

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞEHİR İÇİ TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN  
SDN TEMELLİ BİR VANET MİMARİ ÖNERİSİ ve  
SİNYALİZASYON UYGULAMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Musa BALTA**

**Enstitü Anabilim Dalı** : **BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı** : **Doç. Dr. İbrahim ÖZÇELİK**

**Mayıs 2019**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEHİR İÇİ TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN  
SDN TEMELLİ BİR VANET MİMARİ ÖNERİSİ ve  
SİNYALİZASYON UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

Musa BALTA

Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM  
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 29 / 05 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Celal ÇEKEN  
Jüri Başkanı



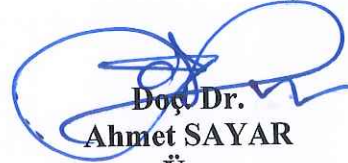
Prof. Dr.  
Resul KARA  
Üye



Prof. Dr.  
Cemil ÖZ  
Üye



Doç. Dr.  
İbrahim ÖZÇELİK  
Üye



Doç. Dr.  
Ahmet SAYAR  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Musa BALTA

.../.../2019

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. İbrahim ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tanımdan büyük onur duyduğum, yapıcı yaklaşım ve önerilerinin yanı sıra, çalışmanın tamamlanması sırasındaki büyük destekleri için, saygıdeğer jüri üyeleri Prof. Dr. Celal ÇEKEN ve Prof. Dr. Resul KARA hocalarıma teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte her zaman en büyük destekçim ve yardımcım olan, beni her daim motive eden sevgili eşim ve meslektaşım Arş. Gör. Deniz BALTA'ya ve tüm hayatım boyunca en büyük desteği ve sevgiyi vererek hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2015-50-02-043) teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xii
SUMMARY .....	xiii

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Şehir-içi Trafik Yönetim Sistemleri ve İletişim Gereksinimleri.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önerilen Çözüm Yöntemi.....	4
1.3. Tez Organizasyonu.....	7

## BÖLÜM 2.

TEMEL BİLGİLER .....	9
2.1. Akıllı Ulaşım Sistemleri.....	9
2.1.1. Akıllı ulaşım sistemlerinin tarihsel gelişimi.....	10
2.1.2. Dünya ve Türkiye’deki AUS politikaları.....	11
2.1.3. Akıllı ulaşım sistemlerinin mimari yapıları.....	14
2.1.4. Akıllı ulaşım sistemlerinde veri çevrimi.....	16
2.1.4.1. Veri toplama .....	16
2.1.4.2. Veri ayrıştırma .....	17
2.1.4.3. Veri işleme.....	17
2.1.4.4. Servis dağıtımı.....	18
2.1.4. Akıllı ulaşım sistemlerinin alt modülleri.....	18

2.2. Trafik Sinyalizasyonu.....	20
2.2.1. Sinyalizasyon sistemleri.....	20
2.2.1.1. Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri.....	21
2.2.1.2. Trafik uyarımalı sinyalizasyon sistemleri.....	21
2.2.2. Sinyalizasyon terimleri ve hesapları.....	21
2.2.2.1. İngiliz (Webster) eşitliği.....	23
2.2.2.2. Amerikan (HCM) yöntemi.....	24
2.2.2.3. Avustralya (Akçelik) yöntemi.....	24
2.2.2.4. Sinyalizasyon sistemlerinde kullanılan hesaplamalı teknikler.....	25
2.3. Araçsal Ağlar (Vehicular Ad Hoc Networks-VANET).....	26
2.3.1. Araçsal ağlar uygulama alanları.....	27
2.3.2. Araçsal ağlar iletişim karakteristiği ve mimari yapıları.....	28
2.3.2.1. WAVE mimarisi.....	31
2.3.2.2. CALM mimarisi.....	32
2.3.2.3. C2CNet mimarisi.....	33
2.3.3. Araçsal ağlar yönlendirme protokolleri.....	35
2.3.3.1. Topoloji temelli yönlendirme protokolleri.....	36
2.3.3.2. Coğrafi konum temelli yönlendirme protokolleri.....	37
2.3.4. Araçsal ağların akıllı ulaşım sistemlerinde uygulanışı.....	38
2.3.4.1. Avrupa’da yapılan araçsal ağ temelli AUS projeleri... ..	38
2.3.4.2. Amerika’da yapılan araçsal ağ temelli AUS projeleri.....	42
2.3.4.3. Japonya’da yapılan araçsal ağ temelli AUS projeleri.. ..	42
2.4. Yazılım Tanımlı Ağlar (Software Defined Networks-SDN).....	43
2.4.1. Programlanabilir ağlar.....	44
2.4.2. Yazılım tanımlı ağ mimari yapıları.....	45
2.4.2.1. İletim elemanları.....	48
2.4.2.2. Kontrolör.....	53
2.4.2.3. SDN uygulamaları.....	55
2.5. Yazılım Tanımlı Araçsal Ağlar (SDN temelli VANET).....	57
2.5.1. Yazılım temelli araçsal ağ mimari yapısı.....	58
2.5.1.1. Yazılım temelli araçsal ağlar iletim modları.....	59

2.5.1.2. Yazılım temelli araçsal ağların sağladığı faydalar.....	61
--	----

### BÖLÜM 3.

ŞEHİR İÇİ TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN SDN TEMELLİ VANET MİMARİSİ .....	63
3.1. Önerilen SDN Temelli VANET Mimarisinin Genel Yapısı.....	64
3.1.1. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin kavşak yapısı.....	66
3.1.2. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin SDN ağ yapısı....	66
3.1.3. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin merkez modeli....	67
3.2. Önerilen SDN Temelli VANET Mimarisinin Modellenmesi.....	67
3.2.1. Şehir içi kavşak yapılarının oluşturulması.....	68
3.2.2. Trafik senaryoları ve simülasyonların oluşturulması.....	68
3.2.3. SDN ağ yapısının oluşturulması.....	69
3.3. Ayrık Kavşak Yapıları İçin Önerilen SDN Temelli VANET Mimarisi	73
3.3.1. Önerilen mimarinin çalışma yapısı.....	73
3.3.2. Önerilen mimarideki veri çevrimi.....	76
3.3.2.1. Veri toplama ve ayrıştırma.....	76
3.3.2.2. Veri işleme ve servis dağıtımı.....	77
3.4. Koordineli Kavşak Yapıları İçin Önerilen SDN Temelli VANET Mimarisi .....	81
3.4.1. Önerilen mimarinin çalışma yapısı.....	81
3.4.2. Önerilen mimarideki veri çevrimi.....	82
3.4.2.1. Veri toplama ve ayrıştırma.....	84
3.4.2.2. Veri işleme ve servis dağıtımı.....	86

### BÖLÜM 4.

ŞEHİR İÇİ TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN SDN TEMELLİ VANET MİMARİSİ ÜZERİNDE GELİŞTİRİLEN SİNYALİZASYON UYGULAMALARI.....	88
4.1. Ayrık Kavşak Yapılarındaki Trafik Sinyalizasyonu İçin Önerilen SDN Kontrolör Modüllerine Dayalı KKA Uygulaması.....	89
4.1.1. Literatürde kullanılan sinyalizasyon teknikleri.....	89

4.1.2. SDN temelli KKA'nın önerilen mimari üzerinde uygulanışı....	92
4.1.3. Performans testlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi.....	95
4.2. Koordineli Kavşak Yapılarındaki Trafik Sinyalizasyonu İçin Önerilen 3 Aşamalı Bulanık-Karar Ağacı Modeli.....	104
4.2.1. Önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelinin çalışma yapısı.....	104
4.2.1.1. Faz süresi bulanık modeli.....	106
4.2.1.2. Faz düzeni bulanık modeli.....	108
4.2.1.3. Yol ağırlığı bulanık modeli.....	108
4.2.1.4. C4-5 karar ağacı yapısı.....	112
4.2.2. Koordineli kavşak yapıları için önerilen mimarinin trafik ve ağ senaryolarına göre performans değerlendirmesi.....	113
4.2.2.1. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak/faz yapıları.	113
4.2.2.2. Önerilen mimari üzerinde gerçekleştirilen trafik ve ağ senaryoları.....	116
4.2.2.3. Performans testlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi.....	119
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE TARTIŞMA .....	139
5.1. Sonuç.....	139
5.2. Çalışmanın Bilime Katkıları.....	141
5.3. Gelecek Çalışmalar.....	143
KAYNAKLAR .....	145
ÖZGEÇMİŞ .....	150



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AUS	: Akıllı Ulaşım Sistemleri
ERGS	: Elektronik Route Guidance System
ARI	: Autofahrer-Rundfunk-Informationssystem
CACS	: Comprehensive Automobile Traffic Control System
SCATS	: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
ISO	: International Organization for Standardization
ITU	: International Telecommunications Union
OSI	: Open Systems Interconnection
VANET	: Vehicular Ad-hoc Networks
DSRC	: Dedicated Short Range Communication
WAVE	: Wireless Access in Vehicular Environment
SDN	: Software Defined Networks
ONF	: Open Networking Foundation
KKA	: Karınca Koloni Algoritması
3-BKA	: 3 Aşamalı Bulanık-Karar Ağacı Modeli

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Uluslararası standartlara uygun AUS mimari yapısı.....	14
Şekil 2.2. Araçsal ağlar uygulamala alanları sınıflandırması.....	28
Şekil 2.3. DSRC kanal dağılımı.....	29
Şekil 2.4. Araçsal ağlar uygulama alanı sınıflandırması.....	30
Şekil 2.5. WAVE mimarisi katmanlı yapısı.....	31
Şekil 2.6. CALM mimarisi katmanlı yapısı.....	33
Şekil 2.7. C2CNet mimarisi katmanlı yapısı.....	34
Şekil 2.8. Literatürdeki araçsal ağlar yönlendirme protokolleri sınıflandırma ağacı.....	36
Şekil 2.9. COOPERS projesi mimari gösterimi.....	39
Şekil 2.10. CVIS projesi mimari gösterimi.....	40
Şekil 2.11. PReVENT projesi mimari gösterimi.....	41
Şekil 2.12. GeoNET projesi mimari gösterimi.....	41
Şekil 2.13. Yazılım tanımlı ağ ve geleneksel ağ yapıları.....	45
Şekil 2.14. ONF tarafından önerilen SDN katmanlı mimari yapısı.....	46
Şekil 2.15. Soyutlama sonucu oluşan SDN katmanları.....	48
Şekil 2.16. Openflow temelli SDN anahtar cihaz ve akış tablosu yapısı.....	49
Şekil 2.17. Akış tablosu işlem süreci.....	50
Şekil 2.18. SDN temelli anahtar cihazı ile SDN kontrolör arasında bağlantı kurulum işlemleri.....	52
Şekil 2.19. Packet_in ve Packet_out mesajları başlık yapıları.....	52
Şekil 2.20. Flow_mod mesajı başlık yapısı.....	53
Şekil 2.21. Floodlight SDN kontrolör modül yapısı.....	55
Şekil 2.22. SDN temelli VANET mimarisi genel yapısı.....	58
Şekil 2.23. SDN temelli VANET mimarisi merkezi kontrol modu.....	60
Şekil 2.24. SDN temelli VANET mimarisi dağıtık kontrol modu.....	60

Şekil 2.25. SDN temelli VANET mimarisi hibrid kontrol modu.....	61
Şekil 3.1. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin Sakarya/Adapazarı şehir merkezi üzerindeki modeli .....	65
Şekil 3.2. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin kavşak yapısı.....	66
Şekil 3.3. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin SDN ağ yapısı.....	67
Şekil 3.4. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin merkez modeli.....	67
Şekil 3.5. Ayrık kavşak faz yapısı ve SUMO gösterimi.....	68
Şekil 3.6. SUMO program çıktısı.....	69
Şekil 3.7. Araçların akış tablosu xml kodu .....	71
Şekil 3.8. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin benzetim ortamları üzerinde modellenmesi .....	72
Şekil 3.9. Ayrık kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin çalışma yapısı .....	74
Şekil 3.10. Önerilen sistemin uçtan-uca iletim şeması .....	74
Şekil 3.11. LLDP ve BDDP'nin önerilen SDN temelli VANET mimarisindeki dizge diyagramı .....	75
Şekil 3.12. SDN etmen RSU akış tablosu .....	78
Şekil 3.13. SDN etmen RSU tarafından üretilen TCP trafik paketi.....	78
Şekil 3.14. SDN anahtar cihazı akış tablosu .....	79
Şekil 3.15. TCP trafik paketi ve packet_in mesajı .....	79
Şekil 3.16. Kontrolör tarafından üretilen TCP paketi .....	80
Şekil 3.17. Kontrolör tarafından üretilen Packet-out mesajı .....	80
Şekil 3.18. Önerilen SDN temelli VANET mimarisindeki veri akışının dizge diyagramı .....	83
Şekil 3.19. Merkezi ve sis hesaplama yöntemlerine göre SDN etmen RSU üzerinde oluşturulan TCP paket yapıları.....	85
Şekil 3.20. 4-fazlı ve 4- yollu kavşak yapısı için yeni sinyalizasyon sürelerini içeren TCP paket yapısı.....	87
Şekil 4.1. Karıncaların sinyalizasyon optimizasyonundaki davranışları .....	91
Şekil 4.2. SDN temelli KKA'nın akış diagramı .....	94
Şekil 4.3. Ortalama gecikme performans sonuçları .....	97
Şekil 4.4. Kuyruk uzunluğu performans sonuçları .....	99

Şekil 4.5. İşlem süresi performans sonuçları .....	100
Şekil 4.6. Uçtan-uca gecikme performans sonuçları .....	102
Şekil 4.7. Simülasyon süresi performans sonuçları .....	103
Şekil 4.8. Önerilen modelin sinyalizasyon hesabı akış şeması .....	105
Şekil 4.9. Faz süresi bulanık modeli üyelik fonksiyonları .....	109
Şekil 4.10. Faz düzeni bulanık modeli üyelik fonksiyonları .....	110
Şekil 4.11. Yol ağırlığı bulanık modeli üyelik fonksiyonları .....	111
Şekil 4.12. Faz süresi bulanık modeli karar ağacı özeti .....	113
Şekil 4.13. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak yapıları.....	114
Şekil 4.14. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak/faz yapıları.....	115
Şekil 4.15. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerinin kavşak içlerindeki ortalama çevrim süreleri .....	122
Şekil 4.16. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerinin kavşak içlerindeki ortalama çevrim süreleri.....	123
Şekil 4.17. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerinin kavşak içi ortalama gecikme süreleri .....	125
Şekil 4.18. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerinin kavşak içi ortalama gecikme süreleri .....	126
Şekil 4.19. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerinin her fazdaki geçen araç sayısı oranı.....	128
Şekil 4.20. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerinin her fazdaki geçen araç sayısı oranı.....	129
Şekil 4.21. Trafik senaryolarına göre merkezi hesaplamaya dayalı iletim mimarilerinin uçtan uca gecikme süreleri .....	131
Şekil 4.22. Trafik senaryolarına göre sis hesaplamaya dayalı iletim mimarilerinin uçtan uca gecikme süreleri.....	132
Şekil 4.23. Trafik ve ağ senaryolarına göre merkezi hesaplamaya dayalı iletim mimarilerinin uçtan uca gecikme süreleri .....	133
Şekil 4.24. Trafik ve ağ senaryolarına göre sis hesaplamaya dayalı iletim mimarilerinin uçtan uca gecikme süreleri .....	134
Şekil 4.25. Trafik senaryolarına göre hesaplama yöntemlerindeki işlem hacmi.....	135

Şekil 4.26. Trafik ve ağ senaryolarına göre hesaplama yöntemlerindeki işlem hacmi.....	135
Şekil 4.27. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerindeki paket kayıp oranları.....	137
Şekil 4.28. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerindeki paket kayıp oranları .....	138

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. AUS mimari hizmet alanları sınıflandırması .....	15
Tablo 2.2. Trafik sinyalizasyon terimleri ve açıklamaları.....	22
Tablo 2.3. Bölgelere göre DSRC standardı teknik özellikleri.....	30
Tablo 2.4. WAVE mimarisi protokol yığını ve açıklamaları.....	32
Tablo 2.5. Araçsal ağ mimarilerinin karşılaştırma tablosu.....	35
Tablo 2.6. SDN kontrolörlerin karşılaştırma tablosu.....	54
Tablo 4.1. Trafik senaryoları için başlangıç parametreleri .....	95
Tablo 4.2. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak bilgileri .....	116
Tablo 4.3. Olağan trafik senaryoları.....	117
Tablo 4.4. Değişken trafik senaryoları.....	118
Tablo 4.5. Ağ topoloji senaryoları.....	119

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Trafik yönetim sistemleri, yazılım tanımlı ağlar, araçsal ağlar, bulanık mantık, SUMO, NS-2

Günümüz şehir içi kavşak yapılarının fiziksel özellikleri ve plansız yol kesişmelerinden dolayı oluşan trafik akımları, zaman/nakit kaybı, stres, daha fazla yakıt tüketimi gibi birçok olumsuz etkiye sebep olmaktadır. Bu nedenle hem akademik hem de ticari çevrelerde bir akıllı şehir uygulaması olan trafik yönetim sistemleri üzerine birçok çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda yapılan bu çalışmalarda araçların birbirleri arasında veya saha kenarındaki cihazlar ile haberleşmelerini kolayca sağlayarak ilgili trafik verilerinin merkeze taşınmasını sağlayan VANET (Araçsal Ağlar-Vehicular ad hoc networks) mimarisinin çok sık kullanıldığı görülmektedir. Diğer taraftan günümüz geleneksel ağlarında karşılaşılan performans, programlanabilirlik, ölçeklenebilirlik, güvenlik ve yönetim zorluğu gibi sorunlara çözüm getiren yeni bir ağ mimarisi olan SDN (Yazılım tanımlı ağlar-Software defined networks) üzerine de birçok çalışma yapılmaktadır.

Tüm bunlara bağlı olarak bu tez çalışmasında, hem günümüz trafik yönetim sistem modüllerini daha adaptif bir şekilde kullanabilmek hem de gelecekte eklenecek trafik tabanlı hizmetleri iletişim altyapısı değiştirilmeden istenilen servis kalitesinde sunabilmek için SDN ve VANET ağ paradigmalarının ayrı ve koordineli kavşak yapılarında nasıl birlikte kullanılacağı ile alakalı bir mimari önerisi sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada trafik yönetim sistemlerinin en önemli problemlerinden olan sinyalizasyon üzerine de literatürdeki çalışmaların aksine kavşak içerisindeki taşıt kompozisyonuna ek olarak çevresel etmenler (kaza durumu, öncelikli araç geçişi vb.) ve aktivite bilgisini (yol yapım, yürüyüş, tren geçişi vb.) de hesaba katan 3 aşamalı bir bulanık karar ağacı modeli önerisinde bulunulmuştur. Önerilen bu model kavşak içerisindeki trafik lambalarının yeşil ışık optimizasyonu ve faz düzenini yeniden ayarlamasının haricinde, kavşak içerisindeki SDN etmen araç ve RSU'lar arasındaki kullanılan VANET yönlendirme protokolleri (AODV, DSDV) arasında otomatik seçim yaptıran bir akış girdisi de üretmektedir. Trafik yönetim sistemlerinin iletim altyapısı için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin ve üzerinde çalışacak 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelinin işlevselliğini ölçebilmek için Adapazarı Şehir Merkezi model alınarak farklı trafik ve ağ senaryoları üzerinde performans testleri yapılmıştır. Yapılan performans testlerinde elde edilen sonuçlara göre önerilen sinyalizasyon modeli ve mimari yapısı literatürdeki çalışmalara göre trafik sinyalizasyon kriterlerinde ortalama %12-14, ağ kriterlerinde ise %30-35 oranında iyileşme sağlamıştır.

# **A PROPOSAL OF SDN BASED VANET ARCHITECTURE AND SIGNALLING APPLICATION FOR URBAN TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS**

## **SUMMARY**

Keywords: Traffic management systems, software defined networks, vehicular networks, fuzzy logic, SUMO, NS-2

One of the main challenges for developed cities is vehicle traffic and its management. Because of physical structures and cross roads of urban intersections, traffic flows may cause time delay, congestion, traffic accidents and more fuel/time consumption. For these reasons, there are many studies on traffic management systems which are a part of smart city applications in both literature and practice. In recent years, it seems that VANET (Vehicular ad hoc networks) architecture has been preferred in these studies, which enables vehicles to easily communicate with each other or devices on the edge of the road and also to transfer the related traffic data to the center. On the other hand, there are many studies on a new network paradigm called SDN (software defined networks) that solves problems such as performance, programmability, scalability, security and management difficulties in today's traditional networks.

Depending on all this, in this study, we will present an architectural proposal about how to use SDN and VANET network paradigms together in traffic management systems in order to use both existing intersection management system modules more adaptively and future traffic based services to be added in desired service quality without changing the communication infrastructure. Also in this study, a 3-stage fuzzy-decision tree model was proposed for traffic signalling by focusing environmental factors and activity information not only vehicle density unlike other signaling studies in literature. The proposed model also generates/sends a dynamic flow input to SDN agent vehicles and SDN agent RSU in intersection for making VANET routing protocols (AODV, DSDV) selection automatically. In order to measure the functionality of the SDN based VANET architecture and 3 stage fuzzy-decision tree model on it for the transmission infrastructure of the traffic management, performance tests were performed on different traffic and network scenarios on Adapazarı City Centre Model. SDN based VANET architecture was compared with traditional systems according to transmission infrastructure and also proposed 3-stage fuzzy-decision model was compared with signaling techniques in literature such as fixed-time signaling, Webster equation and ant colony algorithm. According to results obtained in the performance tests, the proposed signaling models and architectural structures have better performance about 12-14% in traffic signalling criteria and 30-35% in network criteria according to other signaling techniques.



# **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

## **1.1. Şehir-içi Trafik Yönetim Sistemleri ve İletişim Gereksinimleri**

Büyük şehirlerdeki sanayileşme ve göçler yüzünden artan nüfus, beraberinde enerji, su, ulaşım, barınma vb. konularda kaynakların efektif kullanımı açısından sorun oluşturmaktadır. Özellikle nüfus ile orantılı olarak artan araç sayısı, şehir içi trafiğini olumsuz etkilemekte, kavşaklarda daha fazla gecikme, trafik kazaları, yakıt tüketimi, emisyon değerlerinde artışa ve strese neden olmaktadır [1]. Trafikte karşılaşılan bu problemlere çözüm getirebilmek adına akademik ve ticari çevrelerde akıllı ulaşım sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır [2,3]. Trafik yönetim sistemi, rota hesaplama, park yönetimi, yolcu bilgilendirme gibi birçok alt uygulama alanı olan akıllı ulaşım sistemlerinin en önemli modülü ise, şehir içi kavşaklarda araçların bekleme/gecikme sürelerini azaltmak, olası trafik kazalarının önüne geçmek, yakıt ve emisyon değerlerini azaltmak amacıyla sürücü ve yayalara daha güvenli ve konforlu bir ulaşım sunan trafik yönetim sistemleridir. Bu kapsamda trafik yönetim sistemleri gerek günümüzde gerekse gelecekte, şehir içi trafiğin efektif ve dinamik yönetiminde önemli bir rol oynayacaktır.

Günümüzde mevcut trafik yönetim sistemleri, birbirine bağlı birçok ağ cihazından ve farklı veri trafiklerinden oluşan karmaşık ağ yapıları haline geldikleri için, bu sistemlerin iletişim altyapılarının özellikle değişken araç trafiği senaryoları altında (trafik yoğunluğunun değişmesi, trafik kazaları, ambulans geçişi vs.) ağ ölçeklenebilirliği, paket akış kontrolü, efektif bant genişliği kullanımı, kolay cihaz yönetimi ve güvenlik gibi konularda eksik kaldığı görülmüştür [4,5]. Ayrıca ağdaki veri akışında oluşabilecek her hangi bir problem (bant genişliğindeki darboğaz, cihaz bozulması, bağlantı kopması veya siber saldırı vb.) ise daha fazla trafik sıkışıklığı,

trafik kazası, yakıt tüketimi ve çevre kirliliğine neden olabilir [6]. Trafik yönetim sistemlerinde karşılaşılan bir başka problem ise sahadan veri çekmek için kullanılan detektör ve kamera sistemlerinin fiziksel şartlardan (rüzgâr, yağış, bozulma vb.) kolay etkilenecek saha ile merkez arasında efektif bir veri akışının sağlanamamasıdır [7,8]. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek adına sahadan veri çekme işlemleri için akademik çalışmalarda son zamanlarda VANET mimarisi tercih edilmektedir [9,10].

Şehir içi trafik/kavşak yönetim sistemleri için bu çalışmada önerilen mimari yapı içerisinde sahadan veri çekmek için kullanılacak olan VANET, son zamanlarda hem ticari hem de akademik çevrelerde çok ilgi gören bir konudur. Araçların mobil düğüm olarak modellendiği bu ağ paradigmasında araçlar kendi aralarında veya yol kenarındaki ünitelerle iletişim kurup trafik verimliliği, trafik emniyeti ve bilgi eğlence alanında çalışmalar yapılmaktadır. Her ne kadar VANET ağ mimarisi günümüzün popüler bir çalışma konusu ve teknoloji olmasına rağmen, özellikle hızlı ağ topoloji değişikliğindeki bağlantı kopmaları, çoklu atlamalardaki dengesiz ağ trafiği, yetersiz ağ optimizasyonu ve güvenlik gibi konularda eksik kalmaktadır [11,12]. VANET ağlarda karşılaşılan bu problemlere çözüm getirebilmek için geleneksel ağlardaki yapılardan farklı olarak kontrol ve veri düzlemini birbirinden ayıran, ağ cihazlarının sadece iletim için işlem yapmasını sağlayan ve yapılan çalışmanın da iletim ve uygulama altyapısını oluşturan SDN temelli VANET mimari çözüm önerileri literatürde yer almaya başlamıştır.

İlk olarak 2014 yılında Ku ve arkadaşları, VANET sistemlerinde karşılaşılan hızlı topoloji değişikliği ve yetersiz bantgenişliği problemlerine çözüm getirmek için SDN tabanlı bir VANET sistemi önermişler ve bu önerinin içerisinde araçları mobil SDN, RSU'ları ise sabit SDN olarak modellemişlerdir [12]. Önerilen bu model için 3 farklı iletişim modu (merkezi, dağıtık ve hibrid) tanımlanmasına rağmen, bu modlarının akıllı ulaşım sistemleri alanında nasıl kullanılacağı ile alakalı bir bilgi verilmemiştir. Bir başka çalışmada ise Troung ve arkadaşları 2015 yılında diğer çalışmadan biraz daha farklı olarak SDN temelli bir VANET sistemini, merkezdeki işlem yükü fazlalığını azaltmak için yerel olarak hesaplanması mantığına dayalı sis hesaplaması

(fog computing) ile önermişlerdir [13]. Ancak bu çalışmada da RSU'lar üzerinde çalışacak sis hesaplamasında uçtan-uca iletim mimarisi veya nasıl bir paket yapısının ele alındığından bahsedilmemiştir. Chun Liu ve arkadaşları ise 2015 yılında SDN temelli bir VANET sisteminde daha kolay yönetim sağlamak amacıyla konum-temelli yayın yapan bir yapı önermişlerdir [14]. Çalışmada sadece SDN anahtar cihazlarında openflow tabanlı konum-temelli yayın paketleri (Packet\_IN) oluşturulmuştur. Bu çalışmada araçlar ile alakalı bir SDN tanımı bulunmamaktadır.

Mevcut trafik yönetim sistemlerinin bir başka problemi ise, bu sistemlerin uygulama düzlemlerinde çalışan, akıllı ulaşım sistemlerinin en önemli alt uygulamalarından olan trafik sinyalizasyon hesabı üzerinedir. Birçok akademik çalışmada sinyalizasyon işlemlerinde dikkate alınan taşıt kompozisyonunu sisteme tek başına girdi olarak almak yeterli olmamaktadır. Çünkü trafik sistemleri sadece bir matematiksel modele oturtulamayacak, karmaşık ve doğrusal olmayan stokastik sistemlerdir [15]. Bu sistemler üzerinde kesin olmayan, belirsiz ve sürekli değişkenlik gösteren trafik şartlarına adaptif uyum sağlayabilen bir dinamik yapıya gerek duyulmaktadır. Günümüz sinyalizasyon sistemlerinde, değişken araç trafiği, kaza, hava durumu ve de yol bakım/çalışması gibi durumlardan dolayı çalışma yapıları bakımından artık sabit sinyal süresi ve faz düzeni atamaları yerine, sahadan gelecek trafik verilerine göre reaksiyon üretecek zeki sistemlere dayalı trafik uyarlamalı sinyalizasyon sistemleri tercih edilmeye başlanmıştır.

İlk olarak Webster ve Miller tarafından araçların kavşak içerisindeki ortalama gecikme sürelerini azaltmak amacıyla bir matematiksel model kullanmaları sabit zamanlı sistemlerde gelişme olarak nitelendirilmiştir [16,17]. Daha sonra Mamdani ve Pappis'in bir izole kavşak sistemi üzerinde 2 yönlü araç trafiği için kuyruk uzunluğunu hesaba katan bir bulanık model ile araçların kavşak içerisindeki ortalama gecikme sürelerini sabit zamanlı sistemlere göre %10-12 arasında bir iyileştirme yaptığı çalışma ise literatürde sinyalizasyon hesabındaki ilk zeki sistem uygulamasıdır [18]. Her iki çalışma da literatürdeki sinyalizasyon çalışmalarının öncüsü olarak kabul edilseler de günümüz şehir içi kavşak yapılarına uygunluk ve trafik ihtiyaçlarını

karşılamaktan uzaktırlar. 1993 yılında Favilla ve arkadaşlarının Sao Paulo şehrinde çoklu şeritten oluşan sadece bir kavşak ve faz düzeni üzerinde yine sadece kuyruktaki araç sayısına dayalı bulanık modeli durum makineleriyle birlikte çalıştırıp yeşil ışık sürelerini optimize etmeleri bu alanda yapılmış ilk hibrid algoritma çalışması olarak kabul edilebilir [19].

Günümüz çalışmalarında ise hibrid yapılar sinyalizasyon işlemlerinde daha çok tercih edilmektedir. Örneğin 2014 yılında Yunrui ve arkadaşları tip-2 bulanık mantık ve diferansiyel denklem ile 11 kavşaklı bir ağ topolojisi üzerinde çalışma yapmışlardır [20]. Bu çalışmada Yunrui ve arkadaşları önerdikleri modele sadece araç trafik yoğunluk bilgisini ekleyip, kavşak içerisinde gelişebilecek çevresel etmen ve aktivite bilgilerini hesaba katmamışlardır. Bir başka çalışmada ise Li ve arkadaşları 2016 yılında, sahadan elde ettikleri trafik bilgilerine göre derin sinir ağını pekiştirmeli (reinforcement) öğrenme için kullanmışlardır [21]. Wanjing ve arkadaşları ise şehir-içi izole kavşaklar için yaya fazları ve sinyal sürelerini sahadan gelen trafik verilerine göre genetik algoritma temelli sezgisel algoritma ile uygulamışlardır [22]. Yine bu iki çalışmada da bir önceki çalışmada olduğu üzere farklı hibrid modeller sadece kavşak içerisindeki taşıt trafik hacmine göre çalıştırılmış, gerek çevresel etmenler ve aktivite bilgileri olsun gerekse trafik yönetim sistemlerinin iletim altyapılarıyla ilgili bir bilgi sunulmamıştır. Bu tez çalışmasında, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, ayrık ve koordineli kavşaklar içerisindeki taşıt kompozisyonuna ek olarak çevresel etmenler (kaza durumu, öncelikli araç geçişi vb.) ve aktivite bilgilerin (yol yapım, yürüyüş, tren geçişi vb.) birlikte hesaba katıldığı 3 aşamalı bir bulanık karar ağacı modeli önerisinde bulunulmuştur.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Önerilen Çözüm Yöntemi**

İncelenen akademik/ticari çalışmalar neticesinde bu tez çalışmasında, ayrık ve koordineli kavşak yapıları üzerindeki trafik yönetim sistemlerinin her bir veri çevrimi modülü içerisinde karşılaşılan iletim ve uygulama altyapılarındaki ölçeklenebilirlik, paket akış kontrolü ve dinamik programlamabilirlik gibi sınırlamalara çözüm getirmek adına uçtan uca her iki yönde (hem araçtan merkez kontrolöre hem de kontrolörden

araca) çalışan iki aşamalı SDN temelli bir VANET mimari yapısı sunulmuş olup, bu iletişim altyapısı üzerinde çalışacak sinyalizasyon hesabı için de 3 aşamalı bir bulanık-karar ağacı modeli önerilmiştir. Önerilen SDN temelli VANET mimarisi ile 3 aşamalı bulanık modelin uygunluğunu ölçmek için farklı kavşak/faz yapıları üzerinde farklı trafik senaryoları ve ağ topolojileri altında sabit zamanlı, Webster eşitliği ve karınca koloni algoritması gibi sinyalizasyon teknikleri ile birlikte performans testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar bölüm 4’de açıklanmıştır. Genel olarak ise çalışmanın bilimsel katkıları aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

- İncelenen akademik çalışmalar neticesinde, SDN ve VANET mimarilerinin birlikte ele alındığı çalışmaların olduğu görülmüş, fakat bu çalışmaların trafik yönetim sistemlerinin sinyalizasyonu gibi bir akıllı ulaşım uygulaması ile entegre kullanılmadığı ve her iki yönde uçtan-uca bir mimari önerisinin sunulmadığı belirlenmiştir. Bu sebeplerden ötürü, bu çalışmada özellikle değişken trafik ve ağ şartları için geleneksel trafik yönetim sistemlerinin her bir modülünde (veri toplama, veri ayrıştırma, veri işleme ve servis dağıtım) karşılaşılan problemlere çözüm getirmesi için daha esnek, efektif, dinamik ve kolay programlanabilirlik sağlayan ve uçtan-uca iletimi sağlayan hibrid bir iki aşamalı SDN temelli VANET mimari önerisi sunulmuştur.
- Çalışmada önerilen SDN temelli VANET yapısı ayrık ve koordineli kavşak yapıları için 2 aşamalı tasarlanmış olup, çalışmanın ayrık kavşaklar için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin trafik yönetim sistemlerindeki veri çevrim işlemlerine uygunluğu ve işlevselliği test edilmiştir. Veri ve kontrol düzlemlerinin veri transferinde birlikte kullanıldığı bu aşamada, merkezi iletim modu benimsenmiş olup ayrık bir kavşak yapısı üzerinde sınırlı sayıda trafik senaryosuyla çalışılmıştır. Ayrıca bu aşamada önerilen mimarinin sinyalizasyon işlemlerindeki performansını ölçmek için de SDN kontrolörün modüllerini (Hat Keşfi ve Topoloji Yöneticisi) kullanan bir interior uygulama olarak karınca koloni algoritması da geliştirilmiştir.

- Günümüz karmaşık kavşak/faz yapılarına uygun ve de farklı ağ ve trafik senaryolarına kolay uyum sağlamak amacıyla, koordineli kavşak yapılarındaki trafik yönetim sistemlerinin uygulama ve iletim altyapıları için geliştirdiğimiz çalışmanın 2. aşamasındaki SDN temelli VANET mimarisinde ise, veri ve kontrol düzlemleri tam anlamıyla birbirinden ayrılmıştır. Bu mimari yapısında merkezde hesaplamanın yanı sıra ayrıca, hesaplama sunucusu üzerindeki işlem yükünü ve ağdaki veri trafiğini azaltmak için bulanık modelin sistem girdilerinin kavşak içlerindeki SDN etmen RSU'lar üzerinde hesaplandığı sis (fog computing) mimarisi şeklinde sunulmaktadır.
- Önerilen her iki SDN temelli VANET mimarisi de, trafik yönetim sistemlerinin uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından kabul gördüğü veri çevrim modüllerine göre modellenmiş olup, veri akışının mimari üzerinde nasıl gerçekleştiğiyle alakalı dizge diagramları ve paket yapıları oluşturulmuştur. Buna göre ayrık kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimari içerisinde, sahadan gelen trafik verileri, sahadaki SDN etmen RSU tarafından oluşturulan TCP paketi yapısında Openflow protokolü “packet\_in” mesaj tipi içerisinde merkeze iletilmekte, sinyalizasyon hesabı sonucu oluşturulan yeni TCP paketi ilgili kavşak yapısına yine Openflow protokolü “packet\_out” mesaj tipi içerisinde gönderilmektedir. Koordineli kavşak yapıları için önerilen mimari yapısında ise, sis hesaplama ve merkezi hesaplama yöntemlerine göre SDN etmen RSU üzerinde ayrı TCP paket yapıları oluşturulmakta ve merkezdeki 3 aşamalı bulanık-karar ağacı sinyalizasyon modeline gönderilmektedir. Sinyalizasyon sonucu elde edilen verilere göre yeni bir TCP paket yapısı ve bir akış girdisi (gerekliyse) ilgili kavşak yapısına gönderilmektedir.
- Çalışmada ayrıca koordineli kavşaklar için önerilen SDN temelli VANET altyapılı trafik yönetim sistemlerindeki sinyalizasyon işlemleri için, (yeşil ışık optimizasyonu ve faz düzeni ayarlama) günümüz kavşak ve faz yapıları, değişken trafik şartları, çevresel etmenler ve aktiviteleri dikkate alan 3 aşamalı bir bulanık-karar ağacı modeli (faz süre optimizasyonu, faz düzeni ayarı ve yol

önceliği belirleme) geliştirilmiştir. Sahadaki SDN etmen araçlardan gelen trafik bilgilerini ilgili kavşağın yapısı ve faz düzenine göre sınıflandırıp, VANET mimarisi vasıtasıyla kavşak içerisindeki kaza durum ve öncelikli araç kontrolü yapan bu model sinyalizasyon işlemlerinin haricinde, kavşaktaki araçların yoğunluğu veya belirlenen bir duruma (incident) göre ilgili kavşaktaki SDN etmen araç ve RSU'lara daha iyi iletişim ve merkeze net bilgi sağlamak amacıyla hangi yönlendirme algoritmasını (AODV, DSDV) kullanacaklarının bilgisini içeren bir akış girdisi de üretmektedir.

### 1.3. Tez Organizasyonu

Bu tez çalışması 5 ayrı bölümden oluşmaktadır. Tezin 2. Bölümünde, önce iletim ve uygulama altyapılarındaki problemlere çözüm getirmenin amaçlandığı akıllı ulaşım sistemleri, alt çalışma konusu olan trafik yönetim sistemleri ve en önemli işlevi trafik sinyalizasyonu kavramlarının neler olduğu ve bu konular üzerinde yapılan akademik ve ticari çalışmalardan bahsedilmektedir. Daha sonra bu sistemler için tez çalışmasında önerilen mimari yapısı olan iki aşamalı SDN temelli VANET modelindeki, araçsal ağlar, yazılım tanımlı ağlar ve bu iki mimarinin bileşiminden oluşan SDN temelli ağlar kavramları detaylı şekilde açıklanmış olup, yapılan akademik ve ticari çalışmalardan bahsedilmiştir.

Tezin 3. Bölümde ise, önce önerilen SDN temelli VANET mimarisinin genel yapısı gösterilerek, bu yapı üzerinde ayrık kavşak yapıları için önerilen ve geliştirilen ilk aşamadan bahsedilecektir. Bu kısımda trafik yönetim sistemlerinin her bir veri çevrim modülünün, önerilen SDN temelli VANET mimari yapısının her iki aşamasında da nasıl gerçekleştirildiği ve kullanılan paket yapıları anlatılmaktadır. Ayrıca bu bölümde, günümüz farklı koordineli kavşak ve faz yapıları üzerinde çalışacak, değişken trafik ve ağ senaryolarına uygun SDN temelli VANET mimarisinin ikinci aşaması hakkında da bilgiler verilip, bir kavşak yapısı üzerinde nasıl çalıştığından bahsedilmektedir.

Tezin 4. Bölümünde, önce önerilen bu SDN temelli VANET mimari aşamalarının trafik yönetim sistemlerinin en önemli uygulaması olan trafik sinyalizasyonundaki işlevselliğini ölçmek için geliştirilen dahili ve harici sinyalizasyon uygulamalardan bahsedilmektedir. Daha sonra ayrı bir kavşak yapısı için önerilen mimari üzerindeki kontrolörün iç modüllerini kullanarak geliştirilen karınca koloni algoritmasından bahsedilmektedir. SDN temelli KKA sinyalizasyon uygulamasından sonra, bir harici sinyalizasyon uygulaması olarak, günümüz trafik şartlarına ve kavşak yapılarına uygun geliştirilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelinin SDN temelli VANET mimarisi üzerinde işleyişi ve tüm bileşenlerinden bahsedilmektedir. Bu bölümde ayrıca önerilen mimariler için örnek model olarak seçilen Sakarya/Adapazarı şehrinin merkezi kavşak/faz yapılarından bahsedilerek, bu model üzerinde gerçekleştirilen olağan/dinamik trafik ve ağ senaryoları tablolar şeklinde açıklamalı olarak verilmektedir. Son olarak bu bölümde sinyalizasyon uygulamalarının işlevselliğinin ölçülmesi adına yapılan performans testleri sonucunda elde edilen değerler grafiksel olarak verilerek detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Tezin son bölümünde ise, akıllı ulaşım sistemlerinin trafik yönetim sistemlerinin iletim ve uygulama altyapıları için önerdiğimiz esnek, ölçeklenebilir, programlanabilir ve uçtan uca iletişimi sağlayan iki aşamalı SDN temelli VANET mimarisinin literatüre neler kattığı, uygulamadan çıkarılan sonuçların neler olduğu ve gelecekte bu konu üzerinde yapılacak çalışmalar anlatılmıştır.



## **BÖLÜM 2. TEMEL BİLGİLER**

Tezin bu bölümü, tez çalışması kapsamında kullanılan akıllı ulaşım sistemleri, trafik sinyalizasyonu, araçsal ağlar, yazılım tanımlı ağlar ve yazılım tanımlı araçsal ağlar konuları olmak üzere 5 alt başlık altında anlatılacaktır. Önce iletim ve uygulama altyapılarındaki problemlere çözüm getirmenin amaçlandığı akıllı ulaşım sistemleri, alt çalışma konusu olarak trafik yönetim sistemleri ve de en önemli işlevi trafik sinyalizasyonu kavramları hakkında genel bilgiler verildikten sonra, bu konular üzerinde yapılan akademik ve ticari çalışmalardan bahsedilecektir. Daha sonra bu konular kapsamında, tez çalışmasında ayrık ve koordineli kavşak yapıları için önerilen iki aşamalı SDN temelli VANET mimarisindeki, araçsal ağlar, yazılım tanımlı ağlar ve bu iki mimarinin bileşiminden oluşan SDN temelli araçsal ağlar kavramları detaylı şekilde açıklanacak olup, yapılan akademik ve ticari çalışmalardan bahsedilecektir.

### **2.1. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS)**

Günümüzde şehirlerin ulaşım, barınma, enerji, altyapı gibi konularda kaynak yetersizliğinin önüne geçebilmeleri ve insanların yaşam kalitelerini iyileştirebilmeleri için teknoloji odaklı “Akıllı Şehir” çözümleri bulmaları gerekmektedir. Artan nüfusla birlikte akıllı şehirlerin en önemli sorunu, şehir içi kavşaklardaki araç trafik yoğunluğu ve bu araç trafiğinin iyi bir şekilde yönetilememesidir. Büyük şehirlerdeki sınırlı yol kapasiteleri, artan araç ve yaya trafiğine nazaran yetersiz kalmakta, trafik sıkışıklığı, trafik kazaları gibi insan hayatını olumsuz etkileyen olaylara sebebiyet vermektedir. Ayrıca trafikte oluşan bu istenmeyen durumlar daha fazla hava kirliliği ve yakıt tüketimine de neden olmaktadır [1-4].

Trafikte karşılaşılan bu sorunları çözebilmek adına bilgi ve iletişim teknolojilerine dayalı akıllı ulaşım sistemlerinin tasarlanması ve sahada uygulanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen akıllı ulaşım sistemlerinin kullanıcı-araç-altyapı-

merkez arasında çok yönlü kesintisiz ve efektif veri alışverişi ile izleme, ölçme, analiz ve kontrol işlemlerini kolayca yapabilmesi ve iyi tasarlanmaları gerekmektedir. Bu kapsamda Uluslararası Yol Federasyonu akıllı ulaşım sistemlerinin genel amaçlarını:

1. Trafiğin güvenliğini sağlayarak araçlara, yolculara ve yayalara güvenli bir ulaşım imkânı sağlamak,
2. Sürdürülebilir yol ulaşım ağının sağlanması ve idame ettirilmesi,
3. Sahadaki trafik ile ilgili verileri teknolojik altyapı ve gözlemler ile elde etmek,
4. Sahadan elde edilen trafik bilgilerinin merkeze aktarılması, merkezde bu verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi,
5. Bilinçli karar verme,

olmak üzere 5 ana madde şeklinde belirlemiştir [23-27]. AUS'ların planlama, tasarım ve analiz aşamalarındaki bütünlük ve çeşitlilik, bu sistemleri zamanla iletişim ve uygulama altyapıları açısından çok-disiplinli yapılar haline dönüştürmüştür.

### **2.1.1. Akıllı ulaşım sistemlerinin tarihsel gelişimi**

İlk olarak 1928 yılında trafik lambalarının şehir içlerindeki ana kavşaklarda kullanılmasıyla birlikte başlayan akıllı ulaşım sistemi kavramı, tarihsel gelişim sürecinde "AUS araştırmaları", "AUS standartları" ve "AUS uygulamaları" olmak üzere 3 ana aşamadan oluşmaktadır [28-30].

1960'lı yılların sonu ile 1970'li yılların başları olarak kabul edilen "AUS araştırma" döneminde özellikle ABD'de başlatılan ERGS (Electronic Route Guidance System-Elektronik Güzergah Kılavuzluk Sistemi-1969), Almanya'da başlatılan ARI (Autofahrer-Rundfunk-Informationssystem-Sürücü Radyo Yayını Bilgi Sistemi-1974) ve Japonya'daki CACS (Comprehensive Automobile Traffic Control System-Kapsamlı Araç Trafiği Kontrol Sistemi-1973) projeleri bu dönemin öncü projeleri olarak kabul edilmektedir [23-25].

Akıllı ulaşım sistemlerinin tarihsel gelişim sürecindeki ikinci aşama ise 1980 ve 1995 yılları arasını kapsayan “AUS standartları” dönemidir. Bu dönem özellikle teknolojiyi üreten ve yöneten gelişmiş ülkelerde AUS uygulamalarının arttığı ve kullanıma geçildiği bir dönemdir. Dünyadaki gelişmiş şehirlerde artan nüfus, beraberinde araç trafiğini de olumsuz etkilediğinden dolayı bu dönem AUS uygulamalarında önem arz etmektedir. Avusturalya’da 1982 yılında uygulanmaya başlayan Sidney Koordineli Adaptif Trafik Sistemi (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System-SCATS) isimli proje bu dönemin bilinen ilk çalışmasıdır [23,24]. Bir standart oluşturabilmek adına ilk önceleri “ulaştırma telematiği” ismi kullanılsa da daha sonra dünya genelinde “AUS” terimi literatürde yer almıştır. Daha sonra 1990 yılında Avrupa’da, akıllı ulaşım alanında yapılan çalışmalara bir standart sağlaması açısından ERTICO-ITS Europe teşkilatı kurulmuştur. 1992 yılında ise dünya çapında bir organizasyon olan TC204 Akıllı Ulaşım Sistemleri teknik komitesi kurulmuş ve ilk defa 1994 yılında AUS Dünya kongresi düzenlenmiştir [25].

Akıllı ulaşım sistemlerinin “AUS uygulamaları” diye adlandırılan tarihsel gelişim sürecindeki son dönemi ise 1995’ten günümüze kadar olan kısımdır. Bu dönemde mobil trafik bilgi sistemleri, elektronik denetleme sistemleri, zeki hesaplamalı trafik sinyalizasyonları, park yönetimi gibi birçok akıllı ulaşım sistemi uygulamasının haricinde aynı zamanda bu sistemlerin iletişim altyapılarında (3G, 4G, Wi-fi, araçsal ağlar vb.) da gelişmeler sağlanmıştır [25].

### **2.1.2. Dünya ve Türkiye’deki AUS politikaları**

Büyük şehirlerin sınırlı yol ve kavşak kapasitelerine karşın artan nüfus ile birlikte talebin sürekli arttığı akıllı ulaşım sistemlerinin temel görevleri arasında olası kazaları önlemek, kavşak içlerindeki gecikmeleri azaltmak, emisyon ve gürültü oranlarını azaltarak daha güvenli ve konforlu bir ulaşım ortamı sunmak bulunmaktadır. Bu sebepten ötürü yerel/ulusal yönetimler akıllı ulaşım sistemleri konusunda politikalar belirlemektedir.

Avrupa Birliği üyesi ÷lkelerde akıllı ulaşım sistemlerinin (özellikle karayolları için) sistematik ve hiyerarşik bir yapı içerisinde geliştirilip uygulanması için 2010 yılında 2010/40/EU isimli bir direktif yayınlanmıştır. Direktife göre AUS'ların tasarımı ve geliştirilmesinde daha güvenli, konforlu ve çevre dostu bir yapıyla birlikte bilgi ve teknoloji altyapılarına dayalı olmaları beklenmektedir. 2010/40/EU direktifiyle birlikte AUS'lar için dört temel öncelik belirlenmiştir [24-26]. Bunlar;

1. Karayolu trafik ve seyahat verilerinin optimal kullanımı,
2. Trafik yönetimi ve yük taşımacılığı yönetiminde AUS hizmetlerinin devamlılığı,
3. Karayollarının güvenliği ve emniyet uygulamaları,
4. Taşıtların ulaştırma altyapılarına erişim/bağlantılarının sağlanmasıdır.

Bu direktif doğrultusunda bazı AB üyeleri kendi AUS politikalarını belirlemişlerdir. Örneğin İspanya, kendi AUS politikasında 2020 yılına kadar şehir-içi trafik kazalarındaki ölüm oranlarını sıfıra düşürmeyi, motosiklet kazalarındaki ölüm oranlarını %20 azaltmayı, hız limitini açan araç sayısının büyük oranlarda azaltılmasını hedeflemektedir. Bir başka AB üye ÷lkesi olan Norveç'te devletin tüm siyasi ve karar organları tarafından kabul edilen 10 yıllık bir AUS politikası hazırlanmıştır. Hazırlanan bu politikada temel olarak ulaştırma faaliyetlerinde güvenilirlik, kapasite gibi kavramlar daha önem kazanırken seyahat sürelerinde ciddi azalışlar hedeflenmektedir. Teknoloji destekli altyapı sistemlerinin geliştirilerek trafik kazalarının azaltılması ve de sahadan gerçek zamanlı bilgi akışının sağlanması da Norveç'teki AUS politikasına başka bir örnektir [23-28].

Teknolojiyi üreten ve yöneten ABD'nin AUS politikasında ise, günümüz ve gelecek trafik ihtiyaçlarını karşılamada kamusal kaynakların idamesi ve daha efektif kullanımı, motorlu taşıtlar için güvenli bir ulaşım ortamı sağlanması, ulaşım ortamlarında çevrenin korunması ve düzenlenmesi, doğal afet veya savunma amaçlı durumlarda acil müdahale ekipleri için ulaştırma imkânlarının arttırılması ilkeleri bulunmaktadır. Bu ilke ve hedeflerle birlikte hem şehir içlerinde hem de kırsal alanlarda akıllı ulaşım sistemlerin kurulması ve geliştirilmesi, taşıt ve yayaların daha güvenli ve konforlu

ulaşım imkânı bulmaları hedeflenmektedir. Devlet, yerel yönetimler, kamu kurumları, üniversiteler, araştırma merkezleri ve sivil toplum kuruluşları bu AUS politikasındaki ilke ve hedefleri birlikte oluşturup yönetmektedirler [23,29-30].

Uzak doğu ülkelerindeki akıllı ulaşım sistemlerindeki gelişmelerde ise özellikle Japonya ve Singapur'daki AUS politikaları ön plana çıkmaktadır. Özellikle her iki ülke de ISO ve ITU tarafından yapılan teknoloji ve bilişim alanında yapılan standardizasyon çalışmalarını desteklemekte ve gelişmelerine katkıda bulunmaktadır. Özellikle bu standartların özellikle akıllı ulaşım sistem uygulamalarında kullanımı için yerel/genel yönetimleri desteklemekte ve teşvik sağlamaktadır. Sürücü ve yayaların güvenliğini sağlamak, trafik kazalarını ve sıkışıklığını azaltmak her iki ülkenin de AUS politikalarının temelinde yer almaktadır.

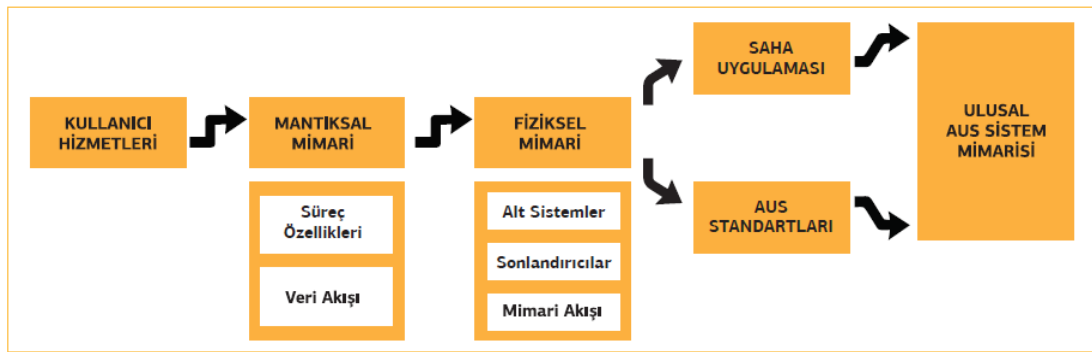
Ülkemizde ise akıllı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanılması açısından özellikle başta Dokuzuncu ve Onuncu Kalkınma Planları olmak üzere, Ulaşım ve İletişim Stratejisi Hedef 2023, Trafik Güvenliği Eylem Planı ve de Kentsel Gelişme Stratejisi ve Eylem planları gibi birçok stratejik politikada akıllı ulaşım sistemleri ile ilgili hedef ve amaçlar yer almaktadır [23,28-30]. Tüm bu stratejik politikalarda belirlenen temel özellikleri:

1. Tüm ulaşım alanlarında (başta karayolları) mevcut altyapıların bilgi ve teknoloji ile geliştirilerek trafik güvenliğinin artırılması,
2. Ulaştırma ve başka uygulamaların temeline altyapı oluşturabilmesi amaçlı sahadan gerçek zamanlı bilgi akışına dayalı, Kent Bilgi Sistemleri, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Trafik Yönetim Sistemleri gibi sistemlerin geliştirilmesi ve idame ettirilmesi,
3. Şehir içi akıllı ulaşım sistem uygulamalarının geliştirilebilmesi için uluslararası standartlara (özellikle 2010/40/EU isimli direktife) uygun ulusal bir ulaşım standardizasyonunun tanımlanması,
4. Geliştirilen bilgi teknolojileri vasıtasıyla çevreye duyarlı, yenilebilir enerji kaynaklarını destekleyen cihaz ve donanımları kullanarak araçların üretmiş oldukları emisyon ve gürültü oranlarını en aza indirmek,

5. AUS teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması için üniversite-sanayi iş birliklerinin artırılması ve teşvik edilmesi, tüm kamu ve kuruluşların AUS konusundaki gelişmelerle alakalı periyodik olarak bilgilendirilmesi, kullanılan bu sistemleri geri beslemelerinin değerlendirilip, analiz edilerek iyileştirilmesi şeklinde sıralayabiliriz.

### 2.1.3. Akıllı ulaşım sistemlerinin mimari yapıları

AUS uygulamalarının tasarımı, geliştirilmesi ve kullanıma geçilebilmesi bir önceki bölümde anlatılan uluslararası standartlar/direktifler/politikalara bağlı olarak bir mimari yapıya gereksinim duyulmaktadır. Bu AUS mimarileri öncelikle uygulanacak bölgenin fiziksel ve uygulama altyapı ihtiyaçlarına göre yerel veya ulusal olabilir. Bir AUS mimarisi tasarımında kullanılacak temel aşamalar Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Uluslararası standartlara uygun AUS mimari yapısı [23]

Buna göre AUS tasarımdaki ilk aşama olan kullanıcı hizmetleri aşaması ISO tarafından oluşturulan ve Tablo 2.1.'de verilen AUS mimari hizmet alanları ve sınıflandırmasına göre yerel/ulusal yönetimlerin o bölgedeki ihtiyaçlarına göre belirlenir. Belirlenen ihtiyaçlar doğrultusunda AUS tasarımının ikinci aşaması olan mantıksal mimari, fiziksel mimari de düşünülerek geliştirilir. Daha sonra bu mimari tasarımı üzerinde Tablo 2.1.'deki ilgili hizmet alanına göre bir uygulama geliştirilir.

Tablo 2.1. AUS mimari hizmet alanları sınıflandırması [23-25]

Hizmet Alanları	Hizmet Grupları
1.Yolcu Bilgisi	1.1 Yolculuk öncesi bilgi
	1.2 Yolculuk sırasındaki bilgi
	1.3 Yolculuk hizmetleri bilgisi
	1.4 Yolculuk öncesi güzergâh rehberi ve navigasyon
	1.5 Yolculuk sırasında güzergâh rehberi ve navigasyon
	1.6 Yolculuk planlama desteği
2.Trafik yönetimi ve işlemleri	2.1 Trafik kontrolü
	2.2 Ulaştırma ile ilgili olay yönetimi
	2.3 Talep yönetimi
	2.4 Ulaştırma altyapısının bakım yönetimi
3.Araç içi sistemler	3.1 Ulaştırma ile ilgili görüş iyileştirme
	3.2 Otonom araç işlemi
	3.3 Çarpışma önleme
	3.4 Emniyet hazırlığı
	3.5 Çarpışma öncesi kısıtlamaların tertibi
4.Yük taşımacılığı	4.1 Ticari araç ön izin
	4.2 Ticari araç idari işlemleri
	4.3 Otomatik yol kenarı emniyet denetimi
	4.4 Ticari araç içinde emniyet takibi
	4.5 Yük taşımacılığı filo yönetimi
	4.6 İntermodal bilgi yönetimi
	4.7 İntermodal merkezlerin yönetimi ve kontrolü
	4.8 Tehlikeli yüklerin yönetimi
5.Toplu Taşıma	5.1.Toplu taşıma yönetimi
	5.2. Talebe duyarlı ve paylaşımlı toplu taşıma
6.Acil Durum	6.1 Ulaştırma ile ilgili acil durum duyurusu ve kişisel güvenlik
	6.2 Acil durum araçlarının yönetimi
	6.3 Tehlikeli madde ve olay duyurusu
7.Ulaştırma ile ilgili elektronik ödeme	7.1 Ulaştırma ile ilgili elektronik mali işlemler
	7.2 Ulaştırma ile ilgili elektronik ödeme hizmetlerinin entegrasyonu
8.Karayolu ulaştırması ile ilgili kişisel emniyet	8.1 Toplu taşıma güvenliği
	8.2 Savunmasız karayolu kullanıcılarının emniyetinin artırılması
	8.3 Engelli karayolu kullanıcılarının emniyetinin artırılması
	8.4 Akıllı kavşaklar ve bağlantı yolları
9.Hava ve çevre koşullarının izlenmesi	9.1 Hava durumunun izlenmesi
	9.2 Çevre koşullarının izlenmesi
10.Afet müdahalesi yönetimi ve koordinasyonu	10.1 Afet veri yönetimi
	10.2 Afet müdahale yönetimi
	10.3 Acil durum merkezleri ile koordinasyon
11.Ulusal güvenlik	11.1 Şüpheli araçların izlenmesi ve kontrolü
	11.2 Enerji tesisleri veya boru hatlarının izlenmesi

AUS mimarilerinin tasarımındaki kullanıcı hizmetlerinin belirlenmesinden sonraki süreç, bilişim teknolojilerinden bağımsız şekilde mimarinin genel hatlarıyla sınırlarının belirlenmesi, yapılması gereken işlev ve fonksiyonların tanımlandığı mantıksal süreçtir. Bu süreçteki veri akışı tüm mimari yapısını etkilemektedir. Mantıksal mimaride belirlenen fonksiyonların ve aralarındaki bağlantıların nasıl ve

hangi teknoloji ile gerçekleştirileceği süreç ise fiziksel mimari tasarım sürecidir. Sahadaki araçlardan yol kenarındaki sonlandırıcılara olan veri akışından, yol kenarındaki birimlerden merkezdeki AUS uygulamasına kadar olan veri akışındaki kullanılacak teknolojiler ve yöntemler belirlenir.

#### **2.1.4. Akıllı ulaşım sistemlerinde veri çevrimi**

Çalışma yapıları ve veri çevrimi açısından akıllı ulaşım sistemleri veri toplama, veri ayrıştırma, veri işleme ve servis dağıtımı olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde akıllı ulaşım sistemlerinin veri çevrim modülleri ve bu modüllerde kullanılan teknolojilerden bahsedilmektedir.

##### **2.1.4.1. Veri toplama**

Akıllı ulaşım sistemlerinin (özellikle trafik yönetim sistemlerinde) veri çevrimindeki ilk aşama sahada bulunan ekipmanlardan merkeze trafik verisi çekme işlemidir. Mevcut sistemlerde ve akademik çalışmalarda kullanılan değişik şekillerde sahadan veri çekme işlemleri vardır. İlk olarak yol kenarına yerleştirilen manyetik detektörler ile başlayan veri çekme teknikleri daha sonraları loop detektörler, kamera kullanımları ve de web uygulamaları (Yandex, Google vb.) ile gelişme göstermiştir.

Manyetik detektörlerin düşük maliyetli ve kolay kurulum özelliklerine sahip olmasına rağmen yol kenarlarında açıkta bulunmalarından dolayı çevresel etkenlerden (rüzgâr, yön değiştirme vb.) çabuk etkilenmektedirler [2,3]. Manyetik detektörlerin bu zafiyetlerini ortadan kaldırmak amacıyla loop detektörler geliştirilmiştir. Asfalt altına döşenen bakır kablolar üzerinden araç geçtikçe tetiklenen sistemlerden oluşan loop detektörlerin ağır tonajlı araç geçişlerinde bozulmaları, onarımları için asfaltın kazılması gibi nedenlerden dolayı kullanımı zor olan bir sahadan veri çekme tekniğidir. Ayrıca loop detektörler için döngü süreleri söz konusudur (min 6sn), fakat bu süre içerisinde bir kaç araç aynı anda geçerse sistem doğru bilgi üretememektedir



[6]. Diğer taraftan detektörler sadece sezme işlemi yapmakta, trafik yoğunluğu ile alakalı herhangi bir bilgi sunmamaktadırlar.

Günümüz trafik/kavşak yönetim sistemlerinde sahadan trafik verisini çekmede daha fazla kamera sistemleri kullanılmaktadır. Anayollar, kavşaklar, köprüler gibi trafiğin yoğun olduğu alanlara yerleştirilen kameralar kendi görüş açılarında sanal noktalar oluşturup, teknik özelliklerine göre ya kendi üzerlerinde görüntü işleme yapıp üretilen trafik bilgisini merkeze gönderirler, ya da hiçbir görüntü işleme yapmadan görüntüyü direk olarak merkeze aktarırlar. Ağır hava şartları (yağmur, kar yağışı) sebebiyle görüntü açısının netliğinin kaybolması ve kameranın rüzgâr veya çevresel etkenler sebebiyle yön değiştirmesi gibi nedenlerden dolayı da kameralar günümüz trafik/kavşak yönetim sistemi uygulamalarını gerçeklemede tek başına yeterli olamamaktadırlar. Son olarak da kullanıcıların trafik verisi girdiği (yandex gibi) web uygulamaları da internetin çekmediği veya kullanıcılar tarafından güvenilir veri girişi olmadığı durumlarda trafik/kavşak yönetim sistemlerini olumsuz etkilemektedir [1-3].

#### **2.1.4.2. Veri ayrıştırma**

Farklı kaynak ve metotlar ile toplanan trafik verileri birbirlerinden farklı paket yapıları ve içeriklere sahiptirler. Bu trafik verilerinin akıllı ulaşım sistemleri içerisindeki veri işleme modüllerinde kullanılabilmesi için filtreleme, anlamlandırma, analiz etme gibi standardize işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir [1,2].

#### **2.1.4.3. Veri işleme**

Anlamlandırılan bu veriler, yeşil ışık süre optimizasyonu, trafik yoğunluğu hesaplama, rota ve ulaşım süresi hesaplaması gibi alt modüller ve belli algoritmalarından oluşan merkezi bir yazılım içerisinde işlenir ve yorumlanırlar. Önceleri sadece trafik sinyalizasyonunun sabit zamanlı olarak ayarlanması şeklinde tasarlanan bu sistem yazılımları, günümüz içerisinde sahadan gelen farklı trafik bilgilerine (anlık, periyodik, tanımlı, değişken vs.) göre dinamik ve adaptif olarak hizmet verebilen

komplex yapılar haline gelmişlerdir. Özellikle sinyalizasyon ve rota hesaplama gibi modüllerin sadece bir matematiksel modele oturtulamayacak kadar karmaşık ve doğrusal olmayan stokastik sistemler haline gelmeleri sebebiyle artık günümüz kavşak/trafik yönetim sistem yazılımlarının hesaplamalı teknik kullanımına açık olmaları gerekmektedir [3,4].

Literatürde, hesaplamalı teknik kullanılarak bu konular üzerinde yapılan birçok çalışma mevcuttur. Örneğin 2012 yılında Nietoa ve ark., trafik ışıklarının sinyalizasyon süreleri için efektif bir döngü kurmak için bir yapay zeka tekniği olan "sürü optimizasyonu" kullanmışlardır [31]. Kullandıkları bu tekniği Malaga ve Sevilla şehirlerini model alarak oluşturmuşlardır. Hea ve ark. ise 2012 yılında, trafik sinyallerinin zamanlamasını ayarlamak için yapay zekada optimizasyon algoritması olarak kullanılan "karınca kolonisi" algoritmasını kullanmışlardır [32]. Trafik akışını etkin bir şekilde kullanmak için zaman gecikmesi, dur-kalk sayısı, trafik kapasitesi gibi performans parametreleri seçip, sistemi Webster eşitliği ve genetik algoritma ile karşılaştırmışlardır.

#### **2.1.4.4. Servis dağıtımı**

Trafik yönetim sistem yazılımı tarafından işlenen veriler daha sonra trafik sinyalizasyon cihazları, elektronik bilgilendirme levhaları, mobil uygulama vs ile son kullanıcıların (sürücülere, yayalara, yetkili kurumlara, özel kuruluşlara) hizmetine sunulmaktadır. Örneğin Kammouna ve ark. 2014 yılında yaptıkları hiyerarşik karınca-bulanık model neticesinde elde ettikleri sonuçları kavşak içlerindeki ajan yazılımlarına iletmektedirler [33]. Bir başka çalışmada ise Mariagrazia ve ark., şehir-içi trafik kontrolü için dinamik bir sinyal planı oluşturup bu bilgiyi sahadaki bilgilendirme levhalarına da iletmışlerdir [34].

#### **2.1.5. Akıllı ulaşım sistemlerinin alt modülleri**

ISO standartları ve uluslararası politikalara göre geliştirilen Tablo 2.1.'de detaylı olarak verilen AUS uygulamaları kullanım amaçları ve uygulanacakları bölgelere göre

farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Dünya üzerinde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde kullanılan şehir içi AUS uygulamaları genel olarak 6 ana kategoride tanımlanmaktadır [23-30]:

1. Trafik yönetim sistemleri; Akıllı ulaşım sistemlerinin en önemli alt modülü olarak kabul edilen bu sistemler, şehir içi kavşaklardaki trafiği efektif yönetebilmek için sinyalizasyon kavşaklarının plan sürelerinin, mevcut trafik hacmi, kuyruklanma ve ortalama gecikme gibi parametrelere göre optimize edilerek yeni süre ve faz düzenlerinin gerçek zamanlı olarak uygulandığı sistemlerdir.
2. Yolcu bilgilendirme sistemleri; kavşak içlerine ve yol kenarlarına konulan LCD ve LED ekranlar ile sürücü ve yayalara trafiğin anlık durumu ile bilginin aktarıldığı sistemlerdir. Ayrıca bu sistemler video reklam, tanıtım, haber durumu ve bilgi-eğlence amacıyla da kullanılabilirler.
3. Araç içi sistemler; Araç içi sürücü ve yolculara bilgi-eğlence ve trafik verimliliği kapsamında ilgili ekipman ve protokoller vasıtasıyla araç içine yerleştirilmiş ekranlar üzerinden bilgi akışının sağlandığı sistemlerdir.
4. Toplu taşıma sistemleri; Belli güzergahlar dahilinde şehir-içi yolcu taşımacılığında, yolculuk süresinin, bekleme ve aktarmanın en az sürede tamamlanması, araç trafiğinin azaltılması ve yolcular için daha güvenilir ve konforlu ulaşımın hedeflendiği sistemlerdir.
5. Acil durum yönetim sistemleri; Şehir içi kavşak yapıları üzerinde oluşabilecek trafik kazası, yangın, doğal afet, öncelikli araç geçişi vb. öngörülemez olaylara bilgi ve iletişim teknolojileri vasıtasıyla anlık tepki vermek için geliştirilen sistemlerdir.
6. Elektronik ücret ödeme/toplama sistemleri; Zaman, yakıt tasarrufu, daha az trafik sıkışıklığı gibi amaçlar doğrultusunda sürücülerden gerek otoyollarda, gerekse şehir merkezindeki park noktalarında aldıkları hizmet karşılığında kamera, Rfid, akıllı kart vb. teknolojiler vasıtasıyla ücret kesen sistemlerdir.

Tezin bu bölümünde, büyük şehirlerdeki artan nüfus ve kentleşmeyle birlikte şehir içi ayrık ve koordineli kavşaklarındaki geçmişten-günümüze (hatta geleceğe) kadar en önemli sorunu olan araç trafiğini yönetebilmek için geliştirilen akıllı ulaşım sistemlerinin/trafik yönetim sistemlerinin mimari yapıları ve bu mimariler üzerindeki

veri çevrim modülleri hakkında bilgi verilmiştir. Tez çalışmamız içerisinde ayrık ve koordineli kavşak yapıları için önermiş olduğumuz SDN temelli VANET mimarileri, uluslararası kurum ve kuruluşlar tarafından önerilen bu AUS standartları ve çalışmalarına göre tasarlanmıştır. Tezin bu bölümünden sonra ise trafik yönetim sistemlerinin en önemli uygulama alanı olan trafik sinyalizasyonu hakkında bilgi verilecektir.

## **2.2. Trafik Sinyalizasyonu**

Akıllı ulaşım sistemlerinin en önemli alt modülü olan trafik yönetim sistemlerinin temel görevi şehir içindeki trafiği yönetmektir. Şehir içi kavşaklardaki araç trafiğini efektif ve dinamik bir şekilde yönetmenin en iyi yolu ise kavşak içlerinde bulunan trafik lambalarının sahadan gelen trafik verilerine göre sinyal optimizasyonun sağlanmasıdır.

İlk olarak 1868 yılında Londra’da, meclis üyelerinin geçiş önceliğinin sağlanması amacıyla Parlamento binasına bağlanan anayola konulan 7 metrelik bir demir kolon ile trafik sinyalizasyon uygulaması sağlanmıştır. Sadece kırmızı ve yeşil ışığın kullanıldığı bu uygulamada bir polis memuru daha önceden atanmış sürelerle göre kurmalı kol ile sinyalizasyonu yönetmekteydi. Daha sonra 1914 yılında ABD’nin Ohio Cleveland şehrinde yine yeşil ve kırmızı ışıklardan oluşan ilk elektrikli trafik sinyalizasyonu uygulamasına geçilmiştir [35,36]. Ülkemizde ise ilk trafik lambası 1928 yılında İstanbul’a konulmuştur [23,24].

### **2.2.1. Sinyalizasyon sistemleri**

Sinyalizasyon sistemleri kendi içlerinde kavşak yapıları ve günün belli saat dilimlerine göre faz düzenleri önceden ayarlanmış sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi ve kavşaktaki taşıt hacminde göre sinyalizasyonun ayarlandığı trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemleri olmak üzere genel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır.

### **2.2.1.1. Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri**

Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerinde, şehir içinde sinyalizasyon kavşaklarının faz çevrim süresi, yeşil ışık süreleri ve faz düzeni önceden belirlenmektedir. Bu yapılarda kavşakların yaklaşım kollarına periyodik olarak gelen taşıt hacimlerine göre sinyal süreleri belirlenip o şekilde çalıştırılır. Kavşaklardaki yaklaşım kollarının yeşil ışık önceliği ve yeşil ışık süreleri ilgili kavşaktaki taşıt hacmine göre belirlenir. Günümüzde birçok şehirde hem ayırık hem de koordineli kavşaklar üzerinde sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi uygulaması devam etmektedir [23,24,35].

### **2.2.1.2. Trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemleri**

Bu sistemlerde, ilgili kavşaktaki faz süreleri ve faz düzenleri sahadaki belli ekipmanlar vasıtasıyla yaklaşım kollarındaki taşıt yoğunlukları ve taleplerine bağlı olarak dinamik belirlenir. Bu sistemler de kendi içlerinde yarı uyarmalı, tam uyarmalı ve yaya uyarmalı olmak üzere 3'e ayrılır.

Bu sistemlerden yarı-trafik uyarmalı sistemlerde tüm kavşak yaklaşım kollarının sadece bir kısmı sinyalizasyon hesabına katılır. Genellikle “ana arter” diye adlandırılan yaklaşım kollarındaki sinyalizasyon işlemleri yapılır, tali ve cephe yollarının sinyalizasyonu ise sadece bir uyarı geldiği zaman yapılır. Tam-trafik uyarmalı sistemlerde ise ilgili kavşaktaki yaklaşım kollarının her birinden uyarı sinyalleri alınır. Bu uyarıya göre ilgili yaklaşım kolundaki sinyal süresi trafik yoğunluğuna göre tekrar düzenlenir. Yaya uyarmalı sinyalizasyon sistemler ise, yayaların kavşak içerisindeki taşıt hacimlerini veya anlık trafik ile ilgili bir durumunu trafik yönetim merkezine iletim kanalları vasıtasıyla aktarması neticesinde yapılan işlemlerden oluşmaktadır [37].

### **2.2.2. Sinyalizasyon terimleri ve hesapları**

Sinyalizasyon sistemlerinin tasarımında ve uygulamaya geçilmesinde farklı yöntemler olmasına karşın özellikle faz çevrimi, faz sürelerinin hesabı ve faz düzeni bulmada

kabul görmüş bazı yöntemler vardır. Bu yöntemlere geçmeden önce bu yöntemlerde kullanılan genel sinyalizasyon terimlerinden (Tablo 2.2.) bahsedilecektir.

Tablo 2.2. Trafik sinyalizasyon terimleri ve açıklamaları [37-40]

Sinyalizasyon Terimleri	Açıklamaları
1. Trafik şeridi	Kavşak içerisinde tek bir sıra taşıta ayrılan bölümü ifade eder.
2. Trafik hacmi	Bir yoldan/şeritten birim zaman içerisinde geçen taşıt sayısını ifade eder.
3. Aralık	Birbirlerini izleyen araçların bir noktadan geçerken aralarındaki süreyi ifade eder.
4. Boşluk	İki aracın arasındaki zaman veya mesafe cinsinden farkını ifade eder.
5. Gecikme	Bir taşıtın, bir kavşak içerisinde araç yoğunluğu, sinyalizasyon sistemleri ve kavşağın geometrik özelliklerinden dolayı kaybettiği süreyi ifade eder.
6. Kapasite	Herhangi yol veya şeritten birim zaman içerisinde geçebilecek araç sayısını ifade eder.
7. Trafik yoğunluğu	Herhangi bir zaman diliminde bir yol veya şerit üzerinde birim uzunluğundaki (1 km) araç sayısını ifade eder.
8. Yeşil dalga sistemi	Araçlara koordineli kavşaklarda, tavsiye edilen seyir hızında gitmeleri dâhilinde her kavşakta yeşil ışığı yakalayacakları durumunu ifade eder.
9. İzole sistem	Diğer sinyalizasyon sistemleri ile bağlantısı olmayan ayrı yapılarıdır.
10. Koordineli sistem	Aynı yol üzerindeki en az iki kavşağın birbirlerine bağlı olarak çalıştığı sistemlerdir.
11. Senkronize sistem	Koordineli kavşakların hepsinde aynı sinyalizasyon parametrelerinin çalışmasını ifade eder.
12. Ofset	Koordineli kavşaklar arasında aynı yöndeki yollardaki yeşil ışık süre başlangıçları arasındaki süreyi ifade eder.
13. Yeşil faz	Bir yönde hareket eden araçlara geçiş hakkının verildiği toplam süreyi ifade eder.
14. Çevrim/devre süresi	Tüm faz evrelerinin bir devreyi tamamlamaları süresini ifade eder.
15. Yeşiller arası süre	Bir sinyalizasyon sistemindeki, yeşil ışık süreleri arasındaki süreyi ifade eder.
16. Doygun akım	Kavşağın birim zaman içerisinde kapasite değerine ulaşması ve kuyruklanma oluşturması kavramıdır.

Sinyalizasyon sistemlerinde kullanılan literatürde kabul görmüş bazı devre/çevrim süresi bulma yöntemleri vardır. Literatürde kullanılan bu yöntemlerde devre hesabında farklılıklar olsa da genel olarak aşağıdaki sıralama izlenmektedir [37,38];

1. Faz sayısının belirlenmesi,
2. Sarı ve kırmızı sinyal sürelerinin seçilmesi,
3. Seçilen yöntemlere göre doymuş akım oranı, taşıt hacmi ve kapasite hesabı,

4. Öncelikli yol/yön belirlenmesi,
5. Çevrim ve faz süre hesabı,
6. Faz düzeni belirleme,
7. Gecikme ve kuyruk uzunluk hesabının yapılmasıdır.

### 2.2.2.1. İngiliz (Webster) eşitliği

Sinyalizasyon ile ilgili literatürde kabul görmüş ilk çalışma 1958 yılında Webster adında bir İngiliz araştırmacı tarafından önerilmiştir. Webster tarafından önerilen bu sinyalizasyon modelinde, kavşağa gelen trafik akımları bir bütün olarak değerlendirilmiş, aynı yöndeki akım oranı en yüksek seçilerek faz süresi hesaplanmaktadır. Yöntemde ilgili kavşak için faz ataması yapıldıktan sonra, o kavşaktaki tüm yaklaşım kolları için doygun akım oranları ve kapasite hesaplanır. Bu trafik akımlarından aynı yönde hareket edeceklerden en büyüğü seçilerek, en düşük ve en yüksek devre süreleri hesaplanır. Her bir yeşil faz süreleri ise devre süresinin yaklaşım kollarındaki trafik hacimlerinin oranlarına göre paylaşılmasıyla bulunur. Webster tarafından önerilen en düşük ve en yüksek çevrim/devre süre hesabı Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’de verilmiştir [37-39].

$$C_{min} = \frac{L}{1 - Y_t} \quad (2.1)$$

$$C_o = \frac{\emptyset L + 5}{1 - Y_t} \quad (2.2)$$

Bu formüllerde “C” ilgili kavşaktaki çevrim süresini, “L” devredeki toplam kayıp süreyi (sn), “ $\emptyset$ ” düzeltme katsayısını, “ $Y_t$ ” de toplam akım oranını ifade etmektedir.

### 2.2.2.2. Amerikan (HCM) yöntemi

Webster yönteminden farklı olarak HCM yönteminde çevrim hesabı 5 aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla şu şekildedir:

1. Giriş aşaması; kavşakla ilgili geometrik özellik (yaklaşım kolu sayısı, şerit sayısı, eğim vb.) bilgileri toplama işlemidir.
2. Hacim düzeltme aşaması; her şeridin kullanımına göre trafik hacimlerinin zirve saat faktörüne göre düzenlenmesi işlemidir.
3. Doygun akım hesabı aşaması; yaklaşım kolundaki trafik akımlarının çeşitli faktörlere göre düzeltilmesi işlemidir.
4. Kapasite belirleme/analiz aşaması; faz durumuna göre şeritlerdeki trafik akımlarının hesaplanarak, en yüksek olanın kritik akım seçilmesi ve çevrim süre hesabının buna göre yapılması işlemidir.
5. Hizmet servisi aşaması; kavşaktaki her bir yaklaşım kolundaki şeritler için ortalama gecikme süreleri hesaplanması işlemidir.

Bu yöntem için Amerikan Yol Araştırma Bölümünce (TRB), “Yolların Kapasitesi” isimli kitapta aşağıdaki (Denklem 2.3) formül önerilmiştir [37-38].

$$C = \frac{L \cdot X_c}{(X_c - \sum_{i=1}^n \left(\frac{V}{S}\right)_i)} \quad (2.3)$$

Bu formülde “C” ilgili kavşaktaki çevrim süresini ifade ederken, “L” devredeki toplam kayıp süreyi (sn), “X<sub>c</sub>” kavşaktaki hacim/kapasite oranını, “v” şerit için trafik hacmini, “s” şerit için doygun akım değerini ifade eder.

### 2.2.2.3. Avustralya (Akçelik) yöntemi

Akçelik yönteminde ise kavşaktaki her yaklaşım kolu için doygun akım değeri hesaplanmakta ve doygunluk derecesi belirlenmektedir. Her yaklaşım kolu için belirlenen doygunluk derecelerine göre kritik akım değerler hesaplanmakta, çevrim süre ve yeşil ışık süre hesabı yapılmaktadır. Genel olarak ise bu yöntemi 6 adımda inceleyebiliriz [37-39]:

1. Faz sayısının belirlenmesi;



2. Her akım için en düşük ve en yüksek yeşil süre, yeşiller arası sürelerinin hesaplanması,
3. Kavşaktaki her yaklaşım kolu için doygun akımların hesaplanması,
4. Doygun akımlara göre yaklaşım kollarının kritik akım değerlerinin belirlenmesi,
5. Bu kritik akım değerlerine göre çevrim süresi ve yeşil ışık süre hesabı,
6. Son işlem olarak ise yaklaşım kollarındaki trafik akımlarının doygun derecelerinin kontrolünün sağlanmasıdır.

Bu yöntemde kavşaklardaki çevrim süresi ve yeşil ışık süresi hesabı için kullanılan formüller Denklem 2.4 ve Denklem 2.5’de verilmiştir. Buna göre “ $C_p$ ” pratikteki çevrim süresini ifade ederken, “ $L$ ” toplam kayıp zamanı, “ $Y_t$ ” kavşak için toplam akımı, “ $k$ ” duruş katsayısını, “ $C_o$ ” ise optimum çevrim süresinin ifade etmektedir.

$$C_p = \frac{L}{1 - U} \quad (2.4)$$

$$C_o = \frac{(1.4 + k)L + 6}{1 - Y_t} \quad (2.5)$$

#### 2.2.2.4. Sinyalizasyon sistemlerinde kullanılan hesaplamalı teknikler

Günümüz sinyalizasyon sistemlerinde ise, değişken araç trafiği, kaza, hava durumu ve de yol bakım/çalışması gibi durumlardan dolayı çalışma yapıları bakımından artık sabit sinyal süresi ve faz düzeni atamaları yerine, sahadan gelecek trafik verilerine göre reaksiyon üretecek zeki sistemlere dayalı trafik uyarlamalı sinyalizasyon sistemleri tercih edilmeye başlanmıştır.

İlk olarak Mamdani ve Pappis’in (1977) bir izole kavşak sistemi üzerinde 2 yönlü araç trafiği için kuyruk uzunluğunu hesaba katan bir bulanık model ile araçların kavşak içerisindeki ortalama gecikme sürelerini sabit zamanlı sistemlere göre %10-12 arasında bir iyileştirme yaptığı çalışma literatürde sinyalizasyon hesabındaki ilk zeki

sistem uygulaması olarak kabul edilmektedir [16,17]. Her ne kadar hesaplamalı tekniklere dayalı bir çalışma da olsa günümüz şehir içi kavşak yapılarına uygunluk ve trafik ihtiyaçlarını karşılamaktan uzaktır. Günümüz çalışmalarında ise hibrid yapılar sinyalizasyon işlemlerinde daha çok tercih edilmektedir. Örneğin 2014 yılında Yunrui ve ark. tip-2 bulanık mantık ve diferansiyel denklem ile 11 kavşaklı bir ağ topolojisi üzerinde çalışma yapmışlardır [20]. Bu çalışmada Yunrui ve arkadaşları önerdikleri modele sadece araç trafik yoğunluk bilgisini ekleyip, kavşak içerisinde gelişebilecek çevresel etmen ve aktivite bilgilerini hesaba katmamışlardır. Bir başka çalışmada ise Li ve ark. 2016 yılında, sahadan elde ettikleri trafik bilgilerine göre derin sinir ağını reinforcement öğrenme için kullanmışlardır [21]. Wanjing ve arkadaşları ise şehir-içi izole kavşaklar için yaya fazları ve sinyal sürelerini sahadan gelen trafik verilerine göre genetik algoritma temelli sezgisel algoritma ile uygulamışlardır [22]. Yine bu iki çalışmada da bir önceki çalışmada olduğu üzere farklı hibrid modeller sadece kavşak içerisindeki taşıt trafik hacmine göre çalıştırılmış, gerek çevresel etmenler ve aktivite bilgileri olsun gerekse trafik yönetim sistemlerinin iletim altyapılarıyla ilgili bir bilgi sunulmamıştır.

Bu tez çalışmasında, akıllı ulaşım sistemlerinin iletim ve uygulama mimari yapılarındaki veri akışında karşılaşılan problemlere çözüm bulmak adına, yine bir AUS alt modülü olan şehir içi trafik yönetim sistemleri için uluslararası standartlar ve ülkemizdeki akıllı ulaşım eylem planları hedefleri doğrultusunda günümüz bilişim teknolojileri ve ağ paradigmlarına dayalı bir mimari önerisinde bulunulmuştur. Önerilen mimarinin, günümüz trafik yönetim sistemlerin değişken trafik ve ağ senaryoları altında işlevselliği ve uygunluğunu ölçebilmek için trafik yönetim sistemlerinin en önemli uygulaması olan trafik sinyalizasyonu üzerine de uygulamalar geliştirilmiştir. Tezin bu bölümünden sonra, önerilen mimaride kullanılan araçsal ağlar ve yazılım tanımlı ağ paradigmlarından bahsedilecektir.

### **2.3. Araçsal Ağlar (Vehicular Ad Hoc Networks-VANET)**

Son zamanlarda araç endüstrisi ve kablosuz iletişim teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte özellikle araçlarla, sürücülerle, yolcularla ve yayalarla ilgili trafik

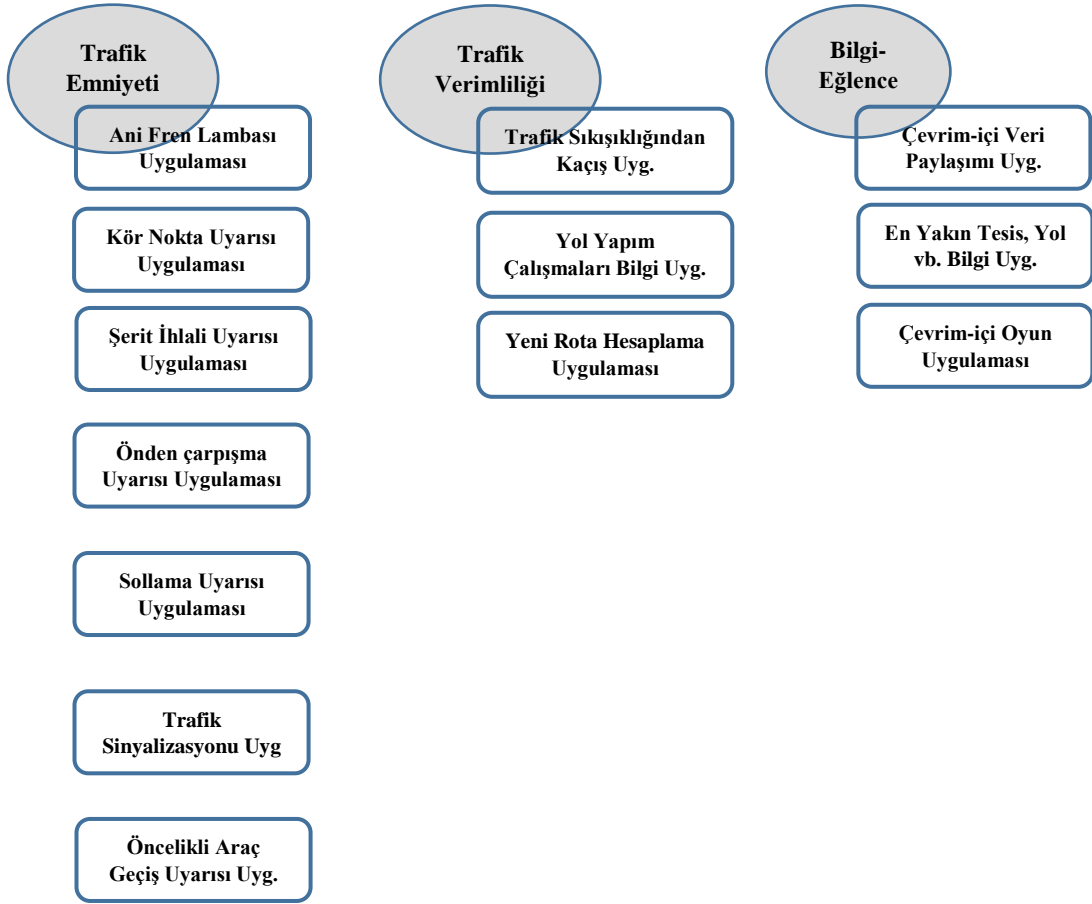
uygulamalarını gerçeklemek için araçların birbirleri arasında iletişim sağladığı, Mobil tasarsız ağların bir alt kümesi olan araçsal ağ sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Şehir içi trafikte araçların kendi aralarındaki ve yol kenarı üniteleri olan iletişimlerdeki servis kalitesini sağlayabilmek adına MANET mimarisi yerine hızlı ağ topoloji değişikliklerine adapte olabilen, çoklu veya tekli atlama iletimini destekleyen, yüksek veri hızları sağlayan ve de farklı trafik uygulamalarına çözüm getiren araçsal ağlar tercih edilmektedir [41-43].

### 2.3.1. Araçsal ağlar uygulama alanları

Araçsal ağlar, akıllı ulaşım sistemlerinin uluslararası standartlar ve direktifler ile belirlediği amaç ve hedefler kapsamında 3 ana uygulama başlığı içerisinde incelenebilir:

1. Emniyet (traffic safety) uygulamaları: Araçlar arası iletişimde üzerinde en fazla çalışma yapılan, trafik kazalarının olma ihtimalini, dolayısıyla yaralanma ve ölüm oranını azaltmayı hedefleyen uygulamalarla ilgilenmektedir. Trafik sinyali ihlal uyarısı, çarpışma riski uyarısı, şerit değiştirme yardımı / uyarısı, çarpışma öncesi algılama / uyarı, vb. uygulamalar bu sınıftaki uygulamalara örnek olarak verilebilir [41,42].
2. Trafik verimliliği (traffic efficiency) uygulamaları: Bu uygulama sınıfı yerel bilgi, haritalar ve zamana ve yere göre tanımlanmış mesajlara bağlı olarak aracın trafik akışı, trafik koordinasyonu ve trafik yardımını geliştirmeye odaklanan uygulamaları kapsamaktadır. Hız yönetim uygulamaları ve navigasyona dayalı uygulamalar, bu sınıf içindeki uygulamalara örnek olarak verilebilir [41,43].
3. Bilgi-Eğlence (infotainment) uygulamaları: Bilgi-Eğlence (Infotainment) uygulamaları sürücü ve yolculara kolaylık ve konfor sunar. Bu maksatla eğlence ve faydalı mesajları sunan tüm mesaj türlerini destekleme noktasında bir uygulama kapsamına sahiptir[42].

Genel olarak araçsal ağlardaki bu uygulama alanlarını literatürde ve pratikteki akıllı ulaşım sistemi uygulamalarıyla ilişkilendirmek için Şekil 2.2.'deki sınıflandırma ağacı hazırlanmıştır.



Şekil 2.2. Araçsal ağlar uygulama alanları sınıflandırması

### 2.3.2. Araçsal ağlar iletişim karakteristiği ve mimari yapıları

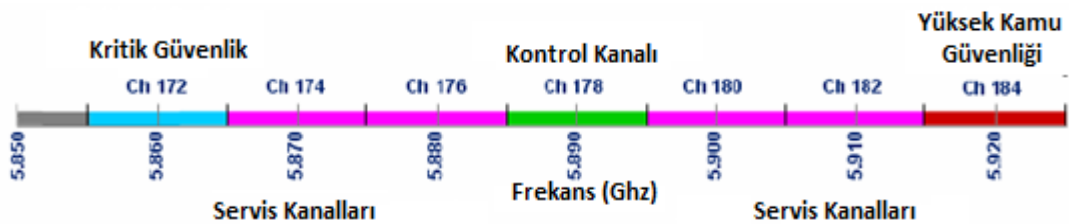
Araçsal ağlar araç içi ve araç dışı olmak üzere iki farklı iletişim sistemini desteklemektedir. Günümüz araç yapıları çok çeşitli istekleri ve fonksiyonları iletişim teknolojileri vasıtasıyla sağlayan kompleks dağıtık bilgisayar sistemleri haline gelmiştir. Kompleks olan bu yapının içerisinde şasi, güç aktarma, emniyet, gövde ve konfor elektroniği gibi farklı kontrol ve iletişim karakteristiklerine sahip alt sistemler bulunmaktadır. Bu alt sistemlerin iletişim (araç-içi) gereksinimlerini karşılayabilmek

için araç içerisinde CAN, LIN, FlexRay ve MOST gibi birden fazla veri yolu sistemi kullanılabilir [41-46].

Diğer taraftan bu alt sistemlerdeki teknolojik gelişmeler devam ederken, araçsal ağların yukarıda bahsedilen uygulama alanları kapsamında araçların kendi aralarında, yol kenarı birimiyle veya bulut sistemlerle olan iletişimlerinin de sağlanması gerekmektedir. Bu sistemleri hayata geçirmek için de WAVE, CALM ve C2CNet eş düzey araç ağ (VANET-Vehicular Ad Hoc Networks) mimarileri geliştirilmiştir. Bu mimariler emniyet, trafik verimliliği ve bilgi-eğlence uygulamalarını gerçekleştirmek için katmanlı mimariye göre özellikle 3, 4, 5, 6 ve 7.katmanlarda farklı protokol önerileri geliştirmelerine rağmen 1. ve 2. katman içerisinde 5.9 GHz bandında çalışan 802.11p protokolü üzerinde anlaşmışlardır.

Araçsal ağlardaki araç dışı iletişimlerde 5.9 Ghz bandında 75 mhzlik bantgenişliğine sahip her biri 6-27 mbps'lik veri hızı sağlayan toplam 7 kanaldan oluşan DSRC standartlarına dayalı iletişim kullanılır.

Bu 7 kanaldan 6 tanesi servis kanalıdır. Bu kanallar üzerinde akıllı ulaşım sistemler uygulamalarından trafik verimliliği ve bilgi-eğlence uygulamaları için ayrılmışken, 1 kanal ise trafik emniyeti uygulamaları için kontrol kanalı olarak tahsis edilmiştir. Şekil 2.3.'de kanal dağılımı, Tablo 2.3.'de ise bölgelere göre DSRC standardı teknik özellikleri verilmiştir [41-46].



Şekil 2.3. DSRC kanal dağılımı

Tablo 2.3. Bölgelere göre DSRC standardı teknik özellikleri

Özellikler	Japan (ARIB)	EUROPE (CEN)	USA (ASTM)
İletişim	Half-duplex(OBU) Full-duplex(RSU)	Half-duplex	Half-duplex
Radyo frekansı	5.8ghz	5.8ghz	5.9ghz
Bantgenişliği	80mhz	20mhz	75mhz
Kanal	7 downlink-7 uplink	4	7
Veri hızı	1-4 mbps	250kbps	6-27mbps
Kapsam alanı	30m	15-20m	1000m
Modülasyon	2-ASK, 4-PSK	RSU:2-ASK OBU:2-PSK	OFDM

4 tip araçsal ağ iletişim modu mevcuttur. Bunlar sırasıyla, araç içi iletişim, araç-arac arası iletişim, araç yol kenarı birimi iletişimi, araç-bulut iletişimidir. Araçsal ağların iletişim modlarının, uygulama alanlarına göre sınıflandırılması Şekil 2.4.'de verilmiştir.



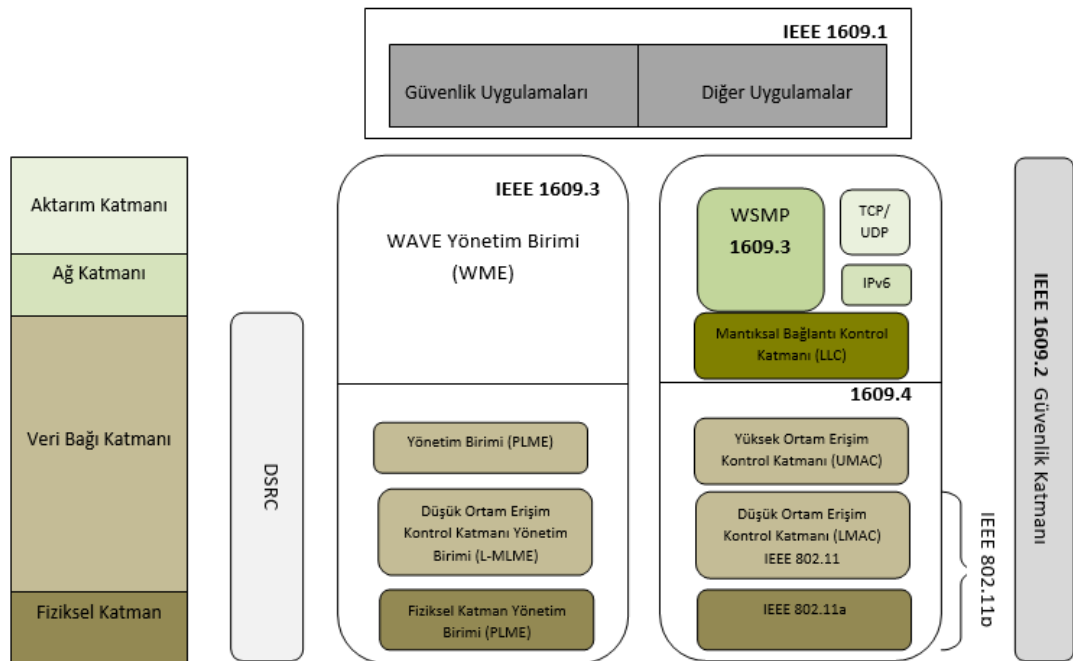
Şekil 2.4. Araçsal ağlar uygulama alanı sınıflandırması

Araçsal ağlar, iletişim ve uygulama altyapıları için geliştirilen WAVE, CALM ve C2CNet mimari yapılarını desteklemektedirler. Bu mimari yapılar trafik emniyeti,

trafik verimliliği ve bilgi-eğelence uygulamaları gerçeklemek için OSI referans modelinin özellikle 3, 4, 5, 6 ve 7.katmanlarda farklı protokol önerileri geliştirmelerine rağmen 1. ve 2. katman içerisinde 5.9 GHz bandında çalışan 802.11p protokolü üzerinde anlaşmışlardır [41-43].

### 2.3.2.1. WAVE mimarisi

WAVE mimarisi araçsal ağlar temelli akıllı ulaşım sistemleri projesi olarak Amerika tarafından 2004 yılında başlatılmış bir çalışmadır. IEEE 1609 protokol kümesinden oluşan WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) mimarisi, fiziksel katmanında, kodlama oranı ve modülasyon tipine göre belirlenen farklı veri oranlarını destekleyebilen OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) mekanizmalı IEEE 802.11a'nın değişik bir çeşidi olan 802.11p'den oluşmaktadır. Şekil 2.5.'de WAVE mimarisinin OSI referans modelindeki karşılığı gösterilmiştir [41,42].



Şekil 2.5. WAVE mimarisi katmanlı yapısı

Fiziksel katman, veri bağı katmanı, ağ katmanı ve aktarım katmanından oluşan mimari yapısında her bir katman için IEEE 1609 protokol kümesinde bir protocol

tanımlanmıştır. Protokollerin hangi katmanda ne iş yaptıkları Tablo 2.4.'de gösterilmiştir.

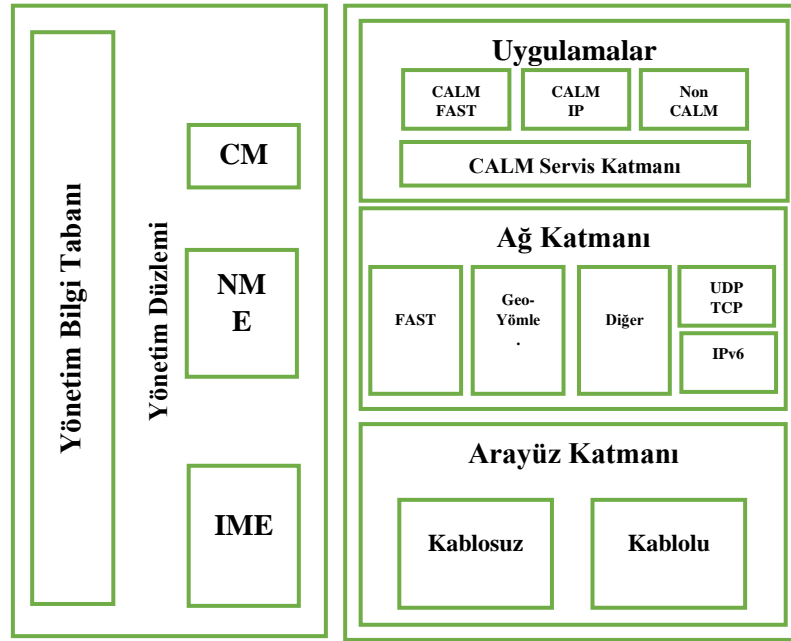
Tablo 2.4. WAVE mimarisi protokol yığını ve açıklamaları

WAVE Standardı	Kullanım Alanı	Tanım
IEEE P1609.0	Mimari	Mimariyi tanımlar.
IEEE P1609.2	Uygulamalar ve Yönetim Mesajları için Güvenlik Hizmetleri	Güvenlik ile ilgili işlemleri tanımlar.
IEEE 1609.3-2010	Ağ Hizmetleri	Üst katman iletişim yığınlarını (TCP/IP) destekleyen standart mesajları tanımlar.
IEEE 1609.4-2010	Çoklu-kanal İşlemleri	5.9Ghz'deki DSRC uygulamaları için çeşitli mesaj formatlarını tanımlar.
IEEE P1609.5	İletişim Yöneticisi	Araç ve yol arasındaki veya araçlar arasındaki kablosuz bağlantı iletişim hizmetlerini tanımlar.
IEEE 1609.11-2010	Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol	OBU ve RSU'ların temel teknik özelliklerini tanımlar.
IEEE P1609.12	Tanımlayıcı Bölüştürme	WAVE tanımlayıcılarını özelleştirir.

### 2.3.2.2. CALM mimarisi

CALM mimarisi araç-araç, araç-yol kenarı ünitesi ve araç-diğer arayüzler ile iletişimi sağlamak amacıyla ISO tarafından önerilen bir araçsal ağ mimari yapısıdır. CALM mimarisi, birer Avrupa konsorsiyumu akıllı ulaşım sistemi uygulaması olan COOPERS ve SAFESPOT projelerinden türetilmiştir. Uygulama, Ağ ve Arayüz katmanı olmak üzere 3 katmanlı yapıya sahip olan CALM mimarisi, WAVE mimarisinde olduğu gibi 5.9 ghz bandında DSRC standartlarını kullanmaktadır. Kısa mesafeli iletişim için kızılötesi iletişimi destekleyen CALM mimarisi, uzun mesafeli iletişim için arayüz katmanında GSM ve UTMS teknolojilerini de desteklemektedir [41-44].





Şekil 2.6. CALM mimarisi katmanlı yapısı

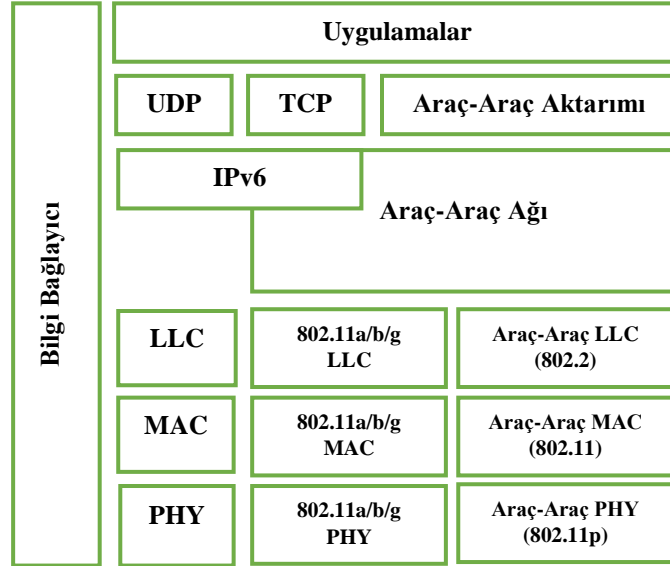
Şekil 2.6.'daki CALM mimarisinde iletişim ve bilgi tabanlı teknolojik gelişmelere uyum sağlanabilmesi için bir yönetim birimi (CCME) tanımlanmıştır. Bu birim 3 temel bileşenden oluşmaktadır:

1. CALM arayüz yöneticisi; kanal kalitesiyle birlikte karar vermede yardımcı olan her iletişim arayüzünün durumunu görüntülemek ve kaydeder.
2. CALM ağ yöneticisi; Alternatif ortamlara aktarım işlemlerini yönetir.
3. CALM uygulama yöneticisi; uygulama iletim gereksinimlerini yönetir. Uygun ortamlar hakkında bilgi almak için iletişim arayüzleriyle etkileşim halindedir, ağ yöneticisine bağlantı kurması için komut gönderir.

### 2.3.2.3. C2CNet mimarisi

Araç-araç konsorsiyumu, açık kaynaklı bir Avrupa endüstri standardı oluşturmak ve aktif trafik emniyet uygulamaları geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda Avrupa araç endüstrisi tarafından oluşturulan C2CNet mimarisi, IP protokolünden farklı olarak C2CNet protokolünü tanımlamıştır. Bu protocol hem güvenlik hem de güvenlik temelli olmayan uygulamaları desteklemek için tasarlanmıştır. Yönlendirme için

konum temelli algoritmalar kullanılan bu mimari yapısı, 5.9 ghz bandında güvenlik uygulamaları için 30 mhzlik bir bant genişliği kullanmaktadır. Ağ katmanı, coğrafi adresleme ve yönlendirme temelli çoklu atlama iletişimini desteklemektedir [42-44].



Şekil 2.7. C2CNet mimarisi katmanlı yapısı

Şekil 2.7.'deki C2CNet mimarisinin genel özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Araç-araç, araç-altyapı iletişimlerinde hızlı veri iletişimi
2. Güvenlik mesajları ve bilgi-eğlence dahil olmak üzere farklı tipteki mesajların iletilmesi için destek.
3. Kısa mesafeli kablosuz LAN teknolojileri için IEEE 802.11p, geleneksel kablosuz LAN teknolojileri (IEEE 802.11a/b/g/n) ve uzun mesafeli iletişim için radio teknolojileri (UMTS ve GPRS) desteği sağlamaktadır.

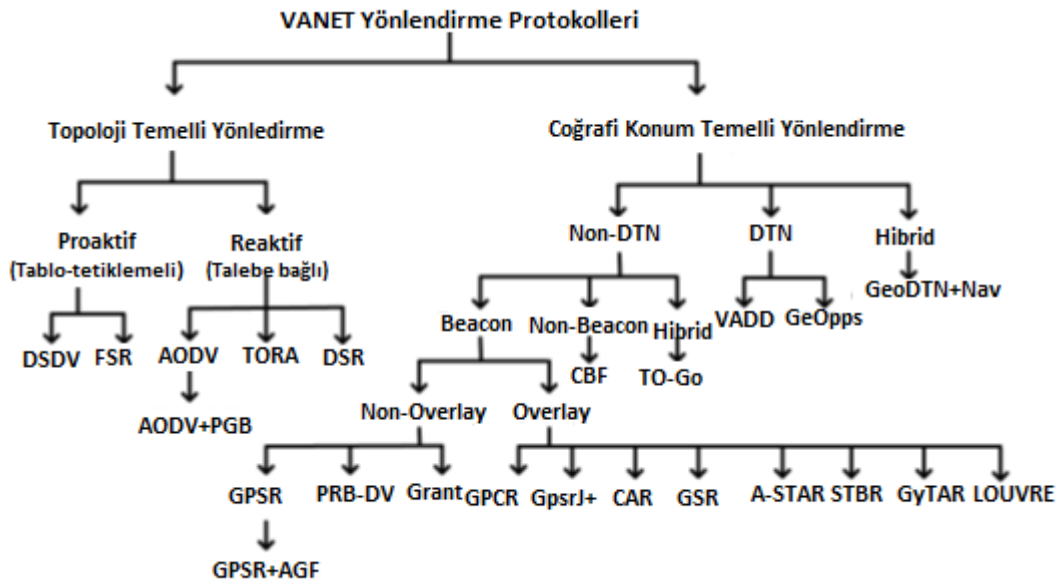
Araçsal ağlar için önerilen bu mimarilerin uygulama, iletişim, yönlendirme, teknoloji temelli olarak karşılaştırmaları Tablo 2.5.'de verilmiştir. Bu tez çalışmasında da sahadaki araçların kendi aralarında ve yol kenarı ünitesi ile olan iletişimlerinde özellikle kısa mesafe iletişiminde diğer mimarilere göre daha fazla avantaj sağlayan Wave mimarisi tercih edilmiştir.

Tablo 2.5. Araçsal ağ mimarilerinin karşılaştırma tablosu

Parametre/ Protokol Yığınları	C2CNet	CALM	WAVE
Üretici	Araç-araç konsorsiyumu	ISO	ABD
Özellik	Çoklu atlama ve coğrafi yönlendirme	Çoklu iletim ortamı desteği (802.11p, DSRC, W-LAN)	Mac katmanında acil mesajlar için sadece 802.11p
Uygulama Tipi	Trafik Emniyeti	Trafik Verimliliği ve Bilgi-eğlence	Trafik Emniyeti
Adresleme	Coğrafi yönlendirme	IP adresleme	IP adresleme
Yönlendirme	Mac Protokolü+IPv6	Mobile IPv6	Farklı kanal ayrımı+IPv6
Atlama sayısı	Tekli & Çoklu Atlama	Tekli Atlama	Tekli Atlama
İletişim Modu	Uni-cast, broadcast, geo-unicast, geo-broadcast	Uni-cast, broadcast	Uni-cast
Simülasyon	Ticari	Ticari	Açık kaynak kodlu

### 2.3.3. Araçsal ağlar yönlendirme protokolleri

Araçsal ağlardaki yönlendirme konusu son bir kaç yıldır gerek akademik gerekse araç endüstrisinde önem kazanmıştır. Araçsal ağlar, tasarsız ağların özel bir alt sınıfı olduklarından, önceleri araçsal ağlar için MANET ağlarda kullanılan yönlendirme algoritmaları tercih edilmiştir. Tasarsız ağlardaki yönlendirme protokollerinin temel görevleri arasında iletişim kurulacak birimler arasında bağlantı kurulumu, yönlendirme kararının verilmesi ve olası hata durumlarına karşı kurtarma mekanizması içerme yer alır. Yapılan araştırmalar ve testlerden sonra, özellikle hızlı ağ topoloji değişikliği, yüksek bant genişliği ihtiyacı, bağlantı kopmaları, araç yoğunluğu gibi sebeplerden dolayı adres ve topoloji temelli yönlendirme algoritmalarının VANET ağları için yetersiz olduğu görülmüştür. Araçsal ağlarda karşılaşılan bu problemleri çözebilmek için literatürde uzaklık temelli, konum temelli, kümeleme yöntemi gibi farklı çözümler sunulmuştur. Şekil 2.8.'de literatürde araçsal ağlarda kullanılan yönlendirme algoritmalarının sınıflandırma ağacı verilmiştir [42].



Şekil 2.8. Literatürdeki araçsal ağlar yönlendirme protokolleri sınıflandırma ağacı

### 2.3.3.1. Topoloji temelli yönlendirme protokolleri

Bu yönlendirme protokolleri packet iletimini sağlamak için ağdaki bağlantı bilgilerini kullanır. Proaktif (tablo-driven) ve reaktif (talebe dayalı) olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Proaktif yönlendirmedeki en belirgin özellik, bir sonraki atlama noktası gibi yönlendirme bilgileri, iletişim isteklerine bakılmadan uygulanır. Kontrol paketleri, sürekli düğümler arasında bağlantı kurulumu bilgisi için broadcast olarak gönderilir. Böylelikle her düğümde kendi komşuluk bilgileri ve mevcut hedef bilgisi tutulur. Proaktif yönlendirmenin en büyük avantajı kaynak ve hedef arasında gereksiz yön keşfi bulunmamasıdır. Gerçek zamanlı uygulamalar için düşük gecikme süresi sağlamadaki iyi özelliğine rağmen, kullanılmayan yolların bakımı, özellikle yüksek mobilitelere sahip VANET'lerde mevcut bant genişliğinin önemli bir bölümünü kullanır [42,45].

Reaktif yönlendirmede ise, bir düğüm başka bir düğüm ile iletişime geçeceği zaman bir yol/bağlantı kurulumu yapılır. Sadece o anda iletişim halindeki düğümlerin yol bilgileri tutulur, bu da bantgenişliğini efektif kullanmayı sağlar. Yol kurulumunda

İstek paketleri kullanılır. Bu yönlendirme tipine en güzel örnek AODV ve DSR protokolleridir. AODV yönlendirme protokolünde, bir yayın isteği alınması neticesinde, düğümler yayını gönderen düğümün adresini kendi yönlendirme tablolarına kaydederler. Bir önceki atlama noktasının kaydı işlemine “geriye öğrenme” denir. Hedefe varıldığında, “geriye öğrenme” methodundan öğrenilen bilgilerle kaynağa kadar tüm ağ üzerinden cevap paketi döndürülür. Her düğüm kendinden önceki atlama noktasını kaydeder, böylelikle “yönlendirme yolu” oluşturulmuş olur. İstek seli ve cevap paketi full-duplex bir bağlantı sunar. DSR yönlendirme protokolünde ise, kaynak yönlendirme kullanılır. Kaynak yönlendirme, yönlendirme yolu üzerindeki orta düğümlerin sırasını dikkate alır. İstek paket kendi ID’sini uğramış olduğu ortadaki düğümlere kopyalar. DSR, düşük mobilitiye sahip ağ topolojilerinde avantajlı bir yönlendirme sunar [42-47].

### **2.3.3.2. Coğrafi konum temelli yönlendirme protokolleri**

Coğrafi (konum) temelli yönlendirmede, yönlendirme kararı paketin hedefindeki ve düğümlerin tek-atlama komşularından olan bir düğüm tarafından verilir. Hedef bilgisi, kaynak tarafından paketin başlığına eklenir. Düğümün kendisine tek-atlamalı komşuları kendilerine periyodik olarak gönderilen beacon sinyalleri vasıtasıyla düğümün konumunu elde ederler. Coğrafi yönlendirmede, her düğümün kendi konum bilgisini bildiği kabul edilir ve alıcı düğümlerin konum bilgilerinin GPS ile elde edildiği kabul edilir. Genel olarak coğrafi yönlendirme protokolleri gecikme toleransız ağlar (non-delay tolerant network-non DTN), gecikme toleranslı ağlar (DTN) ve hybrid olmak üzere 3 kategoriye ayrılır.

Gecikme toleransız ağlarda, temel prensip düğümün hedefe en yakın komşusuna paketi gönderdiği “greedy” yaklaşımıdır. Eğer hedefe yakın komşusu yoksa, çalışma yapısı hataya düşer, böyle durumlarda paket yerel maksimum seviyeye ulaştı olarak nitelendirilir. Bu çalışma yapısına en iyi örnek GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) yönlendirme protokolüdür. Bu protokolde, kaynak düğüm hedef düğümüne coğrafi olarak en yakın orta komşuya paketini yollar [42-47].

Gecikme toleranslı ağlar ise yüksek mobilitiye sahip ağlar (yani araçsal ağlar) için tasarlanmış yönlendirme protokolleridir. Bu yönlendirme protokollerinin en büyük handikapı sık bağlantı kopmalarıdır. Bu problemi ortadan kaldırmak için, paket tesliminde düğümlere, diğer düğümler ile bağlantıları olmadığı zaman paketleri depolama, başak düğümlerle karşılaşana kadar paketi üzerinde taşıma, bazı metriklere göre paketi komşu düğüme yönlendirme yetkileri verilir.

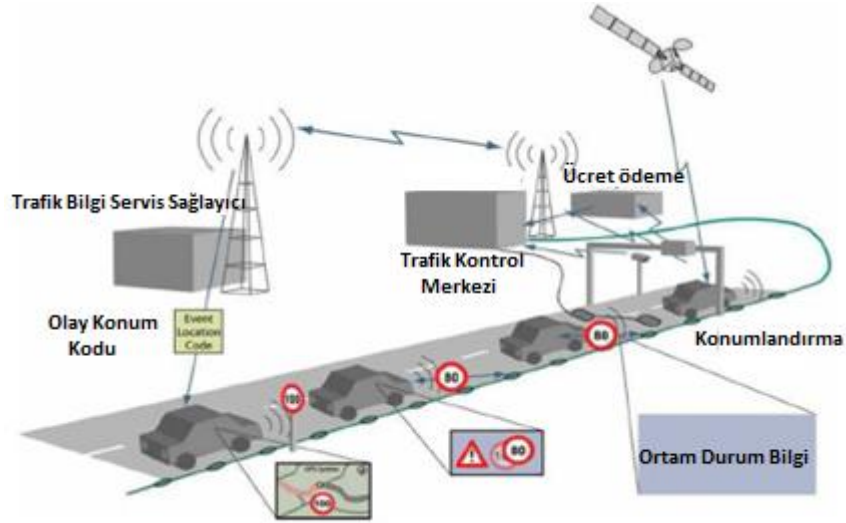
#### **2.3.4. Araçsal ağların akıllı ulaşım sistemlerinde uygulaması**

Son zamanlarda araçlardaki teknolojik ve bilgi tabanlı gelişimlerden sonra ortaya çıkan araçsal ağlar kavramı, akıllı ulaşım sistemlerinin tematik çalışma konuları olan trafik emniyeti, trafik verimliliği ve bilgi-eğlence uygulamalarında başta trafik yönetimi, yolcu bilgilendirme sistemleri olmak üzere birçok AUS uygulaması için iletim ve uygulama altyapısı sağlamaktadır. Araçsal ağların, akıllı ulaşım sistemleri ile entegrasyonu açısından uluslararası birçok proje bulunmaktadır. Aşağıda bu projelerden bazıları ile ilgili bilgi akışı sağlanacaktır.

##### **2.3.4.1. Avrupa’da yapılan araçsal ağ temelli AUS projeleri**

Avrupa’da, kamu kurum ve kuruluşların, üniversitelerin, sanayinin ortak katılımıyla oluşturulmuş birçok araçsal ağ temelli AUS projeleri tamamlanmış, bazı projeler ise devam etmektedir.

COOPERS projesi, 6. Avrupa Komisyonu Programı kapsamında bir proje çağırısı neticesinde 2006 yılında başlamış 4 yıl süren bir AUS uygulamasıdır (Şekil 2.9.). Projenin amacı, bir otoyol bölümündeki altyapı ve motorlu taşıtlar arasında doğrudan ve güncel trafik bilgisi iletişimiyle yol güvenliğinin artırılmasıdır. Toplam bütçesi 16 milyon Euroyu geçen bu proje, doğrulama ve test aşamalarından sonra Fransa, Hollanda ve Almanya karayollarının belli kısımlarında kullanılmaktadır [25,27,41].



Şekil 2.9. COOPERS projesi mimari gösterimi

CVIS projesi ise yine 2006 yılında başlayan, araçlara kendi aralarında ve yol kenarı birimleri ile iletişim kurmalarını sağlayabilmeleri için gerekli teknolojik altyapı ve mimariyi tasarlayan, geliştiren ve test eden büyük bir araştırma ve geliştirme projesidir. Birçok akademik çalışmaya rehber olan bu projede, sürücüler trafik yönetim sistemiyle direk olarak etkileşimde bulunabilmekte ve hedeflerine en kısa yol bilgisini elde edebilmektedirler. Genel olarak ise CVIS projesinin amaçlarını [25,27];

1. Tüm araçların ve altyapı öğelerinin çeşitli ortamlar kullanarak ve gelişmiş yerleştirme ile birbirleriyle sürekli ve şeffaf bir şekilde iletişim kurmasına olanak veren birleşik bir teknik çözüm oluşturmak,
2. Araç ve yol ekipmanlarında açık bir uygulama çerçevesinde çalışabilmek için çok çeşitli potansiyel kooperatif hizmetlerinin sağlanması,
3. Bir dizi kooperatif sistem uygulaması için açık bir mimari ve sistem konseptini tanımlamak ve doğrulamak ve sürücüler, operatörler, endüstri ve diğer kilit paydaşlar için gerçek hayat uygulamaları ve hizmetlerinde işbirliği modellerini desteklemek için ortak çekirdek bileşenler geliştirmek,
4. Kullanıcı kabulü, veri gizliliği ve güvenliği, sistem açıklığı ve birlikte çalışabilirlik, risk ve sorumluluk, kamu politikası ihtiyaçları, maliyet / fayda ve iş modelleri ve uygulama için uygulama planları gibi sorunları ele almak,

şeklinde sıralayabiliriz. Toplam 4 yıl süren 62 partnerli CVIS projesinin (Şekil 2.10.) toplam maliyeti 41 milyon euro'dur.



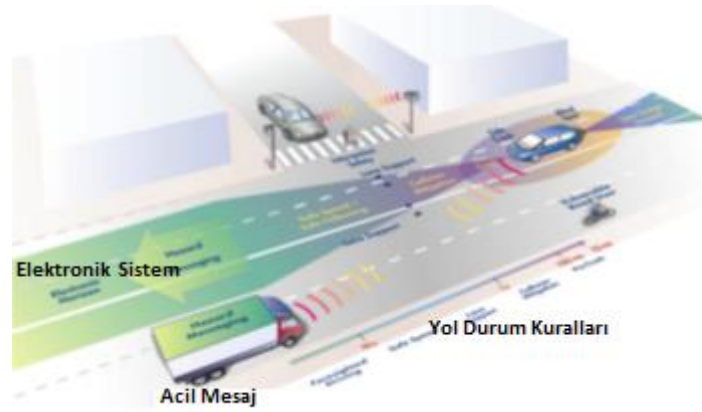
Şekil 2.10. CVIS projesi mimari gösterimi

PREVENT projesi, Avrupa otomotiv endüstrisi konsorsiyumu tarafından trafik emniyeti uygulamalarının geliştirilerek yol güvenliğinin artırılması amacıyla 2010 yılında başlatılan bir projedir (Şekil 2.11.). Önleyici güvenlik uygulamaları, sürücünün durumunu göz önünde bulundurarak, tehlikenin niteliğini ve önemini algılayan araç içi sistemleri kullanarak sürücülerin bir kazayı önlemesine veya azaltmasına yardımcı olur. Projenin ana amaçlarını [25-28];

1. Kaza oranlarını %50 oranında azaltarak yol emniyetine katkıda bulunmak,
2. Avrupa otomotiv endüstrisinin bu konularda çalışmasını teşvik etmek,
3. Avrupa ve ulusal kuruluşların toplanması ve işbirliği ile karayolu taşımacılığı güvenliği girişimlerinin artırılması ve geliştirilmesi,
4. Sürücü yardımı için araç üstü sistemlere entegre edilmiş gelişmiş sensör, iletişim ve konumlandırma teknolojilerini kullanarak önleyici güvenlik uygulamalarını geliştirir, gösterir, test edilip, değerlendirilmesi,
5. Önleyici / aktif güvenlik için artan kullanıcı taleplerine yol açan aktif güvenlik yaklaşımı (yol haritaları, sistemler, altyapı dahil ortak mimari, maliyet verimliliği ve potansiyel kullanıcılara faydalar) hakkında daha fazla farkındalık yaratmak,

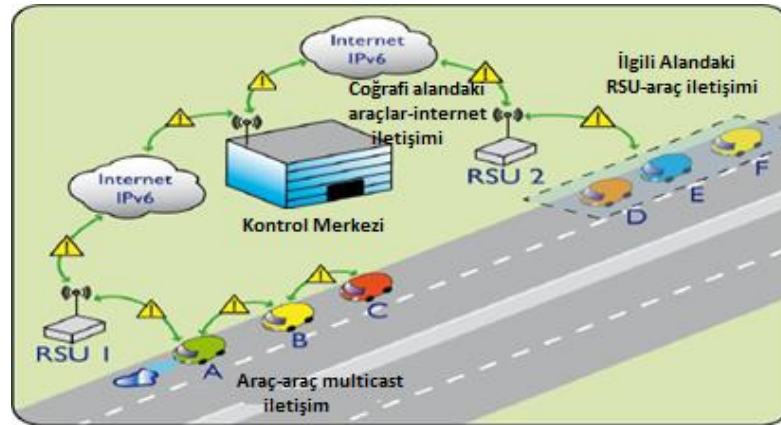
şeklinde sıralayabiliriz.





Şekil 2.11. PReVENT projesi mimari gösterimi

Son olarak GeoNet projesi ise, 2008 yılında başlatılmış 4 yıl süren, ana amacı bilgileri belirlenmiş bir hedef alandaki düğümlere dağıtan bir ağ oluşturma mekanizması olan coğrafi adresleme ve yönlendirmeye dayanmakta olan bir projedir (Şekil 2.12.). Bu projede, yeni bir yönlendirme protokolü geliştirilmiş, her araç bir bölgeyi hedef alandan ayrıran kadar çoklu atlamalar üzerinden bilginin yayılmasından sorumludur. Her araç yeniden aktarımın gerekip gerekmediğini değerlendirir ve gerekirse uygun zamanlama ile gerçekleştirir. Bu proje, verilerin açık coğrafi alanlara aktarılmasını gerektiren yeni uygulamaların geliştirilmesine örnek bir çalışmadır [25-28].



Şekil 2.12. GeoNET projesi mimari gösterimi

### 2.3.4.2. Amerika’da yapılan araçsal ağ temelli AUS projeleri

Amerika’da yapılan araçsal ağlar temelli akıllı ulaşım sistem uygulamalarından ilki “Akıllı araç girişim” projesi olan IVI’dir. Bu projenin ana amacı, sürücülere sürüş esnasında olası kazaları önlemeleri ve tehlikelerden kaçınmaları için yardımcı olacak teknoloji üretmektir. 1998 yılında başlayan IVI projesi yaklaşık 6 yıl sürmüştür.

Amerika’da geliştirilen “Otoyol Trafik Güvenliği Yönetimi” liderliğindeki bir başka proje olan VSC projesinde ise konumlandırma sistemleri ile birlikte DSRC kullanımıyla daha önce belirlenen kritik güvenlik senaryolarının nasıl geliştirilebileceğini değerlendirilmekte, bu DSRC sistemi ile birlikte çalışan araç güvenliği uygulamaları için minimum sistem gereksinimini ve ilgili performans parametreleri belirlenmektedir. Seçilen haberleşme tabanlı araç güvenlik sistemleri için dağıtım modelleri uygulanmaktadır. Bu projenin akabinde tezin önceki bölümlerinde detaylı bir şekilde anlatılan bir araçsal ağ mimarisi olan WAVE projesi başlatılmıştır [23,27,28].

### 2.3.4.3. Japonya’da yapılan araçsal ağ temelli AUS projeleri

Otomobil Trafik ve Sürüş için Elektronik Teknolojisi Derneği (JSK), seksenlerin başında Japonya’daki, akıllı ulaşım sistemleri alanındaki araştırmaların başlatıcısı olarak kabul edilir. Japonya’da bilinen projelerin en büyüğü birkaç dönemlik periyodlar içerisinde gerçekleştirilen “İleri trafik emniyeti araç programı” isimli ASV projesidir. Japonya Ulaştırma Bakanlığı, araç üreticileri (Honda, Mitsubishi, Suzuki ve Toyota), akademik ve araştırma merkezleri tarafından desteklenen bu projede trafik emniyeti aktif ve pasif olmak üzere iki yaklaşım ön plana çıkmaktadır. Aktif emniyet yaklaşımında, dikkatsizlik ve sürücü hatalarını gideren sistemler test edilmiştir. Bu testler özellikle dikkat dağınıklığı uyarı sistemleri, görüntü geliştirme sistemleri, navigasyon sistemleri, otomatik çarpışma önleme sistemleri ve şerit kalkış sistemleri ile ilgilidir. Pasif emniyet yaklaşımında ise, darbe emme sistemleri, yolcu koruma sistemleri, yaya koruma sistemleri ve kapı kilit algılama sistemleriyle ilgili testler yapılmıştır.

Japonya’da yapılan bir başka araçsal ağ temelli AUS projesi ise JARI (Japon Araç Araştırma Enstitüsü) tarafından desteklenen DEMO 2000’dir. Bu projede, işbirliğine dayalı bir sürücü yardım sistemi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Araç içi iletişim için gerekli olan fizibilite ve teknolojileri değerlendirildikten sonra, 5.8 GHz bandında çalışan Atanmış Omni Amaçlı Araçlar Arası Bağlantı Protokolü geliştirilmiş, Dijital Hücrel Radyo İletişimi ve Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (CSMA) orta erişim kontrol protokolleri ile birlikte kullanılmıştır. Projenin test aşamalarında kullanılan her araç uzaklık ve engelleri belirlemek için lazer radarla, araçlar arası iletişimi görüntülemek içinde özel bir likit kristal bir göstergeyle donatılmıştır [28-30].

Bu tez çalışmasında, akıllı ulaşım sistemlerinin trafik emniyeti ve trafik verimliliği uygulama alanları kapsamında şehir içi trafiği yönetmek için önermiş ve gerçekleştirmiş olduğumuz bir akıllı ulaşım sistem mimari ve uygulaması olan SDN temelli VANET altyapılı trafik yönetim sisteminin veri çevrim modülünde VANET WAVE mimarisi kullanılmıştır. Araçların kendi aralarında ve yol kenarı üniteleriyle olan iletişimlerinde ise AODV ve DSDV yönlendirme protokolleri kavşak içerisindeki araç sayısı ve trafik durumlarına göre SDN kontrolör tarafından ürettirilen akış girdileri vasıtasıyla dinamik olarak tercih edilmiştir.

#### **2.4. Yazılım Tanımlı Ağlar (Software Defined Networks-SDN)**

Günümüz kurumsal ağ yapıları, kendi bünyelerinde yönlendirici, anahtar cihazı, çeşitli orta kutu cihazı (güvenlik duvarı) gibi birçok ağ cihazı ve bunlar üzerinde çalışan protokollerden oluşmaktadır. Kurumsal ağların fiziksel ve uygulama altyapılarındaki bu gelişimler beraberinde cihazlara kolay erişim, yüksek bant genişliği, dinamik yönetim gibi problemler oluşturmaktadırlar. Basit ve orta ölçekli ağ yapılarında ağ üzerinde oluşan/oluşabilecek veri trafiği ve topoloji değişikliklerine karşın ağ yöneticileri her bir cihaz için manuel olarak yeni yapılandırmalar ve çözümler üretmek zorunda kalmaktadırlar. Bu sebeplerden ötürü, son zamanlarda, ağ yapılarının dinamik ve kolayca optimize edilebileceği, daha güvenilir ve esnek bir yapı sunan, hızlı erişebilirlik, yük dengeleme ve merkezi yönetim sağlayan yeni bir ağ paradigması ortaya atılmıştır. Önceleri programlanabilir ağlar olarak adlandırılan bu ağ

paradigması, ağdaki cihazlar üzerinde bulunan kontrol ve veri düzlemlerini programlanabilir arayüzler vasıtasıyla birbirinden ayırarak, ağın yönetimini tek bir merkezde toplayan yazılım tanımlı ağlar olarak adlandırılmaktadır [47-51].

Bu bölümde önce yazılım tanımlı ağların gelişim sürecinden ve geliştirilen projelerden bahsedilecektir. Daha sonra yazılım tanımlı ağ mimari yaklaşımları detaylı bir şekilde incelenecek ve Openflow protokolünün çalışma yapısı anlatılacaktır.

### **2.4.1. Programlanabilir ağlar**

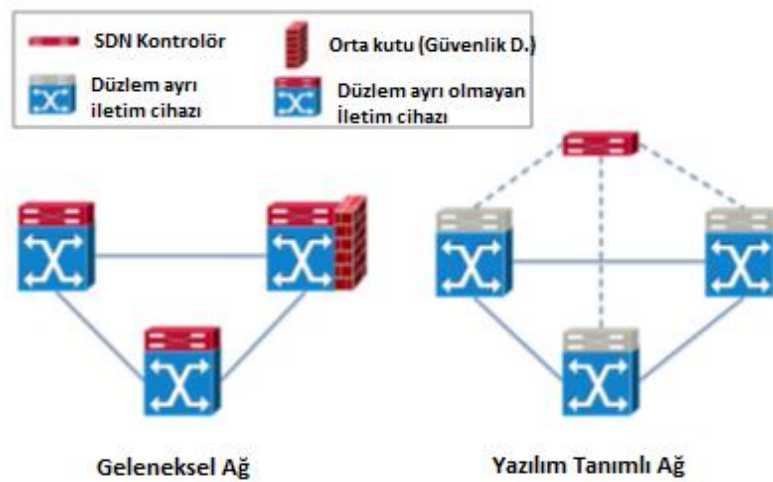
Günümüz yazılım tanımlı ağ paradigmasının oluşmasına kadar ağ yapılarının kolay ve dinamik yönetimi için bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan ilki 1995 yılında “Open Signaling” çalışma grubu tarafından ATM, internet ve mobil ağları daha esnek, programlanabilir ve açık kaynaklı yapmak üzere yapılan çalışmadır. Bu çalışmanın ana amacı ağ cihazlarının donanım katmanlarına açık kaynak ve programlanabilir bir ağ arayüzü ile erişerek, yeni servisler ve programlama çevrelerinin geliştirilmesini sağlamaktır. Bu fikir daha sonraları, IETF tarafından genel anahtar yönetim protokolü olan “GSMP” protokolünün geliştirilmesini sağlayacaktır. Bu protokolün amacı bir kontrolör tarafından anahtar cihazlara bağlantı kurularak, anahtar cihazlar üzerinde multicast bağlantılar ekleme ve silme, portları kontrol etme, anahtar cihaz üzerinden istatistik toplamaktır [47-49].

Programlanabilir ağlar kapsamında yapılan bir başka çalışma ise yine 90’lı yılların ortasında, sadece özel servisler için ağ altyapısının programlanabilir olabileceği “Active Networking” çalışmasıdır. Bu çalışmada iki ana yaklaşım söz konusudur; kullanıcı temelli programlanabilir anahtar cihazları ve kullanıcı mesajları içinde taşınan kapsüllerdir. Daha sonra bu kapsüller yönlendirici cihazları tarafından alınır ve işlenir. Programlanabilir ağların bilinen bir başka çalışması 2004 yılında başlayan “4D Project” isimli çalışmadır. Yönlendirme kararının ve protokollerin ayırımına dayanan bu çalışma, ağın genel yönetimi için bir karar düzlemi, veri trafiği yönetmek için veri düzlemi ve karar düzlemine yardımcı keşif ve yayılım düzlemlerinden oluşur. Bu proje daha sonra NOX kontrolörünün geliştirilmesi için bir altyapı oluşturmuştur.

IETF ağ yapılandırma çalışma grubu tarafından 2006 yılında, ağ cihazlarının yapılandırılması için bir yönetim protokolü tasarımına dayanan “NETCONF” çalışması gerçekleştirilmiştir. Önerilen protokol cihaz yapılandırma verilerinin alınıp, gönderilmesine imkan sağlayan ağ cihazları için bir API sağlamaktadır. Bu çalışmada SNMP protokolünün eksik ve avantajlı tarafları analiz edilmiş ve buna göre geliştirme yapılmıştır. Bu çalışmada, diğer programlanabilir ağlarda olduğu gibi kontrol ve veri düzlemlerini mantıksal ayrımı yoktur [48-51].

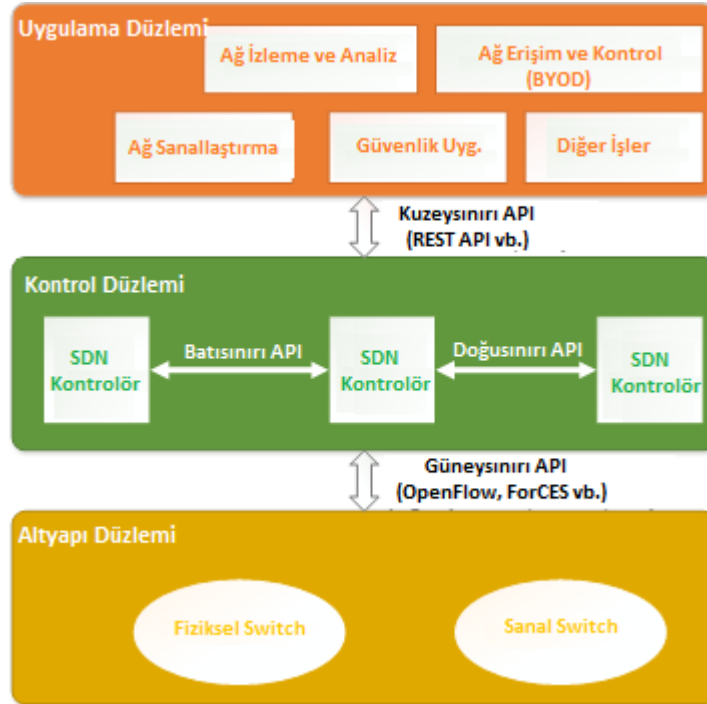
#### 2.4.2. Yazılım tanımlı ağ mimari yapıları

Yazılım tanımlı ağlar, ağdaki veri yolunu daha basit ve dinamik bir şekilde yönetebilmek için tasarlanmış ağ paradigmalardır. Şekil 2.13.’de de görüldüğü üzere, veri ve kontrol düzlemlerinin birbirinden ayrılması mantığına dayanan yazılım tanımlı ağlarda, ağ kontrolünün doğrudan programlanabilir olmasına ve altyapının uygulamalar ve ağ hizmetleri için soyutlaştırılmasına olanak sağlar. İletim elemanları, kontrolör ve bir uygulama yazılımından oluşan bu mimaride ağdaki iletim elemanları önceden tanımlı program mantığına göre kendilerine kontrolörden gelen kurallara göre veri trafiğini iletirler. Kontrolör genellikle uzak bir sunucuda çalışır ve bir takım standartlaşmış komutlar kullanarak iletim elemanlarıyla güvenli bir bağlantı üzerinden haberleşir [47,48].



Şekil 2.13. Yazılım tanımlı ağ ve geleneksel ağ yapıları [47,48]

Yazılım tanımlı ağlar için literatürde belli başlı çalışmalar olsa da kabul gören ve en bilinen SDN mimarisi ONF tarafından oluşturulmuş olan Şekil 2.14.'deki 3 katmanlı yapıdır. Altyapı, kontrol ve uygulama katmanından oluşan bu mimari yapısında, katmanlar arasındaki haberleşme açık kaynak protokoller/API'ler vasıtasıyla sağlanmaktadır [47-51].



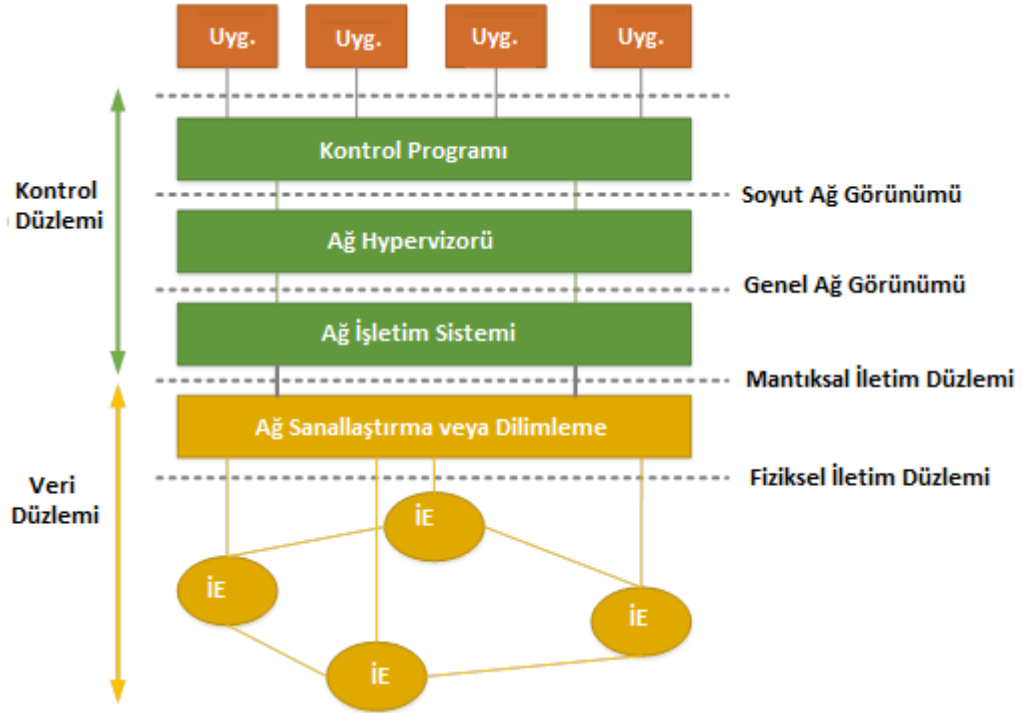
Şekil 2.14. ONF tarafından önerilen SDN katmanlı mimari yapısı [47]

1. Altyapı Katmanı: Veri düzlemi olarak da adlandırılan bu katmanda, bir açık arayüzle/API vasıtasıyla erişilebilen İletme Elemanlarından (fiziksel ve sanal anahtarları) oluşur.
2. Kontrol Katmanı: Bu katman, bir açık arayüz üzerinden ağdaki cihazları yönetmek için çeşitli ağ modüllerinden oluşan kontrolör olarak adlandırılan yazılım bulunmaktadır.
3. Uygulama Katmanı (Application Layer): Bu katman, ana olarak SDN haberleşmesi ve ağ servislerini kullanan yük dengeleme, en kısa yol, güvenlik gibi son-kullanıcı uygulamalarından oluşmaktadır.

Mimarideki katmanlar arasındaki iletişim açık arayüz standartları ile sağlanmaktadır. Bu açık arayüzler altyapı (veri) katmanı ile kontrol katmanı arasındaki iletişimi sağlayan güney sınırı, kontrol katmanı ile uygulama katmanı arasındaki iletişimi sağlayan kuzey sınırı ve de kontrolörün kendi iç modülleri arasında efektif iletişim için geliştirile doğu/batı sınırlarından oluşmaktadır. Ağ yapısındaki iletim elemanları ile kontrolör arasında bulunan güney sınırında ForCES ve Openflow protokolleri kabul görmüş açık kaynak standartlardır. Kuzey sınırında ise uygulama yazılımı ile kontrolörün modülleri arasında haberleşmenin sağlanabilmesi için REST API kullanılmaktadır.

Yazılım tanımlı ağları, geleneksel ağlara göre iletim elemanları üzerindeki kontrol mekanizmasını, veri düzleminde soyutlamasıyla, farklı mantıksal katmanlar oluşmuştur. Şekil 2.15.'de soyutlama sonucu oluşan katmanların mimari gösterimi verilmiştir. Buna göre katmanlı yapının en altında bulunan fiziksel iletim düzlemi, ağ içerisinde bulunan iletim elemanlarını ifade ederken, aynı zamanda bu elemanların bir üst katman olan ağ sanallaştırma katmanı ile olan iletişimlerini sağlar.

Ağ sanallaştırma katmanı ağın ihtiyaçlarına göre belirlenen mantıksal iletim düzlemin neticesinde sahadaki iletim elemanlarının nasıl hareket edecekleri ile ilgili bilgi akışı sağlar. Ağdaki cihazların yüklenme işlemleri, cihazların davranışlarını, kısaca ağın programsal kontrolünü sağlayan uygulama yazılımı olan ağ işletim sistemi, iletim elemanlarının kontrolünü sağlayabilmesi için genel ağ görüntüsünü alması gerekmektedir. Soyut ağ görünümü düzlemi ise genel ağ görünümünün uygulamalar ve kontrol programı tarafından yorumlanabilmesi için oluşturulan bir izdüşüm/tersleme işlemidir [47-49].



Şekil 2.15. Soyutlama sonucu oluşan SDN katmanları [47]

Bu bölümde SDN mimarisinin temel bileşenleri olan iletim elemanları, kontrolör ve SDN uygulamalarından bahsedilecektir.

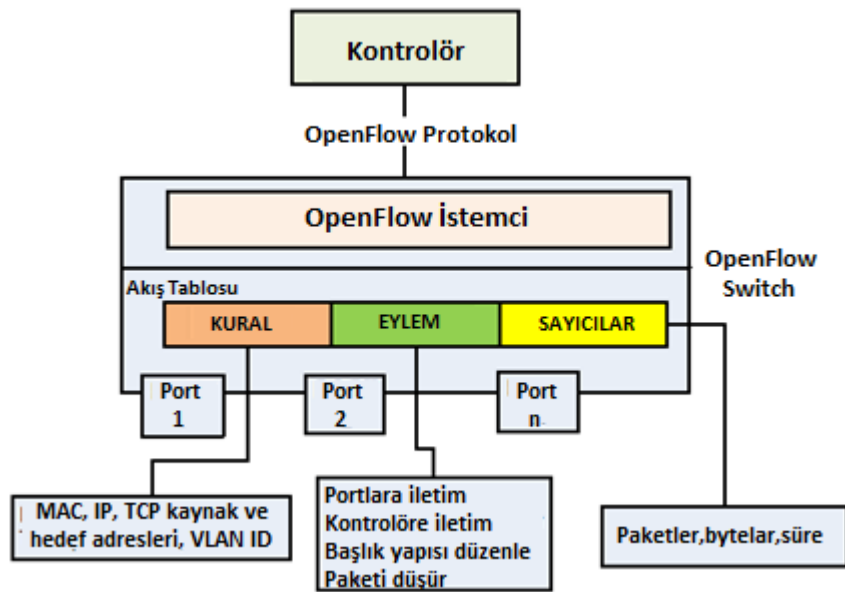
#### 2.4.2.1. İletim elemanları

Ağ altyapıları, yönlendiriciler, anahtar cihazlar, sanal anahtar cihazlar, kablosuz erişim noktaları gibi bir çok iletim cihazı ve ağ ekipmanından oluşmaktadır. Yazılım tanımlı ağlarda bu iletim cihazları, kontrol ve yönetim işlevlerini bir kontrolör cihazına devrederek soyutlanmış, açık bir API (openflow, ForCES) ile basitçe erişilebilen iletim elemanları olmuştur. İletim elemanlarının kontrolör ve kendi aralarında iletişim halinde olabilmeleri için ONF SDN mimarisindeki güney sınırında gösterildiği üzere bir açık arayüz kullanmaları gerekmektedir. Bu açık arayüzlerden literatürde en bilinenleri ForCES ve Openflow protokolleridir.



IETF çalışma grubu tarafından geliştirilen ForCES (Forwarding and Control Element Separation) protokolü ağıdaki cihazların kontrol ve iletim işlevlerini birbirinden ayırmayı amaçlasa da, bu cihazların tek bir birimmiş gibi hareket eder. İletim cihazları üzerinde, tam anlamıyla Open-flow temelli yazılım tanımlı ağlardaki gibi bir soyutlama yoktur. ForCES, iletim elemanları ve kontrol elemanı olmak üzere iki mantıksal birim tanımlamaktadır. İletim elemanları kendisine gelen paketleri işlemekten sorumludurlar. Kontrol elemanı ise tüm ağın yönetimi sağlar ve iletim elemanlarının paketleri nasıl işleyeceğine karar verir. Bu protokol, iletim elemanlarının köle, kontrol elemanın efendi olarak tanımlandığı master-slave mantığında çalışır. İletim elemanları üzerinde kontrol elemanından gelen komutların tutulduğu ve işlendiği mantıksal fonksiyon blokları bulunur. 2003 yılından beri çalışmaları devam eden ilgili IETF çalışma grubu, ForCES protokolü ile ilgili mimari, bileşenler ve çalışma yapısı açısından birçok paylaşım yapmıştır.

Open Network Foundation tarafından geliştirilen OpenFlow protokolü, ForCES gibi SDN'nin temel mantığı olan iletim ve kontrol düzlemlerinin ayrıştırılmasına göre çalışmaktadır. ForCES'ten farklı olarak OpenFlow protokolünde Şekil 2.16.'da görüldüğü gibi akış tabloları ve farklı mesaj tipleri kullanılmaktadır [47-51].

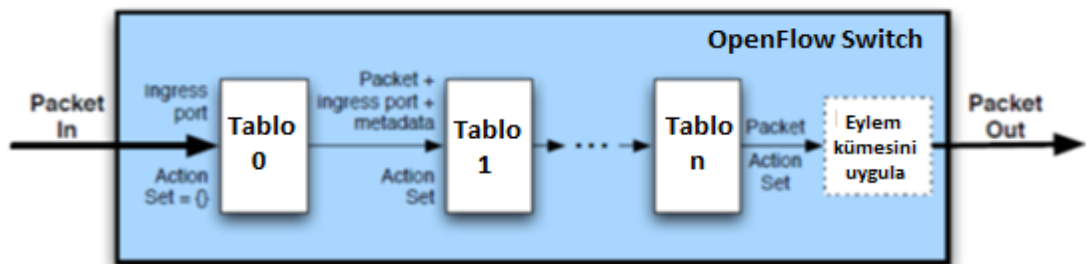


Şekil 2.16. Openflow temelli SDN anahtar cihaz ve akış tablosu yapısı

Bir Openflow destekli iletim elemanı, bir veya birkaç akış tablosundan ve de Openflow vasıtasıyla kontrolör ile haberleşen bir soyutlama katmanından oluşur. Akış tabloları, kendilerine gelen her bir paketin nasıl işleneceği ve iletileceği ilgili bilgileri tutan akış girdilerinden oluşmaktadır. Akış girdileri genellikle, eşleşme alanı, sayıcılar ve komut kümeleri olmak üzere 3 alandan oluşmaktadırlar.

1. Eşleşme alanı; SDN temelli anahtar cihazı, kendisine gelen paketleri akış girdilerine göre, paket başlığı, ingress portu ve meta veriye bağlı olarak karşılaştırmasını yapar.
2. Sayıcılar; Anahtar cihaza gelen paket sayısı, boyutu, akış süresi gibi verileri tutarak düzenli akış istatistik toplar.
3. Komut/eylem kümeleri; Gelen paketlerin nasıl işleneceği ve eşleştirilmesi ile ilgili işlemlerin yapıldığı kısımdır.

Openflow temelli bir anahtar cihaza bir paket geldiği zaman, paket başlığı çıkartılarak, anahtar üzerindeki akış tablosundaki akış girdileri ile bir eşleşme var mı bakılır. Eğer bir eşleşme var ise, anahtar kümesi eylem kümesindeki işleme göre paketi iletir veya iletmez. Bir eşleşme olmaması durumunda paket ile ilgili anahtar cihaz üzerinde table-miss akış girdisi oluşturulur. Openflow destekli bir anahtar cihazında paket gelişinden ilgili porttan paketin çıkışına kadar olan süreç aşağıdaki Şekil 2.17.'de şematize edilmiştir.

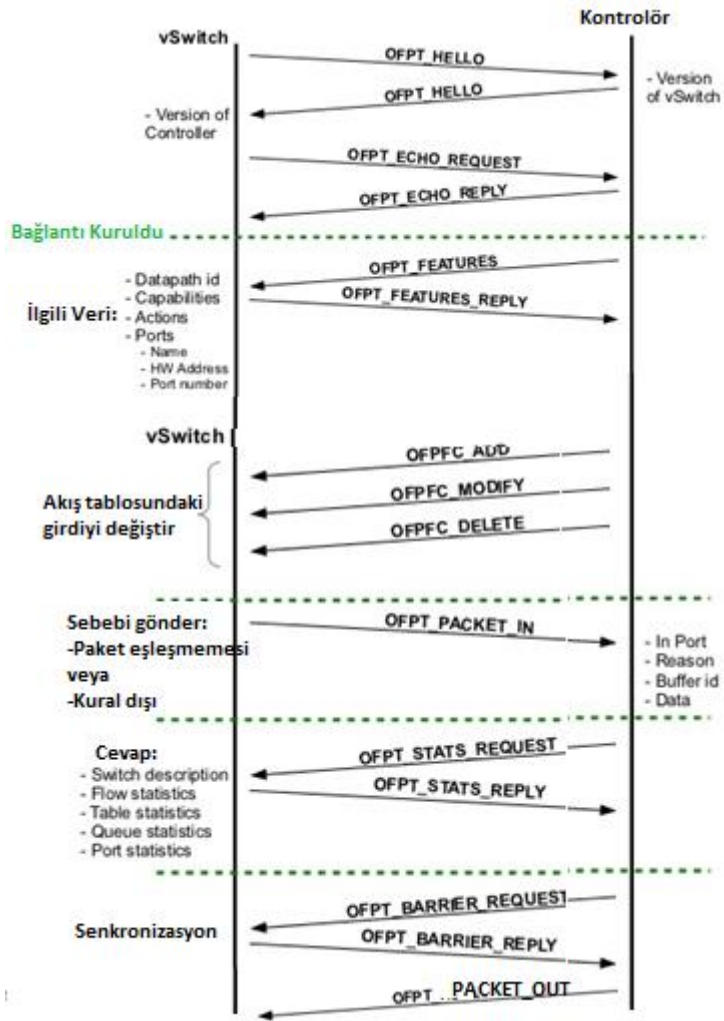


Şekil 2.17. Akış tablosu işlem süreci [47,48]

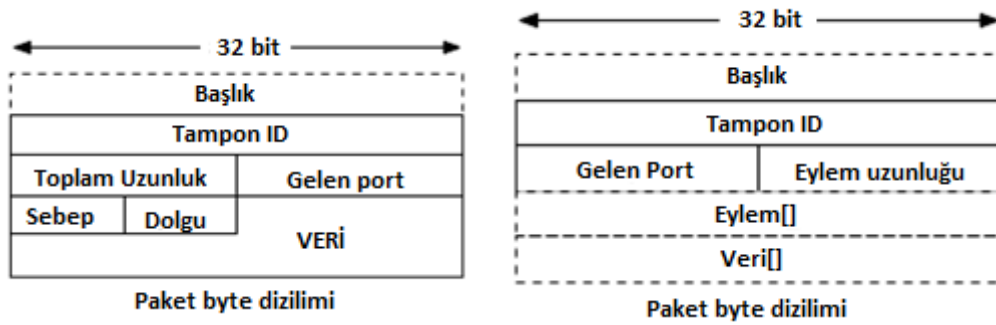
OpenFlow mesajları üç ana tipte kategorize edilebilir. Bunlar;

1. Kontrolör-anahtar arası mesajlar; Kontrolör tarafından başlatılan ve anahtarların durumunu gözetlemek veya yönetmek için kullanılan mesaj tipleridir.
2. Asenkron mesajlar; Bir anahtar ağ olaylarında kontrolörü güncellemek için asenkron mesajlar başlatılabilir ve anahtarın durumunu değiştirir.
3. Simetrik mesajlar; Herhangi bir istek olmadan anahtar ya da kontrolör tarafından başlatılan mesaj tipleridir. Örneğin, kontrolör-anahtar bağlantısı canlılığını kontrol etmek için bu tip mesaj kullanılır.

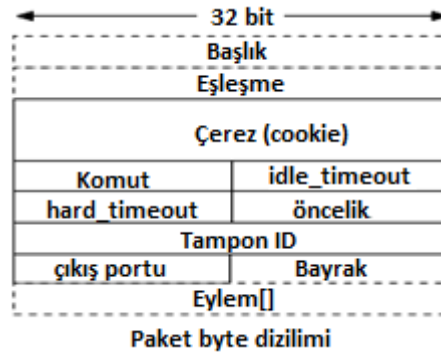
En son versiyonu ile birlikte Openflow protokolü (sürüm 1.4) haberleşme, bağlantı kurulumu, durum bildirim, yapılandırma bilgisi gibi birçok işleve sahip mesaj tipleriyle birlikte toplam 32 çeşit mesaj tipi vardır. Fakat bu mesaj tiplerinden en önemlileri yazılım tanımlı ağlardaki, veri ve kontrol düzlemlerini soyutlama mantığına dayalı akış tablolarındaki akış girdileriyle alakalı olan “packet\_in” ve “packet\_out” mesaj tipleridir. Bir anahtar cihaz kendisine gelen paketi, kendi üzerindeki akış tablosunda eşleştiremediği zaman bu paketi, kontrolör ile bağlantı kurulumu işlemlerinden sonra (Şekil 2.18.) bir packet\_in mesajı içerisinde kontrolöre iletir. Kontrolör kendisine gelen packet\_in (Şekil 2.19.) mesajını ayrıştırarak, önceden tanımlı kural veya kendi iç modüllerine göre hedefe en uygun yol üzerinden packet\_out (Şekil 2.19.) veya flow\_mod (Şekil 2.20.) mesajı içerisinde yollar. Yol üzerindeki ilgili anahtar cihazlar kendilerine gelen bu mesajı ayrıştırarak, akış tablolarına yeni girdi olarak ekleme yaparlar ve kaynak-hedef arası yol belirlenir [47-51].



Şekil 2.18. SDN temelli anahtar cihazı ile SDN kontrolör arasında bağlantı kurulum işlemleri



Şekil 2.19. Packet\_in ve Packet\_out mesajları başlık yapıları



Şekil 2.20. Flow\_mod mesajı başlık yapısı

#### 2.4.2.2. Kontrolör

Kontrolör, katmanlı mimaride ağ işletim sistemlerinin ana parçası olmasının yanı sıra SDN ağların da kontrol ve yönetim merkezinde yer alır. Ağdaki iletim elemanlarını, gerek uygulama temelli gerekse kendi iç modülleri kullanarak akış girdileri vasıtasıyla yönetmek zorundadır. Kontrolörler tarafından proaktif ve reaktif olmak üzere iki farklı akış kurulum modu vardır [47,49]:

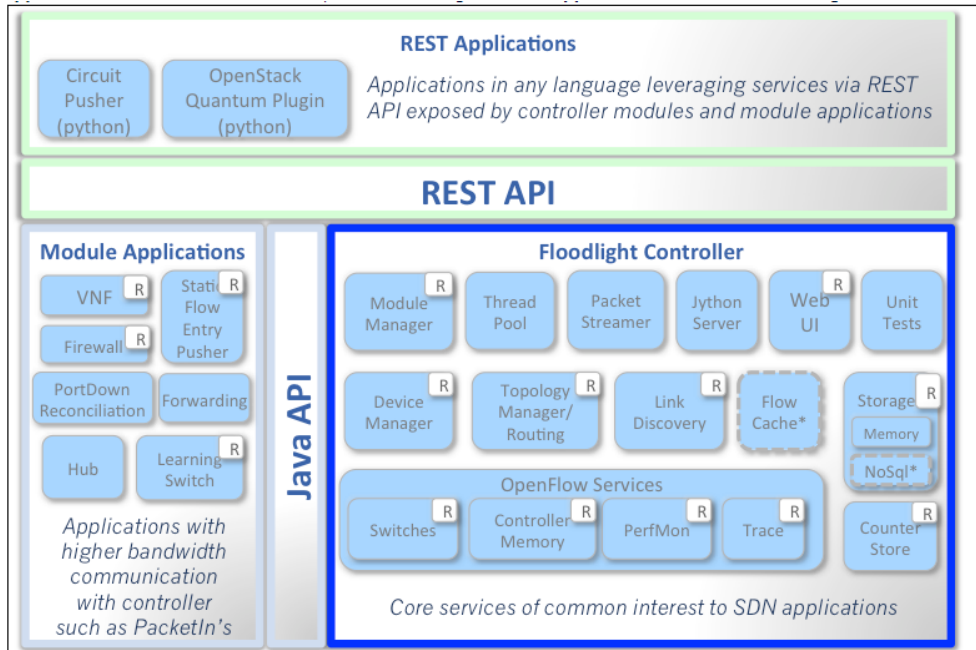
1. Proaktif akış kurulumlarında, paketlerin nasıl işleneceği ve iletileceği ile ilgili akış kuralları anahtar cihazlar üzerindeki akış tablolarına önceden yüklenir. Bu atip akış kurulumlarının ana amacı ve avantajı, iletim cihazları ve kontrolörün bağlantı kurulum sıklığının azaltılması ve gecikme, jitter gibi servis kalitesi kriterlerinin iyileştirilmesidir.
2. Reaktif akış kurulumlarında ise, Openflow destekli anahtar cihazların akış tabloları üzerinde gelen paketlerle ilgili bir akış girdisi olmadığı zaman (table-miss) iletim elemanlarının kontrolör ile bağlantı kurulumu yapılır. Bu akış girdileri, önceden tanımlı bir durgunluk süreaşımından sonra geçersiz kılınır ve tablodan silinir. Reaktif akış kurulumu yüksek bir Gidiş-Geliş Süresinden (Round Trip Time) muzdarip olsa da, QoS gereksinimleri ve trafik yük şartları dikkate alındığında akış seviyesinde kararlar vermek için belirli esneklik derecesi sağlar.

Literatürde yazılım tanımlı ağlarda kullanılan açık kaynak ve ticari olmak üzere birkaç kontrolör tipi vardır. Aşağıdaki tabloda bu kontrolörlerin yazıldıkları dil, grafiksel arayüz desteği, çoklu thread desteği gibi bir çok kriter kapsamında karşılaştırmaları Tablo 2.6.'da verilmiştir.

Tablo 2.6. SDN kontrolörlerin karşılaştırma tablosu

Özellik	NOX	POX	Beacon	Floodlight	OpenDaylight
Geliştirilen/ Desteklenen Dil	C++, Python	Python	Java	Java, Python	Java
Projenin Durumu	Devam	Tamam	Bakım	Tamam	Tamam
Kurulum/Programlama ama Kolaylığı	H	E	E	E	E
Dökümantasyon	Kötü	İyi	İyi	İyi	Orta
REST API Desteği	Yok	Sınırlı	Var	Var	Var
Kullanıcı Arayüzü	Python +QT4	Python+Q T4, Web	Web	Java, Web	Web
Çoklu Düğüm Desteği	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Döngü Teknoloji Desteği	Yok	Yok	Yok	Var	Var
non-OF island Bağlantı Desteği	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Güney Sınırı Protokollerinde Soyutlama Desteği	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
OpenStack Quantum Desteği	Yok	Yok	Yok	Var	Var

Bu tez çalışmasında açık kaynak kod yapısı, multi-thread desteği ve içerdiği modüller açısından kontrolör olarak java tabanlı Floodlight kontrolörü tercih edilmiştir. Floodlight kontrolörü diğer kontrolörlerde olduğu üzere uygulama katmanındaki uygulamalarla REST API üzerinden haberleşir. Şekil 2.21.' de gösterildiği üzere bağlantı keşfi, topoloji yöneticisi ve yönlendirme gibi kendi iç uygulamaları ve güvenlik duvarı, statik akış oluşturma, iletim gibi modüllerden oluşmaktadır [47,52].



Şekil 2.21. Floodlight SDN kontrolör modül yapısı

### 2.4.2.3. SDN uygulamaları

Yazılım tanımlı ağların, özellikle kurumsal ağlar, büyük veri merkezleri, altyapı temelli kablosuz ağlar gibi ağ altyapılarında çok çeşitli uygulama alanları vardır. Bu tip büyük ve orta ölçekli ağlar birçok iletim elemanından oluştukları için, bu ağların özellikle performans, servis kalitesi ve güvenlik gibi konularda adaptif bir şekilde yönetilmeleri gerekmektedir. Bu sebeplerden ötürü, yazılım tanımlı ağ paradigmasının iletim elemanları üzerindeki kontrol ve veri düzlemlerini soyutlanmasıyla, ağ ihtiyaçları ve servis kalitesini arttırmak için özellikle yönlendirme, yük dengeleme,

katmanlar arası geçiş, sınırsız iletişim/dolaşım, kolay ağ yönetimi ve bakımı, ağ güvenliği, ağ sanallaştırma gibi genel konularda yeni protokol ve servisler üzerinde çalışmalar hızlanmıştır. Aşağıda yazılım tanımlı ağların bu konular üzerinde nasıl katkı sağladığı maddeler halinde açıklanmıştır [47-50]:

1. Adaptif yönlendirme; Paket anahtarlama ve yönlendirme, bir ağın temel fonksiyonlarıdır. Bu kavramlar, geleneksel ağlarda sağlamlığı sağlayabilmek için farklı ve dağıtık yaklaşımlar üzerine oturtulmuştur. Bu farklı yaklaşımlar/tasarımlar karmaşık implementasyon, yavaş yakınsama, sınırlı yönetim gibi birçok problemi beraberinde getirmiştir. Buna karşın yazılım tanımlı ağlar, uygulamalara genel ağ durum bilgilerini elde etme ve ağı adaptif kontrol etmelerine izin vermişlerdir.
2. Yük dengeleme; Yük dengeleme, ağ yapılarında daha iyi kaynak kullanımı sağlamak amacıyla uzun süredir çalışılan bir konudur. Özellikle veri merkezi gibi ağlarda kullanıcıların isteklerine karşılık verebilmek için, işlem hacmini artıran, cevap süresini azaltan ve ağdaki overload dan kaçınan atanmış yk dengeleyiciler kullanılır. Bu sistemlerin pahalı olması ve yazılım tanımlı ağ kontrolörlerinin yük dengeleme modülleri sayesinde veri merkezlerinde geleneksel sistemlerin yerini yazılım tanımlı ağlar almaya başlamıştır.
3. Katmanlar arası geçiş tasarımı; OSI referans modelindeki katmanlı mimarideki farklı katmanlardaki birimlerin entegrasyonun arttırılması üzerine kurulu bu yaklaşım, yazılım tanımlı ağların uygulamalara ağ durum bilgilerine kolay erişim ve servis kalitesi desteği vermesiyle birlikte daha da gelişmiştir.
4. Sınırsız dolaşım; Akıllı telefon ve tabletler internet erişiminde baskın cihazlar haline gelmişlerdir. Bu cihazların internete erişimleri kablosuz olarak sağlandığından, bir konumdan başka bir konuma hareket halindeyken sürekli bağlantının sağlanabilmesi için, istasyonlar arasında iletişimlerin değiştirilmesi gerekmektedir. Farklı teknolojiler ve farklı taşıyıcılar ile kontrol düzleminde yapılacak uygulamalar bu tip ağlarda da yazılım tanımlı ağların gerekliliğini ortaya koyacaktır.
5. Ağ yönetimi/bakımı; Ağ üzerinde yapılan her hangi bir yapılandırma hatası, ağdaki veri trafiğini olumsuz etkilemektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde ağ kesintilerinin %60'lık gibi büyük bir oranının ağ operatörleri tarafından



yapılan yanlış cihaz yapılandırmalarından kaynaklandığı belirtilmektedir. Merkezi ve otomatik yönetim ile ağdaki iletim elemanlarına ilke göndererek yazılım tanımlı ağlar, ağ yapılandırmalarındaki hata oranını büyük ölçüde düşürerek kesintisiz ve verimli bir ağ hizmeti sunabilmektedirler.

6. Ağ güvenliği; Ağ güvenliği, siber güvenliğin en önem arz eden bir alt konusudur. Geleneksel ağlarda güvenlik için, güvenlik duvarları, vekil sunucular gibi fiziksel ve yazılımsal çözümler kullanılmaktadır. Ağ altyapıları ve uygulamalarının heterojen ve karmaşık yapılarından dolayı bu cihazlar üzerinde her ağ durumu için ayrı ayrı ilke ve yapılandırmalar yapılmak zorundadır. Bu sebepten ötürü yazılım tanımlı ağlar ağ güvenliği konusunda, gerek kontrolörlerin güvenlik modül uygulamaları, gerekse ağın merkezi kontrolü sayesinde geleneksel ağlara göre daha avantajlı durumdadırlar.

Bu tez kapsamında, akıllı ulaşım sistemlerinin alt modülü olan şehir içi trafik yönetim sistemlerinin iletim ve uygulama altyapıları için önerilen mimari, ONF tarafından önerilen SDN'nin katmanlı yapısı dikkate alınarak tasarlanmıştır. Sahadaki araçların ve yol kenarındaki RSU'ların birer SDN etmen düğüm olarak modellendiği bu mimari yapısında, tüm veri akışı SDN iletim altyapısı üzerinden sağlanmakta, günümüz kavşak ve faz yapılarının yönetim için önerilen sinyalizasyon uygulamaları da yine SDN kontrolöre göre dahili ve harici olarak geliştirilmiştir.

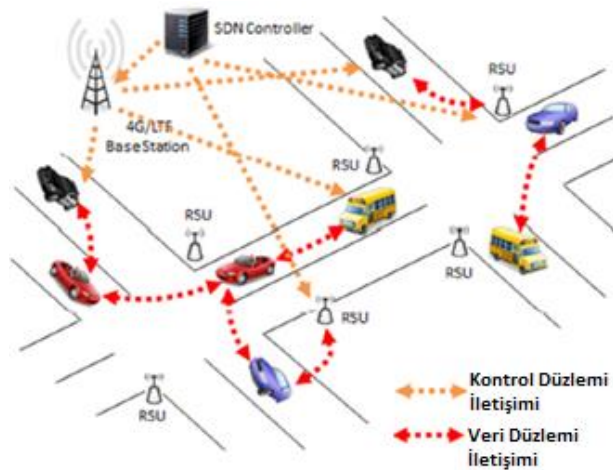
## **2.5. Yazılım Tanımlı Araçsal Ağlar (SDN temelli VANET)**

Şehir içi trafik yönetim sistemleri için bu tez çalışmasında önerilen yapı içerisinde sahadan veri çekmek için kullanılacak olan VANET, son zamanlarda hem ticari hem de akademik çevrelerde çok ilgi gören bir konudur. Araçların mobil düğüm olarak modellendiği bu ağ paradigmasında araçlar kendi aralarında veya yol kenarındaki ünitelerle iletişim kurup trafik verimliliği, trafik emniyeti ve bilgi eğlence alanında çalışmalar yapılmaktadır. Her ne kadar VANET ağ mimarisi günümüzün popüler bir çalışma konusu ve teknoloji olmasına rağmen, özellikle hızlı ağ topoloji değişikliğindeki bağlantı kopmaları, çoklu atlamalardaki dengesiz ağ trafiği, yetersiz ağ optimizasyonu ve güvenlik gibi konularda yetersiz kalmaktadır. VANET ağlarda

karşılaşılan bu problemlere çözüm getirebilmek için geleneksel ağlardaki yapılardan farklı olarak kontrol ve veri düzlemini birbirinden ayıran, ağ cihazlarının sadece iletim için işlem yapmasını sağlayan ve yapılan çalışmanın da iletim ve uygulama altyapısını oluşturan SDN temelli VANET mimari paradigması ortaya çıkmıştır.

### 2.5.1. Yazılım temelli araçsal ağ mimari yapısı

Sahadaki araçların birer mobil iletim elemanı olarak düşünüldüğü SDN temelli VANET mimarilerinde, geleneksel VANET sistemlerin aksine araçlar üzerindeki yönlendirme ve iletim işlemleri soyutlanarak, araçların birbirleri arasında ve yol kenarı ünitesi ile olan iletişimleri merkezdeki SDN kontrolör cihazı tarafından sağlanmaktadır. Araçlar bu düzlem ayrılmasıyla birlikte, yönlendirme, optimizasyon, servis kalitesi ve erişim denetim işlemlerini kontrolöre devretmiş olmaktadır. SDN temelli VANET günümüzde yeni ve trend bir çalışma konusu olduğu için bu sistemlerle alakalı uluslararası akademik ve ticari kurumlarca yayınlanmış bir standart bulunmamaktadır. Fakat literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde SDN temelli VANET sistemlerinin genel kabul görmüş mimari yapısı Şekil 2.22.'deki gibidir [12].



Şekil 2.22. SDN temelli VANET mimarisi genel yapısı

Bir SDN temelli VANET sistem genelde kablosuz mobil SDN düğümler (araçlar), kablolu SDN düğümler (RSU), SDN kontrolör ve bir uygulama yazılımından

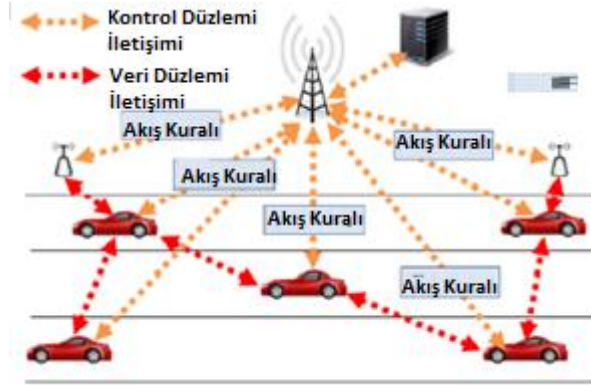
oluşmaktadır. Mobil SDN düğüm olarak adlandırılan araçlar, eylemleri/işlemleri yapmak için üzerinde akış tablosu barındırır. Kontrolörden kendisine gelen akış girdilerini tablosuna kaydeder. Araç üzerindeki bu akış tabloları agent yazılımı ile gerçekleştirilir. Openflow protokolü temelli akış tabloların yanında araçlar aynı zamanda kontrolör ile bağlantı kopması durumları için bir fallback mekanizması barındırır. Bu mekanizma geleneksel VANET sistemlerindeki iletişim karakteristiklerine göre aracın iletişimini devam ettirmesini sağlar. Araçlar kontrolör ile olan iletişimlerini RSU üzerinden DSRC iletim standartları veya 4G/LTE standartları ile direk olarak uzak bağlantı şeklinde gerçekleştirebilirler. Yol kenarı birimlerinin birer sabit SDN düğümler olarak kabul edildiği bu sistemlerde, RSU'lar üzerinde de araçlarda olduğu üzere akış tablosu ve fallback mekanizması vardır. Araçlar-kontrolör ve kontrolör-arac arasındaki iletişim geleneksel SDN ağlarda olduğu gibi Openflow protokolü ile sağlanmaktadır [12-14].

SDN temelli VANET ağlardaki, tüm kontrol ve yönetim işlemlerinin (yönlendirme, yük dağılımı, servis kalitesi vb.) sağlandığı kontrolör, bir REST API vasıtasıyla uygulama yazılımı ile haberleşir. Literatürde SDN temelli ağların akıllı ulaşım sistemleri, trafik yönetim ve kontrolü, akıllı park, öncelikli araç geçişi, en kısa yol bulma, yol durum bilgisi edinme gibi birçok VANET trafik emniyet ve trafik verimliliği uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir.

#### **2.5.1.1. Yazılım temelli araçsal ağlar iletim modları**

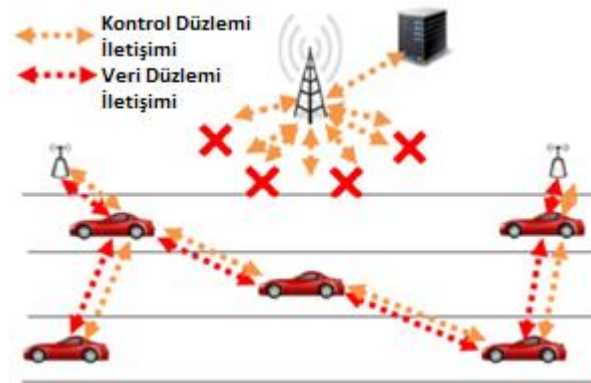
Veri ve kontrol düzlemlerinin ayrılmasıyla birlikte araçsal ağların, kendi aralarında, yol kenarı birimi ve merkezdeki kontrolör ile olan iletişimlerinde 3 tip kontrol modeli önerilmiştir [12-14].

1. Merkezi kontrol modu; Bu kontrol modunda, SDN kontrolörü ağdaki tüm araçların ve RSU'ların yönetim ve kontrol işlemlerinin tek bir merkezden yönetir. Bu kontrol modunda araçlar üzerindeki kontrol ve veri düzlemleri tam anlamıyla ayrılmış bulunmaktadır.



Şekil 2.23. SDN temelli VANET mimarisi merkezi kontrol modu

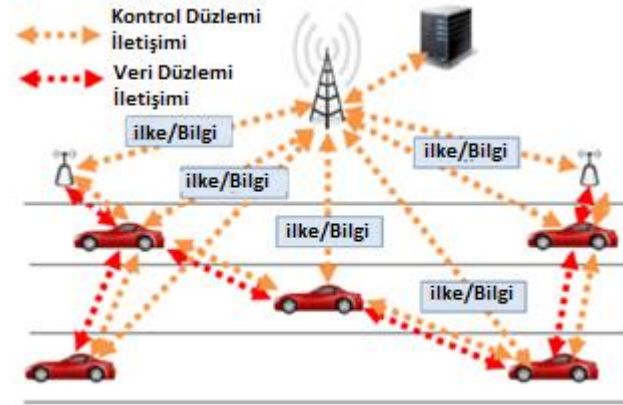
2. Dağıtık kontrol modu; Bu kontrol modunda, araçlar ve RSU sadece kontrol ve yönetim mesajları için SDN kontrolü dinlemektedirler. Veri transferi/trafiğinde kendi üzerlerindeki fallback mekanizması doğrultusunda geleneksel VANET sistemler gibi çalışmaktadırlar. Bu çalışma yapısıyla dağıtık kontrol modu, SDN özelliklerine sahip olmayan self-organizing dağıtık ağlarına benzemektedir.



Şekil 2.24. SDN temelli VANET mimarisi dağıtık kontrol modu

3. Hibrit kontrol modu; Her iki kontrol modunun desteklendiği bu yaklaşımda, kontrolör ağın yönetimi tek başına üzerine almaz, bir temsilci vasıtasıyla sahadaki araçların lokal agentlarını kontrol eder. SDN etmen araçlar ve RSU'lar paket iletimi için kendi lokal agentlarını kullandıkları zaman kontrolör tüm akış kurallarını göndermek yerine, sadece genel davranışları tanımlayan

ilke kurallarını yollar. Kontrolör, araçlar veya RSU'ya özel durumlarda müdahalede bulunur.



Şekil 2.25. SDN temelli VANET mimarisi hibrid kontrol modu

### 2.5.1.2. Yazılım temelli araçsal ağların sağladığı faydalar

Yazılım tanımlı ağlar, araçsal ağlara bağlantı sürekliliği, efektif bantgenişliği kullanımı, kolay ağ yönetimi, yönlendirme gibi ağ parametreleri yanı sıra, sağladığı uygulama ve servis desteği ile de katkıda bulunmaktadır. Özellikle geleneksel araçsal ağlardaki, belirsiz veri trafiği ve de kaynaktan hedefe veri göndermedeki en kısa yol algoritmalarında farklı teknik ve metotların kullanılması ağda bir kararsızlığa ve daha bantgenişliği tüketilmesine neden olmaktadır. Bu durum için yazılım tanımlı araçsal ağlar da, kontrolör veri trafiği için yeni bir yol ataması yapar ve ağın verimliliğini artırır.

Geleneksel ağlarda karşılaşılan bir başka problem ise kullanılan bant genişliğindeki kanalların/frekansın efektif seçilmesi işlemidir. Sahadaki trafik yoğunluğu veya öncelikli araç geçişi gibi durumlarda servis kanalları arasında anahtarlama veyahut kontrol kanalının dinamik tahsis edilebilmesi için araçlar üzerinde ayrı yazılımlar eklenmesi gerekmektedir. Yazılım tanımlı araçsal ağlar, mimari çalışma yapısına göre araçların üzerinde bulunan farklı arayüzler (DSRC, wi-fi, 4G, LTE vb.) kontrolörden gelen akışlar doğrultusunda dinamik olarak kanal ve frekans seçimi yapabilirler.

Araçlar ve yol kenarı birimlerindeki bu iletişim arayüzlerinin gücünü ayarlayıp, trafik yoğunluklarına göre iletişim aralığını değiştirebilirler.

Bu tez kapsamında, ayrık ve koordineli kavşak yapıları için önerilen iki aşamalı SDN temelli VANET mimarisinde, kavşak içlerindeki araçlar ve RSU cihazları, gerek kendi aralarındaki iletişim gerekse sinyalizasyon sunucusu ile olan iletişimlerinde net ve efektif veri aktarımı için SDN etmen olarak modellenmişlerdir. Her iki SDN etmen cihaz üzerinde de, ağın genel durumu ve sinyalizasyon işlemleri neticesinde elde edilen yeni değerlere göre SDN kontrolör tarafından kendilerine gelen akış girdilerinin işleneceği akış tabloları oluşturulmuştur. Kavşak içlerindeki cihazların SDN etmen olarak ayarlanması, hibrid iletim modunun tercih edilmesi ve veri düzlemlerinin kullanım şekilleriyle birlikte, bu tez çalışmasında önerilen SDN temelli VANET mimarisi trafik sinyalizasyonu haricinde rota hesaplama, park yönetimi, şerit takip gibi birçok akıllı ulaşım sistem uygulamasına altyapı oluşturacaktır.

Tezin bu bölümünde genel olarak, tez kapsamında çalışılan akıllı ulaşım sistemleri, trafik sinyalizasyonu, araçsal ağlar, yazılım tanımlı ağlar ve yazılım tanımlı araçsal ağlar konularında mimari ve çalışma yapıları hakkında bilgiler verilerek, bu konular üzerinde yapılan akademik ve ticari çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca tezin bu bölümünde bu alt konuların tezin hangi aşamalarında kullanıldıklarından ve birbirleriyle olan bağlantılarından da bahsedilmiştir. Tezin bir sonraki bölümünde ise bu konular kapsamında, akıllı ulaşım sistemlerinin alt modülü olan şehir içi trafik yönetim sistemlerinin iletim ve uygulama altyapılarındaki veri akışındaki problemleri çözmek için önerilen iki aşamalı SDN temelli VANET mimarisi ve bu mimari üzerinde önerilen trafik sinyalizasyon uygulamalarından bahsedilecektir.

### **BÖLÜM 3. ŞEHİR İÇİ TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN SDN TEMELLİ VANET MİMARİSİ**

Gün geçtikçe artan araç sayısı ve sınırlı kavşak/yol kapasiteleri sebebiyle, büyük şehirlerdeki ayırık ve koordineli kavşak yapıları üzerinde çalışan trafik yönetim sistemleri günümüz trafik ihtiyaçlarını istenen servis kalitesinde karşılayamamaktadırlar [1-6]. Özellikle bu sistemlerin iletim ve uygulama katmanlarındaki veri çevrim modüllerinde yaşanan sıkıntılara çözüm getirebilmek adına bu tez çalışmasında, literatür ve pratikte yapılan çalışmalardan farklı olarak iki aşamalı bir SDN temelli VANET mimarisi sunulmuştur. Günümüz ayırık ve koordineli kavşak yapıları üzerinde oluşabilecek dinamik trafik ve ağ senaryolarına karşın gerçek zamanlı ve uçtan-uca iletim sağlayan bu SDN temelli VANET mimarinin tüm aşamaları, uluslararası AUS mimari standartlarına göre esnek, ölçeklenebilir ve programlanabilir olarak tasarlanmıştır.

Bu kapsamda tezin bu bölümünde, önce şehir içi kavşak ve faz yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin genel gösterimi verildikten sonra, önerilen bu modelin ve bu model üzerinde çalışacak trafik ve ağ senaryolarının simülasyon ortamlarında nasıl gerçekleştirildiği anlatılmaktadır. Daha sonra çalışmanın ilk aşaması olan ayırık kavşak yapıları için önerilen mimari hakkında bilgi verilerek, bu mimarinin trafik yönetim sistemlerinin veri çevrim modülleri içerisinde nasıl gerçekleştirildiği ve ilgili veri modüllerindeki paket yapılarından bahsedilecektir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, günümüz farklı kavşak ve faz yapıları üzerinde, değişken trafik ve ağ senaryolarına istenen servis kalitesinde cevap verebilen gerçek zamanlı ve hibrid hesaplama (merkezi ve sis hesaplama) mantığına dayalı uçtan-uca iletim sunan SDN temelli VANET mimarisiyle ilgili bilgi aktarılarak, bu yapının trafik yönetim sistemlerinin veri çevrim modüllerine göre nasıl modellendiği ve ilgili veri çevrim modüllerindeki paket yapılarından bahsedilecektir.

### 3.1. Önerilen SDN temelli VANET Mimarisinin Genel Yapısı

Yapılan tez çalışmasında, önerilen SDN temelli VANET mimarisi, mevcut sistemlerde olduğu gibi kavşak ve merkez modeli olmak üzere iki yapıdan oluşmaktadır. Şekil 3.1.'de çalışma yapısı verilen mimari önerisine göre (hem ayrık hem de koordineli kavşaklar için), kavşak modelinde SDN katmanlı mimarinin altyapı ve veri düzlemleri bulunmakta iken, merkez modelinde ise kontrol ve uygulama düzlemleri bulunmaktadır. Önerilen bu model, ONF (Open Networking Foundation) tarafından önerilen SDN mimari hiyerarşisi ve trafik yönetim sistemlerinin veri çevrim modülleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda mimarinin oluşturulmasında sırasıyla;

1. Trafik senaryolarının çalıştırılacağı kavşak altyapılarının oluşturulması ve iletim elemanlarının birbirleri arasındaki iletişimleri,
2. Kavşak yapılarının merkezi model ile iletişimin sağlayan SDN ağ yapısının oluşturulması,
3. Ağın yönetiminin sağlandığı kontrol düzlemi ve sinyalizasyon hesaplarının yapıldığı merkez modelinin oluşturulması

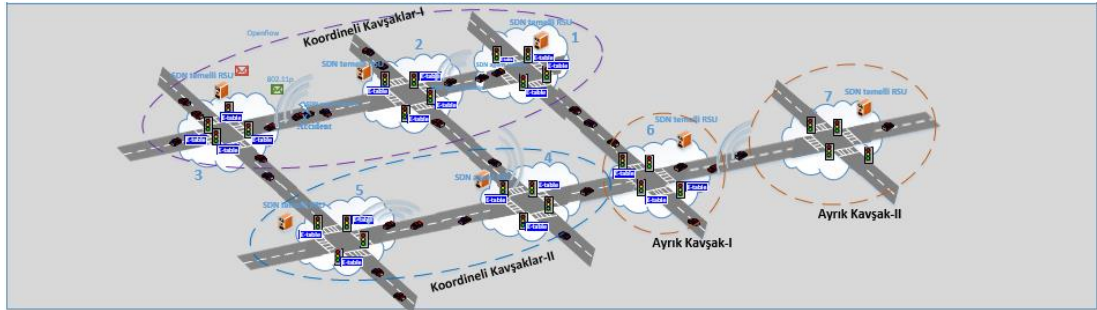
işlemleri anlatılacaktır.





### 3.1.1. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin kavşak yapısı

Şekil 3.1’de önerilen SDN temelli VANET mimarisinin kavşak/altyapı katmanında, SDN etmene sahip araçlar, SDN etmenli RSU cihazı, trafik lambaları bulunurken, bu cihazlar trafik verilerinin sahadaki araçlardan merkeze aktarılmasındaki veri toplama ve veri ayrıştırma modüllerini icra etmektedirler. Kavşak yapısının modellenmesi için çalışmamızda SUMO ve NS2 benzetim platformları birlikte kullanılmıştır. Şekil 3.2.’deki kavşak yapılarının modellenmesinde, bünyesinde çok farklı kavşak ve faz yapılarını barındıran Sakarya/Adapazarı şehir merkezi model alınmıştır.

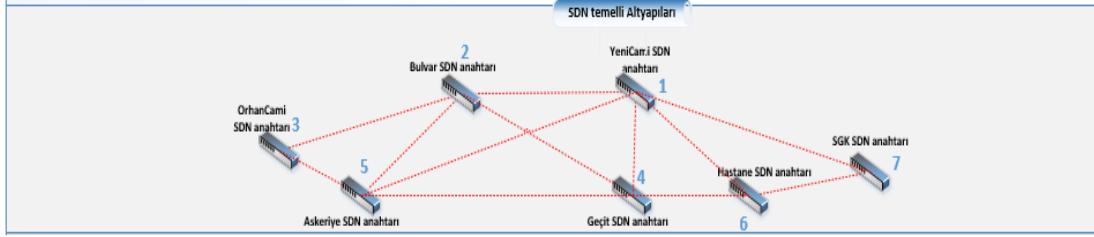


Şekil 3.2. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin kavşak yapısı

### 3.1.2. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin SDN ağ yapısı

Sakarya/Adapazarı kavşak yapıları model alınarak günümüz şehir içi kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin veri düzlemini ise her kavşakta bulunan SDN anahtar cihazları oluşturmaktadır. Bu SDN anahtar cihazlar birbirlerine karmaşık bir yapıda bağlanmıştır. Kendi aralarındaki haberleşme ise bir WAN ağı (DSL, 3G, LTE, metro Ethernet vs.) üzerinden SDN kontrolör vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.

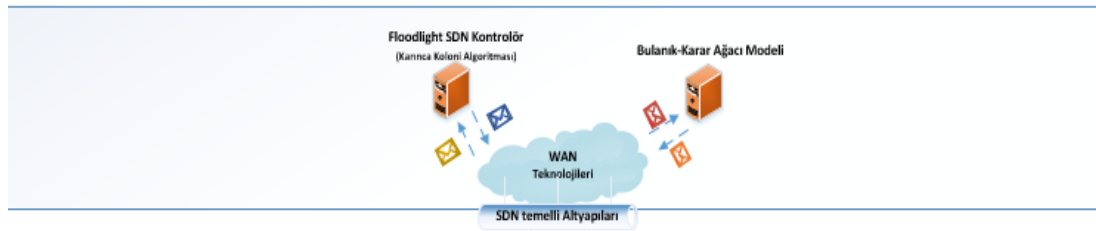
SDN anahtar cihazlar, önerilen modelde kendilerine gelen paketlerin standardizasyonu işlemini yapan veri ayrıştırma modülünde kullanılmaktadırlar. Araçlardan elde edilen trafik verilerinin SDN etmen RSU’ dan, merkezdeki SDN kontrolöre kadar olan iletimi MiniNet sanallaştırma platformunda gerçekleşmiştir. Önerilen mimarinin SDN ağ yapısı Şekil 3.3.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin SDN ağ yapısı

### 3.1.3. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin merkez modeli

Son olarak önerilen mimarinin merkez modelinde ise, SDN mimarisinin kontrol ve uygulama düzlemleri yer almaktadır. Kontrol düzleminde Floodlight kontrolörü bulunan sistemin uygulama düzleminde ise hesaplamalı tekniklere dayalı bir trafik sinyalizasyon uygulaması yer almaktadır. Bu yapılar trafik yönetim sistemlerinin veri işleme ve servis dağıtım modüllerine karşılık gelmektedirler. Önerilen mimarinin merkez modeli Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



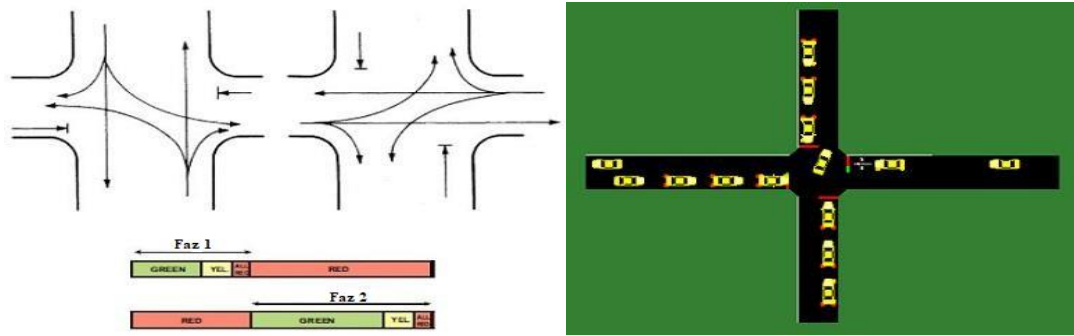
Şekil 3.4. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin merkez modeli

### 3.2. Önerilen SDN Temelli VANET Mimarısının Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, şehir-içi trafik yönetim sistemleri (hem ayrık hem de koordineli kavşaklarda) için önerilen SDN temelli VANET mimarilerin her ikisinin de modelleme ve simülasyon ortamları aynı şekilde oluşturulmuş ve uygulanmıştır. Bu kapsamda, bu bölüm kendi içerisinde bir önceki bölümle de bağlantılı olarak, kavşak yapıları, trafik senaryolarının oluşturulması ve simülasyonların çalıştırılması, son olarak da SDN ağ yapısının oluşturulması olarak 3 ana başlık altında anlatılmıştır [52-56].

### 3.2.1. Şehir içi kavşak yapılarının oluşturulması

Şehir içlerindeki ayırık veya koordineli kavşak tiplerinde 1-8'e kadar kullanılan farklı faz çeşitleri mevcuttur. Faz sayısının artması o bölgedeki araç trafiğinin daha net yönetilebilmesi anlamına gelmekle birlikte her faz için optimal yeşil ışık süre ve sırası ayarlanacağından çok fazla bantgenişliği ve maliyet gerektirmektedir. Bunun için literatürde birçok senaryoyu kapsayabilecek 2 veya 4 fazlı sistemler tercih edilmektedir. Yapılan tez çalışmasında ise Şekil 3.1.'deki 2, 3 ve 4 fazlı ve 4 yollu ayırık ve koordineli kavşak sistemleri ele alınmıştır. Aşağıdaki şekilde 4 yollu-2 farklı faz yönüne sahip olan bir ayırık kavşak altyapısının SUMO platformunda gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. Ayırık kavşak faz yapısı ve SUMO gösterimi

### 3.2.2. Trafik senaryoları ve simülasyonlarının oluşturulması

Şekil 3.1'deki Sakarya/Adapazarı şehir merkezi üzerinde trafik senaryolarının ve araç hareketlerinin modellenmesi için SUMO ve NS2 benzetim ortamları kullanılmıştır. Bu kapsamda trafik senaryolarının ve araç hareketlerinin oluşturulması ve çalıştırılması işlemleri aşağıda listelenmiştir [53-56]:

1. Şekil 3.1.'de gösterilen kavşak yapısının modellenmesi için gerekli harita koordinat bilgileri "OpenStreetMap" üzerinden elde edilerek "map.net.xml" dosyası oluşturulur.

2. Bu harita bilgileri, daha sonra uygulanacak her bir trafik senaryosuna göre “Random\_trip.py” kodu üzerinde değişiklik yapılarak araçların hareket bilgilerini içeren “route.xml” dosyaları oluşturulur.
3. Araçların kendi aralarında veya RSU’lar ile olan iletişimlerinde 802.11p kullanılabilmesi için SUMO ile birlikte çalışan “ns2” kodu çalıştırılmıştır.
4. Son olarak ise “map.net.xml” ve “route.xml” dosyalarının referans ettiği “sumo.cfg” konfigürasyon dosyası simulator üzerinde çalıştırılır.

Şekil 3.6.’da çalıştırılan simülasyonlar neticesinde her bir aracın yolculuk bilgilerini içeren SUMO çıktı dosyası gösterilmiştir. Tez çalışmasında önerilen sinyalizasyon hesaplamalarında, bu çıktı dosyasındaki “arac ID, kavşağa giriş-çıkış hızları ve zamanları, kullanılan şerit ve araç tipi” bilgileri kullanılmıştır.

```
<tripinfos>
  <tripinfo id="2" depart="2.00" departLane="138340948#2_0" departPos="2.72"
departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="7.00"
arrivalLane="138340948#4_0" arrivalPos="2.67" arrivalSpeed="7.99"
duration="5.00" routeLength="10.32" waitSteps="0" rerouteNo="0"
devices="vehroute_2 tripinfo_2" vType="DEFAULT_VEHTYPE" vaporized=""/>
  <tripinfo id="9" depart="9.00" departLane="138340948#6_0" departPos="5.10"
departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="23.00"
arrivalLane="138340948#4_0" arrivalPos="2.67" arrivalSpeed="7.89"
duration="14.00" routeLength="25.28" waitSteps="1" rerouteNo="0"
devices="vehroute_9 tripinfo_9" vType="DEFAULT_VEHTYPE" vaporized=""/>
  <tripinfo id="10" depart="10.00" departLane="215255753#1_0"
departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="30.00"
arrivalLane="215255753#1_0" arrivalPos="216.96" arrivalSpeed="13.69"
duration="20.00" routeLength="211.86" waitSteps="0" rerouteNo="0"
devices="vehroute_10 tripinfo_10" vType="DEFAULT_VEHTYPE" vaporized=""/>
  <tripinfo id="12" depart="13.00" departLane="215255753#1_0"
departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="1.00" arrival="42.00"
arrivalLane="215255753#1_0" arrivalPos="66.53" arrivalSpeed="12.97"
duration="29.00" routeLength="292.74" waitSteps="0" rerouteNo="0"
devices="vehroute_12 tripinfo_12" vType="DEFAULT_VEHTYPE" vaporized=""/>
</tripinfos>
```

Şekil 3.6. SUMO program çıktısı

### 3.2.3. SDN ağ yapısının oluşturulması

Bu kısım, araçlardan gelecek trafik verilerinin SDN etmen RSU vasıtası ile SDN anahtar cihaza ondan sonra da kontrolöre iletilmesi, kontrolör tarafından bu verilerin ilgili modüller aracılığıyla işlenmesi ve son olarak da elde edilen yeni sinyal sürelerinin sahadaki SDN etmen araçlara gönderilmesi işlemlerinden oluşur. Bu işlemler için gerçekleştirilen modelleme adımları şu şekildedir:

1. Sahadaki araçlardan gelen verilerin merkeze taşınması işlemi için MiniNet sanallaştırma platformu kullanılmıştır. Her senaryo için modellenen kavşaklar içerisindeki trafik lambaları (4 adet) ve SDN temelli RSU (1 adet), MiniNet sanallaştırma programında birer sanal host olarak atanmış ve bir SDN anahtar cihazına bağlanmıştır. SDN etmen olarak modellenen RSU, sahadan topladığı bu trafik verilerini bir sonraki bölümde anlatılacak olan TCP raw paketleri haline getirerek OpenFlow packet\_in mesajının içerisinde kapsüllenmesini sağlar ve Floodlight kontrolöre gönderir.
2. Sahadan gelen trafik verilerinin işlenmesi için literatürdeki çalışmaların aksine ayırık kavşak yapıları için önerilen mimari modelinde SDN kontrolör modüllerine dayalı bir interior uygulama olan karınca koloni algoritması geliştirilmiştir. Daha kapsamlı kavşak ve faz yapıları için geliştirilen mimari yapısında ise bir exterior uygulama olan 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli önerilmiştir. Her iki sinyalizasyon uygulamasında da sahadan gelen trafik verilerine göre ilgili kavşaktaki yeni yeşil ışık süreleri ve yeni faz düzeni hesaplanmıştır.
3. Uçtan uca SDN iletim mimarisini sağlamak için sahadaki araçların da SDN etmen mobil düğümler olarak ayarlanması gerekmektedir. Bunun için SUMO benzetim programının “additional file” özelliği kullanılarak içerisinde bir akış tablosu içeren “xml” dosyaları oluşturulmuştur. Bu akış tabloları, kontrolör tarafında araçlardan gelen verilere göre hesaplanan sinyal süre ve durumlarını araçlara iletmek ve araçların ona göre hareket etmelerini sağlamak için dizayn edilmiştir. Şekil 3.7.’de araçlar için oluşturulan xml temelli akış tablosu örneği verilmiştir.

```

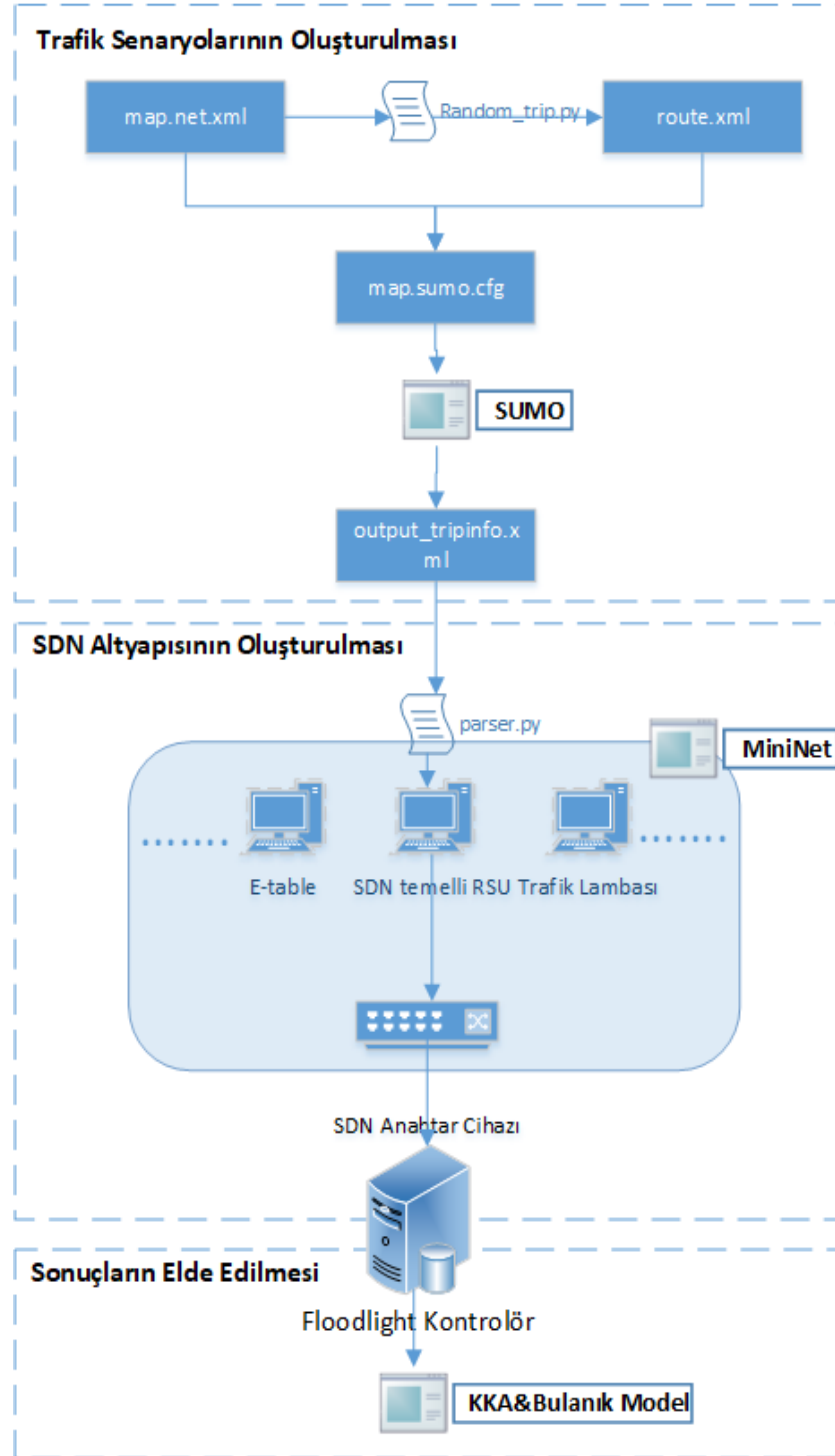
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<flow_table version="1.0" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/net_file.xsd">
  <rule id="1" type="static">
    <InPort value="802.11p"/>
    <VlanID value=""/>
    <Eth_Src_Mac value="SDN_controller"/>
    <Eth_Dest_Mac value="FF:FF:FF:FF:FF:FF"/>
    <Eth_Type value="0x0800"/>
    <IP_Src value="192.168.135.1"/>
    <IP_Dest value="255.255.255.255"/>
    <IP_Prtcl value="0x06"/>
    <TCP-UDP_Src value=""/>
    <TCP-UDP_Dest value=""/>
    <Meta_data intersection_id="" light_id="" light_phase="" light_duration=""/>
  </rule>
  <action id="forward" function="internal">
  </action>
  <statics value="">
  </statics>
</flow_table>

```

Şekil 3.7. Araçların akış tablosu xml kodu

Tez çalışmasında önerilen her iki SDN temelli VANET mimarisinde de, sahadaki araçlardan, yol kenarındaki RSU'ya, kavşak içindeki anahtar cihazdan merkezdeki kontrolör yazılımına kadar tüm düğümlere SDN etmen işlevselliği kazandırılmasının en önemli sebebi ise, kontrolör tarafında gerçekleştirilen sinyalizasyon, yönlendirme, rota hesaplama, park yeri vs birçok trafik uygulamalarının sonuçlarının kolay bir şekilde yine bu ağ elemanlarına aktarılmasının sağlanmasıdır.

Son olarak Şekil 3.8.'de, önerilen SDN temelli VANET mimarisinin yukarıda anlatılan akış çerçevesinde nasıl modellendiği ve benzetim programları arasındaki entegrasyon katmansal olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Önerilen SDN temelli VANET mimarisinin benzetim ortamları üzerinde modellenmesi



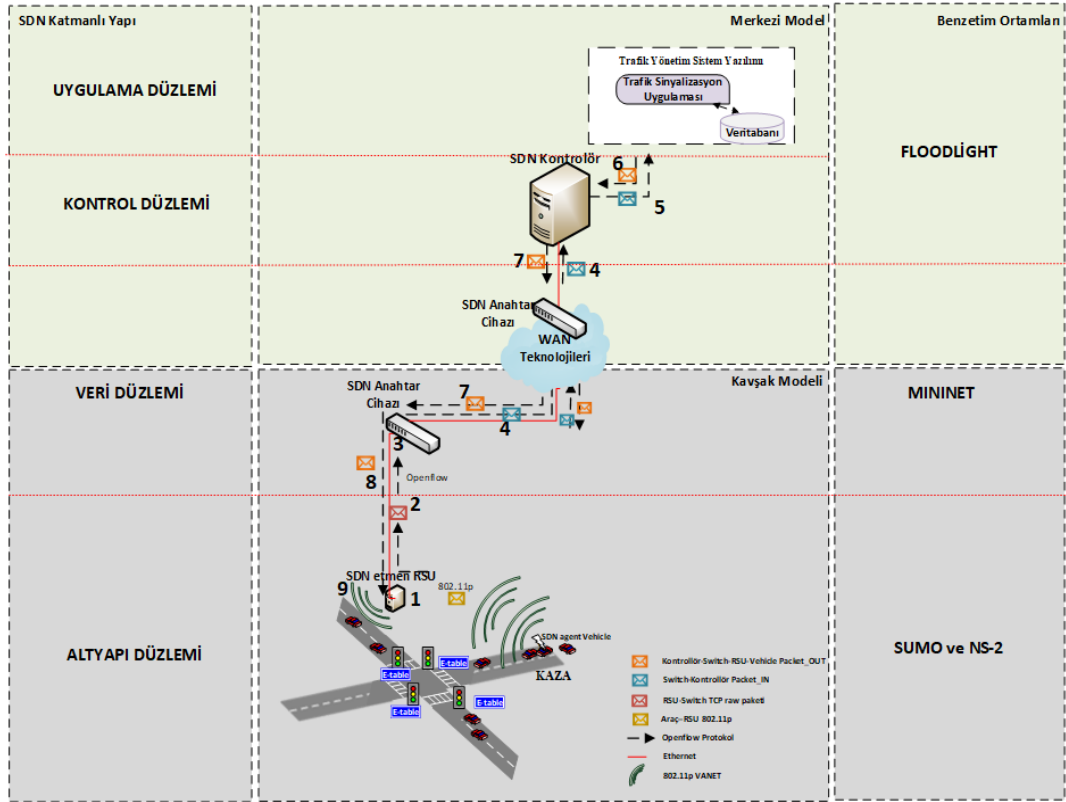
### 3.3. Ayrık Kavşak Yapıları İçin Önerilen SDN Temelli VANET Mimarisi

Bu bölümde, SDN ve VANET mimarilerinin trafik yönetim sistemlerin iletim ve uygulama altyapılarına uygunluğunu ve işlevselliğini gösterebilmek adına, şehir-içi ayrık kavşak yapıları üzerindeki trafik yönetimi için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin çalışma yapısı hakkında bilgi verildikten sonra, mimarinin trafik yönetim sistemlerindeki veri çevrim modüllerine göre nasıl modellendiğinden bahsedilecektir.

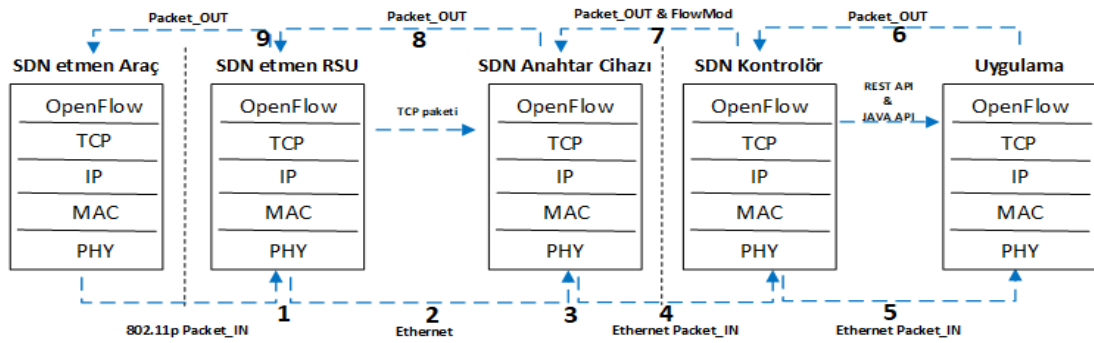
#### 3.3.1. Önerilen mimarinin çalışma yapısı

Şehir içi ayrık kavşak yapıları üzerindeki trafik yönetimi için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin Şekil 3.9.'daki çalışma yapısına göre, önce SDN etmenli RSU sahadaki araçlardan gelen yayın paketlerini kendi üzerindeki akış tablosu ile karşılaştırır (1 numaralı işlem). Akış tablosundaki kontrol işlemlerinden sonra RSU, hem saha hem kavşak trafik bilgilerini içeren bir raw paket oluşturarak bağlı bulunduğu SDN anahtar cihazına gönderir (2 numaralı işlem). Anahtar cihaz da kendi akış tablosunda kontrol işlemi yaptıktan (3 numaralı işlem) sonra Openflow protokolü ile paketi merkezdeki SDN kontrolör yazılımı olan Floodlight'a gönderir (4 numaralı işlem).

Floodlight kontrolörü kendisine gelen paketi ayrıştırarak ilgili trafik verisini trafik sinyalizasyonu, rota hesaplama gibi kavşak yönetim sisteminin modüllerine gönderir (5 numaralı işlem). Burada işlenen veri neticesinde elde edilen sonuçlar önce kontrolör (6 numaralı işlem) ile oradan yine OpenFlow protokolü ile ağdaki SDN anahtar cihaza (7 numaralı işlem), SDN etmen RSU'ya (8 numaralı işlem) ve gezgin SDN düğümlere (araçlara-9 numaralı işlem) gönderilir. Önerilen sistemin uçtan-uca paket iletimi Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



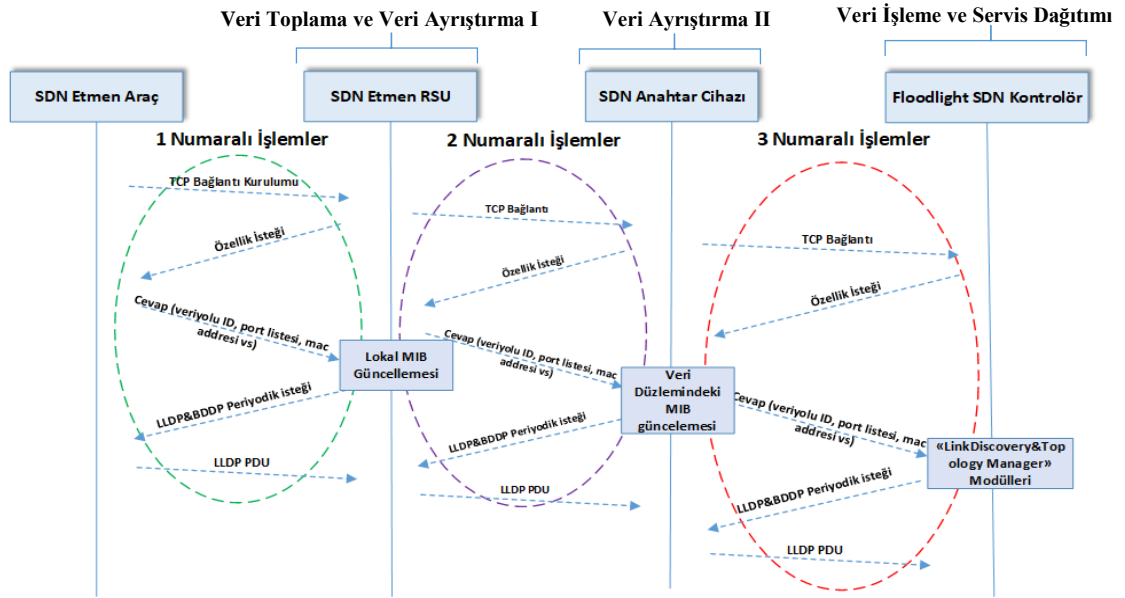
Şekil 3.9. Ayrık kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin çalışma yapısı



Şekil 3.10. Önerilen sistemin uçtan-uca iletim şeması

Mimari içerisinde sahadaki araçlar ve yol kenarındaki RSU cihazlar, merkezdeki kontrolör ve anahtar cihazlarının üzerindeki yükü azaltmak ve SDN ağ paradigmasının avantajlarından yararlanabilmek için SDN etmen cihazlar olarak yapılandırılmıştır. Mimaride kullanılan SDN etmen cihazların kendi aralarında ve kontrolör ile olan iletişimlerinde sahadaki tüm cihazlara kolay erişim ve kontrol için LLDP (Bağlantı Katmanı Keşif Protokolü - Link Layer Discovery Protocol) ve BDDP (Yayın Etki Alanı Keşif Protokolü - Broadcast Domain Discovery Protocol) ile mesajlar

gönderilmektedir. Şekil 3.11.'de LLDP mesajlarının mimari üzerindeki dizge (sequence) diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.11. LLDP ve BDDP'nin önerilen SDN temelli VANET mimarisindeki dizge diyagramı

Şekil 3.11.'deki dizge diyagramına göre SDN etmenli araç, SDN etmen RSU ile (1 numaralı işlemler), veya SDN etmen RSU ,SDN anahtar cihazı ile (2 numaralı işlemler) veya SDN anahtar cihazı merkezdeki kontrolör ile TCP bağlantısı kurmak istediği zaman (3 numaralı işlemler), bağlantının kurulacağı cihaz istekte bulunan cihaza özelliklerini talep eden “özellik istek (feature request)” mesajını gönderir.

Bağlantı kuracak olan cihazlar veri yolu tanıttıcı numarası (datapath ID), port listesi, kendisine bağlı olan host ve komşuluk bilgilerini kontrolöre “cevap (reply)” mesajı içerisinde gönderirler. Bağlantı kurulum aşamasından sonra ise kontrolör periyodik olarak (örneğin 3 sn) SDN anahtar cihazına ve onun üzerinden de SDN etmen RSU cihazına LLDP ve BDDP isteği gönderir. SDN etmen RSU da bu gelen istekleri yayımsal olarak sahadaki SDN etmen araçlara gönderir. “Topoloji Yöneticisi” modülü ise, “Hat Keşfi” modülünden elde edilen bilgilere istinaden ağın genel topolojisini çıkarır.

### 3.3.2. Önerilen mimarideki veri çevrimi

Bu bölümde, ayrıık kavşak yapılarındaki trafik yönetimi için önerilen SDN temelli VANET mimari yapısının, trafik yönetim sistemlerinin her bir veri çevrim modülünü gerçekleyen adımları anlatılacaktır.

#### 3.3.2.1. Veri toplama ve ayrıştırma

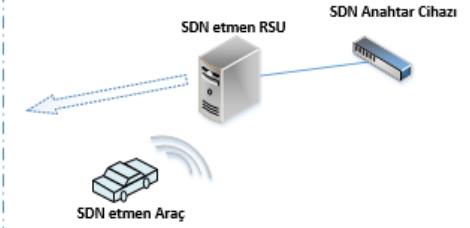
Sahadaki araçlardan kavşak içindeki RSU'ya kablosuz olarak gelen 802.11p paket ve veri tipleri merkeze iletilmeden önce üzerlerinde, anlamlandırma ve filtrelemeye gerek kalmadan yorumlanabilen, yönetimi kolay formatlara dönüştürmek ve de kablolu iletim ortamlarında kolayca aktarılabilmelerini sağlayacak işlemlerin yapılması gerekmektedir. Bu sebeple çalışmanın bu kısmında kavşak yönetim sistemlerinin veri toplama ve ayrıştırma bölümlerinin kendi mimarimiz içerisinde nasıl işlendiğiyle ilgili bilgiler verilecektir.

Mimarimizin veri toplama kısmında VANET ağ mimarisi tercih edilmiştir. Buna göre kavşak içlerindeki araçlar id, konum, hız, kavşağa giriş ve çıkış zamanı, gecikme gibi trafik bilgilerini IEEE 802.11p protokolü ile yayınsal olarak SDN etmenli RSU cihazına aktarırlar. Sahadan gelen verilerin, RSU'lardan SDN anahtar cihazına, SDN anahtar cihazından da kontrolöre aktarılması işlemleri için ise 2 ayrı veri ayrıştırma modülü kullanılmıştır. İlk ayrıştırma modülünde, RSU cihazı sahadan gelen yayın trafik paketlerini kendi üzerindeki Şekil 3.12.'de verilen akış tablosundaki Ethernet source mac (araç id) alanı ile karşılaştırır. Eğer daha önceden o aracın kaydı var ise, RSU gelen paketi 802.11p modülünden kavşak içerisindeki araçlara VANET yapısına göre geri gönderir. Eğer gelen paketin daha önceden kaydı yok ise (yani kavşağa yeni giren araçlar) RSU, kendi akış tablosuna aracın bilgilerini ekleyerek, kendi üzerlerindeki bilgileri de (kavşak id, ışık durumu, zaman) Şekil 3.13.'deki TCP raw paketi içerisine ekler ve ikinci ayrıştırma modül işlemlerinin gerçekleştirileceği SDN anahtar cihazına gönderir.

2. veri ayrıştırma modülünde ise SDN anahtar cihazı kendisine bağlı kavşak içindeki RSU'dan gelen paketleri kendi akış tablosundaki Şekil 3.14'de gösterilen meta veriye göre değerlendirir. Meta veri, Şekil 3.13.'deki RSU tarafından üretilen TCP paketinin Openflow packet\_in mesajı içerisinde kapsülленerek tutulduğu kısımdır. SDN anahtar cihazı bu meta veri içerisindeki her aracın tanıttıcı numarasına (id) göre karar verir (Şekil 3.14.). Eğer başka bir RSU'dan ilgili araç ile ilgili bir girdi var ise, anahtar cihaz eşleşme olduğunu anlayarak gelen paketi elimine eder. Eşleşme olmaması durumunda ise daha önceden oluşturulan TCP paketi Şekil 3.15.'deki Openflow protokolünün "packet\_in" mesaj tipi içerisinde kapsülленerek merkezdeki Floodlight kontrolör yazılımına iletilir. Böylelikle sahadan merkeze veri toplama ve ayrıştırma işlemleri tamamlanmış olur.

### 3.3.2.2. Veri işleme ve servis dağıtımı

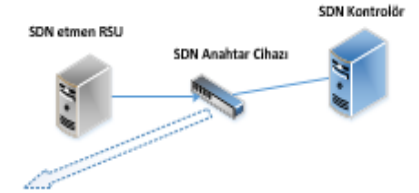
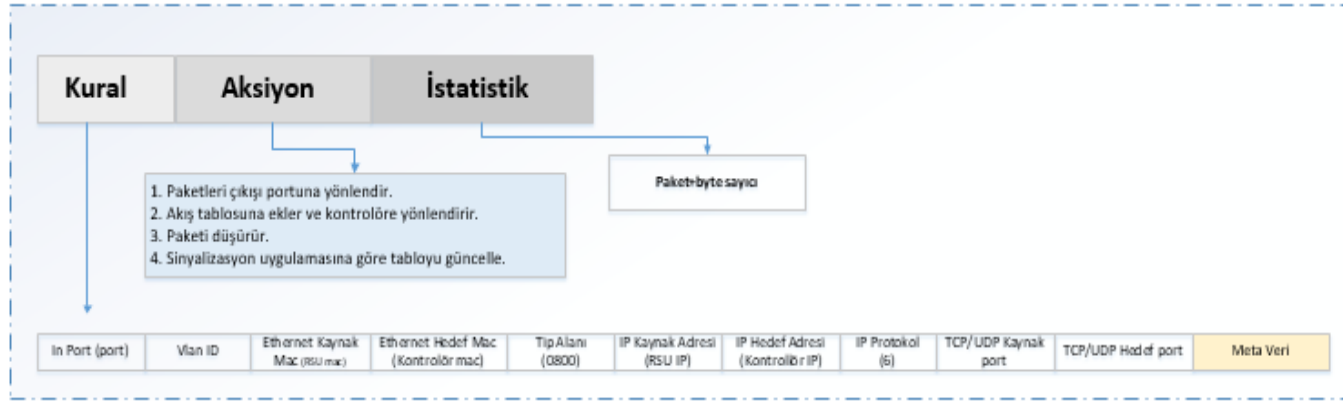
SDN kontrolör kendisine gelen packet\_in mesajlarını pars ettikten sonra "tcp.payload" metodu ile ilgili verileri elde eder ve bir dahili (interior) uygulama olarak geliştirilen karınca algoritmasına aktarır. Bölüm 4'de detaylarıyla anlatılacak karınca koloni algoritması SDN kontrolörün "Topoloji Yöneticisi" modülü ve "Hat Keşfi" modülü kullanılarak geliştirilmiştir. KKA'nın çalışması neticesinde elde edilen yeni yeşil ışık durumu ve sürelerinin sistemdeki SDN anahtar, SDN etmenli RSU ve SDN etmen araçlara geri gönderilmesi gerekmektedir. SDN anahtar ve RSU cihazı trafik sinyalizasyon cihazlarını ayarlamak için, SDN etmen RSU ise SDN etmen araçlara VANET mimarisinin trafik verimliliği anlamında bilgi akışı sağlamak için bu sonuçlara ihtiyaç duyar. Kontrolör tarafından çalıştırılan KKA'nın üretmiş olduğu değerler için Şekil 3.16.'daki gibi yeni bir TCP raw paketi oluşturulur ve Openflow protokolün "packet\_out" mesajı ile içerisinde Şekil 3.17.'deki gibi kapsülленerek SDN anahtar cihazına gönderilir. Anahtar cihazı akış tablosuna yeni kayıt girişi yaptıktan sonra "packet\_out"u hem port 1'den SDN etmen RSU cihaza gönderir hem de packet\_out mesajını decapsule ederek içerisinde sistemin yeni yeşil durum ve süreleri olan TCP paketini elde eder ve de kendisine bağlı olan trafik lambalarına gönderir. RSU cihazı kendisine gelen packet\_out mesajını hem 802.11p modülü vasıtasıyla sahadaki araçlara yollar, hem de kendi üzerindeki akış tablosunu güncellemiş olur.



Şekil 3.12. SDN etmen RSU akış tablosu (SDN etmen araçtan-SDN etmen RSU)

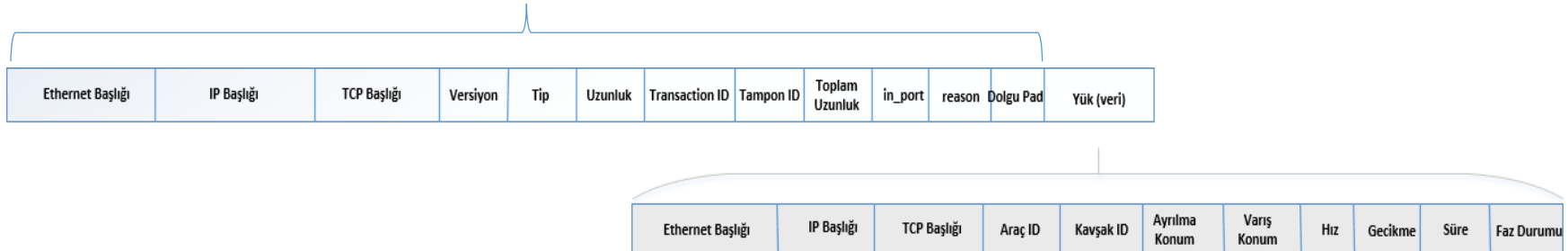
Ethernet Başlığı	IP Başlığı	TCP Başlığı	Araç ID	Kavşak ID	Ayrılma Konum	Varış Konum	Hız	Gecikme	Süre	Faz Durumu
------------------	------------	-------------	---------	-----------	---------------	-------------	-----	---------	------	------------

Şekil 3.13. SDN etmen RSU tarafından üretilen TCP trafik paketi



Şekil 3.14. SDN anahtar cihazı akış tablosu (SDN anahtar-kontrolör)

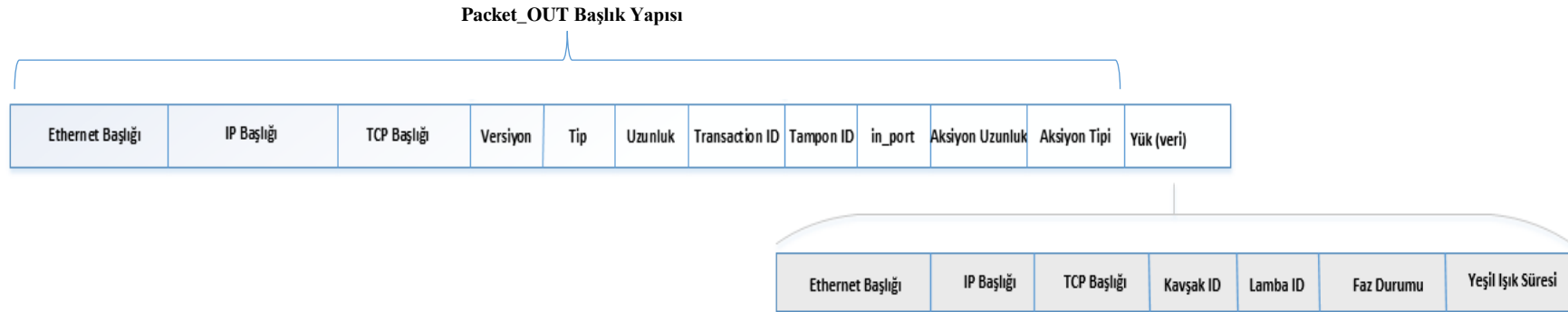
### Packet\_IN Başlık Yapısı



Şekil 3.15. TCP trafik paketi ve packet\_in mesajı



Şekil 3.16. Kontrolör tarafından üretilen TCP paketi



Şekil 3.17. SDN kontrolör tarafından üretilen Packet-out mesajı



### 3.4. Koordineli Kavşak Yapıları İçin Önerilen SDN Temelli VANET Mimarisi

Tez kapsamında şehir içi ayrık kavşak yapıları üzerinde çalışan trafik yönetim sistemlerinin uygulama ve altyapı katmanları için önerdiğimiz ilk SDN temelli VANET mimarisinde, sadece merkezi iletim modu benimsenmiş olup, veri ve kontrol düzlemleri birlikte ele alınarak tek bir kavşak üzerinde sınırlı kapsamdaki trafik senaryoları üzerinde çalışılmıştır.

Tezin bu bölümünde ise, tez çalışmanın ilk aşamasından ve literatürdeki çalışmalardan farklı olarak özellikle günümüz büyük şehirlerindeki farklı kavşak/faz tipleri, dinamik trafik senaryoları ve ağ topoloji değişimlerine bağlı sahadaki trafik lambalarının sinyalizasyonunu (yeşil ışık süresi ve faz düzeni), geliştirilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli ile sağlayabilen, gerçek zamanlı ve hem merkezi hem de sis (fog) hesaplama mantığına dayalı uçtan-uca iletim sunan genişletilmiş bir SDN temelli VANET mimarisi sunulmuştur.

Bu kapsamda bu bölümde önce koordineli kavşak ve faz yapıları üzerindeki trafik yönetimini için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin çalışma yapısı hakkında bilgi verildikten sonra, mimarinin trafik yönetim sistemlerindeki veri çevrim modüllerine göre nasıl modellendiğinden bahsedilecektir.

#### 3.4.1. Önerilen mimarinin çalışma yapısı

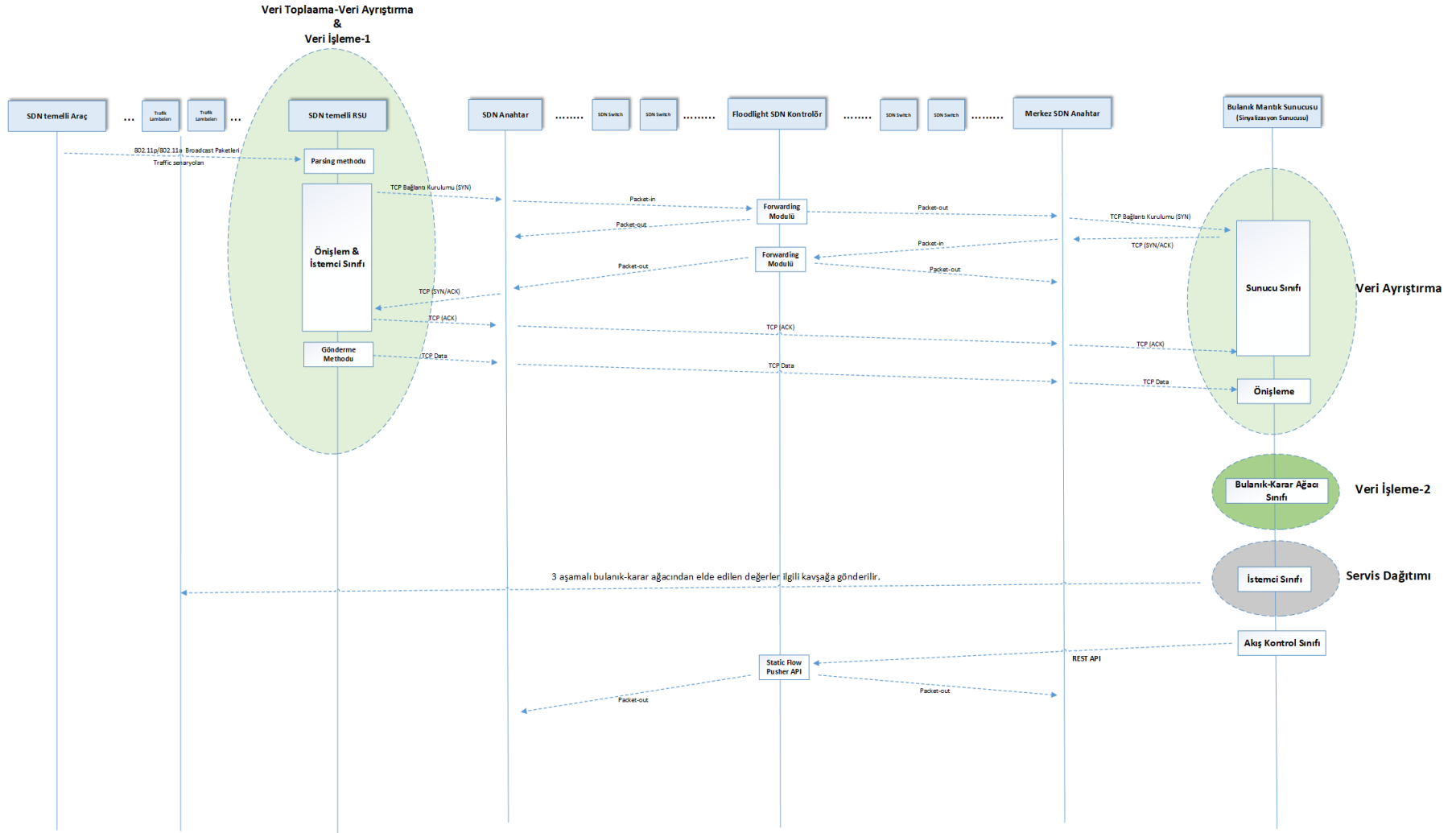
Bünyesinde farklı kavşak ve faz yapılarını barındıran Sakarya/Adapazarı şehir merkezinin model alındığı, günümüz trafik ve ağ ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla önerilen SDN temelli VANET mimarisinin genel görünümü Şekil 3.1.'de verilmiştir. Ayrık kavşak yapısı için önerilen mimari yapısında da olduğu üzere, koordineli kavşak yapıları için önerilen modeldeki trafik lambaları, kavşak yapıları ve trafik yönetim merkezi arasındaki iletişim altyapısı SDN mimarisine göre modellenmiştir. Modelde kavşak içlerindeki trafik lambaları ve SDN etmen RSU'lar, sanal hostlar olarak modellenmiştir. Anahtar cihaz için benzetim ortamında Mininet sanal makinesi içerisinde Open vSwitch yazılımı kullanılmaktadır. SDN kontrolörü için Floodlight

yazılımı, SDN anahtar cihazlar ve SDN kontrolör arasında iletişim için ise OpenFlow protokolü kullanılmaktadır.

SDN iletim mimarisinin gerçekleşmesinden sonra sahadan gelecek trafik yoğunluk bilgilerini elde etmek için VANET mimarisi kullanılmaktadır. Araçlar IEEE 802.11p iletişim karakteristiklerine göre SUMO benzetim ortamında senaryo bazlı modellenmişlerdir. Veri ve kontrol düzlemlerinin birbirinden ayrıldığı bu çalışmada sahadaki SDN etmen araçlardan VANET 802.11p/wi-fi iletim kanalları vasıtasıyla trafik bilgilerini elde eden SDN etmen RSU, merkeze sinyalizasyon hesabı için gönderilecek bulanık model girdileri için TCP paketleri oluşturmaktadır. Merkezi ve sis hesaplama mantığına dayalı hesaplama yapılabilen bu mimari önerisinde SDN etmen RSU'ya bağlı SDN anahtar cihazında oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda, RSU üzerindeki Wi-fi arayüzü ile iletimine devam etmektedir. Merkezdeki bir SDN anahtar cihaza bağlı olan ve bir exterior uygulama olarak geliştirilen bu 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli sahadan gelen trafik verilerine göre dinamik olarak koordineli ve izole kavşakların sinyalizasyon işlemlerini tamamlayacak, gerektiğinde acil durumlar için kontrolör için akış oluşturacaktır.

### **3.4.2. Önerilen mimarideki veri çevrimi**

Bu bölümde, koordineli kavşak ve faz yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimari yapısının, trafik yönetim sistemlerinin her bir veri çevrim modülünü gerçekleyen adımları anlatılacaktır. Şekil 3.1.'de koordineli kavşak ve faz yapıları için önerilen mimarideki veri akışı, Şekil 3.18.'deki dizge diyagramında gösterildikten sonra, ilgili veri çevrim modülleri bu dizge diyagramına göre anlatılacaktır.



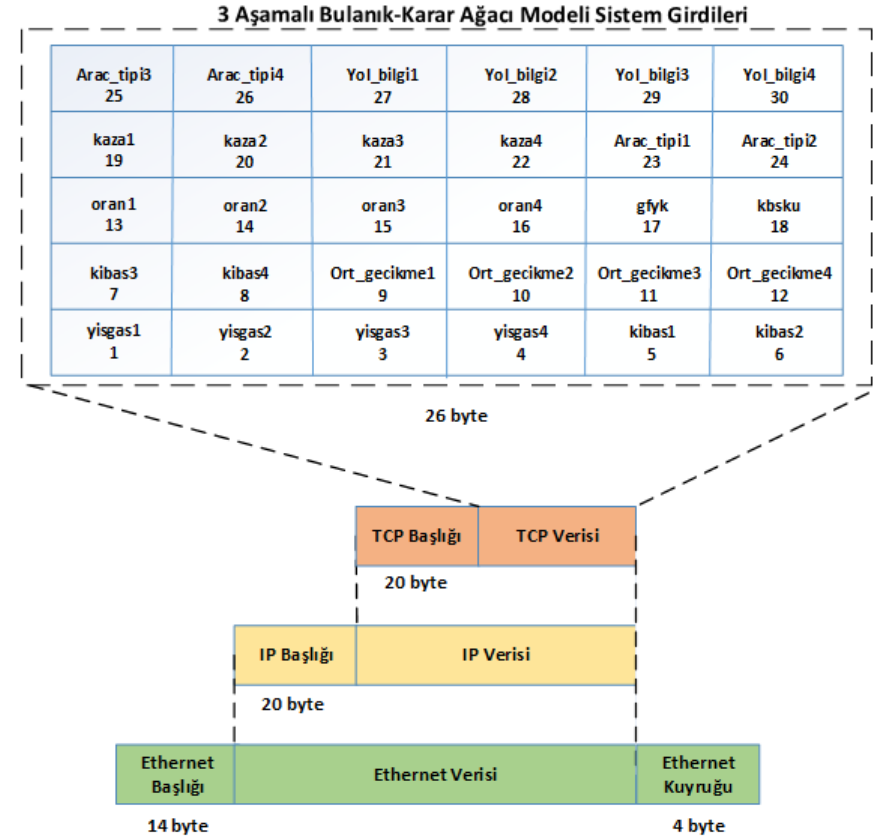
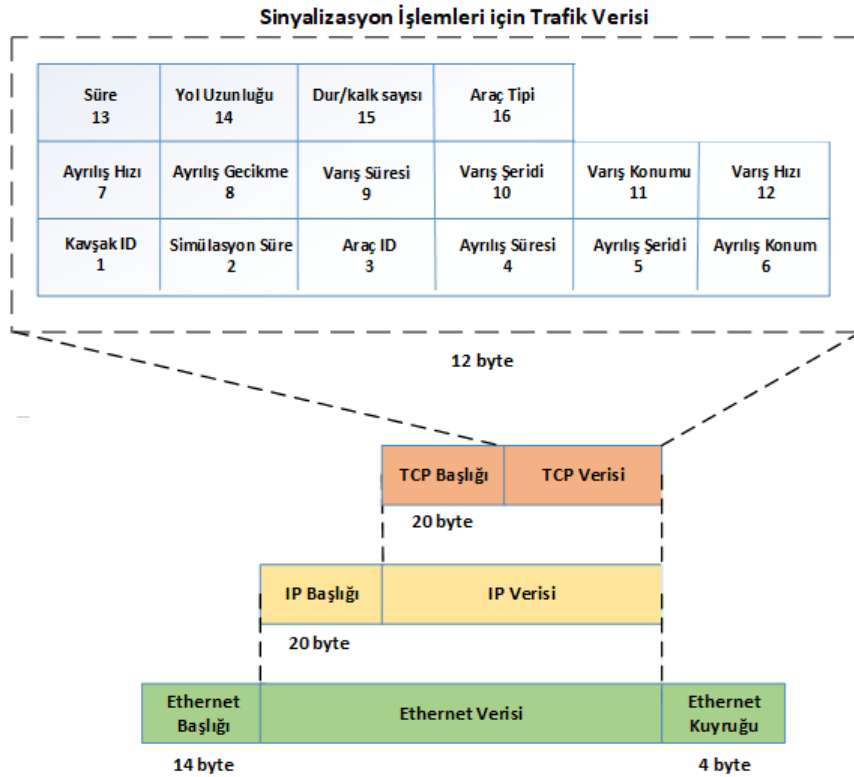
Şekil 3.18. Önerilen SDN temelli VANET mimarisindeki veri akışının dizge diyagramı

### 3.4.2.1. Veri toplama ve ayrıştırma

Şekil 3.18’deki, önerilen SDN temelli VANET mimarisi üzerindeki veri akışı dizge diyagramına göre, SUMO programında gerçekleştirilen her bir trafik senaryosunun çıktısı (output\_trip\_info.xml), MiniNet sanallaştırma ortamında bir sanal host olarak modellenen SDN etmen RSU tarafından pars edilir. Pars etme işleminden sonra önerilen modelin merkezi hesaplama çalışma şekline göre SDN etmen RSU kendisine gelen trafik verilerini Şekil 3.19.a’daki TCP paket yapısı içerisinde merkezdeki sinyalizasyon sunucusuna yollar, merkezi veya sis hesaplama çalışma şekline göre ise SDN etmen RSU kendi üzerinde 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli içerisinde kullanılacak sistem girdilerinin hesaplama işlemlerini (bölüm 4’de) yapar ve daha sonra elde edilen sistem girdilerini Şekil 3.19.b’daki TCP paket yapısı içerisine ekler. İstemci-sunucu mantığı içerisinde merkez anahtar cihazına bağlı olan trafik sinyalizasyon ve yönetimi için geliştirilen bulanık-karar ağacı modeline bağlantı isteğinde bulunur.

Önerilen SDN temelli VANET mimarisi içerisinde senaryo bazlı çalışacak hesaplama göre oluşturulan TCP paketlerinde merkezi hesaplamada her zaman 70 byte’lık paket yapıları oluşturulmaktadır. Şekil 3.19.a’daki merkezi hesaplama yöntemindeki paket yapısı içerisinde kavşak bilgisinden, araç ID, şerit bilgisinden, araç öncelik bilgisi ve aracın kavşaktaki yolculuğu hakkında tüm bilgiler yer almaktadır. Sis hesaplamada ise Şekil 3.19.b’de sadece 4 yaklaşım kolundan oluşan kavşaktaki RSU üzerinde oluşturulan TCP paket yapısı gösterilmiştir. Kavşak yapısına göre boyutu dinamik olarak ayarlanan TCP paketleri içerisinde diğer bölümde anlatılan kavşaktaki her bir yol için bulanık model sistem girdileri bulunur.

Her iki hesaplamalı modelin 3 yöllü el sıkışma TCP yapısının SDN altyapısı içerisinde kontrolör ve anahtar cihazlar arasında olan “packet\_in” ve “packet\_out” yapıları Şekil 3.18.’de verilmiştir. Anahtar cihazlar üzerinde kontrolör tarafında “Forwarding module” vasıtasıyla oluşturulan akışlar ile kaynaktan hedefe yollar belirlendikten sonra, RSU verisini 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeline yollar.

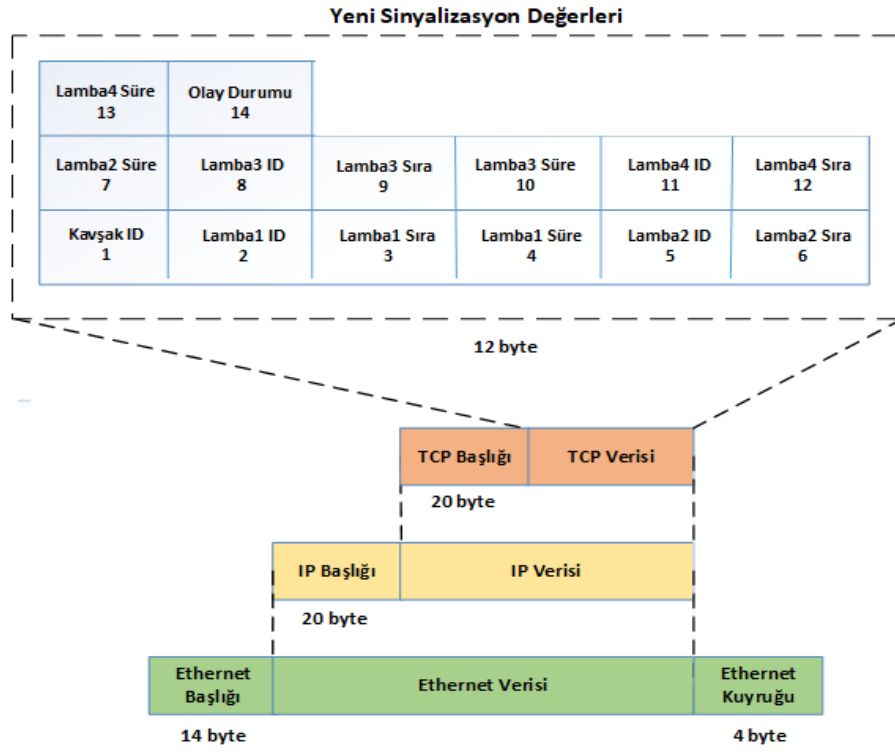


Şekil 3.19. Merkezi ve sis hesaplama yöntemlerine göre SDN etmen RSU üzerinde oluşturulan TCP paket yapıları

### 3.4.2.2. Veri işleme ve servis dağıtımı

3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli ilgili kavşaktaki SDN etmen RSU'dan kendisine gelen trafik verisini pars eder. Sonra elde ettiği bulanık girdilerini detayları Bölüm 4'de anlatılacak olan ilgili bulanık model içerisinde çalıştırarak yeni sinyalizasyon sonuçları (yeşil ışık süreleri ve faz düzeni) bulur. Elde edilen yeni yeşil ışık süreleri ve faz düzeni yine ilgili kavşak modeline iletilir. Senaryo gereği incident (olay) bazlı bir durum söz konusu ise dinamik olarak kontrolör içerisindeki "StaticFlowPusher" modülüne REST API ile bağlanılarak araçların ve RSU'ların kullanacakları yönlendirme algoritmaları ile ilgili akışlar oluşturulur.

3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli, ilgili kavşak yapısı için üretmiş olduğu yeni sinyalizasyon değerlerini Şekil 3.20.'deki gibi yeni bir TCP raw paketi içine ekler ve SDN kontrolör kontrolünde (akış girdisi yenilendiğinde veya süresi dolduğunda) packet\_out içerisinde o kavşaktaki SDN etmen RSU ve SDN anahtar cihazına gönderir. Anahtar cihazı akış tablosuna yeni kayıt girişi yaptıktan sonra (eğer gerekliyse) "packet\_out"u hem port 1'den SDN etmen RSU cihaza gönderir hem de packet\_out mesajını decapsule ederek içerisinde sistemin yeni yeşil durum ve süreleri olan TCP paketini elde eder ve de kendisine bağlı olan trafik lambalarına gönderir. SDN etmen RSU cihazı kendisine gelen packet\_out mesajını hem 802.11p modülü vasıtasıyla sahadaki araçlara yollar, hem de kendi üzerindeki akış tablosunu güncellemiş olur.



#### Merkezi ve Sis Hesaplama

4-yollu ve 4-fazlı bir kavşak yapısı için TCP paket yapısı (70 byte)

Şekil 3.20. 4-fazlı ve 4- yollu kavşak yapısı için yeni sinyalizasyon sürelerini içeren TCP paket yapısı

## **BÖLÜM 4. ŞEHİR İÇİ TRAFİK YÖNETİM SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN SDN TEMELLİ VANET MİMARİSİ ÜZERİNDE GELİŞTİRİLEN SİNYALİZASYON UYGULAMALARI**

Tez kapsamında şehir içi ayrık ve koordineli kavşak yapıları üzerindeki trafik yönetim sistemlerinin uygulama ve altyapı katmanları için önerdiğimiz SDN temelli VANET mimarilerinin veri işleme modüllerinde, trafik yönetim sistemlerinin en önemli çalışma konusu olan trafik sinyalizasyonu ele alınmıştır. Tez çalışmasında ilk sinyalizasyon uygulaması olarak, SDN temelli VANET mimarisinin ayrık kavşaklar için önerilen/geliştirilen modelinde, mimarinin trafik yönetim sistemlerine uygunluğu ve işlevselliğinin ölçülebilmesi adına SDN kontrolörün modüllerine dayalı bir karınca koloni algoritması (SDN temelli KKA) geliştirilmiştir. İkinci sinyalizasyon uygulaması olarak da, günümüz büyük şehirlerin karmaşık kavşak ve faz yapıları dikkate alınarak farklı trafik ve ağ senaryoları altında istenen servis kalitesinde hizmet verebilmek adına koordineli kavşak yapıları için önerilen/geliştirilen SDN temelli VANET modeli üzerinde çalışan 3 aşamalı bulanık-karar ağacı (3-BKA) modeli geliştirilmiştir.

Bu bölümde sırasıyla ayrık ve koordineli kavşaklardaki trafik yönetimi için önerilen SDN temelli VANET mimarileri üzerinde çalışan SDN temelli KKA ve 3-BKA sinyalizasyon modellerinin çalışma yapıları hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra önerilen sinyalizasyon modellerinin çalıştırıldığı Sakarya/Adapazarı şehir merkezindeki kavşak ve faz yapıları hakkında bilgi verilecektir. Son olarak da önerilen sinyalizasyon uygulamalarının literatürdeki diğer sinyalizasyon teknikleri ile olan performans karşılaştırmaları detaylı şekilde anlatılacaktır.



#### 4.1. Ayrık Kavşak Yapılarındaki Trafik Sinyalizasyonu İçin Önerilen SDN Kontrolör Modüllerine Dayalı KKA Uygulaması

Günümüz trafik sinyalizasyon sistemlerinde kullanılan sabit zamanlı sinyalizasyon ve Webster eşitliğine dayalı tekniklerin özellikle doymuş ve değişken trafik şartlarında yeterli performansı sağlayamamasından dolayı artık günümüzde hesaplamalı teknikler kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde sinyalizasyon hesaplamalarında bulanık mantık, yapay sinir ağı, karınca koloni algoritması, parçacık sürü optimizasyonu gibi bir çok yapay zeka tekniği kullanılarak yapılan çalışmalar vardır.

Bu bölümde önce literatürde kullanılan ve bu çalışmada performans karşılaştırmaları için seçilen hesaplamalı sinyalizasyon tekniklerinden bahsedilecek, bu sistemlerin trafik sinyalizasyonu işlemlerinde nasıl uygulandığı anlatılacaktır. Daha sonra SDN temelli KKA'nın çalışma yapısı ve ayrık kavşak yapıları için önerdiğimiz SDN temelli VANET mimari üzerinde uygulanılışından bahsedilecektir.

##### 4.1.1. Literatürde kullanılan sinyalizasyon teknikleri

Bulanık-mantık yaklaşımı, Bir sistemdeki ya da kavramdaki belirsizlik bulanıklık olarak adlandırılır. Belirsiz ve kesin olmayan bilgilere dayanarak etkili sonuçlar üreten bulanık mantık, kontrol modellerini kolaylıkla gerçekleştirme olanağı sağlar. Genel küme denklemi kısmi üyeliğe izin verirken ortaya bulanıklık çıkar. Geleneksel küme denklemi Denklem 4.1'de, bulanık küme teorisi ise Denklem 4.2'de verilmiştir [31,40]. Bu çalışmada performans karşılaştırması için ortalama gecikme, kuyruk uzunluğu sistem girdisi, yeşil ışık süresi de sistemin çıktısı olarak alınmıştır. Bulanık modelde yeşil ışık süresini belirleyebilmek için Mamdani modeline göre 25 adet kural (her girdi 5 üyelik fonksiyonuna sahiptir) kullanılmıştır.

$$\mu_A(x): x \rightarrow \{0,1\} \quad (4.1)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in X \\ 0 & x \notin X \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \{(x, \mu_A(x)) \forall x \in X\} \\ \mu_A(x): X &\rightarrow [0,1] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Parçacık sürü optimizasyonu, 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından balıkların ve böceklerin sürü şeklinde hareketlerinden esinlenerek tasarlanmış sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Sürüdeki her bir bireye parçacık denir. Parçacık sürü optimizasyonundaki ana amaç, sürüdeki her bir parçacığın kendi durum ve konumunu sürü içerisindeki en optimuma göre ayarlamasıdır. Algoritmanın trafik sinyalizasyonuna uyarlanmasında yeşil ışık süresinin başlangıcından süre sonuna kadarki olan zaman aralıkları sürüdeki parçacıklar olarak atanır ve sahadaki trafik bilgilerine göre en iyi süre bulunana kadar algoritma sezgisel olarak çalışır [31]. Algoritmanın sözde kodu şu şekildedir [57]:

Başlangıç pozisyonları ve hızları ile başlangıç sürüsü oluşturulur.

Döngü:

Her parçacık için;

Uygunluk değerlerini hesapla.

Mevcut durumdan en iyi (pbest) yerel durum bul.

Yerel en iyiler içerisinde küresel en iyi (gbest) seç.

Her parçacık için;

Hızı Denklem 4.3'e, pozisyonu ise Denklem 4.4'e göre güncelle.

Eğer maksimum iterasyona ulaşıldıysa

Döngüden çık

Değilse devam et.

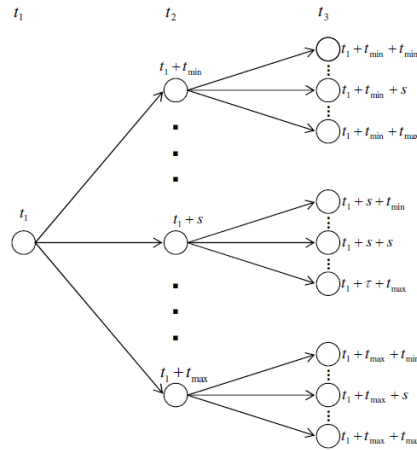
$$V_{id} = W * V_{id} + c_1 * rand_1 * (P_{id} - X_{id}) + c_2 * rand_2 * (P_{gd} - X_{gd}) \quad (4.3)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (4.4)$$

Burada “ $X_{id}$ ” pozisyon ve “ $V_{id}$ ” hız değerlerini verirken,  $rand_1$  ve  $rand_2$  değerleri rasgele üretilmiş sayılardır. “ $P_{id}$ ” ve “ $P_{gd}$ ” ise sürü içindeki en iyi konumları ifade eder. “ $W$ ” atalet ağırlık değeri ve “ $c_1$ ”, “ $c_2$ ” ölçeklendirme faktörleridir.

Karınca koloni algoritması, karıncaların çalışma yapılarından esinlenerek geliştirilmiştir. Önlerine bir engel konulduğunda kendi salgıladıkları feromonları takip edemediklerinden, karıncalar gidebilecekleri iki yoldan birini öncelikle rastsal olarak seçmektedirler. Kısa olan yoldan birim zamandaki geçiş daha fazla olacağından bırakılan feromon miktarı da daha fazla olur. Buna bağlı olarak, zaman içerisinde kısa olan yolu tercih eden karıncaların sayısında artış olur. Belli bir süre sonra tüm karıncalar bu kısa yolu tercih ederler.

KKA'nın trafik sinyalizasyonuna uyarlanması işleminde ise bir faz süresi belli periyotlara ayrılır (1'er saniyelik dilimler) ve bu zaman dilimleri karıncaların hareket noktaları olarak atanır. Şekil 4.1.'de karıncaların sinyalizasyon problemlerindeki hareketleri modellenmiştir [57,58].



Şekil 4.1. Karıncaların sinyalizasyon optimizasyonundaki davranışları

Buna göre:

- Bir karınca  $t$  anında iken mümkün olan tüm düğümlere ( $t + t_{min}$ ,  $t + t_{min} + 1, \dots, t + t_{max}$ ) gidebilir.
- Tüm karıncalar aynı anda harekete başlarlar ve sağındaki düğümlere doğru hareket ederler. Sağ taraftaki bu düğümler bir sonraki sinyal çevrim süresini

ifade eder. Böylece full çevrim süresini bulabilirler. Herhangi bir anda veya belirlenen zamanda,  $t_1$  sonraki çevrim zamanlarının ( $t_2$  ve  $t_3$ ) olası kombinasyonlarını içeren çözüm kümesi olmuş olur.

Literatürde bulanık mantık, parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritma, karınca koloni algoritması vb optimizasyon algoritmaları ve hesaplama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş bir çok sinyalizasyon uygulaması mevcuttur. Trafik yönetim sistemlerinin sinyalizasyon hesaplarında kullanılan tasarım parametrelerinin fazlağı, bu parametrelerin bağlantıları ve sinyalizasyon sistemlerin karmaşık yapılarından dolayı, ayrık kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin sinyalizasyon uygulamasında karınca koloni algoritması tercih edilmiştir.

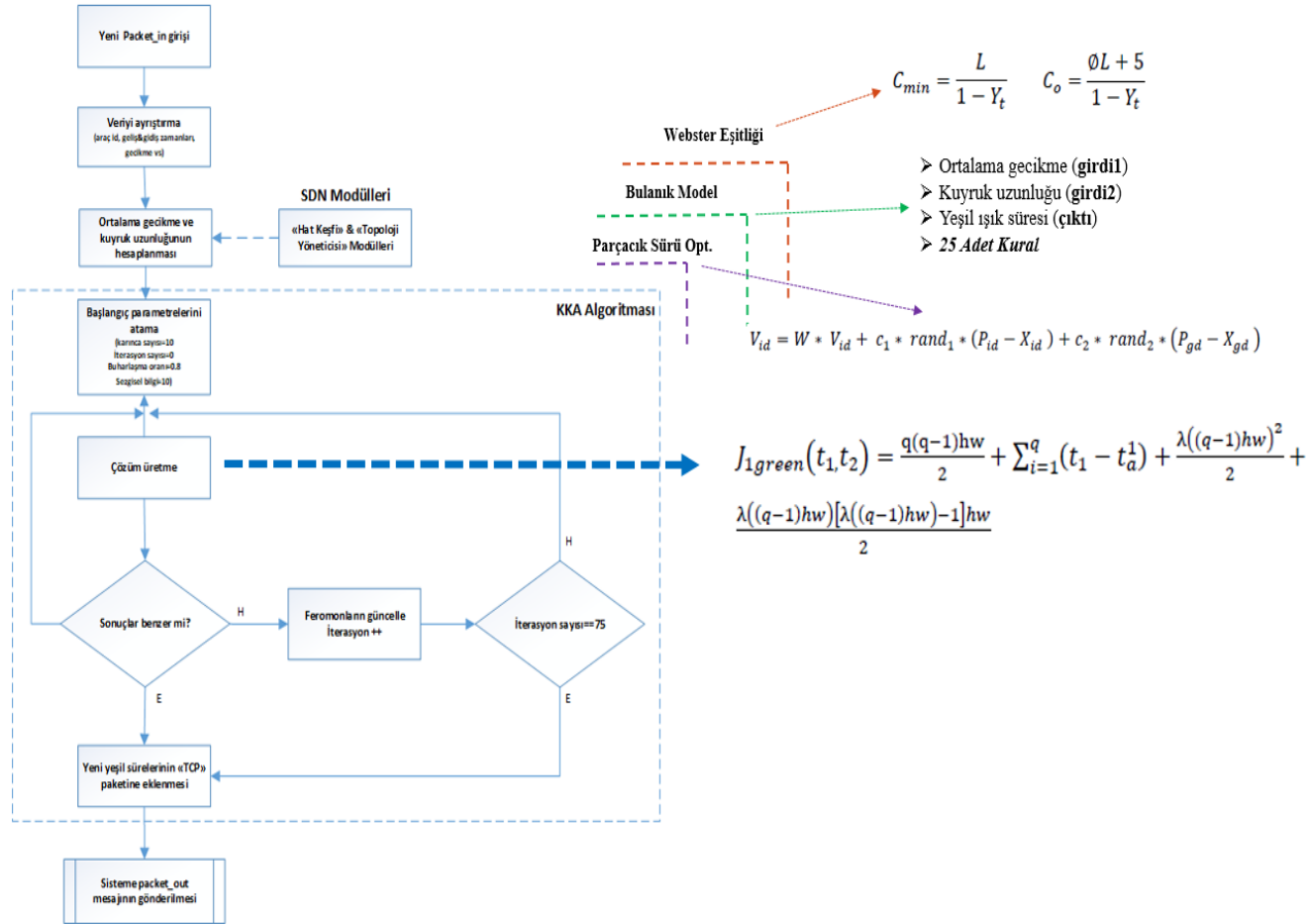
#### **4.1.2. SDN temelli KKA'nın önerilen mimari üzerinde uygulanışı**

Literatürdeki çalışmalar doğrultusunda, çalışmada da, kavşak içi ortalama araç gecikme sürelerinin düşürülmesi ve kavşaktan birim zaman içerisinde geçen araç sayısının artırılması hedeflenmiştir. Bunun için Karınca kolonisi algoritmasına girdi olarak; mevcut trafik kuyruğu (iki faz için de) ve araç gecikme süreleri kullanılmıştır. Algoritma çıktı olarak ise ilgili faz için optimal yeşil ışık süresini ayarlamaktadır. Gerçek zamanlı veri işlemesi için KKA, SDN kontrolör içerisinde bir modül olarak geliştirilmiştir. Algoritmanın akış diyagramı Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

Buna göre SDN anahtar cihazları ve SDN etmenli RSU'lardan gelen trafik bilgileri paket\_in mesajları içerisinde Floodlight kontrolörüne geldikten sonra, paketler parçalanarak gerekli bilgiler elde edilir ve kontrolörün ağdaki düğümleri yönetmekle sorumlu olan iki modülü olan "Hat Keşfi (Link discovery)" ve "Topoloji Yöneticisi (Topology Manager)"a gönderilir. Bu modüller sayesinde bir çevrim süresi içerisinde bir yoldaki kuyruk uzunluğu ve ortalama gecikme tespit edilerek, karınca koloni algoritmasının girdileri olarak işleme alınır. Girdiler elde edildikten sonra, o kavşak için yeni yeşil ışık sürelerinin hesaplanabilmesi için algoritmanın çözüm üretme adımında Denklem 4.5'deki formül kullanılmıştır [16].

$$J_{1green}(t_1, t_2) = \frac{q(q-1)hw}{2} + \sum_{i=1}^q (t_1 - t_a^1) + \frac{\lambda((q-1)hw)^2}{2} + \frac{\lambda((q-1)hw)[\lambda((q-1)hw)-1]hw}{2} \quad (4.5)$$

“ $t_1$ ” başlangıç zamanını ifade ederken, “ $t_2$ ” o kavşaktaki herhangi bir çevrim zamanını ifade eder. Bu iki zaman arasında kavşaktan geçen araçların oluşturduğu kuyruk “ $q$ ” ile ifade edilir. “ $hw$ ” ise araçlar arasındaki boşluk zamanını ifade eder. Bu formül karınca hareketlerine bağlı olarak her iterasyonda tekrar edilir. İterasyonlar neticesinde benzer değerlerin bulunmasıyla, algoritma sonlandırılır. Bu değerlere göre hesaplanan yeşil ışık süresi o kavşağın bir sonraki çevrim zamanı olarak atanır ve ilgili kavşağa gönderilir.



Şekil 4.2. SDN temelli KKA'nın akış diagramı

### 4.1.3. Performans testlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Şehir içi ayrıık kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinin işlevselliğini ölçmek için farklı trafik senaryoları üzerinde performans ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.2.'deki 2 fazlı izole bir kavşak yapısı üzerinde 100 araçtan (az yoğun trafik) 500 araca (yoğun trafik) kadar olan birçok senaryo sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Trafik yoğunlukları uniform dağılım ile oluşturulmuştur. Ayrıca 500 araçtan oluşan araçların yön ve zaman bilgilerinin binom dağılımla üretilerek simülasyon esnasında dinamik olarak değişkenlik gösteren senaryolar da oluşturulmuştur. Tüm senaryolar için sabit olarak atanan başlangıç trafik değerleri Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Trafik senaryoları için başlangıç parametreleri

S.nu	Trafik parametreleri	Değerler (sn)
1	mininum yeşil süresi	5
2	maximum yeşil süresi	30
3	kırmızı süresi	2
4	araçlar arası boşluk süresi	2
5	periyodik LLDP ve BDDP mesajları	3

Ayrıık kavşak yapıları için önerilen mimari üzerinde çalıştırılan SDN temelli KKA, geleneksel mimarilerde kullanılan sabit zamanlı sinyalizasyon, webster eşitliği, geleneksel karınca koloni algoritması, parçacık sürü optimizasyonu ve bulanık mantık yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Karınca koloni algoritmalarında karınca sayısının artırılması daha kesin sonuçlar vereceği için çalışmada her bir trafik senaryosu için 10, 25 ve 50 adet karıncadan oluşan yapılar kullanılmıştır. Çalışmada performans karşılaştırması için 5 parametre belirlenmiştir;

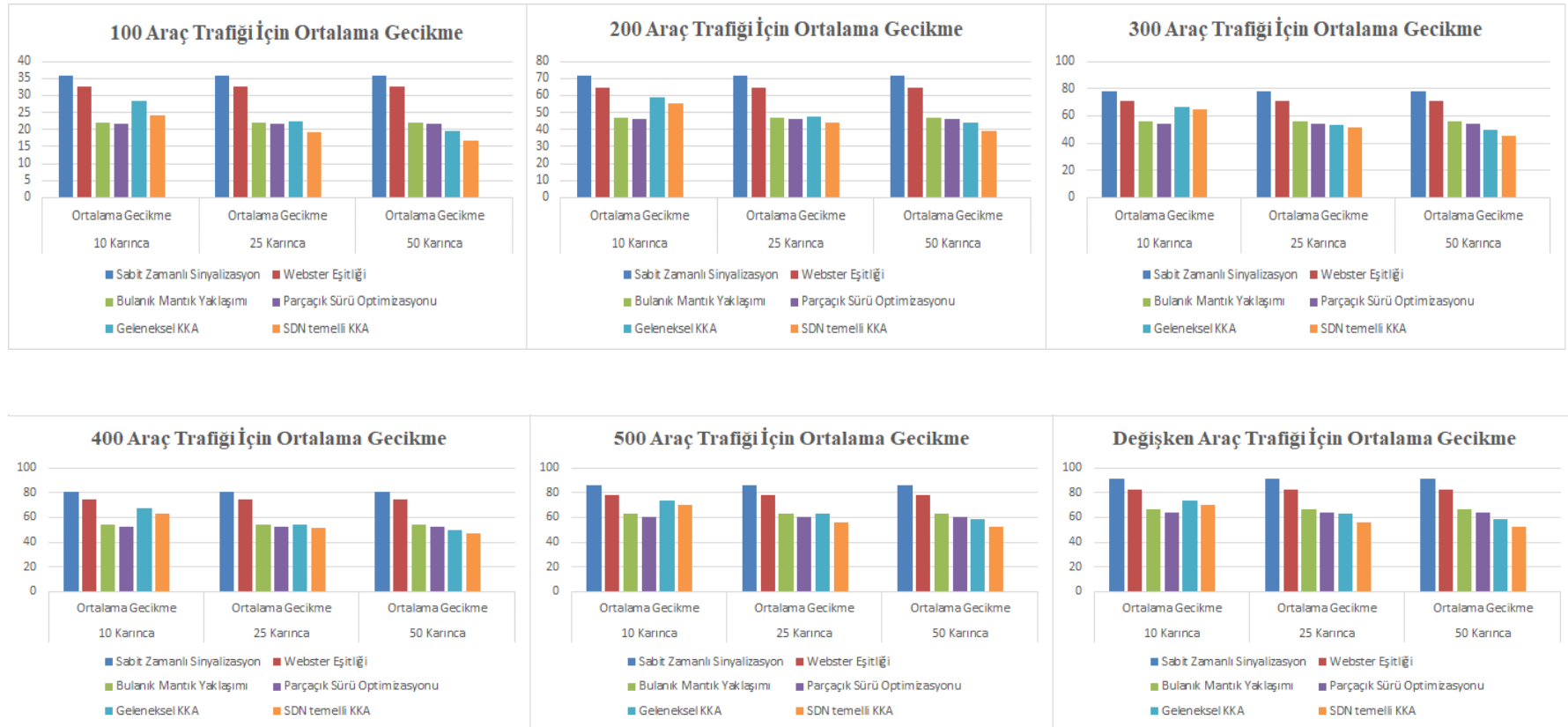
- Ortalama araç gecikmesi; araçların kavşak içerisinde kaybettiği zamanı ifade eder.

- Kuyruk uzunluğu; bir yeşil ışık çevrim süresi içerisinde geçen araç sayısını ifade eder.
- İşlem süresi; Sinyalizasyon işleminin ne kadar sürede tamamlandığını ifade eder.
- Simulasyon süresi; Her bir senaryodaki tüm araçların yolculuklarının tamamladığı toplam zamanı ifade eder.
- Uçtan-uca gecikme; SDN etmen araçtan çıkan paketlerin merkezdeki sinyalizasyon hesabından sonra tekrar SDN etmen araca geri dönmesine kadar geçen süreyi ifade eder.

Şekil 4.3.'de yapılan her bir farklı senaryoda kavşak içlerindeki araçların kavşağa giriş ve çıkışları arasındaki zamanda normal yolculuk süreleri haricinde kırmızı ışık ve trafik sıkışıklığından dolayı yaşamış oldukları ortalama gecikme süreleri (sn) hesaplanmıştır. Buna göre araç sayısının az olduğu senaryolarda yani kavşağın az yoğun (100-200 araç) olduğu durumlarda karınca koloni algoritması kullanılarak yapılan testlerde Webster ve sabit zamanlı hesaplama göre gecikme süreleri arasında %5-10 arasında iyileşme söz konusu iken özellikle doymuş trafik senaryolarında (500 ve dinamik 500 araç) bu iyileşmenin %20-25 arasında olduğu gözlemlenmiştir.

Parçacık sürü optimizasyonu ve bulanık mantık modeline göre bu iyileşme %8-11 arasında daha iyi sonuç vermektedir. Geleneksel karınca algoritması ile SDN temelli KKA arasında ise özellikle karınca sayısı arttığı zaman %5-12 aralığında bir iyileşme söz konusudur. Bu iyileşme, SDN'nin ağdaki tüm cihazlara ve düğümlere direk erişimi ve kontrolü, modüler yapısı ve de merkezi yönetim özellikleri sayesinde sağlanmıştır.



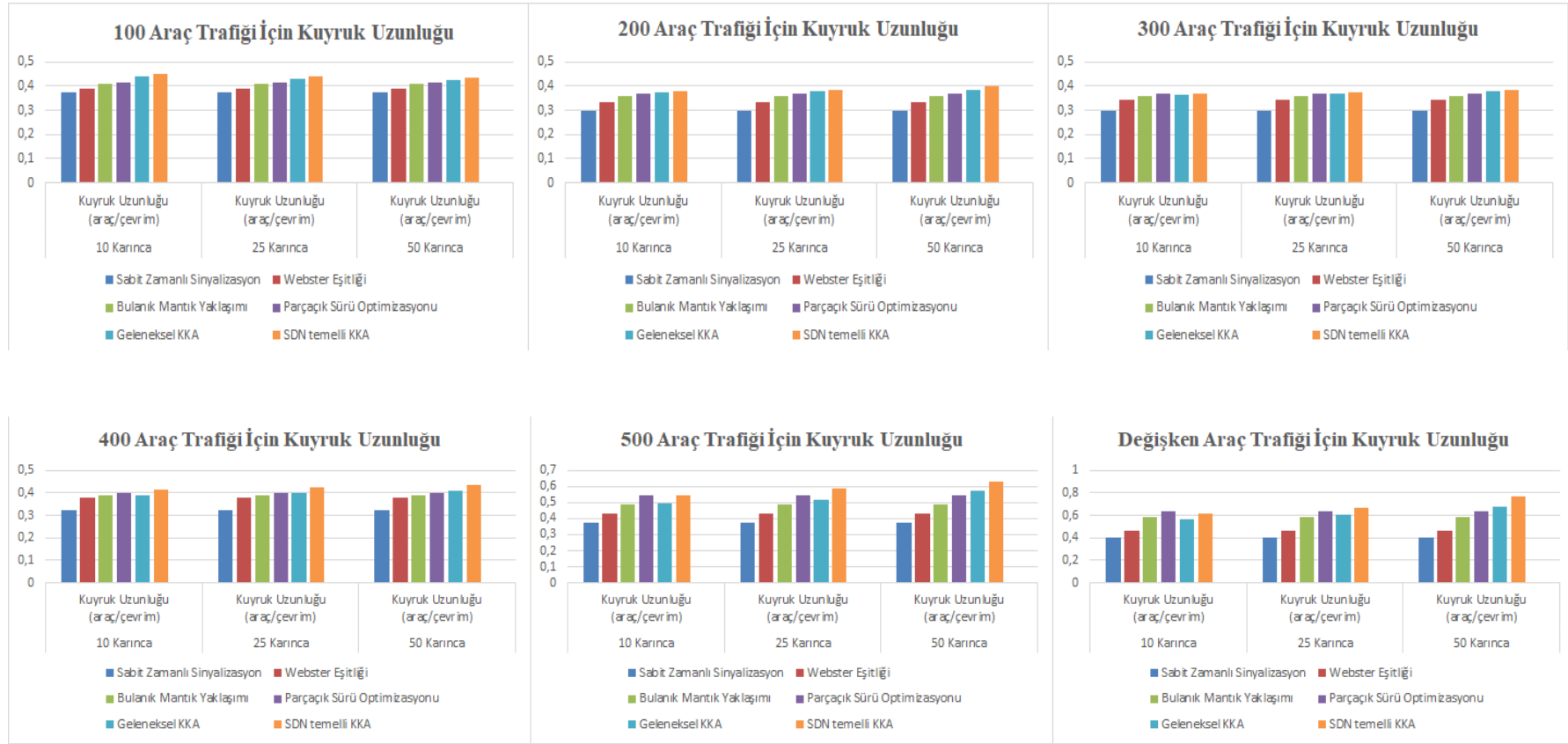


Şekil 4.3. Ortalama gecikme performans sonuçları

2 farklı yeşil fazın toplamı olan bir faz çevrim süresi içerisinde kavşaktan geçen araçların sayılarına oranın bulunduğu bu kuyruk uzunluğu performans testlerinin sonuçları Şekil 4.4.'de gösterilmiştir. Sabit zamanlı sistemlerde 80 sn olarak atanan bu çevrim süresi, diğer hesaplama tekniklerinde her senaryoya göre farklılık gösterdiğinden sonuçlar bir çevrim süresinde geçen araç sayısı oranı olarak hesaplanmıştır. Az yoğun senaryolarda oranlar birbirine yakın olsa da kavşaktaki araç yoğunluğu arttıkça SDN temelli KKA'nın bir çevrim süresi içerisinde kavşaktan geçen araç sayısında artış olduğu görülebilmektedir. Örneğin 100 araçlık senaryoda geleneksel karınca algoritması ile SDN temelli KKA arasında %0,02 oranında bir fark (bir çevrimde 3-4 araç) söz konusu iken, bu fark 500 araçlık ve dinamik senaryoda %1,5 oranına (bir çevrimde 7-8 araç) ulaşmaktadır.

Şekil 4.5.'de trafik sinyalizasyonu ile ilgili performans kriterlerinin haricinde kavşak yönetim sistemlerinin merkezlerindeki sunucuların performans karşılaştırılması için sinyalizasyon hesaplamaları için gereken süreler de hesaplanmıştır. Bu performans karşılaştırmalarında geleneksel sistemler de SDN temelli sistemler de aynı fiziksel özelliklere sahip cihazlardan oluşmaktadırlar. Sunucu performans karşılaştırmaları neticesinde, sabit zamanlı ve Webster eşitliği gibi temel matematiksel denklemlere oturtulan metotların hesaplamalı tekniklere göre daha kısa sürede çözüm sunduğu görülmüştür.

Fakat günümüz gelişen kavşak/trafik yönetim sistemlerinin çok bileşenli kompleks yapılardan oluştuğu düşünülürse hesaplama tekniklerin sinyalizasyon sistemlerinde kullanımını artık zorunlu hale gelmiştir. Burada da özellikle karınca sayısı arttığı zaman SDN temelli KKA'nın diğer hesaplamalı tekniklere göre %16 ila %20 arasında avantajı söz konusudur.



Şekil 4.4.Kuyruk uzunluğu performans sonuçları



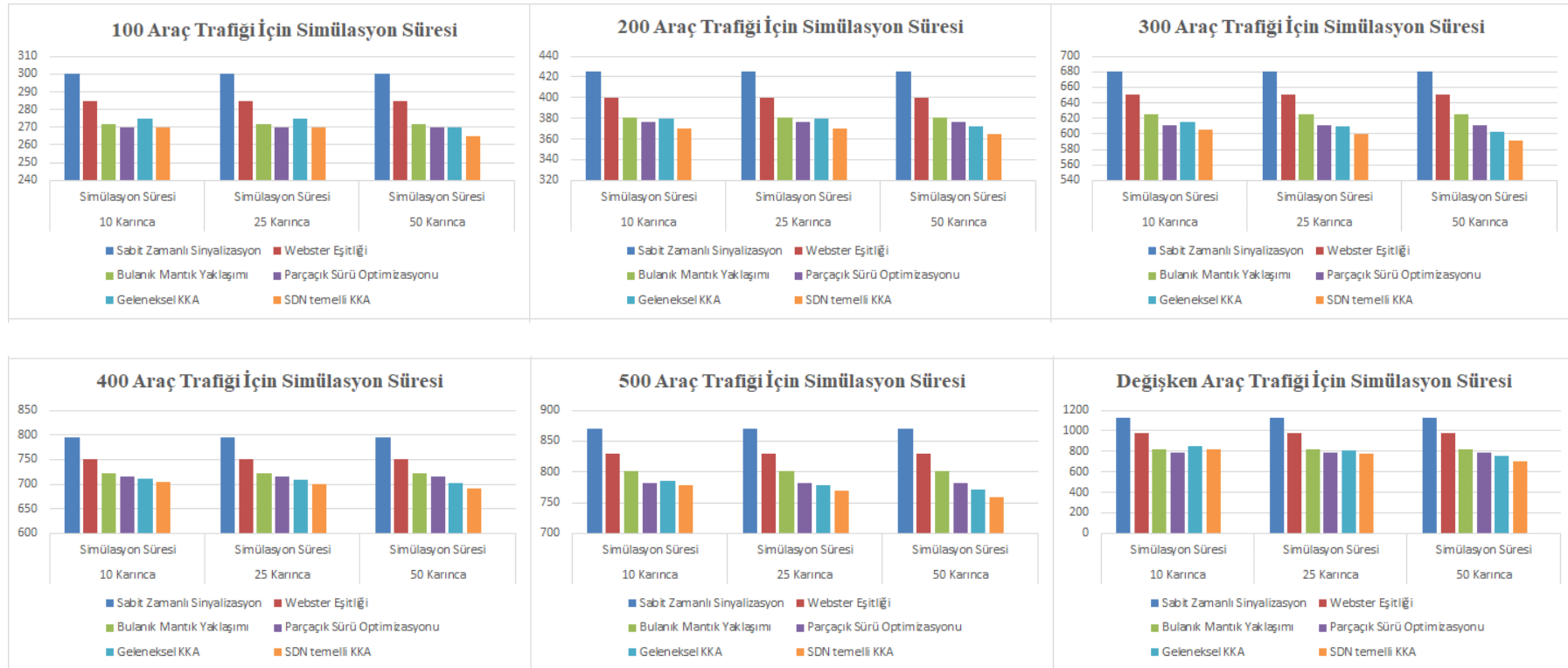
Şekil 4.5. İşlem süresi performans sonuçları

Şekil 4.6.'da, kavşaktaki araçların üretmiş oldukları yayın paketlerinin önce SDN etmen RSU'ya daha sonra ise merkezdeki sunucuya gelmesi, sunucudaki sinyalizasyon hesaplaması neticesinde ise elde edilen yeni trafik bilgilerinin (yeşil ışık süresi, faz düzeni, akış bilgisi vb.) tekrar kavşak içlerindeki araçlara döndürülmesine kadar geçen süre olarak tanımlanan uçtan-uca gecikme performans sonuçları gösterilmiştir. Uçtan-uca gecikme performans karşılaştırması neticesinde, özellikle zeki optimizasyon algoritmalarında SDN iletim altyapısı sağlamış olduğu dinamiklik ve akış kontrolü ile geleneksel ağ yapılarına oranla %17-22 arasında bir iyileşme sunmaktadır. Uçtan-uca performans karşılaştırmasında Webster ve sabit zamanlı sistemlerin gecikme sürelerinin optimizasyon algoritmalarına göre daha az çıkmasının ana sebebi bir önceki şekilde gösterildiği üzere işlem sürelerinin kısa olmasından kaynaklıdır.

Son olarak Şekil 4.7.'de ise her bir senaryodaki araçların yolculuk süreleri için geçen toplam SUMO simülasyon süreleri gözlemlenmiştir. Gerek araçların kavşak içlerindeki gecikme sürelerindeki azalma gerekse de faz süresindeki kuyruk sayılarındaki artış bu seyahat sürelerinin azalmasındaki (simülasyon zamanı) en önemli etkidir. Her bir senaryodaki araçların kavşağı terk etmelerine kadar geçen süreler dikkate alınmıştır. Düşük araç yoğunlukları için (örneğin 100 araç) simülasyon zamanında zeki sistemler, sabit zamanlı ve Webster eşitliğine göre olan uygulamalara göre %9-10 arasında bir iyileşme göstermekteyken, trafik yoğunluğunun arttığı senaryolarda bu değer %25-30 aralığına kadar çıkmaktadır. Ayrıca yoğun trafik ve değişken trafik senaryolarında SDN temelli KKA ve diğer hesaplamalı teknikler arasında da %8'lik bir iyileşme gözlenmektedir.



Şekil 4.6. Uçtan-uca gecikme performans sonuçları



Şekil 4.7. Simülasyon süresi performans sonuçları

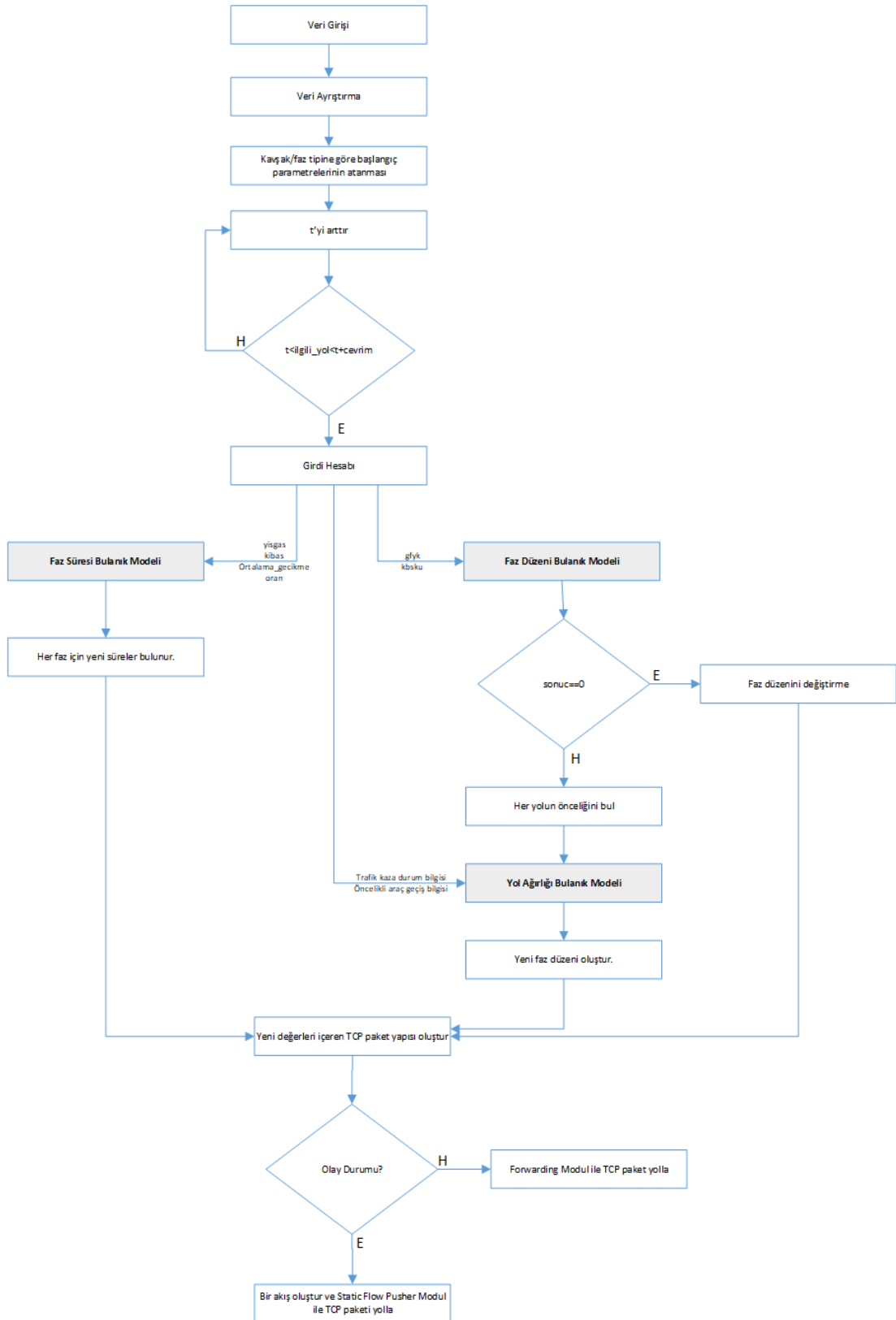
## 4.2. Koordineli Kavşak Yapılarındaki Trafik Sinyalizasyonu İçin Önerilen 3 Aşamalı Bulanık-Karar Ağacı Modeli

Şehir içi koordineli kavşak yapılarındaki trafik yönetim sistemleri için önerdiğimiz SDN temelli VANET mimarisinin merkezinde çalışan bulanık modelin çevresel etmenler ve araç sayısına göre değişkenlik gösteren kavşaklardaki (özellikle kamusal alanlara yakın olanları) trafiği yönetilebilmesi için literatürdeki çalışmalara ilaveten sadece araç yoğunluk bilgisinin haricinde çevresel etmenlerin (şerit sayısı, kavşak tipi, yaya geçidi, hemzemin geçidi vb.) ve aktivitelerin (yaya, otobüs, yol yapım çalışması, etkinlik, kaza, öncelikli araç, hava durumu vb) de hesaba katılması gerekir. Merkezde çalışan bu modelin her kavşakta bulunan anahtar cihazına bağlı sinyalizasyon cihazlarını (trafik lambaları) ve RSU'yu değişken trafik şartlarına göre adaptif ve dinamik olarak ayarlaması da gerekmektedir. Bu sebepten ötürü bu tez çalışmasında 3 aşamalı bir bulanık karar ağacı modeli önerilmiştir.

### 4.2.1. Önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelinin çalışma yapısı

Şekil 4.8.'de verilen akış şemasına göre, çalışmamızda 3 bulanık model (mamdani modeli) birbirleri ile etkileşimli olarak çalışmaktadırlar. Çok istemcili-sunucu şeklinde geliştirilen bulanık-karar ağacı modelinde ilgili kavşaktan gelen trafik verileri önce SDN etmen RSU üzerinde pars edilir. Pars etme işlemlerinden sonra gelen paketlerdeki kavşak ID'ye bakılır ve buna göre faz ataması (4, 3 ve 2 fazlı sistemler) ve yol ataması için (2, 3, 4 şerit) çok boyutlu dizi yapıları oluşturulur. Ayrıca o anda hangi kavşak ve senaryo ele alınıyorsa simülasyon süresi hesabı yapılarak, o senaryoda kaç çevrim olduğu ve ilgili kavşağın her bir fazı için bu sürelerin ne olduğu hesaplanır. Bu işlemlerden sonra "Faz Süresi", "Faz Düzeni" ve "Yol Ağırlığı" bulanık yapıları için sistem girdi hesaplarının yapılması gerekmektedir. Bulanık modellerin sistem girdi hesaplarının RSU'lar üzerinde yapılmasından sonra, bir TCP paket yapısı içerisinde bağlı buldukları SDN anahtar cihazına, ondan da sinyalizasyon sunucu makinesine gönderilir. Sinyalizasyon sunucu makinesindeki her bir bulanık modelin çalıştırılmasından sonra elde edilen yeni yeşil ışık süreleri ve faz düzeni ilgili bilgiler o kavşağa SDN iletim ortamı üzerinden gönderilir.





Şekil 4.8. Önerilen modelin sinyalizasyon hesabı akış şeması

Araçlar kendi aralarında ve RSU ile olan iletişimleri servis kalitesi (paket teslim oranı, gecikme ve jitter) açısından düşük trafik yoğunluğu, yoğun trafik şartlarında ve farklı araç hızlarında değişik performans göstermektedirler. İncelenen akademik çalışmalar neticesinde araçların reaktif yönlendirme protokolü olarak kullanmış oldukları AODV'nin, proaktif yönlendirme protokolü olan DSDV'ye göre yoğun trafik ve araç hızının yüksek olduğu durumlarda özellikle paket teslim oranı kriterinde %20-25 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Fakat yeni bağlantı kurulumu ve az yoğunluklu trafiklerde DSDV özellikle sahadan merkeze veri aktarımındaki gecikme ve jitter performans kriterlerinde AODV'ye göre daha iyi sonuçlar vermektedir [59]. Bu sebeplerden ötürü çalışmada önerilen bulanık-karar ağacı modeli, trafik sinyalizasyonun haricinde ayrıca sahadaki SDN etmen RSU ve SDN etmen araçlar için kendi aralarındaki iletişim için kullandıkları yönlendirme protokolleri (AODV, DSDV vb.) arasında kavşaktaki araç yoğunluğu ve kavşak içi hızlara göre dinamik seçim yaptıran bir SDN akış girdisi de üretmektedir. Akış girdisinin örneği şu şekildedir:

```
curl -X POST -d '{"switch":"00:00:00:00:00:04", "name":"flow-mod-4", "cookie":"0",
"priority":"32768", "in_port":"5", "active":"true", "actions":"output=6"}'
http://192.168.30.133:8080 /wm/staticflowpusher/json
```

#### 4.2.1.1. Faz süresi bulanık modeli

Faz süresi bulanık modeli, yeşil ışıpta geçen araç sayısı, kırmızı ışıpta bekleyen en uzun araç kuyruğu, ilgili yolda bekleyen araçların ortalama gecikmeleri ve de yeşil ışık sürelerinin çevrim süresine oranı olmak üzere 4 adet girdiden oluşmaktadır. Bu girdiler, ilgili kavşaktaki her yol için tekrar çalıştırılarak, kavşaktaki her bir faz için yeni yeşil ışık süreleri (sistemin çıktısı) bulunur. Kavşaktaki yaklaşım kollarındaki yeşil ışık süresince geçen araç sayısını ve de kırmızı ışık süresince bekleyen en uzun kuyruktaki araç sayısını bulmak için çalışmada kullanılan algoritmanın bir kavşak için örnek sözde kodu aşağıda verilmiştir. Buna göre simülasyon boyunca sinyalizasyon sunucusundan dönen yeni yeşil ışık süreleri ve çevrim zamanına göre ilgili yoldaki her bir aracın kavşağa giriş süresini şerit/yol bilgisi ile karşılaştırılarak sistem girdileri bulunur.

Sözde kod:

1. t ve artış'ı 0 ata
2. artışı çevrime eşitle
3. For i=0'dan gelen paket sayısına kadar (araç sayısı)
4.     If kavşak ID 1'e eşit ise
5.         If Şerit ID 140010781#0\_0 eşit ise
6.         If araç [16] t'den büyük ve artıştan küçük ise
7.             kibas\_yenicami1'i artır
8.     Değilse
9.         yisgas\_yenicami1'i artır.

Faz süresi bulanık modelinin diğer girdileri olan her bir yaklaşım kolundaki araçların kaybetmiş oldukları zamanı ifade eden ortalama araç gecikmeleri ve de o yoldaki faz süresinin çevrim süresine oranı Denklem 4.6, 4.7 ve 4.8'deki formüller ile hesaplanmıştır. Eş.11 'de "q" kavşaktaki ilgili yoldaki araç gecikmesini ifade ederken, "n" şerit sayısını, "k" ise o yoldaki araç sayısını ifade eder. "t<sub>L</sub>" aracın başlamak için kavşakta kaybettiği süre, "d" ise kavşaktan çıkana kadar aracın kaybettiği süreyi tanımlar. Eş.12'de ise kavşaktaki tüm yollardaki ortalama araç gecikmeleri toplanarak kavşağın ortalama gecikmesi bulunur. Eş.13'de ise "g" ilgili yoldaki yeşil ışık süresini, "c" ise o kavşaktaki faz süresini ifade eder. eder.

$$q_{1ort} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{\sum_{j=0}^k d_j + tL_j}{Q_i * r} \right) \quad (4.6)$$

$$q_{top} = \sum_{i=0}^n q_i \quad (4.7)$$

$$r = g/c \quad (4.8)$$

Faz süresi için kullanılan sistem girdilerinin ve çıktısının üyelik fonksiyonları Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Buna göre yeşil ışıkta geçen araç sayısı, kırmızı ışıkta bekleyen en uzun araç kuyruğu ve ortalama gecikme için "çok az", "az", "orta", "çok" ve "çok fazla" olmak üzere 5 adet üyelik fonksiyonu kullanılırken, yeşil ışığın çevrim süresine oranında 3 adet (az, orta, çok) üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır. Sistemin çıktısı olan yeşil ışık süresinde ise "çok azalt", "azalt", "değiştirme", "arttır", "çok arttır" olmak üzere 5 adet üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır. Önerilen 3 aşamalı bulanık

modelin tüm üyelik dereceleri aralığı Tablo 5.1. ve Tablo 5.2.’deki senaryoların çalıştırılması neticesinde belirlenmiştir.

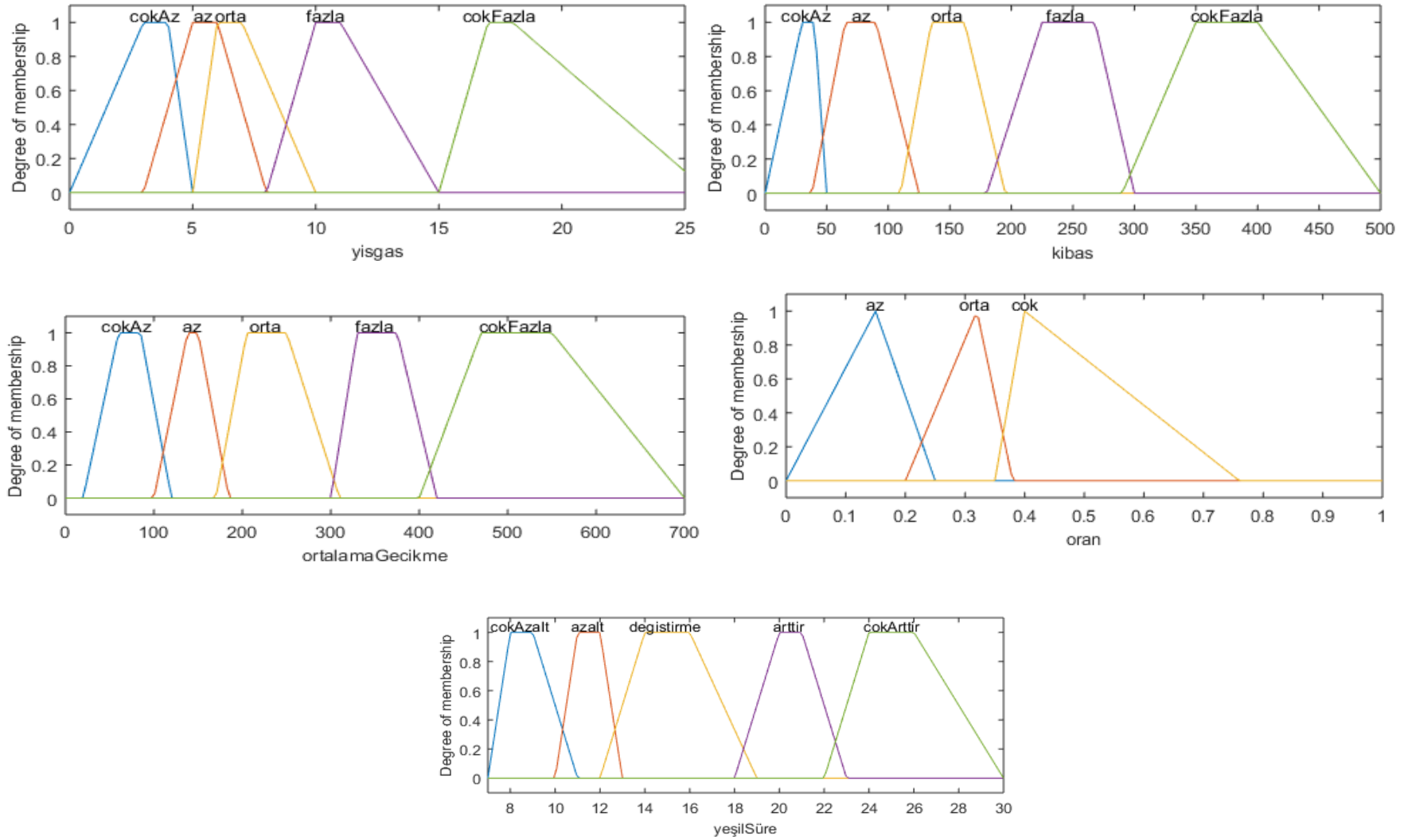
#### 4.2.1.2. Faz düzeni bulanık modeli

Çalışmada önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelinin diğer bir alt modülü ise kavşak içerisindeki faz sisteminin hangi sırada (düzende) çalıştırılacağı ile alakalı olan durumdur. Bu modelde kavşak içerisinde gelecek fazdaki bekleyen araç sayısı ve yine bir önceki modelde olduğu üzere kırmızıda bekleyen en uzun araç kuyruğu olmak üzere sistemin iki girdisi vardır. Elde edilen sonuca göre faz düzenin değiştirilip, değiştirilmeyeceği kararı verilir. Eğer sonuç değiştir çıkar ise, sistem yeni faz düzeni için “Yol Ağırlığı” alt modülünü çağırır. “Faz düzeni” modelinde kullanılan sistem girdilerinin üyelik fonksiyonları Şekil 4.10.’da gösterilmiştir.

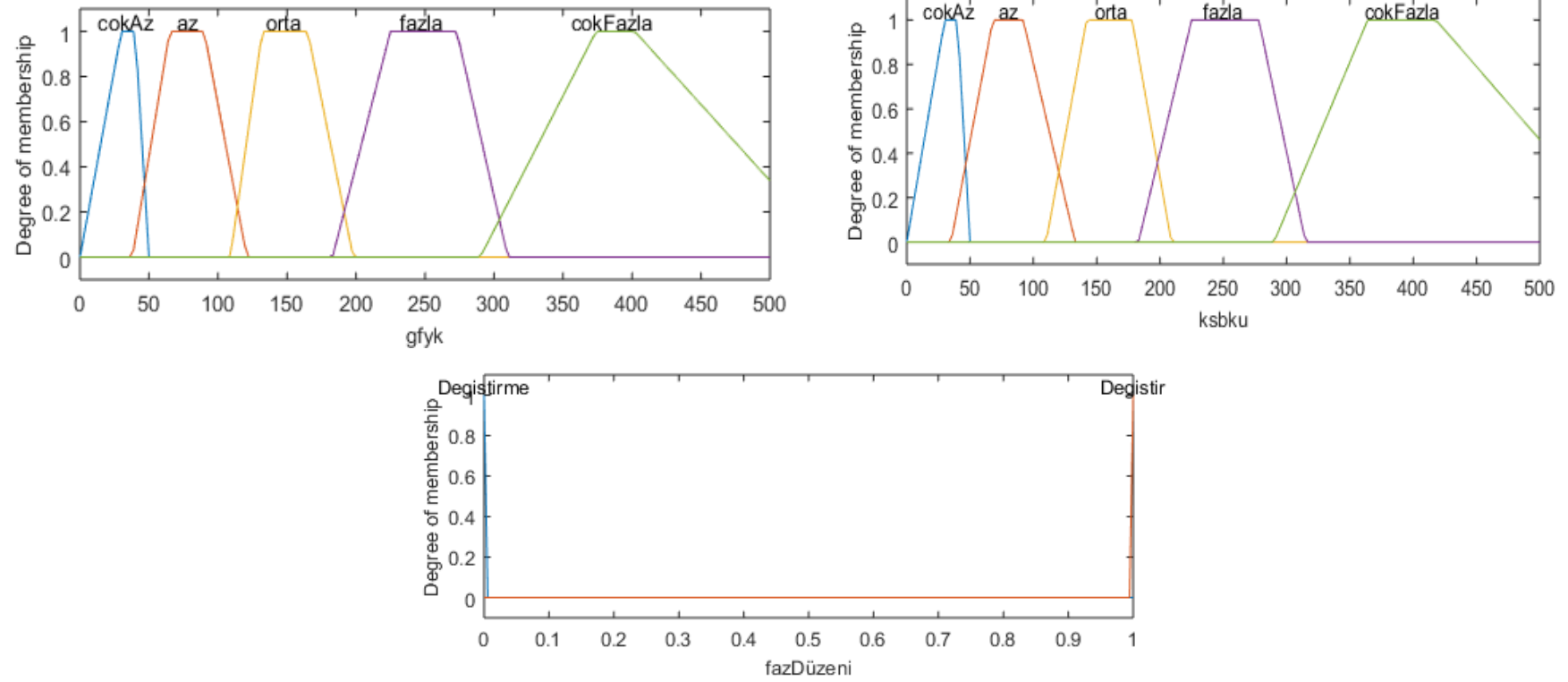
#### 4.2.1.3. Yol ağırlığı bulanık modeli

Önerilen bulanık-karar ağacı modelinin son alt modeli olan “Yol Ağırlığı”nın ise kaza durumu, öncelikli araç geçişi ve yol bilgisi olmak üzere 3 sistem girdisi vardır. Kaza durumu ve öncelikli araç geçişi VANET mimarisinin kontrol kanalından yayın yapıldığı kabul edilerek senaryolara eklenmiş ve dikkate alınmıştır. Yol bilgisi ise bir kavşaktaki her yolun fiziksel karakteristiği (koordineli şerit, şerit sayısı, otobüs durağı, hemzemin geçit, yaya geçidi, yol kenarı otopark ), aktivite (yok/planlı/plansız) ve sıcaklık (güzel/yağışlı/buzlu) bilgilerine bağlı olmak üzere bir puanlama yapıp o anki taşıt hacmi ile çarpılması neticesinde elde edilmektedir. Sistem girdilerinin modelde işlenmesi neticesinde o kavşaktaki her bir yaklaşım kolunun bir ağırlığı bulunup, ona göre yeni faz düzeni oluşturulmaktadır. Yol bilgisi hesabında kullanılan formül Denklem 4.9’da verilmiştir. Yol ağırlığı için kullanılan sistem girdilerinin ve çıktısının üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.11.’de gösterilmiştir.

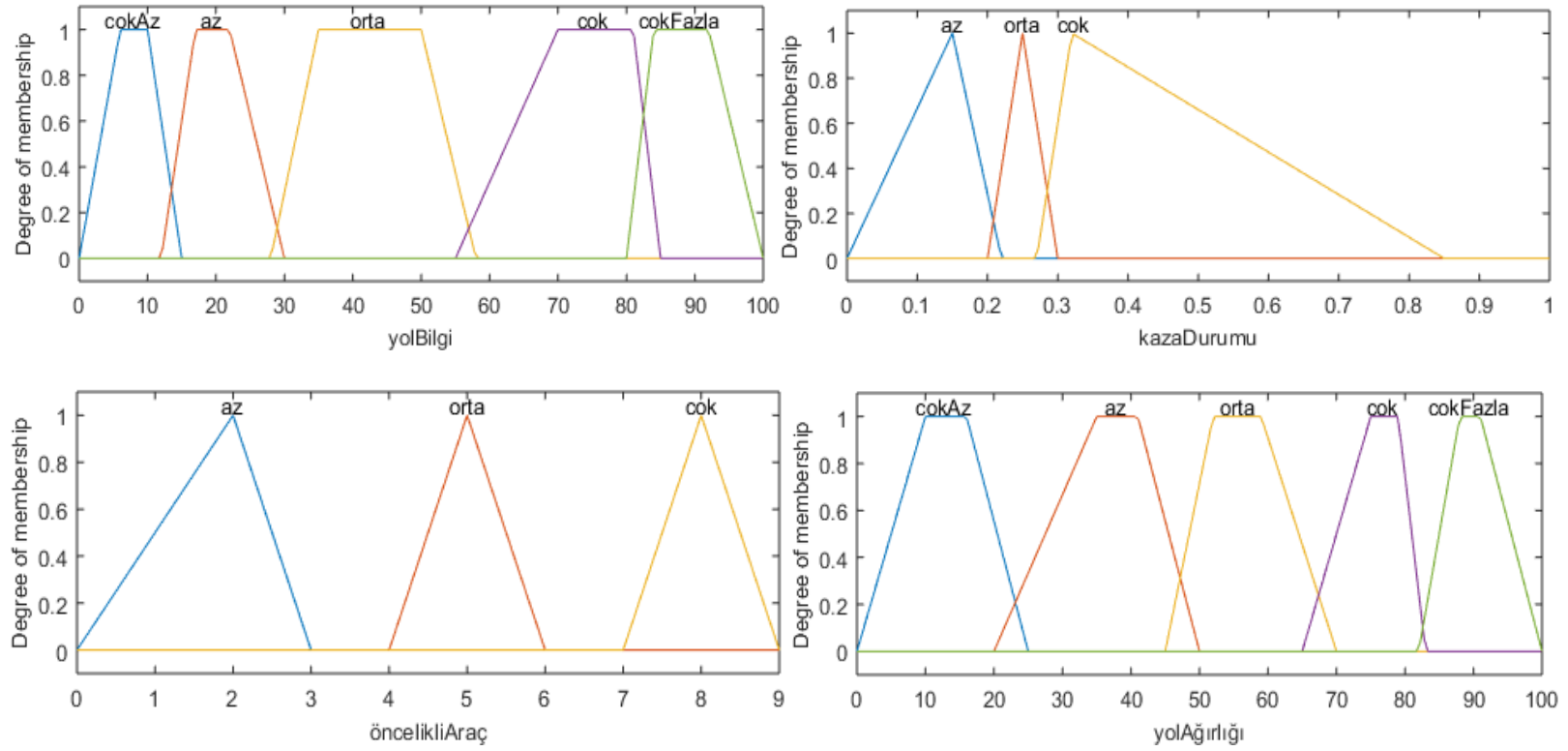
$$w=(fiziksel+aktivite+hava Durumu)*\left(\frac{\sum_{i=0}^n Q_i}{C_i}\right) \quad (4.9)$$



Şekil 4.9. Faz süresi bulanık modeli üyelik fonksiyonları



Şekil 4.10. Faz düzeni bulanık modeli üyelik fonksiyonları



Şekil 4.11. Yol ağırlığı bulanık modeli üyelik fonksiyonları

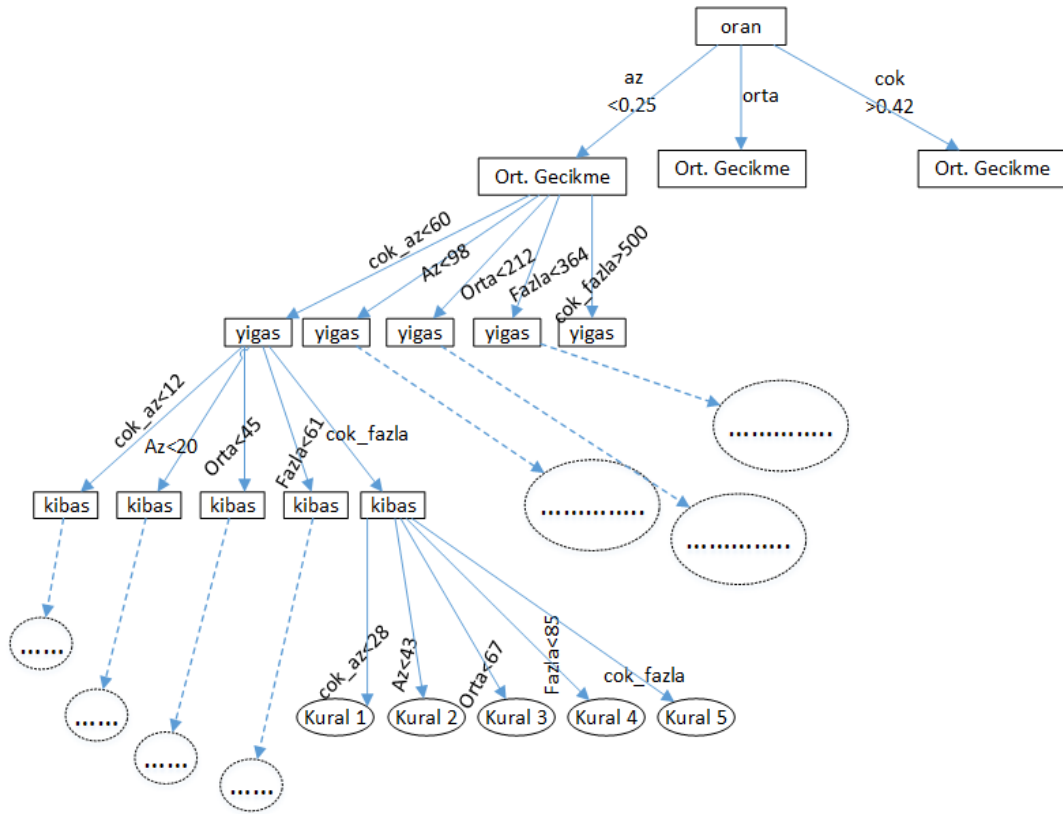
#### 4.2.1.4. C4-5 karar ağacı yapısı

Önerilen 3 aşamalı bulanık modelin farklı trafik senaryoları altında şehir-içi kavşaklarda daha iyi performans sunabilmesi için, bulanık modellerin kural tabanlarının oluşturulmasında, literatürde sınıflandırma ve tahmin gibi veri madenciliği işlemlerinde kullanılan C4-5 karar ağacı algoritması kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında mimaride önerilen 3 aşamalı bulanık modelin her birinde kurallarının oluşturulmasında bir karar ağacı algoritması kullanılmasının asıl sebebi, karar ağaçlarının basit yapıları, oluşturulan sınıflandırma modellerini kolay anlaşılabilir olması, karar ağaçlarının parametrik olmamaları, bilgi keşfi için uygun bir yapı sunmaları ve diğer sınıflandırma yöntemlerine kıyasla kısmen daha hızlı bir biçimde oluşturulabilme gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır [60-61]. Literatürde ID3, Chad, C4-5 gibi birçok karar ağacı örneği bulunmasına rağmen, özellikle bulanık mantık ve makine öğrenmesi gibi hesaplamalı tekniklerde ortalama mutlak hata ve ortalama karesel hata gibi parametrelerde daha iyi başarı sunmasından dolayı bu çalışmada C4-5 algoritması tercih edilmiştir.

Şekil 4.12.'de önerilen 3 aşamalı bulanık modelin faz süresi hesabında kullanılan kısmında kural oluşturulmasında kullanılan karar ağacının özet görüntüsü verilmiştir. Buna göre bir kavşak yolundaki yeşil ışık süresinin faz çevrimine oranının kök düğüm seçildiği durumda, kavşak içinde araçların kaybetmiş oldukları süreler (ortalama gecikme), yeşil ışık süresince geçen araç sayısı ve kırmızıda bekleyen araç sayısı ise bu kök hücrenin hiyerarşik olarak çocuk hücreleri seçilmiştir. Performans denemeleri neticesinde sistem girdilerinin trafik yoğunluklarına göre kırılma noktaları belirlenmiş olup, bu kırılma noktalarına göre kural yazımında ağırlık atamaları yapılmıştır.





Şekil 4.12. Faz süresi bulanık modeli karar ağacı özeti

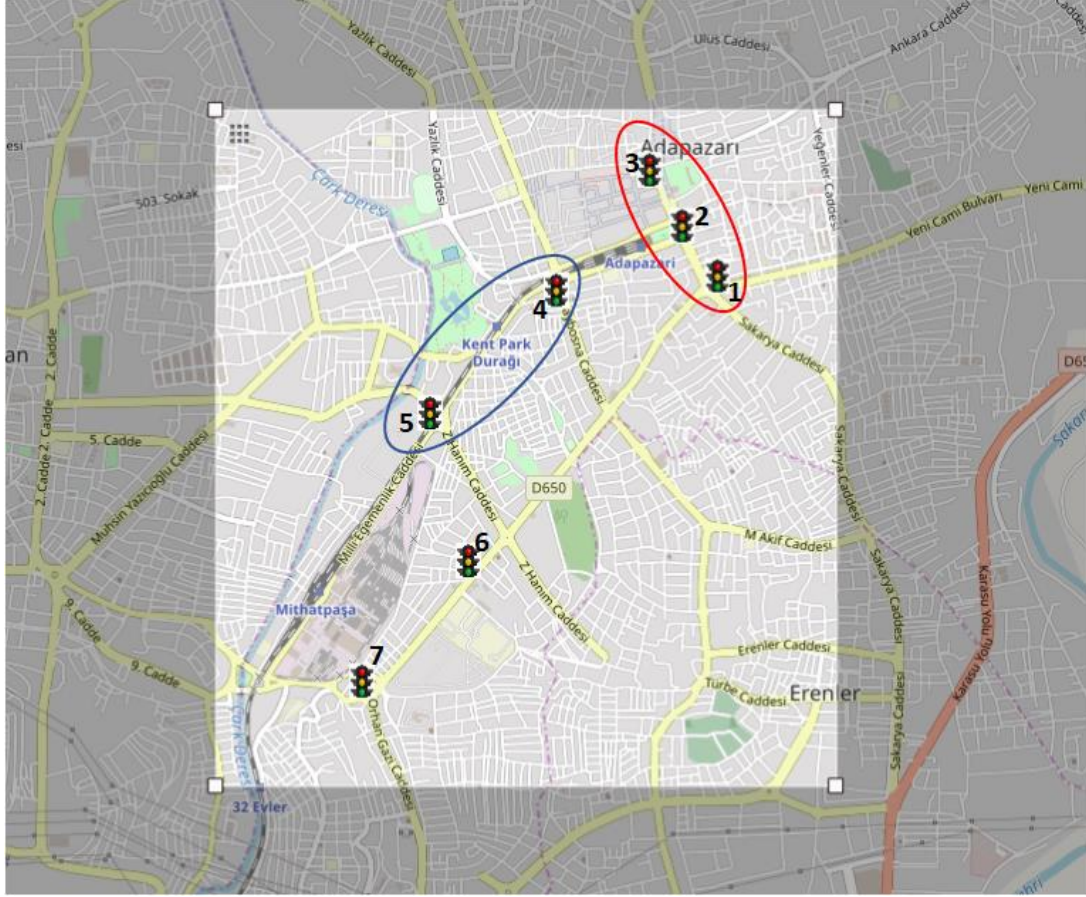
#### 4.2.2. Koordineli kavşak yapıları için önerilen mimarinin trafik ve ağ senaryolarına göre performans değerlendirmesi

Bu bölümde önce, şehir içi trafik yönetim sistemleri için önerilen SDN temelli VANET mimarileri için örnek model olarak seçilen Sakarya/Adapazarı şehrinin merkezi kavşak/faz yapıları hakkında bilgi verilerek, bu model üzerinde gerçekleştirilen olağan ve dinamik trafik ve ağ senaryoları tablolar şeklinde açıklamalı olarak verilecektir. Daha sonra, yapılan trafik ve ağ performans testleri sonucunda elde edilen değerler grafiksel olarak verilerek detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

##### 4.2.2.1. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak ve faz yapıları

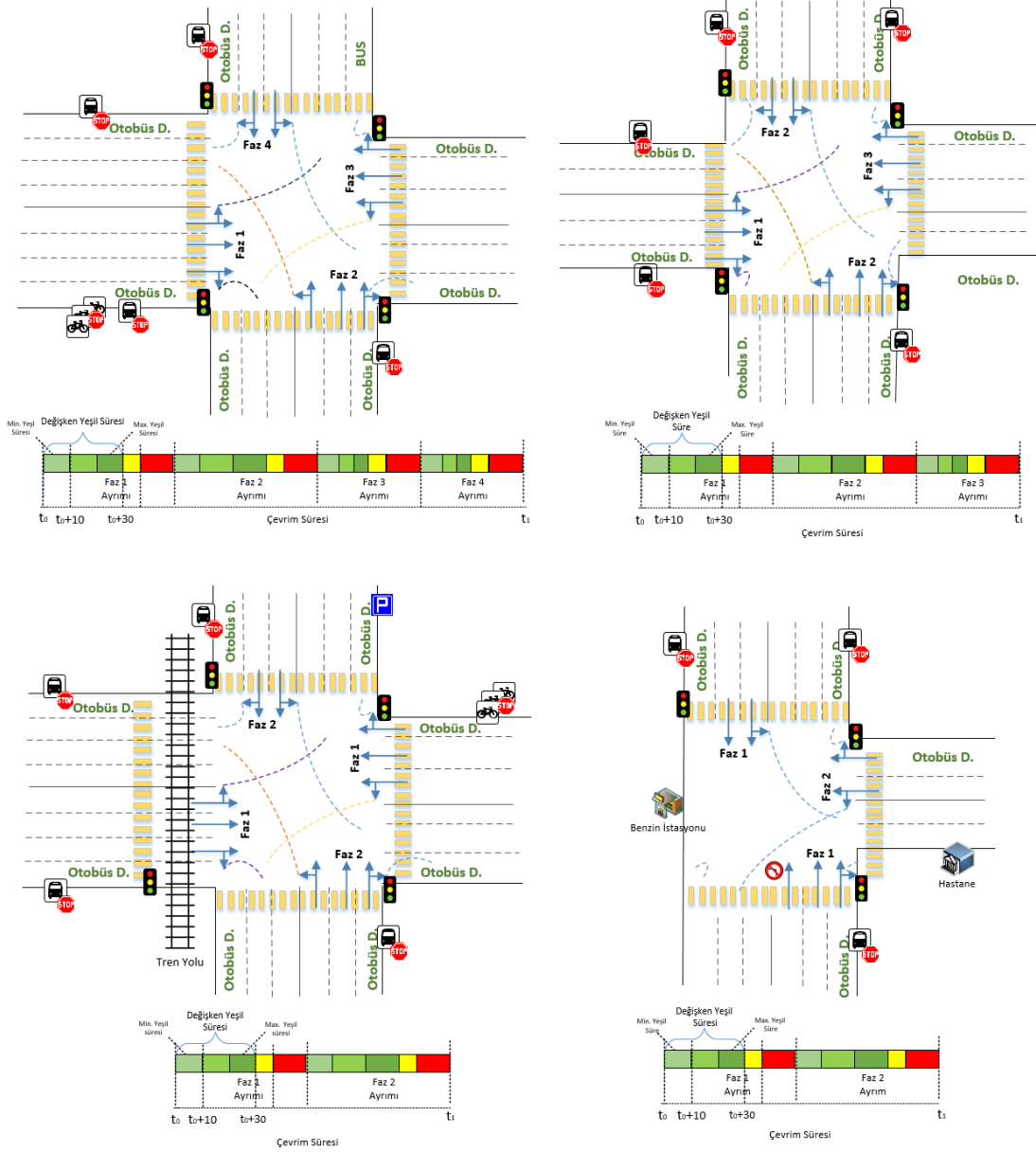
Çalışmada önerilen 3-BKA modelini ve bu modelin çalıştırılacağı SDN temelli VANET altyapısının akıllı ulaşım sistemlerinin en önemli problemi olan trafik sinyalizasyonuna uygunluğunu ölçebilmek için ağ topolojisi olarak, bünyesinde çok

farklı kavşak tipleri, dönüş yönleri ve faz düzeni barındıran Türkiye'nin Sakarya ilinin merkez ilçesi olan Şekil 4.13.'deki Adapazarı Şehir Merkezi tercih edilmiştir.



Şekil 4.13. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak yapıları

Şekil 4.13.'deki Adapazarı Şehir Merkezinde 1,2 ve 3 nolu kavşaklar kendi içlerinde koordineli olup, 4 ve 5 nolu kavşaklar ise kendi içlerinde koordineli kavşaklardır. 6 ve 7 nolu kavşaklar ise izole kavşaklardır. Bu kavşakların geometrik özellikleri ve faz düzenleri Şekil 4.14.'de gösterilmiştir. Buna göre 1 nolu kavşak 4 yaklaşım kolu ve 4 fazlı bir sinyalizasyon sisteminden oluşurken, 2 ve 3 nolu kavşaklar 3 yaklaşım kolu ve 2 fazlı bir sinyalizasyon sistemine sahiptirler. 4 ve 5 nolu kavşaklar ise 4 yaklaşım kolu ve 2 fazlı sinyalizasyon sistemine sahiptir. 6 nolu kavşak 3 yaklaşım kolu ve 2 fazlı bir sinyalizasyon sistemine sahipken, 7 nolu kavşak ise 4 yaklaşım kollu 3 fazlı bir sinyalizasyona sahiptir. Çalışmada kullanılan kavşak yapılarıyla ilgili genel bilgiler Tablo 4.2.'de özetlenmiştir.



Şekil 4.14. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak/faz yapıları

Tablo 4.2. Sakarya/Adapazarı şehir merkezi kavşak bilgileri

Kavşak/ID	Kavşak Tipi	Faz Düzeni	Yaklaşım K./Şerit S.	Dönüş Y.	Hemzemin Geçit	Otobüs D. ve Park	Kamusal Alan
1	Koordineli	4 fazlı	4 yol- 4 şerit	Sağa/Sola	-	✓	-
2	Koordineli	2 fazlı	3 yol-3 şerit	Sağa	-	✓	✓
3	Koordineli	2 fazlı	3 yol-2 şerit	Sola	-	-	-
4	Koordineli	2 fazlı	4 yol-4 şerit	Sağa/Sola	✓	✓	-
5	Koordineli	2 fazlı	4 yol-3 şerit	Sağa/Sola	✓	✓	✓
6	Ayrık	2 fazlı	3 yol-3 şerit	Sağa	-	✓	✓
7	Ayrık	3 fazlı	4 yol-3 şerit	Sağa/Sola	-	-	-

#### 4.2.2.2. Önerilen mimari üzerinde gerçekleştirilen trafik ve ağ senaryoları

Günlük olağan trafik durumları ve değişken trafik durumlarının ele alındığı bu tez çalışmasında hem ayrık hem de koordineli kavşakların fiziksel yapılarına göre (şerit sayısı, kavşak kolu sayısı vs.) kuzey-güney, güney-kuzey, doğu-batı, batı –doğu, sağa ve sola dönüşlü senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan olağan trafik senaryoları Tablo 4.3.'de gösterildiği üzere toplam araç hacimlerine göre düşük yoğunluktan yüksek yoğunluğuna kadar sınıflandırılmıştır. Tablo 4.4.'de ise normal akan trafiğin iş veya okul saati zaman aralığında, bir trafik kazası durumunda, öncelikli araç (ambulans, itfaiye vb.) geçişinde veyahut da bir aktivite (yol yapım, tren saati, gösteri vb.) karşısındaki durumları dikkate alınarak yine SDN temelli VANET mimarisi üzerinde oluşturulmuş değişken trafik senaryo örnekleri verilmiştir.

Trafik senaryolarında kullanılan tablolardaki değerler Sakarya Büyükşehir Belediyesi Trafik Şube Müdürlüğü tarafından ilgili kavşaklar üzerinde 2015-2017 yılları arasında yapılan gözlemler neticesinde elde edilen araç sayılarına göre oluşturulmuştur.

Tablo 4.3. Olağan trafik senaryoları

Kavşak Tipi	Hareket Yönü	Düşük Talep			Normal Talep			Yoğun Talep			
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	
KOORDİNELİ KAVŞAKLAR	1-2-3	Kuzey-Güney	106	94	129	214	203	228	357	311	332
		Güney-Kuzey	234	172	214	348	370	421	618	574	723
		Doğu-Batı	90	93	117	182	240	218	304	344	378
		Batı-Doğu	107	123	181	313	317	338	523	547	525
		Sağa dönüş	21	43	34	56	65	58	128	146	97
		Sola dönüş	19	15	19	48	71	55	84	102	68
		<i>Toplam</i>	577	540	694	1161	1266	1318	2014	2024	2123
	4-5	Kuzey-Güney	65	132	94	132	238	201	220	338	305
		Güney-Kuzey	221	164	184	442	308	357	585	417	602
		Doğu-Batı	276	248	303	587	523	685	720	759	819
		Batı-Doğu	246	228	206	524	408	476	622	741	709
		Sağa dönüş	45	68	77	104	153	147	201	264	225
		Sola dönüş	61	31	94	165	185	113	178	195	231
		<i>Toplam</i>	914	871	958	1954	1815	1979	2526	2714	2891
AYRIK KAVŞAKLAR	6	Kuzey-Güney	273	290	259	521	505	482	780	815	745
		Güney-Kuzey	239	285	265	440	500	537	724	685	719
		Sağa dönüş	38	26	15	56	74	42	110	99	134
		Sola dönüş	15	29	12	59	60	71	85	91	109
		<i>Toplam</i>	565	630	551	1076	1139	1132	1699	1690	1707
	7	Kuzey-Güney	107	174	125	278	256	305	558	597	702
		Güney-Kuzey	156	203	198	285	319	397	524	645	651
		Doğu-Batı	85	103	127	345	361	387	621	669	698
		Batı-Doğu	23	38	42	64	71	55	98	115	168
		Sağa dönüş	15	49	38	41	22	35	67	83	78
Sola dönüş	18	26	54	28	19	26	72	61	66		
<i>Toplam</i>	404	593	584	1041	1048	1205	1940	2170	2363		

Tablo 4.4. Değişken trafik senaryoları

Kavşak Tipi	Senaryolar	Hareket Yönü	Trafik Kazası		Öncelikli Araç Geçisi		Aktivite			
			Araç Bozulması	Zincirleme	Yüksek Öncelikli	Düşük Öncelikli	Planlı	Plansız		
AYRIK KAVŞAKLAR KOORDİNELİ KAVŞAKLAR	1-2-3	1	Kuzey- Güney	-	-	✓	-	-	-	
		2	Güney- Kuzey	-	-	-	✓	✓	-	
		3	Doğu-Batı	✓	-	-	-	-	-	
	4-5	4	Batı-Doğu	-	-	-	✓	-	✓	
		7	Kuzey- Güney	✓	-	-	✓	-	-	
		8	Güney- Kuzey	-	✓	-	-	✓	-	
		9	Doğu-Batı	✓	-	-	-	-	✓	
		10	Batı-Doğu	-	-	✓	-	✓	-	
		11	Kuzey- Güney	-	-	-	-	-	-	
	6	12	Güney- Kuzey	✓	-	-	✓	-	-	
		13	Kuzey- Güney	✓	-	✓	-	✓	-	
		7	14	Güney- Kuzey	-	✓	-	-	-	✓
			15	Doğu-Batı	✓	-	✓	--	-	✓

Çalışmada olağan ve dinamik trafik senaryoları oluşturmanın haricinde, SDN mimarisinin trafik yönetim sistemlerinde uygunluğunu ve gerekliliğini gösterebilmek adına hem geleneksel ağ yapıları hem de önerilen SDN temelli VANET mimarisi üzerinde Tablo 4.3. ve Tablo 4.4.'den türetilen araç trafik senaryoları, farklı ağ topoloji senaryoları (Tablo 4.5.) altında tekrar çalıştırılmıştır. Buna göre Şekil 4.3.'deki ağ topolojisindeki kavşaklarda bulunan anahtar cihazlarında yaşanabilecek cihaz bozulması, çevresel etmenler nedeniyle (yol yapım çalışması, hat döşenmesi vb.) bağlantı kopması ve de aşırı yük (araçlardan gelen trafik verileri) yüzünden cihazlarda darboğaz oluşması gibi farklı senaryolar uygulanmıştır. Senaryolar, karmaşık (mesh) ağ topolojisine sahip olan Adapazarı Şehir Merkezi'nde, kavşaklardaki cihazlar ve cihazlar arasındaki bağlantılara göre uygulanmıştır.

Tablo 4.5. Ağ topoloji senaryoları

Senaryolar	Kavşak Bağlantıları (ID)	Cihaz Bozulması	Bağlantı Kopması	Aşırı Yük
1	1	✓	-	✓
2	1-2	-	✓	-
3	2	-	-	✓
4	3	✓	-	-
5	4	-	✓	-
6	2-6	-	✓	-
7	7	✓	-	-
8	5-6	-	-	✓
9	6	-	✓	-
10	3-5	-	✓	✓
11	2-4	-	✓	-
12	1-5	✓	-	-
13	1-7	✓	-	✓
14	1-4-5	-	✓	✓
15	2-3-5	✓	-	-

#### 4.2.2.3. Performans testlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Bu çalışmada SDN temelli VANET altyapılı bir trafik yönetim sistemi için önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli, literatürde sinyalizasyon üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan sabit zamanlı sistemler, Webster eşitliği ve de karınca koloni algoritması ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada önerilen 3 aşamalı bulanık model yeşil ışık optimizasyonu ve faz düzenini yeniden ayarlamasının haricinde, gönderdiği akış girdileri ile kavşak içlerindeki araçların kendi aralarında ve RSU ile olan

iletişimlerinde kullandıkları yönlendirme algoritmalarını (AODV ve DSDV) dinamik olarak tercih etmelerini de sağlamaktadır.

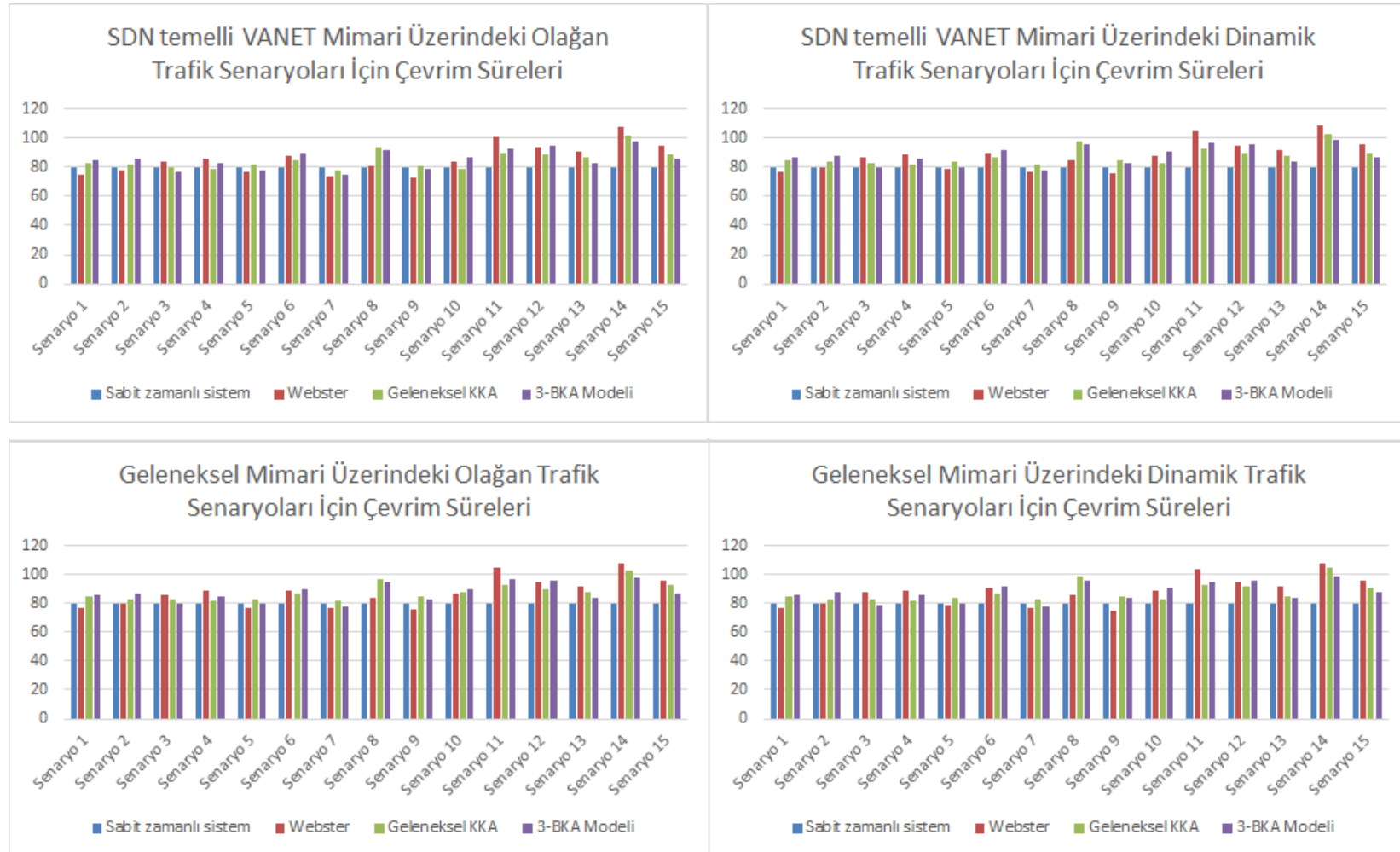
Bu sebepten ötürü çalışmada trafik sinyalizasyonu performans karşılaştırması olarak ortalama araç gecikmesi ve kuyruk uzunluğu kriter olarak seçilmiştir. Trafik yönetim sistemlerinin gerek araç-araç, gerek araç-RSU gerekse RSU-merkez-RSU arasındaki iletişim altyapılarında SDN mimarisi kullanılmasının, geleneksel trafik yönetim sistemlerine göre olan performans karşılaştırmalarında ise uçtan-uca gecikme, işlem hacmi ve paket kayıp oranları kriter olarak tercih edilmiştir. Uçtan-uca gecikme performans kriterinde önerilen modelin hem merkezi hem de sis hesaplamadaki sonuçları ayrıca gösterilmiştir. Yapılan tüm trafik senaryoları yoğunluk seviyelerine ve aktivite bilgilerine göre sınıflandırılıp özet grafikler şeklinde verilmiştir. Çalışmada performans karşılaştırması için kullanılan tüm parametreler aşağıdaki kriterlere göre belirlenmiştir;

- Çevrim süresi; Bir kavşaktaki tüm yeşil fazların tamamlanmasına kadar geçen süreyi ifade eder.
- Ortalama araç gecikmesi; araçların kavşak içerisinde normal seyir sürelerinin haricinde kırmızı ışık, trafik sıkışıklığı vb. nedenler ile kaybettiği zamanı ifade eder.
- Kuyruk uzunluğu; bir yeşil ışık çevrim süresi içerisinde geçen araç sayısını ifade eder. Bu çalışmada kuyruk uzunluğu birim zamanda geçen araç oranı olarak hesaplanmıştır.
- İşlem hacmi; Merkezi ve sis hesaplamaya yöntemine göre önerilen SDN temelli VANET mimarisinin sinyalizasyon sunucusu üzerinde oluşturduğu veri trafiğini ifade eder.
- Uçtan-uca gecikme; SDN etmen araçtan çıkan paketlerin merkezdeki sinyalizasyon hesabından sonra tekrar SDN etmen araca geri dönmesine kadar geçen süreyi ifade eder.
- Paket kayıp oranı; SDN etmen araçların kendi aralarında ve yol kenarı üniteleri olan iletişimlerdeki yönlendirme paketleri başarımlarını ifade eder.

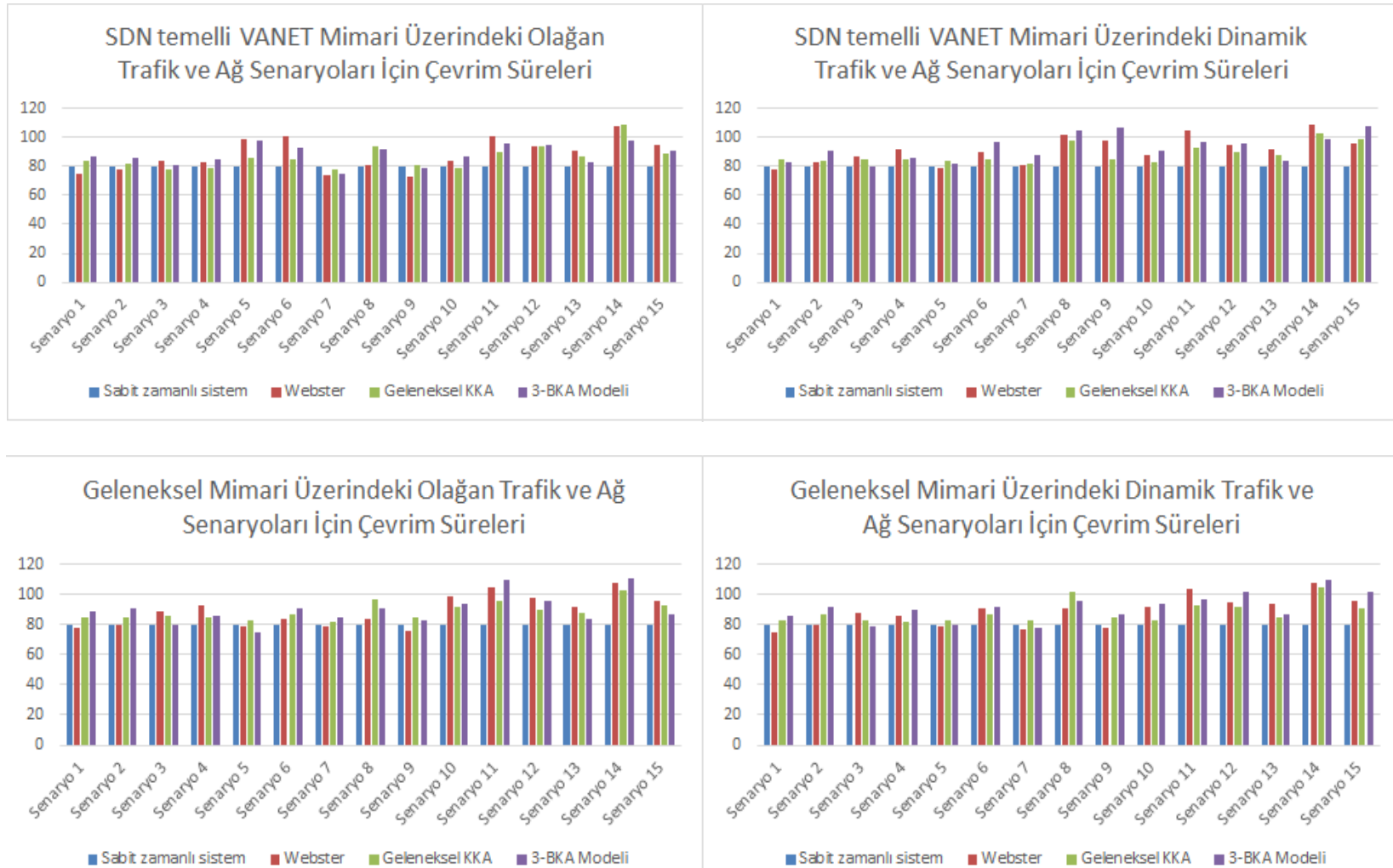


#### 4.2.2.3.1 Trafik performans kriterlerine göre senaryoların değerlendirilmesi

Çalışmadaki her bir farklı trafik ve ağ senaryoları altında sinyalizasyon ölçüm parametreleri olan kavşak içi ortalama araç gecikme süreleri ve bir yoldaki yeşil ışık süresince geçen araç sayısını direk etkileyen kavşak sinyal çevrim sürelerinin değişim grafiği Şekil 4.15.'de gösterilmiştir. 4 yollu- 4 ve 3 fazlı kavşak yapıları için minimum 60 sn, maksimum ise 120 sn olacak şekilde trafik senaryolarındaki durumlara bağlı olarak değişkenlik gösteren bu çevrim süreleri kavşak içerisindeki tüm yeşil fazların tamamlanmasına kadar geçen süre olarak ele alınmıştır. Ayrıca senaryoların farklı ağ senaryoları altındaki çevrim süreleri de Şekil 4.16.'da verilmiştir.



Şekil 4.15. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerin kavşak içlerindeki ortalama çevrim süreleri

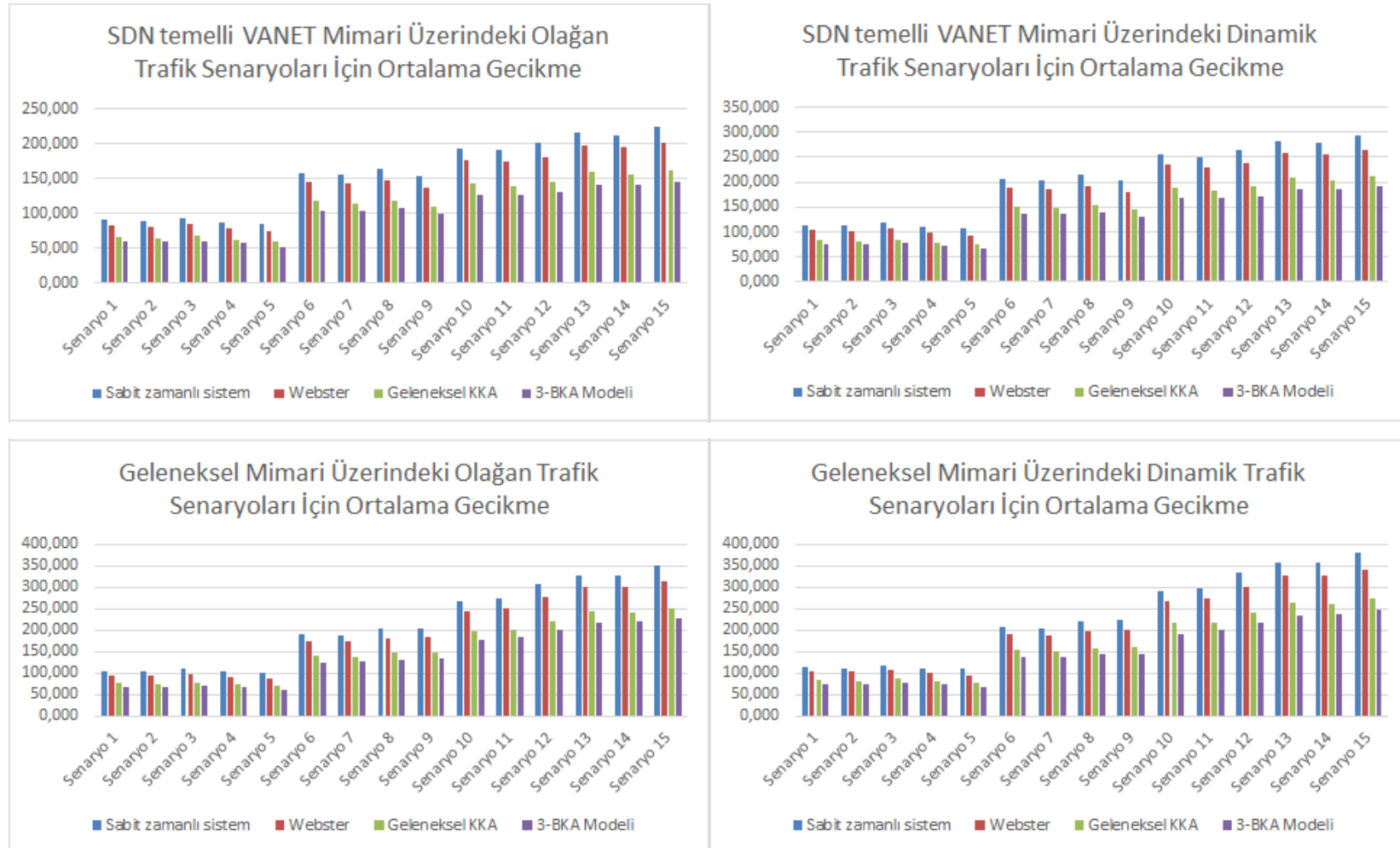


Şekil 4.16. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerin kavşak içlerindeki ortalama çevrim süreleri

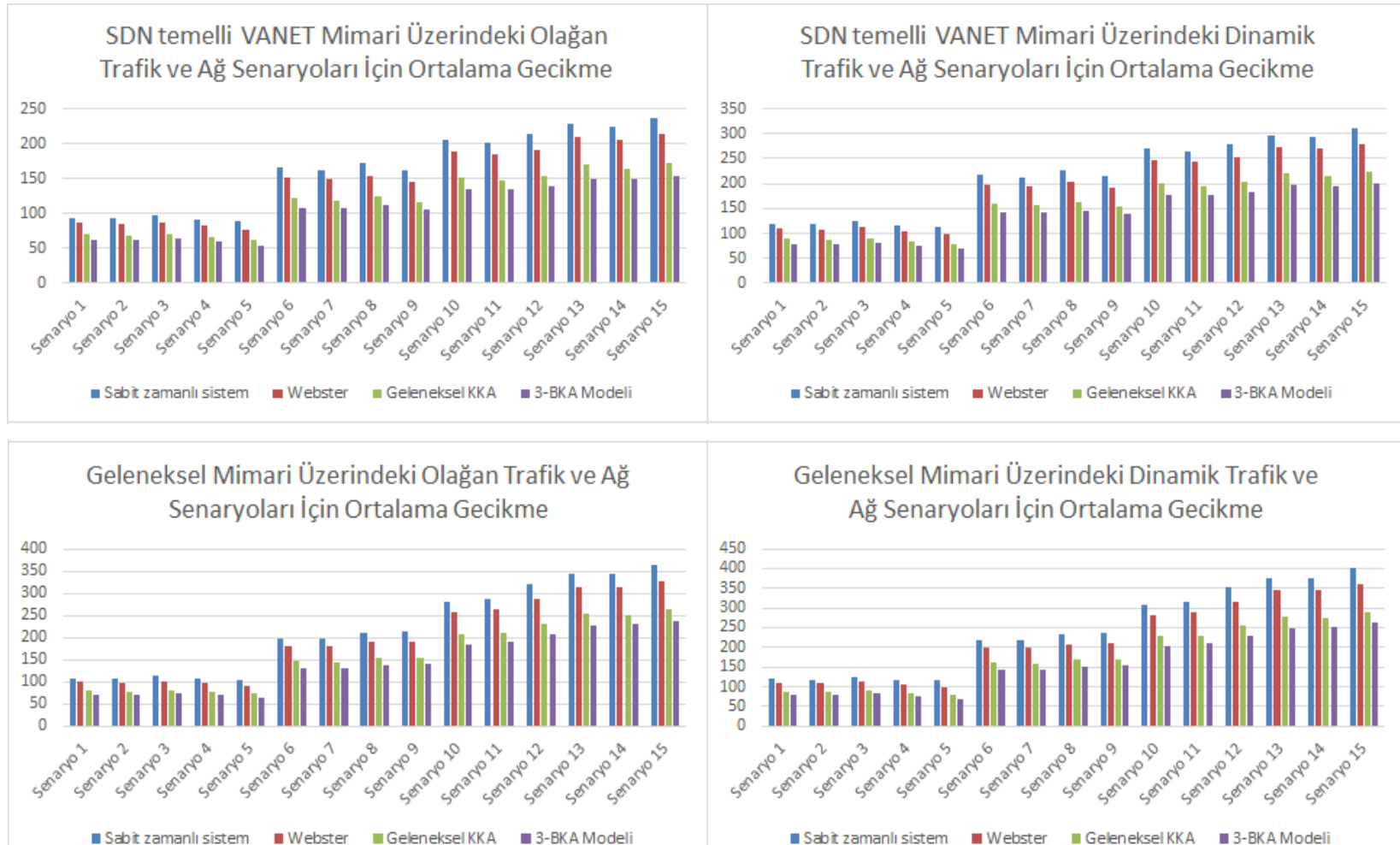
Şekil 4.17.'de, çalışmadaki her bir farklı trafik senaryolarında kavşak içlerindeki araçların kavşağa giriş ve çıkışları arasındaki zamanda normal yolculuk süreleri haricinde kırmızı ışık ve trafik sıkışıklığından dolayı yaşamış oldukları ortalama gecikme süreleri (sn) hesaplanmıştır. Buna göre araç sayısının az yoğun olduğu (100-300 araç) olağan trafik senaryolarında, çalışmada önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli kullanılarak yapılan testlerde Webster ve sabit zamanlı hesaplama göre gecikme süreleri arasında %15-17, karınca koloni algoritmasına göre de %9-11 arasında bir iyileşme gözlenmiştir. Kavşak içerisindeki araç sayısı arttığında (800-1300) yani doymuş trafiğe ulaşıldığında ise bu iyileşme Webster eşitliği ve sabit zamanlı sistemlerde %17-21'e, karınca koloni algoritmasına göre de %13-15'e kadar çıkmaktadır.

Dinamik trafik senaryolarında ise özellikle koordineli kavşaklarda oluşturulan trafik kazası, öncelikli araç geçişi ve aktivite durumu (tren geçişi, yürüyüş vs.) gibi senaryolarda önerilen bulanık modelin sabit zamanlı ve Webster eşitliğine göre ortalama gecikme sürelerinde %20-22, karınca koloni algoritmasına göre ise %14-15 arasında bir iyileşme gerçekleştirildiği gözlenmiştir.

Dinamik ve olağan trafik senaryolarından üretilen araç sayılarına göre, akıllı ulaşım sistemlerinin altyapısında bulunan cihazlar ve aralarındaki bağlantılar üzerinde cihaz bozulması, bağlantı kopması ve bant genişliğinde dar boğaz oluşturularak iletişim altyapıları üzerinde de performans testleri (Şekil 4.18.'de) yapılmıştır. Buna göre çalışmada önerilen SDN temelli VANET altyapılı akıllı ulaşım sistemi, geleneksel altyapılı bir akıllı ulaşım sistemine göre ortalama gecikme sürelerinde %7-8 arasında bir iyileşme sunmaktadır. Bu iyileşme, SDN'nin ağdaki tüm cihazlara ve düğümlere direk erişimi ve kontrolü, modüler yapısı ve de merkezi yönetim özellikleri sayesinde sağlanmıştır.

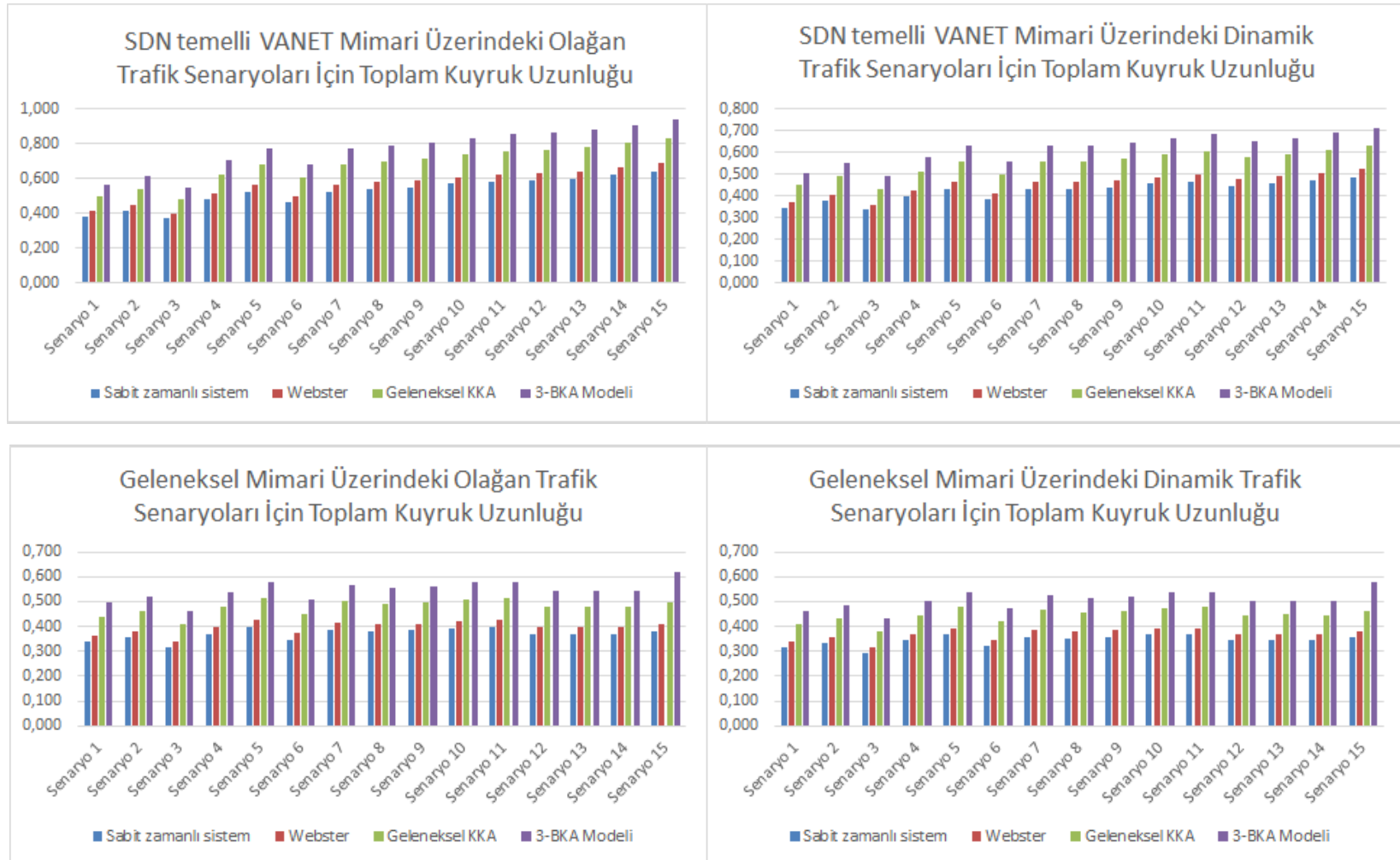


Şekil 4.17. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerin kavşak içi ortalama gecikme süreleri



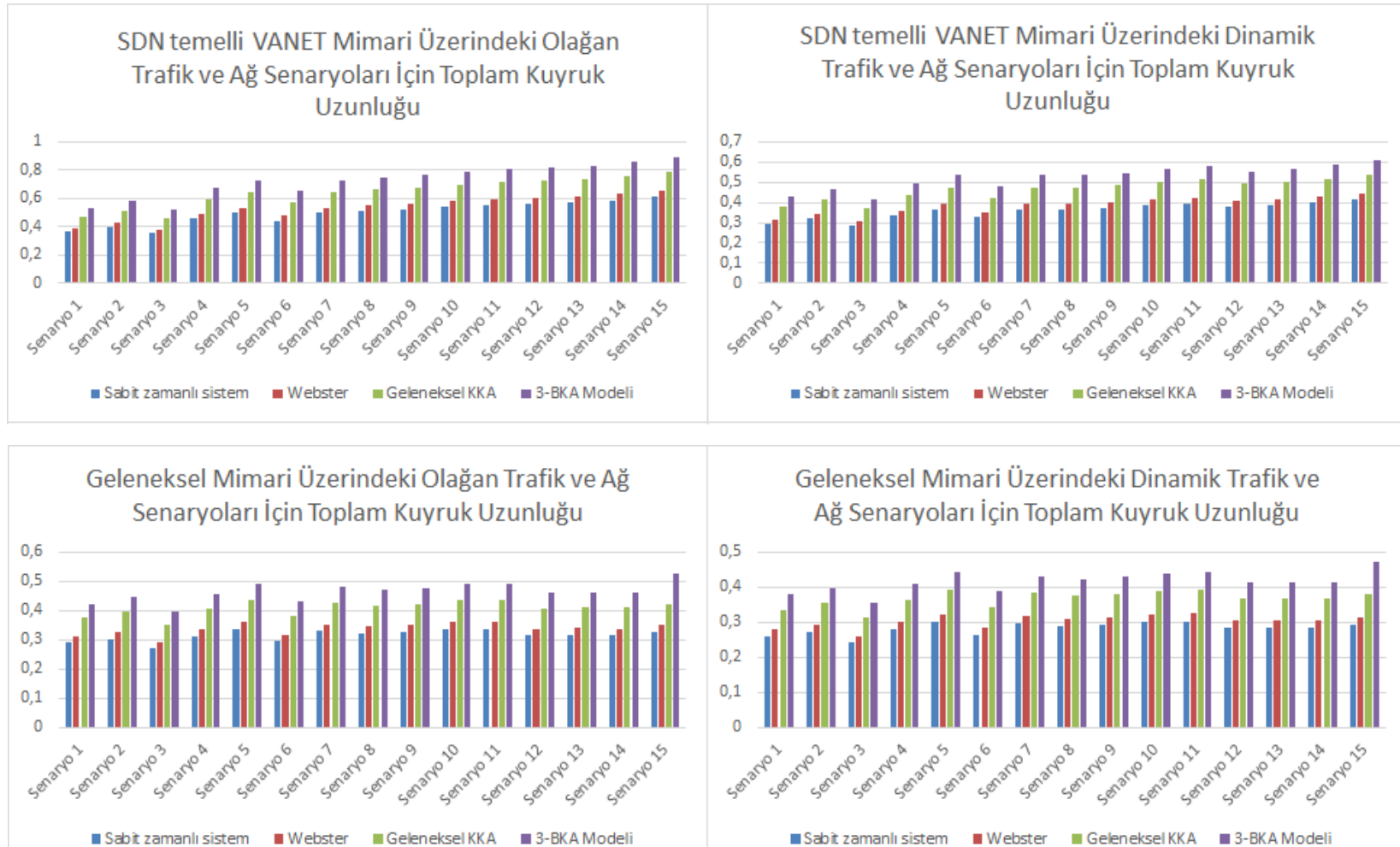
Şekil 4.18. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerin kavşak içi ortalama gecikme süreleri

3 farklı faz sisteminin (4 fazlı, 3 fazlı, 2 fazlı) bulunduğu Adapazarı Şehir Merkezinde olan bir faz çevrim süresi içerisinde kavşaktan geçen araçların sayılarına oranının bulunduğu bu kuyruk uzunluğu performans testlerinin sonuçları Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Sabit zamanlı sistemlerde 4 fazlı bir sistem için 80 sn olarak atanan bu çevrim süresi, diğer hesaplama tekniklerinde her senaryoya göre farklılık gösterdiğinden sonuçlar bir çevrim süresinde geçen araç sayısı oranı olarak hesaplanmıştır. Az yoğun senaryolarda oranlar birbirine yakın olsa da kavşaktaki araç yoğunluğu arttıkça 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelin bir çevrim süresi içerisinde kavşaktan geçen araç sayısında artış olduğu görülebilmektedir. Örneğin az yoğunluklu (100-300 araç) senaryoda önerilen model ile geleneksel karınca algoritması arasında %6-7 oranında bir fark (bir çevrimde 18-22 araç) söz konusu iken, bu fark yoğun ve dinamik trafik senaryolarında %12-13'e (bir çevrimde 60-70 araç) kadar çıkabilmektedir. Yine dinamik ve olağan trafik senaryolarından türetilerek yapılan Şekil 4.20.'deki ağ senaryolarında ise %10 civarında kuyruk uzunluğunda azalma görülmektedir.



Şekil 4.19. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerin her fazdaki geçen araç sayısı oranı



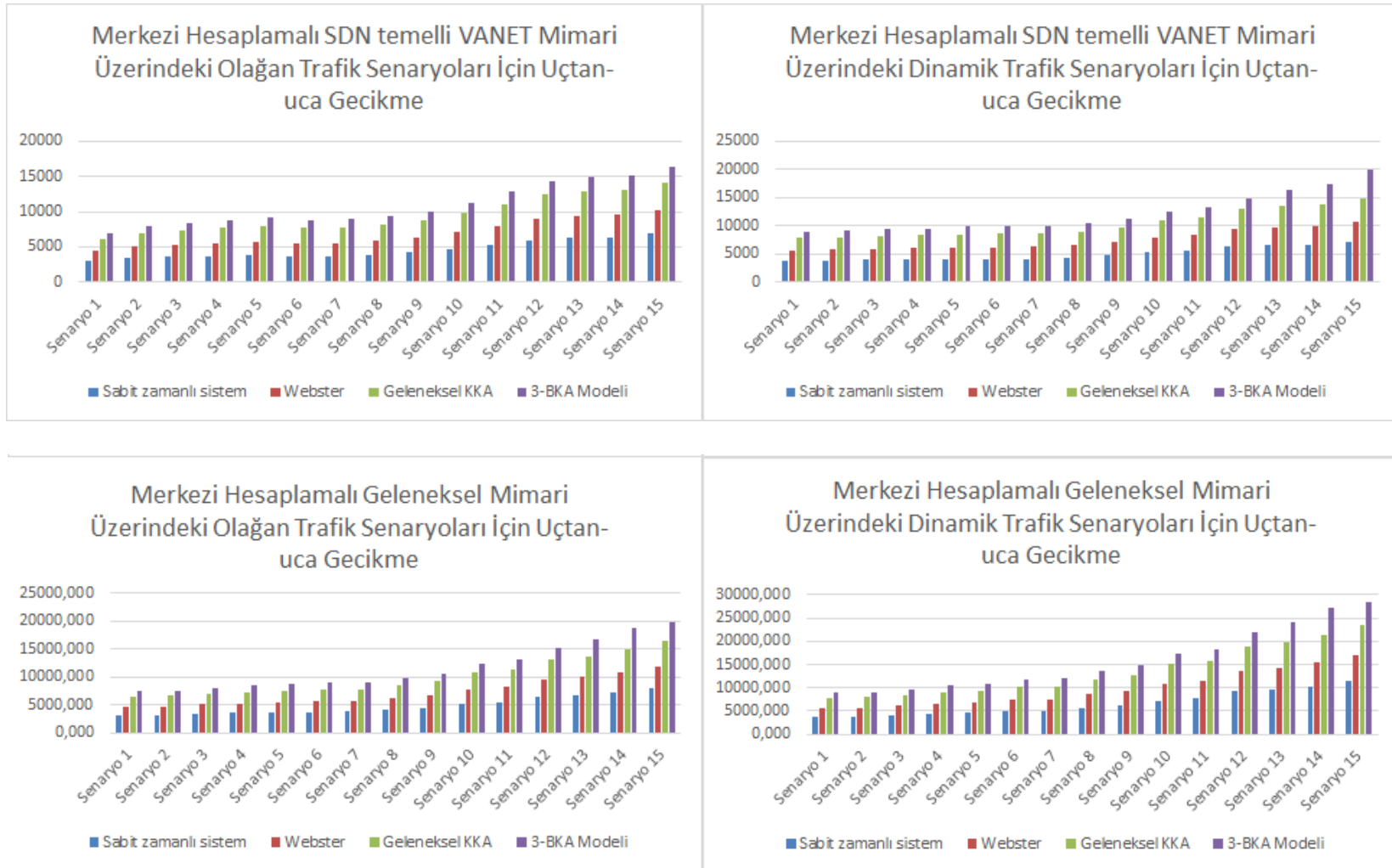


Şekil 4.20. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerinin her fazdaki geçen araç sayısı oranı

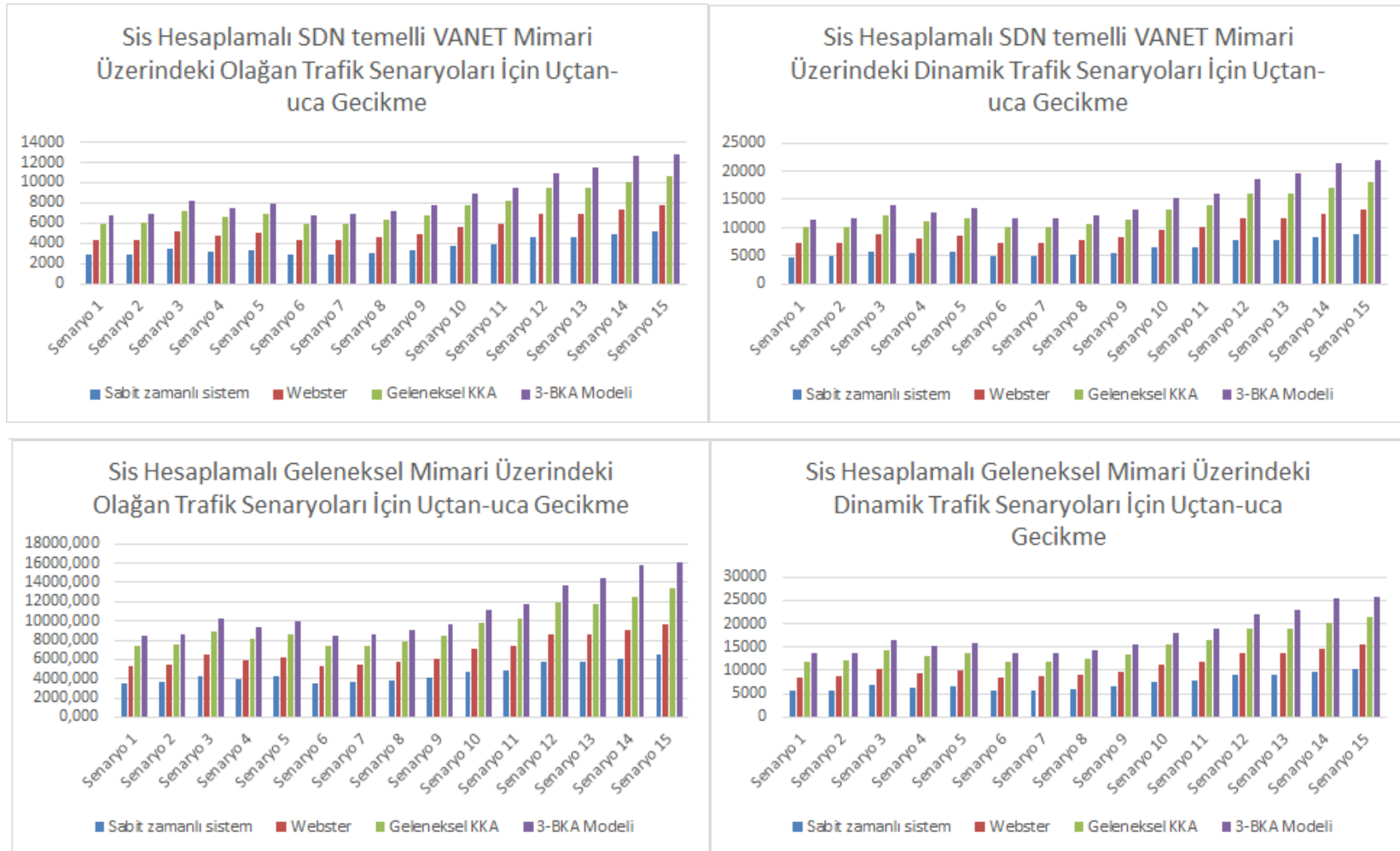
#### 4.2.2.3.2. Ağ performans kriterlerine göre senaryoların değerlendirilmesi

Çalışmada trafik sinyalizasyonu ile ilgili performans kriterleri haricinde trafik yönetim sistemlerinin iletişim altyapılarında SDN mimarisinin işlevselliğini ve uygulanabilirliğini göstermek adına kavşak içlerindeki araçlardan elde edilen trafik bilgilerinin merkezdeki bulanık modelde işlenip elde edilen yeni yeşil ışık süre ve faz düzenlerinin tekrar sahadaki ekipmanlara (araçlar, RSU ve trafik lambalarına) kadar olan iletimlerinde geçen süre (ms) Şekil 4.21.'de gösterilmiştir. Bu performans karşılaştırılmalarında, geleneksel sistem ile önerilen SDN temelli VANET sistemi aynı fiziksel özelliklere sahip cihazlardan oluşmaktadırlar. Her iki sistem üzerinde de sinyalizasyon hesaplamalarında aynı teknikler kullanılmıştır.

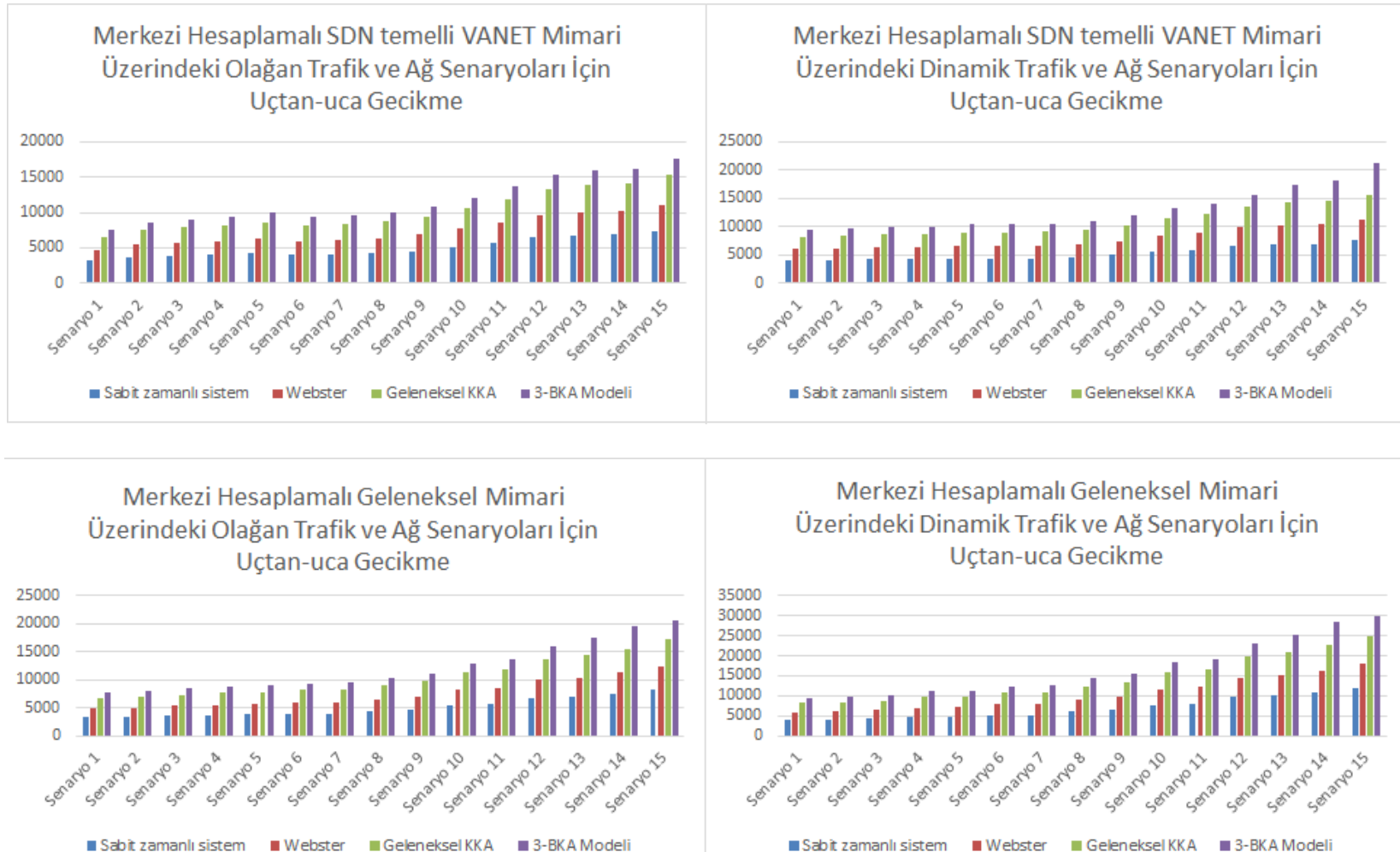
Buna göre olağan ve dinamik trafik senaryolarından üretilerek ağ topolojisi üzerinde Tablo 5.3.'deki senaryolara göre SDN temelli VANET mimarisi, geleneksel sistemlere göre uçtan-uca gecikme de tüm sinyalizasyon tekniklerinde uçtan-uca gecikme sürelerinde %20-30 arasında iyileşme göstermiştir (Şekil 4.22.). Çalışmada önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelin diğer sinyalizasyon tekniklerine göre daha fazla uçtan-uca gecikme sürelerine sahip olmasının temel nedeni sinyalizasyon hesaplaması esnasında kaybettiği süredir. Fakat en yoğun trafik ve ağ topoloji senaryosu altında bile bu uçtan uca gecikme süresi minimum çevrim süresi olan 40 sn'nin altında olduğu için kavşak sinyalizasyonu için bir sorun teşkil etmemektedir. Bu karşılaştırmada ayrıca sis hesaplama ile merkezi hesaplama da karşılaştırılmıştır. Düşük yoğunluklu trafik senaryolarında merkezi hesaplama sis hesaplamaya göre %4-5 daha iyi sonuç verirken, özellikle yoğun trafik senaryolarında sis hesaplama merkezi hesaplamaya göre %18-20 arasında daha iyi sonuç vermiştir.



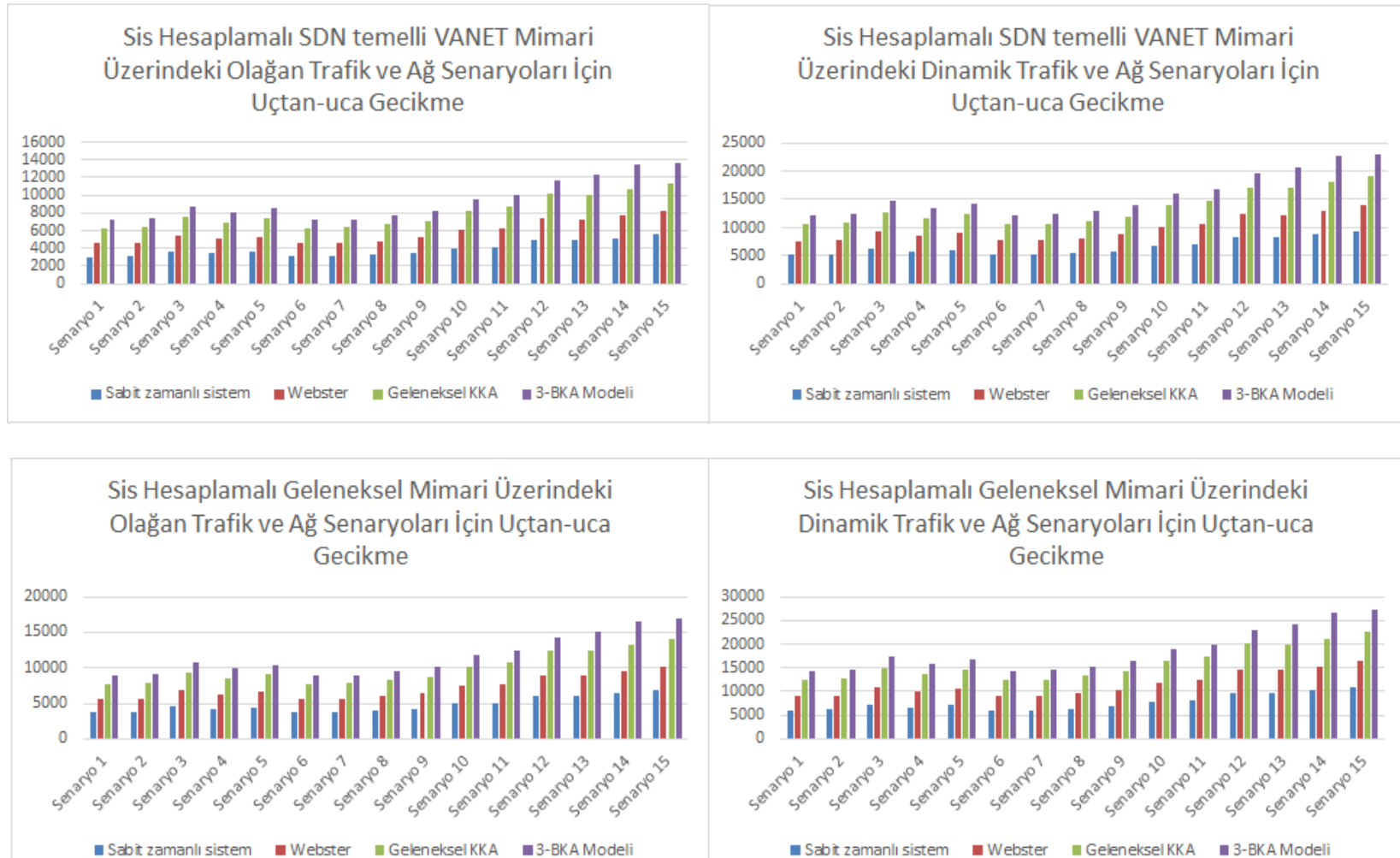
Şekil 4.21. Trafik senaryolarına göre merkezi hesaplama dayalı iletim mimarilerinin uçtan-uca gecikme süreleri



Şekil 4.22. Trafik senaryolarına göre sis hesaplama dayalı iletim mimarilerinin uçtan-uca gecikme süreleri

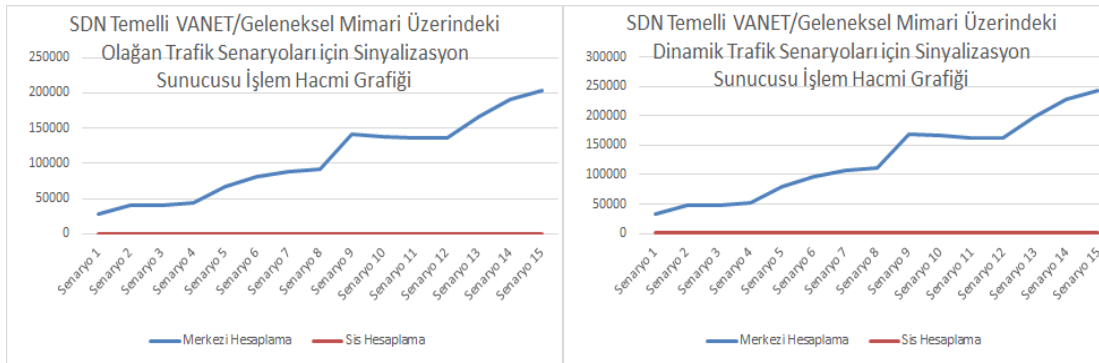


Şekil 4.23. Trafik ve ağ senaryolarına göre merkezi hesaplama dayalı iletim mimarilerinin uçtan-uca gecikme süreleri

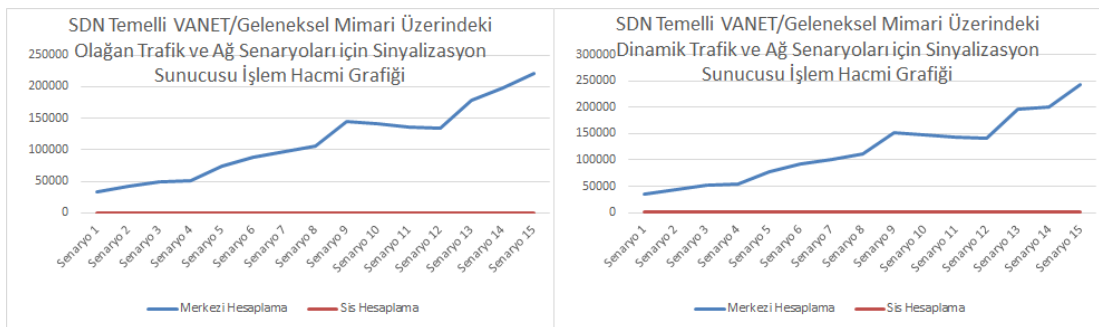


Şekil 4.24. Trafik ve ağ senaryolarına göre sis hesaplama dayalı iletim mimarilerinin uçtan-uca gecikme süreleri

Merkezi ve sis hesaplamasının uçtan-uca gecikme performans kriteri kapsamındaki karşılaştırılmasının haricinde, çalışmada ayrıca sinyalizasyon sunucusu üzerindeki işlem hacmi de ölçülmüştür. Şekil 4.25. ve Şekil 4.26'da verilen karşılaştırma grafiklerinde sis hesaplama temelli SDN temelli VANET mimarisi üzerinde senaryolardaki araç sayısı gözetilmeksizin her RSU, merkezdeki sinyalizasyon sunucusuna ilgili çevrim zamanı için sadece bir TCP paketi yollayacağı için tüm RSU'lar toplam 504 byte'lık bir data trafiği oluşturmaktadır. Merkezi hesaplamada ise RSU'lar kendi üzerindeki herhangi bir hesaplama işlemi yapmadığından, her araçtan kendilerine gelen trafik bilgilerini bir TCP paketi içerisinde (70 byte) direk sinyalizasyon sunucusuna gönderdiklerinden ilgili senaryo için sunucu üzerinde 28 mb-250mb arasında bir data trafiği oluşmaktadır.



Şekil 4.25. Trafik senaryolarına göre hesaplama yöntemlerindeki işlem hacmi



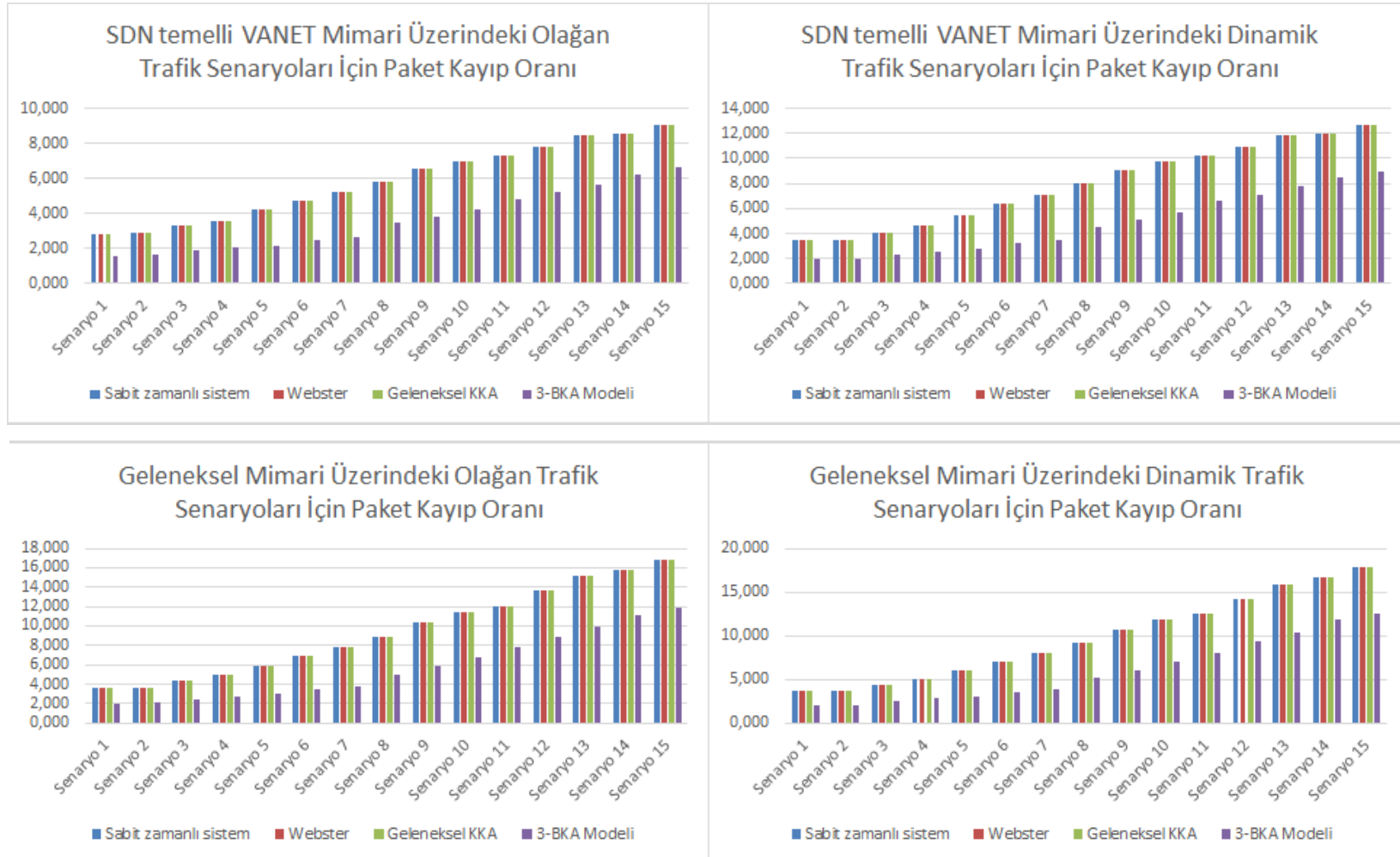
Şekil 4.26. Trafik ve ağ senaryolarına göre hesaplama yöntemlerindeki işlem hacmi

Son olarak, Şekil 4.27. ve Şekil 4.28'de gerek SDN temelli VANET sisteminin geleneksel trafik yönetim sistemlerine göre gerekse önerilen 3 aşamalı bulanık-karar

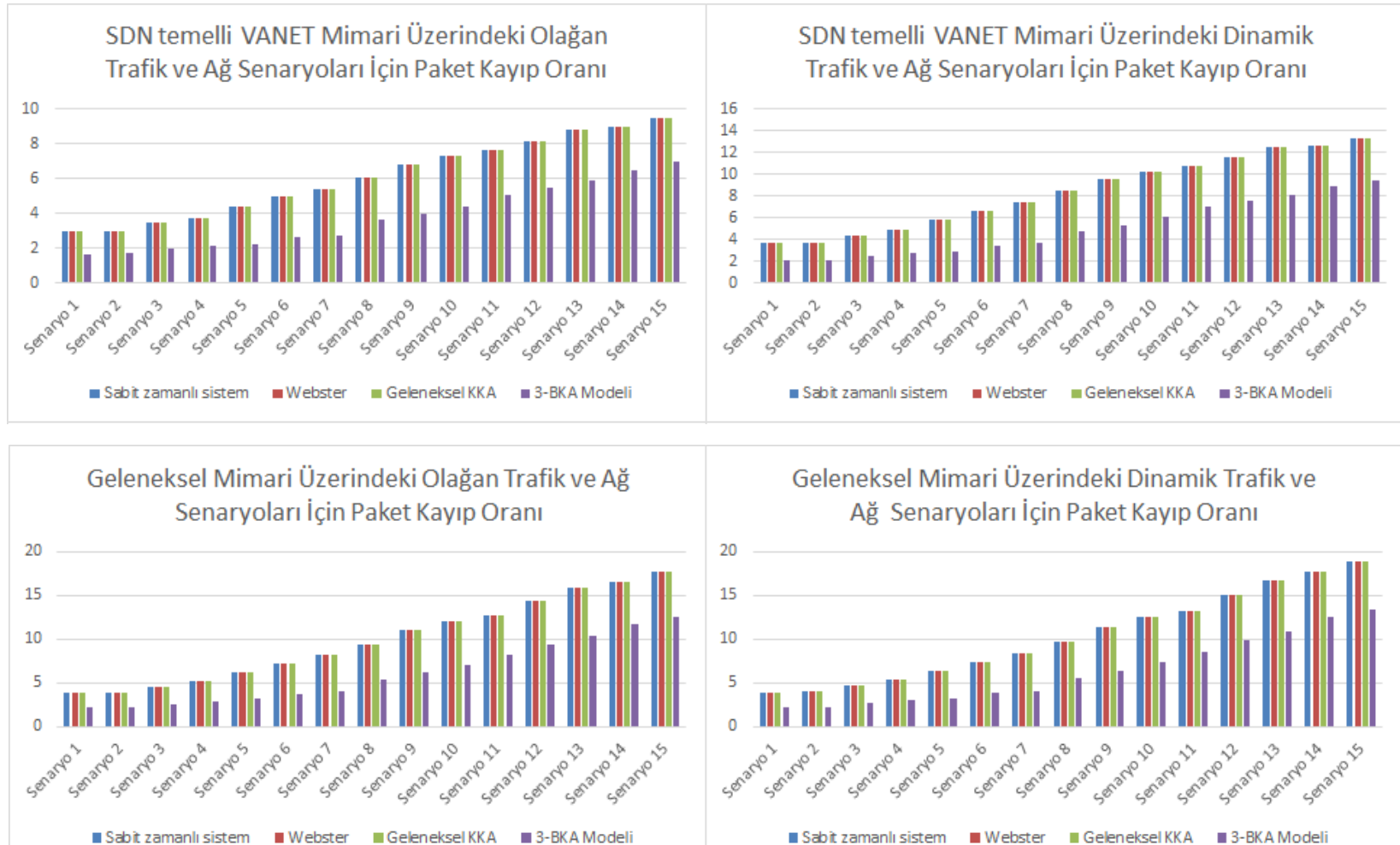
ağacı modelinin diğer sinyalizasyon tekniklerine göre, ağ topolojisindeki değişikliklere (cihaz bozulması, bağlantı kopması, bant genişliği) ve de kavşak içerisindeki araç sayılarına (az yoğun-doygun trafik) göre oluşturulan senaryolar altında kavşaklardaki TCP paket iletimlerindeki (araç-araç, araç-SDN etmen RSU) kayıp oranının, nasıl değişim gösterdiği performans edilmiştir. Çalışmada önerilen 3 aşamalı bulanık model trafik sinyalizasyonun haricinde, sahadan gelen araç sayısı bilgisine göre araçların kendi aralarında ve RSU ile olan iletimlerinde VANET yönlendirme protokollerinden AODV ve DSDV arasında, SDN kontrolör vasıtasıyla gönderdiği akış bilgileri ile otomatik dallanma yaptırmaktadır.

Buna göre SDN temelli VANET sistemi kullanılan trafik yönetim sisteminin, geleneksel sistem kullanan trafik yönetim sistemlerine göre düşük yoğunluk ve basit ağ topoloji değişikliğinde tüm sinyalizasyon teknikleri için paket kayıp oranlarında %4-5 arasında iyileşme göstermiştir. Daha yoğun trafik ve kompleks ağ topoloji değişikliklerinde ise bu paket kayıp oranların SDN temelli VANET sisteminin, geleneksel sistemlere göre %11-12 oranında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Önerilen 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modelin ise diğer sinyalizasyon tekniklerine göre sahadaki SDN etmen araç ve RSU'lara göndermiş olduğu akış girdisi vasıtasıyla %28-45 arasında bir iyileşme sağlamaktadır.





Şekil 4.27. Trafik senaryolarına göre iletim mimarilerindeki paket kayıp oranları



Şekil 4.28. Trafik ve ağ senaryolarına göre iletim mimarilerindeki paket kayıp oranları

## BÖLÜM 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

### 5.1. Sonuç

Akıllı ulaşım sistemlerinin en önemli sorunu olan şehir-içi trafik sinyalizasyon sistemleri karmaşık ve doğrusal olmayan bileşenlerden oluşan sistemler oldukları için bu sistemlerde iletişim altyapılarında esnek ve ölçeklenebilir yapılara, merkezde ise hesaplamalı teknikler kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Literatürde kavşak yönetim sistemlerinin özellikle saha iletişim altyapıları için artık VANET mimarisinin efektif bir alternatif çözüm olduğu görülmüştür. Öte yandan büyük ve karmaşık ağ yapıları, veri ve kontrol düzlemlerini birbirinden ayırarak daha kolay ve dinamik yönetim sağlayan SDN ağ paradigmasını kullanmaya başlamışlardır. Bu sebeplerden ötürü bu tez çalışmasında, şehir içi trafik/kavşak yönetim sistemlerinin günümüz ve gelecek trafik ihtiyaçlarını karşılamaları amacıyla, her iki yönde uçtan-uca iletim modeli sağlayan 2 aşamalı bir SDN temelli VANET mimari önerisi sunulmuştur.

Tez kapsamında ayrık kavşak yapıları için önerilen SDN temelli VANET mimarisinde (ilk aşama), günümüz şehir içi trafik/kavşak yönetim sistemlerinin iletim ve uygulama altyapılarındaki veri akış modüllerinde (veri toplama, veri ayrıştırma, veri işleme, servis dağıtım) karşılaşılan problemlere çözüm bulan bir mimari önerisinde bulunulmuştur. Veri ve kontrol düzlemlerinin birlikte ele alındığı bu mimari önerisinde, SDN etmen araçlardan elde edilen trafik bilgileri “packet\_in” mesajları içerisinde bir TCP trafik paket yapısıyla sinyalizasyon merkezine gönderilmiştir. Tezin bu aşamasında ayrıca 4 fazlı tek bir ayrık kavşak yapısı üzerinde çalışacak trafik sinyalizasyon hesabı için SDN modüllerine (Hat Keşfi ve Topoloji Yöneticisi) dayalı (*interior uygulama*) bir karınca koloni algoritması geliştirerek, literatürdeki diğer sinyalizasyon teknikleri ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada iletim mimarilerinden

sadece merkezi iletim modu benimsenmiş olup, tek bir kavşak üzerinde sınırlı kapsamdaki trafik senaryolar üzerinde çalışılmıştır.

Ayrık kavşak yapılarındaki sinyalizasyon işlemleri geliştirilen SDN temelli KKA, farklı trafik senaryoları altında mevcut geleneksel sinyalizasyon tekniklerinden sabit zamanlı sistemler, Webster eşitliği ve hesaplamalı tekniklerden parçacık sürü optimizasyonu ve bulanık mantık temelli yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ortalama gecikme ve kuyruk uzunluğu gibi trafik performans karşılaştırmalarında önerilen SDN temelli KKA, diğer optimizasyon tekniklerine göre %7-15 arasında iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Sunucu performansı ve uçtan-uca gecikme gibi ağ performans karşılaştırmalarında ise SDN temelli KKA'nın diğer optimizasyon tekniklerine göre %15-22 arasında iyileşme sunmaktadır.

Tezin ikinci aşamasında ise, farklı faz ve kavşak tiplerinden oluşan koordineli kavşaklar üzerindeki günümüz trafik yönetim sistemlerinin sinyalizasyon, yolcu bilgilendirme gibi uygulama ihtiyaçlarını dinamik trafik senaryoları ve farklı ağ topolojileri altında da kesintisiz ve servis kalitesi kriterleri kapsamında karşılayabilmesi için ilk çalışmadan farklı olarak uçtan-uca genişletilmiş bir SDN temelli VANET mimarisi sunulmuştur. Veri ve kontrol düzlemlerinin birbirinden ayrıldığı bu çalışmada sahadaki SDN etmen araçlardan VANET 802.11p/wi-fi iletim kanalları vasıtasıyla trafik bilgilerini elde eden SDN etmen RSU, merkeze sinyalizasyon hesabı için gönderilecek bulanık model girdileri için TCP paketleri oluşturmaktadır. Merkezi ve sis (fog) hesaplama mantığına dayalı hesaplama yapılabilen bu mimari önerisinde SDN etmen RSU'ya bağlı SDN anahtar cihazında oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda, RSU üzerindeki Wi-fi arayüzü ile iletime devam etmektedir. Bu yönüyle önerilen genişletilmiş SDN temelli VANET mimarisi hibrid iletim modunu desteklemektedir.

Günümüz kavşak yapıları, araç trafik yoğunlukları ve değişken şartlar göz önüne alındığında literatürdeki sinyalizasyon çalışmalarının aksine sadece taşıt

kompozisyonunu sinyalizasyon hesabına girdi olarak dahil etmek yeterli olmamakta, sahada gerçekleşen acil durumlar (kaza, öncelikli araç geçişi vs.), çevresel etmenler ve aktiviteleri de dikkate almak gerekmektedir. Bu sebepten ötürü tezin ikinci aşamasında, trafik yönetim sistemlerinin iletim ve uygulama altyapısı için önerdiğimiz genişletilmiş SDN temelli VANET mimarisi üzerinde, sinyalizasyon uygulamaları için 3 aşamalı bir bulanık-karar ağacı modeli de geliştirilmiştir. Merkezdeki bir SDN anahtar cihaza bağlı olan ve bir exterior uygulama olarak geliştirilen bu 3 aşamalı bulanık-karar ağacı modeli sahadan gelen trafik verilerine göre dinamik olarak koordineli ve izole kavşakların sinyalizasyon işlemlerini tamamlamakta, gerektiğinde acil durumlar için kontrolörün akış oluşturmasını sağlamaktadır. Oluşturulan bu akış girdileri sahadaki SDN etmen araç ve RSU'ların aralarındaki iletişimlerde VANET yönlendirme algoritmalarını otomatik seçmelerini sağlamaktadır.

Koordineli kavşak yapılarındaki sinyalizasyon işlemleri için geliştirilen 3-BKA modeli, literatürdeki sabit zamanlı sistemler, Webster modeli ve karınca koloni algoritması sinyalizasyon çalışmaları ile Sakarya Büyükşehir Belediyesi Trafik Şube Müdürlüğünden alınan verilere göre oluşturulan farklı trafik ve ağ senaryoları altında karşılaştırılmıştır. Önerilen 3-BKA modeli ortalama gecikme ve kuyruk uzunluğu performans kriterlerinde diğer tekniklere göre, olağan trafik senaryolarında ortalama %12-14, değişken trafik senaryolarında ise %15-18 arasında daha iyi başarı sağlamıştır. Ayrıca farklı ağ topoloji senaryolarında ise SDN temelli VANET mimarisi, geleneksel sistemlere göre uçtan-uca gecikmede ortalama %30-40 ve paket kayıp oranları kriterinde ise ortalama %9-12 arasında iyileşme sunmaktadır.

## **5.2. Çalışmanın Bilime Katkıları**

Tez kapsamında şehir içi ayrık ve koordineli kavşaklardaki trafik yönetim sistemleri için önerilen 2 aşamalı SDN temelli VANET mimarisi ve bu mimari üzerinde trafik yönetim sistemlerinin en önemli işlevi olan trafik sinyalizasyonu için geliştirilen dahili ve harici sinyalizasyon uygulamalarının genel olarak bilime katkıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- İncelenen akademik çalışmalar neticesinde, SDN ve VANET mimarilerinin birlikte ele alındığı çalışmaların olduğu görülmüş, fakat bu çalışmaların trafik yönetim sistemlerinin sinyalizasyonu gibi bir akıllı ulaşım uygulaması ile entegre kullanılmadığı ve her iki yönde uçtan-uca bir mimari önerisinin sunulmadığı belirlenmiştir. Bu sebeplerden ötürü, bu çalışmada günümüz kavşak ve faz yapıları için farklı trafik ve ağ şartlarında istenen servis kalitesinde çalışabilen mimari önerisinin gerek çalışma yapısı, gerek paket yapıları, gerekse ilgili benzetim programlarında uygulaması açısından literatürde ve ticari çalışmalarda bir karşılığı bulunmamaktadır. Bu sebepten ötürü tez çalışmasından elde edilen birikimler, bu konularda çalışacak araştırmacılar, akademisyenler ve lisansüstü öğrencilere ciddi katkı sağlayacaktır.
- Ayrıca çalışma konusu itibariyle, bu tez çalışması başta Ulaştırma Bakanlığı ve Karayolları Genel Müdürlüğü olmak üzere birçok kamu kuruluşunun dikkatini çekip, dolayısıyla ortak çalışmaları tetikleyecek ve bunlara bağlı olarak üniversite – sanayi işbirliğine de büyük katkılar sağlayabilecektir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen teknik kazanımlar ile ülkemizdeki özellikle büyük şehirlerdeki trafik yönetiminin bilişim teknolojileri ile entegrasyonu açısından uluslararası arenada kalıcı ve sürdürülebilir bir rekabet ortamı oluşturmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca geliştirilen çözümün trafiğe yüzde bir bile olsa iyileştirme sağlaması ulusal ve uluslararası alanda sosyal, ekonomik ve çevresel açıdan çok önemli faydalar sağlayacaktır.
- Çalışmanın bir başka özgün değeri olarak, ayrık ve koordineli kavşaklar için önerilen SDN temelli VANET altyapılı trafik yönetim sistemlerindeki sinyalizasyon işlemleri için, önce bir dahili uygulama olan SDN kontrolör modüllerine dayalı karınca koloni algoritması (SDN temelli KKA), daha sonra ise günümüz kavşak ve faz yapıları üzerinde değişken trafik şartları, çevresel etmenler ve aktiviteleri dikkate alan bir harici uygulama olarak 3 aşamalı bir bulanık-karar ağacı modeli (3-BKA, faz süre optimizasyonu, faz düzeni ayarı ve yol önceliği belirleme) geliştirilmiştir. Bu sinyalizasyon uygulamalarının, gerek çalışma yapıları gerekse mimari üzerindeki gerçekleştirilmesi açısından

literatürde ve ticari çalışmalarda bir karşılığı bulunmamaktadır. Bu sebeplerden ötürü bu tez çalışması, sinyalizasyon konularında çalışma yapan özellikle yerel yönetimler, akademisyenler ve lisansüstü öğrencilere de ciddi katkılar sağlayacaktır.

### 5.3. Gelecek Çalışmalar

Akıllı ulaşım sistemleri ve alt modülü olan trafik yönetim sistemleri, günümüzde olduğu gibi gelecekte de büyük şehirlerin en önemli sorunu olacaktır. Bu sistemler özellikle iletim ve uygulama altyapılarında gelişen bilişim teknolojileri ve ağ paradigmatlarıyla birlikte güncellenip, günümüz/gelecek trafik ihtiyaçlarını daha iyi uçtan-uca gecikme, paket kayıp oranı, işlem hacmi gibi ağ servis kalitesi ve daha az ortalama gecikme, kuyruklanma gibi sinyalizasyon servis kalitelerinde sağlamaları gerekmektedir. Bu kapsamda tez çalışmasında elde edilen bilgi ve birikim neticesinde, ileriki çalışmalar olarak ayrık ve koordineli kavşaklar için önerilen SDN temelli VANET mimarinin günümüz farklı iletişim teknolojileri (5G, hücreli vb.) ve mimari yapıları kullanılarak geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca tez çalışmasında önerilen mimarinin trafik sinyalizasyonu haricinde, akıllı ulaşım sistemlerin rota hesaplama, park yönetim gibi farklı trafik emniyeti ve bilgi eğlence konularına uyumlu hale getirip, bu konular üzerinde çalışmalar yapılması hedeflenmektedir.

İleriki çalışmalar olarak hedeflenen bir başka konu ise, özellikle şehir içi trafik yönetim sistemlerinin veri toplama ve veri ayrıştırma modüllerinde daha esnek ve ölçeklenebilir bir yapı ile veri iletişiminin daha iyi sağlanacağı, TCP/IP protokol yığımına bir alternatif olarak SDN mimari üzerinde bir çerçeve yapısının (framework) geliştirilmesidir. Bu çerçeve yapı içerisinde, kavşak içlerindeki araçlardan yol kenarındaki SDN etmen RSU cihazına olan iletimde veri çevrim modüllerindeki güvenlik, paket kayıp oranları ve uçtan-uca gecikme servis kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla VANET WAVE mimarisi kapsamında kullanılan DSRC standardı ve 802.11p protokol yapısı üzerinde düzenlemeler yapılacaktır. Daha sonra SDN etmen RSU cihazından SDN anahtar cihazına, ondan da SDN kontrolör cihazına kadar olan

iletim de ise günümüz/gelecek trafik ihtiyaçlarına uygun, bağlantı kurulum ve sinyalizasyon verisi taşıma aşamaları için farklı mesaj tiplerinden oluşan openflow temelli bir protokol tasarlanması hedeflenmektedir.

Akıllı ulaşım sistemlerinin önem arz eden bir diğer konusu ise bu sistemlerin gerek iletim gerekse uygulama altyapılarının güvenliğidir. Bu sebepten ötürü, bir başka gelecek çalışma olarak, gerek araçlar üzerinde gerekse iletim altyapısında oluşabilecek, DOS/DDOS, zararlı yazılım, yemleme gibi bir çok siber güvenlik atağına karşın, SDN kontrolör üzerinde anomali tespiti yapabilen bir uygulama geliştirmektir. Ayrıca geliştirilecek uygulamada, sahadaki araçların yetkilendirme ve doğrulama işlemlerinin sağlanabilmesi için bir PKI (public key infrastructure) modeli de oluşturulacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] Djahel S., Doolan R, Muntean G., Murphy J., A Communications-Oriented Perspective on Traffic Management Systems for Smart Cities:Challenges and Innovative Approaches, IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume:17 Issue: 1), pp 125-151, 2014.
- [2] Zhang J., Wang F., Wang K., Lin W., Xu X., Chen C., Data-Driven IntelligentTransportation Systems: A Survey, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp 1624-1639, 2011.
- [3] Chen B., Cheng H., A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp 485-497, 2010.
- [4] A. Ferreira J., Fonseca J., Introduction to Intelligent Transportation Systems, Studies in Systems, Decision and Control, vol 52, pp 1-17, 2016.
- [5] Qu F., Wang F., Yang L., Intelligent transportation spaces: vehicles, traffic, communications, and beyond, IEEE Communications Mag., 2010.
- [6] Dimitrakopoulos G., Demestichas P., Intelligent Transportation Systems, IEEE Vehicular Technology Magazine, pp 77-84, 2010.
- [7] Qureshi K., Abdullah A., A Survey on Intelligent Transportation Systems, Middle-East Journal of Scientific Research 15, pp 629-642, 2013.
- [8] K uc ukmanisa A., Urhan O. “G om l  bir platform üzerinde gerçek zamanlı  eritten ayrılma uyarı sistemi”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol 32, 2017.
- [9] Barba C., Mateos M., Soto P., Mezher A., Smart city for VANETs using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights , IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp 902-907, 2012.
- [10] Bai X., Ye X., Jiang H., Jun Li, A novel traffic information system for VANET based on location service, 16th ICON IEEE Networks, 2008.

- [11] Barrachina J., Sanguesa J.; Fogue M.; Garrido P.; Martinez F.; Cano J.; Calafate Manzoni P., V2X-d: A vehicular-density estimation system that combines V2V and V2I communications, Wireless Days (WD), IFIP, 1-6, 2013.
- [12] Ku I., Lu Y., Gerla M., Ongaro F., Towards Software-Defined VANET: Architecture and Services, Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), 103-110, 2014.
- [13] Truong N., Lee G., Ghamri-Doudane Y., Software defined networking-based vehicular Adhoc Network with Fog Computing, Integrated Network Management (IM), IFIP/IEEE, 1202 - 1207, 2015.
- [14] Chun Liu Y., Chen C., Chakraborty S., A Software Defined Network architecture for GeoBroadcast in VANETs, Communications (ICC), IEEE, 6559 – 65, 2015.
- [15] D. Zhao, Y. Dai, Z. Zhang, Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control: A Survey, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C, vol 42, issue 4, 2012.
- [16] Renfrew D., Yu Hua X., Traffic Signal Optimization Using Ant Colony Algorithm, IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2012.
- [17] [https://en.wikibooks.org/wiki/Fundamentals\\_of\\_Transportation/Traffic\\_Signals](https://en.wikibooks.org/wiki/Fundamentals_of_Transportation/Traffic_Signals), Erişim Tarihi: 23.02.2017.
- [18] Pappis C., Mamdani, A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junction, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol 7, issue 10, 1977.
- [19] Favilla J., Machion A., Gomide F., Fuzzy Traffic Control: adaptive strategies, Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1993.
- [20] Yunrui B., Srinivasan D., Lu. X, Zhe Sun, Zeng W., Type-2 Fuzzy Multi-intersection Traffic Signal Control with Differential Evolution Optimization, Expert Systems with Applications, vol 41, issue 16, 2014.
- [21] Li Li, Yisheng Lv, Wang F., Traffic signal timing via deep reinforcement learning, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica Volume: 3 , Issue: 3 , July 10 2016.
- [22] Wanjing M, Liao D., Liu Y., Kam Lo H., Optimization of pedestrian phase patterns and signal timings for isolated intersection, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 58, Part C, September 2015, Pages 502-514.
- [23] Ulaştırma Bakanlığı, Ulaşım ve İletişim Stratejisi - Hedef 2023, Ankara, 2010.

- [24] AB Politikaları, [http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/index_en.htm), Erişim Tarihi: 25.05.2017.
- [25] AB'nin AUS Girişimleri [http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/initiatives\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/initiatives_en.htm), Erişim Tarihi: 25.05.2017.
- [26] AB'nin AUS Konulu 2010/40 Konulu Direktifi [http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action\\_plan/doc/c\\_2011\\_0289\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action_plan/doc/c_2011_0289_en.pdf).
- [27] ITS America: <http://www.itsa.org/>, Erişim Tarihi: 03.01.2018.
- [28] Karayolu Trafik Güvenliği Stratejisi ve Eylem Planı, 31 Temmuz 2012 tarih ve 28370 sayılı Resmi Gazete.
- [29] UDHB, Akıllı Ulaşım Sistemleri Çalıştayı (25 Mayıs 2012) Sonuç Raporu, Ankara, 2012.
- [30] YILMAZ, Özhan, Karayolu Ulaşımında Akıllı Ulaştırma Sistemleri-Uzmanlık Tezi, Kalkınma Bakanlığı, Ağustos 2012.
- [31] Nietoa J., Albaa E., Oliverab A., Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol:25, 274-283, 2012.
- [32] Hea J., Houb Z., Ant colony algorithm for traffic signal timing optimization, *Advances in Engineering Software*, vol 43, 14-18, 2012.
- [33] Kammouna H., Kallela I., Casillasb J., Abrahamc A., Alimia A., Adapt-traf: An adaptive multiagent road traffic management system based on ant-hierarchical fuzzy model, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol 42, 147-167, 2014.
- [34] D. Mariagrazia, F. Maria Pia, Meloni Carlo. A signal timing plan formulation for urban traffic control. *Control Eng Pract*;14:1297-311., 2006.
- [35] P. Hunt, and D. Robertson, "The SCOOT on-line traffic signal optimization technique", *Traffic engineering and control*, 1982.
- [36] P. Lowrie, "The Sydney coordinated adaptive control systems –principles, methodology, algorithms", *IEEE conf. publication*, vol. 207, 1982.
- [37] Y. Şazi Murat, "Sinyalize kavşaklarda bulanık mantık tekniği ile trafik uyumlu sinyal devre modeli", *Tez, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2001.

- [38] Renfrew D., Yu Hua X., Traffic Signal Optimization Using Ant Colony Algorithm, IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2012.
- [39] D'Acerno L., Gallo M., Montella B., An Ant Colony Optimisation algorithm for solving the asymmetric traffic assignment problem, European Journal of Operational Research, Volume 217, Issue 2, pp 459-469, 2012.
- [40] Zadeh L. A., Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338-353, 1965.
- [41] Zeadally S., Hunt R., Chen Y., Irwin A., Hassan A., Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges, Telecommunication Systems, vol 50, pp217-241, 2012
- [42] Li F., Wang Y., Routing in vehicular ad hoc networks: A survey, IEEE Vehicular Technology Magazine, vol 2, 2007.
- [43] Sultan S., M.Al-Doori, H.Al-Bayatti, Zedan H., A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network, Journal of Network and Computer Applications, vol 37, pp 380-392, 2014.
- [44] Barba C., Mateos M., Soto P., Mezher A., Smart city for VANETs using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights , IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp 902-907, 2012.
- [45] Bai X., Ye X., Jiang H., Jun Li, A novel traffic information system for VANET based on location service, 16th ICON IEEE Networks, 2008.
- [46] Barrachina J., Sanguesa J., Fogue M., Garrido P., Martinez F., Cano J., Calafate C., Manzoni P., V2X-d: A vehicular-density estimation system that combines V2V and V2I communications, Wireless Days (WD), IFIP, 1-6, 2013.
- [47] <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/sdn-definition>, Erişim Tarihi: 25.05.2018.
- [48] Nunes B.; Mendonca M.; Nguyen X.; Obraczka K.; Turletti T., A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials Volume: 16, Issue: 3, Third Quarter 2014.
- [49] Kreutz D., Ramos F., Verissimo P., Rothenberg C., Azodolmolky S., Uhlig S., Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey, Proceedings of the IEEE, 2015.

- [50] Wenfeng Xia ; Yonggang Wen ; Chuan Heng Foh ; Dusit Niyato ; Haiyong Xie, A Survey on Software-Defined Networking, IEEE Communications Surveys & Tutorials Volume: 17 , Issue: 1 , Firstquarter 2015.
- [51] HamidFarhady, HyunYongLee AkihiroNakao, Software-Defined Networking: A survey, Computer Networks Volume 81, Pages 79-95, 2015.
- [52]<https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/floodlightcontroller/pages/1343542/Getting+Started>, Erişim Tarihi: 25.08.2018.
- [53] <https://sumo.dlr.de/index.html>, Erişim Tarihi: 15.06.2017.
- [54] <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>, Erişim Tarihi: 18.09.2018.
- [55] [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main\\_Page](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page), Erişim Tarihi: 12.03.2018.
- [56]<https://github.com/mininet/mininet/wiki/Documentation>, Erişim Tarihi: 15.04.2018.
- [57] Gökçe M.A, Öner E., Işık G., Traffic signal optimization with particle swarm optimization for signalized roundabouts, Sagejournal,2015.
- [58] M. Dorigo, and T. Stutzle, Ant Colony optimization, The MIT Press, 2004.
- [59]Gupta Ku., Saket R.K., Performance metric comparison of aodv and dsdv routing protocols in Manets using ns-2, IJRRAS, June 2011.
- [60] Lertworaprachaya Y., Yang Y., John R., Interval-valued fuzzy decision trees with optimal neighbourhood perimeter, Applied Soft Computing 24, 2014.
- [61] Vu X., Kumar V., The Top Ten Algorithms in Data Mining, Chapman and Hall/CRC, 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

Musa BALTA, 04.02.1986'da Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2004 yılında Sakarya Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nü 2009 yılında bitirdi. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Sırasıyla 2009 yılında Arel Üniversitesi'nde ve 2010 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı, akabinde doktora eğitimine Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.