veri hızı (VH), belirli bir zaman aralığında gönderilen bilgi miktarının hızını ifade etsin. Bu durumda VH ,

$$VH = \frac{E[\text{bir zaman diliminde iletilen bilgi miktarı}]}{E[\text{zaman diliminin uzunluğu}]} \quad (23)$$

Eş. 23'deki biçimde verilebilir. Burada, $E[\cdot]$ beklenen değer operatörünü temsil etmektedir. VH ; başarılı iletim olasılığı, kanalın meşgul olma olasılığı, veri uzunluğu ve bir araç düğümünün tahmini iletim süresi cinsinden

$$VH = \frac{P_{bas} P_{km} L}{T_m} \quad (24)$$

Eş. 24'deki biçimde ifade edilebilir. VH , Eş. 13 ve Eş. 24'deki ifadelerden yararlanarak

$$VH = \frac{P_{bas} P_{km} L}{(1 - P_{km}) T_{slot} + P_{km} P_{bas} T_{bas} + P_{km} (1 - P_{bas}) T_{\text{car}}} \quad (25)$$

Eş. 25'deki biçimde yazılabilir. VH daha kapsamlı olarak Eş. 26'deki gibi ifade edilebilir.

$VH =$

$$\frac{N \left(\frac{(\zeta P + m_r \zeta P / 2 - 1)^2}{2(\zeta P + m_r \zeta P / 2 + 1)} \right)^N \left(\frac{2}{\zeta P + m_r \zeta P / 2 - 1} \right) L}{\left((T_{slot} - T_{\text{car}}) + \frac{2N}{\zeta P + m_r \zeta P / 2 - 1} (T_{bas} - T_{\text{car}}) \right) + T_{\text{car}}} \quad (26)$$

Maksimum yeniden iletim limitinden sonra paket iletilmezse gönderme işleminden vazgeçilerek paket bırakılır. Bu nedenle paket bırakma oranı (PDR)

$$PDR = (1 - P_{bas})^{m_r}, \quad (27)$$

Eş. 27'deki gibi ifade edilir.

4. GECİKME ANALİZİ (DELAY ANALYSIS)

Çerçeve gecikmesi, bir çerçevenin oluşturulması ile başarılı iletimi arasında geçen süre olarak tanımlanır. G çerçevenin gecikmesini temsil eden rastgele değişken, $E[G]$ de bu gecikmenin ortalama değerini göstermektedir. Ortalama çerçeve gecikmesi Eş. 28'deki gibi ifadeyle bulunabilir:

$$E[G] = E[\zeta S_{\text{cer}}] (E[BG] + T_{\text{car}} + T_o) + (E[BG] + T_{bas}). \quad (28)$$

Burada, $E[\zeta S_{\text{cer}}]$ başarılı iletime kadar bir çerçevenin ortalama çarpışma sayısıdır. $E[BG]$ bir kanalın meşgul olma durumunda kanala erişmeden önce seçtiği ortalama geri sayım gecikmesini ve T_o ise kanalın tekrar algılanmasından önce, bir istasyonun çerçeve iletiminin çarpışması durumunda beklemesi gereken süreyi ifade etmektedir. Bir çerçeveyi iletmekten önceki ortalama çarpışma sayısı, bir iletimin başarılı olması olasılığı P_{bas} kullanılarak Eş. 29'deki gibi hesaplanabilir

$$E[\zeta S_{\text{cer}}] = \frac{1}{P_{bas}} - 1. \quad (29)$$

Ortalama geri sayım süresi, sayacın değerine ve istasyonun diğer istasyonlardan iletim algıladığında sayacın donma süresine bağlıdır. Bir istasyon sayacının k durumunda olduğu düşünüldüğünde, sayacın durduğu zaman dikkate alınmaksızın sayacın durumunun 0'a ulaşması için bir k zaman dilimi aralığı gereklidir. Bu zaman aralığı, X rastgele değişkeni ile gösterilir ve ortalaması

$$E[X] = \sum_{i=0}^{m_r} \sum_{k=1}^{CP_i-1} k b_{i,k} \quad (30)$$

Eş. 30 olarak hesaplanır. Daha ayrıntılı olarak

$$E[X] = \frac{b_{0,0}}{6(1 - P_{mk})} \quad (31)$$

$$\frac{\zeta P^2 (1 - P_{\text{car}} - 3P_{\text{car}} (4P_{\text{car}})^{m_r}) + 4P_{\text{car}} - 1}{(1 - 4P_{\text{car}})(1 - P_{\text{car}})}$$

Eş 31'deki biçiminde ifade edilebilir. D , bir istasyon sayacının donduğu süreyi göstermektedir. Sayacın donduğu zaman, bir iletim süresi boyunca durdurulur. Bu süre iletim başarısına bağlıdır. Bu yüzden, sayacın durduğu ortalama süreyi ($E[D]$) hesaplamak için, bir istasyonun sayacı 0'a ulaşmadan önce diğer istasyonlardan iletimi algıladığı ortalama sayı ($E[N_D]$) bulunmalıdır. $E[X]$ 'ye göre, her bir istasyonun ortalama geri sayım gecikmesi ve bir iletimin gerçekleşmeden önce ardışık boşa kalma sürelerinin ortalama sayısı ($E[\varphi]$), Eş. 32 ve Eş. 33 ile ilişkilidir.

$$E[N_D] = \frac{E[X]}{\max(E[\varphi], 1)} - 1 \quad (32)$$

$$E[D] = E[N_D](P_{bas}T_{bas} + (1 - P_{bas})T_{\varphi}) \quad (33)$$

$E[\varphi] = \frac{1}{P_{km}} - 1$ şeklinde ifade edilir. Eş. 31 ile Eş. 33'den yola çıkarak

$$E[BG] = E[X] + E[N_D](P_{bas}T_{bas} + (1 - P_{bas})T_{\varphi}) \quad (34)$$

Eş. 34 elde edilebilir. Son olarak, T_o zaman erişim yöntemine bağlıdır ve

$$T_o = \begin{cases} SIFS + ACK_timeout \\ SIFS + CTS_timeout \end{cases} \quad (35)$$

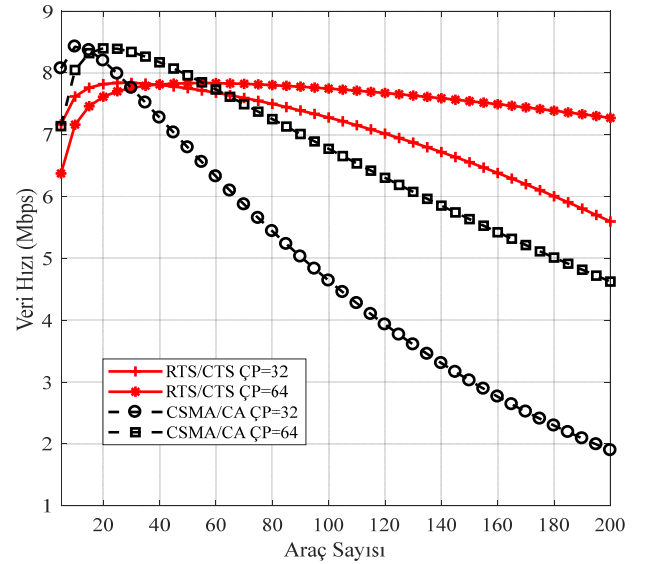
Eş. 35 biçiminde ifade edilebilir. Eş. 29, Eş. 34 ve Eş. 35 de verilen ifadeler Eş. 28'nin içine yazıldığında, ortalama çerçeve gecikmesi hesaplanabilir.

5. BENZETİM SONUÇLARI ve TARTIŞMALAR (NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde, VANET ağlar için IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansı değerlendirilmiş ve teorik analizi doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları MATLAB programında gerçekleştirilmiştir. Her yol genişliğinin 5 m olduğu iki şeritli yol olduğu ve araçların yolda rastgele dağıldığı varsayılmıştır. Kanal koşullarının ideal olduğu varsayılmıştır. Sadece unicast iletim modu ele alınmıştır.

Tablo 3, benzetim sonuçları için gerekli parametreleri içermektedir.

Şekil 7, farklı araç sayısına göre veri hızının değişimini göstermektedir. Veri hızı, belli sınırlara kadar araç sayısının artmasıyla artmaktadır. Daha sonra, veri hızı önemli ölçüde azalmaya başlar, çünkü bu sınırdan sonra, daha fazla paketin iletimi için kanalda rekabet etmesi nedeniyle daha fazla çarpışma olur. Ayrıca, çekişme penceresinin uzunluğu düşük olduğunda veri hızının daha yüksek olduğu şekilden görülmektedir. Ağda bulunan araç sayısının az olduğu durumda CSMA/CA'nın performansının daha iyi olduğu şekilden gözükmektedir. Araç sayısının fazla olduğu durumda ($N > 10$) ise RTS/CTS tekniğinin gizli terminallerle başa çıkma kabiliyeti hesaba katıldığında, bu erişim yönteminin CSMA/CA tekniğinden daha başarılı olduğu şekilden de anlaşılmaktadır.

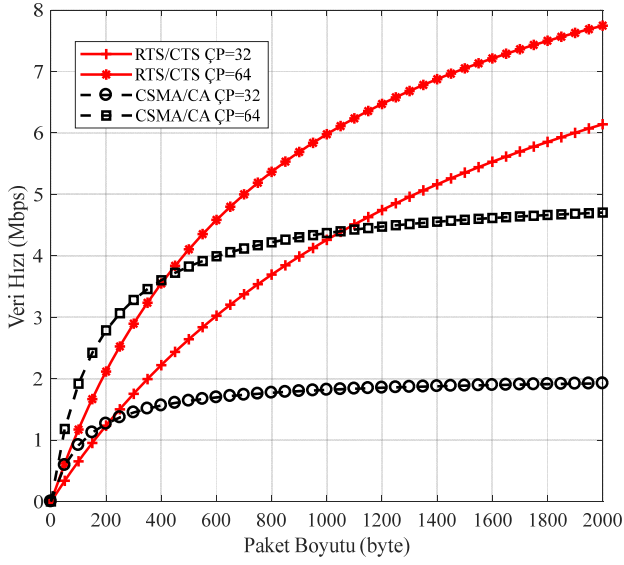


Şekil 7. Araç sayısına göre veri hızı (Throughput against number of vehicles)

Şekil 8, farklı paket boyutuna karşı veri hızını göstermektedir. Paket büyüklüğü arttıkça veri hızı artmaktadır. Aktarılan verinin boyutu arttığından, paket boyutu arttığında veri hızı da artar. Bu şekil için araç sayısı 200 alınmıştır.

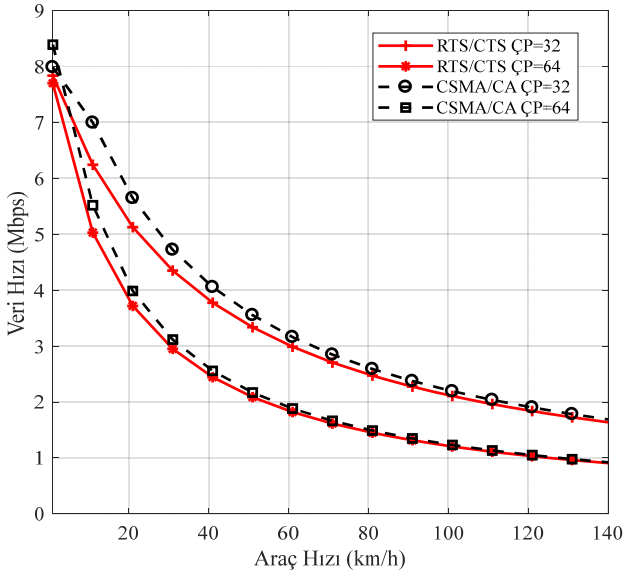
Tablo 3. Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri (Parameter values used in simulation)

Parametreler	Değerler
$T_{slot}, T_{SIFS}, T_{DIFS}, T_{gec}$ (μs)	20, 10, 50, 1
L, L_H, RTS, CTS, ACK (bytes)	2048, 50, 20, 14, 14
Veri iletim hızı, R (Mbps)	11
İletim menzili, M (m)	100 - 500
Araç yoğunluğu, β (araç/m)	0.01
Trafik sıklığı yoğunluğu, t_a (araç/km/şerit)	120
Serbest akış oranı, v_s (km/h)	160
Araç hızı, v (km/h)	0 - 140
Araç sayısı, N	0 - 200



Şekil 8. Paket boyutuna göre veri hızı ($N=200$)
(Throughput against packet size)

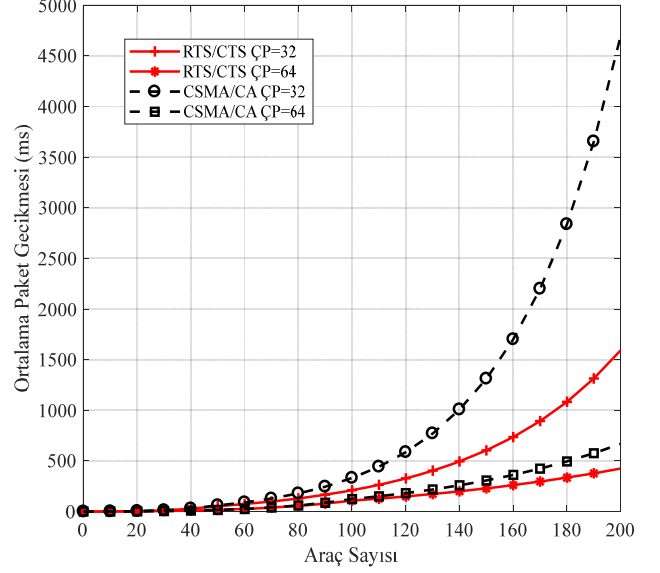
Şekil 9, araç hızına karşı veri hızının değişimini göstermektedir. Araç sayısı 200 alınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi araç hızının artmasıyla veri hızı azalmaktadır. Yüksek düğüm hareketliliği, sık bağlantı kopması ve çarpışma ve paket kaybına neden olan kararsız iletişim ile hızlı topoloji değişikliklerine neden olabilir.



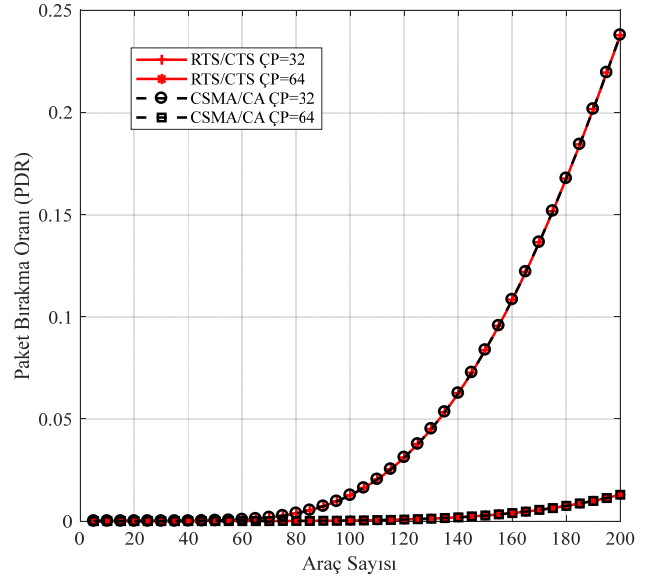
Şekil 9. Araç hızına göre veri hızı ($N=200$)
(Throughput against velocity)

Şekil 10, farklı ÇP uzunluklarının araç sayısına karşılık ortalama paket gecikmesinin değişimini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi ortalama paket gecikmesi, araç sayısının artmasıyla birlikte artmaktadır. Araç sayısı arttığından daha fazla paket, yüksek çarpışmaya neden olan aynı zaman diliminde gönderilmek için mücadele eder. Düşük ÇP boyutunda çarpışma fazla olduğundan iletim için bekleyen paket daha fazla olacaktır. ÇP uzunluğunun küçük

olması gecikmeyi arttıran faktörlerden biridir. Paket boyutunu düşürüp ya da ÇP uzunluğunu çok büyük seçmeyerek belirli bir iletim menziline sabit araç altında genel olarak gecikmeyi azaltabiliriz.



Şekil 10. Araç sayısına göre ortalama paket gecikmesi
(Average packet delay against number of vehicles)



Şekil 11. Araç sayısına göre PDR
(PDR against number of vehicles)

Şekil 11, PDR'nin araç sayısı ile değişimini göstermektedir. Şekilden yararlanarak PDR değerinin araç sayısı ile arttığı görülebilir. Ayrıca çekişme penceresi büyükse PDR daha azdır. Çünkü büyük ÇP , çarpışma olasılığını azaltır. Veri iletiminin güvenilirliği PDR'nin değişimine bağlıdır. PDR değeri düşük ise, iletimin güvenilirliği yüksektir. P_{bas} ve m_r her iki erişim tekniği için aynı olduğundan RTS/CTS ve CSMA/CA tekniklerinin performansları aynıdır.

Veri hızı, yayın niteliğindeki güvenlik mesajları için \mathcal{CP} uzunluğunu optimize ederek en üst seviyeye çıkarılabilir. DCF parametreleri ile performans ölçümleri arasındaki ilişkiyi elde etmek için Markov zincir modeline dayalı analitik çalışma yapıp veri hızı ve optimum \mathcal{CP} uzunluğu ifadeleri sonraki çalışmalarımızda türetilacaktır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede, VANET ağlarında IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansını analiz etmek için Markov zincir modeline dayalı analitik bir model sunulmuştur. Performans modelinde, IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansını etkileyebilecek tüm önemli faktörler dikkate alınmıştır. Performans metrikleri ile çekişme penceresi, yeniden iletim limiti vb. gibi IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün parametreleri arasındaki ilişkiler türetilmiştir. Başarılı iletim olasılığı, çarpışma olasılığı, veri hızı, PDR ve gecikme analizi incelenmiştir. IEEE 802.11 standardındaki CSMA/CA ve RTS/CTS erişim mekanizmalarının karşılaştırması yapılmıştır. RTS/CTS mekanizmasının CSMA/CA'ya göre genel performansının daha iyi olduğu benzetim sonuçlarından anlaşılmaktadır. Analitik modelin doğruluğunu kanıtlamak ve VANET ağlarında IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansını araştırmak için benzetim sonuçları sergilenmiştir. Hareketlilik göz önünde bulundurulup unicast yayın yapan VANET ağlarda düğüm hareketliliğinin etkisi incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda \mathcal{CP} uzunluğu optimize edilerek veri hızının maksimum seviye ulaşması üzerine çalışmalar yapılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 118E701 numaralı proje ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörleri tarafından FDK-2018-3405 numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802.11, 2016.
2. IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Multi-Channel Operation, IEEE 1609.4, 2016.
3. Hassler S., Self-driving cars and trucks are on the move [Spectral Lines], IEEE Spectrum, 54 (1), 6-6, 2017.
4. Balta M., Özçelik İ., Şehir içi kavşak yönetim sistemleri için SDN temelli bir VANET mimari önerisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34 (3), 1451-1468, 2019.
5. IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks--Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE 802.11p, 2010.
6. Bianchi G., Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 18 (3), 535-547, 2000.
7. Zheng J., Wu Q., Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11p EDCA mechanism for VANET, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65 (4), 2673-2687, 2016.
8. Shah A.F.M.S., Mustari N., Modeling and performance analysis of the IEEE 802.11p enhanced distributed channel access function for vehicular network, IEEE Future Technologies Conference (FTC), San Francisco, United States, 173-178, 2016.
9. Shah A.F.M.S., Karabulut M.A., İlhan H., "Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 EDCAF for VANETs," in: Arai K., Kapoor S., Bhatia R. (eds): Advances in Intelligent Systems and Computing, 869, 34-46, Springer, Cham, 2019.
10. Hassan Md.I., Vu H.L., Sakurai T., Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for DSRC safety applications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60 (8), 3882-3896, 2011.
11. Akhtar N., Ergen S.C., Ozkasap O., Vehicle mobility and communication channel models for realistic and efficient highway VANET simulation, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64 (1), 248-262, 2015.
12. Luan T.H., Ling X., Shen X., MAC in motion: impact of mobility on the MAC of drive-thru internet, IEEE Transactions on Mobile Computing, 11 (2), 305-319, 2012.
13. Wu Q., Zheng J., Performance modeling of IEEE 802.11 DCF based fair channel access for vehicular-to-roadside communication in a non-saturated state, IEEE ICC, 1-4, 2014.
14. Yang Q., Xing S., Xia W. and Shen L., Modelling and performance analysis of dynamic contention window scheme for periodic broadcast in vehicular ad hoc networks, IET Communications, 9 (11), 1347-1354, 2015.
15. Karabulut M.A., Shah A.F.M.S., İlhan H., The performance of the IEEE 802.11 DCF for different contention window in VANETs, IEEE 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Athens, 1-4, 2018.
16. Deng D.-J., Ke C.-H., Chen H.-H., and Huang Y.-M., Contention window optimization for IEEE 802.11 DCF access control, IEEE Transactions on Wireless Communications, 7 (12), 5129-5135, 2008.
17. Lei L., Chai S., Chen X., Song X.V. and Sakurai T., Modeling and analyzing the optimal contention window size for distributed synchronization in ad hoc networks, IEEE Communication Letter, 21 (12), 390-393, 2017.

18. Zang Y., Stibor L., Walke B., Reumerman H.-J., Barroso A., A Novel MAC protocol for throughput sensitive applications in vehicular environments, IEEE 65th Vehicular Technology Conference VTC-2007 Spring, 2580-2584, 2007.
19. Kühlmorgen S., Festag A., Fettweis G., Impact of decentralized congestion control on contention-based forwarding in VANETs, IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 1-7, 2016.
20. Karabulut M.A., Shah A.F.M.S., Ilhan H., Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 DCF for VANETs, IEEE 9th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Munich, Germany, 341-346, 2017.
21. Shah A.F.M.S., Ilhan H., Tureli U., RECV-MAC: a novel reliable and efficient cooperative MAC protocol for VANETs, IET Communications, 13 (16), 2541-2549, 2019.
22. Yao Y., Rao L., Liu X., Performance reliability analysis of IEEE 802.11p safety communication in a highway environment, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 62 (9), 4198-4212, 2013

