

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İŞBİRLİĞİNE DAYALI ORTAM ERİŞİM KONTROL
PROTOKOLÜ TASARIMI VE ANALİZİ**

Muhammet Ali KARABULUT

DOKTORA TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Doç. Dr. Hacı İLHAN

Şubat, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İŞBİRLİĞİNE DAYALI ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLÜ
TASARIMI VE ANALİZİ**

Muhammet Ali KARABULUT tarafından hazırlanan tez çalışması 25.02.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hacı İLHAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hacı İLHAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ertuğrul BAŞAR, Üye
Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Serhat ERKÜÇÜK, Üye
Kadir Has Üniversitesi

Doç. Dr. Bülent BOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Hacı İLHAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan İşbirliğine Dayalı Ortam Erişim Kontrol Protokolü Tasarımı ve Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammet Ali KARABULUT

İmza

Bu alışma TÜBİTAK tarafından 118E701 numaralı proje ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FDK-2018-3405 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Dedeme

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora danışmanım Doç. Dr. Hacı İLHAN'a sonsuz teşekkür ederim. Alanına olan derin bilgisi ve yoğun ilgisi, sonsuz sabrı ve sürekli teşvikleri, sürekli ve enerjik denetimi, yapıcı eleştiri ve tavsiyeleri, her aşamada düzeltmeleri bu tezin tamamlamasını sağlamıştır. Bir araştırmacı olarak desteklerini ve bana birçok öğrenme ve gelişme fırsatı sunduğunu asla unutmayacağım.

Tüm tez jüri üyelerine tez izleme komitemde yer aldığından, bu tezi yönetmeyi ve süreç boyunca değerli görüş ve önerileriyle daha ileriye götürmemde yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca, 118E701 nolu TÜBİTAK ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen FDK-2018-3405 numaralı projelerde birlikte çalıştığımız Dr. Öğr. Üyesi A. F. M. Shahan SHAH'a, ve Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü çalışanlarına en içten şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak, iyi ve kötü her zaman beni destekledikleri için aileme ve arkadaşlarıma teşekkür etmek istiyorum. Böylesine sevgi dolu bir çemberin parçası olduğum için kendimi çok şanslı hissediyorum.

Umarım bu tez, VANET ağlarda PHY ve MAC katmanları üzerine çalışan araştırmacılara yardımcı olur.

Muhammet Ali KARABULUT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	11
2 IEEE 802.11'İN MODELLENMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ	12
2.1 Dağıtılmış Koordinasyon Fonksiyonu	12
2.1.1 Çarpışmadan Kaçınma ile Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim Tekniği	12
2.1.2 Gönderim İsteği/Gönderime Uygun Tekniği	15
2.2 Markov Zincir Modeli	17
2.3 Veri Hızı Analizi ve Paket Bırakma Oranı Analizi	21
2.4 Gecikme Analizi	22
2.5 Benzetim Sonuçları	23
2.6 Sonuçlar	27
3 CR-MAC: VANET'LER İÇİN İŞBİRLİKLİ MAC PROTOKOLÜNÜN NAKAGAMİ-M SÖNÜMLEMELİ KANAL ALTINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ	29
3.1 CR-MAC Protokolü	29
3.1.1 Kontrol Paketi Değişim Mekanizması	30
3.1.2 Doğrudan İletim Modu	31
3.1.3 İşbirlikli İletim Modu	32

3.1.4	Çok atlamalı İletim Modu	33
3.1.5	Röle Seçimi	35
3.2	Performans Analizi	35
3.2.1	Nakagami-m Sönümlemeli Kanal	39
3.2.2	Veri Hızı Analizi	40
3.2.3	Gecikme Analizi	40
3.3	Benzetim Sonuçları	41
3.4	Sonuçlar	46
4	OEC-MAC: VANET'LER İÇİN YENİ BİR OFDMA TABANLI ETKİN İŞBİRLİK LİKLİ MAC PROTOKOLÜ	48
4.1	Önerilen OEC-MAC Protokolü	48
4.1.1	Güvenlik Mesajı İletimi	50
4.1.2	Güvenlikle İlgili Olmayan Mesajların İletimi	51
4.1.3	Kanal Erişim Mekanizması	54
4.1.4	Üç Taraflı İletim	56
4.1.5	Veri İletimi	57
4.1.6	Optimum Röle Seçimi	59
4.2	Performans Analizi	60
4.2.1	Veri Hızı Analizi	60
4.2.2	Paket Bırakma Oranı Analizi	63
4.2.3	Gecikme Analizi	64
4.3	Benzetim Sonuçları	65
4.4	Sonuçlar	71
5	MIMO-OFDM TABANLI MAC PROTOKOLÜNÜN VANET AĞLARDAKİ PERFORMANS ANALİZİ	72
5.1	MIMO-OFDM Kanal Modeli	72
5.1.1	Çerçeve Formatı	74
5.1.2	Sonlu Durum Makinesi	75
5.1.3	Kanal Erişim Mekanizması	77
5.2	Performans Analizi	81
5.2.1	Gecikme Analizi	88
5.3	Fiziksel Kanalin Etkileri	88
5.3.1	PHY Katmanında Önerilen Sistemin Performans Analizi	89
5.4	Benzetim Sonuçları	93
5.5	Sonuçlar	99
6	OPTİMİZASYON VE ÖNERİLMİŞ PROTOKOLLERİN HESAPLANMA SÜRELERİ	100

6.1	IEEE 802.11'nin Optimizasyonu	100
6.1.1	Sezgisel Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları	103
6.2	Önerilmiş Protokollerin Hesaplanma Süreleri	106
7	SONUÇ VE ÖNERİLER	107
	KAYNAKÇA	109
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	117

SİMGE LİSTESİ

b_c	Geri sayım değeri
b_s	Geri sayım süreç değeri
c	Işık hızı
C_A	İşbirliği girişim sayısı
C_{ch}	Kanal durumu
CW	Çekişme penceresi boyutu
d	Mesafe
t_{den}	Trafik yoğunluğu
D	Hedef düğüm
D_{veh}	Araçlar arası yasal mesafe
$E[D]$	Ortalama gecikme
$E[P_{drop}]$	Başarılı bir iletme göre düşen paketlerin ortalama sayısı
$E[T_{drop}]$	Bir paketi bırakmak için ortalama süre
$E[T_{interval}]$	Alıcıda başarıyla alınan iki paket arasındaki ortalama zaman dilimi
$E[X_{drop}]$	Bırakılan bir paket için ortalama zaman dilimi sayısı
f	Taşıyıcı frekansı
f_{dop}	Doppler kayması
G_r	Alıcı için anten kazancı
G_t	Verici için anten kazancı
t_{jam}	Trafik sıkışıklığı yoğunluğu
L	Paket boyutu
L_h	MAC ve PHY header uzunluğu
L_r	Yol bölümünün uzunluğu

L_{veh}	Araç uzunluğu
m_r	Maksimum yeniden iletim limiti
N	Araç sayısı
n_L	Yoldaki şerit sayısı
P_b	Meşgul kanal olasılığı
P_c	Çarpışma olasılığı
P_{d-CT}	İşbirlikli iletme karar verme olasılığı
P_{ef}	Hatalı çerçeve olasılığı
P_{fdrop}	Bir paketin düşme olasılığı
P_h	Sistemde rölesiz iletim olasılığı
P_i	Kanalın boşta olma olasılığı
P_{outage}	Kesinti olasılığı
$P_{parrival}$	Paket varış olasılığı
P_s	Başarılı iletim olasılığı
P_t	Rastgele bir zaman diliminde paket iletim olasılığı
P_{us}	Başarısız iletim olasılığı
TR	İletim menzili
R_c	Kontrol paket iletim hızı
R_d	Veri iletim hızı
S	Kaynak düğüm
T_c	Çarpışan paket iletim süresi
T_{coh}	Uyumluluk (coherence) süresi
T_{delay}	Yayılma gecikmesi
T_{DIFS}	DIFS süresi
T_e	Bir aracın beklenen toplam iletim süresi
T_s	Başarılı iletim süresi
T_{SIFS}	SIFS süresi
T_{slot}	Bir zaman diliminin süresi
v	Araç hızı

λ	Ortalama paket varış süresi
λ_{veh}	Araçların iletim aralığına ortalama varış hızı
σ_N	Gürültü gücü
σ_R	Alıcıda iletilen çerçevenin ortalama gücü
α	Yol kaybı katsayısı
β	Araç yoğunluğu
γ	SNR
γ_{th}	SNR'nin eşik değeri
η	Veri hızı

KISALTMA LİSTESİ

ACK	Alındı bilgisi
AIFS	Çerçeveler arası boşluk alanı
AP	Erişim noktası
BER	Bit hata oranı
BPSK	İkili faz kaydırmalı anahtarlama
BSS	Temel hizmet seti
CAM	İşbirlikli iletişim kabul mesajı
CCH	Kontrol kanalı
CDF	Birikimli dağılım fonksiyonu
CSMA/CA	Çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı algılama çoklu erişim
CRM	İşbirliği istek mesajı
CT	İşbirlikli iletişim
CTS	Gönderime hazır
CW	Çekişme penceresi
CWSA	İşbirlikli WAVE servis reklamı
DCF	Dağıtılmış koordinasyon fonksiyonu
DIFS	DCF çerçeveler arası boşluk
DS	Dağıtım sistemi
DSRC	Özel kısa menzilli iletişim
DT	Doğrudan iletim
EDCA	Geliştirilmiş dağıtılmış kanal erişimi
ESS	Genişletilmiş servis seti
FSM	Sonlu durum makinesi

IEEE	Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü
ITS	Akıllı ulaşım sistemleri
LAN	Yerel bölge ağı
MAC	Ortam erişim kontrolü
MGF	Moment üretme fonksiyonu
MHR	Çoklu atlamalı iletim
MIMO	Çok girişli çok çıkışlı
MIMO-CTS	Çok girişli çok çıkışlı - gönderime hazır
MIMO-RTS	Çok girişli çok çıkışlı - gönderme isteği
nsm	Güvenlikle ilgili olmayan mesajlar
OEC-MAC	VANET'ler için yeni bir OFDMA tabanlı etkin işbirlikli MAC protokolü
OFDM	Ortogonal frekans bölmeli çoklama
OFDMA	Ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim
ORM	Optimum röle mesajı
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
PDR	Paket düşme oranı
PHY	Fiziksel
PSID	Sağlayıcı hizmet tanımlayıcı
PSK	Faz kaydırmalı anahtarlama
QAM	Çeyrek genlik modülasyonu
QoS	Servisin kalitesi
RTS	Gönderim isteği
SCH	Servis kanalı
SER	Sembol hata oranı
SIFS	Çerçeveler arası kısa boşluk
SINR	Sinyal-girişim artı gürültü oranı
SNR	Sinyal-gürültü oranı
sm	Güvenlik mesajları
STA	İstasyon

TDMA	Zaman bölmeli çoklu erişim
UML	Birleştirilmiş modelleme dili
V2I	Araçtan altyapıya
V2V	Araçtan araca
VANET	Tasarsız araçsal ağlar
WAVE	Araç ortamlarında kablosuz erişim
WSA	WAVE hizmet reklamı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Tasarsız araç ağı (VANET)	1
Şekil 1.2	IEEE 802.11 bileşenleri	3
Şekil 2.1	CSMA/CA tekniği	14
Şekil 2.2	CSMA/CA akış diyagramı	14
Şekil 2.3	RTS/CTS tekniği	16
Şekil 2.4	RTS/CTS akış diyagramı	16
Şekil 2.5	Geri sayım süreç prosedürü için Markov zincir modeli	18
Şekil 2.6	Araç sayısına göre veri hızı	25
Şekil 2.7	Paket boyutuna göre veri hızı ($N=200$)	25
Şekil 2.8	Araç hızına göre veri hızı ($N=200$)	26
Şekil 2.9	Araç sayısına göre ortalama paket gecikmesi	26
Şekil 2.10	Araç sayısına göre PDR	27
Şekil 3.1	Kontrol değişim paket çerçeve formatı	31
Şekil 3.2	DT modu için önerilen CR-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması	32
Şekil 3.3	CR modu için önerilen CR-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması	33
Şekil 3.4	MHR modu için önerilen CR-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması	34
Şekil 3.5	Doymamış koşullar altında IEEE 802.11p için tek boyutlu Markov zincir modeli	36
Şekil 3.6	Araç sayısına göre veri hızındaki değişim	42
Şekil 3.7	Kanal sönmülmesi olması durumunda araç sayısına göre veri hızındaki değişim	43
Şekil 3.8	Hatalı çerçeve iletim olasılığına karşı veri hızı değişimi	44
Şekil 3.9	SNR'e göre ortalama BER'in değişim eğrisi	44
Şekil 3.10	Araç sayısına karşı başarısız iletim olasılığındaki değişim eğrisi	45
Şekil 3.11	SNR'e göre kesinti olasılığı değişimi	45
Şekil 3.12	Araç sayısına karşı gecikme değişimi	46
Şekil 4.1	Önerilen OEC-MAC protokolünün FSM mekanizması	49
Şekil 4.2	Önerilen OEC-MAC protokolünün sm mesajları için akış diyagramı	52

Şekil 4.3	Önerilen OEC-MAC protokolünün nsm mesajları için akış diyagramı	53
Şekil 4.4	Sm mesajları için kanal erişim mekanizması	55
Şekil 4.5	Nsm mesajları için kanal erişim mekanizması	55
Şekil 4.6	Sm mesajları için S, D ve R düğümleri arasında üç taraflı iletim	56
Şekil 4.7	Nsm mesajları için S, D ve R düğümleri arasında üç taraflı iletim	57
Şekil 4.8	Sm mesajları için veri aktarımı: (a) Başarılı sm yayını; (b) S ve D arasında başarısız iletim; (c) CRM alarak komşu düğümler iletim başarısızlığını tespit eder; (d) Komşu düğümler aktarmayı önerir ve S en uygun R_1 'i seçer; (e) Optimum R_1 aracılığıyla veri iletimi	58
Şekil 4.9	Nsm mesajları için veri aktarımı, (a) S (WAVE sağlayıcı) ve D (WAVE kullanıcısı) arasında başarılı aktarım; (b) CWSA'yı komşu düğümlerden alarak, S röleleri tespit eder; (c) S, rölelerden optimum R_1 rölesini seçer; (d) Optimum röle R_1 üzerinden veri iletimi	59
Şekil 4.10	Araç sayısına göre veri hızı	65
Şekil 4.11	Araç hızına göre veri hızı	66
Şekil 4.12	Trafik yüküne göre veri hızı	67
Şekil 4.13	PDR'a göre veri hızı	68
Şekil 4.14	Araç sayısına göre ortalama paket gecikmesi	68
Şekil 4.15	Araç hızına göre ortalama paket gecikmesi	69
Şekil 4.16	Farklı sönmülemeli kanallar altında araç hızına göre veri hızı	69
Şekil 5.1	MIMO-OFDM yapısı	73
Şekil 5.2	Önerilen MIMO-OFDM tabanlı VANET senaryosu	74
Şekil 5.3	MIMO-RTS ve MIMO-CTS kontrol paket formatı	74
Şekil 5.4	Önerilen sistemin sonlu durum makinesi	75
Şekil 5.5	Çok düğümlü MIMO sistemi için kanal çekişmesine dayalı iletim	76
Şekil 5.6	MIMO sistemi için kanal çekişmesine dayalı iletim örneği	76
Şekil 5.7	MIMO sistemi için MIMO-RTS/MIMO-CTS tabanlı iletim	77
Şekil 5.8	Önerilen sistemin OFDM kanal erişim mekanizması	79
Şekil 5.9	Geri çekilme süreci için 3D Markov zincir modeli	83
Şekil 5.10	$M_T \times M_R$ boyutlu kanal matrisine sahip MIMO sisteminin blok diyagramı	89
Şekil 5.11	Araç sayısına karşı veri hızı	94
Şekil 5.12	Araç sayısına karşı iletim olasılığı	94
Şekil 5.13	Araç hızına karşı veri hızı	95
Şekil 5.14	Farklı sönmülemeli kanallar altında araç sayısına karşı veri hızı	96
Şekil 5.15	Araç sayısına karşı ortalama gecikme	96
Şekil 5.16	Araç hızına karşı ortalama gecikme	97
Şekil 5.17	SNR'ye karşı kesinti olasılığı	98
Şekil 5.18	SNR'ye karşı BER	98
Şekil 6.1	Araç sayısına karşı veri hızı	102

Şekil 6.2	3 boyutlu optimum parametre varyasyonları	103
Şekil 6.3	Sezgisel tabanlı optimizasyon algoritmaları kullanıldığında veri hızı değişimi	105

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	CSMA/CA algoritması	15
Tablo 2.2	RTS/CTS algoritması	17
Tablo 2.3	Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri	24
Tablo 3.1	Uygun veri iletim modunu bulma algoritması	30
Tablo 3.2	Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri	41
Tablo 4.1	IEEE 802.11p standardındaki OFDMA parametreleri	50
Tablo 4.2	Sm mesajları için önerilen OEC-MAC protokolü algoritması	51
Tablo 4.3	Nsm mesajları için önerilen OEC-MAC protokolü algoritması	54
Tablo 4.4	Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri	65
Tablo 5.1	Önerilen MIMO-OFDM MAC protokolünün kanal erişim mekanizması algoritması	78
Tablo 5.2	IEEE 802.11 standardındaki OFDMA parametreleri	79
Tablo 5.3	Farklı modülasyon türleri için hata analizi	93
Tablo 5.4	Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri	93
Tablo 6.1	Simülasyonda kullanılan parametre değerleri	102
Tablo 6.2	Her bir optimizasyon algoritmasında araç sayısına karşı veri hızı . .	105
Tablo 6.3	Her yineleme için geçen süre (sn)	106

İşbirliğine Dayalı Ortam Erişim Kontrol Protokolü Tasarımı ve Analizi

Muhammet Ali KARABULUT

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hacı İLHAN

Tasarsız araç ağları (Vehicular adhoc networks, VANETs) ulaşım verimliliği ve yol güvenliğini arttırdığından dolayı son zamanlarda otomasyon ve akıllı ulaşım sistemleri (intelligent transportation systems, ITSs) alanında oldukça ilgi görmektedir. VANET ağlar, hem araçlar arası iletişimi (vehicle to vehicle, V2V) hem de araç ve altyapı (vehicle to infrastructure, V2I) arasındaki iletişimi içermektedir. VANET ağlar, iletişimdeki güvenlik mesajları (safety messages, sm) ve güvenlikle ilgili olmayan mesajlar (non-safety messages, nsm) olarak kategorize edilebilen çok sayıda uygulamayı kolaylaştırır. VANET ağlarda verimli ve güvenilir veri iletimi için ortam erişim kontrolü (medium access control, MAC) protokolünün tasarımı çok önemlidir.

VANET ağlarda araçlar arasında yüksek hareketlilik, sık bağlantı kopmasına, çarpışmaya ve paket kaybına neden olan dengesiz iletişim ile hızlı topoloji değişikliklerine neden olabilir. İşbirlikli iletimin kullanımı iletişim güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca işbirliğine dayalı iletişim VANET ağlardaki hareketliliğin neden olduğu kablosuz kanal bozukluklarını azaltarak daha düşük gecikmeyle iletişim hızını artırabilir. IEEE 802.11 standardı, araç ortamlarında (wireless access in vehicular environments, WAVE) kablosuz erişimi desteklemek ve VANET ağlarda MAC ve fiziksel (PHY) katman özelliklerini sağlamak için elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü (institute of electrical and electronics engineers, IEEE) tarafından detaylıca açıklanmıştır. IEEE 802.11 standardında, dağıtılmış koordinasyon işlevi (distributed coordination function, DCF) kanal ortamına erişmek için kullanılan temel mekanizmadır ve MAC katmanında çekişmeye dayalı önceliklendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında öncelikle IEEE 802.11 standardı için DCF'in performansı modellenmiş ve iki boyutlu (2D) Markov zincir modeline dayalı analitik bir analiz sunulmuştur. Türetilmiş performans modeli sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Ayrıca PHY katmanının etkisini görmek için Nakagami-m ve Rayleigh sönümlemeli kanal yapıları kullanılmıştır.

VANET ağlarda göreceli hareketlilik ve araçların yüksek hareketliliği, paket kaybı ve çarpışma ile sonuçlanan sık bağlantı kesilmeleriyle dengesiz iletişime neden olan hızlı topoloji değişikliklerine yol açabilmektedir. Çözüm olarak, işbirliğine dayalı iletişim, kullanıcı hareketliliği nedeniyle kablosuz kanal bozukluklarını azaltarak VANET ağların performansını artırabilir. Zamanla değişen bir kanal üzerinden iletişim güvenilirliğini ve iletim hızını artırmak ve ayrıca ağ genelinde iletişim gecikmesini, iletim gücünü, paraziti, kanal sönümlemesinin etkisini azaltmak, iletim aralığını genişletmek ve kesinti olasılığını azaltmak işbirlikli iletişimin temel faydaları arasındadır. Kablosuz ağlarda işbirliği her zaman veya her durumda yararlı olmayabilir veya gerekli olmayabilir. İşbirliği yapmanın kazancı (üretim ve enerji verimliliği vb.) maliyetini telafi etmek için çok küçük olduğunda gereksiz hale gelir. Bu nedenle, verilerin doğrudan mı yoksa işbirliği içinde mi aktarılacağını bilmek için bir mekanizmaya ihtiyaç vardır.

Buradan hareketle IEEE 802.11p MAC protokolünün performansını incelemek için doymamış durum (unsaturated condition) altında Markov zincir modeline dayalı analitik bir model sunulmuştur. VANET ağların performansını etkileyebilecek parametrelerden çarpışma olasılığı, başarılı iletim olasılığı, başarısız iletim olasılığı, hatalı çerçeve iletim olasılığı, veri hızı ve gecikme ile performans ölçütleri arasındaki ilişki elde edilmiştir. VANET ağlar için işbirlikli iletim ortam erişim kontrolü (cooperative relaying medium access channel, CR-MAC) protokolünün Nakagami-m kanal sönümlemesi üzerine performansı araştırılmıştır. M-PSK modülasyonu kullanılarak bit hata oranı (bit error rate, BER) hesaplanmıştır. Ayrıca elde edilen performans modeli benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır.

Çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı duyarlı çoklu erişim tekniği (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) kullanımı, düşük trafik yoğunluğunda iyidir, ancak trafik yoğunluğu arttığında veri hızı düşer ve daha yüksek çarpışma nedeniyle gecikme artar. Öte yandan, dik frekans bölmeli çoklu erişim (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) kullanımı ile yüksek veri hızı ve daha düşük gecikme sağlanabilir. Fiziksel katmanındaki dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), sınırlı spektrumda yüksek spektral verimlilik sağlayan ve gizli düğüm problemini çözen frekans ve zaman çoğullamayı birleştirir. Bu tezde VANET ağlar için hem sm hem de nsm

mesajlarının iletimi için tasarlanmış yeni, güvenilir ve verimli işbirliğine dayalı MAC (OEC-MAC) protokolü tasarlanmıştır. OEC-MAC, hem gönderen hem de alıcı için iyi kanal koşullarına sahip rölelerin yardımıyla güvenilir ve verimli iletim sağlamaktadır. İşbirlikli iletişimi desteklemek için yeni kontrol mesaj paketleri tanıtılmış ve kullanılan mekanizma, uygun aktarım modunu seçmenin yanı sıra en uygun röleyi seçmek için tanımlanmıştır. Önerilen OEC-MAC protokolünün performansı 2D-Markov zincir modeline dayalı olarak analiz edilmiş ve OEC-MAC protokolünün performansı sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. OEC-MAC protokolünün performansı, IEEE 802.11 standardındaki geleneksel MAC modeli için önerilen parametreler kullanılarak sunulmuştur. OEC-MAC protokolünün IEEE 802.11 ve işbirliğine dayalı MAC sistemlerinden daha iyi performans gösterdiği yapılan karşılaştırma eğrilerinden açıkça gözükmektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar, OEC-MAC protokolünün performansı daha yüksek verimle geliştirdiğini, paket düşme oranını (packet dropping rate, PDR) azaltarak iletişimin güvenilirliğini arttırdığını ve özellikle gecikmeyi azalttığını, sm mesajlar için 100 msn'lik gecikme kısıtlamasını karşıladığını göstermektedir.

PHY katmanındaki çok-girişli çok-çıkışlı (multiple input multiple output, MIMO) teknoloji, aynı anda birden fazla anten kullanır ve çok yollu yayılma yoluyla veri hızını artırabilir. MIMO sistemi teorik olarak, verici ve alıcıda çoklu antenlere sahip bir sistem olarak bağlantı kapasitesinin doğrusal büyümesini sağlar. OFDM, kablosuz kanallar üzerinden sinyal iletimi için popüler bir çoklu taşıyıcı modülasyon teknolojisi haline gelmiştir. Bu tekniklerin birleştirilmesi, iyi kapsama alanı, verimli iletim, yüksek veri hızları ve yüksek spektral verimlilik dahil olmak üzere, bir görüş hattı ortamında ihtiyaç duyulan cihaz gereksinimlerini karşılayacaktır. Çeşitli anten konfigürasyonlarının kullanıldığı MIMO-OFDM sistemindeki MAC katmanının tasarımları üzerine literatürde yeterince araştırılma yapılmadığı görülmüştür. Birden fazla antene sahip verici ve alıcı iletişim sistemleri, alıcıdaki sinyal-gürültü oranını (signal-to-noise ratio, SNR) ve kanal kapasitesini önemli ölçüde arttırarak hızlı veri iletişimini sağlamaktadırlar. Ayrıca, yüksek spektral verimliliği nedeniyle OFDM, kablosuz iletişim sistemlerinde sinyalleri iletmek için yaygın olarak kullanılır. Yüksek spektral verimliliğe sahip MIMO ve OFDM haberleşme sistemlerinin birleşiminden oluşan MIMO-OFDM yapısı, yeni nesil haberleşme sistemlerinde çok önemli bir konuma sahiptir. Buradan esinlenerek hem sm hem de nsm mesajlarının iletimi MIMO-OFDM yapısı VANET ağlarında kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kanal sönmülmesi ile performans analizi IEEE 802.11 standardındaki parametreler kullanılarak ele alınmıştır. Haberleşme sistemlerinde ele alınan bit hata olasılığı, VANET ağların performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu etkiler göz önüne alınarak parametreler ve performans ölçütleri arasındaki ilişki, doymamış koşullar

altında üç boyutlu (3D) Markov zincir modeline dayalı teorik çalışma ile çıkarılmıştır. Ayrıca önerilen MIMO-OFDM sistemin BER ve kesinti olasılığı ifadeleri Nakagami-m ve Rayleigh sönümlmeli kanallar için türetilmiştir. Çarpışma olasılığı, başarılı iletim olasılığı, veri hızı, paket düşme oranı ve gecikme analizi ifadeleri ele alınmıştır.

Bu tezin son kısmında, IEEE 802.11'in performansı optimize edilmiş ve performans optimizasyon mekanizması sunulmuştur. Ayrıca, tezde önerilen CR-MAC, OEC-MAC ve MIMO-OFDM protokollerin hesaplanma süreleri de karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: IEEE 802.11, MAC, MIMO, OFDMA, optimizasyon, VANET

Cooperative Medium Access Control Protocol Design and Analysis

Muhammet Ali KARABULUT

Department of Electronics and Communication Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Hacı İLHAN

Vehicular ad hoc networks (VANETs) have recently attracted considerable attention in automation and intelligent transportation system (ITS). VANETs increase transport efficiency and road safety. VANETs include communication vehicle-to-infrastructure (V2I) as well as communication vehicle-to-vehicle (V2V). VANETs facilitate a large number of applications that can be categorized as safety messages (sm) and non-safety messages (nsm). However, to have useful applications, communication between tools and existing network infrastructures must be efficient. For any ad hoc network, the medium access control (MAC) protocol is one of the most important parts because efficient and reliable data transmission depends directly on the MAC protocol.

In VANETs, high mobility between vehicles can cause rapid topology changes, with unstable communication causing frequent disconnection, collision, and packet loss. Cooperative transmission can improve communication reliability and increase communication efficiency with lower latency by reducing wireless channel distortions caused by mobility in VANETs. The IEEE 802.11 standard is detailed by the institute of electrical and electronics engineers (IEEE) to support wireless access in-vehicle environments (WAVE) and to provide MAC and physical (PHY) layer features for VANETs. In IEEE 802.11, the distributed coordination function (DCF) is the basic mechanism used to access the environment and is prioritized based on contention at the MAC layer.

In this thesis, the performance of DCF for IEEE 802.11 has been modeled and analyzed. An analytical analysis based on the Markov chain model is presented. Numerical

results verify the derived performance model. Moreover, the effects of Nakagami and Rayleigh fading channels are considered as physical layer effects. Relative mobility and high mobility of vehicles in VANET networks can lead to rapid topology changes that cause unstable communication, with frequent disconnections resulting in packet loss and collisions. As a solution, cooperative communication can improve VANETs performance by reducing wireless channel disruptions due to user mobility. The main benefits of cooperative communication; to enhance communication reliability over a time-varying channel, to increase transmission speed and reduce communication delay across the network, to reduce transmission power, to reduce interference, to reduce the effect of channel fading, to widen the transmission range, and to reduce the possibility of an outage. Cooperation on wireless networks may not always be beneficial or necessary in all situations. Cooperation becomes redundant when the gain (production and energy efficiency, etc.) is too small to compensate for its cost. Therefore, a mechanism is needed to know whether data will be transferred directly or cooperatively. The different data transmission modes are explained, and which mode is effective when. A systematic model is presented to examine the performance of the IEEE 802.11p MAC protocol. An analytical model based on the Markov chain model under the saturated state is presented. Among the parameters that can affect the performance of VANET networks, the probability of collision, probability of successful transmission, probability of unsuccessful transmission, probability of error frame transmission, data rate and delay, and performance criteria are obtained. The performance of cooperative relaying medium access channel (CR-MAC) protocol for VANET networks on Nakagami-m channel fading is investigated. The bit error rate (BER) is calculated using the M -PSK modulation. Besides, the obtained performance model has been verified with the simulation results.

The use of carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) technique is good at low traffic density, but when traffic density increases, data rate decreases and delay increases due to higher collision. On the other hand, high throughput and lower latency can be achieved by using orthogonal frequency division multiple access (OFDMA). Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) in the PHY layer combines frequency and time multiplexing, which provides high spectral efficiency in a limited spectrum and solves the hidden node problem. In this thesis, a novel OFDMA based efficient cooperative MAC (OEC-MAC) protocol is proposed for VANETs designed for both sm and nsm messages transmission. OEC-MAC provides reliable and efficient transmission with the help of relays with good channel conditions for both the sender and the receiver. To support cooperative communication, new control message packets have been introduced. The mechanism has been described for selecting the most suitable relay as well as selecting the appropriate

transmission mode. In order to investigate the performance of the proposed OEC-MAC protocol, analytical analysis based on the Markov chain model is provided, and the OEC-MAC protocol is validated with numerical studies. The performance of the proposed OEC-MAC protocol is presented in the traditional MAC model based on IEEE 802.11. It is clear from the comparison made that OEC-MAC outperforms IEEE 802.11 and existing cooperative MAC schemes. The numerical results show that the OEC-MAC protocol improves the performance with higher efficiency, increases the communication's reliability by decreasing the packet drop rate (PDR), and especially reduces the latency. It meets the delay constraint of 100 ms for sm messages.

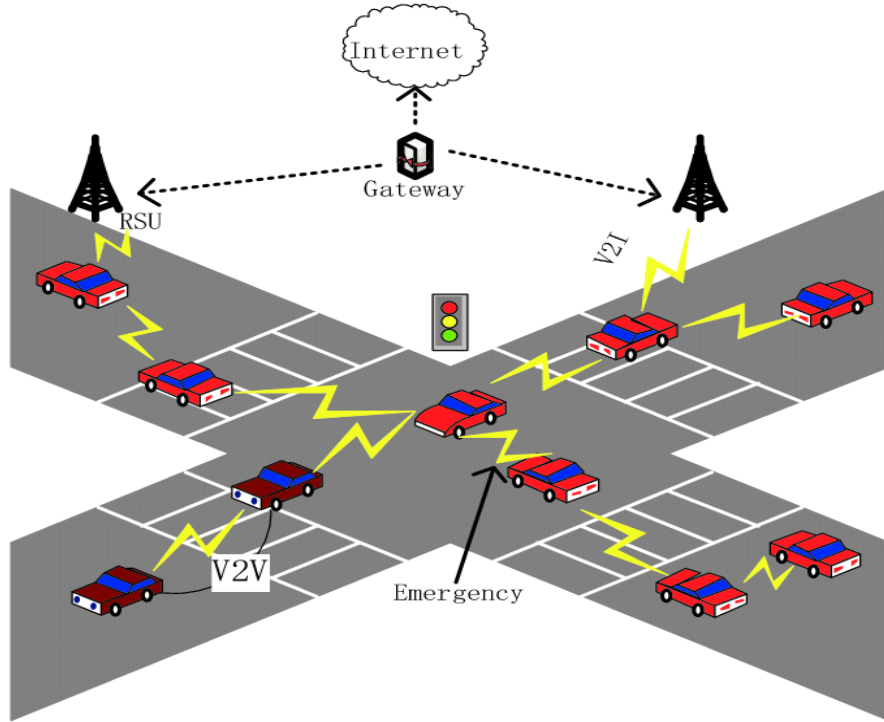
Multi-input multiple-output (MIMO) technology in the PHY layer uses multiple antennas at the same time and can increase data rate through multi-path propagation. Theoretically, the MIMO system provides linear growth of the link capacity as a system with multiple antennas in the transmitter and receiver. OFDM has become a popular multi-carrier modulation technology for signal transmission over wireless channels. Combining these techniques will meet the device requirements needed in a line-of-sight environment, including good coverage, efficient transmission, high data rates, and high spectral efficiency performance. The MAC layer of the MIMO-OFDM system using various antenna configurations has not been sufficiently studied in the literature. Transmitter and receiver communication systems with multiple antennas meet the demands of fast data communication by significantly improving the signal-to-noise ratio (SNR) and channel capacity due to their advanced diversification. Also, OFDM is widely used in wireless communication systems to transmit signals because of its high spectral efficiency. MIMO-OFDM structure, which consists of high spectral efficiency MIMO and OFDM communication systems, has a significant position in new-generation communication systems. In addition, performance analysis of both sm and nsm messages with channel fading in VANET networks of IEEE 802.11 MAC layer is discussed. The bit error probability considered in communication systems has an impact on the performance of VANETs. Considering these effects, the relationship between parameters and performance criteria has been extracted with a theoretical study based on a three-dimensional Markov chain model under unsaturated conditions. In addition, the BER and outage probability expressions of the proposed MIMO-OFDM system are derived for Nakagami-m and Rayleigh fading channels. Collision probability, probability of successful transmission, throughput, packet dropping rate, and delay analysis expressions are discussed.

In the last part of the thesis, IEEE 802.11 has been optimized, and the performance optimization mechanism is presented. Moreover, calculation times of the proposed CR-MAC, OEC-MAC, and MIMO-OFDM protocols are compared in the thesis.

Keywords: IEEE 802.11, MAC, MIMO, OFDMA, optimization, VANETs

1.1 Literatür Özeti

Son zamanlarda, tasarsız araç ağıları (vehicular ad hoc network, VANET), otomasyon ve akıllı ulaşım sistemi (intelligent transportation system, ITS) için büyük ilgi toplamıştır. VANET, trafik sıkışıklığının azaltılması, güvenlik, konfor ve rahatlık, üretkenlik ve operasyonel verimlilik, çevre izleme ve koruma gibi çok sayıda uygulamayı destekleyen önemli bir ITS unsurudur. VANET'ler nakliye verimliliğini ve yol güvenliğini artırır. VANET'ler, pahalı sensör bağımlılığını azaltarak otonom araçların dağıtımını kolaylaştırır ve hızlandırır. VANET ağılar, araçlar arası iletişimin (vehicle-to-vehicle, V2V) yanı sıra araç ve altyapı (vehicle-to-infrastructure, V2I) arasındaki iletişimi içermektedir. Şekil 1.1'de VANET için bir örnek sunulmuştur.



Şekil 1.1 Tasarsız araç ağıları (VANET)

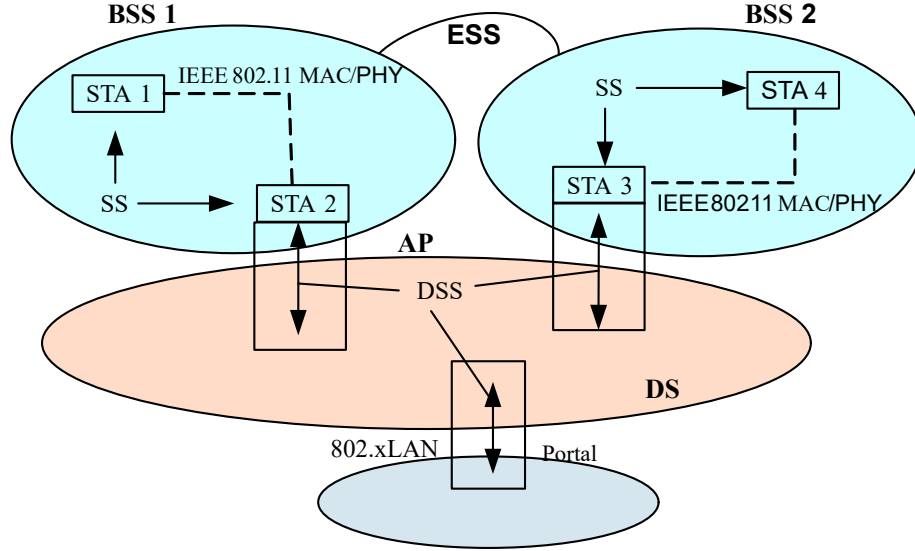
VANET'ler, güvenlik mesajları (safety messages, sm) ve güvenlik dışı mesajlar (non-safety messages, nsm) olarak kategorize edilebilen çok sayıda uygulamayı kolaylaştırır. Acil durum uyarısı, kaza önleme, yol durumu, şerit değiştirme asistanı, acil durum elektronik fren lambası göstergesi, trafik işareti veya sinyal ihlali uyarısı, güvenlik mesajlarıdır. Trafik bilgi sistemi, harita güncellemesi, hava durumu bilgileri, web'de gezinme, içerik dağıtımı, benzin istasyonu, restoran konum ve fiyat bilgileri, oyun oynama güvenlikle ilgili olmayan mesajlardandır. Bununla birlikte, yararlı uygulamalara sahip olmak için araçlar arasındaki ve mevcut ağ altyapıları ile iletişimin verimli olması gerekmektedir.

Bir kontrol kanalı (control channel, CCH) ve altı servis kanalı (service channel, SCH) olmak üzere toplam yedi adet 10 MHz geniş kanallı özel kısa menzilli iletişim (dedicated short range channel, DSRC) için 5.850-5.925 GHz bandında 75 MHz'lik bir geniş spektrumda atanır [1]. IEEE 80211 [2] standartlarında, dağıtılmış koordinasyon işlevi (distributed coordination function, DCF) ortam erişim kontrolü (medium access control, MAC) için temel mekanizmadır. Bir MAC protokolü, heterojen hizmetler için kesin trafik farklılaşması ve destek sağlamalıdır. DCF, ikili üstel geri çekilme algoritmasıyla çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı algılama çoklu erişimini (carrier-sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) kullanır. Ek olarak, gönderme isteği (request-to-send, RTS) / göndermek için uygun (clear-to-send, CTS) tekniği, gizli araç düğümü sorunundan kurtulmak için tasarlanmıştır.

ITS G5 standardı [3] ETSI tarafından hazırlanmıştır. Avrupa'da 5.875-5.925 GHz frekans bandında 50 MHz geniş spektrum ETSI tarafından tahsis edilmiştir. IEEE 1609.4 standardı [4], PHY katman bilgisi olmadan üst katman veri aktarımlarının eylemini birden fazla kanal üzerinden kontrol etmektedir. Ayrıca bu standartta çok kanallı işlem, kanal yönlendirmesi ve değiştirilmiş senaryolar için geçiş tanımlanmaktadır. IEEE 1609.4 standardına göre kontrol kanalı CCH, işaretler ve kontrol mesajları (yani, hizmet reklam mesajları) olarak adlandırılan güvenlik mesajları (safety messages) için ayrılmıştır ve servis kanalı SCH, güvenlik ile ilgili olmayan mesajlar (non-safety messages) için ayrılmıştır. Bir aracın CCH ve SCH'leri dinlemeye devam ettiği süre, sırasıyla CCH ve SCH zaman dilimleri olarak anılır. Araç düğümlerin birbirleriyle iletişim kurmak ve aralarında veri iletimi sağlamak için tam zamanında kanalı dinlemeleri gerekmektedir. VANET ağlarda performans kriterlerini yerine getirmek için örneğin, güvenlik mesajları için katı gecikme kısıtlaması 100 msn [5-7] gibi belirli gereksinimler vardır.

IEEE 802.11 standardı dört temel fiziksel öge içerir: Şekil 1.2'deki gibi kablosuz ortam, dağıtım sistemi (distribution system, DS), erişim noktası (access point, AP) ve istasyon (station, STA). DS, yerel alan ağlarını (local area networks, LAN) ve temel hizmet

setini (basic service set, BSS) birleştirmek için kullanılan sistemdir. Genişletilmiş bir hizmet seti (extended service set, ESS) oluşturmak için birden fazla BSS gereklidir. Adreslenebilir birim, kablosuz bir iletişim cihazı olan bir istasyondur. AP ihtiva etmeyen kablosuz LAN'lara tasarsız ağlar denir. BSS, bir dizi mobil STA, yani araçlar içeren bir altyapıdır.



Şekil 1.2 IEEE 802.11 bileşenleri

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 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 sunulmuştur. [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 tespit edilen eksiklik olarak yazarların yeniden iletim mekanizmasını dikkate almadıkları ve veri hızı analizini yapmadıkları görülmektedir. Yazarlar, [11]'de, düğüm nodu 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 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 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.

Herhangi bir çarpışma olmazsa veya iletilen bir paket çarpışma nedeniyle kaybolursa, iletilen bir paketin başarılı bir şekilde alındığı hesaba katıldığında tüm bu modellerde ideal bir iletim kanalı varsayılmıştır. Gerçekte, gölgeleme, sönmüleme ve çok yollu yayılma nedeniyle, iletilen bir sinyal alıcıya farklı güç seviyelerinde ulaşır. Çarpışma olmamasına rağmen, bu etkiler altında kod çözme hatası nedeniyle iletilen bir paket kaybolabilir [21]. Alıcıda en yüksek güce sahip paket, eşzamanlı iletimler için başarıyla alınabilir [21]. Aşağıda üç farklı sönmülemeli kanalı modeli verilmektedir:

Nakagami- m dağılımı ve Rayleigh dağılımlarını içerir. Nakagami- m dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu, merkezi ki-kare dağılımının temelini oluşturur. Buradaki m değeri Nakagami- m ’nin sönmüleme parametresidir ve 0.5 ile ∞ arasında değişir. Nakagami dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, pdf) şöyledir:

$$f_Y(y) = \frac{1}{y\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{my\sigma_{Noise}}{\sigma_R\Omega}\right) \left(\frac{my\sigma_{Noise}}{\sigma_R\Omega}\right)^m, \quad y \geq 0 \quad (1.1)$$

burada $\Gamma(m)$, $\Omega = E[Y^2]$ olan Gama fonksiyonudur. Nakagami- m , $m = 0.5$ olduğunda tek yönlü Gauss dağılımı ve $m = 1$ olduğunda Rayleigh dağılımı verir. $m \rightarrow \infty$

olduğunda, Nakagami-m sönümleme kanalı AWGN kanalına yakınsar. Rayleigh dağılımının pdf'si

$$f_Y(y) = \frac{y}{\sigma_R^2} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_R^2}\right), \quad y \geq 0 \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir. Bir sistemin avantajı, en kötü koşullarda başarısına bağlı olduğundan, iletişim sistemlerinin hata performansı çoğunlukla Rayleigh sönümleme kanalında incelenir.

VANET'ler için IEEE 802.11 protokolünün performans araştırması [22–27] yapılmıştır. [22–24]'te, yalnızca güvenlik mesajları dikkate alınmıştır ve yalnızca güvenlikle ilgili olmayan veriler [25–27]'de dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, IEEE 802.11, yüksek kanal çekişmesi, mobilite nedeniyle hızlı ağ topolojisi değişiklikleri vb. nedenleriyle VANET kriterlerini karşılayamaz. Kümeleme, kanal çekişmesini sınırlayarak gecikmeyi azaltır, ağ topolojisini verimli bir şekilde kontrol eder ve geçiş başarı oranını artırır [28]. IEEE 802.11 DCF ve IEEE 802.11 EDCAF'ın etkisi, sırasıyla [24, 26, 27, 29–33] ve [16, 34–37] içinde anlatılmaktadır. [38]'de VANET ağlar için CCB-MAC olarak adlandırılan işbirlikli iletişime dayalı küme tabanlı bir MAC protokolü önerilmiştir. CCB-MAC protokolü yalnızca sm mesajlar için önerilmiştir ve CCB-MAC protokolü, zaman bölmeli çoklu erişime (TDMA) dayalı olarak sunulmuştur. [39]'da, iletimin güvenilirliğini artırmak ve ayrıca TDMA tabanlı VANET'lerdeki farklı uygulamalar için QoS'yi desteklemek için çok kanallı işbirliğine dayalı bir MAC protokolü önerilmiştir. Ayrıca, bu protokol gizli düğüm terminal probleminden muzdariptir. Ayrılmamış zaman aralıkları sırasında, kanal boşta olsa bile, kaynak araç düğüm bir başarısızlık geçişi üzerine yeniden iletim için bir sonraki çerçeveyi bekler [40], kanal kullanımını kolaylaştırmak ve ağ kararlılığını korumak için VANET ağlarda hibrit küme tabanlı bir MAC protokolü önerilmektedir. Ancak, bu protokol yalnızca sm mesajları için önerilmiştir. [41]'de, TDMA tabanlı VANET'ler için küme tabanlı çok kanallı bir MAC protokolü önerilmiştir. TDMA tabanlı MAC protokolleri [9, 38, 40, 41], zaman dilimlerini boşa harcayan ağdaki komşu düğümlerin olmaması nedeniyle bir çerçevenin tüm zaman aralıklarını kullanamaz. Sonuç olarak, TDMA tabanlı MAC protokolü mevcut kaynakları kullanmada başarısızdır. Ayrıca, boşta zaman dilimi yoksa veri iletimi veya kümeleme mümkün olmayacaktır. [42]'de, DMMAC olarak adlandırılan VANET ağlar için bir MAC protokolü önerilmektedir. Ancak, DMMAC protokolü yalnızca sm mesajları için kullanılır. [43]'te, VANET için çok noktalı küme tabanlı hibrit mimari önerilmiştir ve bu da yalnızca güvenlik mesajı yayımı içindir. [44]'te, VANET ağlar için küme tabanlı veri indirme ve yönlendirme yöntemi önerilmiştir. Bununla birlikte, yalnızca verim analizi verilir ancak gecikme ve paket düşme oranı (packet dropping rate, PDR) analizi sağlanmaz. VANET ağlar için kümeleme tekniklerinin karşılaştırmalı bir çalışması [45]'de verilmiştir. IEEE 802.11

standartı, yüksek yoğunluklu ağda çekişmeye dayalı rastgele erişim şemasından muzdariptir. Dahası, IEEE 802.11 standardındaki RTS/CTS yöntemi, RTS'den sonra CTS gerektirdiğinden yayın (broadcast) modunda çalışmamaktadır. Bu yüzden, mesaj tüm araç düğümlere yayınlandığında, tüm araç düğümlerin CTS göndermesi gerekmektedir. Eşzamanlı CTS iletimi daha fazla çarpışmaya neden olacaktır [46]. Ayrıca, mevcut küme tabanlı mekanizmalar sm mesajlar için 100 msn'lik katı gecikme gereksinimini karşılamamaktadır. Dahası, bu mevcut küme tabanlı çalışmalar [38, 40, 42–44] yalnızca sm mesajları için bir mekanizma sağlar. Bu nedenle, hem sm hem de nsm mesajları iletimi için etkili bir MAC protokolüne ihtiyaç vardır. Hareketliliğin etkisi de dikkate alınmalıdır [47].

İşbirlikli iletişim, komşu araç düğümlerin yardımıyla iletim performansını iyileştirmektedir [48]. İşbirliğine dayalı iletişim, kullanıcı hareketliliğinden kaynaklanan bozuklukları hafifletmek ve özellikle daha yüksek verim ve daha düşük gecikmeyle iletişim kalitesini iyileştirmek için VANET'lerdeki iletişimin güvenilirliğini artırabilir, özellikle güvenlik mesajları, 100 msn'den fazla gecikmeyle karşılaşmamalıdır [5–7, 49]. IEEE 802.11 tabanlı VANET ağların etkisi ve tek noktaya yayın (unicast) iletimi için veri hızı analizi [50]'de sağlanmıştır. VANET ağlar için hareketlilik modeli [51]'de sunulmuştur. IEEE 802.11p'nin VANET'lerdeki etkisi [9, 15, 52, 53]'te incelenmiştir. IEEE 802.11p EDCA yönteminin etkisi [10, 20, 54]'te araştırılmıştır. MAC protokolü tasarlamak, topolojiyi değiştiren yüksek hareketlilik nedeniyle VANET ağlar oldukça için zordur [55]. VANET için işbirlikli kümeleme tabanlı bir MAC protokolü olan CCB-MAC [38]'de önerilmektedir. CCB-MAC'de yalnızca güvenlik sm mesajları ele alınmıştır. [56]'da, IEEE 802.11 tabanlı VANET'ler için ADC-MAC adlı bir ortak MAC protokolü verilmektedir. ADC-MAC, sm mesajları için uygun olmayan IEEE 802.11 standardındaki RTS/CTS mekanizmasını kullanmıştır. RTS tüm düğümlere yayınlanacağından, tüm düğümler daha fazla çarpışmaya neden olan CTS gönderecektir [49]. [57]'de, CAH-MAC, TDMA tabanlı işbirlikli MAC protokolü VANET'ler için önerilmiştir. CAH-MAC yalnızca unicast iletişimi desteklemektedir. CAH-MAC'de, bir araç düğümü, ayrı ayrı işbirliği için bir ve iki atlamalı yakın düğümlerinin bir listesini tutmaktadır. Trafik, kanal durumu ve ağ topolojisindeki değişiklikler VANET ağlarda oldukça normaldir. Bu durumda, kaynak araç düğümünün röle düğümü bulmaması veya rölelerin, veri hızını azaltan ve paket teslimatında gecikmeye neden olan işbirliğini gerçekleştirmede başarısız olma olasılığı yüksektir. Dahası, CAH-MAC'de, bitişik araç düğümleri, ayrılmamış zaman aralıklarını kullanarak işbirliği yapar. Sonuç olarak, uygun (boşta) zaman aralığı yoksa işbirlikli iletişim mümkün değildir. [58]'te, işbirliği çatışmalarından kaçınarak bir zaman aralığını verimli bir şekilde kullanmak için gelişmiş bir CAH-MAC önerilmiştir. [59]'de, VANET'lerdeki sm

mesajları için ortak bir MAC önerilmiştir. [60]'da VANET ağlar için TDMA tabanlı bir programlama protokolü önerilmiştir. [61]'de VeMAC, aynı zamanda TDMA tabanlı bir MAC protokolü olan VANET için önerilmiştir. TDMA tabanlı MAC protokolleri, VANET'lerin dinamik topolojisi nedeniyle zaman aralıklarının boşa gitmesine neden olabilir. Ayrılmamış zaman aralıkları sırasında, kanal boşta olsa da, kaynak araç düğümü, VeMAC'de yüksek gecikmeye ve düşük veri hızına neden olan iletim için bir sonraki çerçeveyi beklemektedir. Dahası, bu metodolojiler, sunulan radyo kaynaklarının kullanılmasında etkisiz olabilir. VANET'lerdeki kaynak paylaşımı sorunu [62, 63]'te araştırılmıştır. Hem periyodik hem de olay güdümlü sm mesajları için VeMAC'ın mesaj gönderme tekniği [64]'te incelenmiştir. [65]'de, gecikme kısıtlamasını karşılamayan VANET'lerdeki sm mesajları için yeni bir işbirliğine dayalı MAC protokolü sunulmaktadır. [66]'da VC-MAC, VANET'lerde ağ geçidi indirmesi için sağlanmıştır. [67]'de, yayının güvenilirliğini artırmak için komşu düğümlerin paketi göndericiden yeniden yayınladığı araç ağları için işbirliğine dayalı yayın iletimi (CRB) tanıtılmıştır. CRB seçimi, kanal durumlarına göre proaktif olarak elde edilir. Ancak, gecikme analizi [57, 61, 66, 67]'de yapılmamıştır. VANET ağlar için işbirlikli iletişime dayalı bir MAC protokolü [68]'de, önerilmiştir. Ancak [68]'de, sm mesajlarının gecikme kriterleri karşılanamamıştır. [69]'da, VANET'ler için sm mesajlarının gecikme gereksinimini karşılamayan IEEE 802.11 tabanlı işbirlikli MAC protokolü olan bir MAC protokolü önerilmektedir. [38, 57, 59, 61, 65]'te, işbirliğine dayalı MAC yalnızca sm mesajları için önerilmiştir ve hareketlilik dikkate alınmamıştır. [69, 70]'de, VANET'lerde yalnızca güvenlikle ilgili olmayan veriler için işbirliğine dayalı MAC protokolü önerilmektedir. Daha yüksek verimle iletişim kalitesini sağlamak için hem sm hem de nsm mesajlar için ve ayrıca paket düşme oranı PDR ve gecikmeyi azaltarak güvenilir ve verimli iletişim sağlamak için işbirliğine dayalı bir MAC gereklidir.

Fiziksel (PHY) katmandaki çoklu giriş çoklu çıkış (multiple-input multiple-output, MIMO) teknolojisi, spektral olarak oldukça etkili bir potansiyel göstermiştir. PHY katman standardı, dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, MIMO ve OFDM'nin kombinasyonu, yüksek seviyelerde veri aktarım hızı elde etme yeteneğine sahiptir [2, 71].

VANET ağlar için MAC protokolü tasarlamak, ağ topolojisini anında değiştiren yüksek mobilite nedeniyle oldukça zordur [72]. VANET ağlarda yüksek hızda veri iletişimi, kısıtlamaların güvenilirlik ve gecikme ile ilgili olduğu yerlerde çok önemlidir. Dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), bu sınırlamanın üstesinden gelmek için kullanılabilir. Fiziksel (PHY) katman standardı, OFDM'i temel alarak ortaya çıkmıştır [2]. Geçici ağlar için OFDM'nin kullanımı

[73, 74]'te çeşitli çalışmalarla araştırılmıştır. [75, 76]'te, OFDM'nin çeşitli yönleri tartışılmaktadır. Ancak bu çalışmalar kaynak tahsisi konusunu dikkate almamaktadır. OFDM, semboller arası paraziti (inter-symbol-interference, ISI) ortadan kaldırır ve alt taşıyıcıların bant genişliğinin, taşıyıcılar arası parazit (inter-carrier-interference, ICI) olmadan üst üste gelmesine olanak sağlar. Ayrıca, kablosuz bağlantının her iki tarafında birden fazla antenin kullanıldığı MIMO sistemleri, yüksek veri hızı oranları ve spektral verimlilik sunmaktadırlar [77–79]. MIMO sistemleri üzerine yapılan çalışmaların çoğu dar bantlı kanallar bazında yapılmıştır. Bununla birlikte, geniş bant MIMO kanalları, yüksek kapasite kullanımına ve frekans çeşitliliğinin yanı sıra uzamsal çeşitliliğe de izin vermektedir. OFDM'nin [80] geniş bantlı kablosuz sistemlerde alıcı karmaşıklığını önemli ölçüde azalttığı göz önüne alındığında, MIMO teknolojisinin OFDM [81] ile kullanılması, yeni nesil geniş bant kablosuz iletişim sistemlerinde çok ilgi çekici bir çözüm olarak görülmektedir. Bu tekniklerin birleştirilmesi, iyi kapsama alanı, verimli iletim, yüksek en yüksek veri hızları ve yüksek spektral performans dahil olmak üzere, ihtiyaç duyulan cihaz gereksinimlerini karşılayacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Güvenilir olmayan kablosuz iletim ortamından kaynaklanan çeşitli engellere ek olarak, VANET'lerin geliştirilmesi ve çalıştırılmasının, diğer kablosuz ağ biçimleriyle karşılaştırıldığında bazı benzersiz zorlukları vardır. Yüksek düğüm hareketliliği, araçlar arasında göreceli hareketlilik, sık bağlantı kopmasıyla birlikte dinamik topoloji değişiklikleri ve yüksek öncelikli güvenlik mesajlarının katı gecikme kısıtlamaları, VANET'lerde bazı yaygın zorluklardır. VANET'lerde, araçlar arasında yüksek hareketlilik ve göreceli hareketlilik, sık bağlantı kopması, çarpışmaya ve paket kaybına neden olan dengesiz iletişim ile hızlı topoloji değişikliklerine neden olabilir. Buna çözüm olarak, işbirliğine dayalı iletim, iletişim güvenilirliğini artırabilir ve VANET'lerdeki hareketliliğin neden olduğu kablosuz kanal bozukluklarını hafifleterek daha düşük gecikmeyle iletişim hızını artırabilir. Tezin temel amacı, kullanıcı hareketliliğinden kaynaklanan bozuklukları azaltarak VANET'lerde iletişimin güvenilirliğini artırmak ve daha yüksek verim ve daha düşük gecikme ile iletişim kalitesini iyileştirmektir, özellikle güvenlik mesajlarında 100 msn'den fazla gecikme olmamalıdır.

Bu tezin katkıları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Bölüm 2'de, IEEE 802.11 DCF'in performansı analiz edilmektedir. Markov zincir modeline dayalı analitik model, performansı etkileyebilecek tüm parametrelerin dikkate alındığı bir ortamda geliştirilmiştir. Performans ölçütleri ile MAC

parametreleri arasındaki ilişki sağlanmıştır. VANET'ler için IEEE 802.11 MAC protokolünün performansını incelemek için sayısal sonuçlar sunulup IEEE 802.11'in VANET'ler için performans kriterlerini karşılayıp karşılayamayacağı kontrol edilmiştir. Aşağıdaki yayınlar bu bölümün katkılarıdır.

- M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. Ilhan, "Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETs," in Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 35, no. 3, pp. 1575-1588, 2020.
- M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. Ilhan, "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, Greece, 2018, pp. 1-4.
- M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. Ilhan, "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, 2017, pp. 346-351.

Bölüm 3'te, VANET'ler için işbirlikli MAC (cooperative relaying medium access channel, CR-MAC) protokolünün Nakagami-m kanal sönümlemesi üzerine performansı araştırılmıştır. Önerilen protokol, veri hızını artırmak için esas olarak doğrudan iletim, işbirlikli iletim ve çok atlamalı iletim gibi üç veri iletim modu içermektedir. Ayrıca, uygun veri iletim modunu ve optimal röleyi seçmek için bir algoritma tanımlanmaktadır. Yalnızca doğrudan iletişim için özel olarak tasarlanmış IEEE 802.11 standartlarında tanımlanan mekanizma, işbirlikli iletişim için uygun değildir. Bu yüzden, yeni kontrol paketleri kullanılmıştır ve mevcut kontrol paketi formatı, işbirlikli iletişimi desteklemek üzere değiştirilmiştir. Önerilen CR-MAC protokolünün performans analizini gerçekleştirmek için, doymamış Markov Zinciri modeline dayanan bir analitik model simülasyonla türetilip ve doğrulanmıştır. Aşağıdaki yayınlar bu bölümün katkılarıdır.

- M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "Performance of the CR-MAC with channel fading and capture effect under practical traffic scenarios for VANETs," IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON), New York City, USA, 2019, pp. 647-652.
- M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. Ilhan, "CR-MAC: Cooperative relaying MAC protocol for VANETs," IEEE Scientific Meeting

on Electrical-Electronics Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-4.

Bölüm 4'te, OEC-MAC olarak adlandırılan, VANET'ler için yeni bir OFDMA tabanlı verimli işbirliğine dayalı MAC protokolü önerilmektedir. IEEE 802.11 tarafından kullanılan CSMA/CA erişim mekanizması, VANET ağların dinamik yapısı nedeniyle en uygun ve verimli olduğu için önerilen OEC-MAC protokolünde kullanılmıştır. Bu nedenle, önerilen OEC-MAC protokolü IEEE 802.11 ile uyumlu çalışmaktadır. Uygun bir aktarım modunu belirlemek için bir algoritma önerilmiştir. İşbirliği kazancı röleye bağlıdır ve bu optimum röle seçim prosedürü de açıklanmıştır. İşbirliğine dayalı iletişim ve araç hareketliliğinin getirdiği ek yük dikkate alınmıştır. Önerilen OEC-MAC protokolünün Markov zincir modeli tabanlı analitik analizi yapılmıştır. Daha sonra, OEC-MAC protokolü sayısal çalışmalarla değerlendirilmiştir. Sayısal sonuçların, önerilen OEC-MAC protokolünün performansı arttırdığını göstermektedir. Bu bölümden aşağıdaki yayın elde edilmiştir.

- M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. İlhan, "OEC-MAC: A Novel OFDMA Based Efficient Cooperative MAC Protocol for VANETS," in IEEE Access, vol. 8, pp. 94665-94677, 2020.

Bölüm 5'te, VANET'lerin doymamış koşulu altında IEEE 802.11'in performansının analizi, 3D Markov zincir modeli temelinde verilmiştir. Bu yeni modele dayanarak, Nakagami-m sönümlmeli kanalları üzerinden alma çeşitliliğine sahip çok girişli çok çıkışlı - ortogonal frekans bölmeli çoğullama (MIMO-OFDM) sisteminin bit hata oranı (BER) performansı analitik olarak değerlendirilmiştir. Performansı etkileyen parametreler dikkate alınıp ve parametreler ile performans ölçümleri arasındaki ilişkiler türetilmiştir. Başarılı iletim olasılığı, kesinti olasılığı, BER, veri hızı ve gecikme ifadeleri elde edilmiştir. Ayrıca, analitik çalışmaları doğrulayan sayısal sonuçlar sunulmuştur. Bu bölümün katkıları aşağıdaki gibidir.

- M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "A novel MIMO-OFDM based MAC protocol for VANETs," IEEE Transaction on Intelligent Transportation System, under review, pp. 1-14, 2021.
- M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "Improvement of performance with MIMO enabled MAC protocol for VANETs," IEEE Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-4.

Bölüm 6'da, IEEE 802.11'in performansı optimize edilmiştir. Bir performans optimizasyon mekanizması sunulmuştur. Ayrıca 3 farklı yapay zeka algoritmasıyla veri hızı optimizasyonu yapılmıştır. Analitik analizi doğrulayan Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmuştur. Önerilmiş protokollerin hesaplanma süreleri verilmiştir.

- M. A. Karabulut, A. F. M. Shahen Shah and H. Ilhan, "Performance Optimization by Using Artificial Neural Network Algorithms in VANETs," IEEE 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 2019, pp. 633-636.

1.3 Hipotez

Yararlı uygulamalara sahip olmak için, araçlar ve mevcut ağ altyapıları arasındaki iletişim güvenilir ve verimli olmalıdır. İşbirlikli iletişim, VANET ağlarda hareketliliğin neden olduğu kablosuz kanal bozukluklarını azaltarak iletişim bağlantısı güvenilirliğini artırabilir. İşbirlikli iletişim, komşu araç düğümlerinin yardımıyla iletişim performansını iyileştirebilmektedir. Röle düğümü, hem kaynak araç düğümü hem de hedef araç düğümleriyle iyi bir kanal durumuna sahip olması sayesinde paketleri hedef araç düğümüne ileten komşu araç düğümler arasında bir düğümdür. Hedef araç düğümüne, kötü bir kanal durumu yaşayan araç düğüm paketi, bir röle/ler düğüm/leri tarafından iletebilir. İşbirlikli iletişim, bir röle düğümün yardımıyla paket teslimatının güvenilirliği nedeniyle tüm ağın verimini artırabilir. VANET ağlarda yüksek veri hızı iletişimi, kısıtlamaların güvenilirlik ve gecikme ile ilgili olduğu yerlerde çok önemlidir. OFDMA, bu sınırlamanın üstesinden gelmek için kullanılabilir. Ayrıca, kablosuz bağlantının her iki tarafında birden fazla antenin kullanıldığı MIMO sistemleri, yüksek veri hızı oranları ve spektral verimlilik sunmaktadırlar. OFDM'nin geniş bantlı kablosuz sistemlerde alıcı karmaşıklığını önemli ölçüde azalttığı göz önüne alındığında, MIMO teknolojisinin OFDM ile kullanılması, yeni nesil geniş bant kablosuz iletişim sistemlerinde çok ilgi çekici bir çözüm olarak görülmektedir.

Bu tezin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: IEEE 802.11'in performans modellemesi ve analizi Bölüm 2'de sunulmuştur. Bölüm 3'te VANET'ler için işbirlikli iletim ortam erişim kontrolü (cooperative realyng medium access channel, CR-MAC) protokolünün Nakagami-m kanal sönümlemesi üzerine performansı incelenmiştir. Bölüm 4'te VANET'ler için yeni bir OFDM tabanlı etlili işbirlikli MAC (OFDMA based efficient cooperative MAC, OEC-MAC) protokolü önerilmiştir. Bölüm 5'te VANET'ler için yeni bir MIMO-OFDM MAC protokolü önerilmiştir. Bölüm 6'te optimizasyon ve önerilmiş protokollerin hesaplanma süreleri verilmiştir. 7. Bölümde de sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2

IEEE 802.11'İN MODELLENMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, IEEE 802.11 modellemesi ve performans analizi yapılmıştır. IEEE 802.11 DCF, Bölüm 2.2'de açıklanmaktadır, Bölüm 2.3'te performans analizi yapılmıştır.

2.1 Dağıtılmış Koordinasyon Fonksiyonu

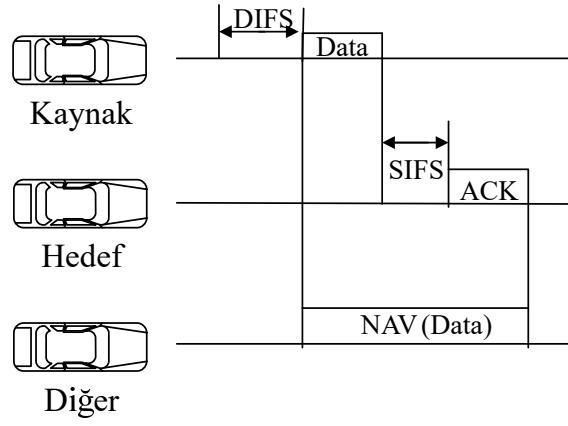
IEEE 802.11 standardındaki MAC [2] protokolü, birden fazla istasyonun ortak bir kanala erişimini koordine etmek için kullanılır. IEEE 802.11 standardındaki MAC mimarisi iki erişim yöntemi içerir: Dağıtılmış koordinasyon fonksiyonu (distributed coordination function, DCF) adı verilen temel bir erişim 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

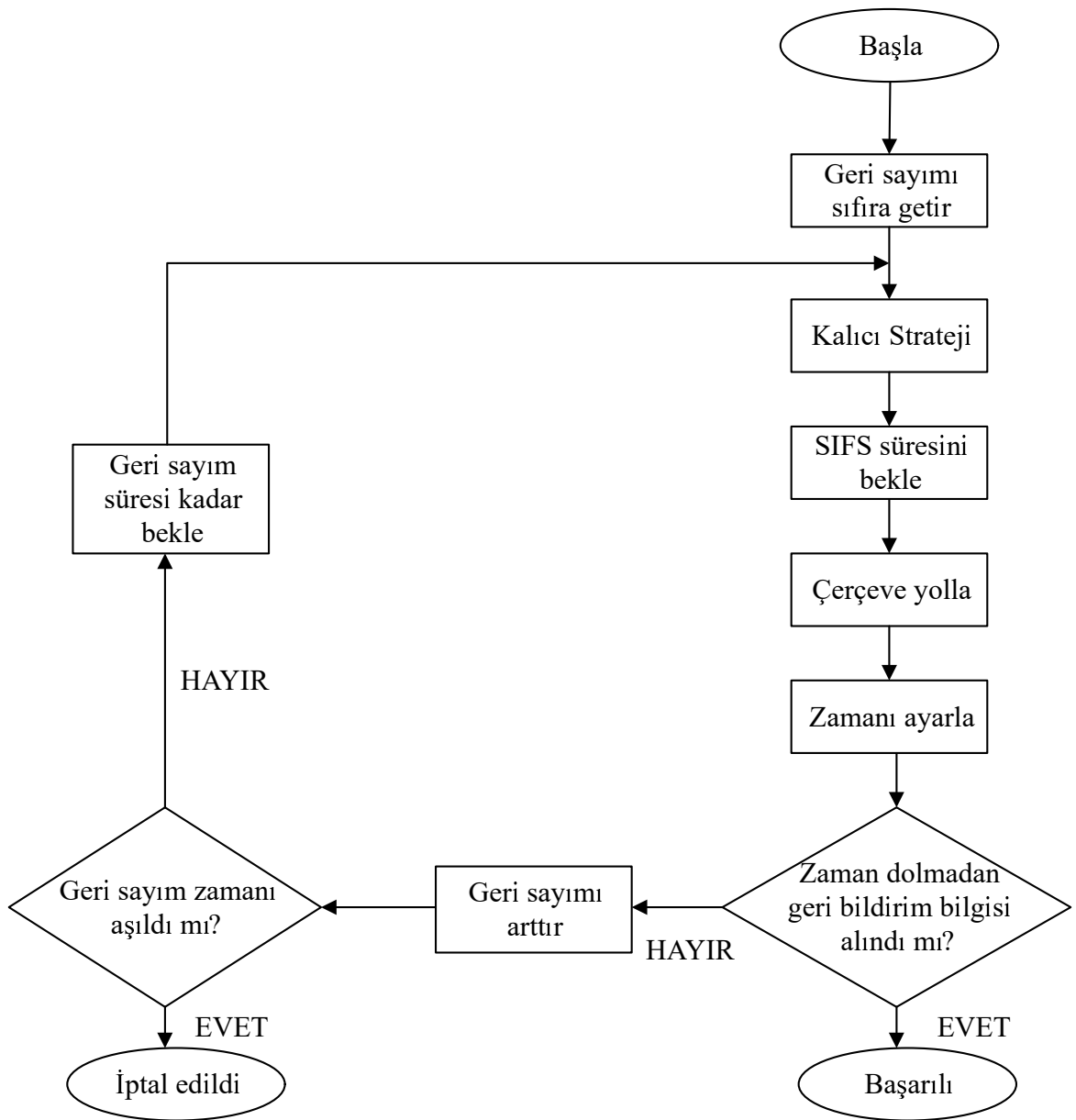
IEEE 802.11 standardındaki MAC katmanının temel erişim yöntemi, çarpışmadan kaçınma ile taşıyıcı duyarlı çoklu erişim (carrier-sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA) tekniği olarak bilinen bir çeşit DCF protokolüdür. Kablosuz ağlarda CSMA/CA tekniği kullanılır çünkü çarpışmayı algılayamazlar, böylece tek çözüm çarpışmadan kaçınmadır. CSMA/CA tekniği, aşağıda verilen yöntemleri kullanarak çarpışmaları önler.

- Kanal boşta bulunduğunda, araç düğümü hemen iletimi gerçekleştirmez. Dahili çerçeve mesafesi (inter-frame space, IFS) denilen bir süre bekler. Kanalın 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, 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 benzemektedir. Çekişme penceresinde, aracın her zaman diliminden sonra kanalı algılaması gerekir. Araç kanalı meşgul bulursa, işlemi tekrar başlatmaz. Sadece zamanlayıcıyı durdurur ve kanal boşta olduğunu algıladığında yeniden başlatır.
- 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 2.1'de gösterilmektedir. DCF dahili çerçeve mesafesi (DCF inter-frame space, DIFS) süresini bekledikten ve geri sayım prosedürünü tamamladıktan sonra kaynak düğüm, hedef düğüme veri gönderir. Hedef, kısa dahili çerçeve mesafesi (short inter-frame space, SIFS) süresini bekler ve daha sonra kanalın meşgul ya da boş durumuna bakılmaksızın bu başarılı iletimi onaylamak için bir alındı bilgisi (acknowledgment, ACK) çerçevesi ile yanıt verir. Kaynak düğüm ile hedef düğüm iletişim durumunda iken kullanılan kanal bloke edilir ve diğer düğümlerin erişimine kapatılır. Şekil 2.2'de CSMA/CA tekniğinin akış diyagramı verilmektedir. Ayrıca Tablo 2.1'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. CW_{min} çekişme penceresinin minimum değerini ifade etmektedir.



Şekil 2.1 CSMA/CA tekniği



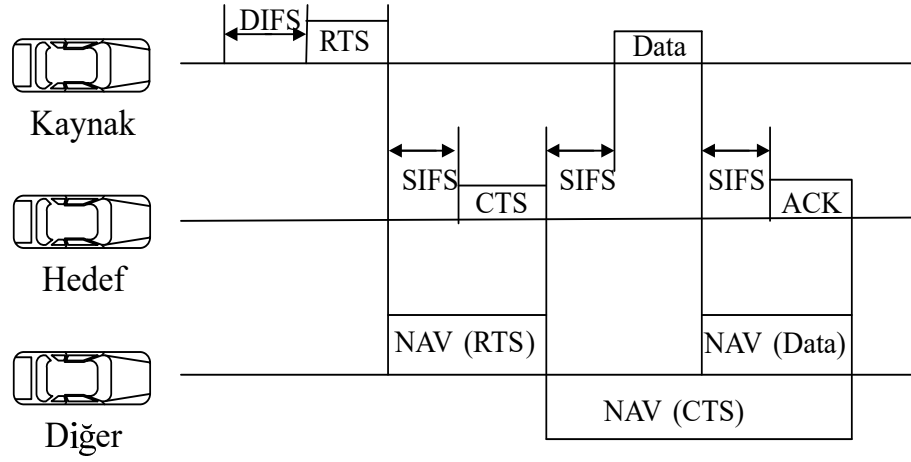
Şekil 2.2 CSMA/CA akış diyagramı

Tablo 2.1 CSMA/CA algoritması

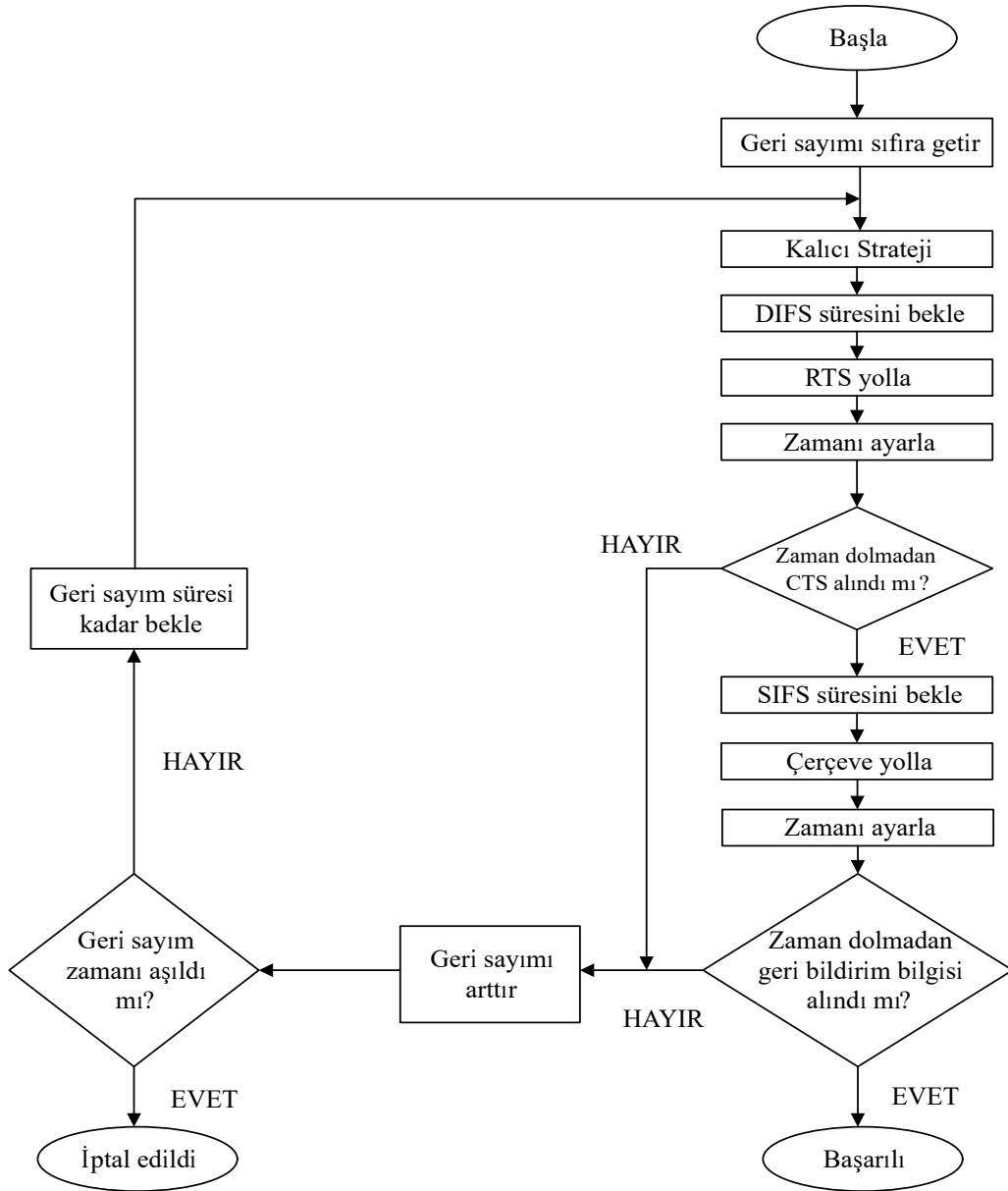
1. if $CH=CH_i$
2. $T_{wait} = T_{DIFS}$ still $CH=CH_i$
3. yolla Data
4. end
5. if $T_{wait} > T_{DIFS}$
6. bekle $CH_i = T_{DIFS}$
7. geri sayım _i = CW_{min}
8. if $CH=CH_i$ her bir zaman diliminde
9. geri sayım _i = geri sayım _i -1,
10. else geri sayım _i = geri sayım _i
11. end
12. end
13. if geri 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 = $2 * CW_{min}$
20. if geri sayım _i = 0
21. Data
22. end
23. end
24. if $m_r = m_{rmax}$, $m_{rmax} = 2m_r * CW_{min}$
25. İptal
26. end

2.1.2 Gönderim İsteği/Gönderime Uygun Tekniği

DCF'in içerdiği diğer bir erişim tekniği olan gönderim isteği/gönderime uygun (request to send/clear to send, RTS/CTS) mekanizması Şekil 2.3'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 kaynak ve hedef düğümleri dışında herhangi bir düğüm, ağ tahsis vektörünü (network allocation vector, NAV), ACK çerçevesinin sonuna kadar iletim işlemini erteleyecek şekilde ayarlar. Şekil 2.4'te RTS/CTS tekniğinin akış diyagramı verilmektedir. Ayrıca, Tablo 2.2'de RTS/CTS tekniğinin algoritması gösterilmektedir.



Şekil 2.3 RTS/CTS tekniği



Şekil 2.4 RTS/CTS akış diyagramı

Tablo 2.2 RTS/CTS algoritması

```

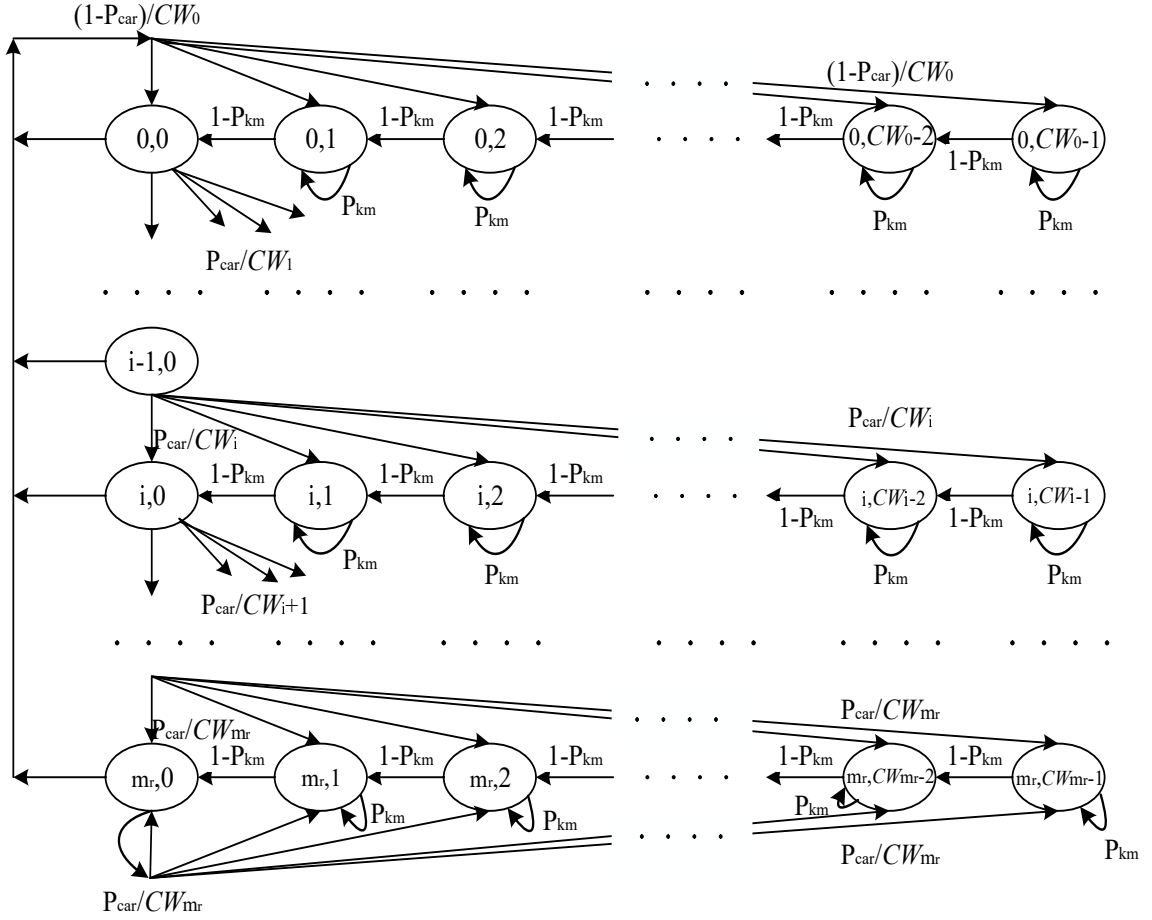
1. if CH=CHi
2.  $T_{wait} = T_{DIFS}$  still CH=CHi
3. yolla Data
4. end
5. if  $T_{wait} > T_{DIFS}$ 
6. bekle CHi =  $T_{DIFS}$ 
7. geri sayımi= $CW_{min}$ 
8. if CH=CHi her bir zaman diliminde
9. geri sayımi = geri sayımi-1,
10. else geri sayımi = geri sayımi
11. end
12. end
13. if geri sayımi = 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 sayımi =  $2 * CW_{min}$ 
20. if geri sayımi = 0
21. Data
22. end
23. end
24. if  $m_r = m_{rmax}$ ,  $m_{rmax} = 2m_r * CW_{min}$ 
25. İptal
26. end

```

2.2 Markov Zincir Modeli

Ele alınan 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 2.5'teki 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 2.5'te, 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 $[0, CW - 1]$ arasındaki bir değeri alır. Kanalin boş olduğu algılandığında, k değeri 1 azaltılır. Kanal meşgul olduğunda, kanal o anki değerinde sabit kalır ve kanalin boş olduğu algılanırsa yeniden 1 azaltılır. k sıfır değerine geldikten sonra paket gönderilir. Ele alınan Markov zincirinde görülen tek aşamalı olasılık ifadeleri şöyledir [30]:



Şekil 2.5 Geri sayım süreç prosedürü için Markov zincir modeli

$$P \{i, k | i, k + 1\} = 1 - P_{km}; [i \in (0, m_r), k \in (0, P_i - 2)]. \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'deki ilk ifade, kanal meşgul olmadığında, her zaman diliminin başlangıcında geri sayım süresinin azaltılacağını ifade eder. İkinci ifade, paketin geri sayım aşaması 0 olduğunda gönderileceğini ve daha sonra $(0, CW_0 - 1)$ 'nin aralıklarında bir değere geri sayım yapıldığını belirtir ve şöyle ifade edilir:

$$P \{0, k | i, 0\} = (1 - P_{car})/CW_0; [i \in (0, m_r), k \in (0, CW_0 - 1)]. \quad (2.2)$$

Çekişme penceresi olarak adlandırılan CW değeri, iletilemeyen iletim sayısına bağlıdır. Minimum çekişme penceresi CW_{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 ($CW_{max} = 2^{m_r} CW_{min}$). m_r 0 ile 9 arasında değer alabilmektedir [30].

$$P \{i, k | i - 1, 0\} = P_{car}/CW_i; [i \in (1, m_r), k \in (0, CW_i - 1)] \quad (2.3)$$

Üçüncü eşitlik (Eş. 2.3) çarpışmanın gerçekleştiğini ve geri sayım aşamasının 1

yükseldiğini belirtir.

$$P\{m_r, k | m_r, 0\} = P_{car} / CW_{m_r}; [k \in (0, CW_{m_r} - 1)]. \quad (2.4)$$

Dördüncü ifade (2.4) ise m_r 'nin maksimum değere ulaştıktan sonra geri sayım aşamasının arttırılamayacağını ifade eder. $CW_i = 2^i CW$ ifadesi geri sayım aşamasını temsil eder ($i \in (0, m_r)$). Tezin bu bölümünde $m_r = 7$ alınmıştır. P_{car} ve P_{km} sırasıyla çarpışma ve kanalın meşgul olma olasılıklarıdır.

$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$, ($i \in (0, m_r)$, $k \in (0, CW_0 - 1)$) zincirin sabit dağılımıdır. Kaynak düğüm ile hedef düğüm iletişime geçtiği ilk anda yani Markov zincir modelinde backoff zaman sayacı ve aşaması 0 olduğu durum şöyle ifade edilebilir [30]:

$$b_{0,0} = \frac{2(1 - 2P_{car})(1 - P_{car})}{(1 - 2P_{car})(CW + 1) + P_{car}CW(1 - (2P_{car})^{m_r})}. \quad (2.5)$$

P_i rastgele seçilen bir zaman diliminde bir paketin iletilmesi olasılığı olmak üzere şöyle ifade edilebilir:

$$P_i = \sum_{i=0}^{m_r} b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - P_{cek}} = \frac{2(1 - 2P_{car})}{(1 - 2P_{car})(CW + 1) + P_{car}CW(1 - (2P_{car})^{m_r})}. \quad (2.6)$$

$P_{car} = 0$ üstel geri sayım aşamasının dikkate alınması gerekmediğinde P_i , P_{car} 'a bağımlı değildir ve eşitlik 2.6'daki ifade

$$P_i = \frac{2}{CW + 1} \quad (2.7)$$

biçimine dönüşür. $P_{car} = 1/2$ alındığında

$$P_i = \frac{2}{1 + CW + m_r CW / 2} \quad (2.8)$$

şeklinde olur. İletim süresince kalan $N-1$ araç düğümünden en az biri paket gönderdiğinde paket çarpışmaya neden olur ve bu durumda P_{car} ifadesi,

$$P_{car} = 1 - \left(\frac{CW + m_r CW / 2 - 1}{CW + m_r CW / 2 + 1} \right)^{N-1} \quad (2.9)$$

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

$$P_{km} = 1 - \left(\frac{CW + m_r CW / 2 - 1}{CW + m_r CW / 2 + 1} \right)^N \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Gönderilen bir paketin başarıyla teslim alındığı ve başarılı iletim olasılığı P_{bas}

$$P_{bas} = \frac{2N(CW + m_r CW/2 - 1)^{N-1}}{(CW + m_r CW/2 + 1)^N - 2^N} \quad (2.11)$$

biçiminde ifade edilebilir. İletilen paketlerin varış olasılığı, ortalama varış oranı λ_{ort} olan Poisson dağılımı ile ifade edilebilir. Bu dağılımın olasılığı [82]

$$P_p = 1 - \exp(-\lambda_{ort} T_m) \quad (2.12)$$

şeklinde gösterilir. Burada, T_m bir Markov zincir sürecinde bir araç düğümünün tahmini iletim süresidir ve

$$T_m = (1 - P_{km})T_{slot} + P_{km}P_{bas}T_{bas} + P_{km}(1 - P_{bas})T_{car} \quad (2.13)$$

olarak hesaplanabilir. T_{slot} zaman dilimi süresidir. Eş. 2.13'te verilen T_{bas} ve T_{car} sırasıyla başarılı ve çarpışan paket iletiminin zaman süresidir ve bu süreler RTS/CTS mekanizması için sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T_{bas}^{RTS/CTS} = T_{DIFS} + 3T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + \frac{L + L_H}{R} + T_{ACK} + 4T_{gec} \quad (2.14)$$

$$T_{car}^{RTS/CTS} = T_{DIFS} + T_{RTS} + T_{gec} \quad (2.15)$$

CSMA/CA için,

$$T_{bas}^{CSMA/CA} = T_{DIFS} + T_{SIFS} + \frac{L + L_H}{R} + T_{ACK} + T_{gec} \quad (2.16)$$

$$T_{car}^{CSMA/CA} = T_{DIFS} + \frac{L + L_H}{R} + T_{gec} \quad (2.17)$$

gibi ifade edilebilir. 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 [2].

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

$$\lambda_{arac} = y_s t_y v, \quad (2.18)$$

biçiminde gösterilebilir. Eş. 2.18'de verilen y_s yoldaki şerit sayısını ve t_y trafik

yoğunluğunu temsil etmektedir [83]. Trafik yoğunluğu t_y ile ortalama hız v arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlikteki gibidir:

$$t_y = t_a \left(1 - \frac{v}{v_s} \right). \quad (2.19)$$

Burada, t_a trafik sıkışıklığı yoğunluğunu göstermektedir. v_s serbest akış oranını belirtir. v , v_{min} ve v_{max} arasında düzgün dağılıma sahiptir [82].

Araç sayısı, hızı ve iletim menzili M arasındaki ilişki

$$N = \frac{\lambda_{arac} M}{v} \quad (2.20)$$

olarak ifade edilebilir. İletim aralığındaki ortalama araç sayısı [82]

$$E[N] = 2\beta M \quad (2.21)$$

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 [82]

$$P(x, B_r) = \frac{(\beta L_r)^x \exp(-\beta B_r)}{x!} \quad (2.22)$$

biçiminde gösterilebilir.

2.3 Veri Hızı Analizi ve Paket Bırakma Oranı Analizi

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

$$\eta = \frac{E[\text{bir zaman diliminde iletilen bilgi miktarı}]}{E[\text{zaman diliminin uzunluğu}]} \quad (2.23)$$

biçiminde verilebilir. Burada, $E[.]$ beklenen değer operatörünü temsil etmektedir. η ; başarılı iletim olasılığı, kanalın meşgul olma olasılığı, veri uzunluğu ve bir araç düğümünün tahmini iletim süresi cinsinden

$$\eta = \frac{P_{bas} P_{km} L}{T_m} \quad (2.24)$$

biçiminde ifade edilebilir. η , eşitlik 2.10, 2.11 ve 2.13'teki ifadelerden yararlanarak

$$\eta = \frac{P_{bas} P_{km} L}{(1 - P_{km}) T_{slot} + P_{km} P_{bas} T_{bas} + P_{km} (1 - P_{bas}) T_{car}} \quad (2.25)$$

biçiminde yazılabilir. S daha kapsamlı olarak eşitlik 2.26'daki gibi ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{N \left(\frac{CW + m_r CW/2 - 1}{CW + m_r CW/2 + 1} \right)^N \left(\frac{2}{CW + m_r CW/2 - 1} \right) L}{\left(\frac{2}{CW + m_r CW/2 + 1} \right)^N (T_{slot} - T_{car}) + N \left(\frac{CW + m_r CW/2 - 1}{CW + m_r CW/2 + 1} \right)^N \left(\frac{2}{CW + m_r CW/2 - 1} \right) (T_{bas} - T_{car}) + T_{car}}. \quad (2.26)$$

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

$$PDR = (1 - P_{bas})^{m_r}, \quad (2.27)$$

olarak ifade edilir.

2.4 Gecikme Analizi

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 aşağıdaki ifadeyle bulunabilir:

$$E[G] = E[CS_{cer}](E[BG] + T_{car} + T_o) + (E[BG] + T_{bas}). \quad (2.28)$$

Burada, $E[CS_{cer}]$ başarılı iletme 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 iletmeden önceki ortalama çarpışma sayısı, bir iletimin başarılı olması olasılığı P_{bas} kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$E[S_{er}] = \frac{1}{P_{bas}} - 1. \quad (2.29)$$

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

$$E[X] = \sum_{i=0}^{m_r} \sum_{k=1}^{P_i-1} k b_{i,k} \quad (2.30)$$

olarak hesaplanır. Daha ayrıntılı olarak

$$E[X] = \frac{b_{0,0}}{6(1-P_{km})} \frac{CW^2(1-P_{car}-3P_{car}(4P_{car})^{m_r})+4P_{car}-1}{(1-4P_{car})(1-P_{car})} \quad (2.31)$$

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 ($E[\varphi]$),

$$E[N_D] = \frac{E[X]}{\max(E[\varphi], 1)} - 1 \quad (2.32)$$

ve

$$E[D] = E[N_D](P_{bas}T_{bas} + (1-P_{bas})T_{car}) \quad (2.33)$$

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

$$E[BG] = E[X] + E[N_D](P_{bas}T_{bas} + (1-P_{bas})T_{car}) \quad (2.34)$$

elde edilebilir. Son olarak, T_O zaman erişim yöntemine bağlıdır ve

$$T_O = \left\{ \begin{array}{l} SIFS + ACK_timeout \\ SIFS + CTS_timeout \end{array} \right\} \quad (2.35)$$

biçiminde ifade edilebilir. Eşitlik 2.29, 2.34 ve 2.35'te verilen ifadeler eşitlik 2.28'nin içine yazıldığında, ortalama çerçeve gecikmesi hesaplanabilir.

2.5 Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, VANET ağlar için IEEE 802.11 standardındaki DCF protokolünün performansı değerlendirilmiş ve teorik analizi yapılmıştır. 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 2.3, benzetim sonuçları için gerekli parametreleri içermektedir.

Şekil 2.6, farklı araç sayısına göre veri hızının değişimini göstermektedir. Bu şekil için paket boyutu 512 byte alınmıştır. 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

Tablo 2.3 Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri

Parametreler	Değerleri
$T_{slot}, T_{delay}, T_{SIFS}, T_{DIFS} \mu s$	20, 1, 10, 50
RTS, CTS, ACK (bytes)	20, 14, 14
L_h, L (bytes)	50, 512, 300
Veri iletim hızı R (Mbps)	1, 11
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)	140
İletim menzili M (m)	500
Araç sayısı, N (km/h)	0-200

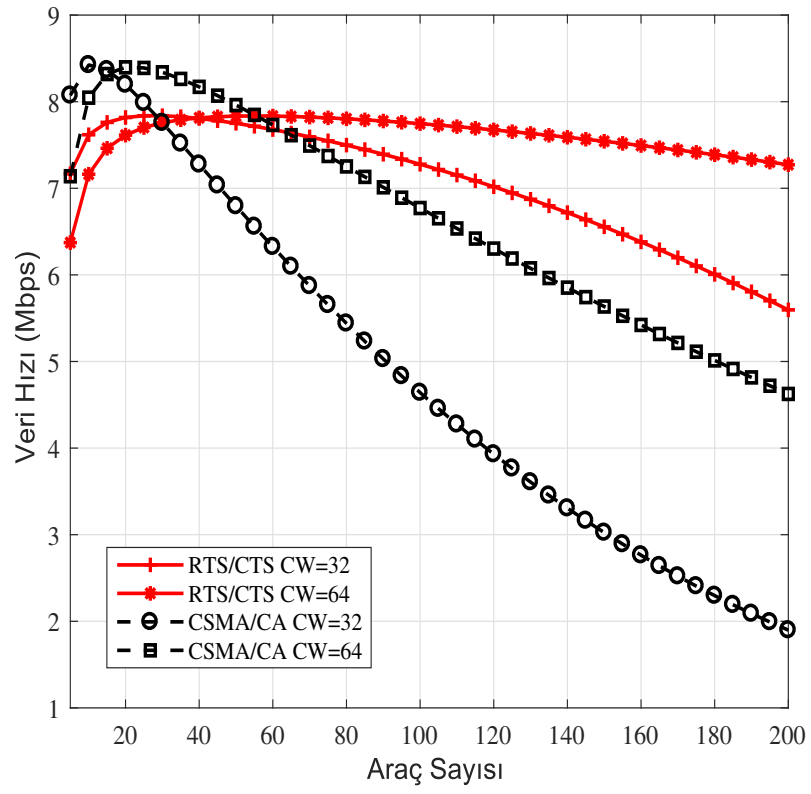
nedeniyle daha fazla çarpışma olur. Ayrıca, çekişme penceresinin uzunluğu düşük olduğunda veri hızının daha yüksek olduğu şekilden görülmektedir. Ağda bulunan araç sayısının az olduğu durumda CSMA/CA'nın performansının daha iyi olduğu şekilden gözükmemektedir. Araç sayısının fazla olduğu durumda ise RTS/CTS tekniğinin gizli terminallerle başa çıkma kabiliyeti hesaba katıldığında, bu erişim yönteminin CSMA/CA tekniğinden daha başarılı olduğu şekilden de anlaşılmaktadır.

Şekil 2.7, 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.

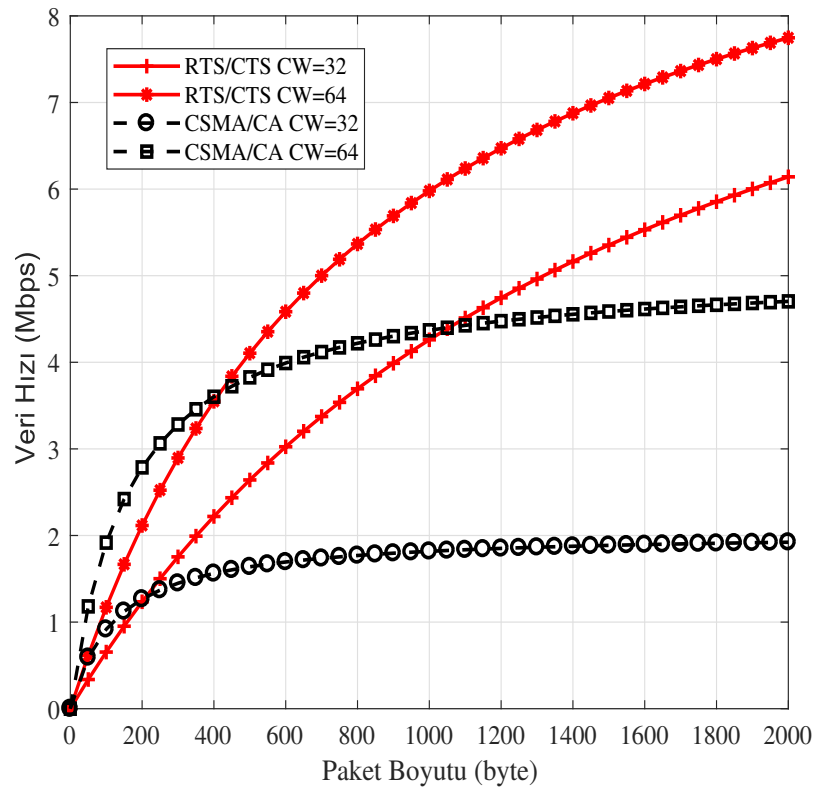
Şekil 2.8, araç hızına karşı veri hızının değişimini göstermektedir. Araç sayısı 200 alınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi araç hızının artmasıyla veri hızı azalmaktadır. Yüksek düğüm hareketliliği, sık bağlantı kopması ve çarpışma ve paket kaybına neden olan kararsız iletişim ile hızlı topoloji değişikliklerine neden olabilir.

Şekil 2.9, farklı CW 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 CW boyutunda çarpışma fazla olduğundan iletim için bekleyen paket daha fazla olacaktır. CW uzunluğunun küçük olması gecikmeyi arttıran faktörlerden biridir. Paket boyutunu düşürüp ya da CW uzunluğunu çok büyük seçmeyerek belirli bir iletim menzilinde sabit araç altında genel olarak gecikmeyi azaltabiliriz.

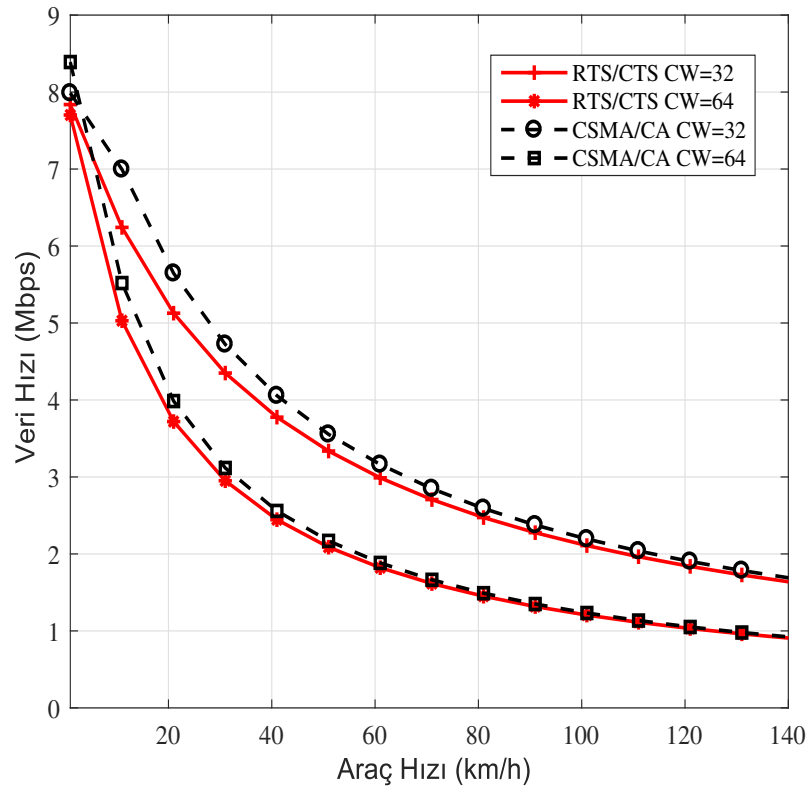
Şekil 2.10, PDR'nin araç sayısı ile değişimini göstermektedir. Şekilden yararlanarak PDR değerinin araç sayısı ile arttığı görülebilir. Ayrıca çekişme penceresi büyükse PDR daha azdır. Çünkü büyük CW, çarpışma olasılığını azaltır. Veri iletiminin güvenilirliği



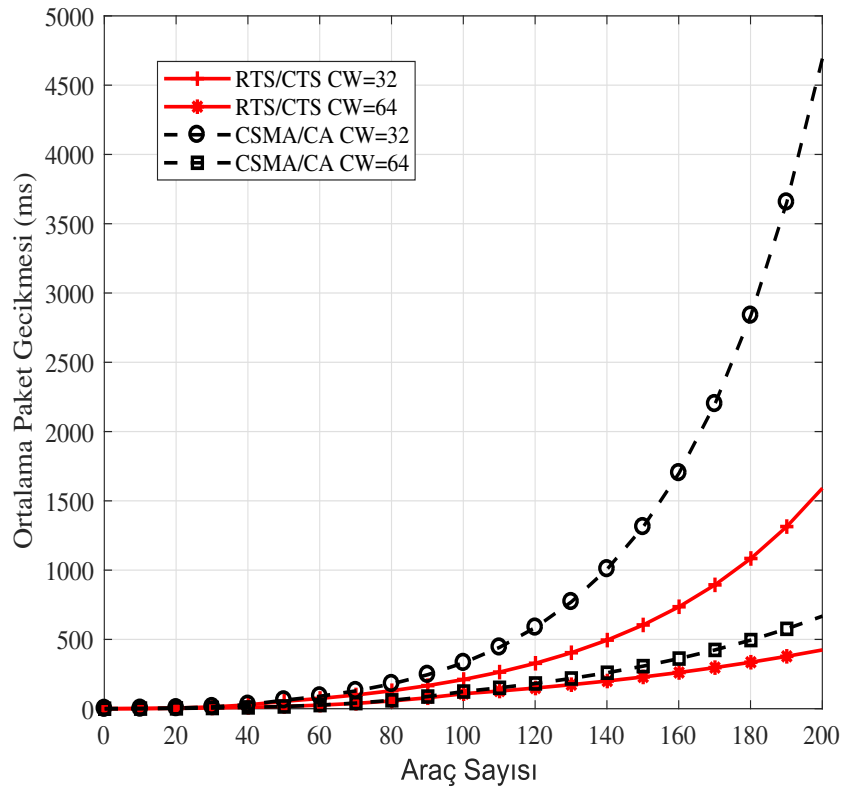
Şekil 2.6 Araç sayısına göre veri hızı



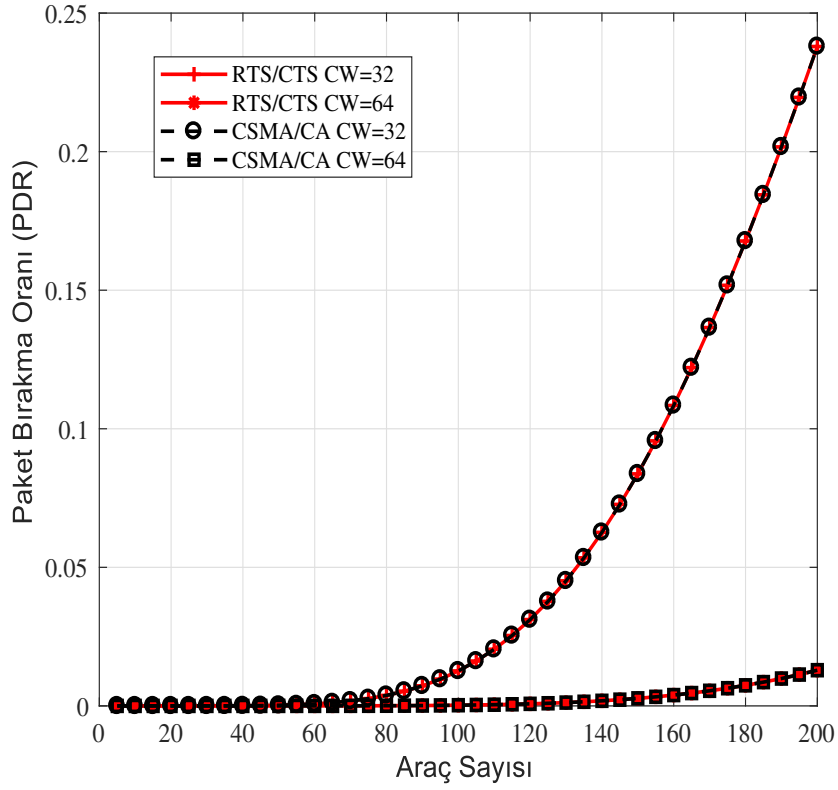
Şekil 2.7 Paket boyutuna göre veri hızı (N=200)



Şekil 2.8 Araç hızına göre veri hızı (N=200)



Şekil 2.9 Araç sayısına göre ortalama paket gecikmesi



Şekil 2.10 Araç sayısına göre PDR

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.

2.6 Sonuçlar

Bu bölümde, 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 bulundurularak unicast yayın yapan VANET ağlarda düğüm hareketliliğinin etkisi incelenmiştir.

CR-MAC: VANET’LER İÇİN İŞBİRLİKLİ MAC PROTOKOLÜNÜN NAKAGAMI-M SÖNÜMLEMELİ KANAL ALTINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, VANET’ler için işbirlikli iletim ortam erişim kontrolü (cooperative relaying medium access channel, CR-MAC) protokolünün fiziksel katmanda Nakagami-m kanal sönümlemesi olması durumundaki performansı araştırılmıştır. Bu bölümde önerilen protokol, sistemin verimini artırmak için esas olarak doğrudan iletim (direct transmission, DT), işbirlikli iletim (cooperative relaying, CR) ve çok atlamalı iletim (multi-hope relaying, MHR) biçiminde üç veri iletim modu içermektedir. Ayrıca, uygun bir veri iletim modunu seçmek ve optimal röleyi seçmek için algoritma tanımlanmaktadır. Yalnızca doğrudan iletişim için özel olarak tasarlanmış IEEE 802.11p standartlarında tanımlanan mekanizma, işbirlikli iletişim için uygun değildir. Bu nedenle, yeni kontrol paketleri kullanılır ve mevcut kontrol paketi formatı, işbirliğine dayalı iletişimi desteklemek üzere değiştirilmiştir. Önerilen CR-MAC protokolünün performans analizini gerçekleştirmek için, doymamış Markov zincir modeline dayanan bir analitik model simülasyonla türetilip ve doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen protokolün sistem verimini en üst düzeye çıkardığını göstermektedir.

3.1 CR-MAC Protokolü

Bu bölümde, VANET için önerilen CR-MAC protokolü ayrıntılı olarak incelenmektedir. Önce en uygun veri iletim modunu, sonra en uygun röleyi seçmek gerekmektedir. Burada kontrol paketi değişim mekanizması ve değiştirilmiş kontrol paketi formatı gösterilmektedir. Ayrıca, CR-MAC protokolünün zaman çizelgesi DT, CR ve MHR gibi farklı veri iletim modları için ifade edilir [84, 85].

Uygun bir veri iletim modu elde etme algoritması Tablo 3.1’de sunulmaktadır. U aynı ağ kapsamındaki araç düğüm kümesidir, S kaynak düğümdür ve D hedef düğümdür.

Tablo 3.1 Uygun veri iletim modunu bulma algoritması

1: If (S, D) $\notin$ U
2: then MHR
3: end
4: If (S, D) $\in$ U,
5: then DT
6: end
7: If (S, D) $\in$ U, ve $R_{CR} > S_r$, ve $T_{CR} < S_t$,
8: then CR
9: else if $R_i \notin U_r$
10: else DT
11: end

S , S_t sürede S_r veri hızıyla L boyutunda paketi gönderir. R_{CR} ve R_{MHR} sırasıyla CR ve MHR moduyla etkili paket aktarım hızıdır, T_{CR} ve T_{MHR} , aynı veri paketini kaynaktan hedefe göndermek için gereken süredir. U_r , iyi röle R_j dizisidir. S ve D aynı ağda değilse, S , MHR modunda veri gönderir. MHR modu iletim aralığını genişletir ve ağ kapsamını genişletir. S ve D aynı ağdaysa, DT modunda veri iletir. S ve D aynı ağdaysa ve L yük kapasitesi iletişim yükünden ve etkin yük aktarım hızından büyükse, R_{CR} , gönderen veri hızı S_r 'den ve yükü kaynaktan hedefe göndermek için gereken süreden daha büyüktür. T_{CR} , gönderen iletim süresi S_t 'den daha az ise S , CR modunda veri iletir. CR modu, iletim hızını artırır ve ağdaki iletişim gecikmesini azaltır. CR modu için iyi koşullara sahip bir röleye ihtiyaç vardır. İşbirlikli iletişim, karmaşıklığı beraberinde getirirken, aynı zamanda da gereksiz işbirliği en uygun MAC protokol tasarımında sorun çıkarabilmektedir. Bu iletim modları teker teker ele alınacaktır.

3.1.1 Kontrol Paketi Değişim Mekanizması

IEEE 802.11p standardındaki mevcut kontrol paketleri doğrudan iletim için kullanıldığından işbirlikli iletişime uygun olması için biraz değiştirilmesi gerekmektedir. Burada yeni kontrol paketleri: aktarma isteği gönderme (relay request to send, RRTS), aktarım teklifi (offer to relay, OR), röle aktarmaya hazır (relay ready to relay, RRR), röle aktarımı yapıldı (relay clear to relay, RCR), röle onaylama (relay acknowledgement, RACK) bilgileri tanıtıldı. Değiştirilmiş kontrol paketi formatları Şekil 3.1'te verilmektedir. Önerilen protokolün farklı veri iletim modları için iletişim zaman çizelgesi ve kontrol paketi değişim mekanizması, Şekil 3.2, 3.3 ve 3.4'te gösterilmektedir.

RTS

Frame Control	Duration	RA	TA	T -SNR	FCS
---------------	----------	----	----	--------	-----

RRTS

Frame Control	Duration	RA	TA	HA	T -SNR	FCS
---------------	----------	----	----	----	--------	-----

CTS

Frame Control	Duration	RA	R-SNR	FCS
---------------	----------	----	-------	-----

OR

Frame Control	Duration	RA	TA	HA	R -SNR	FCS
---------------	----------	----	----	----	--------	-----

RRR

Frame Control	Duration	RA	TA	HRRA	RRR-SNR	FCS
---------------	----------	----	----	------	---------	-----

RCR

Frame Control	Duration	RA	TA	HRRA	FCS
---------------	----------	----	----	------	-----

ACK

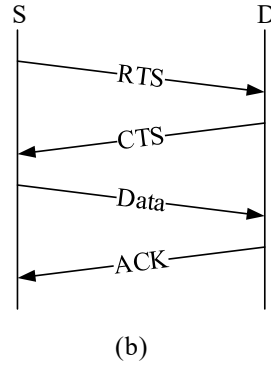
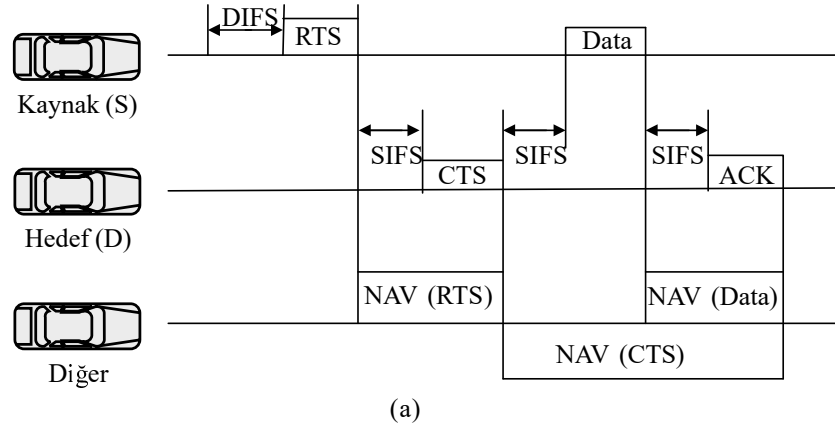
Frame Control	Duration	RA	FCS
---------------	----------	----	-----

RACK

Frame Control	Duration	RA	HRRA	FCS
---------------	----------	----	------	-----

Şekil 3.1 Kontrol değişim paket çerçeve formatı**3.1.2 Doğrudan İletim Modu**

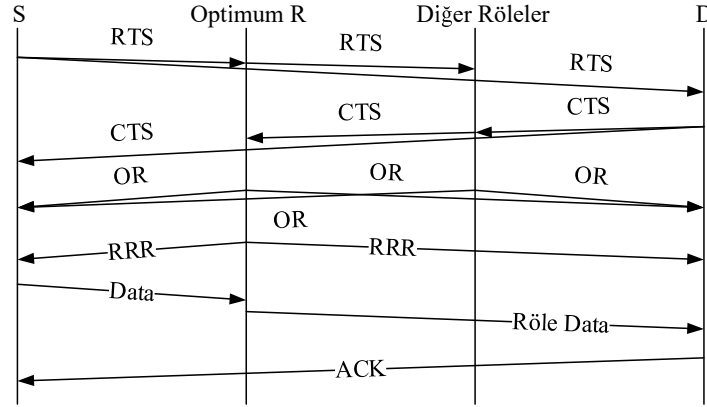
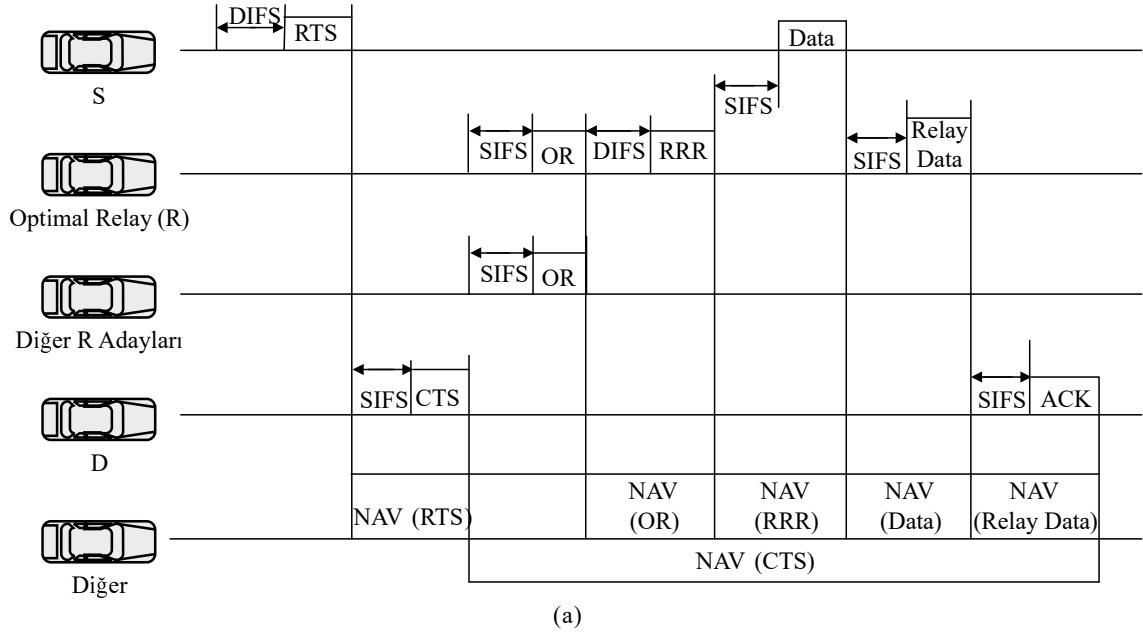
IEEE 802.11p'de tanımlanan RTS/CTS üzerinden doğrudan iletim (direct transmission, DT), CR-MAC protokolünün DT modudur. DT modu için; Şekil 3.2 (a), CR-MAC protokolünün zaman çizelgesini gösterir. Şekil 3.2 (b), CR-MAC protokolünün kontrol paketi değişim mekanizmasını göstermektedir. Veri iletiminden önce S tarafından RTS yollanıp, CTS alınır. Daha sonra veri iletimi gerçekleştirilmektedir. Başarılı iletim için D tarafından yollanan ACK S tarafından alınmalıdır.



Şekil 3.2 DT modu için önerilen CR-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması

3.1.3 İşbirlikli İletim Modu

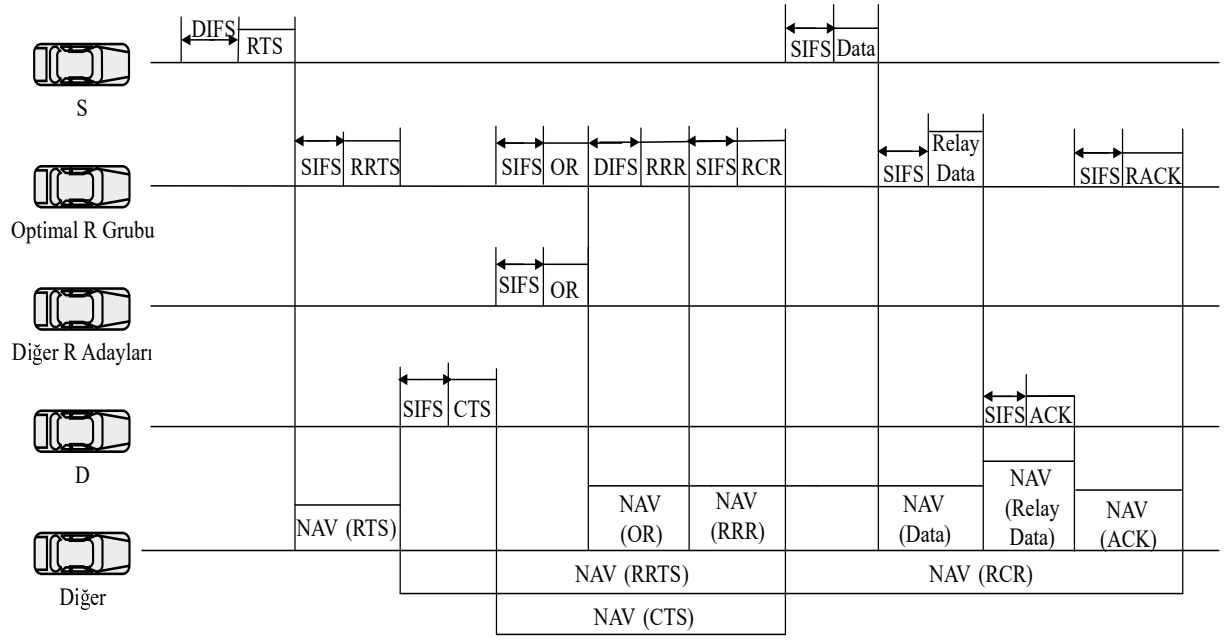
İşbirlikli iletim (cooperative relaying, CR) modunda, RTS, CTS veri iletiminden önce iletilir, RTS ve CTS sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) bilgisini içermektedirler. Araç düğümleri hem S hem de D'ye OR bilgisini göndermek daha yüksek SNR'ye sahiptir. OR bilgisi yardımcıyı göstermektedir. OR tüm ağa yayın yapmaktadır. Optimal R, dağıtılmış koordinasyon işlevi (distributed coordination function, DCF) çerçeveler arası boşluk (DCF inter-frame space, DIFS) süresinden sonra araç düğümleri S ve D'ye RRR gönderir. Diğer düğümler RRR bilgisindeki aralık ve ağ tahsis vektörünü (NAV) görür. Kısa çerçeveler arası boşluk (SIFS) süresinden sonra S, verileri D'ye ileten optimum R'ye gönderir ve bu optimum R, D'ye veri gönderir. S, veri iletiminin onaylama (ACK) bilgisi ile başarılı olduğunu iletir. ACK, SIFS aralığından sonra S'ye ulaşmazsa, R, verileri D'ye geri gönderir. VANET'teki tüm düğümlerin, yeni veri iletimini başlatmak için DIFS süresinin beklenmesi gerekir. Şekil 3.3 (a), CR modu için CR-MAC protokolünün zaman çizelgesini gösterir. Şekil 3.3 (b), CR modu için CR-MAC protokolünün kontrol paketi değişim mekanizmasını göstermektedir.



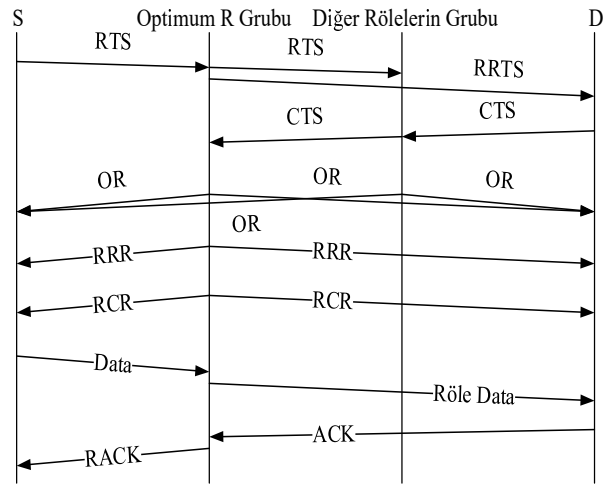
Şekil 3.3 CR modu için önerilen CR-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması

3.1.4 Çok atlamalı İletim Modu

Çok atlamalı iletim (multi-hope relaying, MHR) modunda, S ve D düğümleri farklı ağ kapsama alanındadır. Bu nedenle D düğümü, S tarafından gönderilen RTS bilgisini almaz. Komşu R düğümleri RTS bilgisini alabilir ve hem S hem de D düğümlerini dinleyebilir. R düğümü, hem S hem de D düğümleri bu komşu ağın kapsama alanı içinde olduğundan SIFS süresinden sonra RTS bilgisini D'ye gönderir. Diğer düğüm, RTS bilgisinde zamanı gözlemleyerek NAV'yi başlatmaktadır. Daha sonra D, komşu R düğümlerine CTS gönderir. S araç düğümü bu CTS iletimini bilmemektedir. CTS bilgisini alan R düğümü adayları OR bilgisini hem S hem de D düğümlerine gönderir. Optimum R veya optimum R grupları seçtikten sonra RRR hem S hem de D düğümlerini iletir. S ve D düğümleri RRR bilgisinden dolayı optimum R bilgisini bilirler. S ve D düğümleri SIFS süresinden sonra bir RCR bilgisini aldığı anda, S, D



(a)



(b)

Şekil 3.4 MHR modu için önerilen CR-MAC protokolünün; (a) zaman çizelgesi (b) kontrol paketi değişim mekanizması

düğümüne CTS bilgisini gönderdiğini anlar ve verileri optimum R'ye göndermeye başlar. R veya optimum R'ler grubu verileri D'ye iletir. Veriler D tarafından alındıktan sonra, bir ACK R'ye gönderilir. Daha sonra, S, R düğümünden RACK bilgisini alarak son veri iletiminin başarılı olduğu anlaşılır. Şekil 3.4 (a) MHR modu için CR-MAC protokolünün zaman çizelgesini gösterir. Şekil 3.4 (b), MHR modu için CR-MAC protokolünün kontrol paketi değişim mekanizmasını göstermektedir.

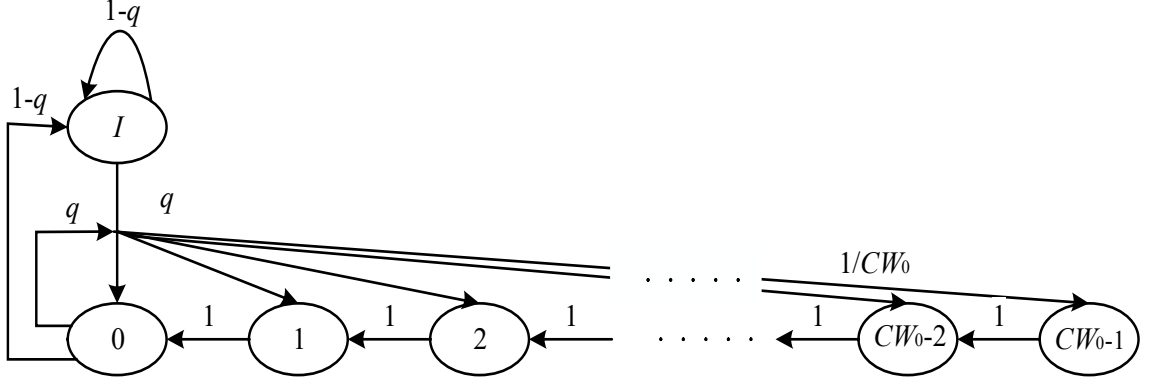
3.1.5 Röle Seçimi

Veri iletimi için DT, CR ve MHR arasından uygun bir iletim modu ve gerekirse veri aktarımı için uygun bir röle seçmek gerekmektedir. İşbirliği kazancı röle sayısına bağlıdır. Röle sayısının artmasıyla iletişimin güvenilirliği ve çeşitlilik kazancı arttırılır. Röle düğümü seçimi için gerekli bazı parametreler vardır. Röle seçilecek düğüm boşta olmalı ve yüksek S-D linkinin SNR değerine sahip olmalıdır. Anlık kanal durumu da parametre olarak kullanılır. İşbirlikli iletişim, kaynaktan hedefe olan tüm bağlantılara bağlıdır. Bir röle, kontrol mesajlarının anlık SNR değerine göre seçilmelidir. RTS ve CTS aracılığıyla, tüm komşu düğümler hem gönderenin hem de alıcının SNR bilgisini bilmektedirler. Gönderilen bir ek SNR bilgisi, sırasıyla S ve D veri iletim hızını bilmek için RTS ve CTS paket içerisinde yer alır. Boşta ve yüksek SNR bilgisine sahip olan düğümler OR bilgisini hem S hem de D düğümüne gönderir. Bu şekilde, bilgi geçişi için en iyi yola sahip olan düğümler seçilebilir ve bir dizi iyi röle U_r oluşur. Çoğu zaman veri iletimi başarılı olmalıdır, çünkü bu RTS ve CTS değişimi tarafından yapılır. Anlık SNR bilgilerine bakılıp S ve D arasındaki en kısa yol bulunarak optimal R seçilebilir. Burada röle, iyi röle ve optimal röle olarak sınıflandırılır. RTS ve CTS değişiminden sonra bir dizi iyi röle bulunur ve daha sonra en kısa yola sahip iyi röleler arasından optimal röle seçilir. İyi röleler boştadır, daha yüksek veri hızına, daha düşük iletim süresine ve iyi kanal durumuna sahiptir. Optimal R sadece iyi bir röle değil, aynı zamanda S ve D arasındaki en kısa yola sahiptir. Bu şekilde, düşük bir veri hızına sahip düğüm, R düğümü yardımıyla yüksek veri hızıyla veri iletebilir.

3.2 Performans Analizi

Önerilen CR-MAC protokolünde araçların yolda rastgele dağıldığı ve VANET ağının N araçtan oluştuğu varsayılmıştır. Kullanılan ağdaki S araç düğümü ile D araç düğümü arasındaki haberleşme ağı doymamış koşullar altındaki Markov zincir modeli ile modellenmiştir. Buradaki analizler IEEE 802.11p standardına bağlı kalınarak yapılmıştır.

şekil 3.5'te, geri sayım mekanizmasını açıklamak için oluşturulan ayrık zamanlı Markov zincir modeli sunulmaktadır. Ele alınan Markov zincir modelinde, ağdaki bir aracın ara belleğinin boş olduğu yeni bir rölanti durumu (I) sunulmuştur. $b(t)$, t zaman diliminde belirli bir araç için stokastik geri çekilme işlemini belirtir ($b(t) \in \{0, 1, \dots, CW_0 - 1\}$). q , bekleme durumunda veya iletim durumunda yeni bir paketin gelme olasılığıdır. $q \rightarrow 1$ limiti alındığında modelimiz τ için Bianchi'nin doymuş modeliyle aynı değeri verir.



Şekil 3.5 Doymamış koşullar altında IEEE 802.11p için tek boyutlu Markov zincir modeli

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, tek adımlı geçiş olasılıkları [31]

$$P[i|i+1] = 1, \quad i \in [0, CW_0 - 2],$$

$$P[i|0] = q/CW_0, \quad i \in [0, CW_0 - 1],$$

$$P[i|I] = q/CW_0, \quad i \in [0, CW_0 - 1], \quad (3.1)$$

$$P[I|0] = 1 - q,$$

$$P[I|I] = 1 - q,$$

ile açıklanabilir.

$b_k = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{b(t) = i\}$, ($i \in [0, CW_0 - 1]$) zincirin sabit dağılımıdır ve aşağıdaki ilişkiler, kararlı durumda Markov zincirinden türetilir:

$$b_k = \frac{q(b_0 + b_I)(CW_0 - i)}{CW}, \quad i \in [0, CW_0 - 1]. \quad (3.2)$$

Tüm olası durumların toplamı bire eşittir:

$$\sum_{i=0}^{CW_0-1} b_i + b_I = 1. \quad (3.3)$$

Daha sonra,

$$b_0 = \frac{2q}{(CW_0 - 1)q + 2} \quad (3.4)$$

elde edilir. Bir aracın rastgele seçilen bir zaman diliminde bir paket iletme olasılığı $\tau = b_0 = \frac{2q}{(CW_0 - 1)q + 2}$ gibi elde edilebilir.

Her araç, paket varışları sabit bir varış oranı λ_q olan bir Poisson dağılımını takip eder. Bir veya daha fazla paketin zaman dilimine ulaşma olasılığı $1 - e^{-\lambda_q T_e}$ dir. Zaman aralığı kısa olduğunda varış sırası atlanabilir ve bu nedenle Markov durumunda paket varış olasılığı q şu şekilde yazılabilir:

$$q = 1 - e^{-\lambda_q T_e} \approx \lambda_q T_e. \quad (3.5)$$

Bir aracın her bir Markov durumunda geçirmesi beklenen süre T_e ,

$$T_e = (1 - P_b)T_{slot} + P_b P_s (1 - P_{ef})T_s + P_b (1 - P_s)T_c + P_b P_s P_{ef} T_{ef}, \quad (3.6)$$

olarak hesaplanır. İletim süresince kalan $N-1$ araç düğümünden en az biri paket gönderdiğinde paket çarpışmaya neden olur ve bu durumda çarpışma olasılığı P_c ifadesi,

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (3.7)$$

biçimine dönüşür. N araç düğümünden herhangi biri bir zaman diliminde bir paketi gönderirse, kanal meşgul olacaktır ve bu durumda kanalın meşgul olma olasılığı P_b ,

$$P_b = 1 - (1 - \tau)^N \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Gönderilen bir paketin başarıyla teslim alındığı ve başarılı iletim olasılığı P_s ,

$$P_s = \frac{N\tau(1 - \tau)^{N-1}}{P_b} \quad (3.9)$$

biçiminde ifade edilebilir.

P_{us} başarısız iletim olasılığını temsi etmektedir. MAC katmanındaki çarpışma ve/veya fiziksel katmandaki kanal sönümlemesi ve/veya gürültü nedeniyle hatalı bir çerçeve nedeniyle paket iletimi başarısız olabilir. P_{ef} hatalı çerçeve olasılığı olduğuna göre P_{us} aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$P_{us} = 1 - (1 - P_c)(1 - P_{ef}) = 1 - (1 - \tau)^{N-1}(1 - P_{ef}). \quad (3.10)$$

T_{slot} zaman dilimi süresidir. Eş. 3.7'de verilen T_s ve T_c sırasıyla başarılı ve çarpışan paket iletiminin zaman süresidir ve bu süreler DT, CR ve MHR için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T_c = T_{DIFSs} + T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{delay}, \quad (3.11)$$

$$T_{s-DT} = T_{DIFS} + 3T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + \frac{L}{R_d}, \quad (3.12)$$

$$T_{s-CR} = 2T_{DIFS} + 5T_{SIFSs} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{OR} + T_{RRR} + T_{ACK} + \frac{2L}{R_d}, \quad (3.13)$$

$$T_{s-MHR} = (2+x)T_{DIFS} + (4+2x)T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{RRTS} + T_{RRR} \quad (3.14)$$

$$+T_{OR} + T_{RCR} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{RACK} + \frac{(2+x)L}{R_d},$$

$$T_{ef} = T_{DIFS} + 2T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + \frac{L}{R_d} + T_{delay}. \quad (3.15)$$

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. x , veri iletilecek röle sayısını temsil eder. L veri uzunluğunu, R_d veri iletim hızını ve T_{delay} ise yayılım gecikmesini ifade eder. T_d ortalama veri iletim süresini temsil etmektedir ve DT, CR ve MHR için aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$T_{d_DT} = \frac{L}{R_d}, T_{d_CR} = \frac{2L}{R_d}, T_{d_MHR} = \frac{(1+x)L}{R_d}. \quad (3.16)$$

P_{or} optimal röleyi seçme olasılığıdır:

$$P_{or} = 1 - \frac{N - R_{no}}{N}, \quad (0 \leq R_{no} \leq N - 2) \quad (3.17)$$

burada, R_{no} optimum röle sayısını ifade etmektedir.

Bir VANET'te sinyal zayıflaması yol kaybından kaynaklanır. d mesafesindeki araç düğümü tarafından gönderilen sinyalin yaşadığı bu yol kaybı matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılır [86];

$$PL = \frac{(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2} \quad (3.18)$$

burada G_r ve G_t alıcı ve verici için anten kazancıdır ve her iki değer de bire eşittir. $\lambda = c/f$ işaretin dalga uzunluğudur ($c=3 \times 10^8$ m/s ışık hızı ve $f=5$ GHz taşıyıcı frekansıdır). α , yol kaybı parametresi olarak ifade edilmiştir. Tüm araçların iletilen gücü aynıdır. Yol kaybının etkisi altında alıcıdaki anlık SNR bilgisi şu şekilde ifade edilir:

$$\gamma = \frac{|h|^2 P_T}{N_0 PL}, \quad (3.19)$$

burada h , sönmüleme katsayısını belirtmektedir ve P_T , tüm araç düğümleri için aynı olduğu varsayılan iletim gücüdür. σ_{Noise} , toplanır beyaz Gauss gürültüsüdür (AWGN). [86] nolu çalışmaya göre, yol kaybının etkisi altında TR mesafesinde alınan sinyalin ortalama SNR bilgisi

$$\bar{\gamma} = \frac{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}{\sigma_{Noise} (4\pi)^2 d^\alpha}, \quad (3.20)$$

olur.

Bir paket iletim sırasında B sayıda bloklara ayrılır. B değeri, paket boyutuna ve aracın hızına bağlıdır ve ayrıca paket kaybı olasılığını da etkiler. Hızın arttırılması ve uyumluluk süresinin azalması, B 'nin büyük olduğunu ifade eder. B ayrıca aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$B = \frac{L}{T_{coh} \log(1 + \gamma_{th})}, \quad (3.21)$$

burada γ_{th} SNR eşik değeridir ve T_{coh} uyumluluk süresidir,

$$T_{coh} = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_{dop}}}, \quad (3.22)$$

burada f_{dop} dopler kaymasını göstermektedir ($f_{dop} = \frac{v}{c} f \cos(\theta)$). v araç hızıdır. θ , alınan sinyal ile aracın yönü arasındaki açıyı temsil eder.

3.2.1 Nakagami-m Sönümlmeli Kanal

Nakagami-m sönümlmeli kanal modeli, Rayleigh ve Rician sönümleme modellerine göre daha genel bir dağılımdır ve uzun mesafelerde hızlı sönümlemeyi karakterize eden bir kanal modelidir. $|h|$ Nakagami-m dağılımı temsil eden rastgele değişken olmak üzere SNR ifadesinin olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf) aşağıdaki gibi verilebilir:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)\gamma} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^m \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right). \quad (3.23)$$

Burada m dağılım parametresini $\Gamma(.)$ ise Gamma fonksiyonunu gösterir. Kesinti olasılığı P_{kes} , alınan sinyalin ortalama SNR bilgisinin ($\bar{\gamma}$) SNR eşik değerinden (γ_{th}) düşük olması olasılığı olarak tanımlanır. P_{kes} aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{kes} = P(\gamma < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f(\gamma) d\gamma = F(\gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} \frac{1}{\Gamma(m)\gamma} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^m \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma. \quad (3.24)$$

Biraz basitleştirmeden sonra eşitlik

$$P_{kes} = 1 - \exp\left(-\frac{m\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right)^k}{k!} = 1 - \exp\left(-\frac{m\gamma_{th}\sigma_{Noise}(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}\right) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m\gamma_{th}\sigma_{Noise}(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}\right)^k}{k!}, \quad (3.25)$$

olarak elde edilebilir. Paket B sayıda bloğa ayrıldığı için hatalı çerçeve olasılığı P_{ef} ,

$$P_{ef} = 1 - (1 - P_{kes})^B = 1 - \exp\left(-B \frac{m\gamma_{th}\sigma_{Noise}(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}\right) \left[\sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m\gamma_{th}\sigma_{Noise}(4\pi)^2 d^\alpha}{G_r G_t \lambda^2 \sigma_R}\right)^k}{k!} \right]^B, \quad (3.26)$$

olarak yazılabilir.

$\bar{P}_{ser} = 2Q(\sqrt{2\gamma\sin^2(\pi/M)})$ formu kullanarak M -PSK için ortalama sembol hata oranı (SER) elde edilebilir. Burada, $Q(.)$ Gauss Q fonksiyonunu ifade eder. M , modülasyon derecesini belirtir. Ortalama SER ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir [71]

$$\bar{P}_{ser} = \sqrt{\frac{\sin^2(\pi/M)}{\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \exp(-\sin^2(\pi/M)\gamma) F(\gamma) d\gamma. \quad (3.27)$$

Ortalama bit hata oranı (BER), [71]

$$\bar{P}_{ber} \approx \bar{P}_{ser} / \log_2 M. \quad (3.28)$$

ortalama SER ifadesi kullanılarak yaklaşık olarak elde edilebilir.

3.2.2 Veri Hızı Analizi

η , bir zaman dilimine gönderilen ortalama veri hızı ve bir zaman diliminin ortalama süresinin oranıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\eta = \frac{E[data]}{E[time]} = \frac{P_{suc} P_{busy} (1 - P_{ef}) R_d T_d}{(1 - P_{or}) T_e}. \quad (3.29)$$

Eş. (3.7), (3.9), (3.10), (3.17), (3.20) ve (3.26), Eş. (3.29) içerisine yazıldığında η ,

$$\eta = \frac{P_s P_b (1 - P_{ef}) R_d T_d}{T_e (1 - P_{or})}. \quad (3.30)$$

ayrıntılı olarak elde edilir.

Önerilen sistem modelini simülasyon sonuçları ile eşleştirmek için q 'yu sunulan paket yüküyle ilişkilendirmeliyiz. Doymuş bir sistemin modellenmesi, yani her zaman hizmet bekleyen bir paketin var olması, $q=1$ alınarak elde edilir. Paketler λ_q oranı ile üstel olarak dağılmış paketler arası varış süreleri ile Poisson dağılımlı gelirse, $1-q$, bir T_e uzunluğu zaman dilimine hiçbir paketin ulaşmama olasılığıdır.

3.2.3 Gecikme Analizi

$E[D]$, başarıyla iletilen paketin ortalama gecikmesidir [25]:

$$E[D] = E[T_{interval}] - P_{ST} E[T_{drop}]. \quad (3.31)$$

$E[T_{interval}]$, alıcıda ardarda gönderilen iki paketin bir başarılı şekilde alındığı ortalama süredir, P_{ST} başarılı iletme göre ortalama iletimi bırakılan pakettir ve $E[T_{drop}]$ bir paketin iletimi bırakmak için ortalama süresidir. P_{drop} , bir paketin düşürölme

olasılığını temsil ettiğine göre, P_{ST} aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_{ST} = \frac{P_{drop}}{1 - P_{drop}}. \quad (3.32)$$

$E[T_{interval}]$, Eş. (3.7) kullanılarak

$$E[T_{interval}] = NT_e, \quad (3.33)$$

şeklinde hesaplanabilir. $E[T_{drop}]$ da Eş. (3.7) kullanılarak

$$E[T_{drop}] = E[X_{drop}]T_e \quad (3.34)$$

şekilde hesaplanabilir. Burada $E[X_{drop}]$, bırakılan paket için ortalama zaman dilimi süresi olup

$$E[X_{drop}] = \frac{2q}{(CW - 1)q + 2} \quad (3.35)$$

şeklinde verilebilir. Böylece, (3.31) ile (3.34) arasındaki denklemler kullanılarak ortalama paket gecikmesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E[D] = T_e \left(N - \frac{P_{drop}}{1 - P_{drop}} \times \frac{2q}{(CW - 1)q + 2} \right). \quad (3.36)$$

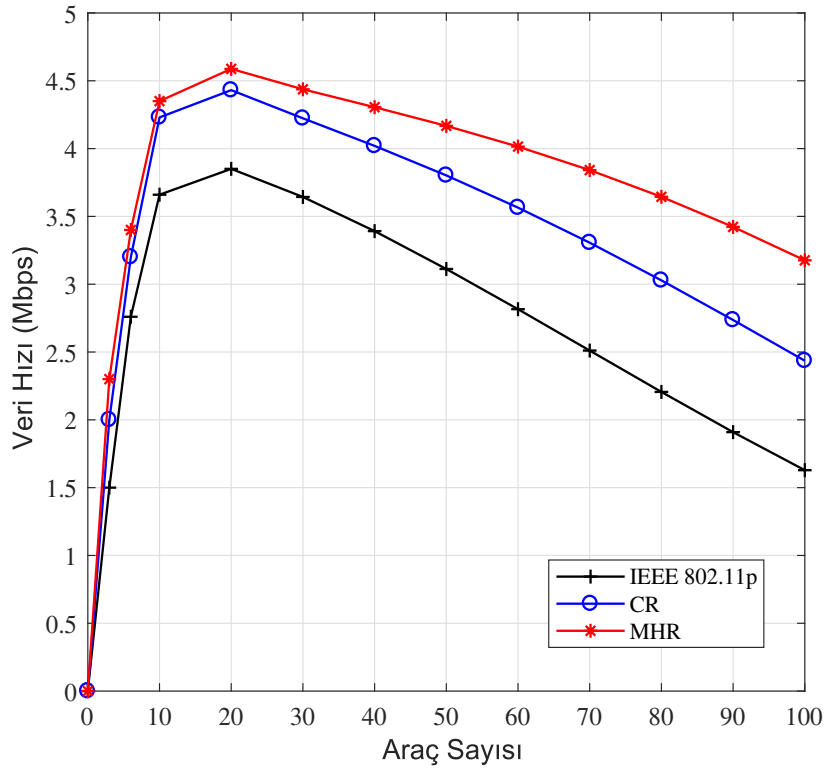
3.3 Benzetim Sonuçları

CR-MAC protokolünün performansı bu bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tablo 3.2, benzetimlerdeki parametrelerin değerini göstermektedir. Benzetim sonuçları MATLAB'da elde edilmiştir.

Tablo 3.2 Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri

Parametreler	Değerleri
$T_{slot}, T_{delay}, T_{SIFS}, T_{DIFS} \mu s$	20, 1, 10, 50
RTS, CTS, $L_h, L, ACK(bytes)$	26, 20, 50, 500, 14
R_c, R_d (Mbps)	1, 11
N, CW, R_t	2-100, 64, 500
α, f (GHz)	3, 5
$\sigma_R, \sigma_{Noise}, \gamma_{th}$ (dB)	10, -50, 5
G_r, G_t, D_T (veh/m), v (km/h)	1, 1, 0.01, 0-100

Şekil 3.6, araç sayısına göre veri hızını göstermektedir. Bu şekilde fiziksel katman etkisi ihmal edilmiştir. Performans belirli sayıda araca kadar yükselir. Daha sonra, performans azalmaya başlar çünkü kanal için daha fazla paket rekabet haline girmektedirler, bu da araç sayısındaki artış yüzünden daha fazla çarpışmaya neden

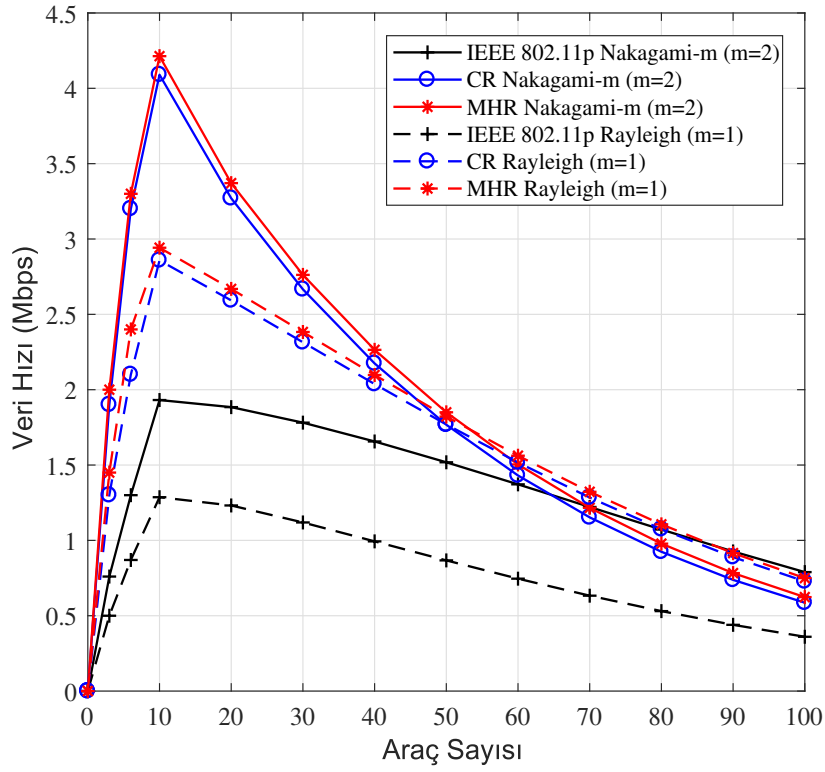


Şekil 3.6 Araç sayısına göre veri hızındaki değişim

olur. CR ve MHR'nin performansı DT (IEEE 802.11p)'den daha yüksektir. Optimum R verileri nedeniyle CR modunda veri hızı performansı daha yüksektir. En yüksek veri hızı performansı, iletim aralığının ötesinde iletişim sağlayan MHR kullanılarak elde edilir.

Şekil 3.7, Nakagami-m ve Rayleigh sönümlmeli kanal modelleri için araç sayısına karşı veri hızını göstermektedir. Nakagami-m ve Rayleigh sönümlmeli kanallar için veri hızı, N 'nin artmasıyla azalır. N arttığında, ilave araçlardan daha fazla paket ulaşacaktır ve bu da iletim için gereken paket sayısını arttıracaktır. N artışı ile ekstra paket iletimi, veri hızını düşürür ve çarpışma olasılığını artırır. Rayleigh sönümlmeli kanalı ($m=1$) kullanan sistem en düşük veri hızına sahiptir. Nakagami-m sönümlmeli kanalı ($m=2$) kullanan sistemin daha yüksek veri hızına sahip olduğu şekilden anlaşılmaktadır.

Şekil 3.8, hatalı çerçeve olasılığına karşı veri hızını göstermektedir. CW çok küçük olduğunda, iletimden önceki backoff süresi çok kısa olur. Bu nedenle, paket kanalda çok hızlı bir şekilde fazla bekletilmeden iletilmektedir. CW boyutu arttığında, kanalın backoff süresi artmaktadır. Bu da, veri hızını azaltmaktadır, çünkü paketin iletilmesi için uzun süre beklemek gerekmektedir.

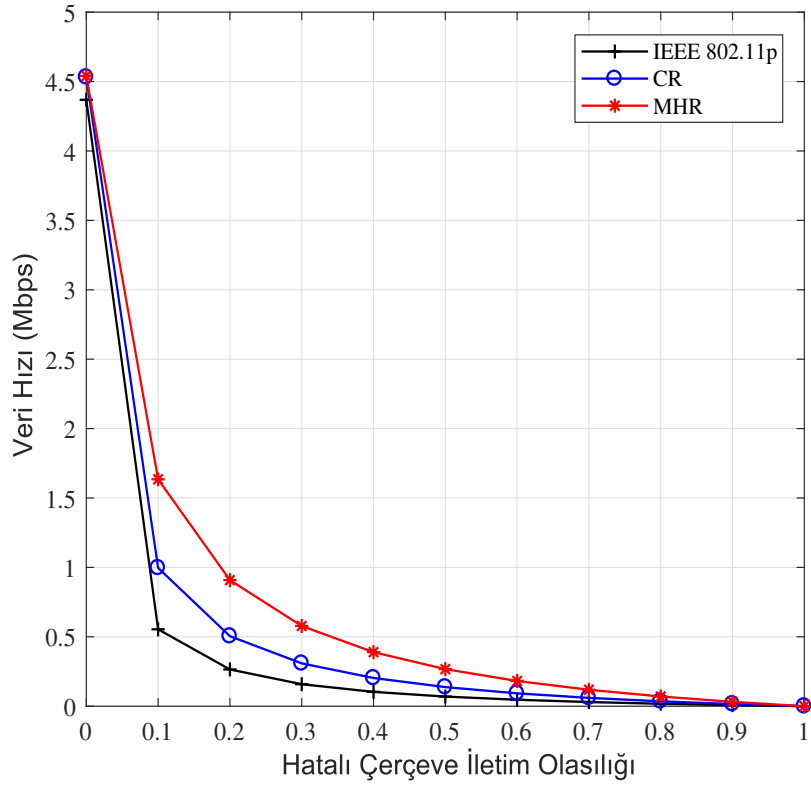


Şekil 3.7 Kanal sönümlenmesi olması durumunda araç sayısına göre veri hızındaki değişim

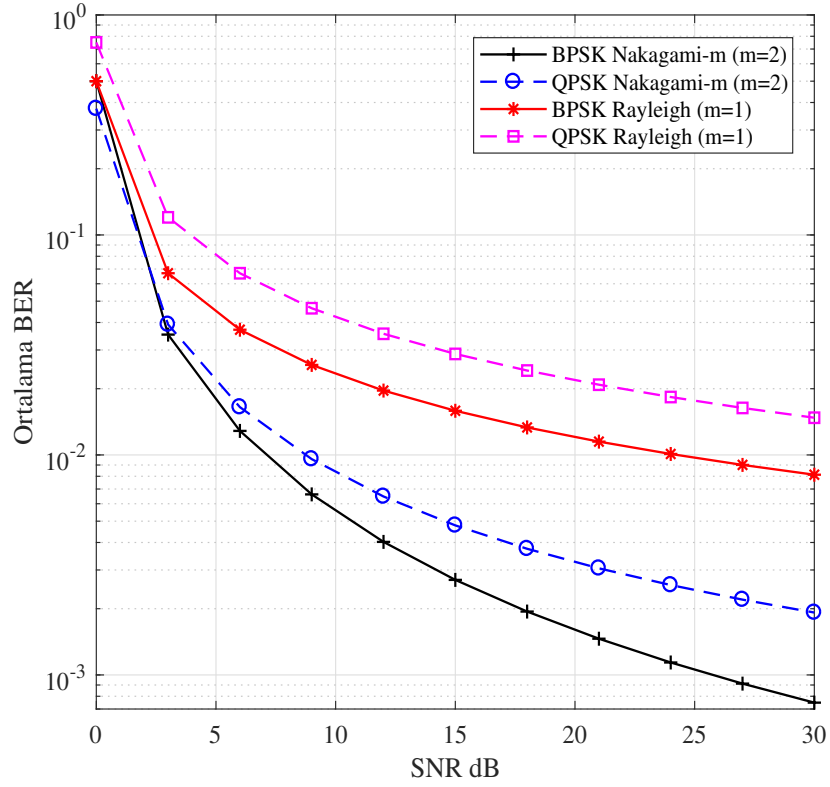
Şekil 3.9, SNR'ye karşı ortalama BER'yi göstermektedir. Artan SNR ile sistem performansı artmaktadır. Böylece BER düşmektedir. İncelenen her modülasyon türü için Nakagami-m sönümlmeli kanalını kullanan sistemin performansı Rayleigh sönümlmeli kanal tipini kullananndan daha iyidir. Nakagami-m sönümlmeli kanal kullanan sistem, SNR'ye karşı en düşük BER'ye sahiptir; Rayleigh sönümlmeli kanal kullanan sistem, her modülasyon türü için en yüksek BER'e sahiptir. İncelenen sönümlmeli kanal sönümlmeli modelleri için SNR'ye karşı BER, BPSK<QPSK'dır. Modülasyon derecesinin M artırılması, BER'i arttırmaktadır, yani performans düşmektedir.

Şekil 3.10, araç sayısına karşı başarısız iletim olasılığını göstermektedir. Başarısız iletim olasılığı, her iki sönümlmeli kanal için N 'nin artmasıyla artar. Daha fazla paket, çarpışma olasılığını artıracak olan N artışı ile iletim için rekabete girecektir. Çarpışma olasılığı arttığında, başarısız iletim olasılığı da artar. Rayleigh sönümlmeli kanal ($m=1$) kullanan sistemin en yüksek başarısız iletim olasılığına ve Nakagami-m sönümlmeli kanal ($m=2$) kullanan sistemin en düşük başarısız iletim olasılığına sahip olduğu açıkça görülmektedir.

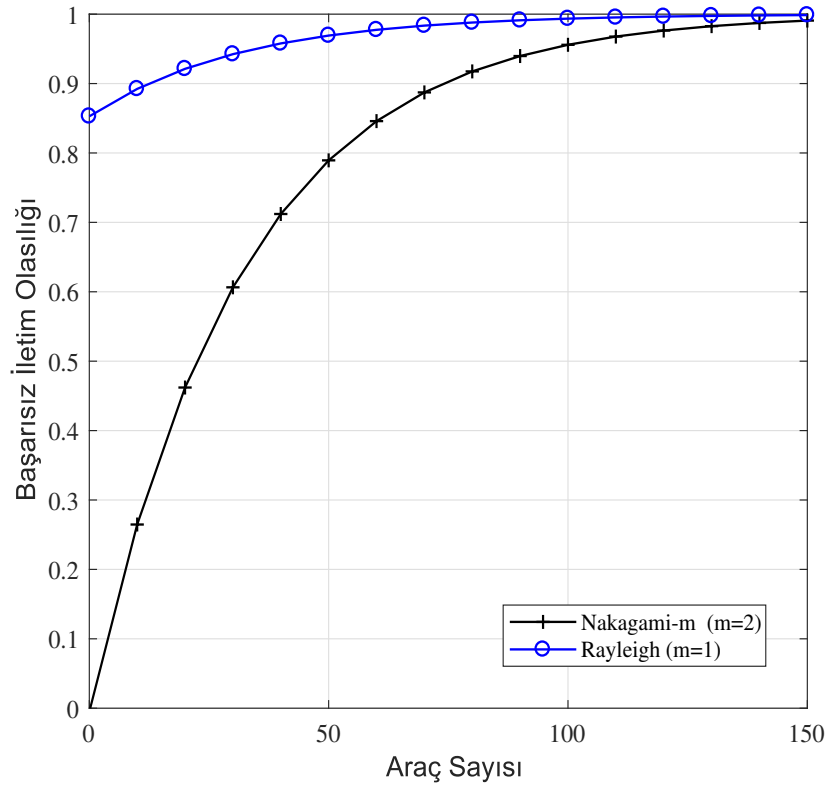
Şekil 3.11, önerilen sistemin SNR'ye karşı kesinti olasılığını göstermektedir. Kesinti



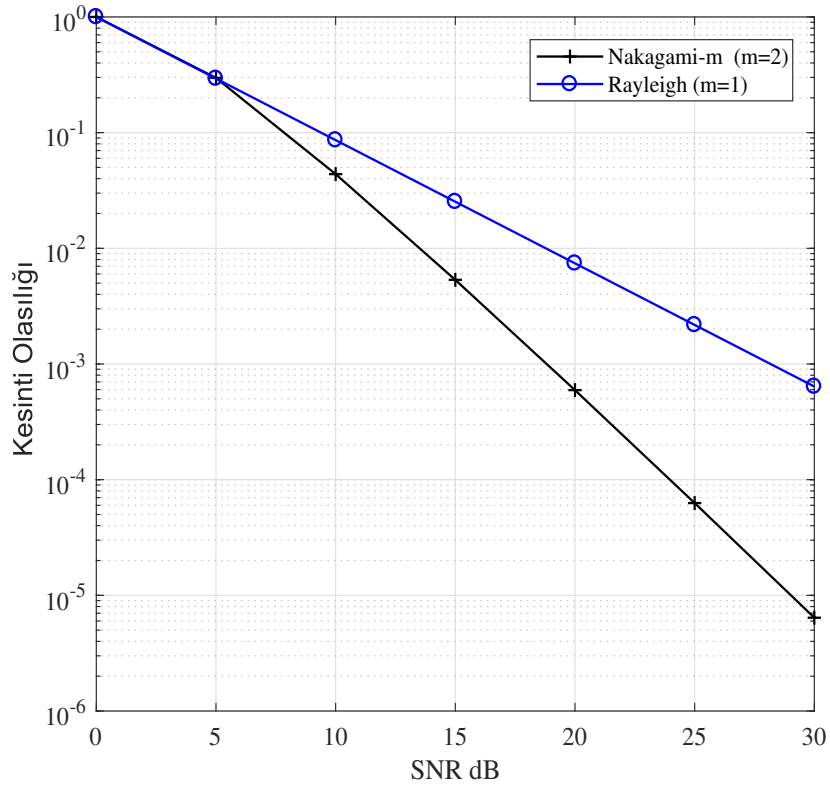
Şekil 3.8 Hatalı çerçeve iletim olasılığına karşı veri hızı değişimi



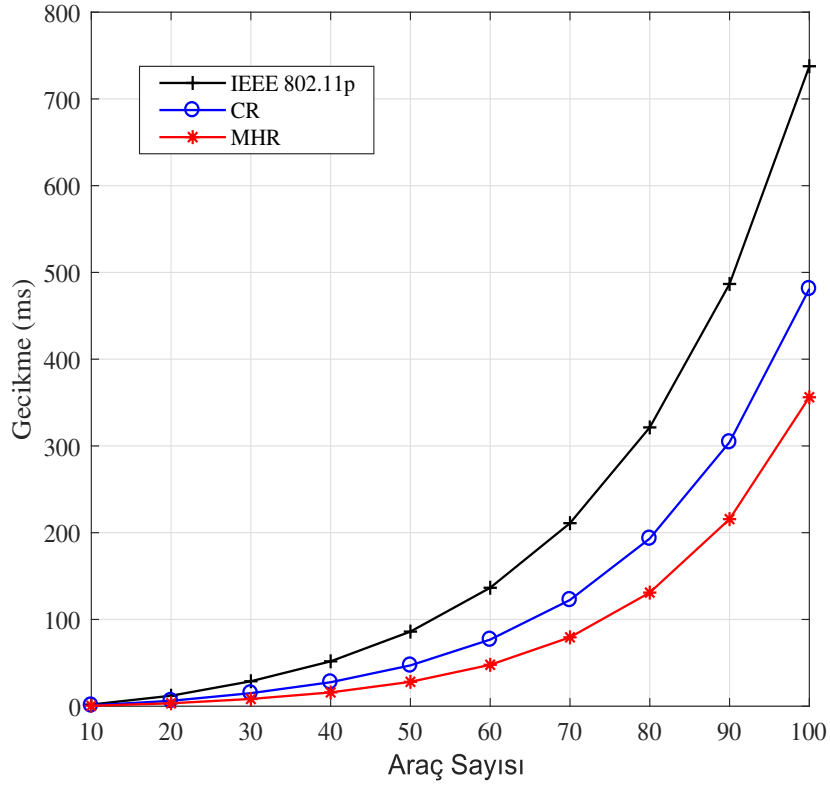
Şekil 3.9 SNR'e göre ortalama BER'in değişim eğrisi



Şekil 3.10 Araç sayısına karşı başarısız iletim olasılığındaki değişim eğrisi



Şekil 3.11 SNR'e göre kesinti olasılığı değişimi



Şekil 3.12 Araç sayısına karşı gecikme değişimi

olasılığı, sönümlemeli kanallar için SNR artışı ile azalır. Sinyal gücü SNR arttıkça arttığından, kesinti olasılığı azalmaktadır. Rayleigh sönümlemeli kanalını ($m=1$) kullanan sistem en yüksek kesinti olasılığına ve $m=2$ ile Nakagami-m sönümlemeli kanalını kullanan sistem daha düşük kesinti olasılığına sahiptir.

Şekil 3.12, araç sayısına karşı ortalama gecikmeyi göstermektedir. İletim için paket sayısı, daha fazla paket çekişmesi ile sonuçlanan araç sayısı ile artacaktır. Kanal, çarpışma olasılığını artıracak daha fazla paket tartışması için daha yoğun olacaktır. Bu nedenle, gecikme araç sayısının artması ile artmaktadır.

3.4 Sonuçlar

Doymamış koşullarda Markov zincir modeli kullanılarak IEEE 802.11p MAC katmanının CR-MAC protokolü performansı incelenmiştir. Ayrıntılı benzetim sonuçlarının nicel ve nitel bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. CR-MAC protokolünün performansı, VANET'ler için Nakagami-m ve Rayleigh sönümlemeli kanallar altında incelenmiştir. Veri hızını artırmak için farklı veri iletim modları önerilmiş ve uygun veri aktarım modunu seçmek için bir mekanizma sunulmuştur. Çarpışma olasılığı, başarılı ve başarısız iletim olasılığı, veri hızı, gecikme analizi

ifadeleri türetilmiştir. Benzetim sonuçları ile Nakagami-m ve Rayleigh sönümlemeli kanallar altında CR-MAC protokolünün performansı açıkça gösterilmiştir. Başarılı iletim olasılığının artması nedeniyle, veri hızının arttığı olduğu açıktır. Öte yandan, kanal sönümlemesi, başarısız iletim olasılığının artması nedeniyle veri hızını azaltmaktadır.

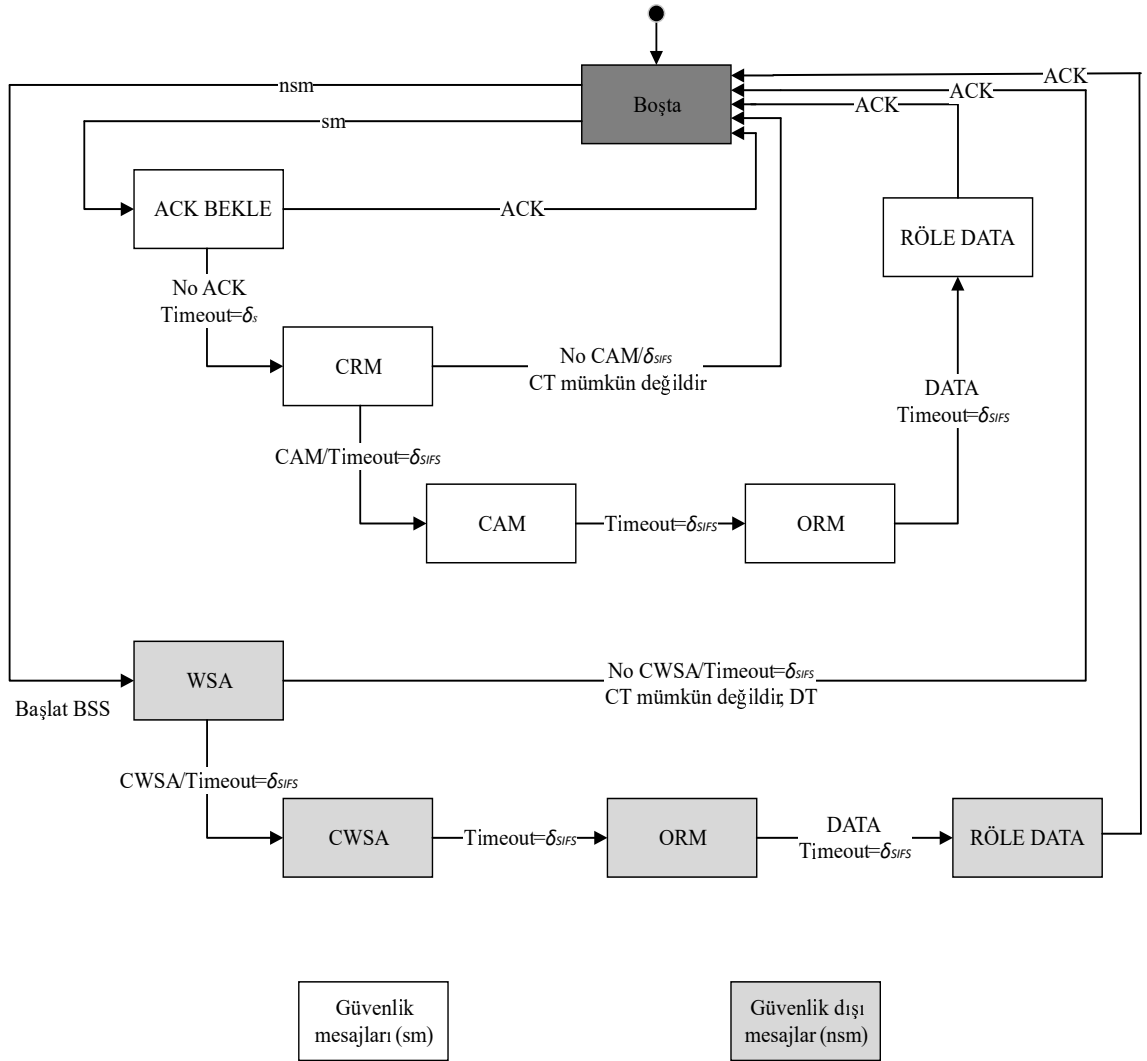
OEC-MAC: VANET'LER İÇİN YENİ BİR OFDMA TABANLI ETKİN İŞBİRLİKLİ MAC PROTOKOLÜ

VANET'ler, araçlar arasındaki hareketlilik, sık bağlantı kesilmeleri ile hızlı topoloji değişikliklerine neden olabilir, bu da iletişimlere kararsız hale getiren çarpışmalara ve paket kayıplarına neden olabilir. Alternatif olarak, işbirliğine dayalı iletim, VANET'lerdeki bu sorunları ortadan kaldırarak iletişimin güvenilirliğini artırabilir. Yoğun trafik koşullarında, CSMA/CA yüksek veri hızı gerektiğinde etkili değildir. Bu nedenle, dik frekans bölmeli çoklu erişim (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) önerilmektedir. OFDMA kullanımı ile yoğun trafik senaryolarında çarpışma olasılığı azaltılarak veri hızı artırılır ve gecikme azaltılır. Bu bölümde, VANET'ler için yeni bir OFDMA tabanlı etkin işbirlikli MAC protokolü (OEC-MAC) önerilmiştir. Alt taşıyıcı kanal atama ve erişim mekanizmaları açıklanmaktadır. Mekanizma sadece uygun iletim modunu seçmek için değil aynı zamanda optimum rölenin seçilmesi için de sunulmuştur. İşbirliğine dayalı iletişimi desteklemek için yeni kontrol mesajları tanımlanmıştır. OEC-MAC protokolünün performansı, Markov zincir modeline dayalı analitik analiz sağlanarak incelenmiştir. OEC-MAC protokolünün veri hızında dikkate değer bir artış sağladığını ve aynı zamanda sm mesajlar için VANET'lerde 100 msn'lik gecikme gereksinimini karşıladığını ortaya koyan sayısal sonuçlar gösterilmiştir. Ek olarak, paket düşme oranı (packet dropping rate, PDR) azaltılarak iletişim güvenilirliği artırılmaktadır. Sayısal sonuçlar, mevcut protokollerle karşılaştırılmıştır ve nicel bir karşılaştırma sağlanmıştır. Sonuçlardan, önerilen OEC-MAC protokolünün, özellikle yoğun trafik senaryoları altında mevcut sistemlerden daha iyi olduğu görülmüştür.

4.1 Önerilen OEC-MAC Protokolü

Bu bölümde, güvenlik mesajların (safety messages, sm) ve güvenlikle ilgili olmayan mesajların (non-safety messages, nsm) iletimi için önerilen OEC-MAC protokolü açıklanmaktadır. Verimli işbirliği için, bazı yeni tanımlanan mesajlar, alındı bildirimi

(acknowledgment, ACK), işbirliği istek mesajı (cooperation request message, CRM), işbirliğine dayalı dalga hizmeti reklamı (cooperative wave service advertisement, CWSA), işbirliği kabul mesajı (cooperation acceptance message, CAM) ve optimum röle mesajı (optimal relay message, ORM). Sm mesajlar için ACK, CRM ve CAM başlatılır. Nsm mesajları iletmek için CWSA tanıtılmıştır. ORM bilgisi, optimum röleye gönderilecektir. OEC-MAC protokolünün dahili sonlu durum makinesi (finite state machine, FSM), birleşik modelleme dili (unified modeling language, UML) ile gösterilen Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Standart paket işleme için FSM'de tanımlanmış 10 dahili durum ve 15 harici durum vardır. Anormal durumu işlemek için zamanlayıcılar, paket başlığının süre değerlerine göre ayarlanacaktır. Zaman aşımı olursa, "BOŞTA" durumu olarak sıfırlanır.



Şekil 4.1 Önerilen OEC-MAC protokolünün FSM mekanizması

Mevcut alt taşıyıcıların toplam sayısının 64 olduğu varsayılır, ancak haritalama için yalnızca 52 alt taşıyıcı kullanılır. Ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) uygulamadan önce, pilot sinyali taşımak için 52 alt taşıyıcıdan 4 alt taşıyıcı seçilir. Pilot semboller,

kanalı tahmin etmek ve iletilen sinyaldeki değişiklikleri incelemek için kullanılır. Pilot alt taşıyıcılar, alıcıda frekans kaymalarına ve faz gürültüsüne karşı güvenilir algılama yapmak için kullanılır. Tablo 4.1, IEEE 802.11p standartlarında [2] OFDMA parametrelerini göstermektedir.

Tablo 4.1 IEEE 802.11p standardındaki OFDMA parametreleri

Parametre	Değeri
Toplam alt taşıyıcı sayısı	64
Toplam kullanılan alt taşıyıcı	52
Pilot alt taşıyıcı	4
Data alt taşıyıcı	48
Boştaki alt taşıyıcılar	12
Bant genişliği	10 MHz
Alt taşıyıcıların frekans aralığı	156.25 kHz

IEEE 802.11p’de sm mesajlarının yayını kabul edilmemektedir. Diğer paketlerle çarpışma veya kablosuz kanal bozuklukları nedeniyle, yüksek öncelikli sm mesajlarının başarısız iletimi tanımlanamamaktadır. Ancak sm mesajları çok önemlidir; dolayısıyla, ACK önerilen protokole dahil edilmiştir. ACK bilgisi yalnızca sm mesajları için tanıtılmıştır. Onaylanmayan paketler, başarısız iletim olarak kabul edilmişlerdir. Bu paketler, başarılı bir teslimat sağlamak için işbirliğine dayalı iletişim yoluyla gönderilmişlerdir. Bu nedenle, aktarımın güvenilirliği artırılmıştır. ACK bilgisi kullanılsa bile, farklı alt taşıyıcılar kullanıldığından genel performansı etkilememektedir.

Nsm mesajları iletiminin tek noktaya yayın modu (unicast) çok fazla bant genişliği gerekmektedir. Kaynak düğüm S, kanal durumu kötüyse, ve diğer komşu düğümler hem S hem de alıcı D düğümleri için iyi bir kanal durumuna sahipse, komşu düğümler bir paketi alıcı D düğümüne aktarabilir. Böylece, nsm mesajlarının iletimi daha hızlı olacaktır.

4.1.1 Güvenlik Mesajı İletimi

Kaynak S düğümü, güvenilir bir yayın hizmeti sağlamak için iletimin başarılı olup olmadığını anlamalıdır. Bu nedenle, ACK önerilen OEC-MAC protokolünde uygulanmaktadır. Sm mesajları iletdikten sonra, kaynak S düğümü başarılı bir iletim süresi olan ACK bilgisi veya zaman aşımı için bekleyecektir. S düğümü ACK bilgisini alırsa, iletim başarılıdır. Aksi takdirde, başarısız bir iletimdir. Başarısız paket teslimi için S, CRM’yi tüm komşu düğümlere yayınlamaktadır. S, röleleri aramak için CRM paketi yayınlamaktadır. CRM paketi, CRM kimliği, paket kimliği, kaynak adresi, hedef

Tablo 4.2 Sm mesajları için önerilen OEC-MAC protokolü algoritması

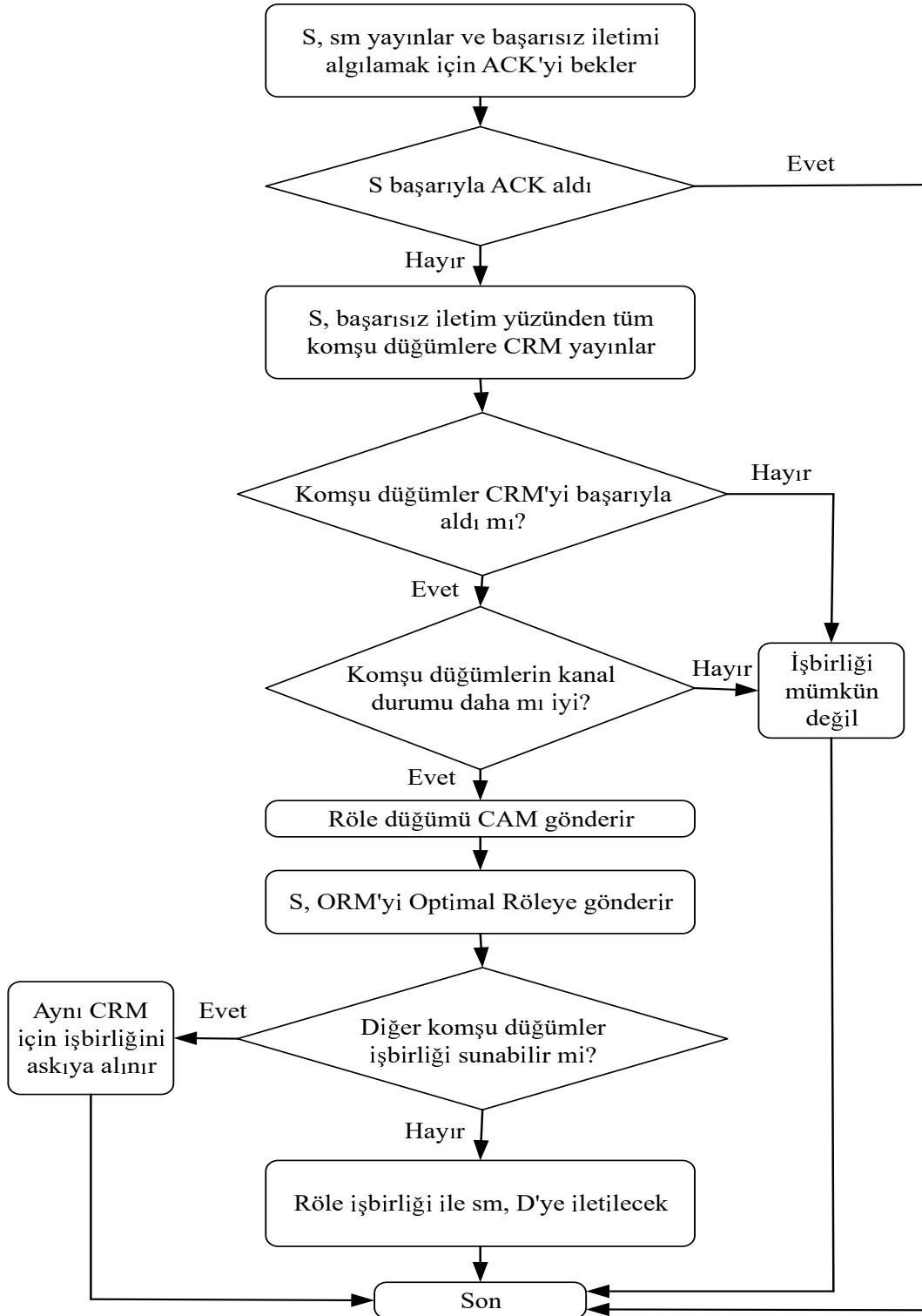
1:	sm yayınla
2:	$\delta_{wait} = \delta_{ACK}$
3:	If ACK alındıysa
4:	end
5:	else if ACK alınmadıysa
6:	CRM yayınla
7:	daha iyi kanal durumuna sahip CAM bilgisini gönder
8:	optimal Röleye ORM'yi gönder
9:	if herhangi bir düğüm işbirliği önerirse
10:	aynı CRM için işbirliğini askıya al
11:	else
12:	Röle işbirliğiyle başarılı iletim
13:	end if
14:	else daha iyi kanal durumuna sahip düğüm yoksa
15:	işbirliğini iptal et
16:	else
17:	işbirliğini iptal et
18:	end if
19:	else
20:	iptal
21:	end if

adresi, kaynağın sinyal-girişim-gürültü-oranı (signal-interference-plus-noise-ratio, SINR) vb. verileri içermektedir. İyi SINR bilgisine sahip bir düğüm, CAM bilgisini S düğümüne iletir. CAM bilgisi, CRM kimliklerini, paket kimliklerini, röle adreslerini, rölelerin SINR bilgilerini vb. bilgileri içermektedir. S düğümü herhangi bir CAM bilgisi almazsa, bu, olası bir röle olmadığı ve işbirliğinin mümkün olmadığı anlamına gelmektedir.

Kaynak S düğümü, CAM bilgisini gönderen düğümler arasında optimum röleyi seçecektir. S, ORM bilgisini optimum röleye gönderecektir. Diğer düğümler, ORM bilgisin dinleyerek aynı CRM bilgisi için CAM bilgisi gönderimini askıya alırlar. ORM bilgisi, optimum röleyi seçmek için kullanılmaktadır. Daha sonra sm mesajları, optimum röle aracılığıyla D düğümüne gönderilecektir. Bu, paket dağıtımının güvenilirliğini artırmaktadır ve ağ kapsamını genişletmektedir. Sm mesajları için önerilen OEC-MAC protokolünün akış diyagramı ve algoritması sırasıyla Şekil 4.2 ve Tablo 4.2'de sunulmuştur.

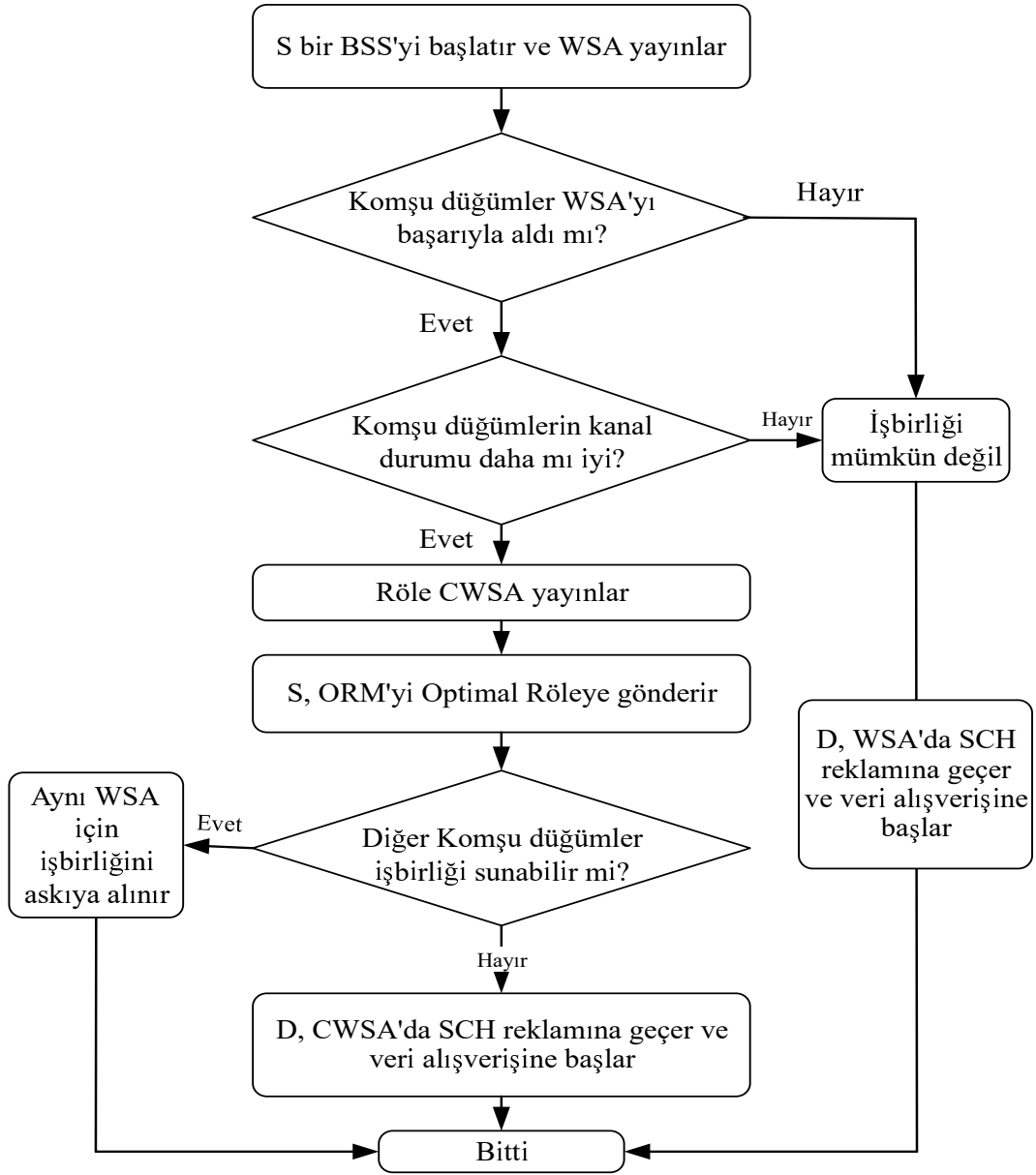
4.1.2 Güvenlikle İlgili Olmayan Mesajların İletimi

Güvenlikle ilgili olmayan nsm mesaj iletimini yapan düğümlere sağlayıcı (provider) denmektedir. Araç ortamlarında kablosuz erişim (wireless access in vehicular



Şekil 4.2 Önerilen OEC-MAC protokolünün sm mesajları için akış diyagramı

environments, WAVE) sağlayıcısı bir yol kenarı birimi veya bir araç olabilir. Temel hizmet seti (basic service set, BSS), S tarafından başlatılır. S'nin varlığı ve teklif hizmetleri, WAVE hizmet reklamının (WAVE service advertisement, WSA) periyodik olarak yayınlanmasıyla duyurulur. WSA, sunulan hizmetler ve sağlayıcı hizmet tanımlayıcısı (provider service identifier, PSID), BSS'nin benzersiz tanımlayıcısı



Şekil 4.3 Önerilen OEC-MAC protokolünün nsm mesajları için akış diyagramı

(unique identifier of BSS, BSSID), WSA Kimliği, SCH, EDCA parametre setleri, IP yapılandırma parametreleri ve sağlayıcı SINR bilgisi gibi BSS'ye erişmek için gereken ağ parametreleri hakkında bilgi sağlar. Komşu düğümler (röle) daha iyi SINR bilgisine ve daha iyi kanal koşullarına sahipse, CWSA paketini yayınlarlar. CWSA paketi, WSA'nın tüm bilgilerini, rölenin kimliğini ve kanal bilgilerini içermektedir. S düğümü, CWSA bilgisini aldıktan sonra ORM bilgisini göndererek en uygun röleyi seçecektir. ORM bilgisine ulaşan işbirlikli aktarım sağlayabilen diğer düğümler, aynı WSA için işbirliğine dayalı iletişimi dondurabilir. Optimum röle, temel hizmet seti BSS'ye katılır ve S, optimum röle aracılığıyla nsm mesajlarını D'ye gönderir.

Hedef düğüm D, sunulan hizmeti almak isteyen WAVE kullanıcısı olarak adlandırılır.

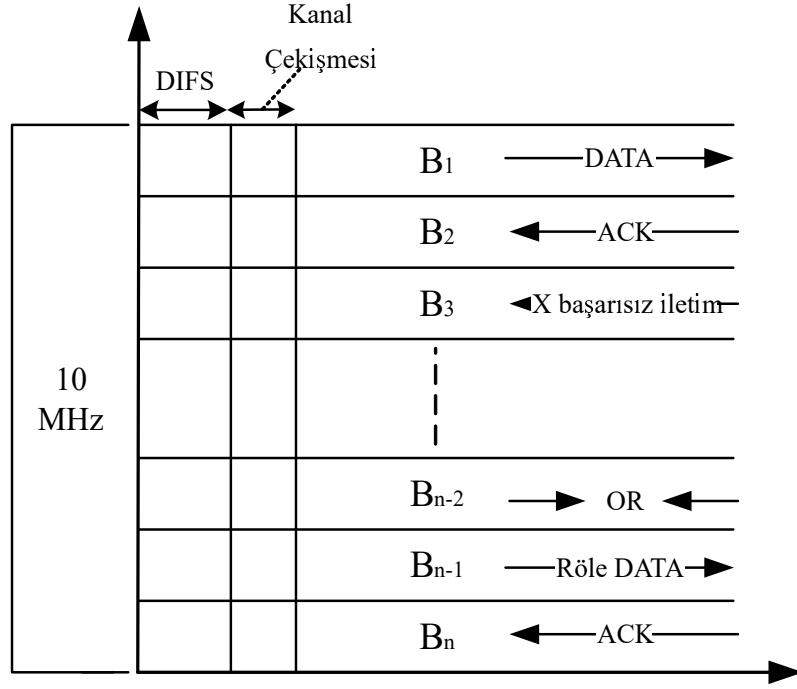
Tablo 4.3 Nsm mesajları için önerilen OEC-MAC protokolü algoritması

1:	nsm yayınla
2:	BSS'yi başlat ve WSA'yı gönder
3:	If tüm düğümler WSA aldıysa
4:	daha iyi kanal durumuna sahip CWSA bilgisini gönder
5:	optimal Röleye ORM'yi gönder
6:	if herhangi bir düğüm işbirliği önermezse
7:	değişim verilerini gönder
8:	else
9:	aynı WSA için işbirliğini askıya al
10:	end if
11:	else if
12:	işbirliğini iptal et
13:	değişim verilerini gönder
14:	end if
15:	else daha iyi kanal durumuna sahip düğüm yoksa
16:	işbirliğini iptal et
17:	end if
18:	iptal
19:	end if

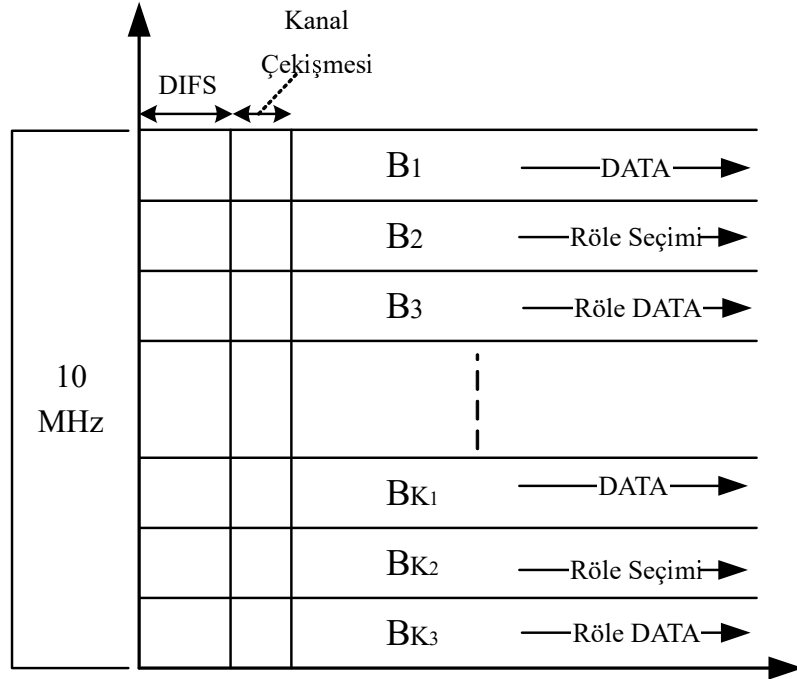
Mevcut BSS'yi ve operasyonel parametrelerini bilmek için D, kontrol kanalını (control channel, CCH) izleyecektir. D düğümü, S düğümünden bir ORM çerçevesi aldığı anda, ORM'de tanıtılan servis kanalına (service channel, SCH) geçecektir ve optimum röle ile veri aktarmaya başlayacaktır. Aksi takdirde, ORM tanımlanmadıysa, yani röle mevcut değilse, o zaman hedef düğüm D, WSA'da tanıtılan S'den SCH'ye değişir ve doğrudan S veri formunu değiştirmeye başlar. Nsm mesajları için önerilen OEC-MAC protokolünün akış şeması ve algoritması sırasıyla Şekil'de 4.3 ve Tablo 4.3'te sunulmuştur.

4.1.3 Kanal Erişim Mekanizması

Araç düğümü, alt kanal boşta iken hemen iletim yapmaz. DCF çerçeveler arası alanı (DIFS) olan T_{DIFS} süresince bekler. Kanalin boşta olduğu fark edildiğinde, aynı mesafedeki araç daha erken yayına başlamış olabilir ve bu uzak aracın paketi henüz diğer araçlara ulaşmamış olabilir. Dolayısıyla, DIFS zamanının amacı, iletilen bu sinyalin diğer istasyonlara ulaşmasına izin vermektir. Kanal DIFS süresi boyunca hala boşta ise, kaynak S düğümü paket gönderecek, aksi takdirde çekişme penceresi (contention window, CW) boyutuna göre geri çekilme yapacaktır. Tüm önlemlere rağmen çarpışmalar meydana gelebilir ve veriler kaybolabilir. Bu nedenle, S düğümü, ACK bilgisi iletiminin başarılı olduğunu doğrulamasını bekleyecektir. S düğümü ve D düğümü iletişim halindeyken, kullanılan alt kanal bloke edilir ve diğer düğümlere



Şekil 4.4 Sm mesajları için kanal erişim mekanizması



Şekil 4.5 Nsm mesajları için kanal erişim mekanizması

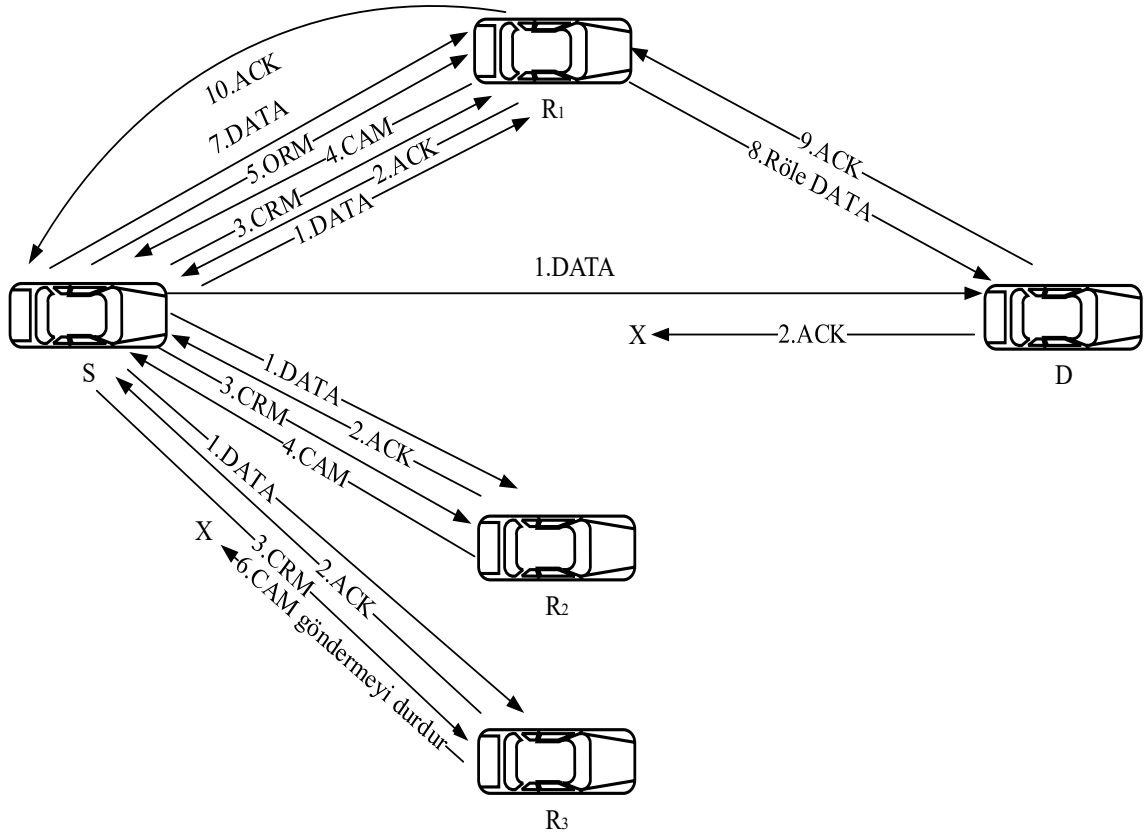
kapatılır.

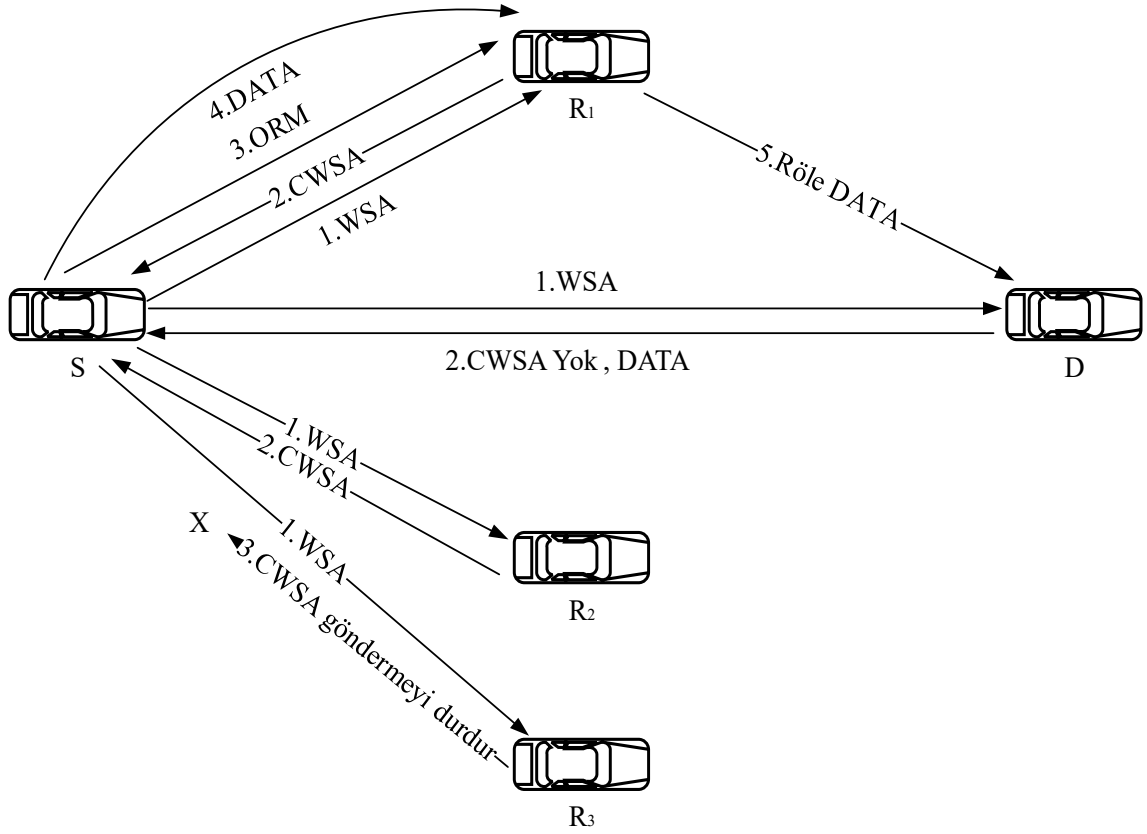
Veri iletimi, alındı bildirimi, başarısız bilgi, aktarım teklifi, aktarım verileri ve alındı, sm mesajları için toplam altı alt taşıyıcı içeren bir ortak veri aktarım grubunu oluşturur. 48 alt taşıyıcıya sahip sistem aynı anda 8 sm iletimine sahip olabilir. Şekil 4.4, sm için kanal erişim mekanizmasını göstermektedir. Bir nsm mesaj aktarım grubu 3 alt

taşıyıcıdan oluşur: veri iletimi, röle seçimi ve aktarım bilgisi iletimi. 48 alt taşıyıcıya sahip sistem, aynı anda 16 nsm iletimine sahip olabilir. Şekil 4.5, nsm için kanal erişim mekanizmasını göstermektedir.

4.1.4 Üç Taraflı İletim

Sm ve nsm mesajları için S, D ve R düğümleri arasındaki üçlü iletim sırasıyla Şekil 4.6 ve 4.7’de gösterilmektedir. Sm için, S, D’den ACK bilgisini almazsa işbirliğine dayalı iletimi başlatacaktır. S düğümü, CRM bilgisini yayınlayacak ve başarısız paket için işbirliğine dayalı iletişimi başlatacaktır. CRM bilgisini alan komşu düğümler kanal durumlarını kontrol edecektir. Komşu düğümler sm iletimi için daha iyi kanal koşullarına sahipse, CAM bilgisini ileterek geçiş yapmayı önereceklerdir. Şekil 4.6’da, sm’yi iletmek için iyi kanal koşullarına sahip olduklarından, R_1 ve R_2 CAM bilgisini S’ye gönderir. Bir T_{SIFS} süresi geçtikten sonra S düğümü, CAM bilgisini gönderen düğümler arasında en uygun R düğümünü seçecektir. Ardından S düğümü, ORM bilgisini optimum R_1 rölesine gönderecektir. Diğer düğümler, ORM bilgisini aldıktan sonra aynı CRM için CAM bilgisi iletimi askıya alınır. CRM kendi kimlik numarasını içerir ve ORM, sm’yi belirlemek için CRM kimlik numarasını içermektedir. Burada R_3 , aynı CRM için CAM iletimini askıya alır. Daha sonra, S sm mesajını D’ye optimum





Şekil 4.7 Nsm mesajları için S, D ve R düğümleri arasında üç taraflı iletim

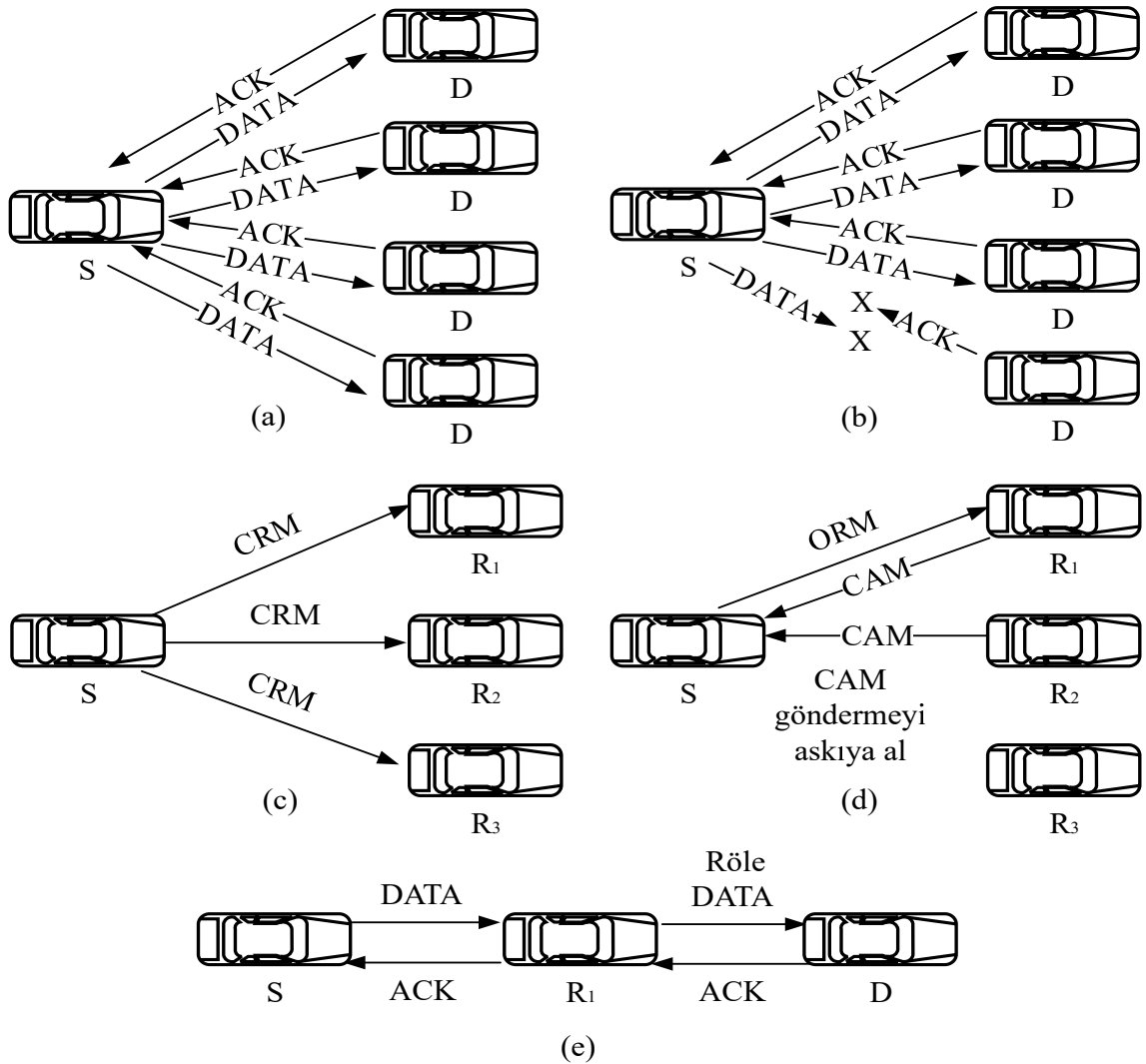
R_1 rölesi üzerinden gönderecek ve D de ACK bilgisini optimum R_1 rölesi üzerinden gönderecektir. İşbirlikli iletimde sm mesajı için S düğümü tarafından başlatılacak ve optimum R, S tarafından da seçilecektir.

Nsm mesajları için, S düğümü WSA bilgisini yayınlayacak ve hizmetler sunacaktır. D, sunulan hizmeti almak isteyen WAVE kullanıcısı olarak adlandırılır. Komşu düğümler daha iyi kanal koşullarına ve daha iyi SINR bilgisine sahipse, CWSA paketini iletilecektir. R_1 ve R_2 röle düğümleri CWSA bilgisini S düğümüne gönderir. SIFS süresinden sonra S, kanal durumunu ve SINR bilgisini gözlemleyerek R_1 ve R_2 arasından en uygun röleyi seçecektir. S, ORM bilgisini Şekil 4.7’de açıklanan optimum R_1 rölesine gönderecektir. Ardından R_3 , ORM bilgisini aldıktan sonra aynı WSA için CWSA bilgisini iletimini askıya alır. S düğümü, optimum R_1 rölesi aracılığıyla nsm mesajlarını D düğümüne gönderir. Nsm mesajları için işbirliği röle tarafından başlatılacak ve en uygun röle, S düğümü tarafından seçilecektir.

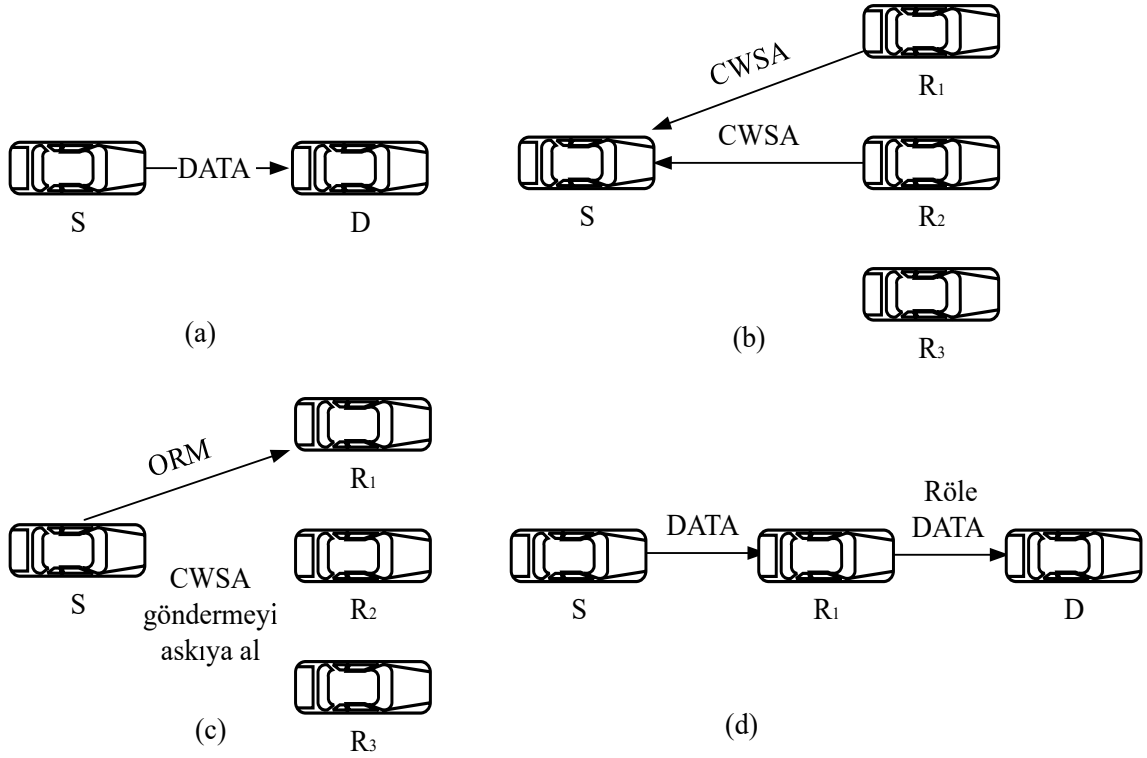
4.1.5 Veri İletimi

Veri iletimi sm ve nsm mesajları için sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmektedir. Kaynak ve hedef arasındaki başarılı doğrudan aktarım Şekil 4.8a’da gösterilmektedir. S verileri gönderdikten sonra ACK bilgilerini bekleyecektir. S düğümü, ACK bilgisini

alır, bu başarılı bir iletimdir. Öte yandan, S, ACK bilgisini almazsa, S düğümü, başarısız iletimi algılayacaktır. Şekil 4.8b, başarısız iletimi göstermektedir. Başarısız iletimden sonra, S işbirliğini başlatır ve S düğümü CRM bilgilerini gönderir. CRM bilgisini aldıktan sonra, komşu düğümler hata iletimini anlayacaktır. Şekil 4.8c, komşu düğümlerin CRM alarak iletim başarısızlığını tespit ettiğini göstermektedir. Daha sonra, iyi kanal durumuna sahip komşu düğümler, başarısız iletim için işbirliği yapmak üzere CAM gönderecektir. S, aralarında en uygun röleyi seçecek ve ORM'yi optimum röleye gönderecektir. Diğer düğümler, Şekil 4.8d'de gösterilen aynı CRM için CAM göndermek için eklenecektir. Daha sonra S, verileri optimum röleye gönderecek ve optimum röle, verileri D'ye gönderecektir. Yine, D, ACK bilgisini optimum röleye gönderecek ve optimum röle, ACK bilgisini S düğümüne iletecektir. Optimal röle aracılığıyla veri aktarımı Şekil 4.8e'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Sınır mesajları için veri aktarımı: (a) Başarılı sm yayını; (b) S ve D arasında başarısız iletim; (c) CRM alarak komşu düğümler iletim başarısızlığını tespit eder; (d) Komşu düğümler aktarmayı önerir ve S en uygun R₁'i seçer; (e) Optimum R₁ aracılığıyla veri iletimi



Şekil 4.9 Nsm mesajları için veri aktarımı, (a) S (WAVE sağlayıcı) ve D (WAVE kullanıcısı) arasında başarılı aktarım; (b) CWSA'yı komşu düğümlerden alarak, S röleleri tespit eder; (c) S, rölelerden optimum R_1 rölesini seçer; (d) Optimum röle R_1 üzerinden veri iletimi

Nsm mesajları için, S herhangi bir röleye ulaşamazsa, verileri doğrudan D'ye gönderir. S ve D arasında başarılı veri aktarımı Şekil 4.9a'da gösterilmektedir. Komşu düğümler daha iyi kanal koşullarına sahipse, CWSA yayınlarlar. CWSA bilgisini alarak S düğümü, Şekil 4.9b'de gösterilen röleyi algılayacaktır. Ardından S düğümü, röleler arasında en uygun kanal durumuna sahip olan optimum röleyi seçecektir. S, ORM bilgisini optimum röleye gönderir ve diğer düğümler, aynı WSA için ORM bilgisini duyduktan sonra CWSA göndermeyi askıya alır. Şekil 4.9c, en uygun rölenin seçimini ve CWSA göndermenin ertelenmesini açıklamaktadır. Şekil 4.9d, S düğümünün optimum röle seçildikten sonra optimum röle aracılığıyla D düğümüne veri göndereceğini göstermektedir.

4.1.6 Optimum Röle Seçimi

En uygun röle düğümü R, sm ve nsm mesajları için S tarafından seçilir. Bununla birlikte, S düğümü sm mesajları için işbirliğini başlatır ve D düğümü nsm mesajları için işbirliğini başlatır. İşbirliği kazanımı, R düğümüne bağlıdır. İşbirlikli iletimle, düşük veri hızlı bir düğüm, R düğümünün yardımıyla yüksek veri hızında veri yayınlayabilir.

Sm mesajları için S, işbirliğini başlatmak için CRM bilgisini gönderir. Daha sonra,

daha yüksek SINR bilgisine sahip komşu düğümler, S düğümüne CAM paketini gönderecektir. SINR bilgisi, CAM paketi içindedir. CAM paketini gönderen düğümler R olarak kabul edilir. Daha sonra S, CAM bilgisinden rölenin SINR bilgisini öğrenecektir. Ardından S düğümü, optimum SINR bilgisine sahip en uygun röleyi seçecek ve S düğümü, ORM bilgisini optimum röleye gönderecektir. Nsm mesajları için, daha yüksek bir SINR bilgisine sahip komşu düğümler CWSA bilgisini S düğümüne iletecek ve işbirliğini başlatacaktır. CWSA bilgisini S düğümüne yayınlayan düğümler rölelerdir. SINR bilgisi, CWSA'de bulunmaktadır. Optimal SINR bilgisine sahip bir düğüm, optimum röledir. Ardından S, ORM'yi optimum röleye gönderecektir. Burada röleler, röle ve optimum röle olarak kategorize edilebilir. CAM veya CWSA göndererek veri aktarımında geçiş yapmayı teklif eden komşu düğümler röledir. Röle grubundakiler daha yüksek SINR bilgisine sahiptir. En uygun röle grubundakiler, röleler [87, 88] arasında optimum SINR bilgisine sahip bir röledir.

4.2 Performans Analizi

4.2.1 Veri Hızı Analizi

İletim menziline (TR) N araç olduğu bir VANET ağı varsayılmıştır. Aynı zamanda araçların rastgele dağıtıldığı ve çok şeritli yolda gittiği varsayılmaktadır.

β , aşağıdaki gibi verilebilen araçların varış hızıdır [87]:

$$\beta = N_L d_T v, \quad (4.1)$$

burada N_L , çok şeritli yoldaki şerit sayısını temsil ederken, v aracın hızıdır. d_T trafik yoğunluğunu belirtir.

Δ_t , bir aracın zaman diliminde bir paketi yayınlama olasılığı olsun. Her bir alt taşıyıcı için Δ_{t-sc} şu şekilde yazılabilir [89]:

$$\Delta_{t-sc} = \frac{2}{(CW + 1)}. \quad (4.2)$$

N_{sc} bir dizi alt taşıyıcı olduğundan, Δ_t şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta_t = \frac{2}{(CW + 1)N_{sc}}. \quad (4.3)$$

İletim menzili ζ içinde en az bir araç paketi yayınlıyorsa, kanal meşgul olur, kanalın

meşgul olma olasılığı (Δ_b) şu şekilde gösterilebilir:

$$\Delta_b = 1 - (1 - \Delta_t)^N. \quad (4.4)$$

Çarpışma, kalan $N-1$ araçlarından en az birinin, zaman diliminde bir paket iletmesi durumunda meydana gelir, çarpışma olasılığı (Δ_c) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta_c = 1 - (1 - \Delta_t)^{N-1}. \quad (4.5)$$

Δ_s , kanaldaki bir paket iletiminin başarılı olması için başarılı iletim olasılığıdır; bu aralık zamanında kanalda bir araç iletim yaparsa meydana gelir. Δ_s ifadesi şu şekilde verilebilir:

$$\Delta_s = \frac{N \Delta_t (1 - \Delta_t)^{N-1}}{\Delta_b} c_{CH}, \quad (4.6)$$

burada c_{CH} ifadesi, kanal iyi ya da kötü olduğunu göstermektedir. Kablosuz kanallar iyi veya kötü durumda olabilir. Herhangi bir andaki SINR, kablosuz kanal iyi durumda olduğunda 15 ila 30 dB aralığındaki tekdüze bir dağılıma sahiptir. Kanal kötü durumda olduğunda SINR değeri 0 ila 15 dB aralığında varsayılır. Kanal, iki durumlu bir Markov zincir modeli ile modellenmiştir.

Δ_{d-coop} , işbirlikli iletim kararının olasılığıdır. İşbirlikli iletim kararları, doğrudan iletim başarısız olduktan sonra gerçekleştirilecektir ve işbirliğine dayalı aktarım için en az bir kullanılabilir röle vardır. Δ_{d-coop} aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\Delta_{d-coop} = \Delta_b \Delta_r N_{sc}, \quad (4.7)$$

burada, Δ_r , yardımcı olma olasılığıdır ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta_r = \frac{N_r}{N}, \quad (4.8)$$

burada, N_r röle sayısını göstermektedir.

Δ_{s-coop} , paket aktarımının işbirlikli aktarımla başarılı olduğu, işbirlikli aktarımla başarılı aktarım olasılığıdır. İletim, doğrudan iletimle veya ortak iletimle başarılı olabilir. Δ_{s-coop} şu şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} \Delta_{s-coop} &= \Delta_s + \Delta_s (1 - \Delta_s) \Delta_{d-coop} \\ &= \left(\frac{1}{\Delta_b} + \Delta_r N_{sc} \right) N \Delta_t (1 - \Delta_t)^{N-1} c_{CH}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

η , sistem veri hızını ifade etmektedir. η , aşağıdaki şekilde ifade edilebilen ortalama bir zaman dilimi süresi boyunca iletilen veri miktarıdır:

$$\eta = \frac{E[\text{data transmitted in a slot time}]}{\delta_e}, \quad (4.10)$$

$E[.]$ beklenen değer operatörünü ifade etmektedir ve δ_e , Markov zinciri sürecinde beklenen zamandır. Sm ve nsm mesajları için, η doğrudan iletimde aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\eta_{sm-dir} = \frac{\Delta_{s-dir} \Delta_b (1 - P_{ef}) L_{sm}}{\delta_{e-dir-sm}}, \quad (4.11)$$

$$\eta_{nsm-dir} = \frac{\Delta_{s-dir} \Delta_b (1 - P_{ef}) L_{nsm}}{\delta_{e-dir-nsm}}. \quad (4.12)$$

Burada L_{sm} , L_{nsm} , sırasıyla sm ve nsm mesajları için paket boyutunu belirtir. P_{ef} (3.26)'daki gibi hatalı çerçeve olasılığını ifade etmektedir. Hatalı çerçeve olasılığını kullanarak fiziksel katman etkilerini MAC katmanı ile birleştirebiliriz. Sm ve nsm mesajları için, işbirlikli iletimde η şu şekilde verilebilir:

$$\eta_{sm-coop} = \frac{\Delta_{s-coop} \Delta_b (1 - P_{ef}) L_{sm}}{\Delta_r \delta_{e-coop-sm}}, \quad (4.13)$$

$$\eta_{nsm-coop} = \frac{\Delta_{s-coop} \Delta_b (1 - P_{ef}) L_{nsm}}{\Delta_r \delta_{e-coop-nsm}}. \quad (4.14)$$

Sm ve nsm mesajları için, hem doğrudan iletim hem de ortak iletim durumunda δ_e ifadeleri

$$\delta_{e-dir-sm} = (1 - \Delta_b) \delta_{slot} + \Delta_b \Delta_{s-dir} \delta_{s-dir-sm} + \Delta_b (1 - \Delta_{s-dir}) \delta_c, \quad (4.15)$$

$$\delta_{e-coop-sm} = (1 - \Delta_b) \delta_{slot} + \Delta_b \Delta_{s-coop} \delta_{s-coop-sm} + \Delta_b (1 - \Delta_{s-coop}) \delta_c, \quad (4.16)$$

$$\delta_{e-dir-nsm} = (1 - \Delta_b) \delta_{slot} + \Delta_b \Delta_{s-dir} \delta_{s-dir-nsm} + \Delta_b (1 - \Delta_{s-dir}) \delta_c, \quad (4.17)$$

$$\delta_{e-coop-nsm} = (1 - \Delta_b) \delta_{slot} + \Delta_b \Delta_{s-coop} \delta_{s-coop-nsm} + \Delta_b (1 - \Delta_{s-coop}) \delta_c, \quad (4.18)$$

gibi ifade edilebilir. Burada, δ_c ve δ_s sırasıyla çarpışan ve başarılı iletim süreleridir. Sm mesajlarının yayın modu (broadcast) ve nsm mesajlarının tek noktaya yayın modu (unicast) dikkate alınmıştır. Sm ve nsm mesajları için, δ_s ve δ_c hem doğrudan iletim hem de ortak iletim için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\delta_{s-dir-sm} = \delta_{DIFS} + \frac{L_h + L_{sm}}{R_d} + \delta_{CRM} + \delta_{delay}, \quad (4.19)$$

$$\delta_{s-dir-nsm} = \delta_{DIFS} + \delta_{SIFS} + \frac{L_h + L_{nsm}}{R_d} + \delta_{WSA} + \delta_{delay}, \quad (4.20)$$

$$\delta_{s-coop-sm} = \delta_{DIFS} + 3\delta_{SIFS} + \frac{L_h + L_{sm}}{R_d} + \delta_{CRM} + \delta_{CAM} + \delta_{OHM} + \delta_{delay}, \quad (4.21)$$

$$\delta_{s-coop-nsm} = \delta_{DIFS} + 3\delta_{SIFS} + \frac{L_h + L_{nsm}}{R_d} + \delta_{WSA} + \delta_{CWSA} + \delta_{OHM} + \delta_{delay}, \quad (4.22)$$

$$\delta_c = \delta_{DIFS} + \frac{L_h + L}{R_d} + \delta_{delay}, \quad (4.23)$$

burada δ_{SIFS} , δ_{DIFS} , sırasıyla SIFS, DIFS için gerekli sürelerdir. δ_{CRM} , δ_{CAM} , δ_{WSA} , δ_{CWSA} , δ_{ORM} , sırasıyla CRM, CAM, WSA, CWSA, ORM bilgileri için gereken sürelerdir. δ_{delay} ve R_d , sırasıyla yayılma gecikmesini ve iletim hızını belirtir.

Tüm iletim modları için, sunulan trafik yüküne dayalı veri hızı değişim denklemi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\eta = \frac{t_L \exp(-\theta t_L)}{(1 - \exp(-\theta t_L)) + \theta} \quad (4.24)$$

burada, t_L trafik yükünü temsil etmektedir. Trafik yükü tipik olarak, servis talep eden ortalama istasyon sayısı ve servisi gerektiren istasyonların ortalama süresiyle karakterize edilir. θ normalize edilmiş zaman birimidir ($\theta = \delta_{delay}/\delta_e$). Ayrıca, işbirliğine dayalı iletişim sayesinde, sistem verim kazancı ζ hem sm hem de nsm mesajları için

$$\zeta_{sm} = \frac{\eta_{sm-coop} - \eta_{sm-dir}}{\eta_{sm-coop}}, \quad (4.25)$$

$$\zeta_{nsm} = \frac{\eta_{nsm-coop} - \eta_{nsm-dir}}{\eta_{nsm-coop}}. \quad (4.26)$$

şekilde hesaplanabilir.

4.2.2 Paket Bırakma Oranı Analizi

Toplam olasılık 1 ise (başarılı iletim olasılığı + paket bırakma olasılığı), paket bırakma oranı 1 - başarılı iletim olasılığıdır. Doğrudan iletim için, paket bırakma oranı (ε) şu şekilde hesaplanabilir [89]:

$$\varepsilon = (1 - \Delta_{s-DT}). \quad (4.27)$$

Doğrudan iletimin başarısız olmasından sonra, işbirlikli iletim ile paket iletilecektir. İşbirlikli iletim için, paket bırakma oranı (ε) aşağıdaki gibi yazılabilir [89]:

$$\varepsilon = (1 - \Delta_{s-CT})^m, \quad (4.28)$$

burada m işbirliği girişimlerinin sayısını göstermektedir.

4.2.3 Gecikme Analizi

Bir çerçevenin oluşturulmasından başarılı iletimine kadar geçen süre çerçeve gecikmesidir. Bu gecikme $E[\Lambda]$ şöyle yazılabilir:

$$E[\Lambda] = E[\chi](E[\vartheta] + \delta_c + \delta_w) + (E[\vartheta] + \delta_s), \quad (4.29)$$

burada $E[\chi]$, başarılı bir aktarıma kadar bir çerçevenin ortalama çarpışma sayısıdır, $E[\vartheta]$, kanala erişmeden önce aracın geri çekilmesi olan geri çekilme gecikmesidir ve δ_w , bir aracın bir çarpışmadan sonra kanalı tekrar algılaması için bekleme süresidir. δ_w aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\delta_w = \delta_{SIFS}. \quad (4.30)$$

$E[\chi]$, başarılı aktarım olasılığı Δ_s 'den elde edilebilir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E[\chi] = \frac{1}{\Delta_s} - 1. \quad (4.31)$$

$E[\Lambda]$ geri çekilme sayacı değerine ve kanal meşgul olduğunda sayacın duraklatılan süresine bağlıdır. Geri çekilme sayacı c değerinde ise ve 0'a ulaşmak için, sayacın duraklatılması dikkate alınmadan b_c zaman dilimi sürelerine ihtiyaç vardır. Bu zaman aralığının ortalaması şu şekilde yazılabilir:

$$E[\Psi] = \sum_{c=0}^{CW-1} c b_c = \sum_{c=0}^{CW-1} c \frac{CW-c}{CW} b_0 = \frac{(CW-1)(CW+2)}{(CW+1)N_{sc}}. \quad (4.32)$$

$E[\Phi]$ bir araç sayacının ortalama bekleme zamanıdır, $E[N_\Phi]$ geri çekilme sayacı 0 olmadan önce bir aracın diğer araçlardan gelen iletimi algıladığı ortalama süredir ve $E[\Upsilon]$, iletim gerçekleşmeden önceki ardışık boşa kalma sürelerinin ortalama sayısıdır. Bu parametreler arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$E[N_\Phi] = \frac{E[\Psi]}{\max(E[\Upsilon], 1)} - 1, \quad (4.33)$$

$$E[\Phi] = E[N_\Phi](\Delta_s \delta_s + (1 - \Delta_s) \delta_c), \quad (4.34)$$

$$E[N_\Phi] = \frac{E[\Psi]}{\max(E[\Upsilon], 1)} - 1, \quad (4.35)$$

(4.32) - (4.35) kullanılarak, $E[\vartheta]$ aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$E[\vartheta] = E[\Psi] + E[N_\Phi](\Delta_s \delta_s + (1 - \Delta_s) \delta_c). \quad (4.36)$$

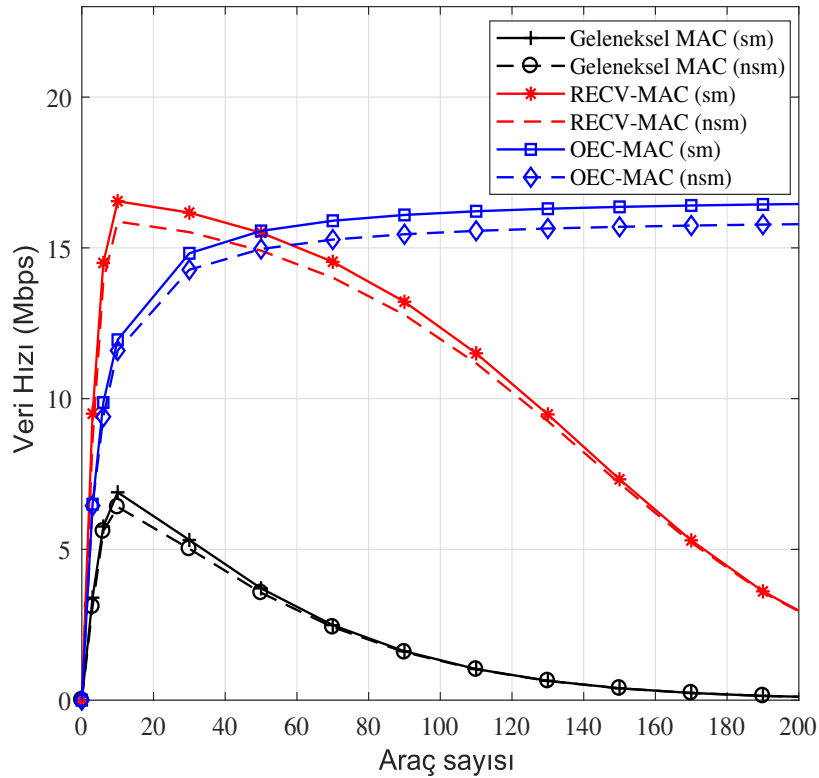
Burada δ_s ve δ_c (4.19)-(4.23) eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Böylece $E[\Lambda]$; (4.30), (4.31) ve (4.36), (4.29) içerisine yazılarak elde edilebilir.

Tablo 4.4 Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri

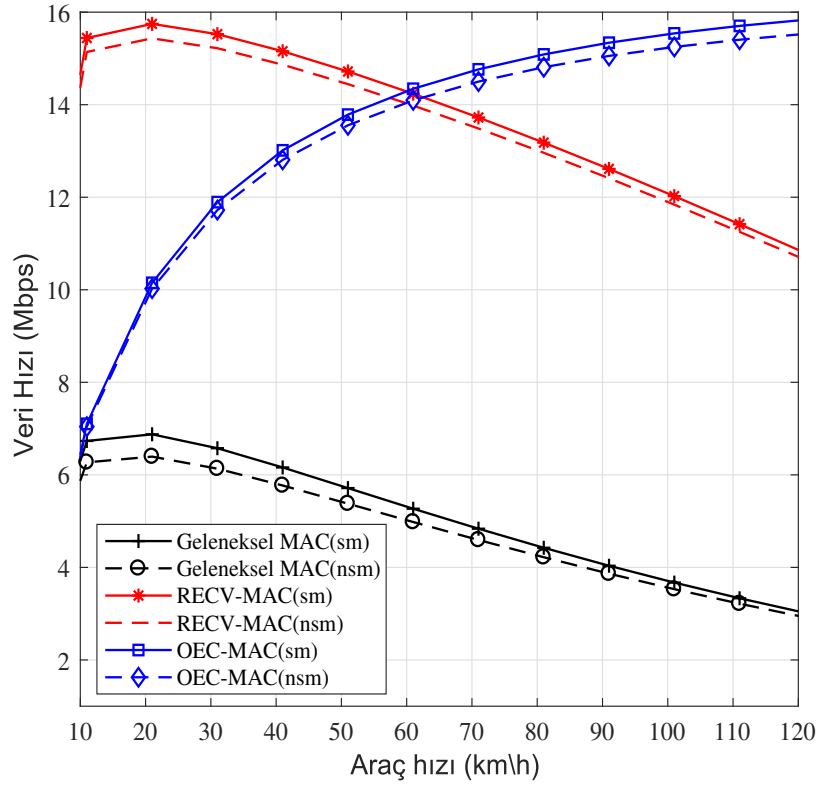
Parametreler	Değerleri
$\delta_{slot}, \delta_{delay}, \delta_{SIFS}, \delta_{DIFS} \mu s$	20, 1, 10, 50
CRM, CAM, ORM, WSA, CWSA (bytes)	20, 26, 24, 25, 27
L_h, L_{sm}, L_{nsm} (bytes)	50, 512, 300
R_c, R_d (Mbps)	1, 11
CW	64
ζ (m)	500

4.3 Benzetim Sonuçları

Önerilen OEC-MAC protokolünün performansı bu bölümde incelenmiştir. Sayısal analiz MATLAB’da yapılmıştır. Doymuş durum ve ideal bir kanal durumu varsayılmıştır. Ayrıca araçların iki şeritli yolda gittiğini varsayılmıştır. Sayısal sonuçlarda, önerilen OEC-MAC protokolü RECV-MAC [90] ve IEEE 802.11p [91] tabanlı geleneksel MAC ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz için kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 4.4’te sunulmuştur.

**Şekil 4.10** Araç sayısına göre veri hızı

Şekil 4.10, araç sayısına göre veri hızını göstermektedir. VANET’ler için sm ve nsm mesajlarının iletimi için OEC-MAC protokolünde önemli bir gelişme vardır. Veri hızı belirli bir noktaya kadar artar ve ardından azalır. Daha az araç çarpışmalarına neden

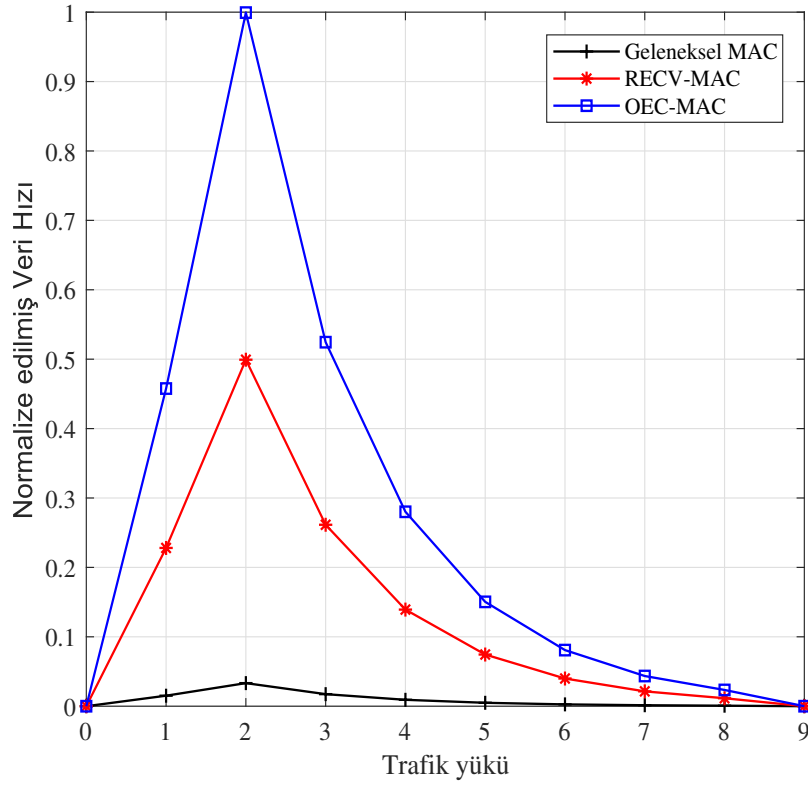


Şekil 4.11 Araç hızına göre veri hızı

olamayacağından, artan araç düğümleriyle veri hızı artmaya başlar, ancak araçlar arttıkça, araçlar daha fazla çarpışmaya neden olur ve veri hızını azaltır. Bununla birlikte, önerilen OEC-MAC'de, veri hızı özellikle yüksek trafik senaryolarında oldukça iyidir. İşbirliği nedeniyle, S-R bağlantısı paket iletimi için daha güvenilir olacak ve iyi kanal koşullarında iletim daha hızlı olacaktır. CSMA/CA nedeniyle, RECV-MAC protokolü, OEC-MAC ile karşılaştırıldığında düşük trafik olduğunda daha yüksek verim sağlar. Ancak trafik arttığında, OEC-MAC, RECV-MAC protokolünden daha iyidir. OEC-MAC protokolü için veri hızı, OFDMA nedeniyle daha yüksektir. OFDMA, farklı alt taşıyıcı kanallar üzerinden mevcut veri iletimini mümkün kıldığından, çarpışma olasılığı daha düşüktür.

Şekil 4.11, araçların hızına göre veri hızını göstermektedir. Araç düğümleri arasındaki yüksek hareketlilik hızlı topoloji değişikliklerine neden olabileceğinden, veri hızı artan hız ile önemli ölçüde azalır. Bununla birlikte, önerilen OEC-MAC protokolü, işbirliğine dayalı iletişim ve OFDMA nedeniyle VANET'lerde farklı hızlarda veri hızını artırır.

Şekil 4.12, sunulan trafik yüküne karşı normalize edilmiş veri hızını göstermektedir. Veri hızı, sunulan yükün artmasıyla artar ve ardından normal bir dağılımı izleyen düşmeye başlar. Sunulan trafik yükü 20 araçla başlar, ve sunulan yükün her artışında

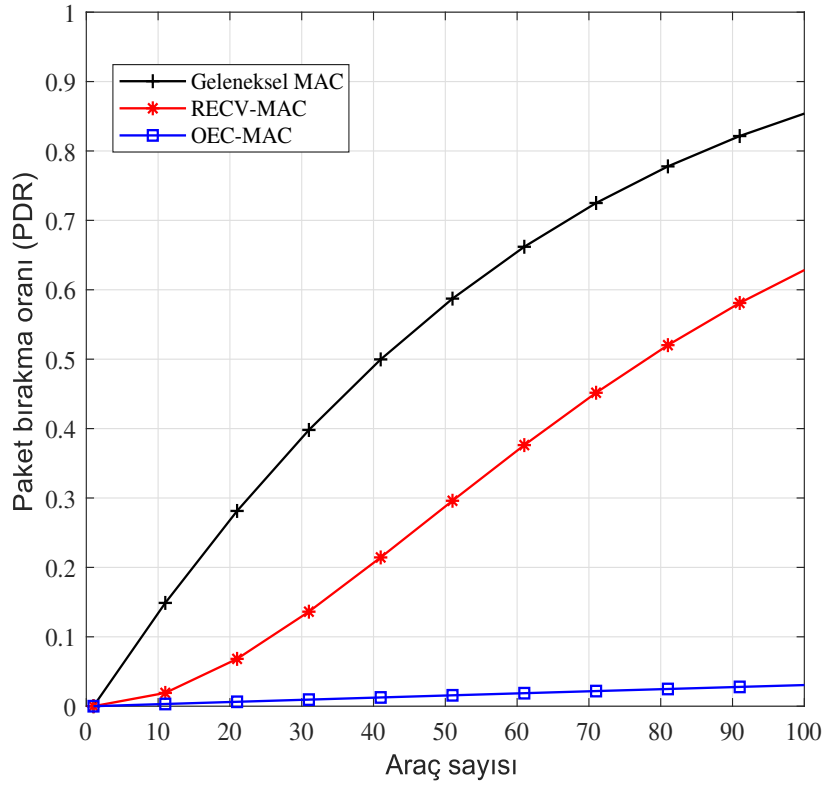


Şekil 4.12 Trafik yüküne göre veri hızı

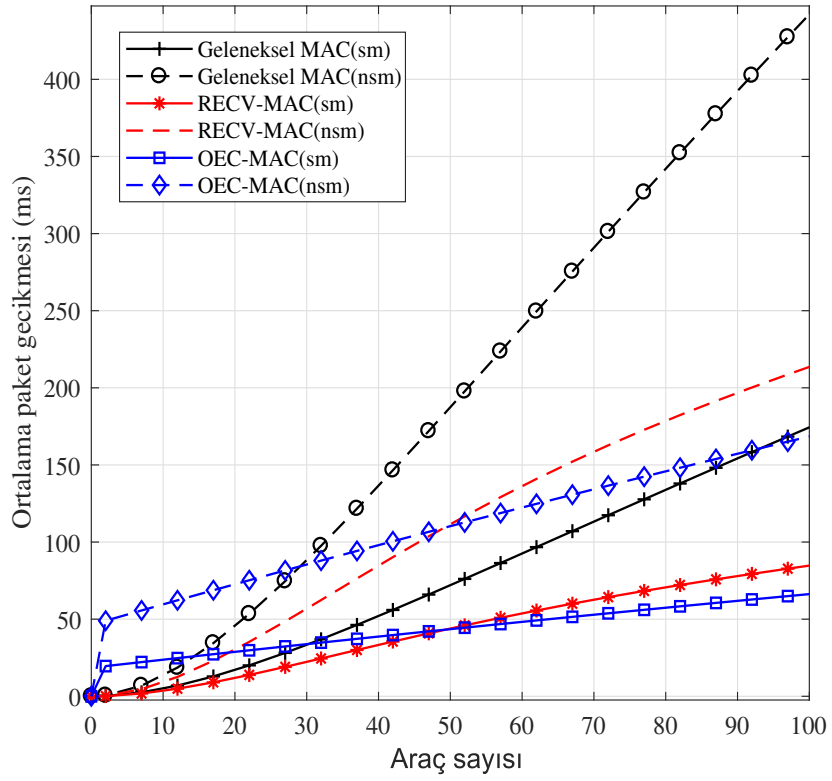
20 araç sisteme ilave olur. OEC-MAC'ın en yüksek veri hızına sahip olduğu şekilden görülmektedir.

Şekil 4.13, araç sayısına göre paket düşürme oranını (PDR) göstermektedir. Çarpışma olasılığı arttığı için araç sayısının artmasıyla paket düşme oranı artar. Daha fazla düğüm olduğunda, paketin varma olasılığı artar, bu da daha fazla çekişme ve daha fazla çarpışma ile sonuçlanır. OEC-MAC protokolü, paket düşme oranını azaltarak güvenilir iletim sağlar. Alt taşıyıcı nedeniyle, farklı alt taşıyıcı kanallarından eşzamanlı paket erişimi ve iletimi çarpışma olasılığını azaltabilir. Bu nedenle, OEC-MAC en düşük PDR'ye sahiptir.

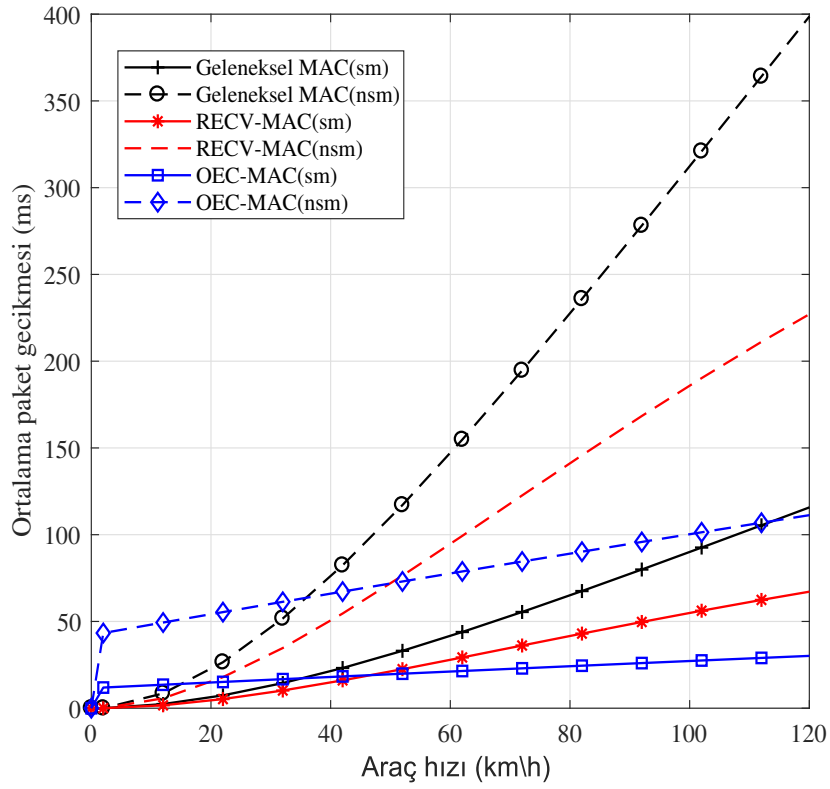
Şekil 4.14, araç sayısına göre ortalama paket gecikmesini göstermektedir. Gönderilecek daha fazla paket olacağından, ortalama paket gecikmesi araç sayısı ile artar. İletim için, bu ek paketler, aynı zaman periyodunda kanal için genişletilmiş meşgul olma ve kanal için çarpışma olasılığı ile sonuçlanacaktır. Bu nedenle, ortalama paket gecikmesi artar. İşbirliğine dayalı iletişim, başarılı aktarım olasılığını artırır. Bu nedenle, RECV-MAC ve OEC-MAC, geleneksel MAC'den daha düşük gecikmeye sahiptir. Hem RECV-MAC hem de geleneksel MAC'ın OEC-MAC protokolünden daha düşük gecikmeye sahip olduğu görülmektedir çünkü her ikisi de CSMA/CA kullanır



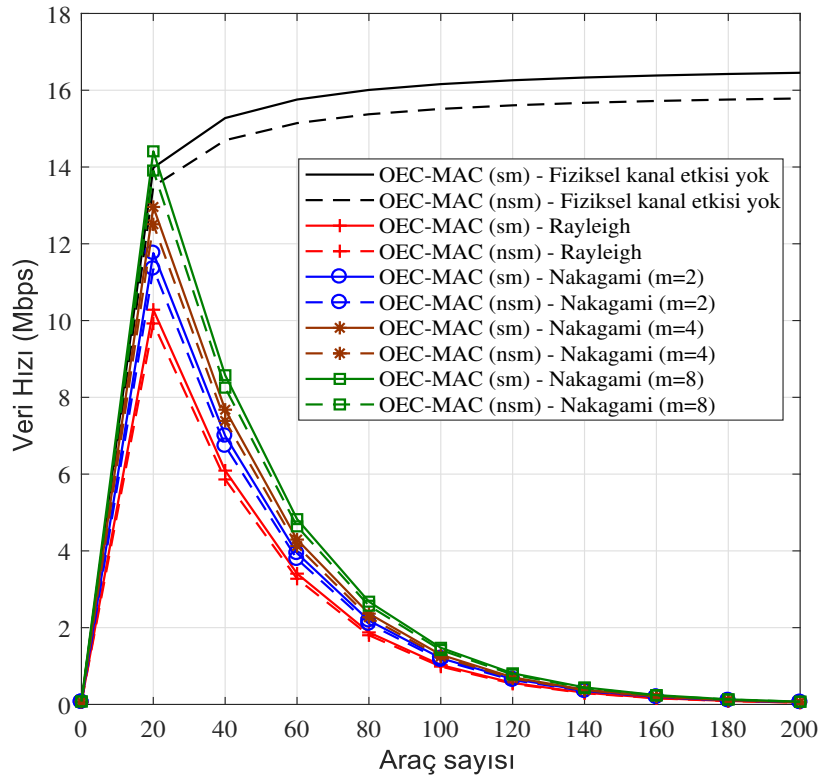
Şekil 4.13 PDR'a göre veri hızı



Şekil 4.14 Araç sayısına göre ortalama paket gecikmesi



Şekil 4.15 Araç hızına göre ortalama paket gecikmesi



Şekil 4.16 Farklı sönmülemeli kanallar altında araç hızına göre veri hızı

ve düşük trafik olduğunda CSMA/CA daha iyi performans gösterir. CSMA/CA tam kanal kullandığından, paket OEC-MAC'den daha yüksek bant genişliğiyle iletilir. Öte yandan, CSMA/CA, yüksek çarpışma olasılığı nedeniyle yüksek trafik senaryosu durumunda iyi performans gösterememektedir. Yüksek çarpışma olasılığı geri çekilmeyi artırır ve kanalı daha uzun süre meşgul eder. Bu nedenle, hem RECV-MAC hem de geleneksel MAC protokolleri, yoğun trafikte daha yüksek gecikmeye sahiptir. Öte yandan, OEC-MAC, OFDMA mekanizmasının alt taşıyıcı kanalı ile kanal meşgul ve çarpışma olasılığını azaltır. Paketler, bir kanalda rekabet etmek yerine, kanalın meşgul olma ve çarpışma olasılığını azaltacak olan farklı alt taşıyıcı kanalları için mücadele edeceklerdir. Bu nedenle, OEC-MAC yoğun trafikte RECV-MAC'den daha düşük gecikmeye sahiptir.

Şekil 4.15, hıza göre ortalama paket gecikmesini göstermektedir. Araç hızının artmasıyla gecikme artar. Ağ topolojisi, iletişimi kararsız hale getiren ve paket kaybına ve çarpışmaya neden olan hızla değiştiği için gecikme artar. Ancak OEC-MAC protokolü, OFDMA ve işbirliğine dayalı iletişim nedeniyle VANET'lerde gecikmeyi azaltır. Aynı konu bu şekilde de göze çarpmaktadır. Trafik düşük olduğunda, geleneksel MAC ve RECV-MAC protokolleri OEC-MAC'den daha düşük gecikmeye sahiptir. Öte yandan, OEC-MAC, trafik yüksek olduğunda geleneksel MAC ve RECV-MAC protokollerinden daha düşük gecikmeye sahiptir.

Şekil 4.16, fiziksel kanalın etkisinin olmadığı durum, Rayleigh ve Nakagami-m sönümlemeli kanallar için araç sayısına karşı veri hızını göstermektedir. Rayleigh ve Nakagami-m sönümlemeli kanallar için veri hızı, N 'nin artmasıyla azalır. N arttığında, ilave araçlardan daha fazla paket ulaşacaktır ve bu da iletim için gereken paket sayısını artıracaktır. N artışı ile ekstra paket iletimi, veri hızını düşürür ve çarpışma olasılığını artırır. Rayleigh sönümlemeli kanalı ($m=1$) kullanan sistem en düşük veri hızına sahiptir. Nakagami-m sönümlemeli kanalı kullanan sistemin veri hızı Rayleigh sönümlemeli kanaldan daha fazladır.

Mevcut MAC mekanizmalarında, aynı ağ senaryosu altında, maksimum veri hızı [36, 41, 43, 48]'de sırasıyla yaklaşık 3.5, 3.5, 7, 16 Mbps'dir. Bununla birlikte, OEC-MAC protokolü yaklaşık 16,3 Mbps'lik bir maksimum veri hızına ulaşır. Gecikme analizi [37, 41, 42]'de incelenmemiştir. Sm mesajının gecikme limiti [40, 41, 43]'te karşılanamamaktadır. [48], VANET'lerde sm mesajları için 100 msn gecikme gereksinimini karşılasa da, OEC-MAC yoğun trafik koşullarında [48]'den daha düşük gecikmeye sahiptir.

4.4 Sonuçlar

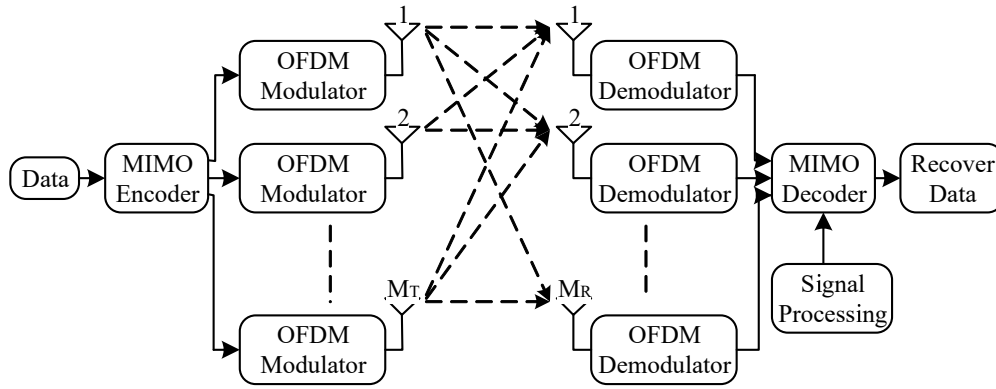
Bu bölümde, OEC-MAC olarak adlandırılan VANET'ler için yeni bir OFDMA tabanlı etkin işbirlikli MAC protokolü önerilmiştir. Etkili işbirliği iletişimi sağlamak için yeni kontrol mesajları sunulmuştur. Veri aktarım modu iki kategoriye ayrılır - doğrudan aktarım ve işbirliğine dayalı aktarım. Optimum röle seçim mekanizması da açıklanmıştır. OEC-MAC protokolünün Markov zincir modeline dayalı analitik bir analiz gösterilmiştir. Başarılı iletim olasılığı, kanal meşgul olasılığı, çarpışma olasılığı, veri hızı, paket bırakma oranı ve gecikme gibi ağ performansı ölçümleri türetilmiştir. OEC-MAC protokol performansı sayısal analizle incelenip ve nicel bir karşılaştırma sağlanmıştır. Sayısal sonuçlar, OEC-MAC protokolünün veri hızını artırdığını, paket bırakma hızını ve gecikmeyi azalttığını ve sm mesajlar için 100 msn gecikme gereksinimini karşıladığını göstermektedir. Ayrıca, OEC-MAC, yoğun trafik senaryolarında diğer mevcut protokollerden daha iyi performans göstermektedir.

MIMO-OFDM TABANLI MAC PROTOKOLÜNÜN VANET AĞLARDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, VANET ağlarda performansı artırmak için yeni bir MIMO-OFDM tabanlı MAC Protokolü önerilmiştir. Çok girişli çoklu çıkış (multiple-input multiple-output, MIMO) ve dik frekans bölmeli çoklama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), hem MIMO hem de OFDM'nin avantajlarından yararlanmak için entegre edilmiştir. MIMO'yu OFDM ile uyumlu hale getirmek için yeni bir erişim mekanizması önerilmiştir. Doymamış (non-saturated) durum olarak değerlendirilen 3D Markov zincir modeli tabanlı analitik çalışma sunulmuştur. Nakagami-m sönümlemeli kanal çalışmada dikkate alınmıştır. Performansı etkileyen parametreler dikkate alınıp ilişkiler türetilmiştir. Başarılı iletim olasılığı, kesinti olasılığı, BER, veri hızı ve gecikme ifadeleri elde edilmiştir. Ayrıca, analitik çalışmaları doğrulayan sayısal sonuçlar sunulmuştur.

5.1 MIMO-OFDM Kanal Modeli

Tek taşıyıcı sistemler, yüksek veri hızlarında spektral olarak verimsizdirler. Yüksek veri hızını desteklemek için tek taşıyıcılı sistemlerde daha yüksek bant genişlikleri kullanılır. Bu artırılmış bant genişliği, bit aralığını (interval) veya sembol aralığını azaltır. Dolayısıyla sistem gürültüye ve diğer bozukluklara karşı daha duyarlı hale gelir. Öte yandan, çok taşıyıcılı sistemlerde, gerekli toplam veri hızı birden çok alt taşıyıcı arasında bölünür. Bu, tek taşıyıcı sisteme kıyasla azaltılmış girişim (dar bantlı girişim) avantajına sahiptir. Çoklu taşıyıcı sistemde, her bir alt taşıyıcı daha düşük oranda veri taşıdığından sembol süresi daha uzundur. Bu, sistemi gürültüye ve diğer bozukluklara karşı daha bağışık hale getirir. OFDM, paralel veri iletimi için çoklu ortogonal alt taşıyıcılar kullanır ve bu nedenle çoklu taşıyıcı modülasyon tekniği olarak adlandırılır. Alt taşıyıcılar arasındaki bu ortogonalite ISI olmamasını sağlar. FDM'den farklı olarak, ICI'yi azaltmak için alt taşıyıcılar arasında koruyucu frekans bandı gerektirmez. Güvenilir olduğu ve çok yönlü sönümleme

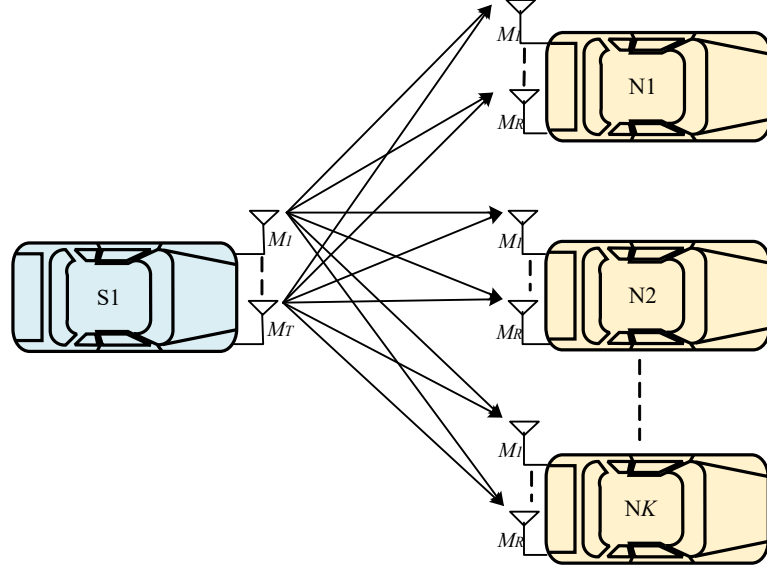


Şekil 5.1 MIMO-OFDM yapısı

ortamında yüksek iletim hızlarına sahip kullanıcı verilerini taşıyabildiği için yeni nesil kablosuz ağlar için umut verici tekniklerden biridir. OFDM, yüksek spektral verimlilik, semboller arası girişime karşı sağlamlık, frekans seçici sönmlemeye karşı dayanıklılık, uygulama kolaylığı (azaltılmış donanım karmaşıklığı) ve basit eşitleme teknikleri sunmaktadır. Son yıllarda OFDM, ister kablosuz ister kablolu olsun birçok geniş bant iletişim uygulamasında kullanılmıştır. Birden fazla antenin kullanımı da son zamanlarda daha ilgi çekici bir teknik haline gelmiştir. Çoğu yeni nesil kablosuz sistem, protokollerinde MIMO teknolojilerini kullanmaktadır. MIMO, kanal kapasitesinde çarpımsal bir artışa yol açan daha yüksek çeşitlilik avantajına sahiptir. Aynı zamanda spektral verimliliği de artırır. OFDM ve MIMO bu nedenle spektral verimlilik, kapasite ve güvenilirlik veya hizmet kalitesi (QoS) açısından sistemin performansını artırabilir. Şekil 5.1, bir MIMO-OFDM sistemini göstermektedir. İşaret MIMO kodlayıcı sonrasında OFDM modulatöre gönderilir. Daha sonra alıcı tarafta OFDM demodülasyon işlemi gerçekleştirilir. Demodülasyon işlemi sonrasında MIMO çözümü yardımıyla işarete karar verilir. Her araç düğümünün birden fazla antene sahip olduğu bir VANET senaryosu Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Kaynak S düğümünün M_T diğer alıcı araç düğümlerinin M_R anten sayısına sayısına sahip olduğu sistem düşünülmektedir. S düğümünden tüm düğümlere yayın yapılmaktadır.

MIMO-OFDM teknolojisinin ana avantajları şunlardır:

- Uzaysal çeşitlilik, iletim gücünde 100 kata kadar artışa eşdeğer bir gelişme sağlar,
- Kapasite artışı,
- Bant genişliği verimliliği,
- Simgeler arası girişim (Intersymbol interference, ISI) azaltma.



Şekil 5.2 Önerilen MIMO-OFDM tabanlı VANET senaryosu

5.1.1 Çerçeve Formatı

Önerilen bu protokolde, yeni kontrol paketleri: MIMO-RTS (MIMO-request to send), MIMO-CTS (MIMO-clear to send) verilmektedir. IEEE 802.11 standardındaki kontrol paketleri biçimi, MIMO iletişimini desteklemek için değiştirilmiştir. İletimden önce, araç düğümleri donanım özelliklerini ilişkilendirme prosedüründe paylaşmaktadırlar. Standartta tanımlanan yapı hem RTS hem de CTS bilgilerine dayanmaktadır. Şekil 5.3, IEEE 802.11 standardındaki MAC protokolünün iletim zaman diyagramını değiştirmeden genişletilmiş çoklu alıcı adreslerini içeren bir RTS kontrol çerçevesini, ve çoklu kanal durum bilgilerini içeren değiştirilmiş CTS'yi göstermektedir. İletişim prosedürü şu şekilde devam etmektedir: ilk olarak, verici bir MIMO-RTS çerçevesi gönderir. Ardından alıcı, iletimin başlatılması için bir MIMO-CTS çerçevesi ile yanıt verir. MIMO-CTS çerçevesinin alınmasından sonra, verici, alıcıdan gelen talimatlara göre (bir veya daha fazla) paket gönderir. Alıcı, alınan paketleri kontrol eder ve bunları aldıktan sonra ACK çerçevesini oluşturur. ACK çerçevesi verici tarafından alındığında, kuyruk paketleri çıkarılır ve başka bir iletim başlatılır. Kaynak S düğümü,

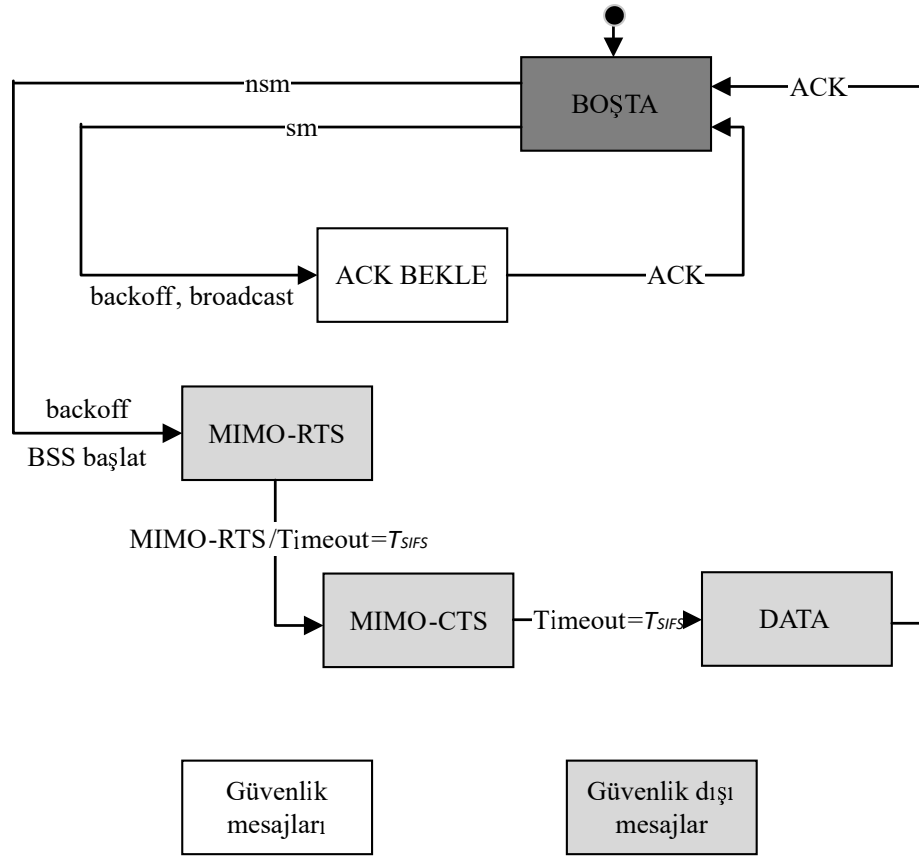
MIMO-RTS

Frame Control	Duration	Receiver Address	Transmitter Address	Frame Check
2 bytes	2 bytes	Number of antennas *6 bytes	6 bytes	2 bytes

MIMO-CTS

Frame Control	Duration	Receiver Address	Channel State Information	Frame Check
2 bytes	2 bytes	6 bytes	Number of antennas *bytes	2 bytes

Şekil 5.3 MIMO-RTS ve MIMO-CTS kontrol paket formatı



Şekil 5.4 Önerilen sistemin sonlu durum makinesi

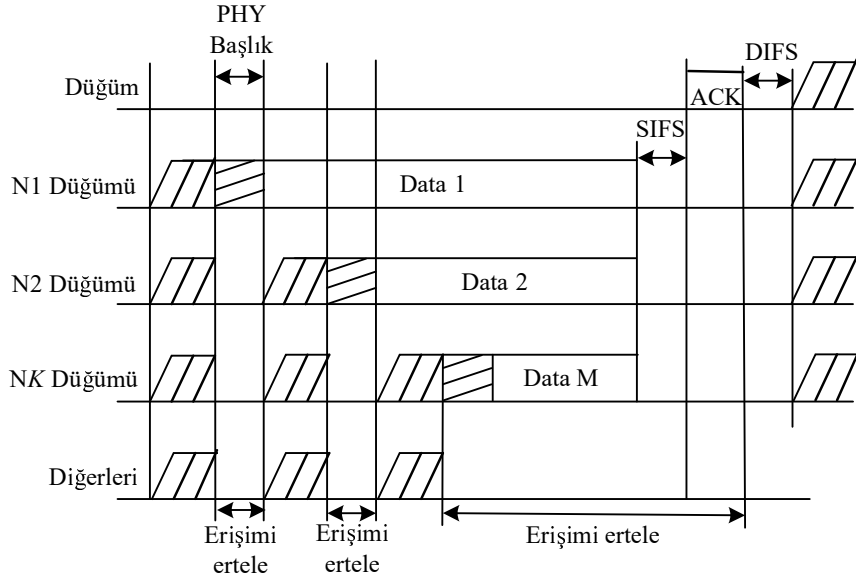
ACK çerçevesi kaybolursa bir zaman aşımından sonra yeniden iletme neden olur. Tüm kontrol çerçeveleri, donanım yetenekleri ne olursa olsun tüm istasyonların doğru şekilde alındığından emin olmak ve onlara yardımcı olmak için ayrı bir cihaz aracılığıyla iletilir.

5.1.2 Sonlu Durum Makinesi

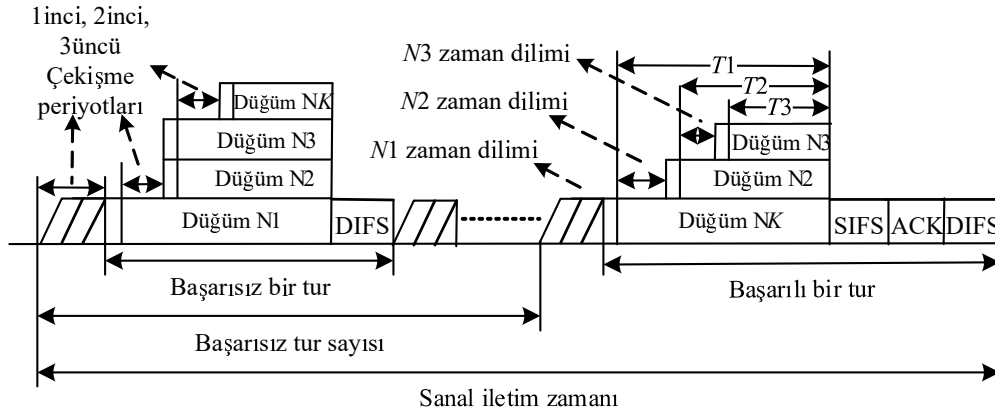
Güvenlik mesajları (sm) ve güvenlik dışı mesajları (nsm) iletmek için önerilen MIMO-OFDM MAC protokolünün dahili sonlu durum makinesi (finite state machine, FSM), birleşik modelleme dili (unified modeling language, UML) ile gösterilen Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Beklenmedik bir durumu işlemek için, zamanlayıcılar, paket başlığı uzunluk değerlerine göre hesaplanır. Bir zaman aşımı olursa "BOŞTA" durumu olarak sıfırlanır.

5.1.2.1 Güvenlik Mesajları İletimi

VANET'lerde gecikme kriterlerine sahip en önemli mesajlar, acil durum uyarısı, kaza önleme, sokak durumu, yöntem değişikliği desteği, elektronik fren lambası göstergesi gibi güvenlik mesajlarıdır. Kaynak düğüm S, sm mesajını yayınlar ve ACK bilgisi için



Şekil 5.5 Çok düğümlü MIMO sistemi için kanal çekişmesine dayalı iletim

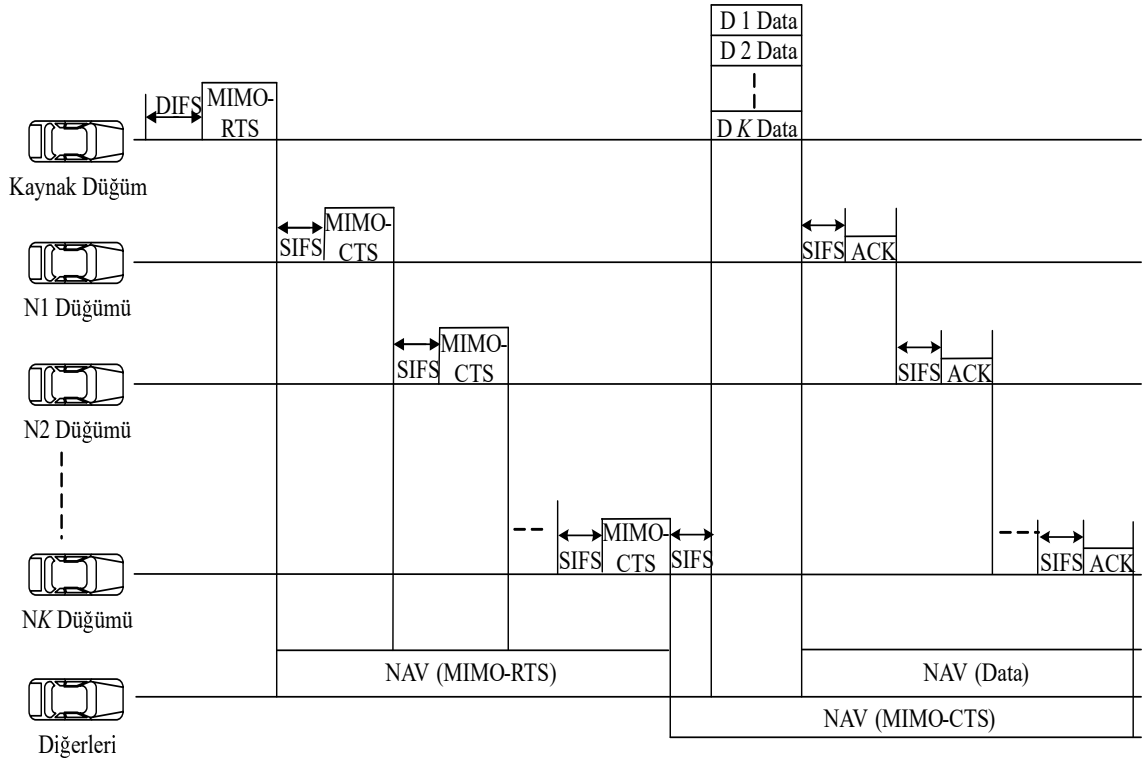


Şekil 5.6 MIMO sistemi için kanal çekişmesine dayalı iletim örneği

bekler. Tüm hedef düğümlerden ACK bilgisi alınırsa, yayın başarılı olacaktır. m_r sayısı sm (m_{r-sm}) mesajları için maksimum m_r limitine eşit veya küçükse, ACK bilgisi alınmazsa ve iletim hatası için sm mesajları, ACK almayan düğüme aktarılacaktır. Kaynak düğüm hala RTS/CTS olmadan sm yayınlar çünkü CTS tüm düğümlerden bir çarpışma yaratır. ACK bilgisi, güvenilir iletim sağlamak için kullanılır. Kanal çekişmesine dayalı çok düğümlü iletim diyagramı Şekil 5.5'te gösterilmektedir. İki düğüm aynı anda çekişme penceresini kazandığında bir çarpışma meydana gelebilir. Bu durum, sm mesajını iletimi için Şekil 5.6'da bir örnek olarak gösterilebilir.

5.1.2.2 Güvenlik ile İlgili Olmayan Mesajların İletimi

Güvenlik dışı mesajlar (nsm), örneğin web'de gezinme, içerik sunumu, harita güncellemeleri, video akışı, oyun ve eğlence vb. VANET'lerde sağlanır. nsm mesajları, bir kaynak düğümden bir hedef düğüme tek noktaya yayın yapar ve



     5.7 MIMO sistemi için MIMO-RTS/MIMO-CTS tabanlı iletim

ACK'nin veri aktarım başarılarını veya hatalarını tanımasını bekler. Bir kaynak düğüm, hedef düğüme nsm mesajlarını gönderirse, ilk olarak, gizli düğüm problemlerinden kaynaklanan paket çarpışmalarını önlemek için nsm mesajları, RTS/CTS mekanizması aracılığıyla kaynak düğüme gönderilecektir. Ardından, kaynak düğüm hedefe nsm mesajı gönderecektir. ACK bilgisi hedef düğümden alındıktan sonra, ACK bilgisi kaynağa gönderilir. ACK bilgisi alınmazsa iletim başarılı olmaz. Bir başarısız iletim için anlık m_r değeri, maksimum m_r (m_{r-nsm}) değerinden küçük veya ona eşit olduğunda, nsm mesajı yeniden iletilecektir.

Kaynak S düğümünün aynı anda K alıcı düğümlerine hizmet vermesi için çok kullanıcılı serbestlik derecesinden yararlanılmaktadır. Çok kullanıcılı iletim diyagramı      5.7'de gösterilmektedir ve iletim prosedürü nsm mesajları için aşağıdaki gibidir: S kaynak düğümü, K alıcı düğümlerine bir MIMO-RTS  er evesi gönderir. Bu K alıcı düğümleri bir MIMO-CTS bilgisi ile yanıt verir. Veri iletimi tamamlandıktan ve kanalın SIFS için boşta olduğu algılandıktan sonra, K alıcı düğümleri ACK bilgisini aynı MIMO-CTS bilgisi iletimlerinde sıralı olarak geri gönderir.

5.1.3 Kanal Erişim Mekanizması

     5.2'de gösterildiği gibi,  nerilen MIMO-OFDM MAC sistemi, çok sayıda araç düğümünün kaynak S düğümünden güvenlik mesajlarının alınmasını sağlar. MIMO,

Tablo 5.1 Önerilen MIMO-OFDM MAC protokolünün kanal erişim mekanizması algoritması

1:	başla
2:	k ve N_{sc} 'yi başlat
3:	Mesajlar sıraya girer ve kanal izlenir
4:	if $k < N_{sc}$
5:	düğüm iletim için mücadele eder ve $k=k+1$ olarak güncellenir
6:	else if $k > N_{sc}$
7:	kanal izlenmeye devam edilir
8:	end else if
9:	end if
10:	if ACK başarıyla alınır
11:	k 1'e düşecek ve $k=k-1$ 'i güncellenecektir
12:	else if ACK alınmadıysa
13:	4. adıma dönülür
14:	end else if
15:	end if

birden fazla düğümün eşzamanlı olarak verici düğümüne iletim yapmasına olanak sağlar. Tüm düğümlerin N_{sc} sayıda alt taşıyıcısı olduğundan, sistemde maksimum eşzamanlı düğüm sayısı N_{sc} 'yi aşamaz. Bu amaca ulaşmak için her düğüm, başlangıç eklerini saptayarak alt taşıyıcıların sayısına bağlı olan, eşzamanlı akımların mevcut sayısını sayan bir iletim sayacı (k) tutar. K , alt taşıyıcıların sayısından küçükse, düğüm iletim fırsatı (TXOP) için mücadele edecek ve k 'yi $k+1$ olarak güncelleyecektir. K 'den daha küçük olan yalnızca bir ileten düğüm olduğundan, kalan düğümler ikinci iletim fırsatı için kanala erişim mücadelesine devam edecektir. N2 kanala erişmek için ikinci çekişmeyi kazandığında ve ilettiğinde, geri kalan düğümler önceki duruma benzer şekilde davranır ve k , $k+2$ olarak artacaktır. K değeri, N_{sc} 'den büyük olduğunda, eşzamanlı iletim fırsatı kalmaz; geri kalan düğümler, kanal boş ($1 \leq k \leq N_{sc}$) olana kadar iletim için kanalı izler. N_{sc} eşzamanlı iletimlerinin eşzamanlı olarak sona erdiği varsayıldığında, verici düğüm daha sonra ağdaki K düğümünden bir ACK çerçeve mesajı alacaktır ($1 < K < N$). Dolayısıyla, k 1'e düşecek ve $k-1$ olarak güncellenecektir. ACK bilgisi alınmazsa, düğüm iletim fırsatını tekrar değerlendirecek ve k , $k+1$ olarak güncellenecektir.

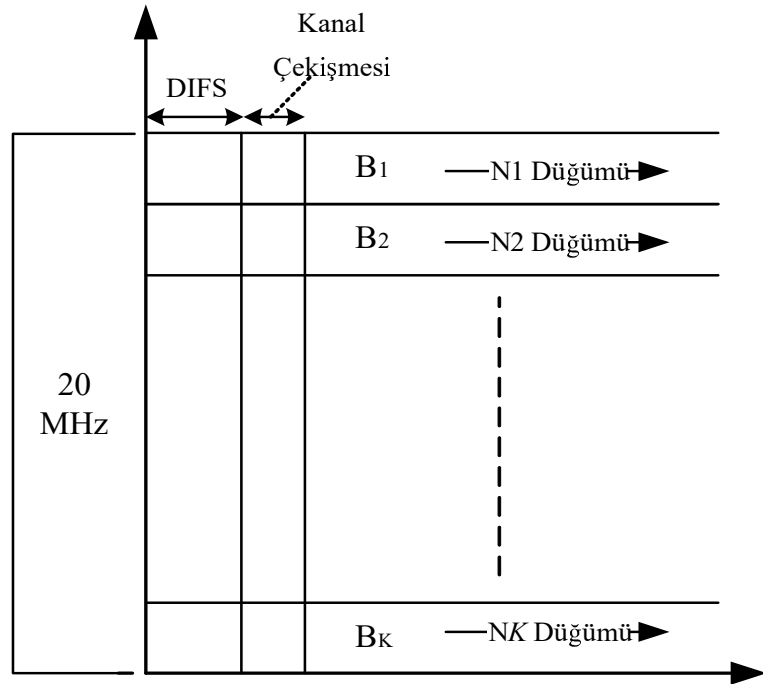
Aynı alt taşıyıcıda iki düğüm aynı anda kanala erişmek için çekişmeyi kazandığında bir çarpışma (collision) meydana gelir. Örneğin, ikinci eşzamanlı TXOP kazanan N2 düğümü ve N3 düğümünü gösteren Şekil 5.6'daki başlangıç zamanını düşünün. Diğer düğümler başlangıç ekini algılayabildikleri halde, başlangıç ekinin aslında örtüşen iki başlangıç eki olduğunun farkında değildirler. Sonuç olarak N3 düğümü üçüncü çekişmeyi kazanır ve dördüncü eşzamanlı vericidir. N2 düğümü ve N3 düğümünün iki çerçevesi birlikte örtüşür; Alıcı Düğümün, NK düğümünün çerçevesini çıkarmak

Tablo 5.2 IEEE 802.11 standardındaki OFDMA parametreleri

Parametre	Değeri
Toplam alt taşıyıcı sayısı	64
Toplam kullanılan alt taşıyıcı	52
Pilot alt taşıyıcı	4
Data alt taşıyıcı	48
Null alt taşıyıcılar	12
Bant genişliği	20 MHz
Alt taşıyıcıların frekans aralığı	312.5 kHz

için iki üst üste binen çerçevenin girişimini etkisiz hale getirmesi zordur. Ayrıca, alıcı düğüm iki üst üste binen çerçevenin kodunu çözmediğinden, birinci çekişme kazananın çerçevesi, ardışık bir girişim iptali ile çıkarılamaz. Toplamda, bir çarpışma meydana geldiğinde, alıcı düğüm bir kod çözme hatası fark eder. ACK bilgisi, bir kod çözme hatası durumunda eşzamanlı alıcılardan gönderilmez.

Tek bir OFDM sembolünde 52 alt taşıyıcı vardır; 48 data alt taşıyıcı ve 4 pilot alt taşıyıcıdır. Pilot alt taşıyıcılar, alıcıdaki frekans değişikliklerini ve faz gürültüsünü algılamak için kullanılır. IEEE 802.11 standardındaki OFDMA parametreleri Tablo 5.2’de verilmektedir.

**Şekil 5.8** Önerilen sistemin OFDM kanal erişim mekanizması

Alt kanal boşta olduğunda, araç düğümü hemen iletim yapmaz. DCF için çerçeveler arası alan (DIFS) T_{DIFS} süresini bekler. Kanalin boşta olduğu tespit edildiğinde, herhangi bir araç düğümü daha erken iletime başlamış ve paket iletimi diğer araç

düğümüne ulaşmamış olabilir. Bu nedenle, iletmek istenilen bu paket sonrası DIFS süresi kadar diğer istasyonlara izin verilecektir. Kaynak S düğümü, kanal hala boşta iken bir paket gönderecektir, aksi takdirde geri çekilme, çekişme penceresi CW boyutuna göre alınacaktır. Tüm önlemlere rağmen, çarpışmalar meydana gelebilir ve veriler kaybolabilir. Bu nedenle kaynak, ACK iletimi başarıyla doğrulayana kadar bekleyecektir. Kaynak düğüm ve hedef düğüm iletişim halindeyken, kullanılan alt kanal diğer düğümlere kapatılır. Önerilen sistem için kanal erişim mekanizması Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Önerilen sistemde Şekil 5.8’den de anlaşıldığı gibi her bir düğüm için bir alt kanal tahsis edilmiştir.

5.1.3.1 Yukarı Yönlü İletim

Yukarı yönlü (Uplink, UL) iletim, VANET’ler için düğümden (mobil cihaz) erişim noktasına (baz istasyonu) aktarım yoludur. Önerilen MIMO-OFDM MAC protokolünde, çok araçlı düğüm girişimini etkili bir şekilde yönetme ve erişim noktası alıcısındaki birden çok UL iletimi arasında senkronizasyon elde etme güçlükleri nedeniyle, tüm düğümler IEEE 802.11 DCF ile kanal erişimi için mücadele eder. Yani, yukarı yönlü bağlantıya yalnızca bir düğüm tarafından erişilir. Düğümler, iletimin performansını ve güvenilirliğini iyileştirmek için bir MIMO sisteminde çok antenli bir sistem kullanır [2].

5.1.3.2 Aşağı Yönlü İletim

Aşağı yönlü (Downlink, DL) iletim, VANET’ler için bir erişim noktasından düğüme iletim yoludur. DL iletiminde, kaynak düğümün aynı anda birden fazla düğüme hizmet verebilmesi için çok araçlı düğüm sistemi kullanılır [92]. Bunu şöyle adımlayabiliriz;

Adım 1. Kaynak araç S düğümü, K araç düğümlerine bir MIMO-RTS çerçevesi gönderir.

Adım 2. Kaynak araç düğümü tarafından gönderilen RTS çerçevesinde olan adres listesindeki i düğümü, MIMO-RTS çerçevesini aldıktan sonra H_i MIMO kanal matrisini oluşturur. H_i , verici düğümünün m ’inci anteninden alıcı düğümün n ’inci antenine kanal kazancını temsil eden $h_i^{n,m}$ ile $H_i = [h_i^{n,m}]_{N_i \times M_T}$ şeklinde gösterilen MIMO kanal matrisidir. Daha sonra, çok düğümlü iletim koşulu karşılanırsa, MIMO-RTS sonrası H_i içeren bir MIMO-CTS ile yanıt verilir. Yani, H_i ve önceki düğümlerden alınan H_j ’ye dayanarak, düğüm i , kabul edilen tüm düğümlerin sinyal-parazit artı gürültü oranı (signal-interference-plus-noise-ratio, SINR) değerlerini ölçerek kabul edilip edilemeyeceğine karar verebilir. Herhangi bir düğümün SINR bilgisi, başarılı kod çözme gerçekleştirecek bir eşiğin altındaysa, düğüm i , bir MIMO-CTS çerçevesi

göndermeyecektir. Bir sonraki düğüm, SINR bilgisini düğüm i ile aynı zamanda hesaplar. Ayrıca SINR bilgisine göre eğer düğüm i iletimi gerçekleştirmezse diğer düğüm SIFS zaman diliminden sonra bir MIMO-CTS çerçevesi gönderir ve çok düğümlü iletim koşulunu karşılamış olur.

Adım 3. DL aktarımları için, bir TXOP ve birleştirme şeması da kullanılmaktadır. Alıcı adres listesinde olmayan düğümler, ağ tahsis vektörünü (network allocation vector, NAV) ayarlar ve iletimlerini erteler.

Adım 4. DL periyodu tamamlandıktan ve kanalın SIFS süresi için boşta olduğu kabul edildikten sonra, iletim yapmak isteyen düğümler ACK çerçevesini aynı MIMO-CTS çerçeve sırasına göre sırayla gönderir.

Adım 5. Ayrıca, çok düğümlü aktarımların karmaşık senaryosu nedeniyle, kaynak düğüm NAV'nin uzunluğunu kesin olarak tahmin edemeyebilir ve tüm devam eden iletimleri kapsayacak şekilde genişletilmiş bir NAV ayarlanmalıdır. Bu durumda, tüm DL iletimlerinden sonra, kaynak düğüm, TXOP'sinin tamamlandığını açıkça belirten bir son çerçeve iletir.

5.2 Performans Analizi

Bu bölümde, MIMO-OFDM tabanlı MAC protokolünün PHY kanal koşullarını entegre eden bir VANET modelinin performansı analiz edilmiştir. Kablosuz kanalın zayıflamasından kaynaklanan bağlantı arızası olasılığı hesaplanıp araç mobilite modellerine göre bir 3D Markov zinciri oluşturulmuştur. Önerdiğimiz model VANET'leri kapsamlı bir şekilde karakterize edebilir. Önerdiğimiz VANET ağı, bir şeritte bir Poisson dağılımını takip ettiği rastgele N araç tarafından dağıtılmak üzere tasarlanmıştır. L_r bir yol segmentinin uzunluğuyorsa, L_r cinsinden N 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde verilebilir:

$$P(N, L_r) = \frac{(\beta L_r)^N \exp(-\beta L_r)}{N!}, \quad (5.1)$$

burada β araç düğüm uzunluğuna ve bir ülkenin trafik departmanı tarafından belirlenen araç düğümleri arasındaki yasal farka bağlı olarak hesaplanan araçlar arası ortalama şerit mesafesidir;

$$\beta = D_{veh} + L_{veh}, \quad (5.2)$$

burada D_{veh} , araç düğümleri arasında tutulması gereken yasal mesafeyi belirtir ve L_{veh} , araç uzunluğunu belirtir.

İletim menzilineki (TR) ortalama araç düğüm sayısı

$$N_{tr} = 2\beta TR, \quad (5.3)$$

olarak ifade edilebilir. λ_{veh} , ileitm menzili TR 'deki araç düğümlerinin ortalama varış hızıdır, ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\lambda_{veh} = n_L t_{den} v, \quad (5.4)$$

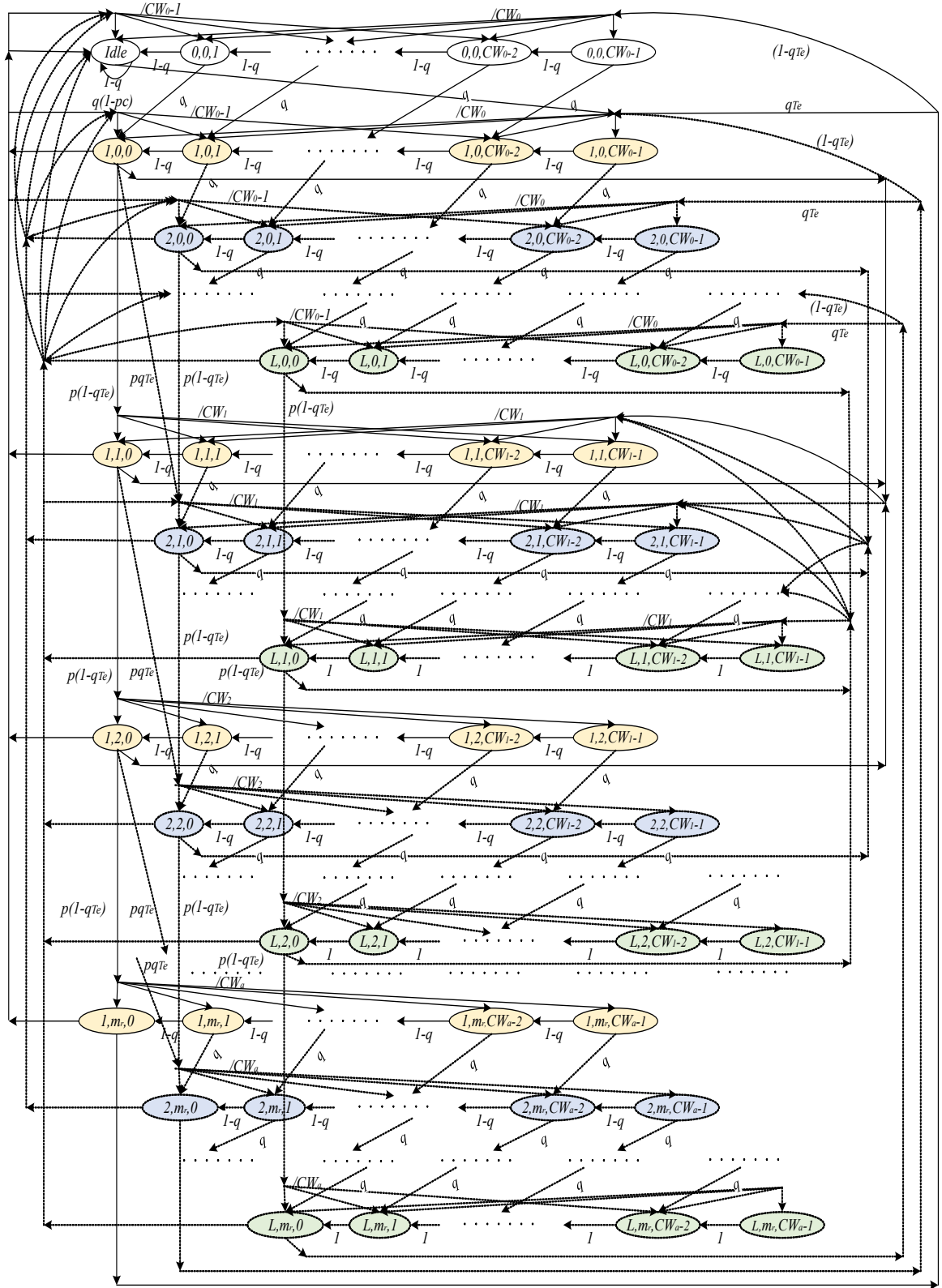
burada n_L , yoldaki şerit sayısını belirtir ve araç hızı v , v_{min} ve v_{max} arasında eşit olarak dağıtılır ve t_{den} trafik yoğunluğudur (şerit başına araç). t_{den} ifadesi,

$$t_{den} = t_{jam} \left(1 - \frac{v}{v_f} \right), \quad (5.5)$$

olarak ortalama hız v ile doğrusal olarak değişir. t_{jam} , trafik akışını durduran trafik sıkışıklığının yoğunluğunu ifade eder. v_f , serbest akış oranını temsil eder.

Bianchi'nin [30] çalışmasından sonra, IEEE 802.11 MAC alanındaki araştırmaların çoğu, her araç düğümü tarafından sürekli iletilecek bir paket olan doymuş (saturated) ağlara odaklanılmıştır. Doygunluk varsayımı, kuyruğa alma karmaşıklıklarının göz ardı edildiği ve trafik özellikleriyle ilgili verilerin ortadan kaldırıldığı anlamına gelmektedir. Bianchi çalışmalarında [30], Markov zincirinden her düğümün bir çift tam sayı modeline (i, k) sahip olduğu bir model sunuyor. Geri çekilme süreci, bir paket ilk denendiğinde 0'da başlar ve bir iletim girişimi bir çarpışmayla sonuçlandığında 1 artar. Verimli iletimden sonra sıfırlanır. Sayaç k , ilk olarak $(0, CW - 1)$ arasında tekdüze olacak şekilde seçilir. Sayaç, kanal boştayken azaltılır. $k=0$ ise, iletim yapılır.

Her düğümün bir paketi arabelleğe alabileceğini ve durum başına en az bir paketin gelmesi için sabit bir olasılık değeri q olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, bir paketi iletmiş ancak beklemeyen bir düğümü temsil etmek için $(0, k)_e$ durumlarını tanıtılmaktadır $k \in [0, CW - 1]$. Tüm bu tür durumlarda $i=0$ olduğuna dikkat etmek gerekmektedir, çünkü eğer $i>0$ ise bir çarpışma meydana geldiği bilinmemelidir. Her düğüm için, düğüm tamponunun, her birim düşüşünün başlangıcında iletimi bekleyen paketlerin olmadığı $1-q$ sabit olasılığına sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu, düğüm başına miktarlar arasındaki ilişkileri türetmemize izin vermektedir: q bir birim düşüşün başlangıcında iletimi bekleyen en az bir paket olasılığı; m_r , maksimum geri çekilme aşaması; p , düğümün yayına girmeye çalıştığı göz önüne alındığında çarpışma olasılığıdır; P , Markov zincirinin geçiş matrisidir; b , zincirin sabit dağılımıdır; ve τ , bir düğümün bir aralıkta iletim yapma olasılığıdır.



Şekil 5.9 Geri çekilme süreci için 3D Markov zincir modeli

En karmaşık geçişler, gönderilecek paketin olmadığı geri sayımın tamamlandığı $(0,0)_e$ durumundandır. Gönderilecek bir paket olmazsa aynı çekişme penceresinde kalınır. Eğer ortam boştaysa iletme başlayabiliriz, bu da başarılı bir iletim veya bir çarpışma ile sonuçlanabilir; ortam meşgulse, 802.11 MAC başka bir aşama 0 geri çekilme sürecine başlar. Bu süreç aşağıdaki ifadelerle

$$\begin{aligned}
P[(0,0)_e|(0,0)_e] &= 1 - q + \frac{q(1-\tau)^{N-1}(1-p)}{CW_0}, \\
P[(0,k)_e|(0,0)_e] &= \frac{q(1-\tau)^{N-1}(1-p)}{CW_0}, \quad k > 0 \\
P[(1,k)|(0,0)_e] &= \frac{q(1-\tau)^{N-1}p}{CW_0}, \quad k \geq 0 \\
P[(0,k)|(0,0)_e] &= \frac{q(1-(1-\tau)^{N-1})}{CW_0}, \quad k \geq 0
\end{aligned} \tag{5.6}$$

gösterilebilir.

Şekil 5.9'da Markov zinciri $b(i,k)$ 'nin sabit dağılımı için birkaç ilgili ifade verilecektir, bu da iletim olasılığının τ belirlenmesine izin verir:

$$1 = \sum_{i=0}^{m_r} \sum_{k=0}^{CW-1} b(i,k) + \sum_{k=0}^{CW-1} b(0,k)_e. \tag{5.7}$$

Eşitlik (5.6) ve (5.7) kullanılarak çeşitli matematiksel adımlardan sonra, (5.7) normalizasyon eşitliği

$$\begin{aligned}
\frac{1}{b(0,0)_e} &= 1 - q + \frac{q^2 CW_0 (CW_0 + 1)}{2(1-(1-q)^{CW_0})} + \frac{q(1+CW_0)}{2(1-q)} \left(\frac{q^2 CW_0}{1-(1-q)^{CW_0}} + p(1-q) - q(1-p)^2 \right) \\
&+ \frac{pq^2}{2(1-p)(1-q)} \left(\frac{CW_0}{1-(1-q)^{CW_0}} - (1-p)^2 \right) \left(2CW_0 \frac{1-p-p(2p)^{m-1}}{1-2p} + 1 \right)
\end{aligned} \tag{5.8}$$

şeklinde verilebilir. τ , bir aracın, aşağıdaki gibi verilebilecek bir zaman diliminde bir paket gönderdiği aktarım olasılığıdır:

$$\tau = b(0,0)_e \frac{q^2}{(1-q)} \left(\frac{CW_0}{(1-p)(1-(1-q)^{CW_0})} - (1-\tau)^{N-1} \right). \tag{5.9}$$

Modelinin doğruluğunu sağlamak için q ile paketin önerilen yükü ilişkilendirilmelidir. $q=1$ ayarları, doymuş bir sistemin, yani hizmet bekleyen bir paketin modellenmesidir. Paketler, Poisson tarzında λ oranında üssel olarak dağıtılmış paketler arası varış süreleri ile ulaşırsa, muhtemelen $1-q$, T uzunluğundaki olağan yuvaya hiçbir paket girmeyecektir. Daha sonra, paket varış hızı q ,

$$q = 1 - \exp(-\lambda T) \tag{5.10}$$

olarak hesaplanabilir.

En az bir araç paket gönderiyorsa kanal meşgul olacaktır ve kanalın meşgul olma olasılığı P_b

$$P_b = 1 - (1 - \tau)^N. \quad (5.11)$$

olarak verilebilir. P_s ,

$$P_s = \frac{N\tau(1 - \tau)^{N-1}}{P_b}. \quad (5.12)$$

olarak verilebilen, iletilen bir paketin alıcı düğümüne teslim edilmesinin başarılı iletim olasılığıdır.

Eşitlik (5.9) Markov zinciri geçiş sürecine dayanmaktadır. Markov modelleri hem MIMO'da hem de geleneksel IEEE 802.11'de benzer olsa da, her iki sistem için zaman dilimleri farklıdır, bu nedenle Bianchi yaklaşımı [30], koşullu bir çarpışmanın olasılık ve doygunluk dışı veriminin türetilmesi için geçerli değildir. Koşullu çarpışma olasılığı p , bir düğümün kanalı kazandıkça iletim sıkıntısı yaşama olasılığıdır. $p = 1 - (1 - \tau)^{N-1}$, kalan $N - 1$ düğümlerinden en az birinin, bir düğüm iletildiğinde bir zaman aralığında eşzamanlı olarak iletim yapabilme olasılığını ifade eder. Ancak, aşağıda ifade edilen iki nedenden dolayı, bu sonuç MIMO tabanlı bir sistemde geçerli değildir. Her şeyden önce, N1 düğümü herhangi bir zaman diliminde iletim yaptığında, dilimi eşzamanlı olarak iletebilen diğer düğümlerin sayısını bilmez, çünkü bu düğümlerden bazıları sürekli iletimlere dahil olmuş olabilir. İkinci olarak, N1 düğümündeki ve bunu eşzamanlı olarak ileten düğümlerdeki çarpışmalar, N1 düğümü iletmeye başladığında meydana gelebilir. Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, N1 düğümü, kanal ilk kazanıldığında çarpışmada değilken, N2 düğümü ve N3 düğümü çarpıştığı için yine de verilerini iletmez. Bianchi'nin sonucu uygulanabilir olmadığından, p 'yi hesaplamak için yeni bir yöntem vermekteyiz.

tr terimi, aynı anda iletim yapan düğümlerde N_{sc} ile (veya bir çarpışma olursa N_{sc} 'den fazla) bir iletim tarafından harcanan zaman aralığını belirtmektedir. Kaynak düğümün o turda başarılı bir kod çözme yapıp yapamayacağına bağlı olarak bir iletim turu başarılı olabilir (veya başarısız olabilir). Devam eden iletim sona ermeden önce hiçbir düğümün çekişmeyi kazanmadığı bir tur tr'de N_{sc} 'den daha az düğüm iletim yapabilir. Burada bu şartlı çarpışma olasılığının farkında olunmadığından ve bu da analiz modelinin sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Koşullu çarpışma olasılığı p şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} p &= P(\text{Ni dugumu basarisiz olur} | \text{Ni dugumu iletim yapar}) \\ &= P(mr \text{ turu basarisiz olur} | \text{Ni dugumu } mr \text{ turu icerisinde iletim yapar}), \end{aligned} \quad (5.13)$$

burada $i \in 1, 2, \dots, N$ ilgili düğümü belirtir ve mr rastgele seçilen bir turdur. R_s ve R_f sırasıyla başarılı ve başarısız tur setlerini gösterebilir. O halde $mr \in R_s$ (veya $mr \in R_f$), mr 'ın başarılı olduğu (veya başarısız olduğu) anlamına gelir. Buna göre p

$$\begin{aligned} p &= 1 - P(mr \in R_s | \text{Düğüm Ni } mr \text{ turu içerisinde iletim yapar}) \\ &= 1 - \frac{P(\text{Ni düğümü } mr \text{ turu içerisinde iletim yapar ve } mr \in R_s)}{P(\text{Ni düğümü } mr \text{ turu içerisinde iletim yapar})} \\ &= 1 - \frac{P(\text{Ni düğümü } mr \text{ turu içerisinde iletim yapar} | mr \in R_s) P(mr \in R_s)}{1 - P(\text{Ni düğümü } mr \text{ turu içerisinde iletim yapmaz})}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

olarak hesaplanabilir. Düğüm, bir çarpışma olduğu sürece bir kod çözme hatasıyla karşılaşır. Dolayısıyla, $P(mr \in R_s)$, bir tr turunda hiçbir düğümün aynı anda iletim yapmama olasılığını ifade eder. Bu olasılık kesinlikle bir tr'de izin verilen eşzamanlı iletimlerin sayısına ve bu TXOP için rekabet eden istemcilerin sayısına bağlıdır. Bu nedenle, k ve N 'ye bağımlılığını vurgulamak için $P(mr \in R_s)$ yerine $PS(N)$ kullanılmaktadır. Başarılı bir iletimde, aynı anda birden fazla iletim vardır, bu nedenle başarılı iletim olasılığı $PS(N)$, her çekişme döneminin sonunda yalnızca bir düğümün TXOP'u kazanma olasılığı olarak hesaplanabilir. $PS(N)$ şu şekilde hesaplanır:

$$PS(N) = M_T \left(\frac{N\tau(1-\tau)^{N-1}}{1-(1-\tau)^N} \times \frac{(N-1)\tau(1-\tau)^{N-2}}{1-(1-\tau)^{N-1}} \times \dots \times \frac{(N-(k-1))\tau(1-\tau)^{N-k}}{1-(1-\tau)^{N-(k-1)}} \right). \quad (5.15)$$

İlk terimde, $1 - (1 - \tau)^N$ paydası, N düğümünden en az birinin zaman diliminde iletilmesini belirtirken, $N\tau(1 - \tau)^{N-1}$ payı, bir zaman dilimindeki düğümlerin yüzdesi, tam olarak bir zaman diliminde ifade edilir. Bu, bir araç düğümünün çekişmeyi kazandığında, aynı düğümün o zaman diliminde iletim yaptığı anlamına gelir. Diğer tüm terimler $k-1$, önceki çekişmelerin çarpışmasız durumunda hesaplanmadıkça, aynı şekilde açıklanabilir. Ayrıca, kaynak düğüm, verileri M_T kez iletecektir. Sonuç olarak, başarılı bir iletimde N_i düğümünün k düğümü arasında olma olasılığı, i 'nin N düğümlerinden rastgele seçilen k düğümler arasında olma olasılığına eşittir;

$$P(\text{Ni nolu düğüm } mr \text{ turu içerisinde iletim yapar} | mr \in R_s) = \frac{\binom{N-1}{N_{sc}-1}}{\binom{N}{N_{sc}}} = \frac{N_{sc}}{N}, \quad (5.16)$$

$P(\text{Ni düğümü, } mr \text{ turu içinde iletim yapmaz})$ olasılığını hesaplamak için, N_i nolu düğümün bir turda sessiz kalacağından emin olunması ve tüm ağın N_i nolu düğümün orada yokmuş gibi davranacağını, $N-1$ düğümleri olduğunu unutmamak gerekir.

Böylece

$$P(mr \in R_s | \text{Dugum Ni } mr \text{ turu icerisinde iletim yapmaz}) = PS(N-1). \quad (5.17)$$

elde edilir. Bayes Teoremine göre

$$\begin{aligned} P(\text{Dugum Ni } mr \text{ turu icerisinde iletim yapmaz}) &= \\ &= \frac{P(\text{Dugum Ni } mr \text{ turu icerisinde iletim yapmaz} | mr \in R_s) P(mr \in R_s)}{P(mr \in R_s | \text{Dugum Ni } mr \text{ turu icerisinde iletim yapar})} \\ &= \frac{(1-N_{sc}/N)PS(N)}{PS(N-1)}. \end{aligned} \quad (5.18)$$

olarak elde edilebilir. Daha sonra p

$$p = 1 - \frac{(k/N)PS(N)}{1 - \frac{(1-k/N)PS(N)}{PS(N-1)}}. \quad (5.19)$$

olarak hesaplanabilir. τ 'nın nümerik değerleri eşitlik (5.9) ve (5.19) kullanılarak ve Wolfram Mathematica gibi programlardan yararlanarak hesaplanabilir.

İlk olarak, ardışık iki başarılı zaman aralığı arasındaki zaman olan sanal iletim süresi adı verilen bir terimi tanımlanmaktadır. N_f sanal iletim periyodu sırasında başarısız olan iletim turlarının sayısı ve N_{idle} iki ardışık tur arasındaki boşta kalma zaman aralıklarının sayısıdır. T_j bir tr'deki j'inci eşzamanlı düğümün iletim süresini göstermektedir ($j \in 1, 2, \dots, N_{sc}$). O halde N_f , N_{idle} ve T_j rastgele değişkenlerdir. Böylelikle veri hızı η ,

$$\eta = \frac{RT}{E[N_f]T_f + T_s + (E[N_f] + 1)E[N_{idle}]T_{slot}} \quad (5.20)$$

olarak ifade edilebilir. Burada T_f , T_s ve T_{slot} sırasıyla başarısız bir tr, başarılı bir tr ve boş bir zaman aralığıdır. R , veri aktarım hızını gösterir. T , Ni nolu düğümün rastgele seçilen bir zaman aralığında çekişme süresi boyunca iletim yaptığındaki bir zaman dilimidir. Daha önce tanımlandığı gibi, N_f , $1-PS(N)$ 'lik bir geometrik parametre dağılımıdır, bu nedenle keyfi olarak seçilen bir tur başarısız olur. Bu durumda, bir iletim turu süresindeki ortalama başarısız zaman aralığı süresi

$$E[N_f] = \frac{1-PS(N)}{PS(N)} \quad (5.21)$$

'dır. N_{idle} , iki ardışık tr arasındaki boşta kalma zaman aralığı sayısıdır. İlk çekişme döneminde, N araç düğümleri TXOP için rekabet eder ve τ olasılığı ile her düğüm bir zaman aralığında veri paketlerini gönderir. Bu nedenle $N1$ düğümü, $(1-\tau)^N$

parametresiyle geometrik bir dağılım izler. Buna göre

$$E[N_{idle}] = \frac{(1 - \tau)^N}{1 - (1 - \tau)^N}. \quad (5.22)$$

elde edilir. Farklı iki iletim zaman aralığının her düğümü içermeye ihtimaline rağmen, bu zaman aralığının ne kadar süreceği yalnızca ilk düğümün veri zamanına bağlıdır. Bu nedenle, T_s ve T_f , sm ve nsm mesajları için

$$T_{s-sm} = T_{DIFS} + T_{SIFS} + \frac{L_{sm}}{R_d} + T_{ACK} + T_{delay}, \quad (5.23)$$

$$T_{s-nsm} = T_{DIFS} + T_{SIFS} + \frac{L_{nsm}}{R_d} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{delay},$$

$$T_{f-sm} = T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{delay}, \quad (5.24)$$

$$T_{f-nsm} = T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{delay}.$$

olarak ifade edilebilir.

5.2.1 Gecikme Analizi

Her düğüm için ortalama erişim gecikmesi bu bölümde hesaplanmaktadır. Erişim gecikmesi, sıranın sondan başa gelmesine yani bir paketin başarıyla iletilmesine kadar geçen süre olarak tanımlanır. δ , belirli bir düğümün, örneğin N1 nolu araç düğümünün ortalama erişim gecikmesini belirtir. Eşitlik (5.20)'a göre, N1 nolu düğümün başarılı bir tura katılmak için ortalama $1/P(N1 \text{ nolu düğüm, } mr \text{ turu içinde iletim yapar} \mid mr \in R_s)$ başarılı turları beklemesi gerekir. İletim süresi kavramına dayanarak, δ aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\delta = \frac{E(\text{Ni dugumu basarisiz olur} \mid \text{Ni dugumu } mr \text{ turu icerisinde iletim yapar})}{P(\text{Ni dugumu iletim yapar} \mid mr \in R_s)}. \quad (5.25)$$

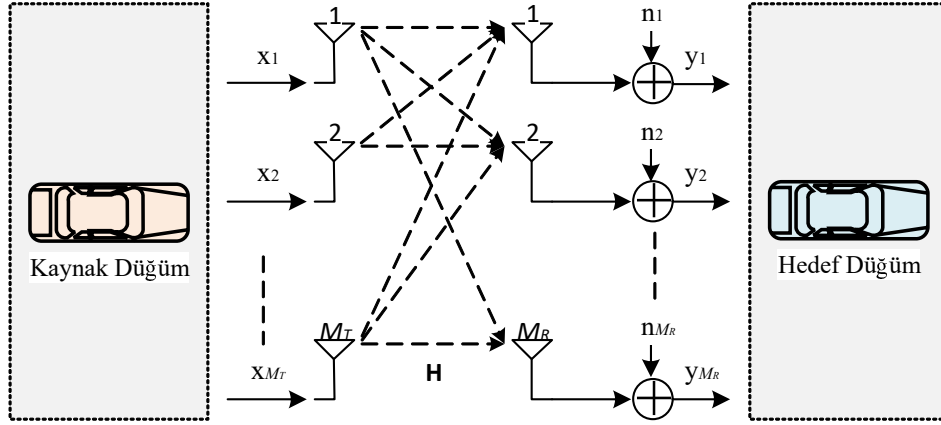
Eşitlik (5.20) ve (5.25) kullanılarak δ ifadesi

$$\delta = \frac{E[N_f]T_f + T_s + (E[N_f] + 1)E[N_{idle}]T_{slot}}{k/N}. \quad (5.26)$$

şeklinde yazılabilir.

5.3 Fiziksel Kanalın Etkileri

Araç ortamlarında kablosuz erişim (WAVE) ağlarının, diğer kablosuz ağlarda karşılaşılmayan bazı teknik zorlukları vardır. Bunlardan biri, hızlı hareket eden



   il 5.10 $M_T \times M_R$ boyutlu kanal matrisine sahip MIMO sisteminin blok diyagramı

araçlar arasındaki çarpışmaları önlemek için WAVE teknolojisini kullanmaktır, bu da mobilite zorluklarını ve iletişim kalitesi üzerinde yüksek bir etkiye sahip çeşitli teknik sorunları artırır. Temel olarak, WAVE a  larının olağanüstü derecede sağlam ve yüksek hızlı yanıt vermesi gerekir, çünkü arızaları can ve mal kaybına neden olabilir. Ayrıca, bir WAVE ağında gönderilen bazı mesajların katı bir gecikmeye ihtiya  ı vardır ve ertelenen bilgiye dayalı bir karar çok zararlı olabilir. WAVE a  ları ile çok çeşitli karışık ortamlar çalışabilir. Telsiz kapsama alanındaki araçların miktarı, kalitesi ve yoğunluğu değişebilir. VANET a  larındaki güvenlik uygulamaları için gecikmenin 100 ms'n'i geçmemesi gerektiği IEEE tarafından belirtilmiştir. Bununla birlikte, diğer uygulamalar için gecikme 100 ms'den fazla olabilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için fiziksel (PHY) katmanının sağlam, ölçeklenebilir, güvenilir, düşük gecikme süresi ve minimum bit hata oranına (BER) sahip olması gerekir. Düğümlerin hareketliliği ve kentsel, çöller, ormanlar ve otoyollar gibi iletim ortamındaki farklılıklar nedeniyle PHY, iletim sürecini doğrudan etkiler, bu nedenle kum, toz, yağmur ve diğer çevresel faktörler farklı kanallar içinde iletilebilir. Ayrıca, kodlama, modülasyon vb. gibi teknik faktörlerin PHY'nin performansı üzerinde birden çok etkisi vardır. Tüm bu faktörlerin iletim kalitesi üzerinde etkileri vardır.

5.3.1 PHY Katmanında   nerilen Sistemin Performans Analizi

   il 5.10'da gösterildiği gibi, bir L -kollu en büyük oran birleştirici (maximum ratio combining, MRC) alıcısı düşünülmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi, bu alıcı, bir maksimum olabilirlikli (maximum likelihood, ML) alıcıya yol a  tı  ı için, farklı çeşitlilik dalları için zayıflama istatistiklerinden bağımsız olarak optimal çok kanallı alıcıdır. MRC alıcısının girişindeki toplam gürültü işareti y ve çıkışındaki SNR ifadesi

γ_t sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir [93]:

$$y = \mathbf{xH} + \mathbf{n} = \sum_{i=1}^{M_R} h_{j,i} x^i + n^j, \quad (5.27)$$

$$\gamma_t = \sum_{l=1}^L \gamma_l. \quad (5.28)$$

Burada j verici anteni ve i alıcı antenini ($i = 1, 2, \dots, M_R$ ve $j = 1, 2, \dots, M_T$) göstermektedir. M_T , verici antenlerin sayısı ve M_R , alıcı antenlerin sayısıdır. Eşitlik (5.26)'da, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{M_T}]^T$ iletilen sinyal vektörüdür, $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{M_T}]^T$ sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı toplamsal beyaz Gauss gürültü vektörüdür. Kanal matrisi $\mathbf{H}$,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,M_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R,1} & \dots & h_{M_R,M_T} \end{bmatrix}. \quad (5.29)$$

($M_T \times M_R$) boyutludur.

ML algoritmasının, alıcı tarafından iletilen bilgi dizisini tahmin etmek için kullanıldığını ve alıcının MIMO kanalı üzerinde ideal kanal durum bilgisine (CSI) sahip olduğu varsayılmaktadır. Verici ise herhangi bir kanal bilgisine sahip değildir. Alıcıda, karar ölçüsü, varsayılmış alınan dizi ile gerçek alınan dizi arasındaki karesel Öklid mesafesine göre şu şekilde hesaplanır:

$$\sum_{j=1}^{M_T} \left| y^j - \sum_{i=1}^{M_R} h_{j,i} x^i \right|^2. \quad (5.30)$$

Ardından kod çözücü, minimum karar ölçüsü ile kodu çözülen dizi için kod sözcüğünü seçer.

Şekil 5.10'daki gibi bir MIMO-OFDM sisteminde alıcı anten ile gönderen anten arasındaki her dal, katsayısı h_i olan bir FIR filtresi olarak kabul edilir, $j(k)$ burada $k = 0, \dots, L-1, L$, çoklu yol sayısıdır. Daha sonra, n 'inci frekans alt taşıyıcısındaki $F(L < F)$ noktası DFT şu şekilde yazılır:

$$H_{j,i}(n) = \frac{1}{\sqrt{F}} \sum_k^{F-1} h_{j,i}(k) \exp\left(-\frac{j2\pi k n}{F}\right) \quad 0 \leq n \leq F-1. \quad (5.31)$$

Tüm antenlerin ilişkisiz olduğu durumlarda, n 'inci alt taşıyıcıdaki MIMO-OFDM

sisteminin toplam SNR bilgisi [71, 93] şöyle ifade edilebilir:

$$\gamma_n = \frac{1}{M_T} \sum_{j=0}^{M_T} \sum_{i=0}^{M_R} \frac{E_s}{\sigma} |H_{j,i}(n)|^2. \quad (5.32)$$

$|h(k)|$ Nakagami-m dağılımlı olduğundan, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF)

$$f_{|h(k)|}(x) = \frac{2}{\Gamma(m_k)} \exp\left(-\frac{m_k}{\Omega_k} x^2\right) \left(\frac{m_k}{\Omega_k}\right)^{m_k} x^{2m_k-1}, \quad (5.33)$$

olarak tanımlanabilir. Burada m_k , dağılımın şekil parametresini belirtir ve $\Gamma(\cdot)$, Gamma fonksiyonunu belirtir. $\Omega_k = E[x^2]$ ve $E[\cdot]$, beklenen değer operatörünü ifade eder. $h(k)$ 'lerin tüm k 'ler için karşılıklı olarak bağımsız olduğu varsayılmıştır. [93]'a göre, $m_k = m$ ve $\Omega_k = \Omega$, $|H(n)|$, h 'ler ile aynı sönümleme parametresine ve ortalama Ω güce sahip Nakagami-m katsayılarıdır. $H(n)$, [93] tarafından verilen pdf Nakagami-m dağılımına sahiptir:

$$f_{|H(n)|}(y) = \frac{2}{\Gamma(m_t)} \exp\left(-\frac{m_t}{\Omega_t} y^2\right) \left(\frac{m_t}{\Omega_t}\right)^{m_t} y^{2m_t-1}. \quad (5.34)$$

m_k , sabit m ile özdeşse ve çok yollu yoğunluk profili (MIP) bir sabitse, $m_t = Lm / (Lm - m + 1)$, m_t olarak belirtilir ve $\Omega_t = L/F$, Ω_t olarak gösterilir.

Alıcı antenleri ilişkisiz olduğunda, moment üreten fonksiyon (moment generating function, MGF) şu şekilde verilebilir:

$$\Phi_{\gamma_n}(s) = E[\exp(s\gamma_n)] = \int_0^\infty \exp(s\gamma_n) f_{\gamma_n}(\gamma_n) d\gamma_n = \prod_{i=1}^{M_T} \prod_{j=1}^{M_R} \left(1 - \frac{E_s \Omega_f}{\sigma^2 M_T m_f \sin^2 \theta}\right)^{-m_f} \quad (5.35)$$

burada $f_{\gamma_n}(\gamma_n)$, γ_n 'nin pdf'idir.

İkili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) modülasyonu için, belirli bir SNR γ_n değeri altında ulaşılabilen koşullu hata olasılığı [71] $P_{BER}(\gamma_n) = Q(\sqrt{2\gamma_n})$ ile verilebilir. $Q(\cdot)$, Gauss Q fonksiyonunu gösterir ve $Q(x) = (1/\pi) \int_0^{\pi/2} \exp(-\frac{x^2}{2\sin^2 \theta}) d\theta$ ile ifade edilir. n 'inci frekans alt taşıyıcısı için ortalama BER

ifadesi,

$$\begin{aligned}
P_{BER,n} &= \int_0^{\infty} P_{BER}(\gamma_n) f_{\gamma_n}(\gamma_n) d\gamma_n \\
&= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\gamma_n^2}{2\sin^2\theta}\right) f_{\gamma_n}(\gamma_n) d\gamma_n d\theta \\
&= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \Phi_{\gamma_n}\left(s = -\frac{1}{\sin^2\theta}\right) d\theta \\
&= \frac{1}{\pi M_T} \int_0^{\pi/2} \left(1 + \frac{\gamma_n}{M_T m_f \sin^2\theta}\right)^{-M_T M_R m_f} d\theta
\end{aligned} \tag{5.36}$$

olarak hesaplanabilir. Farklı modülasyon türleri örneğin M -PSK ve M -QAM için BER ve sembol hata oranı (symbol error rate, SER) ifadeleri Tablo 5.3'te verilmektedir. Frekans alt taşıyıcısı artık bir işlev olmadığından, çok alıcılı anten OFDM sistemi için toplam ortalama BER şu şekilde hesaplanabilir:

$$P_{BER,total} = 1 - (1 - P_{BER,n})^F. \tag{5.37}$$

Nakagami- m sönümlleme parametresi çok büyük olduğunda, ($m \rightarrow \infty$), AWGN kanalına yakınsar. $m = 1$ olduğunda, Rayleigh dağılımını verir. Kesinti olasılığı P_{out} , alınan sinyalinin SNR bilgisinin γ_n olarak verilebilen SNR eşiği γ_{th} 'den daha düşük olması olasılığıdır;

$$\begin{aligned}
P_{out} &= P(\gamma < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \\
&= \int_0^{\gamma_{th}} \frac{1}{\gamma \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma_R}\right) \left(\frac{m\gamma}{\gamma_R}\right)^m d\gamma \\
&= 1 - \exp\left(-\frac{m\gamma_{th}}{\gamma_R}\right) \sum_{s=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{m\gamma_{th}}{\gamma_R}\right)^s}{s!}.
\end{aligned} \tag{5.38}$$

Paket B bloklarına bölündüğünden, paket hatalı çerçeve olasılığı P_{PHY} şu şekilde yazılabilir:

$$P_{PHY} = 1 - (1 - P_{out})^B. \tag{5.39}$$

MAC ve PHY katmanını altındaki veri hızı η , sm ve nsm mesajları için

$$\eta_{sm} = \frac{P_s P_b L_F (1 - P_{PHY})}{E[N_f] T_{f-sm} (1 - P_{PHY}) + T_{s-sm} + (E[N_f] + 1) E[N_{idle}] T_{slot}}, \tag{5.40}$$

$$\eta_{nsm} = \frac{P_s P_b L_F (1 - P_{PHY})}{E[N_f] T_{f-nsm} (1 - P_{PHY}) + T_{s-nsm} + (E[N_f] + 1) E[N_{idle}] T_{slot}}. \tag{5.41}$$

olarak ifade edilebilir.

Tablo 5.3 Farklı modülasyon türleri için hata analizi

Modülasyon	a	b	P_{SER}	P_{BER}
M -PSK	2	$\sin^2(\frac{\pi}{M})$	$aQ(\sqrt{2b\gamma})$	$\frac{aQ(\sqrt{2b\gamma})}{\log_2 M}$
M -QAM	$1 - \frac{1}{\sqrt{M}}$	$\frac{3}{2(M-1)}$	$\frac{4a}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \Phi_\gamma(s = \frac{b}{\sin^2 \theta}) d\theta$ $-\frac{4a^2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \Phi_\gamma(s = \frac{b}{\sin^2 \theta}) d\theta$	$\frac{4a}{\log_2 M} \sum_{i=0}^{\sqrt{M}/2} \left(\frac{(2i-1)}{\sqrt{2b\gamma \log_2 M}} \right)$

5.4 Benzetim Sonuçları

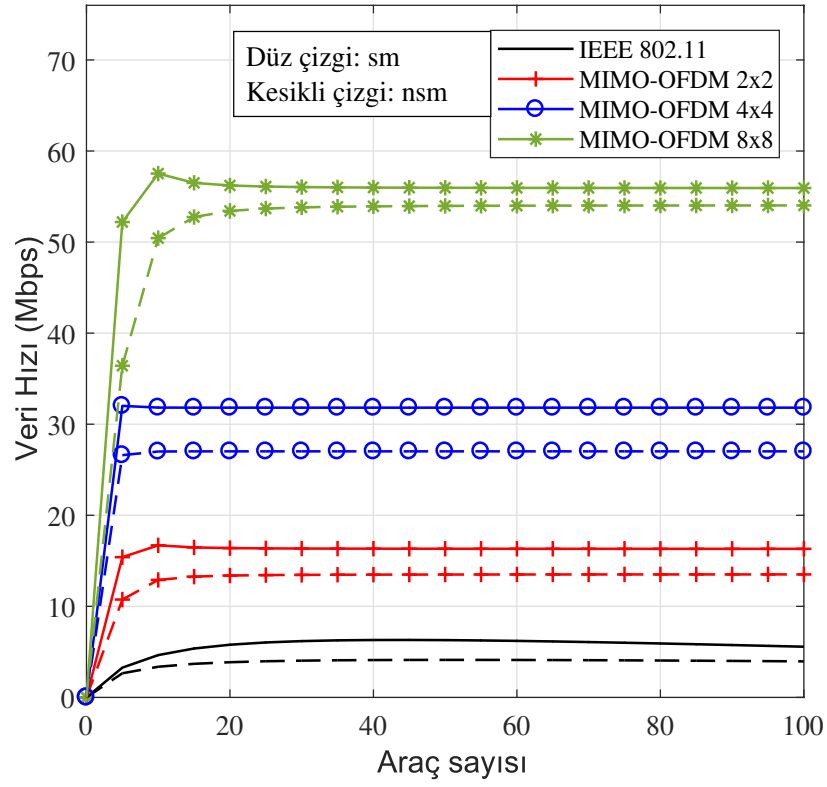
IEEE 802.11 MAC performansı, Nakagami-m kanal sönümlemesi altında VANET ağlar için test edilmiştir. MATLAB ve Mathematica programları sayesinde mümerik sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen sistemde, yolların iki şeritli ve araçların hızının yaklaşık olarak aynı olduğu varsayılmaktadır. Nümerik sonuçlarda kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Benzetim sonuçlarında kullanılan parametre değerleri

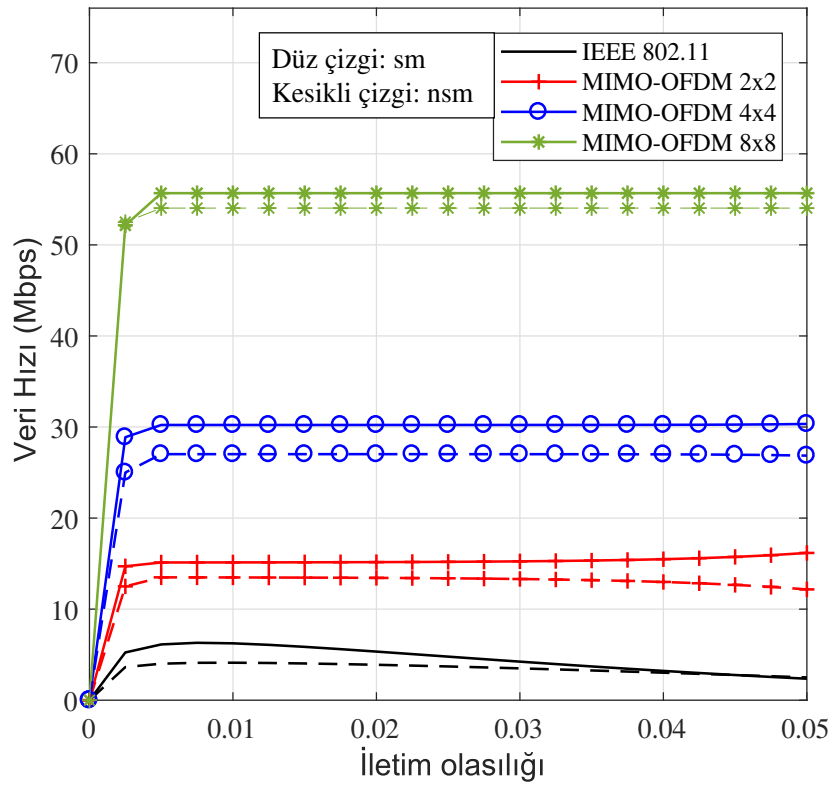
Parametreler	Değerleri
$T_{slot}, T_{delay}, T_{SIFS}, T_{DIFS} \mu s$	20, 1, 10, 50
RTS, CTS, $L_h, L(sm), L(nsm), ACK(bytes)$	26, 20, 50, 300, 500, 14
R_c, R_d (Mbps)	1, 11
N, CW, R_t	2-100, 64, 500
$\sigma_R, \sigma_{Noise}, \gamma_{th}$ (dB)	10, -50, 5
G_r, G_t, D_T (veh/m), v (km/h)	1, 1, 0.01, 0-120
α, f (GHz)	3, 5

Şekil 5.11, araç sayısına (N) karşı veri hızını göstermektedir. Veri hızı, belirli bir aşamaya kadar araç sayısı (N) ile artar çünkü N 'in az olması çarpışmaya neden olmaz. Bununla birlikte, N 'nin artması, kanalın meşgul olma olasılığını ve çarpışma olasılığını artıracaktır. Daha fazla sayıda araçtan iletim için gönderilecek paketlerin çekişmesi nedeniyle veri hızı azalacaktır. Sm mesajlarının nsm mesajlarından daha yüksek bir veri hızına sahip olduğu görülebilir çünkü sm başka herhangi bir kontrol mesajı yayını olmadan yayınlanmaktadır. Nsm, RTS yayınından sonra iletilir. Anten sayısının, başarılı iletim olasılığını ve veri hızını arttırdığı şekilden açıkça görülmektedir.

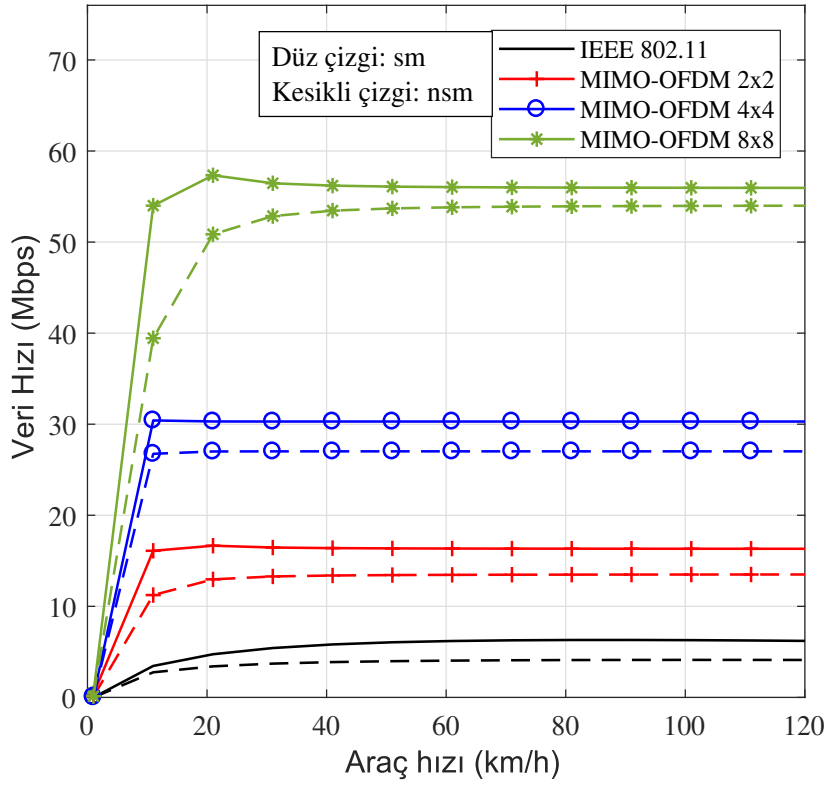
İletim olasılığına karşılık gelen veri hızı Şekil 5.12'de verilmiştir. İletim olasılığı düşük olduğunda, birkaç araç tek seferlik zaman diliminde iletim yapar, bu nedenle boş zaman aralıkları tarafından fazla zaman harcanır. İletim olasılığı büyük olduğunda, iki veya daha fazla araç düğümünün aynı zaman aralığında iletim yapması muhtemeldir, bu



Şekil 5.11 Araç sayısına karşı veri hızı



Şekil 5.12 Araç sayısına karşı iletim olasılığı



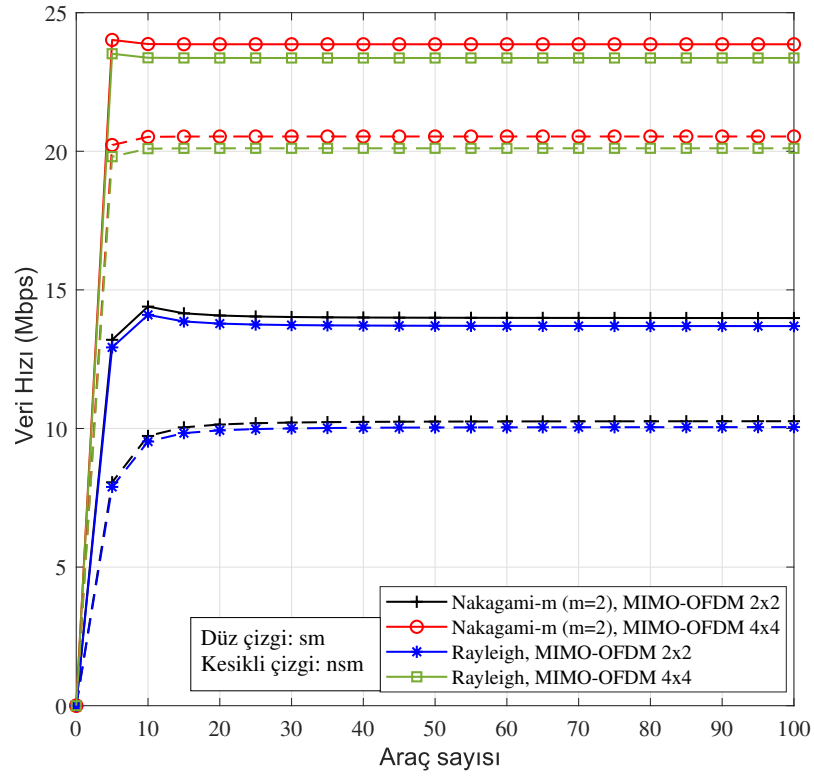
Şekil 5.13 Araç hızına karşı veri hızı

nedenle çarpışma olasılığı yüksektir. Bu nedenle, iletim olasılığı arttığında veri hızı azalır. Sm mesajları, nsm mesajlarından daha iyi performans gösterir. Ayrıca anten sayısının artması sistem performansını da artırmaktadır.

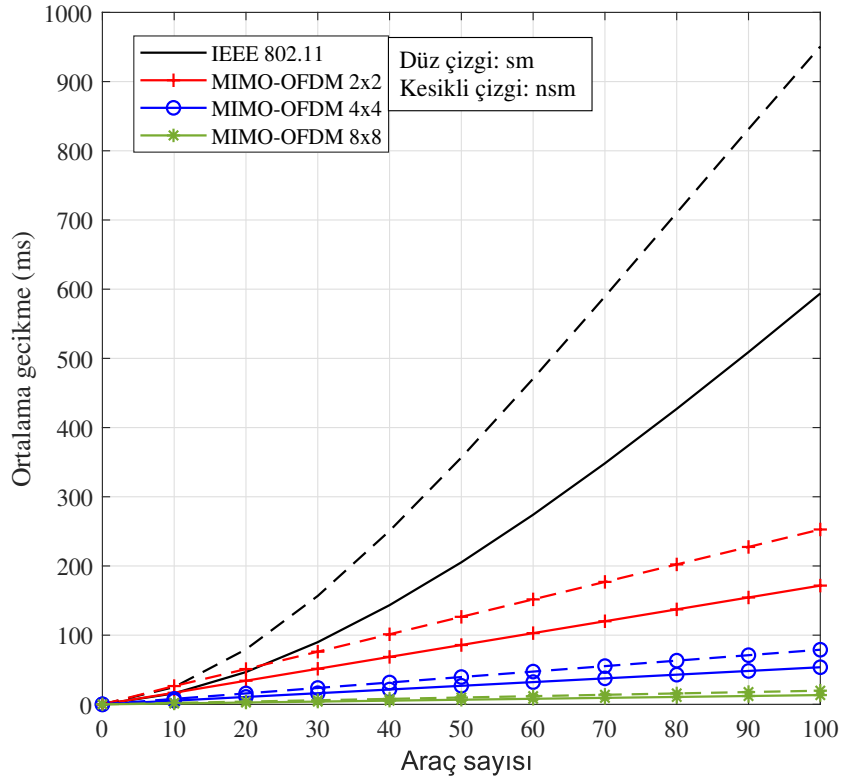
Şekil 5.13, farklı sayıda anten için araç hızına karşı veri hızını göstermektedir. Araç hızındaki artışla veri hızı azalır. Araçların hareketliliği, sık bağlantı kopmasıyla birlikte hızlı topoloji değişikliklerine neden olarak, çarpışma ve paket kaybı nedeniyle iletişimi kararsız hale getirir. Nakagami-m sönmleme kanalları altında verim en yüksektir.

Şekil 5.14, farklı kanal modelleri için araç sayısına karşı veri hızını göstermektedir. Nakagami-m ve Rayleigh sönmlemeli kanallar için, veri hızı N artışıyla azalır. N arttığında, araçlardan iletim için yarışan paketlerin sayısını arttıracak daha fazla paket gelecektir. N 'in artması ile paket iletimi, veri hızını azaltan çarpışma olasılığını artıracaktır. Rayleigh sönmleme kanalını kullanan sistem en düşük veri hızına sahiptir ve Nakagami-m kanalını ($m=2$) kullanan sistem en yüksek veri hızına sahiptir. Anten sayısı fazla olduğunda performans daha iyidir.

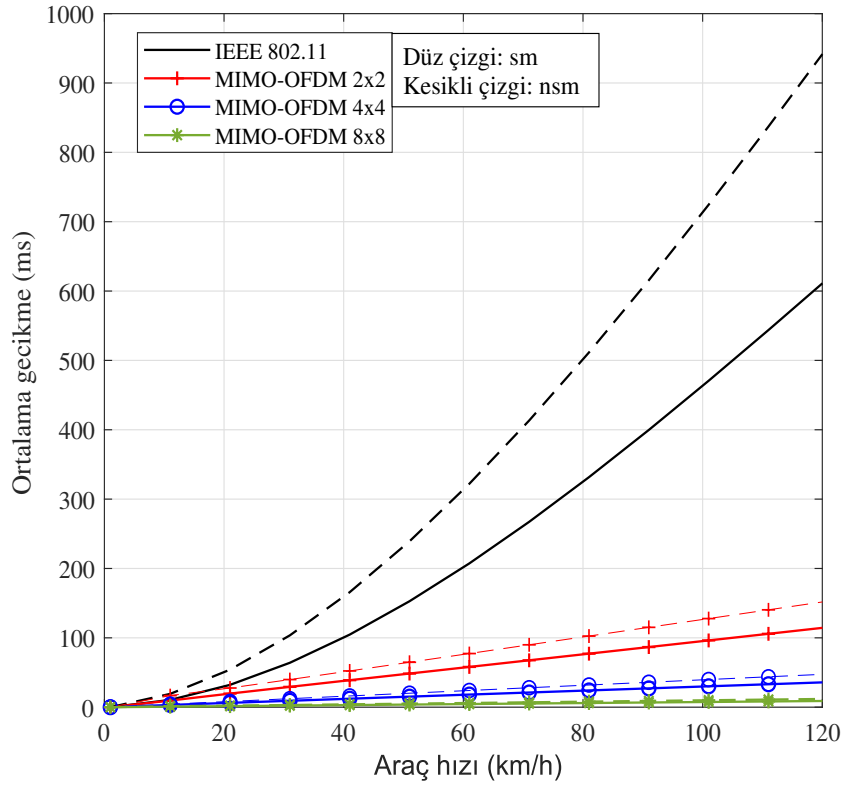
Şekil 5.15 ve 5.16, sırasıyla araç sayısı ve araç hızına karşı ortalama gecikmeyi göstermektedir. İletim için paket sayısı, araç sayısı ile artacak ve bu da daha fazla paket çekişmesine neden olacaktır. Kanal, çarpışma olasılığını arttıracak daha fazla



Şekil 5.14 Farklı sönümlmeli kanallar altında araç sayısına karşı veri hızı



Şekil 5.15 Araç sayısına karşı ortalama gecikme

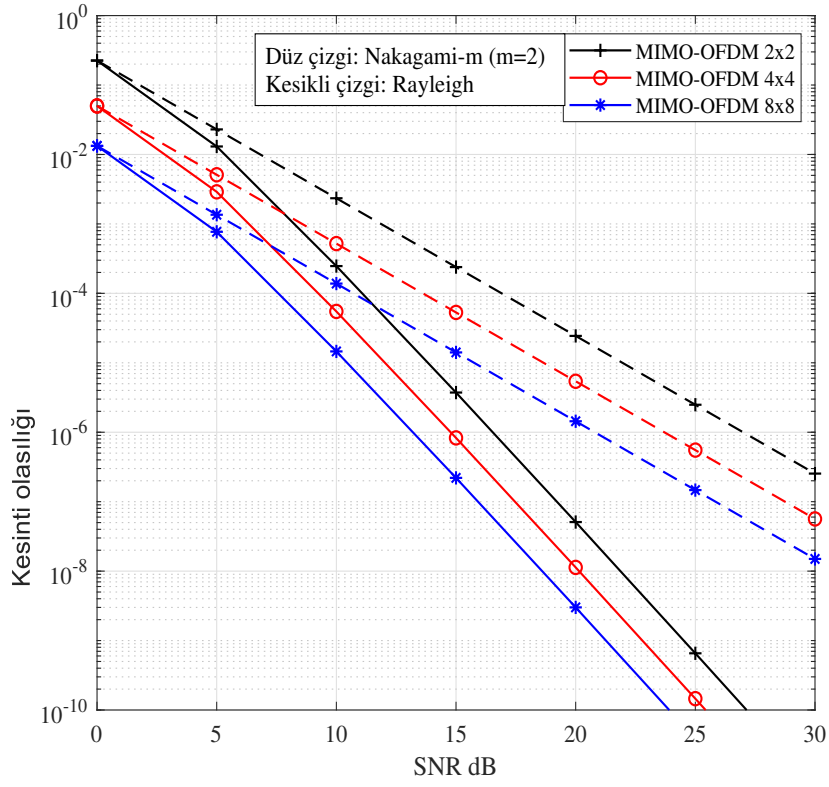


Şekil 5.16 Araç hızına karşı ortalama gecikme

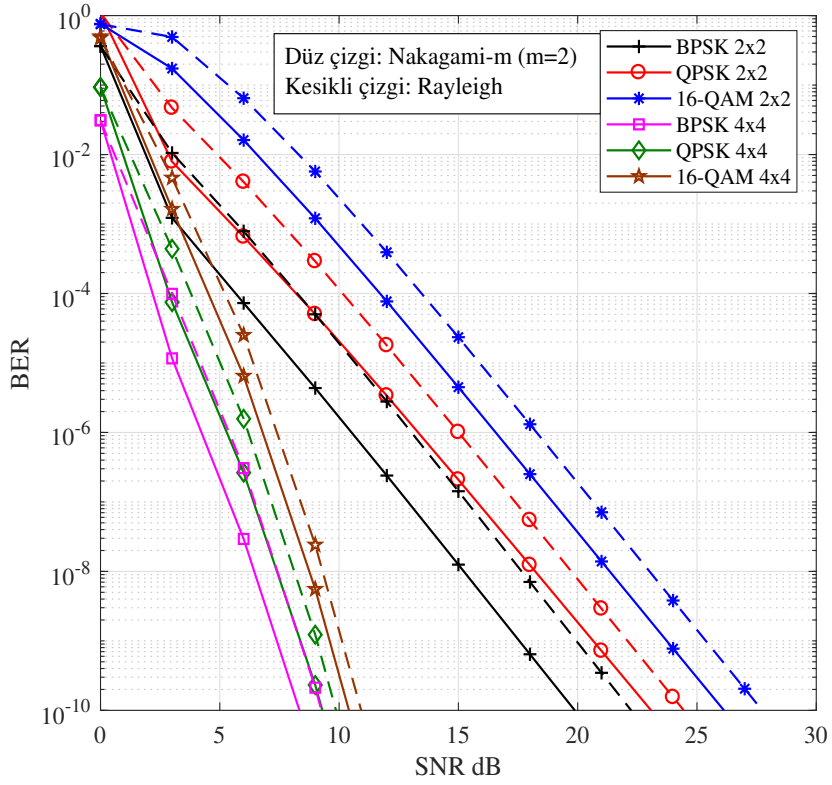
paket çekişmesi için meşgul olacaktır. Bu nedenle araç sayısı ve araç hızı arttıkça gecikme artmaktadır. Sm mesajları için gecikme, nsm mesajlarından daha düşüktür. Artan anten sayısı ile gecikme düşmektedir.

Şekil 5.17, SNR bilgisine karşı kesinti olasılığını göstermektedir. Kesinti olasılığı, sönmülemeli kanallar için SNR'nin artmasıyla azalır. SNR yükseldikçe sinyal gücü arttığı için kesinti olasılığı azalır. Rayleigh sönmüleme kanalını kullanan sistem en yüksek kesinti olasılığına sahiptir. Artan anten sayısı ile kesinti olasılığı azalmaktadır.

Şekil 5.18, SNR'ye karşı ortalama BER sonuçlarını göstermektedir. SNR arttıkça sistem performansı artmaktadır. Böylelikle BER'in düşmesi belenir. Her modülasyon tekniği için, Nakagami-m sönmüleme kanalını kullanan sistemin performansı, Rayleigh sönmüleme kanalını kullanan sistemden daha iyidir. Nakagami-m ve Rayleigh kanal sönmüleme modelleri için, SNR'ye karşı BER perfromansı, BPSK < QPSK < 16 QAM'dir. Artan modülasyon derecesi M , BER'i arttırmaktadır, yani performans kötüleşmektedir.



Şekil 5.17 SNR'ye karşı kesinti olasılığı



Şekil 5.18 SNR'ye karşı BER

5.5 Sonuçlar

Bu bölümde, Nakagami-m sönümleme kanalları üzerinden VANET'ler için yeni bir MIMO-OFDM tabanlı MAC protokolü sunulmuştur. Hem MIMO hem de OFDM, performansı arttırmak için kullanılmıştır. Hem MIMO hem de OFDM'i kullanmak için yeni bir erişim mekanizması önerilmiştir. Doymamış durumu dikkate alan bir 3D Markov zincir modeli tabanlı analitik analiz gerçekleştirilmiştir. Parametreler arasındaki ilişki türetilmiştir. Çarpışma olasılığı, başarısız iletim olasılığı, başarılı iletim olasılığı, kesinti olasılığı, BER, veri hızı ve gecikme ifadeleri belirlenmiştir. Sayısal sonuçlar sunulmuştur. Önerilen MIMO-OFDM MAC protokolü, geleneksel MAC'den daha yüksek veri hızı, daha düştük gecikme ve BER'e sahiptir. Ayrıca anten sayısının artması ile birlikte sistem performansının da arttığı görülmektedir.

OPTİMİZASYON VE ÖNERİLMİŞ PROTOKOLLERİN HESAPLANMA SÜRELERİ

Simülasyon MATLAB ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.1, simülasyonda kullanılan parametre değerlerini göstermektedir. m_r tüm şekiller için 5 alınmıştır. IEEE 802.11 için CW boyutu 64 alınmıştır.

6.1 IEEE 802.11'nin Optimizasyonu

VANET'ler, veri hızı, trafik, CW boyutu ve araç hızı ile değişir. Bu parametrelerden herhangi biri değiştirilirse, üretim değişiklikleri ve hatta üretim miktarı ihmal edilebilir hale gelebilir. Araç sayısı ve araç hızı kontrol edilebilir olmadığından, CW boyutu verimi en üst düzeye çıkarmak için optimize edilecektir. Burada sm mesajları için, araç sayısı ve araç hızına göre CW boyutu dinamik olarak ayarlanarak veri hızı optimize edilmiştir. Bu parametrelerden herhangi biri (araç sayısı ve/veya araç hızı) değişirse, CW boyutu, verimi maksimum seviyede tutmak için dinamik olarak ayarlanacaktır. Optimum verim elde etmek için η , eşitlik (2.25) şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$\eta = \frac{L}{T_s - T_c + \frac{P_b(T_c - T_{slot}) + T_{slot}}{P_s P_b}}. \quad (6.1)$$

L , T_s , T_c ve T_{slot} sabit olduğundan, aşağıdaki eşitlik optimize edildiğinde η maksimum olacaktır:

$$\frac{P_s P_b}{P_b + \frac{T_{slot}}{(T_c - T_{slot})}} = \frac{NP_t(1 - P_t)^{N-1}}{(1 - (1 - P_t)^N) + k}, \quad (6.2)$$

burada $k = \frac{T_{slot}}{T_{col} - T_{slot}}$ 'dır. P_t 'ye göre eşitlik (6.2)'nin türevini alıp 0'a eşitleyerek,

$$kNP_t - k + (1 - P_t)^N + NP_t - 1 = 0. \quad (6.3)$$

ifadesi bulunur. $P_t \ll 1$ koşulu altında, aşağıdaki seri açılımı gerçekleşir [30]:

$$(1 - P_t)^N \cong 1 - NP_t + \frac{N(N-1)P_t^2}{2}. \quad (6.4)$$

Daha sonra eşitlik (6.3) daha sade şekilde yazılabilir:

$$kNP_t - k + \frac{N(N-1)P_t^2}{2} = 0. \quad (6.5)$$

Böylece, optimum P_t (6.5)'ten şu şekilde türetilir:

$$P_t = \frac{\sqrt{kN(kN + 2N - 2)} - kN}{N(N-1)}. \quad (6.6)$$

burada $N > 1$ 'dir. P_t 'ye göre (6.1)'in ikinci türevini aldıktan sonra, negatif bir P_t değeri elde ederiz çünkü ifadenin sağ kısmı her zaman birden büyüktür:

$$P_t = 1 - \sqrt[N-1]{k+1}, \quad (6.7)$$

bu da bunun maksimum P_t olduğunu gösterir.

X yol segmentindeki ortalama araç düğüm popülasyonunu temsil etmektedir. Little yasasına göre [94]

$$X = \lambda T_e, \quad (6.8)$$

hesaplanır. Eşitlik (2.18) ve (2.19), (6.8)'de yerine yazıldığında aşağıdaki ifadeyi elde edebiliriz:

$$X = y_s t_a \left(1 - \frac{\nu}{\nu_s}\right) \nu T_e. \quad (6.9)$$

R_t iletim menzilineki ortalama araç düğümü sayısı şu şekilde ifade edilebilir [93]

$$E[N] = X R_t. \quad (6.10)$$

Eşitlik (2.8) ve (6.6) kullanılarak, optimum CW şu şekilde elde edilebilir:

$$CW_{opt} \approx \left\lceil \left(\frac{2y_s t_a \left(1 - \frac{\nu}{\nu_s}\right) \nu T_e R_t (N-1)}{\sqrt{kN(kN + 2N - 2)} - kN} - 1 \right) / 1 + m_r \right\rceil, \quad (6.11)$$

burada $\lceil . \rceil$, sayıyı yukarı yuvarlama operatörünü (ceil) temsil etmektedir.

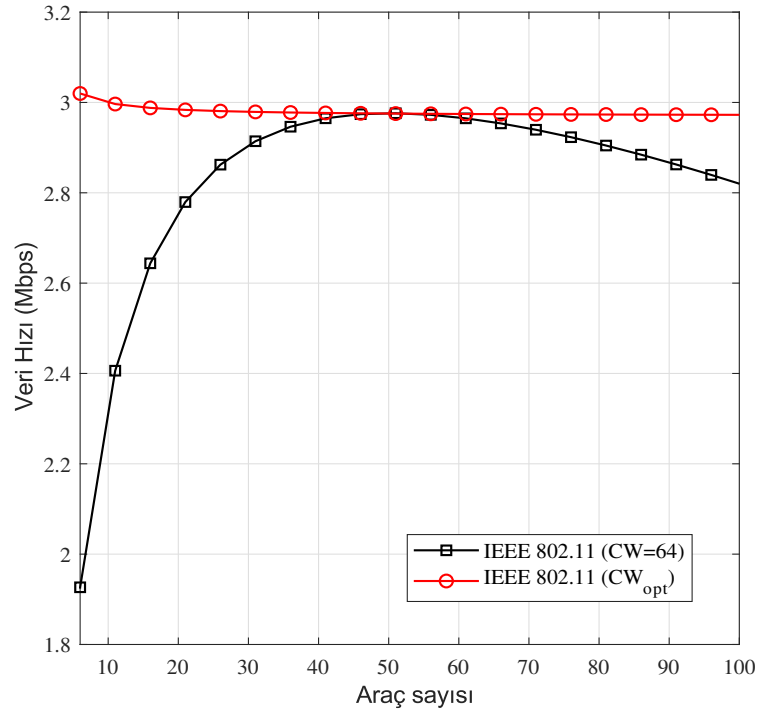
Optimum P_t değerini benimseyecek olan optimum CW değerini kullanarak, optimum

veri hızı η , aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\eta = \frac{L}{T_s - T_c + \frac{(1-(1-P_{t_opt})^N)(T_c - T_{slot}) + T_{slot}}{\left[y_s t_a \left(1 - \frac{v}{v_s} \right) v T_e \right] R_t P_{t_opt} (1 - P_{t_opt})^{N-1}}}. \quad (6.12)$$

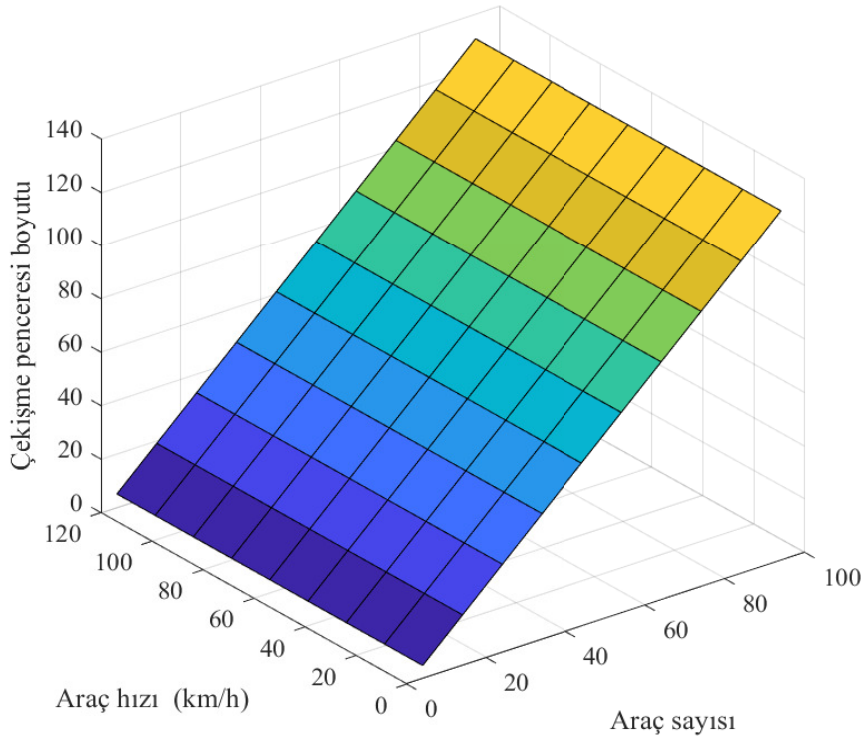
Tablo 6.1 Simülasyonda kullanılan parametre değerleri

Parametre	Değeri
$T_{slot}, T_{delay}, T_{SIFS}, T_{DIFS} \mu s$	30, 3, 10, 50
RTS, CTS, ACK (bytes)	26, 20, 14
v, v_f (km/h)	0-120, 160
R_c, R_d (Mbps)	1, 11
N, m_r	0-100, 7
L_h, L (bytes)	50, 100
Maksimum araç hızı (m/s)	14
J_T (veh/m), r_t (m)	120, 500



Şekil 6.1 Araç sayısına karşı veri hızı

Araç sayısına karşı veri hızı Şekil 6.1'de gösterilmektedir. RTS/CTS mekanizması RTS'den sonra CTS gerektirdiğinden, IEEE 802.11'in RTS/CTS mekanizması yayın modunda etkin olmadığından, IEEE 802.11'in performansı güvenlik mesajları için verimli değildir. Bu yüzden tüm araçlara mesaj yayınlandığında tüm araçların CTS göndermesi gerekmektedir. Bunun sonucunda da, eşzamanlı CTS iletimi daha fazla çarpışmaya neden olacaktır. Veri hızı, araç sayısındaki artışla belirli bir noktaya kadar



Şekil 6.2 3 boyutlu optimum parametre varyasyonları

artar, ardından veri hızı düşmeye başlar. Belirli bir araç sayısına kadar çarpışma olmayacağından, daha fazla paket iletileceği zaman çarpışma olacaktır.

Optimum parametre varyasyonları Şekil 6.2’de 3 boyutlu olarak gösterilmektedir. Araç sayısı ve hızına göre optimum CW boyutu alınır. Araç sayısının ve hızın artmasıyla birlikte, veri hızını en üst düzeye çıkaracak CW boyutu artmaktadır.

6.1.1 Sezgisel Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları

Ticaret, bilim ve mühendislik gibi çeşitli problemlerde, doğadan ilham alan optimizasyon algoritmaları son zamanlarda yaygın olarak doğrudan arama ve optimizasyon yöntemleri olarak kullanılmıştır. Optimizasyon, belirli kısıtlamalara sahip olarak belirli bir amaç veya hedef için en etkili yaklaşımı bulma yöntemidir. Optimizasyon terminolojisinde, her seferinde en iyiyi elde etme isteği vardır. En güçlü yorum, araştırmaya, çözüm biçimine ve izin verilen toleransa odaklanır. Geçmişte karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için birçok optimizasyon yöntemi geliştirilmiş ve farklı alanlara uyarlanmıştır. Optimizasyon problemlerinin formülasyonunda yaygın olarak matematiksel yöntemler veya sezgisel yöntemler kullanılır. Bu tür yöntemlerin dezavantajları, esnek olmama ve bunları matematiksel işlevlerle tanıma zorunluluğu, son zamanlarda bilim adamlarının genel amaçlı ve

doğal olaylardan esinlenen yüksek performanslı yaklaşımları geliştirme çabalarını artırmıştır. Optimizasyon problemlerinde, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO), Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA) ve Bal Arısı Algoritması (BAA) yaygın olarak kullanılmaktadır [95].

- Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO):

Temel olarak PSO, sürü zekasına odaklanan bir algoritmadır. VANET'lerde çalışan araçların olduğu görülmektedir. PSO algoritması, araçlar arasında sosyal bilgi alışverişine odaklanmıştır. Genetik algoritmadaki nesil sayısına bağlı olarak arama tamamlanır. Her bir CW boyutu, boyutunu sistemdeki en iyi boyuta ayarlamak için önceki deneyimi kullanır. PSO algoritması, temel olarak özel ağlardaki araçların konumunun, geçici ağlarda en iyi konuma sahip araçlara yaklaştırılmasına dayanır. CW boyutu rastgeledir ve ağdaki araçlar yeni hareketlerinde önceki pozisyona göre daha iyi konumlandırılır ve bu süreç hedefe ulaşılan kadar devam eder.

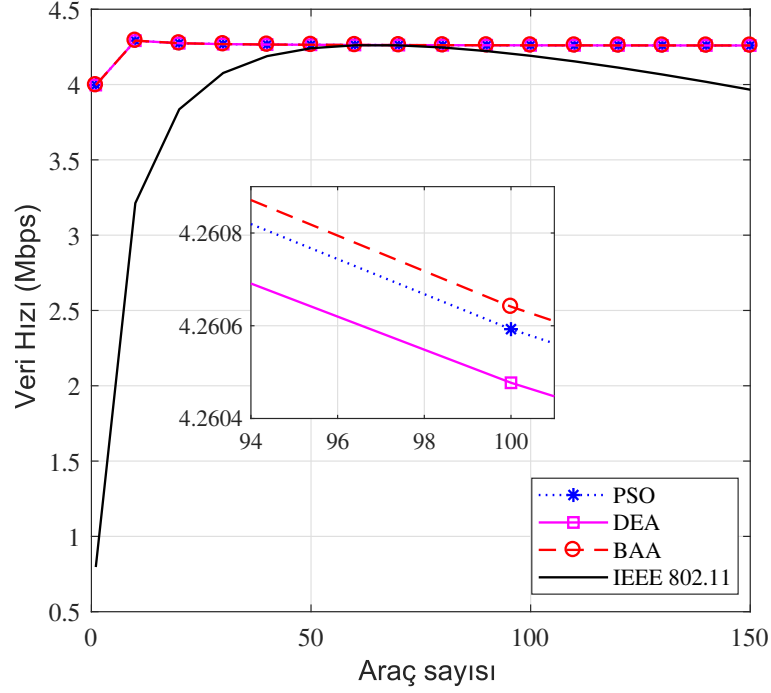
- Diferansiyel Evrimsel Algoritma (DEA):

Popüler bir popülasyon tabanlı algoritma, optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan DEA'dır. Bu algoritmalar ayrıca genel amaçlar için sayısal optimizasyon algoritmalarıyla birlikte kullanılır. Gelişmiş veri hızı verimliliğini kullanan DEA, genetik algoritmalarından farklıdır. VANET'lerde hedef CW çiftleri arasındaki varyasyona odaklanan işlemin çıktısı, hedef CW'lerin kendi dağılımı ile hesaplanır. Genellikle, mutasyon ve çaprazlama ile kombinasyon halinde bir ebeveyn vektöründen bir referans CW oluşturmak için kullanılır.

- Bal Arısı Algoritması (BAA):

Arıların yiyecek arama özelliğinin eylemleri, anlayışı, bilgi alışverişi ve ezberlenmesi, son zamanlarda en önemli sürü zekası araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Doğal bir arı kolonisinde arılar arasında paylaşılan bir rol vardır. Arılar bu işi merkezi bir birim olmadan yaparlar, bunu kendi başlarına paylaşırlar, bu da geçici ağlara benzer. Sürü zekasının iki ana yönü, iş alışverişi ve kendi kendine organizasyondur. Minimal CW boyutu arama modelinde, ortak zekanın görünmesini sağlayan basit bir özellik vardır. Optimum veri hızını elde etmek için arılar, yani araçlar CW boyutunu alır. Bir iç içgüdüye veya harici bir etkiye dayanan iki tür arı vardır (araçlar ve ağ sistemi), örneğin rastgele fırsatlar arayan rastgele arılar, arıları ve arılar tarafından değiş tokuş edilen bilgileri kullanmak ve yeni bir CW boyutuna geçmek için VANET'lerde arıları (araçlar) bekler. Araçlar arasında ayrıntıların paylaşılması, ortak bilginin yaratılmasında en önemli unsurdur. Bal arısı algoritması (BAA), arıların

(erkek arıların) davranışını (CW boyutu) modelleyerek oluşturulan en son algoritmadır. Daha yüksek veri hızına sahip CW boyutunu bulmaya çalışarak, BAA sonucu settteki maksimum veya minimuma göre almaya çalışır.



Şekil 6.3 Sezgisel tabanlı optimizasyon algoritmaları kullanıldığında veri hızı değişimi

Tablo 6.2 Her bir optimizasyon algoritmasında araç sayısına karşı veri hızı

Araç sayısı	PSO	DEA	BAA
10	4.2912	4.2910	4.2917
30	4.2685	4.2683	4.2687
50	4.2640	4.2640	4.2641
70	4.2620	4.2615	4.2621
90	4.2610	4.2608	4.2610
110	4.2603	4.2602	4.2603
130	4.2598	4.2597	4.2598
150	4.2595	4.2594	4.2595

Veri hızı, bu 3 farklı optimizasyon algoritması kullanılarak Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Veri hızı değerleri birbirine yakın olduğundan ayrıntılı olarak Tablo 6.2'de karşılaştırılmıştır. Bu tablo, araç sayısına göre veri hızını göstermektedir. Veri hızı, belirli bir sınıra kadar artan araç sayısı ile artmaktadır, daha sonra kanal aktarımı için daha fazla paketin rekabet etmesi nedeniyle daha fazla çarpışma meydana geldiği için veri hızı düşmeye başlar. Veri hızı, sezgisel optimizasyon

algoritmalarında geleneksel MAC'den her zaman daha yüksektir. Araç sayısı düşük olduğunda, BAA algoritması PSO ve DEA'dan daha yüksek veri hızına sahiptir. Araç sayısı yükseldiğinde ($N > 90$), BAA ve PSO algoritmalarının veri hızı neredeyse aynıdır, ancak DEA'dan daha yüksektir. Ancak, sezgisel optimizasyon algoritmalarının veri hızı, geleneksel MAC'dan daha yüksektir.

6.2 Önerilmiş Protokollerin Hesaplanma Süreleri

Bu bölümde, IEEE 802.11, CR-MAC, OEC-MAC ve MIMO-OFDM MAC'in hesaplanma süreleri sunulmaktadır. Simülasyon i7 3.50 GHz işlemci, 16GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda çalıştırılıp analizi MATLAB'da yapılmıştır.

Her yineleme için geçen IEEE 802.11 süresi Tablo 6.3'te sunulmuştur.

Tablo 6.3 Her yineleme için geçen süre (sn)

Yineleme	IEEE 802.11	CR-MAC	OEC-MAC	MIMO-OFDM
1	0.008056	0.021347	0.023384	0.025741
2	0.008292	0.025410	0.026110	0.027864
3	0.015999	0.018756	0.019976	0.021042
4	0.007572	0.021422	0.021732	0.023541
5	0.011058	0.023414	0.024794	0.026434
6	0.013106	0.022433	0.023233	0.025813
7	0.012406	0.018357	0.019557	0.022382
8	0.009716	0.018217	0.018917	0.021426
9	0.018397	0.021790	0.021980	0.023751
10	0.009505	0.021678	0.023478	0.025763

Analiz 100 araç için yapılmıştır. Araç sayısı (N) zaman tüketimi artmaktadır. CR-MAC, OEC-MAC ve MIMO-OFDM protokolleri, IEEE 802.11'den daha yüksek bir zaman tüketimine sahiptir çünkü işbirliğine veya çoklu anten yapısına dayalı iletişim, zaman tüketimini artırır. OEC-MAC ve MIMO-OFDM protokollerinin zaman tüketimi de CR-MAC protokolüne göre daha fazladır. Çoklu anten yapısına dayalı önerdiğimiz MIMO-OFDM tabanlı MAC protokollü sistem en fazla zaman tüketimine sahip sistemdir.

7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölüm 2’de, IEEE 802.11 standardında, VANET ağlar için PHY ve MAC katman özellikleri tanımlanmıştır. DCF, temel erişim yöntemidir. RTS/CTS ve CSMA/CA mekanizmaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. VANET’lerde IEEE 802.11 DCF’nin performansını incelemek için analitik bir model sunulmuştur. Teorik model, Markov zincir modeline göre gerçekleştirilmiştir. Araç sayısı, hız, araç yoğunluğu, çekişme penceresi (CW) boyutu gibi VANET’ler için IEEE 802.11 MAC performansını etkileyebilecek tüm temel parametreler dikkate alınmıştır. Performans ölçütleri ile IEEE 802.11 MAC parametreleri arasındaki ilişki belirlenmiştir. Kanal meşgul olasılığı, çarpışma olasılığı, başarılı iletim olasılığı, veri hızı ve gecikme ifadeleri türetilmiştir. VANET’ler için IEEE 802.11 MAC’nin etkisini incelemek için sayısal sonuçlar gösterilmiştir. Başarılı ve başarısız iletim olasılığı, veri hızı ve gecikme ifadeleri elde edilmiştir. Başarılı aktarım olasılığının artması nedeniyle veri hızı, daha yüksektir.

Alternatif olarak, işbirliğine dayalı iletim, iletişim güvenilirliğini artırabilir ve VANET’lerdeki hareketliliğin neden olduğu kablosuz kanal bozukluklarını hafifleterek daha düşük gecikmeyle iletişim hızını artırabilir. Bölüm 3’te, doymamış koşullarda Markov zincir modelinde kullanılarak IEEE 802.11p MAC katmanının CR-MAC protokolü performansı incelenmiştir. Ayrıntılı benzetim sonuçlarının nicel ve nitel bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. CR-MAC protokolünün performansı, VANET’ler için Nakagami-m kanal sönümlemesi altında incelenmiştir. Veri hızını artırmak için farklı veri iletim modları önerilmiş ve uygun veri aktarım modunu seçmek için bir mekanizma sunulmuştur. Çarpışma olasılığı, başarılı ve başarısız iletim olasılığı, veri hızı, gecikme analizi ifadeleri türetilmiştir. Benzetim sonuçları ile sönümlemeli kanallar altında CR-MAC protokolünün performansı açıkça gösterilmiştir. Başarılı iletim olasılığının artması nedeniyle, veri hızının arttığı olduğu açıktır. Öte yandan, kanal sönümlemesi, başarısız iletim olasılığının artması nedeniyle veri hızını azaltmaktadır.

Bölüm 4’te, OEC-MAC olarak adlandırılan, VANET’ler için yeni, güvenilir ve verimli

bir işbirlikli OFDM MAC protokolü önerilmiştir. OEC-MAC protokolü, hem sm mesajlarını hem de nsm mesajlarını iletimini desteklemek için tasarlanmıştır. Rastgele erişim mekanizması, VANET'lerin dinamik ve açık doğası nedeniyle en uygun ve verimli olduğu için, rastgele erişim yaklaşımını, yani IEEE 802.11p tarafından kullanılan CSMA/CA'yı kullanmıştır. Bu nedenle, önerilen OEC-MAC protokolü IEEE 802.11p ile uyumludur. Etkili işbirliği iletişimi sağlamak için yeni kontrol mesajları tanıtılmıştır. Uygun veri aktarım modunu seçmek için bir algoritma önerilmiştir. Markov zincir modeline dayanan OEC-MAC protokolünün analitik bir analizini sunulmuştur. Sayısal sonuçlar, OEC-MAC protokolünün sistem veri hızında kayda değer bir gelişme sağladığını ve ayrıca VANET'lerdeki güvenlik mesajlarının 100 msn gecikme gereksinimini karşıladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca PDR azaltılarak iletişimin güvenilirliği artırılmıştır.

Bölüm 5'te, Nakagami-m sönümlmeli kanal üzerinden VANET ağlarda IEEE 802.11 MAC protokolünü analiz etmek için analitik bir model sunulmuştur. Doymamış bir durumda 3D Markov zincir modeli analitik analizi gerçekleştirilmiştir. Nakagami-m sönümlmeli kanal üzerinden iletim çeşitliliği birleştirilen MIMO-OFDM sisteminin BER performansı incelenmiştir. Çarpışma olasılığı, başarısız iletim olasılığı, başarılı iletim olasılığı, kesinti olasılığı, BER, veri hızı ve gecikme ifadeleri belirlenir. Sayısal sonuçlar sunulmuştur.

Bölüm 6'da, IEEE 802.11 veri hızı, VANET'lerdeki güvenlik mesajları için optimize edilmiştir. Optimum veri hızı, araç sayısı, CW boyutu, maksimum yeniden iletim limiti ve araç hızı gibi bu parametrelerden herhangi biri değiştiğinde parametrelerin dinamik olarak ayarlanmasıyla elde edilir. Ayrıca sezgisel tabanlı yapay zeka algoritmalarıyla optimizasyon yapılarak geleneksel MAC sistemiyle de karşılaştırılmıştır. Önerilmiş protokollerin hesaplama süreleri sunulmuştur. CR-MAC protokolü RTS/CTS değişimini kullanmadığından, CR-MAC protokolü daha düşük zaman tüketimine sahiptir. OEC-MAC protokolü, işbirliğine dayalı iletişim zaman tüketimini artırdığı için IEEE 802.11'den daha yüksek zaman tüketimine sahiptir. Çoklu anten yapısına sahip MIMO-OFDM yapısı en fazla zaman tüketimine sahip sistemdir.

- [1] “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 Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pp. 1–51, Jul. 2010.
- [2] “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 Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, pp. 1–3534, Dec. 2016.
- [3] *Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band*, Nov. 2009.
- [4] “IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE) – multi-channel operation,” *IEEE Std 1609.4-2016 (Revision of IEEE Std 1609.4-2010)*, pp. 1–94, Mar. 2016.
- [5] S. Bharati, *Link-layer cooperative communication in vehicular networks*. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [6] Q. Xu, T. Mark, J. Ko, R. Sengupta, “Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC,” in *1st ACM international workshop on VANET*, Oct. 2004, pp. 19–28.
- [7] X. Ma, J. Zhang, X. Yin, K. S. Trivedi, “Design and analysis of a robust broadcast scheme for VANET safety-related services,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 46–61, Jan. 2012.
- [8] F. Kaabi, P. Cataldi, F. Filali, C. Bonnet, “Performance analysis of IEEE 802.11p control channel,” in *Sixth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Dec. 2010, pp. 211–214.
- [9] Y. Yao, L. Rao, X. Liu, “Performance and reliability analysis of IEEE 802.11p safety communication in a highway environment,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4198–4212, Nov. 2013.
- [10] H. J. F. Qiu, I. W. Ho, C. K. Tse, Y. Xie, “A methodology for studying 802.11p IEVANETEE broadcasting performance with practical vehicle distribution,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 10, pp. 4756–4769, Oct. 2015.
- [11] B. Li, G. J. Sutton, B. Hu, R. P. Liu, S. Chen, “Modeling and Qos analysis of the ieee 802.11p broadcast scheme in vehicular ad hoc networks,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 19, no. 2, pp. 169–179, Apr. 2017.

- [12] C. Campolo, A. Molinaro, A. Vinel, "Understanding the performance of short-lived control broadcast packets in 802.11p/WAVE vehicular networks," in *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Nov. 2011, pp. 102–108.
- [13] C. Campolo, A. Vinel, A. Molinaro, Y. Koucheryavy, "Modeling broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 199–201, Feb. 2011.
- [14] C. Campolo, A. Molinaro, A. Vinel, Y. Zhang, "Modeling event-driven safety messages delivery in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2392–2395, Dec. 2013.
- [15] C. Han, M. Dianati, R. Tafazolli, R. Kernchen, X. Shen, "Analytical study of the IEEE 802.11p MAC sublayer in vehicular networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 873–886, Jun. 2012.
- [16] A. F. M. S. Shah, N. Mustari, "Modeling and performance analysis of the IEEE 802.11p enhanced distributed channel access function for vehicular network," in *Future Technologies Conference (FTC)*, Dec. 2016, pp. 173–178.
- [17] Y. Xie, I. W. Ho, E. R. Magsino, "The modeling and cross-layer optimization of 802.11p VANET unicast," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 171–186, 2018.
- [18] J. R. Gallardo, D. Makrakis, H. T. Mouftah, "Performance analysis of the EDCA medium access mechanism over the control channel of an IEEE 802.11p WAVE vehicular network," in *IEEE International Conference on Communications*, Jun. 2009, pp. 1–6.
- [19] P. Wang, F. Wang, Y. Ji, F. Liu, X. Wang, "Performance analysis of EDCA with strict priorities broadcast in IEEE 802.11p VANETs," in *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Feb. 2014, pp. 403–407.
- [20] J. Zheng, Q. Wu, "Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11p EDCA mechanism for VANET," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2673–2687, Apr. 2016.
- [21] G. J. Sutton, R. P. Liu, I. B. Collings, "Modelling IEEE 802.11 DCF heterogeneous networks with rayleigh fading and capture," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 8, pp. 3336–3348, Aug. 2013.
- [22] J. Sahoo, E. H. Wu, P. K. Sahu, M. Gerla, "Binary-partition-assisted MAC-layer broadcast for emergency message dissemination in VANETs," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 757–770, Sep. 2011.
- [23] M. Khabazian, S. Aissa, M. Mehmet-Ali, "Performance modeling of safety messages broadcast in vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 380–387, Mar. 2013.
- [24] M. I. Hassan, H. L. Vu, T. Sakurai, "Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for DSRC safety applications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 8, pp. 3882–3896, Oct. 2011.
- [25] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. Ilhan, "Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 DCF for VANETs," in *9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Nov. 2017, pp. 346–351.

- [26] M. A. Karabulut, A. F. M. Shahen Shah, H. İlhan, "The performance of the IEEE 802.11 DCF for different contention window in VANETs," in *41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Jul. 2018, pp. 1–4.
- [27] Q. Wu, J. Zheng, "Performance modeling of IEEE 802.11 DCF based fair channel access for vehicular-to-roadside communication in a non-saturated state," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2014, pp. 2575–2580.
- [28] H. Wang, R. P. Liu, W. Ni, W. Chen, I. B. Collings, "VANET modeling and clustering design under practical traffic, channel and mobility conditions," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 3, pp. 870–881, Mar. 2015.
- [29] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. İlhan, "The effect of contention window size of the IEEE 802.11 DCF for VANETs," in *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, May 2018, pp. 1–4.
- [30] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, Mar. 2000.
- [31] D. Malone, K. Duffy, D. Leith, "Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 1, pp. 159–172, Feb. 2007.
- [32] S. Kafaie, M. H. Ahmed, Y. Chen, O. A. Dobre, "Performance analysis of network coding with IEEE 802.11 DCF in multi-hop wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 5, pp. 1148–1161, 2018.
- [33] X. Ma, X. Chen, H. H. Refai, "Unsaturated performance of IEEE 802.11 broadcast service in vehicle-to-vehicle networks," in *IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, Sep. 2007, pp. 1957–1961.
- [34] M. Gas, K. Kosek-Szott, M. Natkaniec, A. R. Pach, "3d markov chain-based saturation throughput model of IEEE 802.11 EDCA," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 14, pp. 826–827, Jul. 2011.
- [35] J. Gosteau, M. Kamoun, S. Simoens, P. Pellati, "Analytical developments on qos enhancements provided by IEEE 802.11 EDCA," in *IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No.04CH37577)*, vol. 7, Jun. 2004, pp. 4197–4201.
- [36] R. Shankar, A. T. Muthaiya, L. Mathew Janvier, P. Dananjayan, "Quality of service enhancement for converging traffic in EDCA based IEEE 802.11," in *International Conference on Process Automation, Control and Computing*, Jul. 2011, pp. 1–6.
- [37] S. Mukherjee, X. Peng, Q. Gao, "Qos performances of IEEE 802.11 EDCA and DCF: A testbed approach," in *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Sep. 2009, pp. 1–5.
- [38] F. Yang, Y. Tang, "Cooperative clustering-based medium access control for broadcasting in vehicular ad-hoc networks," *IET Communications*, vol. 8, no. 17, pp. 3136–3144, 2014.

- [39] F. Yang, Y. Tang, L. Huang, "A multi-channel cooperative clustering-based MAC protocol for VANETs," in *Wireless Telecommunications Symposium*, Apr. 2014, pp. 1–5.
- [40] N. Gao, L. Tang, S. Li, Q. Chen, "A hybrid clustering-based MAC protocol for vehicular ad hoc networks," in *International Workshop on High Mobility Wireless Communications*, Nov. 2014, pp. 183–187.
- [41] H. Su, X. Zhang, "Clustering-based multichannel MAC protocols for qos provisionings over vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 3309–3323, Nov. 2007.
- [42] K. A. Hafeez, L. Zhao, J. W. Mark, X. Shen, Z. Niu, "Distributed multichannel and mobility-aware cluster-based mac protocol for vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 8, pp. 3886–3902, Oct. 2013.
- [43] S. Ucar, S. C. Ergen, O. Ozkasap, "Multihop-cluster-based IEEE 802.11p and LTE hybrid architecture for VANET safety message dissemination," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2621–2636, Apr. 2016.
- [44] M. Zhang, C. Li, T. Guo, Y. Fu, "Cluster-based content download and forwarding scheme for highway VANETs," *China Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 110–120, Apr. 2018.
- [45] C. Cooper, D. Franklin, M. Ros, F. Safaei, M. Abolhasan, "A comparative survey of VANET clustering techniques," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 657–681, 2017.
- [46] M. Benslama, M. L. Boucenna, H. Batatia, *Ad hoc networks: study and discussion of performance*. London, UK: John Wiley Sons, 2015.
- [47] T. H. Luan, X. Ling, X. Shen, "MAC in motion: Impact of mobility on the MAC of drive-thru internet," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 305–319, Feb. 2012.
- [48] A. F. M. S. Shah, M. S. Islam, M. S. Alam, *Cooperative communication in wireless networks*. Saarbrücken, Germany: LAMBERT academic publishing, 2013.
- [49] A. F. M. Shahan Shah, H. Ilhan, U. Tureli, "CB-MAC: A novel cluster-based MAC protocol for VANETs," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 587–595, 2019.
- [50] N. Etemadi, F. Ashtiani, "Throughput analysis of IEEE 802.11-based vehicular ad hoc networks," *IET Communications*, vol. 5, no. 14, pp. 1954–1963, Sep. 2011.
- [51] G. H. Mohimani, F. Ashtiani, A. Javanmard, M. Hamdi, "Mobility modeling, spatial traffic distribution, and probability of connectivity for sparse and dense vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1998–2007, May 2009.
- [52] K. Xu, D. Tipper, Y. Qian, P. Krishnamurthy, "Time-dependent performance analysis of IEEE 802.11p vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5637–5651, Jul. 2016.

- [53] V. Nguyen, O. T. T. Kim, C. Pham, T. Z. Oo, N. H. Tran, C. S. Hong, E. Huh, "A survey on adaptive multi-channel MAC protocols in VANETs using markov models," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 16 493–16 514, 2018.
- [54] H. Zhang, W. Tian, J. Liu, "Improving EDCA for efficient channel access in vehicular communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, pp. 72–77, Oct. 2018.
- [55] X. Cheng, R. Zhang, L. Yang, "Wireless toward the era of intelligent vehicles," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 188–202, Feb. 2019.
- [56] T. Zhou, H. Sharif, M. Hempel, P. Mahasukhon, W. Wang, T. Ma, "A novel adaptive distributed cooperative relaying MAC protocol for vehicular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 1, pp. 72–82, Jan. 2011.
- [57] S. Bharati, W. Zhuang, "CAH-MAC: Cooperative ADHOC MAC for vehicular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 9, pp. 470–479, Sep. 2013.
- [58] S. Bharati, L. V. Thanayankizil, F. Bai, W. Zhuang, "Effects of time slot reservation in cooperative ADHOC MAC for vehicular networks," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2013, pp. 6371–6375.
- [59] R. Woo, D. S. Han, "A cooperative MAC for safety-related road information transmission in vehicular communication systems," in *The 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics*, Oct. 2012, pp. 672–673.
- [60] R. Zhang, X. Cheng, L. Yang, X. Shen, B. Jiao, "A novel centralized TDMA-based scheduling protocol for vehicular networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 411–416, Feb. 2015.
- [61] H. A. Omar, W. Zhuang, L. Li, "VeMAC: A TDMA-based MAC protocol for reliable broadcast in VANET," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 9, pp. 1724–1736, Sep. 2013.
- [62] R. Zhang, X. Cheng, Q. Yao, C. Wang, Y. Yang, B. Jiao, "Interference graph-based resource-sharing schemes for vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 8, pp. 4028–4039, Oct. 2013.
- [63] C. Chen, B. Wang, R. Zhang, "Interference hypergraph-based resource allocation (ihg-ra) for NOMA-integrated v2x networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 161–170, Feb. 2019.
- [64] H. A. Omar, W. Zhuang, A. Abdrabou, L. Li, "Performance evaluation of VeMAC supporting safety applications in vehicular networks," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 69–83, Jun. 2013.
- [65] H. Taghizadeh, V. Solouk, "A novel MAC protocol based on cooperative master-slave for V2V communication," in *38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Jul. 2015, pp. 1–5.
- [66] J. Zhang, Q. Zhang, W. Jia, "VC-MAC: A cooperative MAC protocol in vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 3, pp. 1561–1571, Mar. 2009.

- [67] S. Bharati, W. Zhuang, "CRB: Cooperative relay broadcasting for safety applications in vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 12, pp. 9542–9553, Dec. 2016.
- [68] S. Khan, M. Alam, N. Mullner, M. Franzle, "Cooperation and network coding based MAC protocol for VANETs," in *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Dec. 2015, pp. 64–67.
- [69] L. Zhang, B. Jin, Y. Cui, "A concurrent transmission enabled cooperative MAC protocol for vehicular ad hoc networks," in *IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service (IWQoS)*, May 2014, pp. 258–267.
- [70] Y. Hao, J. Tang, Y. Cheng, "Secure cooperative data downloading in vehicular ad hoc networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 9, pp. 523–537, Sep. 2013.
- [71] M. K. Simon, M. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*. John Wiley Sons, 2015.
- [72] X. Cheng, R. Zhang, L. Yang, "Wireless toward the era of intelligent vehicles," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 188–202, 2019.
- [73] H. Kwon, H. Seo, S. Kim, B. G. Lee, "Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: Protocol design, throughput analysis, and implementation issues," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 8, pp. 4176–4187, 2009.
- [74] H. Xiong, E. Bodanese, "A scheme to support concurrent transmissions in OFDMA based ad hoc networks," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, pp. 1–5.
- [75] R. Rashtchi, R. H. Gohary, H. Yanikomeroglu, "Joint routing, scheduling and power allocation in OFDMA wireless ad hoc networks," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, pp. 5483–5487.
- [76] M. Veyseh, J. J. Garcia-Luna-Aceves, H. R. Sadjadpour, "Cross-layer channel allocation protocol for OFDMA ad hoc networks," in *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, 2010, pp. 1–6.
- [77] S. R. Chaudhary, M. P. Thombre, "BER performance analysis of MIMO-OFDM system using different equalization techniques," in *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, 2014, pp. 673–677.
- [78] C. Zhang, B. Wang, D. Li, X. Tan, "Low complexity multiuser detection with recursively successive zero-forcing and SIC based on nullspace for multiuser MIMO-OFDM system," *China Communications*, vol. 12, no. 9, pp. 53–63, 2015.
- [79] Z. Sheng, H. D. Tuan, H. H. Nguyen, M. Debbah, "Optimal training sequences for large-scale MIMO-OFDM systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 13, pp. 3329–3343, 2017.
- [80] S. E. Khamy, N. Korany, H. Hassan, "Channel estimation techniques for wideband MIMO-OFDM communication systems using complementary codes two-sided sequences," in *37th National Radio Science Conference (NRSC)*, 2020, pp. 74–84.

- [81] H. Chen, R. Zhang, W. Zhai, X. Liang, G. Song, "Interference-free pilot design and channel estimation using ZCZ sequences for MIMO-OFDM-based C-V2X communications," *China Communications*, vol. 15, no. 7, pp. 47–54, 2018.
- [82] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. İlhan, "Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETs," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 35, no. 3, pp. 1575–1588, 2020.
- [83] T. H. Luan, X. Ling, X. Shen, "Mac in motion: Impact of mobility on the mac of drive-thru internet," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 305–319, 2012.
- [84] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. İlhan, "CR-MAC: Cooperative relaying MAC protocol for VANETs," in *2Scientific Meeting on Electrical-Electronics Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT)*, 2019, pp. 1–4.
- [85] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. İlhan, "Performance of the CR-MAC with channel fading and capture effect under practical traffic scenarios for VANETs," in *IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 2019, pp. 0647–0652.
- [86] F. Jameel, Faisal, M. A. A. Haider, A. A. Butt, "Performance analysis of VANETs under rayleigh, rician, nakagami-m and weibull fading," in *International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*, 2017, pp. 127–132.
- [87] C. Qin, K. Xiao, "Performance analysis of a multi-user relay selection scheme with predicted SINR in the presence of co-channel interference," in *8th IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, Jun. 2016, pp. 171–176.
- [88] Q. Wang, Y. Jing, "Closed-form average SNR and ergodic capacity approximations for best relay selection," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2827–2833, Apr. 2016.
- [89] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. İlhan, "OEC-MAC: A novel OFDMA based efficient cooperative MAC protocol for VANETS," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 94 665–94 677, 2020.
- [90] A. F. M. Shahan Shah, H. İlhan, U. Tureli, "RECV-MAC: A novel reliable and efficient cooperative MAC protocol for VANETs," *IET Communications*, vol. 13, no. 16, pp. 2541–2549, 2019.
- [91] A. F. M. S. Shah, H. İlhan, U. Tureli, "Modeling and performance analysis of the ieee 802.11p MAC for VANETs," in *IEEE 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2019, pp. 393–396.
- [92] S. Wu, W. Mao, X. Wang, "Performance study on a CSMA/CA-based MAC protocol for multi-user MIMO wireless lans," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 6, pp. 3153–3166, 2014.
- [93] Z. Kang, K. Yao, F. Lorenzelli, "Nakagami-m fading modeling in the frequency domain for OFDM system analysis," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 10, pp. 484–486, 2003.
- [94] T. H. Luan, X. Ling, X. Shen, "MAC in motion: Impact of mobility on the MAC of drive-thru internet," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 305–319, 2012.

- [95] M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah, H. Ilhan, “Performance optimization by using artificial neural network algorithms in VANETs,” in *IEEE 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2019, pp. 633–636.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgileri: karabulutmal@gmail.com

Makale

1. M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. İlhan, "OEC-MAC: A Novel OFDMA Based Efficient Cooperative MAC Protocol for VANETS," in IEEE Access, vol. 8, pp. 94665-94677, 2020.
2. M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. İlhan, "Performance modeling and analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for VANETS," in Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 35, no. 3, pp. 1575-1588, 2020.
3. M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. İlhan, "A Novel MIMO-OFDM Based MAC Protocol for VANETS," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, under review, pp. 1-14, 2021.

Konferans Bildirisi

1. M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "Improvement of performance with MIMO enabled MAC protocol for VANETS," IEEE Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-4.
2. M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "Performance of the CR-MAC with channel fading and capture effect under practical traffic scenarios for VANETS," IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON), New York City, USA, 2019, pp. 647-652.
3. M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "Performance optimization by using artificial neural network algorithms in VANETS," 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 2019, pp. 633-636.
4. M. A. Karabulut, A. F. M. Shahan Shah and H. İlhan, "CR-MAC: Cooperative relaying MAC protocol for VANETS," IEEE Scientific Meeting on Electrical-Electronics Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-4.

5. M. A. Karabulut, A. F. M. Shahen Shah and H. Ilhan, "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, Greece, 2018, pp. 1-4.
6. M. A. Karabulut, A. F. M. S. Shah and H. Ilhan, "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, 2017, pp. 346-351.