



**KOORDİNELİ SİNYALİZE KAVŞAKLARDA
GECİKME MODELLEMESİ: E80 KARAYOLU
ÖRNEĞİ, ERZURUM**

Ahmet AKBULUT

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KOORDİNELİ SİNYALİZE KAVŞAKLARDA GECİKME MODELLEMESİ: E80
KARAYOLU ÖRNEĞİ, ERZURUM**

(Delay Modelling at Coordinated Signalized Intersections: Case Study of E80 Highway,
Erzurum)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet AKBULUT

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Erzurum
Temmuz, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**Koordineli Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Modellemesi: E80 Karayolu Örneği,
Erzurum**

Doç. Dr. Ahmet ATALAY danışmanlığında, Ahmet AKBULUT tarafından hazırlanan bu çalışma, 22/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Ahmet TORTUM
Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY
Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Kadir Diler ALEMDAR
Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Aslı ıslak imzalıdır

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2024-14757

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ****ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU**

Yüksek Lisans Tezi olarak **Doç. Dr. Ahmet ATALAY** danışmanlığında sunulan “**Koordineli Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Modellemesi: E80 Karayolu Örneği, Erzurum**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	21	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Metot	10	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	16	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	15	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ahmet AKBULUT	Doç.Dr. Ahmet ATALAY
7.7.2025	7.7.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde bilgi, destek ve katkılarını esirgemeyen, akademik yönlendirmeleriyle çalışmamın her aşamasında değerli rehberlik sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Ahmet ATALAY'a ve araştırmam süresince teknik desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Halim CEYLAN'a, Yusuf Cem TURAN'a, Yasin KANBİR'e, Halil İbrahim YİĞİT'e ve Mustafa AKBULUT'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma ve Erzurum İl Milli Emlak Müdürüm Eser ÜNLÜ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet AKBULUT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOORDİNELİ SİNYALİZE KAVŞAKLARDA GECİKME MODELLEMESİ: E80 KARAYOLU ÖRNEĞİ, ERZURUM

Ahmet AKBULUT

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Erzurum ili E80 karayolu güzergâhında yer alan Üniversite Kavşağı, Çat Yolu Kavşağı ve Yenişehir Kavşağı'nda, gerçek trafik verileri kullanılarak koordineli sinyalizasyon planlaması yapmaktır. Koordineli sinyalizasyon sistemlerinin, trafik kazalarını azaltma, taşıt gecikmelerini düşürme ve enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, PTV VISSIM simülasyon programı kullanılarak çeşitli senaryolar oluşturulmuş ve kavşakların mevcut durumları ile koordinasyon senaryolarındaki taşıt gecikmeleri karşılaştırılmıştır.

Yöntem: Çalışma, Erzurum ilindeki üç kritik kavşağın (Üniversite Kavşağı, Çat Yolu Kavşağı ve Yenişehir Kavşağı) trafik verileriyle yapılmıştır. Koordineli sinyalizasyon sistemlerinin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla PTV VISSIM simülasyon programında farklı senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar, kavşakların mevcut trafik durumlarıyla karşılaştırılmış ve taşıt gecikme süreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Bulgular: Yapılan simülasyonlar sonucunda, koordineli sinyalizasyon sisteminin uygulanmasının, kavşaklarda taşıt gecikmelerini belirgin şekilde azalttığı ve trafik akışını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, koordinasyonun sağlandığı senaryolarda, mevcut sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine kıyasla daha verimli sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç: Koordineli sinyalizasyon sistemlerinin uygulanmasının, Erzurum ili E80 karayolu üzerindeki kavşaklarda trafik akışını iyileştirdiği, taşıt gecikmelerini düşürdüğü ve trafik kazalarını azaltma potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, koordineli sinyalizasyon sistemlerinin kent içi trafik yönetiminde etkin bir araç olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: trafik yönetimi, koordineli sinyalizasyon, taşıt gecikmeleri, PTV VISSIM, kavşak analizi

Temmuz 2025, 91 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DELAY MODELING IN COORDINATED SIGNALIZED INTERSECTIONS: THE CASE OF E80 HIGHWAY, ERZURUM

Ahmet AKBULUT

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ATALAY

Purpose: The aim of this study is to develop coordinated signalization planning for the University Junction, Çat Road Junction, and Yenişehir Junction located on the E80 highway in Erzurum, using real traffic data. The potential of coordinated signalization systems to reduce traffic accidents, decrease vehicle delays, and lower energy consumption is evaluated. Various scenarios were created using the PTV VISSIM simulation program, and vehicle delays in the current conditions of the intersections were compared with those in the coordination scenarios.

Method: The study was conducted using traffic data from three critical intersections in Erzurum (University Junction, Çat Road Junction, and Yenişehir Junction). To test the applicability of coordinated signalization systems, different scenarios were created in the PTV VISSIM simulation program. These scenarios were compared with the current traffic conditions of the intersections, and vehicle delay times were assessed.

Findings: The results of the simulations showed that the implementation of coordinated signalization systems significantly reduced vehicle delays at the intersections and improved traffic flow. Moreover, in the scenarios with coordination, more efficient results were achieved compared to the existing fixed-time signalization systems.

Results: The application of coordinated signalization systems was found to improve traffic flow, reduce vehicle delays, and have the potential to decrease traffic accidents at the intersections along the E80 highway in Erzurum. These findings suggest that coordinated signalization systems can be an effective tool in urban traffic management.

Keywords: traffic management, coordinated signalization, vehicle delays, PTV VISSIM, intersection analysis

July 2025, 91 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAN BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
Problem Tanımı.....	2
Amaç	3
Kapsam.....	4
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Sinyalizasyon Sistemleri	5
İzole sinyalizasyon kavşaklar	5
Koordine sistemler	7
Literatür Özeti	18
MATERYAL VE YÖNTEM	20
Sinyalizasyon Kavşaklarında Gecikme ve Kapasite Hesapları	20
Webster (İngiliz Yöntemi)	20
Simülasyon İle Modelleme	24
Simülasyonun kullanım alanları.....	25
Simülasyonun avantajları	26
Simülasyonun dezavantajları	26
Benzetim modeli	27
PTV VISSIM mikro simülasyon programı	28
Model çıktılarının analizi	30
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	31
Giriş.....	31
Ağ Tasarımı ve Trafik Etütleri.....	31
Üniversite Kavşağı.....	32

Çat Yolu Kavşağı	40
Yenişehir Kavşağı	47
Doygun Akım Hesabı.....	53
Mevcut Durum Analizi	56
Kalibrasyon	56
Üniversite Kavşağı.....	58
Çat Yolu Kavşağı	58
Yenişehir Kavşağı	59
İzole durum analizi.....	60
Koordine durum analizi.....	61
Optimizasyon	61
Ofset süresinin belirlenmesi.....	64
Sonuçlar.....	68
Sabah zirve saat.....	68
Akşam zirve saat	69
SONUÇ VE ÖNERİLER	71
Sonuçlar.....	71
Öneriler	73
KAYNAKÇA	74
ÖZGEÇMİŞ.....	76

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Taşıt Türlerine Göre Birim Otomobil Değerleri)	22
Tablo 2. Üniversite Kavşağı Sabah Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00-09:00)	36
Tablo 3. Üniversite Kavşağı Sabah Zirve Saat Birim Otomobil Hacimleri (taşıt/saat) (08:00-09:00)	37
Tablo 4. Üniversite Kavşağı Akşam Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00-18:00).....	39
Tablo 5. Üniversite Kavşağı Akşam Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00-18:00)	40
Tablo 6. Çat Yolu Kavşağı Sabah Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00-09:00)	43
Tablo 7. Çat Yolu Kavşağı Sabah Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00 09:00)	44
Tablo 8. Çat Yolu Kavşağı Akşam Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00-18:00).....	46
Tablo 9. Çat Yolu Kavşağı Akşam Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00-18:00)	46
Tablo 10. Yenişehir Kavşağı Sabah Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00 09:00).....	50
Tablo 11. Yenişehir Kavşağı Sabah Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00 09:00)	50
Tablo 12. Yenişehir Kavşağı Akşam Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00 18:00).....	52
Tablo 13. Yenişehir Kavşağı Akşam Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00 18:00)	53
Tablo 14. Üniversite Kavşağı Terminal Cad. Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)	54
Tablo 15. Üniversite Kavşağı Fatih Sultan Mehmet Bul. Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)	55
Tablo 16. Çat Yolu Kavşağı Fatih Sultan Mehmet Bul. Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)	55
Tablo 17. Çat Yolu Kavşağı Köşk Yolu Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)	55
Tablo 18. Yenişehir Kavşağı Köşk Yolu Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)	56

Tablo 19. Yenişehir Kavşağı Karayollarıyolu Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)	56
Tablo 20. Sabah ve Akşam Zirve Saat GEH Değerleri	57
Tablo 21. Üniversite Kavşağı Mevcut Durum Performansı	58
Tablo 22. Çat Yolu Kavşağı Mevcut Durum Performansı	59
Tablo 23. Yenişehir Kavşağı Mevcut Durum Performansı	60
Tablo 24. Ulaşım Ağı Genelinin İzole Durum Performans Sonuçları.....	61
Tablo 25. Üniversite Kavşağı Sabah Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler	62
Tablo 26. Çat Yolu Kavşağı Sabah Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler	62
Tablo 27. Yenişehir Kavşağı Sabah Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler	62
Tablo 28. Üniversite Kavşağı Akşam Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler	63
Tablo 29. Çat Yolu Kavşağı Akşam Zirve Saat İzole Durum Optimum devre ve Yeşil Süreler	63
Tablo 30. Yenişehir Kavşağı Akşam Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler	63
Tablo 31. Üniversite Kavşağı Optimize Sinyal ve Devre Süreleri	64
Tablo 32. Çat Yolu Kavşağı Optimize Sinyal ve Devre Süreleri	64
Tablo 33. Yenişehir Kavşağı Optimize Sinyal ve Devre Süreleri	64
Tablo 34. Koordine Aksların Sabah Saati İçin Ofset/Gecikme Değerleri	65
Tablo 35. Koordine Aksların Akşam Saati İçin Ofset/Gecikme Değerleri.....	67
Tablo 36. Ulaşım Ağı Genelinde Sabah Zirve Saat Performans Değerleri	69
Tablo 37. Ulaşım Ağı Genelinde Akşam Zirve Saat Performans Değerleri	70

ŞEKİLER DİZİNİ

Şekil 1. Koordineli hale getirilecek kavşaklar.....	3
Şekil 2. E80 Karayolu çevresi yerleşim ağı	3
Şekil 3. Tek yönlü yer – zaman diyagramı	10
Şekil 4. Kuyruklanma olan kavşaklarda yer diyagramı	12
Şekil 5. Kuyruklanma düzeltmesi sonrası ideal ofset süresine bağlı yer – zaman diyagramı.....	13
Şekil 6. Senkronize koordine sistemin yer – zaman diyagramı	14
Şekil 7. Alternatif koordine sistemde yer – zaman diyagramı	15
Şekil 8. Progresif koordine sistem yer – zaman diyagramı.....	16
Şekil 9. Kavşak yaklaşım kolundaki taşıtların yeşil ışık boyunca hareketi.....	21
Şekil 10. Widemann psiko fiziksel taşıt takip modeli.....	29
Şekil 11. Üniversite Kavşağı konumu	33
Şekil 12. Üniversite Kavşağı İHA görüntüsü	33
Şekil 13. Üniversite Kavşağı taslak planı.....	34
Şekil 14. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat faz planı	35
Şekil 15. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat devre diyagramı	35
Şekil 16. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi.....	36
Şekil 17. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi	37
Şekil 18. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat faz planı	38
Şekil 19. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat devre diyagramı	38
Şekil 20. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi	39
Şekil 21. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi	40
Şekil 22. Çat Yolu Kavşağı konumu	41
Şekil 23. Çat Yolu Kavşağı İHA görüntüsü	41
Şekil 24. Çat Yolu Kavşağı taslak plan	42
Şekil 25. Çat Yolu Kavşağı sabah zirve saat faz planı	42
Şekil 26. Çat Yolu kavşağı sabah zirve saat devre diyagramı.....	43
Şekil 27. Çat Yolu Kavşağı sabah zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi.....	43
Şekil 28. Çat Yolu Kavşağı sabah zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi	44
Şekil 29. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat faz planı.....	45
Şekil 30. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat devre diyagramı	45

Şekil 31. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi	46
Şekil 32. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi	47
Şekil 33. Yenişehir Kavşağı konumu	47
Şekil 34. Yenişehir Kavşağı İHA görüntüsü	48
Şekil 35. Yenişehir Kavşağı taslak planı	48
Şekil 36. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat faz planı	49
Şekil 37. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat devre diyagramı	49
Şekil 38. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat trafik hacimleri	50
Şekil 39. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi	51
Şekil 40. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat faz planı	51
Şekil 41. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat devre diyagramı	52
Şekil 42. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi	52
Şekil 43. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi	53
Şekil 44. Kavşaklar arası eğim bilgisi	54
Şekil 45. Üniversite Kavşağı mevcut durum simülasyonu	58
Şekil 46. Çat Yolu Kavşağı mevcut durum simülasyon	59
Şekil 47. Yenişehir Kavşağı mevcut durum simülasyon	60
Şekil 48. E80 Karayolu ulaşım ağı mevcut durum simülasyon	61
Şekil 49. Ulaşım ağının sabah zirve saat ofset/gecikme değerleri	66
Şekil 50. Ulaşım ağının akşam zirve saat ofset/gecikme değerleri	68
Şekil 51. Sabah zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı	69
Şekil 52. Akşam zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı	70
Şekil 53. Sabah zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı	72
Şekil 54. Akşam zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Sarı ışık süresi
B	: Bant genişliği
C	: Devre süresi
C	: Sinyal periyodu
C_b	: Bant genişliği kapasitesi (araç/saat)
C_i	: Kapasite (taşıt/saat)
d_g	: Yokuş yukarı çıkış şeritlerinde 1,yokuş aşağı şeritlerde 0 değeri
d_n	: Banket kenarı şeritlerde 1,banket kenarı olmayan şeritlerde 0 değeri
D_o	: Optimum devre süresi
E	: Eş zamanlı sistemin etkinliği
E_b	: Bant genişliği etkinliği (%)
F	: Şeritte dönüş yapan taşıtların oranları
G	: Görünen yeşil süre
G	: Yol dikey eğimi
G_i	: Etkin yeşil süre
H	: Bir noktadan art arda geçen iki taşıt arasındaki farktır.
H	: Kuyrukta bekleyen araçların boşalması için taşıtlar arası zaman aralığı
H	: Kuyruktaki araçların boşalma zaman aralığı (s/ta)
I	: Yeşiller arası süre
I₁	: Kalkış zaman kaybı (san)
K	: Kuyrukta bekleyen şerit başına araç sayısı
L	: Bir devredeki toplam kayıp süre
L	: Kavşaklar arası mesafe
L	: Mesafe (m)
L₁	: Başlangıç kaybı, (s)
L_m	: İki kavşak arasındaki mesafe (m)
N	: Doğru istikametteki şerit sayısı
N	: Sistemdeki kavşak sayısı
Q	: Şerit başına kuyruktaki araç sayısı, (Birim Oto)
R	: Şeritlerin dönüş yarı çapları
S	: Araçların ortalama seyahat hızı

S	: Hız (m/s)
S₁	: Doygun akım oranı (otomobil/saat/şerit)
S_i	: Doygun akım değeri,
t_{adj}	: Düzeltilmiş ideal ofset süresi (s)
t_{ideal}	: İdeal Ofset Süresi
t_{ideal}	: Kuyruklanma etkisi altındaki optimum ofset süresi
V	: Araç takımının arterde ortalama seyahat hızı
V	: Araçların arterde ilerleme hızı (m/san)
V_i	: Trafik hacmi (taşıt/saat)
W	: Bir kavşak kolundaki taşıt başına ortalama gecikme (sn)
W	: Şerit genişlikleri
X_i	: Yaklaşım kolunun hacim/kapasite oranı
Y	: Her faz için akımların doygun derecelerinin toplamı
λ	: Yeşil süre oranı ($\lambda = g/D$)
φ	: 1,2-1,8 arasında değişen kat sayı

GİRİŞ

Kentleşmenin hız kazanması ve nüfusun artmasıyla birlikte şehir içi ulaşımında ortaya çıkan trafik sorunları, modern kentlerin karşılaştığı en büyük zorluklardan biri hâline gelmiştir. Özellikle büyük ve gelişmekte olan kentlerde hızlı nüfus artışına paralel olarak taşıt sayısındaki ciddi yükseliş, trafik sıkışıklığını kaçınılmaz kılmaktadır. Kent içi ulaşımında taşıtların yönlendirilmesi ve yol kapasitesinin etkin kullanımı açısından stratejik öneme sahip olan kavşaklar; yetersiz trafik yönetimi nedeniyle uzun bekleme süreleri, trafik kazaları ve kuyruklanmalar gibi sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır.

Özellikle günün zirve saatlerinde kavşaklarda uygulanan sinyalizasyon planlarının etkin olmaması, araç gecikmelerini artırmakta, kuyruklanmaları tetiklemekte ve trafik güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca dur-kalk hareketlerindeki artış sebebiyle çevresel kirlilik ve yakıt tüketimi yükselmekte, bu durum ekonomik kayıpları da beraberinde getirmektedir. Yayla (2002) tarafından yapılan çalışmada, kent içi trafik kazalarının %40 ila %60'ının ve trafik gecikmelerinin %70'ten fazlasının kavşaklarda gerçekleştiği belirtilmiştir. Bu veriler, kavşaklarda koordineli sinyalizasyon ve etkin trafik yönetiminin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Erzurum ili için 2022 yılına ait trafiğe kayıtlı toplam araç sayısı 133.000 civarındadır. Bu sayı, 2021 yılında yaklaşık olarak 130.000'dir. Bu da yıllık olarak yaklaşık %2.3 oranında bir artışa işaret etmektedir. (TÜİK, 2022). Bu veriler, Erzurum'da motorlu taşıt sayısının yıllık olarak istikrarlı bir şekilde arttığını göstermektedir. Artan kayıtlı araç sayısı ile birlikte trafik sorunları kentin öncelikli ulaşım problemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle şehrin trafik yükünü taşıyan ana arterlerinden biri olan E80 Karayolu; üniversite, hastane, devlet kurumları ve ticari bölgeler gibi trafik talebinin yoğun olduğu kritik merkezlere ulaşımı sağlamaktadır. Özellikle günün zirve saatlerinde, söz konusu arterdeki trafik yoğunluğu kritik seviyelere ulaşmakta ve kavşaklarda uzun bekleme sürelerine yol açmaktadır. Dolayısıyla bu arterde uygulanacak koordineli sinyalizasyon sistemleri, trafik akışının düzenlenmesinde ve operasyonel performansının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

Bu tez çalışmasının temel amacı; Erzurum'da E80 Karayolu üzerinde yer alan üç kritik kavşağın trafik performanslarını detaylı bir şekilde incelemek ve kavşaklar arasında koordineli sinyalizasyon sistemi oluşturarak mevcut trafik akışını optimize etmektir. Bu amaç doğrultusunda trafik hacimleri, kavşak geometrileri ve mevcut sinyal planları analiz edilerek,

kavşaklar arası koordinasyon sağlayacak optimum sinyalizasyon sisteminin oluşturulması hedeflenmektedir. Çalışmada, PTV VISSIM simülasyon programı kullanılarak farklı senaryolar altında performans değerlendirmeleri yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar, Erzurum ölçeğindeki şehirlerde uygulanabilir, sürdürülebilir ve etkin trafik yönetimi çözümleri için yol gösterici olacaktır.

Literatürde, orta ölçekli şehirlerde koordineli sinyalizasyon kavşak yönetimine dair yapılan çalışmaların sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Mevcut çalışmalar genellikle büyükşehir ölçeğindeki yoğun trafik akışına odaklanmış olup, orta büyüklükteki kentlerde bu tür çalışmaların yeterince ele alınmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, Erzurum'daki kavşaklarda yapılacak bu çalışma, trafik yönetimi literatürüne yenilikçi bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca çalışmada, mevcut trafik sinyalizasyon sistemlerinin etkinliği değerlendirilerek, kavşaklar arasındaki koordinasyonun trafik akış performansı, yakıt tüketimi ve çevresel faktörlere katkısı incelenecektir.

Son yıllarda, trafik yönetiminde sürdürülebilir ve çevreci çözümler giderek önem kazanmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği ülkelerinde ve gelişmiş diğer ülkelerde trafik sıkışıklığının yol açtığı ekonomik ve çevresel sorunlara karşı akıllı trafik yönetimi sistemlerine yönelik yatırımlar artmaktadır. Lee ve arkadaşlarının (2020) yaptığı araştırmada, koordineli sinyalizasyon uygulamalarının araç gecikmelerini belirgin oranda azaltarak yakıt tüketimini düşürdüğü ve karbon emisyonlarını azalttığı ortaya konmuştur. Bu doğrultuda, Erzurum'da yürütülecek olan bu çalışma, uluslararası literatürde yer alan güncel yöntemleri kullanarak şehir içi ulaşım problemlerine çevreci, ekonomik ve yenilikçi bir çözüm geliştirme potansiyeline sahiptir.

Problem Tanımı

E80 Karayolu, Erzurum'un şehir içi ulaşımında stratejik öneme sahip ana arterlerinden biridir. Bu yol, şehrin farklı bölgelerini birbirine bağlayarak üniversite, hastane ve devlet kurumları gibi yoğun trafik talebine sahip merkezlere ulaşımı sağlamaktadır. Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşakları, bu güzergâh üzerindeki en kritik noktalar arasında yer almakta olup, trafik akışında belirleyici rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, E80 Karayolu üzerindeki üç kavşağın mevcut trafik akışı detaylı bir şekilde analiz edilerek kavşaklar arasındaki koordinasyon eksiklikleri tespit edilmiştir. Şekil 1'de koordineli hale getirilecek kavşaklar gösterilmektedir. Şekil 2'de ise bağlanılan yollar ve toplayıcı yollar gösterilmiştir.



Şekil 1. Koordineli hale getirilecek kavşaklar



Şekil 2. E80 Karayolu çevresi yerleşim ağı

Amaç

Bu çalışma, komşu kavşaklar arasında koordineli sinyalizasyon sistemlerinin uygulanarak trafik akışının iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Seçilen örneklem alanda kavşaklar arasındaki gecikmelerin en aza indirilmesi, trafik akışının düzenlenmesi ve ulaşım ağında genel bir iyileştirme sağlanması hedeflenmektedir. Böylece, risklerin azaltılması, trafik güvenliğinin artırılması, kapasitenin optimize edilmesi ve trafikte bekleme sürelerinin minimize edilmesi sağlanarak şehir içi ulaşımın verimliliği artırılabacaktır.

Bu kapsamda, çalışma aşağıda belirtilen temel hedefleri gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır:

- Araçların kavşaklardan daha hızlı ve sorunsuz geçmesini sağlamak.

- Trafik akışını daha etkin yöneterek tıkanıklıkları azaltmak.
- Sürücülerin ani fren yapma ve hatalı geçiş yapma risklerini minimize etmek.
- Yaya güvenliğini artırarak yayalar için daha güvenli bir trafik ortamı oluşturmak.
- Daha az dur-kalk hareketiyle yakıt tüketimini düşürerek karbon emisyonlarını azaltmak.
- Araç motorlarının daha stabil çalışmasını sağlayarak hava kirliliğini minimize etmek.
- Trafik akışını öngörülebilir ve düzenli hale getirerek sürücülerin yolculuk sırasında yaşadığı stresi azaltmak.
- Şehir içi ulaşımı daha konforlu ve verimli hale getirmek.

Bu doğrultuda, PTV VISSIM simülasyon programı kullanılarak kavşaklar arasında koordineli sinyal süreleri ve ofset süreleri optimize edilecek, farklı senaryolar oluşturularak bu sistemlerin trafik performansına etkileri analiz edilecektir. Çalışma sonucunda, şehir içi ulaşımın verimliliğini artıracak, gecikmeleri ve çevresel etkileri minimize edecek en uygun sinyalizasyon senaryosu belirlenerek uygulanabilir bir trafik yönetim modeli önerisi sunulacaktır.

Kapsam

Çalışma kapsamında, E80 Karayolu üzerinde bulunan Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşaklarında mevcut trafik akışı analiz edilmiştir. Bu amaçla zirve ve zirve dışı saatlerdeki trafik hacimleri incelenmiş; kavşakların mevcut sinyal süreleri, şerit sayıları, yaklaşım kolları genişlikleri ve geometrik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen trafik verilerine dayanarak, kavşaklar arasındaki koordinasyon eksiklikleri tespit edilmiş ve sinyal sürelerinin optimize edilmesine yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde PTV VISSIM trafik simülasyon yazılımı kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, koordineli sinyalizasyon sistemleri ve kavşaklarda gecikme analiz yöntemlerine ilişkin literatür taraması yapılmış ve kuramsal çerçeve oluşturulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında kullanılan PTV VISSIM trafik simülasyon yazılımının temel özellikleri tanıtılmış ve bu yazılım aracılığıyla gerçekleştirilen modelleme yöntemlerine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, E80 Karayolu üzerinde yer alan Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşaklarına ilişkin mevcut durum analizleri yapılmış; farklı senaryolar altında geliştirilen optimize edilmiş sinyal planları simülasyon ortamında değerlendirilmiştir. Son olarak beşinci bölümde, elde edilen bulgular yorumlanmış ve ulaşılan sonuçlara dayalı öneriler sunulmuştur.

KURAMSAL TEMELLER

Sinyalizasyon Sistemleri

Trafik akışının kontrollü bir şekilde yönetilmesi ve yaya-taşıt etkileşiminin düzenlenmesi amacıyla trafik işaret ve işaretçileri kullanılır. Bu işaretler yatay veya dikey levhalar olabileceği gibi, elektrikle çalışan ışıklı trafik lambalarını da içerir. Işıklı lambalarla kontrol edilen kavşaklar, sinyalizasyon (ışıklı) kavşaklar olarak adlandırılır.

Birbirine yakın kavşaklar izole veya koordine olarak çalışabilir. Kavşaklar arasındaki mesafenin çok kısa olduğu durumlarda iki ayrı kavşak tek bir kavşak gibi değerlendirilebilir. Mesafenin nispeten uzun olduğu durumlarda ise kavşaklar arası koordinasyon sağlanamaz; bu gibi hallerde her kavşak bağımsız (izole) şekilde çalıştırılır. Mesafenin uygun olduğu durumlarda kavşaklar arasında koordinasyon kurularak birlikte (senkronize) çalışmaları sağlanır.

İzole sinyalizasyon kavşaklar

İzole sinyalizasyon kavşaklar, çevresindeki komşu kavşaklardan bağımsız olarak çalışan ışıklı kavşak sistemleridir. İzole sinyalizasyon kavşaklar kendi içinde dört gruba ayrılır:

- Sabit Zamanlı Sinyalizasyon Sistemi,
- Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi,
- Yaya Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi,
- El ile Kumandalı Sinyalizasyon Sistemi.

Sabit zamanlı sinyalizasyon

Sabit zamanlı sinyalizasyon sisteminde önceden belirlenmiş sabit sinyal planları kullanılır. Bu plan çerçevesinde araçlar ve yayalar sırayla geçiş hakkı alır. Yaklaşım kollarına ait yeşil ışık süreleri ve döngü (devre) süreleri, önceden yapılan trafik etütleri sonucunda belirlenir. Bilindiği gibi günün farklı saatlerinde trafik hacimleri önemli değişimler gösterir. Örneğin sabah ve akşam zirve saatlerinde trafik hacmi yükselirken, gün içinde daha düşük seviyelerde seyredebilir. Bu nedenle sabit zamanlı sinyalizasyon kavşaklar, günün farklı zaman dilimleri için ayrı programlar (farklı döngü süreleri, faz planları ve yeşil süreler) olacak şekilde ayarlanabilir. Böylece değişen trafik koşullarına rağmen sistemin verimli işlemesi sağlanır.

Trafik uyarmalı sinyalizasyon

Trafik uyarmalı (araç sensörlü) sistemlerde kavşağın sinyal planı ve yeşil ışık süreleri, yaklaşım kollarına yerleştirilmiş dedektörler aracılığıyla anlık trafik akımına göre belirlenir. Dedektörler sürekli olarak trafik hacmini ölçerek, ölçüm sonuçlarına göre optimum devre süresi ve yeşil süreleri hesaplar. Trafik uyarmalı sistemler iki alt tipe ayrılır:

- Yarı Uyarmalı Trafik Sistemleri,
- Tam Uyarmalı Trafik Sistemleri.

Yarı uyarmalı trafik sistemi

Yarı uyarmalı sinyalizasyon sisteminde, kavşakta belirli yaklaşım kollarına yerleştirilen sensörler sayesinde trafik akışı dinamik olarak kontrol edilir. Genellikle, trafik hacminin yüksek olduğu ana akım yönlerinde sinyal sürekli yeşil tutulurken, trafik yoğunluğu daha düşük olan yan yollar sensörler aracılığıyla kontrol edilir. Sensörler, düşük yoğunluklu yaklaşım kollarında araç algılandığında sinyalizasyon sistemine bilgi gönderir ve bu doğrultuda yeşil ışık süresi belirli bir süreliğine değiştirilir. Eğer sensörlü yaklaşım kolunda araç bulunmazsa, bu kol için sürekli kırmızı ışık yanmaya devam eder ve ana yolun trafik akışı kesintisiz şekilde sürdürülür.

Tam uyarmalı trafik sistemi

Tam uyarmalı sinyalizasyon sisteminde kavşağın tüm kollarında dedektörler bulunur. Dedektörler her koldaki trafik hacmini sürekli ölçerek kavşağı tamamen dinamik bir şekilde yönetir. Araç talebine göre yeşil ışık süreleri gerçek zamanlı ayarlanır. Tam uyarmalı sistemlerin kurulum maliyeti yüksek olmakla birlikte, izole kavşaklar içinde en verimli trafik akışı bu sistemlerle sağlanabilir. Çünkü her yönden gelen trafik için gereken süre tam olarak gerektiği kadar verilir, gereksiz yeşil süre kayıpları minimize edilir.

Yaya uyarmalı sinyalizasyon sistemi

Yaya uyarmalı sinyalizasyon sistemleri, kavşaklarda veya kavşak olmayan yaya geçitlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu sistemde, yaya olmadığı durumlarda taşıt trafiğine sürekli yeşil ışık yanar. Karşıya geçmek isteyen bir yaya geldiğinde, yaya butonuna basarak sistemi tetikler; böylece taşıtlara yanan yeşil ışık uygun bir süre sonra kırmızıya döner ve yayaya geçiş izni veren yeşil yanar. Yaya geçişi tamamlandıktan sonra sistem tekrar taşıtlar için yeşile döner. Bu sayede yaya yokken araç trafiği kesintiye uğramaz, yaya geldiğinde ise güvenli geçiş sağlanır.

El ile kumandalı sinyalizasyon sistemi

El ile kumandalı sinyalizasyon sisteminde kavşak sinyal düzeni gerektiğinde dışarıdan müdahale ile kontrol edilebilir. Kavşağın tüm yaklaşım kolları bir merkezi kontrol cihazına veya kumanda paneline bağlanmıştır. Normal koşullarda kavşak sabit zamanlı planla çalışır; ancak trafik hacminin aniden arttığı, özel bir konvoy geçişi gerektiği veya bir acil durum olduğu hallerde operatör tarafından uzaktan kumandayla sinyal planına müdahale edilir. Bu şekilde kavşak kontrolü esnek hale getirilerek, gerektiğinde anlık düzenlemelerle trafik akışı optimize edilir.

Koordine sistemler

Birbirine yakın ve art arda sıralanan kavşakların birbiriyle uyumlu çalıştırılması, gecikmeleri ve duraklamaları azaltıp ortalama seyahat hızını arttırmak için kullanılan yaygın bir uygulamadır. Koordine kavşaklar, özellikle ana trafik akışını oluşturan arterler üzerindeki komşu kavşaklarda, araçların mümkün olduğunca duraksamadan yeşil ışık dalgası yakalayarak geçmesini sağlamak amacıyla planlanır. Koordine çalışması sayesinde kavşaklar arasındaki dur-kalk sayısı ve kuyruk boyları azaltılır, böylece yakıt tüketimi ve emisyonlar da düşürülebilir. Koordine çalışan kavşaklar dört gruba ayrılabilir:

- Senkronize Sistem,
- Alternatif Sistem,
- Progresif Sistem,
- Alansal Trafik Kontrol Sistemi.

Koordine sistemlerin en büyük avantajı; kuyruklanma, durma sayısı ve gecikme gibi performans ölçütlerinde belirgin iyileşme sağlamalarıdır.

Koordinasyona etki eden faktörler

Kavşaklar arasında etkin bir koordinasyon sağlanabilmesi için çeşitli faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Koordinasyonun başarısı, trafik akışının sürekliliğini ve verimliliğini artırmaya yönelik olarak planlanırken, bazı durumlar bu süreci olumsuz etkileyebilir.

- Kavşaklar arası mesafenin aşırı kısa veya aşırı uzun olması, sinyal zamanlamalarının doğru şekilde senkronize edilmesini zorlaştırarak koordinasyonun etkinliğini azaltabilir.
- Ana aks üzerinde yan kollardan yoğun araç katılımı olması, ana aksta sürekli akışı bozarak gecikmelere neden olabilir.

- Koordine edilen aks boyunca şerit sayısının değişmesi, trafik akışında dengesizliklere yol açarak koordinasyonun verimini düşürebilir.
- Yol kapasitesinin yetersiz kalması, trafik hacminin yol kapasitesini aşması durumunda sinyal optimizasyonunun etkisini kaybetmesine ve kuyruklanmaların artmasına neden olabilir.
- Yol kenarında park veya duraklamaların bulunması, trafik akışında kesintilere neden olarak koordinasyonu bozabilir.

Koordine sistemlerin genel prensipleri

Kavşaklar arasında koordinasyon sağlanabilmesi için temel gereksinim, ilgili kavşakların döngü sürelerinin eşit veya birbirinin tam katı olmasıdır. Bu koşul sağlanırsa, kavşaklar arasında zaman uyumu (faz senkronizasyonu) mümkün hale gelir. Döngü süreleri uyumsuz ise sinyal zamanlamaları birbirinden kopuk olacağından koordinasyon zorlaşır.

Koordine edilecek kavşaklardaki trafik hacmi değerleri birbirinden çok farklı ise, döngü sürelerini tam eşit yapmak uygun olmayabilir. Bu durumda, bir kavşak diğerinin yarı döngü süresinde veya iki katı döngü süresinde çalışacak şekilde ayarlanabilir. Önemli olan, bir kavşağın döngüsünün diğerine göre tam sayılı katlar şeklinde senkronize edilmesidir. Örneğin, bir kavşak 60 saniyelik döngüyle çalışırken komşu kavşak 30 veya 120 saniyelik döngüyle çalıştırılabilir; böylece her iki kavşak her 60 saniyede bir yeşil dalga uyumunu yakalayacaktır (Roess ve Prassas, 2004). Bu yaklaşım, çok düşük ya da çok yüksek hacimler için esneklik sağlar.

Koordine sistem bileşenleri

Ofset süresi

Ofset, sinyal planlarının zamanlamasında kritik bir parametredir. Koordine sistemde, bir kavşağın koordine edilen kolunda yeşil fazın başlangıcı ile bir sonraki kavşağın aynı yöndeki koordine kolunda yeşilin başlaması arasında geçen süre ofset süresi olarak tanımlanır. Daha basit ifade ile ofset, ardışık kavşaklar arasındaki yeşil ışık başlangıç farkıdır.

Ofset genellikle 0 ile döngü süresi arasında bir değerdir ve bir referans kavşağa göre tanımlanır. Koordineli arter üzerinde genellikle bir kavşak "ana kavşak (master)" olarak seçilir ve onun yeşil başlangıcı referans (0 ofset) kabul edilir; diğer kavşakların ofsetleri buna göre ayarlanır. Literatürde, farklı algoritmalarla optimum ofset süresinin hesaplanmasına yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca ofset süresinin trafik akışını nasıl etkilediğine dair araştırmalar da mevcuttur.

Roess ve Prassas (2011), kuyruklanmanın olmadığı ideal durum için ofset süresini aşağıdaki formülle tanımlamıştır:

$$t_{ideal} = \frac{L_m}{S} \quad (1)$$

Şeklinde tanımlamışlardır. Burada;

t_{ideal} = İdeal Ofset Süresi

L_m = Kavşaklar arası mesafe

S = Araçların ortalama seyahat hızı

Bu formüle göre, birinci kavşaktan çıkan araçların büyük kısmı, ikinci kavşağa vardığında yeşil ışığa denk gelir.

Pratikte yan kollardan katılım, parklanma veya benzeri nedenlerle kavşak yaklaşımlarında kuyruklanma oluşabilir. Bu durumda, tam yeşil dalga sağlansa bile koordine ana akım araçları ikinci kavşakta kuyruktaki araçlar nedeniyle durmak zorunda kalabilir. Bu etkiyi gidermek için ofset süresine bir düzeltme eklemek gerekir. Kuyruklanma durumunu hesaba katan düzeltilmiş ofset süresi için bir formül aşağıda verilmiştir:

$$t_{adj} = \frac{L}{S} - (Qh + l1) \quad (2)$$

Denklemini kullanılarak ofset düzeltmesi yapılır. Burada;

t_{adj} = Düzeltilmiş ideal ofset süresi (s)

L = Mesafe (m)

S = Hız (m/s)

Qh = Şerit başına kuyruktaki araç sayısıdır. (Birim Otomobil)

Bu düzeltme ile, kuyruklanmanın yarattığı gecikme ofset hesabına dahil edilir.

Ofset optimizasyonu genellikle simülasyon teknikleri ile de yapılabilir. Günümüzde PTV VISSIM ve TRANSYT gibi trafik analiz programları kullanılarak, koordineli kavşaklarda optimum ofset ve minimum gecikme değerleri belirlenebilmektedir.

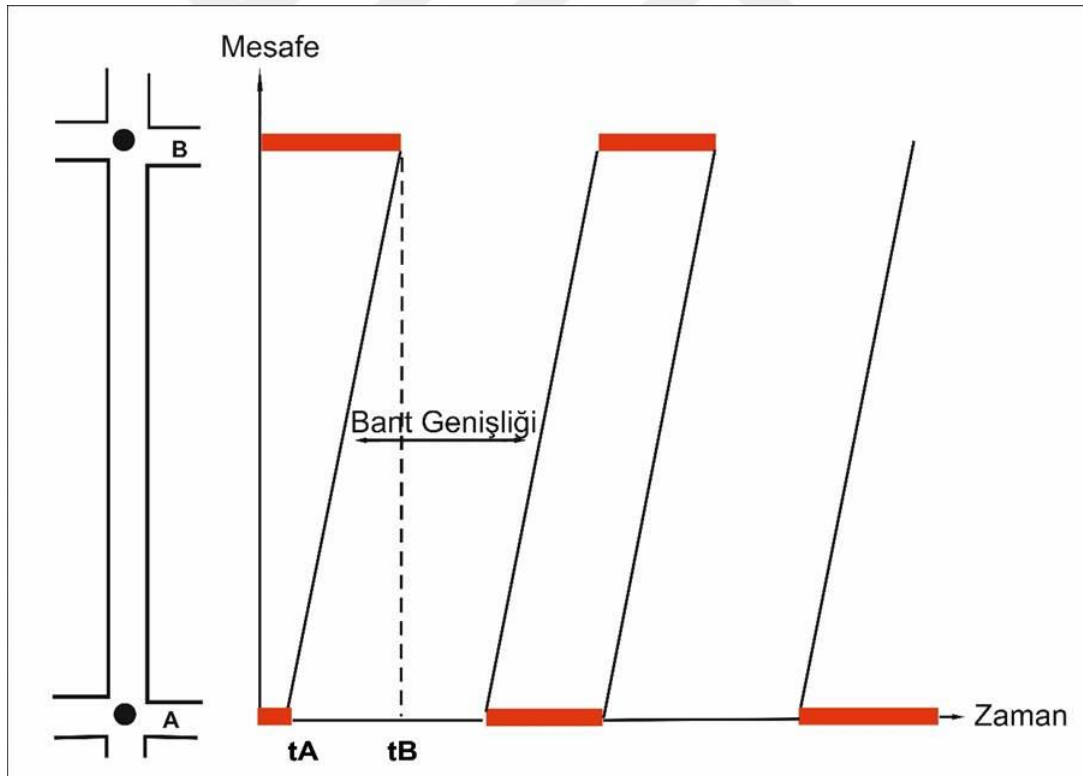
VISSIM; mikro ölçeğe (ayrıntılı) çalışan bir trafik simülasyon programıdır. Otomobil, kamyon, demiryolu, hafif raylı sistem, bisiklet ve yaya gibi çok modlu trafik akımlarını analiz edebilir. Esnek tasarım özellikleriyle her çeşit geometrik yapıda (sinyalli kavşaklar, döner kavşaklar, otoyol koridorları, otobüs durakları, havaalanı, taksi yolları vb.) simülasyon

yapılmasına imkan tanır. VISSIM, harita ve CAD tabanlı altlıkları kullanarak gerçekçi bir görsel ortamda dört boyutlu (X, Y, Z konum ve zaman) simülasyon çıktıları sunabilir. Bu program da koordinasyon optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ocaktan, 2010).

TRANSYT, trafik sinyal optimizasyonu ve simülasyonu yapan bir program olup genetik algoritmalar metoduyla döngü süresi, faz sırası, faz ayrımları ve kavşaklar arası ofsetleri optimize eder. Ayrıca tepe tırmanma (hill-climbing) ve çok periyotlu optimizasyon tekniklerini de içerir. Program içindeki simülasyon modeli sayesinde kuyruk birikmesi (queue spillback), araç gruplarının dağılması (platoon dispersion) ve trafik duyarlı kontrol gibi olgular da değerlendirilir. TRANSYT; trafik ağları, arterler ve tek kavşaklar üzerinde uygulanabilmektedir.

Yer-zaman diyagramı

Yer-zaman diyagramları, ardışık kavşakların sinyal zaman planlarını mesafe ve zaman ekseninde gösteren grafiklerdir. Bir arter üzerinde, birinci kavşaktan çıkan araçların ikinci kavşağa belirli bir süre sonra ulaştıklarında sinyal durumunu görselleştirir.



Şekil 3. Tek yönlü yer – zaman diyagramı

Örneğin Şekil 3'te tek yönlü bir arter için yer-zaman diyagramı verilmiştir. Bu diyagramda, A ve B kavşaklarının yeşil ışık zamanlamaları karşılaştırılmaktadır. A kavşağında yeşil ışık t_A anında başlarken, B kavşağında t_B anında başlamaktadır. İki kavşaktaki yeşil başlangıçları arasındaki fark (yani $t_B - t_A$), bu kavşaklar arasındaki ofset süresini verir.

Genellikle ofset süresi, devre süresinden küçük herhangi bir değer olabilir. Koordineli bir arter üzerindeki kavşaklarda ofsetler, ana kavşak referans alınarak sırayla hesaplanır. Eğer hesaplanan ofset, döngü süresinden büyük çıkarsa, kavşakların döngü süreleri sabit tutulup faz planları kaydırılarak (faz başlangıçlarını değiştirerek) efektif ofset ayarı yapılır. Bu durum, pratikte ofset ihtiyacına göre sinyal fazlarının yer değiştirmesi anlamına gelir.

Bant genişliği

Bant genişliği, koordineli arterde, birinci kavşaktan çıkıp ikinci kavşağa kadar durmadan geçebilen araç grubunun zaman aralığı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, belirli bir hızla seyreden ilk araç ile son araç arasındaki zaman farkıdır. Şekil 3'te gösterildiği gibi, arter üzerinde optimum ofset uygulandığında A kavşağından yeşil ışığın başında çıkan bir araç v hızıyla ilerleyerek t_B anında B kavşağına ulaşır ve bu kavşaktan geçen ilk araç olur. A kavşağından yeşil ışığın son anında çıkan bir başka araç ise yine hızını koruyarak B kavşağına vardığında, yeşilin son anına denk gelir ve B'den geçen son araç olur. Bu iki araç arasındaki süre, bant genişliğini oluşturur. Optimum ofset uygulandığında bant genişliği süresi, ikinci kavşağın yeşil ışık süresine eşittir.

Bant genişliğinin etkinliği, bant genişliği süresinin döngü süresine oranı ile ifade edilir (genellikle yüzdesel olarak). Aşağıdaki formül bant genişliği etkinliğini verir:

$$Eb = \left(\frac{B}{C}\right) * 100 \quad (3)$$

Denklemler ile hesaplanır. Burada; Eb = Bant genişliği etkinliği (%)

B =Bant genişliği

C = Devre süresi

Bant genişliği etkinliğinin %40–55 aralığında olması, koordinasyon açısından iyi bir seviye olarak kabul edilir. (Roess & Prassas, 2004) Bant genişliği etkinliği ofset süresiyle doğrudan ilişkili olup, ofset süresindeki değişiklik bant genişliği etkinliğini de değiştirir.

Koordineli bir arter boyunca, duraksamadan geçebilen araç sayısı “bant genişliği kapasitesi” olarak adlandırılır. Bu kapasite, bant genişliği süresi içinde kaç araç geçebileceğiyle ilgilidir ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$C_b = \frac{3600 * B * N}{C * h} \quad (4)$$

Burada;

C_b = Bant genişliği kapasitesi (araç/saat)

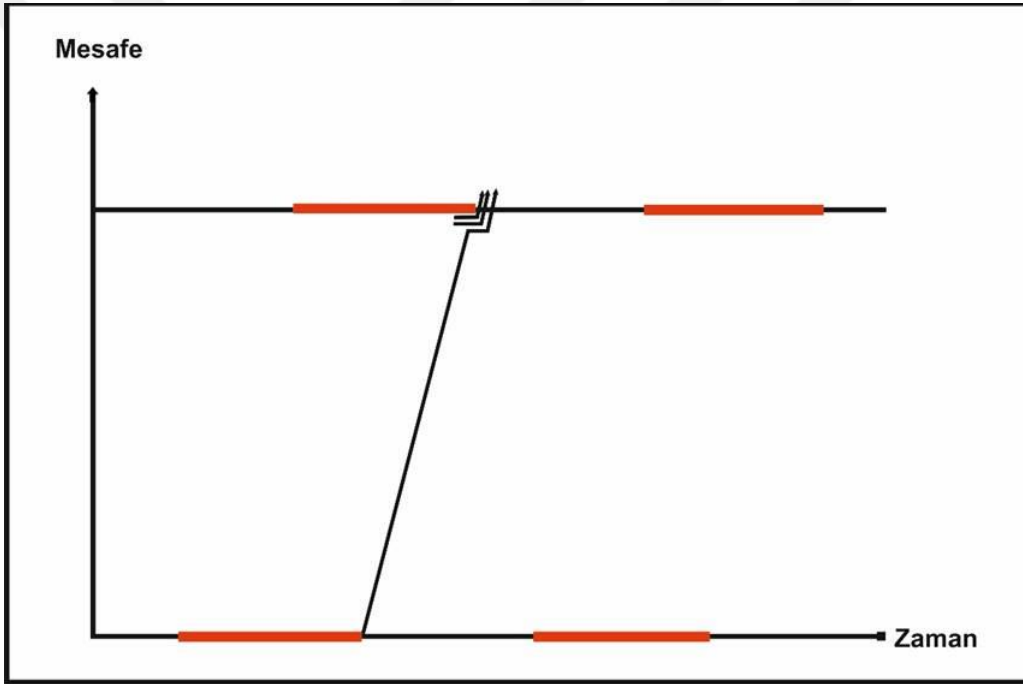
N =Doğru istikametteki şerit sayısı

C =Sinyal periyodu

h = Bir noktadan art arda geçen iki taşıt arasındaki farktır.

Koordine kavşaklarda kuyruklanma etkisi

Koordinasyon optimizasyonu yapılırken ideal olarak bir kavşaktan çıkan aracın sonraki kavşağa kadar kuyruklanmaya uğramadan ulaşacağı varsayılır. Oysa gerçekte, kavşaklardan birinde kuyruk oluşursa, koordine ana akımda ilerleyen araçlar da bu kuyruğa takılıp durmak zorunda kalabilir. Kuyruklanma, araçların ortalama hızını düşürerek koordinasyonun verimini azaltır. Kuyruklanma genellikle koordine olmayan yan kolların yoğun katılımından, yetersiz yeşil süreden veya yol üzerindeki beklenmedik engellerden kaynaklanır. Bu durumda, koordineli ana akımdan gelen taşıtlar, önlerindeki kuyruk çözülene kadar bekler. Şekil 4'te kuyruklanma oluşan koordineli kavşaklar için bir yer-zaman diyagramı örneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Kuyruklanma olan kavşaklarda yer diyagramı

Kuyruklanmayı hesaba katabilmek için ofset hesabına bir kuyruklanma düzeltmesi eklenir. Kuyruk etkisi altındaki ideal ofset süresi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Şekil 5'te kuyruklanma düzeltmesi sonrası yer-zaman diyagramı verilmiştir):

$$t_{ideal} = L/v - (K * h + I_1) \quad (5)$$

Burada;

t_{ideal} = Kuyruklanma etkisi altındaki optimum ofset süresi

L =İki kavşak arasındaki mesafe (m)

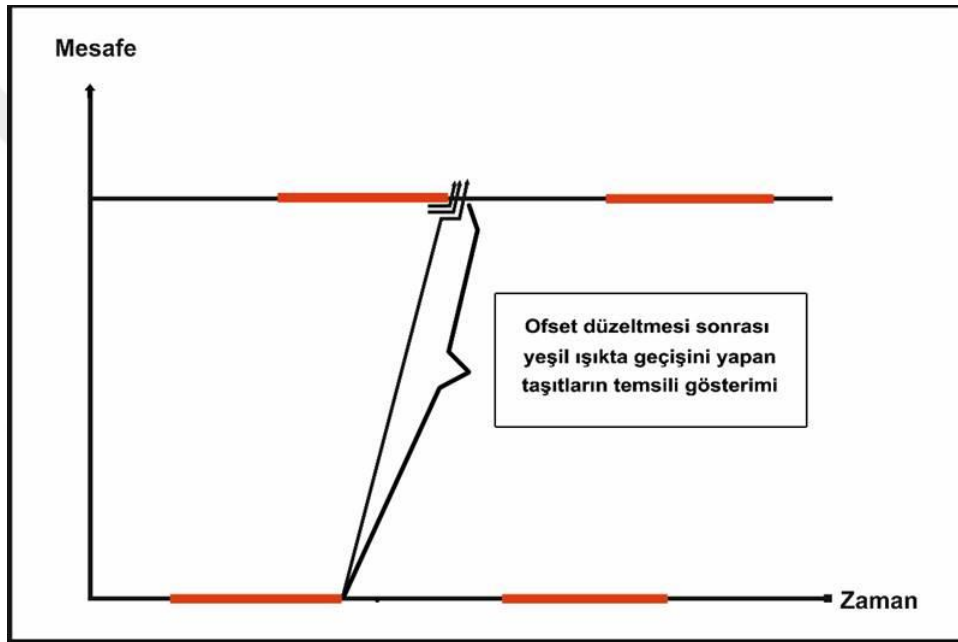
v =Araçların arterdeki ilerleme hızı (m/sn)

K =Kuyrukta bekleyen şerit başına araç sayısı

h =Kuyrukta bekleyen araçların boşalması için taşıtlar arası zaman aralığı (sn)

I_1 = Kalkış zaman kaybı (sn)

Şekil 5’te görüldüğü üzere, düzeltme sonrası hesaplanan ideal ofset süresi uygulandığında, birinci kavşaktan hareket eden araçların ikinci kavşağa vardıklarında yeşil ışığa denk gelmeleri sağlanabilir. Bu sayede kuyruklanma nedeniyle oluşan gecikme en aza indirilerek koordinasyonun verimi artırılır.



Şekil 5. Kuyruklanma düzeltmesi sonrası ideal ofset süresine bağlı yer – zaman diyagramı

Koordine sistem türleri

Koordine sinyal sistemleri, ardışık kavşakların yeşil dalga uyarlamasına göre farklı şekillerde uygulanır:

Senkronize sistem

Ana arterdeki tüm koordineli kavşak kollarında eş zamanlı olarak yeşil ışık yanar. Bu sistemde kavşaklar arasında herhangi bir ofset süresi yoktur (yeşiller aynı anda başlar). Şehir içi alanlarda pek tercih edilmez, çünkü tüm kavşaklarda aynı anda yeşil vermek, akım sürelerini kısıtlayabilir ve verimliliği düşürebilir. Yeşil ışıkların aynı anda yanması, arter üzerindeki araçlar için kesintisiz akışı sağlamaz; aksine bir kavşakta durmadan geçen araç, bir sonraki kavşağa yeşilin bitiş anında ulaşacağı için durabilir. Senkronize sistem genellikle kavşakların

çok yakın olduğu ve tek bir ana akım yönüne maksimum yeşil vermenin istendiği özel durumlarda uygulanır. Eş zamanlı sistemin etkinliği kavşak sayısına bağlıdır ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$E = \left[\frac{1}{2} - \frac{(N-1)*L}{v*c} \right] \quad (6)$$

Burada;

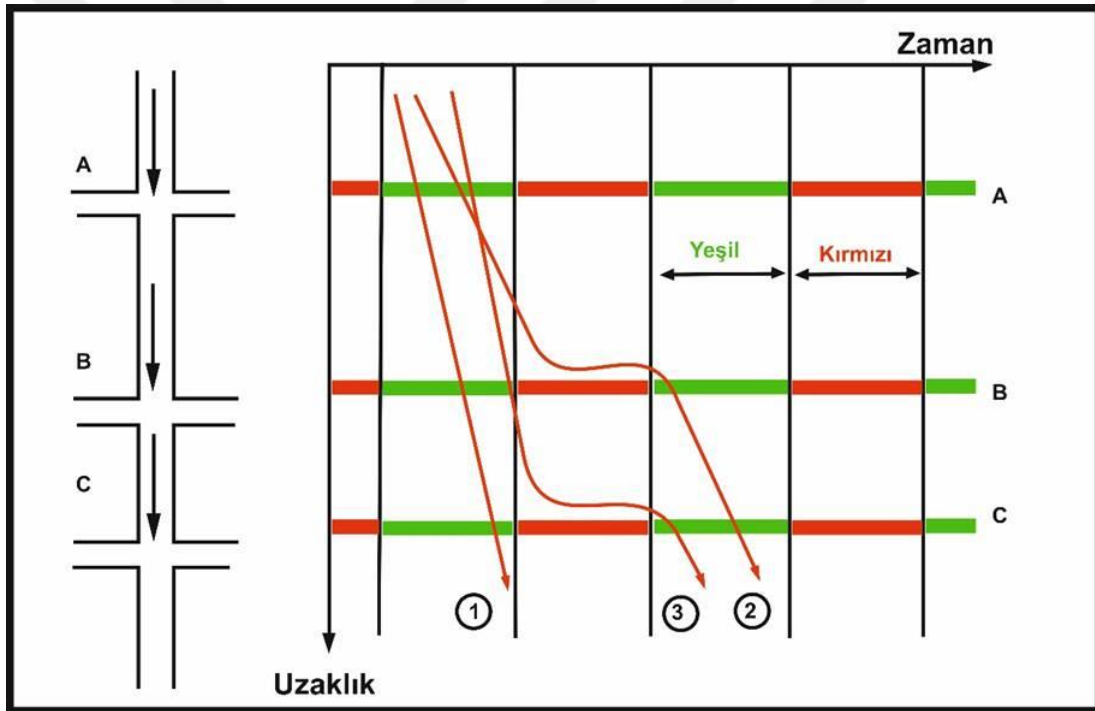
E =Eş zamanlı sistemin etkinliği

N = Sistemdeki kavşak sayısı

v = Araç takımının arterde ortalama seyahat hızı

C = Devre Süresi

L = İki kavşak arası mesafe (3 ve daha fazla kavşak olması durumunda kavşak arası mesafelerin ortalaması alınır)



Şekil 6. Senkronize koordine sistemin yer – zaman diyagramı

Alternatif sistem

Alternatif sistemde koordineli arter üzerindeki komşu kavşaklara, sırasıyla ters zamanlı yeşil sinyal verilir. Yani bir kavşak yeşil ışık gösterirken sonraki kavşak kırmızı gösterir; yarım döngü sonra rolleri değişir. Bu sistemin hedefi, araçların iki kavşak arasındaki mesafeyi, sinyal döngüsünün yarısı sürede katedebilmesidir. Böylece araçlar her yarım döngüde bir sonraki kavşağa ulaşarak yeşile denk gelebilir. Alternatif sistemin düzgün işlemesi için kavşaklar arası mesafelerin belirli bir standarda yakın olması gerekir; mesafeler çok farklıysa sisteme uyum

sağlanamaz. Kavşaklar arası mesafe, döngü süresi ve seyahat hızı arasındaki ilişki Denklem (7)'de verilmiştir. Şekil 7'de alternatif sistem için yer-zaman diyagramı örneği gösterilmiştir.

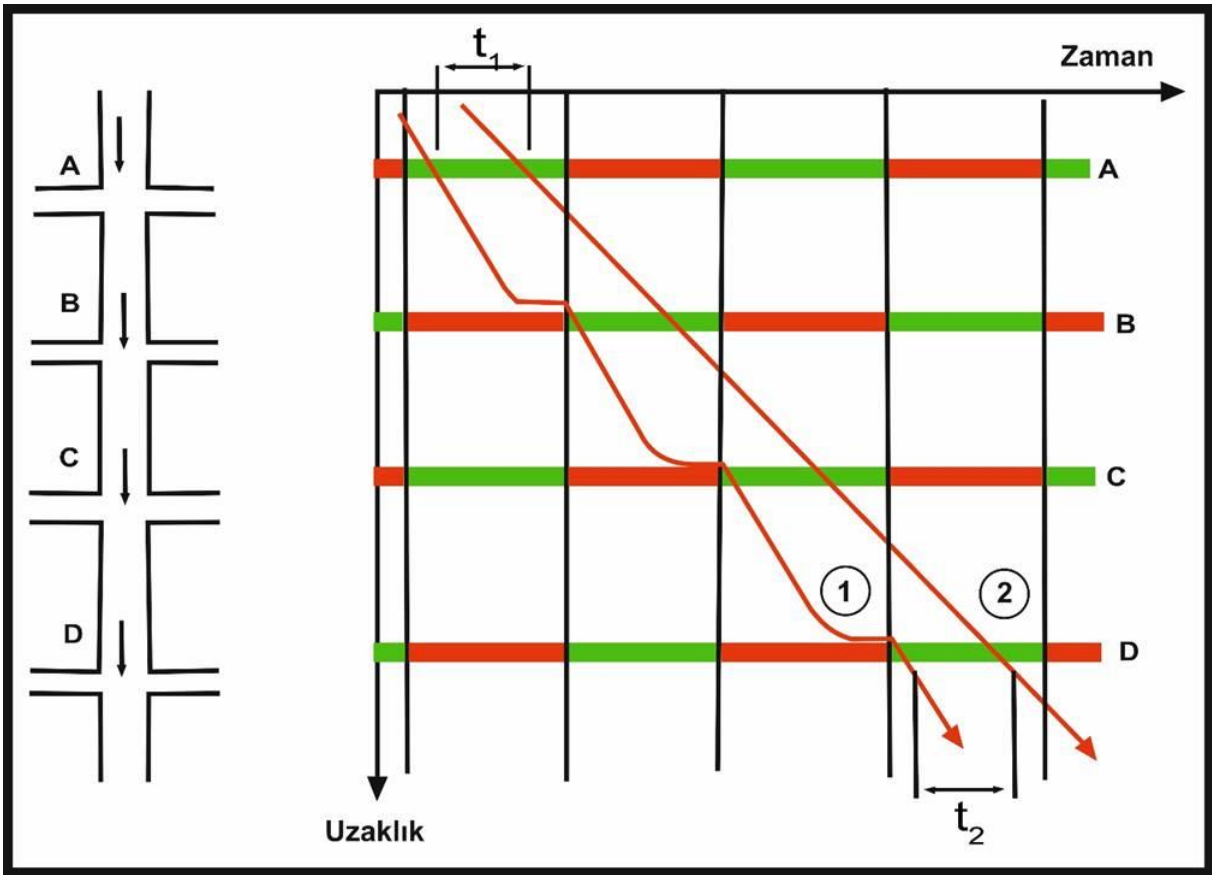
$$C/2 = L/v \quad (7)$$

Burada;

C = Sinyal devir süresi (sn)

L = İki kavşak arası mesafe (m)

v = Araçların arterde ilerleme hızı (m/sn)



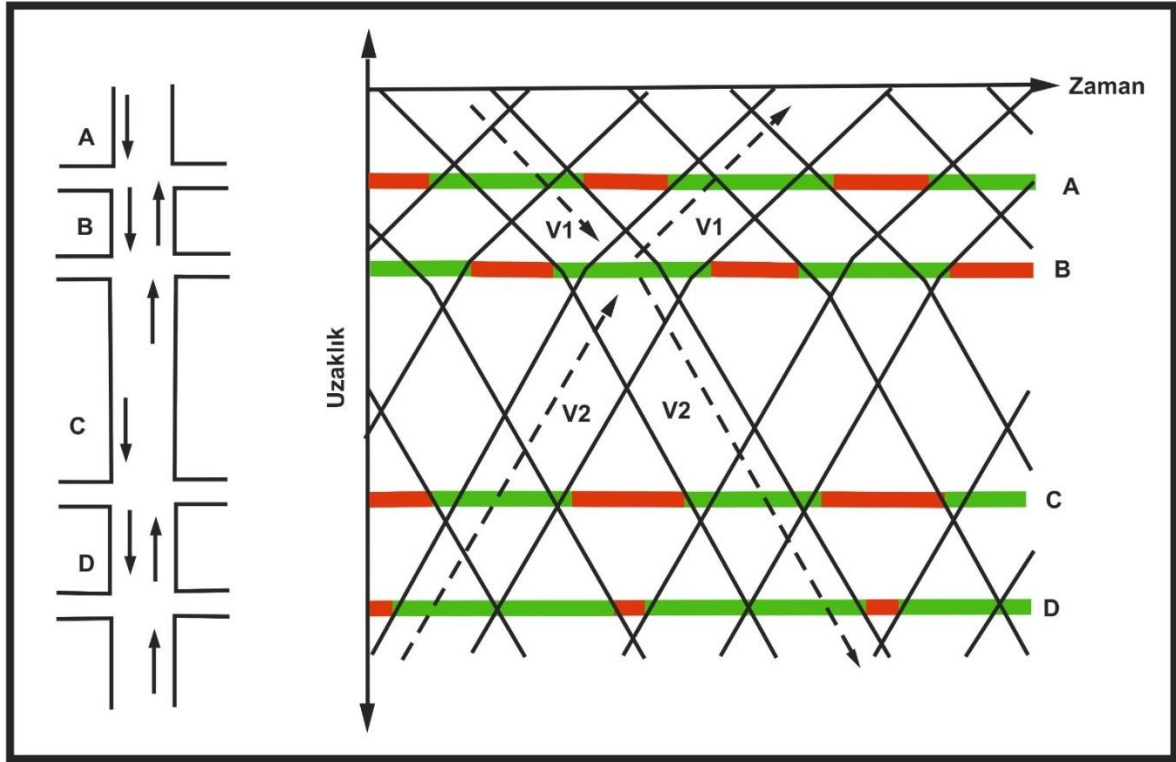
Şekil 7. Alternatif koordine sistemde yer – zaman diyagramı

Progresif sistem

Progresif sistemde, koordine edilen arter üzerindeki tüm kavşaklar aynı döngü süresine ayarlanır. Yeşil ışık süreleri ise arterde hedeflenen seyahat hızına uygun olarak belirlenir. Amaç, arter boyunca *yeşil dalga* oluşturmak, yani araçların her kavşakta yeşil ışığa denk gelerek duraksamadan ilerlemesini sağlamaktır. Şekil 8'de progresif sisteme ait örnek bir yer-zaman diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda arterin iki yönünde de yeşil sürelerin eşit ve senkron olduğu varsayılmıştır. Örneğin, A ve B kavşakları arasını V_1 hızıyla kateden bir araç, B'den sonra hızını V_2 'ye çıkarırsa C ve D kavşaklarını da durmadan geçebilir. Benzer şekilde, D

yönünden V_2 hızıyla gelip B'ye ulaşan bir araç, A kavşağında durmamak için hızını V_1 'e düşürmek zorunda kalabilir.

Progresif sistemde tanımlanan hız sınırlarına uyulduğu takdirde, ana aks boyunca bütün kavşaklarda yeşil ışık dalgası yakalamak mümkündür. Yeşil dalga, sürücüler için sürekli akıcı bir seyir anlamına gelir ve hem zaman tasarrufu hem de yakıt ekonomisi sağlar.



Şekil 8. Progresif koordine sistem yer – zaman diyagramı

Progresif sistem uygulamaları iki alt başlıkta incelenir:

Basit progresif sistem

Koordinasyon her iki yön için bir kez sağlanır ve döngü süresi, ofset gibi parametreler süreç boyunca sabit kalır. Bu nedenle sistem trafik koşullarındaki değişikliklere uyum sağlamaz; esnek değildir. Örneğin gece düşük hacimlerde de gündüz yoğunluklarına göre ayarlanmış parametrelerle çalışmaya devam eder.

Esnek progresif sistem

Bu sistemde döngü süreleri, yeşil süreleri ve ofsetler trafik koşullarına göre dinamik olarak değiştirilebilir. Günün farklı saatlerinde trafik hacimleri değiştiğinde sistem parametreleri de uygun şekilde güncellenir. Böylece her zaman diliminde taşıtlar mümkün olan en az gecikmeyle ilerler. Esnek sistemler, trafik akışındaki dalgalanmalara uyum sağlayarak gecikmeleri minimize eder ve yeşil ışıkta geçen araç sayısını maksimize eder.

Alansal trafik kontrol sistemi

Koordinasyon sistemleri genellikle tek bir arter üzerindeki kavşakları senkronize etmeye odaklanır. Oysa kentsel ulaşım ağları birbiriyle kesişen birçok arterden oluşur. Alansal trafik kontrol sistemi, belirli bir bölge içindeki birden fazla arterin kavşaklarını eşzamanlı ve entegre biçimde yönetmeyi hedefler. Bu sistemde, tanımlanan bölge içindeki tüm kavşaklara dedektörler yerleştirilir ve merkezî bir kontrol bilgisayarına anlık veriler iletilir. Merkez, bu verileri işleyerek tüm bölgedeki sinyal planlarını eş güdümlü biçimde ayarlar.

Alansal kontrol sayesinde, bir arterdeki koordinasyonun bir diğer arterde olumsuz etki yaratması önlenmeye çalışılır; bölgedeki tüm trafiğin genel optimizasyonu hedeflenir. Bilgisayar kontrollü bölgesel sistemler, değişen trafik koşullarına anlık uyum sağlayarak kapsamlı bir trafik yönetimi sunar.

Alansal trafik kontrol sisteminin bazı avantajları şunlardır:

- Bölgede yer alan tüm kavşakların sinyal planları tek merkezden yönetildiği için zamandan ve iş gücünden tasarruf edilir, tutarlılık sağlanır.
- Günün farklı saat dilimleri ve farklı günler için değişen optimizasyonlar otomatik olarak uygulanabilir; böylece her zaman aralığında uygun sinyal planı devrede olur.
- Tüm kavşaklar sürekli izlendiğinden, herhangi bir arıza veya kesinti durumu anında tespit edilip müdahale edilebilir.
- Toplu taşıma araçlarına öncelik tanınması gibi stratejiler bölgesel olarak entegre edilebilir; örneğin otobüsün yaklaşmasıyla kavşaklardaki yeşil süre uzatılabilir.

Dünyada kullanılmakta olan bazı alansal trafik kontrol sistemleri örnek verilebilir. SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*), İngiltere’de geliştirilmiş ve ilk olarak Glasgow ve Coventry şehirlerinde uygulanmış bir bölgesel trafik kontrol sistemidir. SCOOT’un en büyük avantajı, sinyal zamanlamasını kısa aralıklarla sürekli optimize edebilmesidir. Bu sistem, önceden bahsedilen TRANSYT programındaki optimizasyon mantığını gerçek zamanlı verilerle birleştirir. Kavşak yaklaşımlarına yerleştirilen dedektörler sayesinde her döngüde gelen araç sayıları izlenir. Program, bu bilgilere dayanarak optimum döngü süresini belirler ve sinyal sürelerini küçük adımlarla ayarlar. Ayrıca dedektör verileri kullanılarak, bir kavşakta oluşan kuyrukların bir önceki kavşağa ulaşmasını (geri tepmesi) önlenmeye çalışılır; eğer kuyruk uzamaya başlarsa yukarı yöndeki kavşakta yeşil süre uzatılarak tıkanıklık önlenir.

Benzer şekilde SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) Avustralya’da geliştirilen bir başka alansal sistemdir ve dünyanın pek çok kentinde başarıyla uygulanmaktadır. Bu tür sistemler, adaptif yaklaşımlarıyla şehir içi trafiğin bütüncül optimizasyonunu sağlar.

Literatür Özeti

Trafik sıkışıklığı, kentlerin büyümesi ve taşıt kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte tüm dünyada önemli bir sorun haline gelmiştir. Özellikle taşıt sayısının yol kapasitesini aşmasıyla kavşaklarda meydana gelen gecikmeler, trafik mühendisliği alanında birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve çeşitli yöntemlerle analiz edilmiştir. Trafik akışının temel kontrol unsurlarından biri olan sinyalizasyon sistemleri, ilk olarak 1868 yılında Londra’da gaz lambalarıyla çalışan semaforlar biçiminde kullanılmaya başlanmış, günümüzde ise ileri teknolojiyle entegre edilmiş akıllı kontrol sistemlerine dönüşmüştür (Papageorgiou ve diğ., 2003).

Lowrie & diğ., (1990), Avustralya’da geliştirdiği SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) ile adaptif sinyalizasyon yönetiminin trafik performansına katkılarını analiz etmiştir. SCATS, belirlenen kavşaklara yerleştirilen dedektörlerden aldığı verileri işleyerek, kavşaklar arasında uyumlu bir sinyalizasyon yönetimi sağlamaktadır. Çalışma sonucunda, SCATS’in trafik sıkışıklığını %20 oranında azalttığı ve kavşaklardaki ortalama taşıt gecikmelerini düşürdüğü belirlenmiştir.

Robertson & Bretherton, (1991), kavşaklar arasında koordineli sinyalizasyonun trafik akışına olan etkisini incelemiş ve özellikle büyük kentlerde tekil kavşak optimizasyonunun yetersiz kaldığını vurgulamıştır. Bu çalışmada, ilk olarak koordineli sinyal sistemlerinin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiş ve TRANSYT modeli önerilmiştir. TRANSYT, yeşil dalga koordinasyonunu sağlayarak kavşaklar arasındaki geçişleri daha verimli hale getirmeyi amaçlayan bir modeldir.

Bretherton & diğ., (2004), adaptif sinyal kontrol sistemleri üzerine yaptıkları araştırmalarda SCOOT modelini geliştirerek, trafik verilerini gerçek zamanlı analiz eden ve sinyal sürelerini dinamik olarak optimize eden bir sistem sunmuştur. SCOOT’un en büyük avantajı, araç dedektörlerinden gelen verileri anlık olarak işlemesi ve trafik akışına bağlı olarak sinyal zamanlarını sürekli güncellemesidir.

Fellendorf & Vortisch, (2010), mikroskobik trafik simülasyonlarının performanslarını değerlendirerek VISSIM, AIMSUN, SUMO ve Paramics gibi yazılımların trafik modelleme süreçlerine etkilerini analiz etmiştir. Araştırmada, VISSIM ve AIMSUN’un trafik koşullarını en iyi şekilde modellediği, diğer programların ise belirli senaryolarda tutarsız sonuçlar verebildiği ifade edilmiştir.

Stevanovic & diğ., (2008), genetik algoritmaların koordineli kavşak optimizasyonundaki etkinliğini incelemiş ve taşıt gecikmelerini %15-30 oranında azaltabilecek

bir model geliştirmiştir. Çalışma, genetik algoritmaların sinyal süreleri optimizasyonunda başarılı sonuçlar verdiğini ve trafik akışını iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Yun & Park, (2012), genetik algoritmalar ve adaptif trafik yönetimi konularında önemli bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu araştırmada, sinyal sürelerini optimize ederek trafik akışını iyileştiren bir model geliştirilmiş ve simölasyonlarla desteklenmiştir. Sonuçlar, genetik algoritmaların yoğun saatlerde trafik performansını artırdığı ve kuyruklanmaları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Abbas & diğ., (2017), koordineli sinyalizasyonun trafik güvenliği üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu sistemlerin çarpışma risklerini azalttığını tespit etmiştir. Araştırma, koordineli sinyalizasyonun sürücülerin ani fren yapma sıklığını düşürerek kavşak güvenliğini artırdığını ortaya koymuştur.

Li & diğ., (2019), koordineli sinyalizasyon sistemlerinin çevresel etkilerine yönelik gerçekleştirdiği araştırmada, bu sistemlerin yakıt tüketimi ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını tespit etmiştir. Çalışma, koordineli sistemlerin taşıt gecikmelerini yaklaşık %25 oranında düşürdüğünü ve trafik yoğunluğunu azalttığını göstermiştir.

Chen & diğ., (2021) tarafından yapılan bir başka çalışma, sinyal sürelerinin yayalar ve taşıtlar üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Çalışmada, trafik akışını iyileştiren sinyalizasyon sistemlerinin yaya bekleme sürelerini de azalttığı ve kent içi yaşam kalitesini artırdığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak literatürde yapılan araştırmalar, trafik akışının etkin bir şekilde yönetilmesi açısından koordineli sinyalizasyon sistemlerinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Yapılan alışmalar, gecikme süreleri, kuyruklanmalar, yakıt tüketimi, trafik güvenliği ve çevresel etkiler gibi parametreleri optimize etmek için bu sistemlerin önemli kazanımlar sağladığını kanıtlamaktadır. Bu alışma da literatüre katkı sağlamak amacıyla, E80 Karayolu üzerinde bulunan üç kavşakta koordineli sinyalizasyon sistemlerinin trafik performansına etkisini analiz etmeyi hedeflemektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Sinyalize Kavşaklarda Gecikme ve Kapasite Hesapları

Trafik mühendisliğinde, sinyalize kavşakların kapasite ve gecikme analizleri kavşak performansını değerlendirmek için yapılır. Bu bölümde, sinyalize kavşaklarda kapasite ve gecikme hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan Webster yöntemi ele alınmıştır.

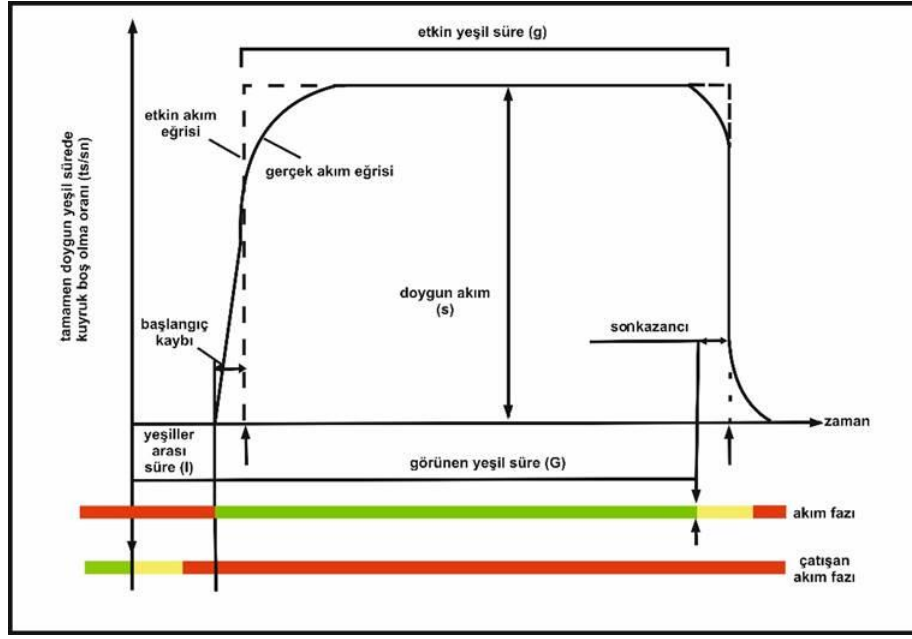
Webster (İngiliz Yöntemi)

Webster (1958) tarafından geliştirilen yöntem, sabit zamanlı sinyalize kavşaklar için *yaklaşık* optimum döngü süreleri ve gecikme tahminleri sağlar. Bu yöntem, kavşakta ölçülen veya tahmin edilen trafik değerlerine dayalı formüller sunar.

Doygun akım

Doygun akım, bir kavşak kolunda, sinyal lambası sürekli yeşil yandığı takdirde bir saat içinde geçebilecek maksimum araç sayısıdır. Diğer bir deyişle, o kolda araç arzının sürekli olduğu durumda ölçülen akımdır. Doygun akım değeri kavşağın fiziksel özelliklerine, şerit genişliğine, eğimine, dönüş durumlarına ve araç türlerine bağlı olarak değişir. Bu konuda literatürde farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Örneğin, Pursula ve Niittymäki (1996) yaptıkları çalışmada doymun akımın 1800–2475 araç/saat/şerit aralığında değişebildiğini göstermişlerdir. Bu değerler, farklı kavşak koşullarında doymun akımın ne kadar çeşitlenebileceğini ortaya koymaktadır.

Bir kavşakta yeşil ışık süresince araçların akım profilini anlamak için doymunluk akımı eğrisi kullanılabilir. Tipik olarak, yeşilin ilk birkaç saniyesinde akım artar, belli bir doymun seviyeye ulaşır ve yeşilin bitimine kadar bu seviyede kalır. Şekil 9, bir kavşak kolunda yeşil ışık boyunca araç geçişlerinin nasıl doymun akıma ulaştığını gösteren örnek bir grafikdir (Akçelik, 1998).



Şekil 9. Kavşak yaklaşım kolundaki taşıtların yeşil ışık boyunca hareketi

Şekil 9’da görüldüğü üzere, sinyalizasyon kavşaklarında etkin sürelerin yanı sıra belirli kayıp süreler de meydana gelmektedir. Kavşağa yaklaşan taşıtlar için yeşil ışığın yanmasıyla birlikte araçların harekete geçmesi arasında geçen zaman dilimi, "başlangıç kaybı" olarak tanımlanır. Bununla birlikte, sinyal fazları arasındaki geçişlerde uygulanan koruma süreleri ve yeşiller arası geçiş süreleri de toplam kayıp süreye eklenir. Bu durum, kavşak kapasitesinin belirlenmesinde yalnızca yeşil sürenin değil, aynı zamanda bu tür kayıp sürelerin de dikkate alınmasını gerektirir.

Kavşak kapasitesinin analizi kapsamında doygun akım değeri, araçlar arasındaki doygun takip aralığına bağlı olarak Denklem (8) ile hesaplanır:

$$S = 3600/h_n \quad (8)$$

Bu formülasyon, geometrik faktörleri göz ardı etmektedir. Oysa kavşak geometrisi, şerit sayısı, yol eğimi ve sürücü davranışları gibi unsurlar doygun akım üzerinde doğrudan etkilidir. Kimber ve arkadaşlarının (1986) yürüttüğü çalışmada, bu geometrik faktörler dikkate alınarak doygun akımın daha hassas şekilde hesaplandığı alternatif modeller geliştirilmiştir. Bu kapsamda, geometrik etkenleri içeren hesaplama Denklem (9) ve (10) ile ifade edilmektedir:

$$S1 = (S0 - 140dn)/(1 + 1,5f/r) \text{ otomobil/saat/şerit} \quad (9)$$

$$S0 = 2080 - 42dg * G + 100(w - 3,25) \quad (10)$$

Burada:

S1: Geometrik etkenler dikkate alınarak hesaplanan doygun akım değeri (araç/saat/şerit),

dn : Banket kenarındaki şeritler için 1, diğerleri için 0,
 dg : Yokuş yukarı yönlü şeritler için 1, diğerleri için 0,
 G : Yolun dikey eğimi,
 w : Şerit genişliği,
 f : Dönüş yapan taşıt oranı,
 r : Dönüş yarıçapı.

şeklinde tanımlanmıştır. Bu parametreler kullanılarak kavşakların gerçek koşulları altında daha gerçekçi bir doygun akım tahmini yapılması mümkün hale gelmektedir.

Taşıt kompozisyonu

Kavşak performansını etkileyen önemli faktörlerden biri trafikteki araç türleri ve bunların oranlarıdır. Ağır taşıtlar (kamyon, otobüs vb.), otomobillere kıyasla daha büyük, daha yavaş ivmelenen ve daha fazla boşluk gerektiren araçlardır. Bu yüzden kavşaktaki ağır taşıt oranı arttıkça, efektif kapasite düşer ve gecikmeler artabilir.

Analizlerde farklı araç türlerinin etkisini hesaba katmak için her araç türü “birim otomobil eşdeğeri” cinsine dönüştürülür. Örneğin bir otomobil 1 birim kabul edilirken, bir kamyon daha fazla yer kaplar ve daha yavaş olduğundan >1 birim otomobile eşdeğer sayılır. Tablo 1, farklı taşıt türleri için kullanılan tipik birim otomobil (PCU – Passenger Car Unit) değerlerini göstermektedir:

Tablo 1. Taşıt Türlerine Göre Birim Otomobil Değerleri (*Kimber ve diğerleri, 1986*)

Taşıt Türü	Birim Otomobil Değeri
Otomobil	1.0
Hafif Ticari	1.5
Ağır Taşıt	2.3
Otobüs	2.0

Bir kavşaktaki trafik hacmi, içinde barındırdığı her araç türü bu katsayılarla çarpılarak birim otomobil (oto) cinsine çevrilir. Böylece karma trafik akımı, eşdeğer otomobil akımı olarak tek bir ölçüte indirgenir ve kapasite hesaplarında kullanılır.

Hacim/Kapasite oranı

Sinyalize kavşaklarda kapasite, belirli bir zaman diliminde kavşaktan geçebilen maksimum taşıt sayısıdır. Kapasite, doygun akıma (si) bağlı olup, kavşağın trafik akışını yönetme kapasitesinin belirlenmesi açısından kritik bir parametredir.

Bir kavşağın belirli bir yaklaşım kolundaki trafik hacmi (v), doygun akıma bölünerek hacim/kapasite oranı hesaplanmaktadır. Bu oran, kavşağın etkinliği ve performans seviyesi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Hacim/kapasite oranı, aşağıdaki Denklem (11) ile ifade edilmektedir:

$$x_i = \left(\frac{v}{c} \right) \quad (11)$$

Burada;

x_i =Yaklaşım kolunun hacim/kapasite oranı

v =Trafik hacmi (taşıt/saat)

c =Kapasite (taşıt/saat)

Etkin yeşil süre ise kavşaktaki verimli geçiş süresi olarak tanımlanmakta olup aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$g = G - l \quad (12)$$

Burada;

G =Görünen yeşil süre (saniye)

l =Kayıp süre (saniye)

Webster yöntemine göre, bir kavşağın kapasitesi, devre içindeki toplam kayıp süreler (L) bağlıdır. Kavşaktaki toplam kayıp süre, aşağıdaki denklem (13) ile hesaplanmaktadır:

$$L = \Sigma(I - a) + \Sigma l \quad (13)$$

Burada;

I =Yeşiller arası süre

a =Sarı ışık süresi

l =Bir fazdaki kayıp süre

Optimum devre süresi

Optimum devre süresi, kavşaklarda trafik akışını düzenlemek, gecikmeleri azaltmak ve kapasiteyi etkin şekilde kullanmak amacıyla belirlenen ideal sinyal süresidir. Webster yöntemine göre optimum devre süresi hesaplanırken öncelikle fazlardaki toplam kayıp süreler belirlenir. Bir fazdaki toplam kayıp süre, yeşiller arası süre ile sarı ışık süresi arasındaki farktan oluşmakta olup, başlangıç kaybı ve sarı sürenin ikinci yarısının toplamıyla elde edilir. Bir devrede tüm fazların kayıp sürelerinin toplamı " L " ile ifade edilir. Devrede kayıp süre dışında kalan zaman dilimi ise "yararlı süre" olarak adlandırılır ve fazlar arasında her fazın trafik

hacminin doygun akıma oranına göre paylaştırılır. Bu oran Webster yönteminde "doygunluk derecesi" olarak tanımlanır ve "Y" ile ifade edilir. Sonuç olarak, kavşaklarda en düşük gecikmeyi sağlayacak optimum devre süresi aşağıdaki denklem (14) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$D_0 = \frac{\phi * L + 5}{1 - Y} \quad (14)$$

Burada;

D_0 =Optimum devre süresi;

L =Bir devredeki toplam kayıp süre;

Y =Her faz için akımların doygun derecelerinin toplamı;

ϕ =1,2-1,8 arasında değişen kat sayıdır.

Gecikme hesabı

Işıklı kavşaklarda gecikme, kavşak performansının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir kriterdir. Kavşaklarda gecikme süresi, taşıtların kavşağa varışından, kavşağı terk edene kadar geçen toplam süre ile ideal durumda kavşakta hiç durmadan geçiş yapabilecekleri süre arasındaki farktır. Diğer bir ifadeyle, araçların dur-kalk hareketlerinden dolayı yaşadıkları zaman kaybını temsil eder. Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerinde gecikme süresi hesaplamalarında genellikle Webster yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemle göre, bir kavşak kolundaki ortalama gecikme değeri, trafik akımının kavşak kapasitesine oranını ifade eden doygunluk derecesi dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Webster yöntemi ile ortalama gecikme aşağıdaki Denklem (15) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$w = \frac{D \times (1 - \lambda)^2}{2 \times (1 - \lambda \times x)} + \frac{x^2}{2 \times q \times (1 - x)} - \left(0.65 \times \frac{1}{D} \times \frac{3 \times x \times (2 + 5\lambda)}{2} \right) \quad (15)$$

w = Ortalama gecikme süresi (sn/taşıt)

D = Devre süresi (sn)

λ = Yeşil süre oranı ($\lambda = g/D$)

g = Yeşil süre (sn)

x = Doygunluk derecesi [$x = q / (\lambda \times s)$]

q = Trafik hacmi (taşıt/saat)

s = Doygun akım (taşıt/saat)

Simülasyon İle Modelleme

Simülasyon, gerçek bir sistemin teorik ya da fiziksel modelini bilgisayar ortamında kurup işleterek, sistem davranışlarını ve farklı senaryoların etkilerini inceleme yöntemidir. Bu

teknikte, gerçek sistemin bir benzetimi oluşturulur ve model üzerinde deneyler yapılarak sistemin tepkileri gözlemlenir. Simülasyon, özellikle karmaşık ve riskli sistemlerin analizinde vazgeçilmez bir araçtır; zira doğrudan gerçek sistem üzerinde deneme yapmak maliyetli veya tehlikeli olabilir.

Simülasyon ortamında, gerçek sistemin özellikleri ve dinamikleri zaman hızlandırılabilir veya yavaşlatılabilir, böylece kısa sürede uzun dönem etkileri incelenebilir ya da hızlı süreçler yavaşlatılarak detaylı analiz edilebilir (Kobal, 2011). Modern simülasyon yazılımları, görsel arayüzlerle desteklenerek kullanıcıların modeli anlamasını ve sonuçları yorumlamasını kolaylaştırmaktadır.

Simülasyonun kullanım alanları

Günümüzde simülasyon tekniği, ulaşım sistemleri başta olmak üzere mühendisliğin birçok alanında yoğun olarak kullanılmaktadır. Düşük maliyetle farklı senaryoları test edebilme imkânı, yüksek hesaplama gücü gerektiren kompleks problemleri çözebilme kapasitesi ve bilgisayar teknolojilerinin sürekli gelişimi, simülasyonu yaygın ve etkili bir yöntem haline getirmiştir.

Simülasyonun kullanılabileceği başlıca amaçlar şunlardır:

- Çok bileşenli ve dinamik sistemlerin (örneğin bir şehrin trafik ağı, bir üretim hattı, bir havalimanı operasyonu) tüm parçalarını aynı anda incelemek ve sistemin bütünsel davranışını anlamak için simülasyon yapılabilir.
- Gerçek sistemde değiştirilemeyecek veya zor denenecek parametre değişiklikleri (örneğin yol kapasitelerini artırmak, yeni sinyal planları uygulamak, araç sayısını belirli oranda yükseltmek gibi) model üzerinde uygulanarak sonucun ne olacağı görülebilir. Böylece hangi etkenin sistem performansını ne ölçüde etkilediği hakkında bilgi edinilir.
- Simülasyon sayesinde organizasyon yapısındaki veya çevresel koşullardaki (talep artışı, hava durumu, politika değişiklikleri vb.) farklılıklar modele yansıtılıp sistemin tepkisi incelenebilir. Bu, geleceğe yönelik planlamalarda yardımcı olur.
- Mevcut sistemin modeli üzerinde yapılan deneylerle elde edilen bilgiler, gerçek sistemin geliştirilmesine ışık tutar. Örneğin bir kavşak simülasyonu, gerçekte o kavşağın geometrik iyileştirmelere nasıl tepki vereceğini gösterip tasarım kararlarına katkı sağlayabilir.

Simülasyonun avantajları

Simülasyon, problem çözümünde son derece güçlü bir yardımcıdır ve yaygın kullanılmasının pek çok nedeni vardır:

- Sistemin modeli kurulduktan sonra, farklı senaryolar istenildiği kadar tekrarlanabilir ve hızlıca test edilebilir. Gerçek hayatta mümkün olmayan veya uzun zaman alacak deneyler, simülasyonda kısa sürede ve güvenle gerçekleştirilebilir.
- Büyük yatırım gerektiren projeler (yeni bir yol yapımı, kavşak düzenlemesi, vb.), uygulanmadan önce simülasyonla test edilebilir. Bu sayede başarısız veya verimsiz olabilecek bir projeye baştan kaynak ayırmak yerine, simülasyon sonuçlarına göre karar verilir; bu da zaman ve maliyetten tasarruf sağlar.
- Simülasyon modeli, gerçek hayatta elde edilmesi zor veya pahalı olabilecek verileri kolayca üretir. Örneğin, bir kavşakta her bir araç için bireysel gecikme sürelerini veya tam konum bilgilerini gerçek hayatta tek tek ölçmek zorken, simülasyon bu verileri doğrudan sağlar. Bu da detaylı analiz imkânı sunar.
- Simüle edilen sistemi tüm detaylarıyla gözlemlemek mümkündür. Bu sayede sistemin işleyişi daha iyi anlaşılır, daha önce fark edilmemiş sorunlar tespit edilebilir. Örneğin simülasyonda araç hareketleri izlenerek, fiziksel sistemde fark edilemeyen bir şişme noktası veya gereksiz bekleme durumu ortaya çıkarılabilir. Bu bulgular, gerçek sistemde iyileştirme yapmayı sağlar.
- Gerçek sistemle ilgili veri eksikliği olsa bile, simülasyon modeli üzerinde çeşitli varsayımlarla deneyler yapılabilir. Bu, belirsizlik altındaki durumlarda bile öngörüler geliştirmeye imkân tanır.
- Karmaşık sistemler için elde edilen analitik çözüm veya hesaplamalar varsa, bunların doğru olup olmadığı simülasyonla test edilebilir. Simülasyon, analitik modelin varsayımlarının geçerliliğini ve sonuçlarının gerçekçiliğini kontrol etmede bir araçtır.
- Simülasyon, dinamik sistemlerin zaman ölçeğiyle oynama esnekliği sunar. Gerçek sistemin bir saatlik çalışması simülasyonda birkaç saniyede simüle edilebilir (hızlandırılmış simülasyon), ya da milisaniyelik hızlı bir süreç yavaşlatılarak adım adım incelenebilir. Bu, özellikle trafikte yoğunluk oluşma süreci gibi olayları hızlandırarak görmek veya hızlı kimyasal reaksiyonlar gibi olayları yavaşlatarak anlamak için faydalıdır.

Simülasyonun dezavantajları

Tüm avantajlarına karşın simülasyon yönteminin de bazı zorlukları ve kısıtları vardır:

- Gerçekçi bir simülasyon modeli geliştirmek için konuya özel uzmanlık ve güçlü bir matematiksel altyapı gerekebilir. Özellikle karmaşık sistemlerin modellenmesi ve doğru bir şekilde programlanması oldukça zaman alan ve emek isteyen bir süreçtir. Model kurulumunda yapılacak hatalar, sonuçların güvenilirliğini düşürecektir.
- Simülasyon modelleri genellikle rastgelelik (stokastik süreçler) içerir. Bu da modelin çıktılarında her çalıştırmada bir miktar değişkenlik olacağı anlamına gelir. Simülasyon sonuçları, gerçek sistemi olasılıksal olarak yansıtır; tam olarak birebir vermez. Bu nedenle, simülasyon ne kadar ayrıntılı olursa olsun, sonuçların tamamen garantili doğrulukta olduğu söylenemez. Sonuçlar, belirli bir güven aralığında değerlendirilmelidir.
- Bir simülasyon modeli ne kadar detaylandırılırsa, o kadar gerçekçi sonuç verir. Ancak detay arttıkça modelin kurulması ve çalıştırılması için gereken bilgi, veri, zaman ve hesaplama gücü de artar. Çok detaylı bir model bazen gereksiz olabilir veya pratik olmayabilir. Bu nedenle modelleyici, ihtiyaç duyulan detay seviyesi ile kaynaklar arasında bir denge kurmak zorundadır. Fazla basit bir model önemli dinamikleri kaçırabilir, aşırı detaylı bir model ise kullanım ve anlaşılma zorluğu yaratabilir.

Benzetim modeli

Ulaşım sistemlerinde mikro-simülasyon kullanımı, şehir içi trafik ağı gibi karmaşık yapıları analiz etmeyi mümkün kılar. Ancak başarılı bir simülasyon çalışması için belli kurallara uymak gerekir:

- Gerçekleştirilmek istenen simülasyonun seçilen yazılımla uyumlu olup olmadığı analiz edilmelidir. Her simülasyon yazılımının güçlü ve zayıf yönleri vardır; örneğin bazı yazılımlar büyük ölçekli ağlarda verimli iken bazıları mikro düzeyde daha ayrıntılıdır. Bu nedenle önce problem tanımı ve ağ yapısı değerlendirilerek uygun araç seçilmelidir.
- Modellemede kullanılacak trafik hacimleri, dönüş oranları, araç kompozisyonları vb. veriler gerçek durumu yansıtmalıdır. Yanlış veya eksik verilerle kurulan model yanıltıcı sonuçlar verir. Bu yüzden kalibrasyon için güvenilir ölçüm verileri kullanılmalı, gerekiyorsa saha çalışmalarından elde edilen veriler modele girilmelidir.
- Simülasyon çalışmaları, özellikle geniş kapsamlı ise ciddi bilgisayar kaynakları ve zaman gerektirebilir. Modeli çalıştırmak için yeterli donanım ve süre ayrılmalıdır.

Aksi takdirde analizler yarım kalabilir veya sonuçlar çok geç elde edilip karar sürecine katkı sağlayamayabilir.

- Simülasyon modelinin başarısı, büyük oranda kullanılan verilerin doğruluğuna bağlıdır. Geçersiz veya yanlış kalibre edilmiş veriler, hatalı sonuçlara yol açar. Bu nedenle modele girilen parametreler, dağılımlar ve ilişkiler dikkatle kontrol edilmelidir.
- Her şehrin, her bölgenin trafik karakteristikleri farklıdır. Bu yüzden genel varsayımlar yerine, model parametreleri yerel gözlem ve ölçümlere göre kalibre edilmelidir. Örneğin sürücülerin ortalama takip mesafesi veya sarı ışıktaki geçme eğilimi gibi davranışlar kültürden kültüre değişebilir; model bu koşullara uyarlanmalıdır.

Yukarıdaki kurallara dikkat ederek kurulan bir simülasyon modeli, gerçeğe oldukça yakın davranacak ve güvenilir sonuçlar üretecektir.

PTV VISSIM mikro simülasyon programı

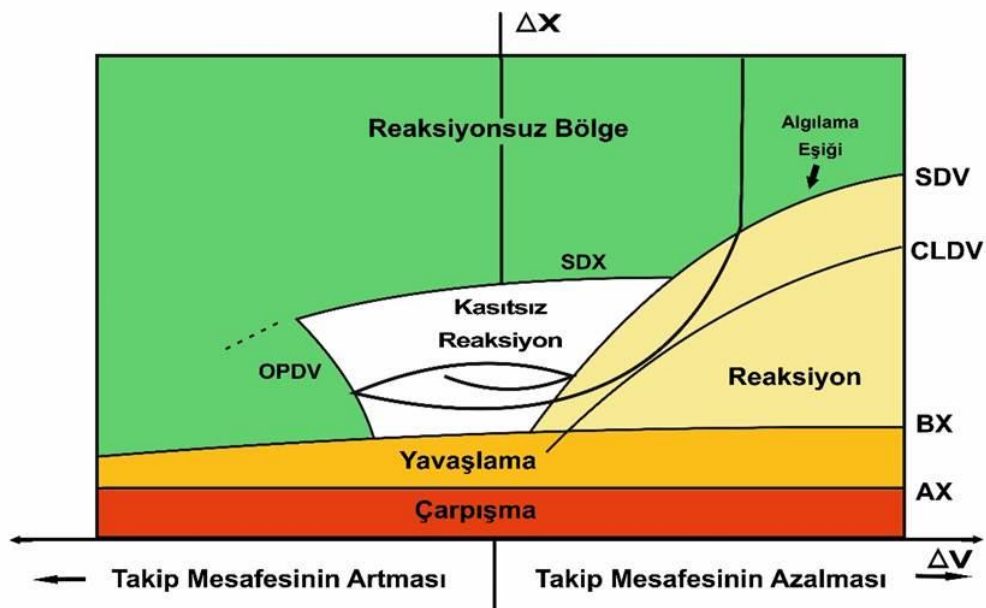
PTV VISSIM, ulaştırma sistemlerindeki trafik ve toplu taşıma unsurlarını modellemek ve analiz etmek için geliştirilmiş, ayrık zaman adımlı ve davranış temelli bir mikroskobik simülasyon yazılımıdır. Almanya merkezli PTV Group tarafından geliştirilen bu program, Karlsruhe Teknik Üniversitesi iş birliği ile kalibre edilmiştir. VISSIM'in öne çıkan özellikleri şunlardır:

- VISSIM, karayolu taşıtlarının yanı sıra tramvay, tren gibi raylı sistemler, bisiklet ve yaya hareketlerini de simüle edebilir. Böylece karma trafik ortamlarının (örneğin hem araç hem yaya trafiği içeren şehir içi cadde) gerçekçi modellenmesini sağlar.
- Farklı yol geometrilerini ve kontrol türlerini destekler. Karmaşık kavşaklar, dönel kavşaklar, otoyol şerit değişimleri, otobüs durakları, hatta havaalanı taksi yolları gibi çok çeşitli senaryolar VISSIM'de oluşturulabilir. Harita tabanları, uydu görüntüleri veya CAD çizimleri üzerine model kurulabilir, böylece gerçek dünyadaki yol yapısı birebir yansıtılabilir.
- Simülasyon çalışırken araç hareketleri, sinyal değişimleri, kuyruk oluşumları ekrandan gerçek zamanlı izlenebilir. Bu, modelin davranışını anlamayı kolaylaştırır ve sunumlarda karar vericilere görsel bir açıklama sağlar.
- VISSIM, sabit zamanlı kontrolün yanı sıra adaptif ve duyarlı sinyal kontrol stratejilerini de simüle edebilir. Program, diğer sinyal kontrol yazılımlarıyla entegre çalışabildiği gibi, kullanıcının özel kontrol mantıklarını (ör. kendi yazdığı bir

algoritma) uygulamasına da izin verir. Bu esneklik sayesinde farklı kontrol senaryolarının performansı ölçülebilir.

- VISSIM’de araç takip ve şerit değiştirme davranışları, R. Wiedemann’ın 1974’te geliştirdiği psikofiziksel sürücü algı modeli ile tanımlanır. Bu model, bir sürücünün önündeki aracı algılayıp tepki vermesi sürecini dört rejimde ele alır: serbest sürüş, yaklaşma, takip ve frenleme. Her sürücü-arac kombinasyonu için farklı karakteristikler tanımlanabilir.

VISSIM programında kullanılan taşıt takip modeli, Şekil 10’daki diyagramda gösterilmiştir (Kobal, 2011).



Şekil 10. Wiedemann psiko fiziksel taşıt takip modeli

- **Serbest Sürüş:** Sürücü önündeki araçtan uzakta ve ondan etkilenmeksizin seyretmektedir; hedeflediği (rahat) hızda gitmeye çalışır.
- **Yaklaşma:** Sürücü daha yavaş giden bir araca yaklaştığında hızını düşürmeye başlar; iki araç arasındaki mesafe belirli bir güvenlik aralığına inerken sürücü tepki verir.
- **Takip:** Sürücü öndeki aracı belirli bir mesafeyi koruyarak takip eder; ne hızlanır ne yavaşlar, öndeki araçla senkronize gider.
- **Frenleme:** Öndeki araçla mesafe güvenli takip mesafesinin altına düştüğünde sürücü aniden frene basar; bu durum genellikle öndeki aracın ani fren yapması veya bir başka aracın iki araç arasına girmesiyle ortaya çıkar.

VISSIM, bu davranış modlarını ve geçişlerini yüksek doğrulukla modelleyerek gerçekçi bir trafik akışı simüle eder. Ayrıca araçların şerit değiştirme davranışları da modellenir: Bir araç,

hedef şeridine geçebilmek için yeterli boşluk bulamadığında bir süre bekler, güvenli bir açıklık oluştuğunda hamle yapar. Program, özellikle sinyalizasyon kavşak yaklaşımlarında, araçların çok önceden tek bir şeritte kuyruğa girmesini engelleyecek manevralara izin verir (örneğin kavşağa 100 m kala şerit değiştirme yasağı gibi gerçek dışı kısıtlar kaldırılmıştır). Bu sayede simülasyon, gerçek hayatta görülen çok şeritli kuyruk dağılımı olgusunu yansıtabilir.

Her bir sürücü-arac birimi için farklı özellikler tanımlanabilir: Araç boyu, maksimum hızı, ivmelenme yeteneği; sürücünün hız tercihi, agresiflik düzeyi, takip mesafesi duyarlılığı gibi parametreler dağılımsal olarak verilebilir. Ayrıca yol çevresi faktörleri (örneğin yol tipi, kavşak yaklaştıkça sürücülerin yavaşlama eğrileri, trafik ışıklarına tepki süreleri vb.) de modele dahil edilebilir. Tüm bu esneklikler, VISSIM simülasyonunu gerçeğe oldukça yakın kılar.

Model çıktılarının analizi

Bir simülasyon modeli oluşturulduktan ve kalibre edildikten sonra, yapılacak her senaryo değişikliği için sonuçların dikkatlice analiz edilmesi gerekir. Simülasyon çalışmasında, model üzerinde değiştirilen her bir parametrenin sistem performansına etkisi kayıt altına alınmalıdır. Örneğin, bir kavşak modelinde sinyal döngü süresini artırdığımızda, gecikmelerin azalıp azalmadığı; yeşil dalga ofsetini değiştirdiğimizde, kuyruk uzunluklarının nasıl etkilendiği gibi soruların cevapları raporlanmalıdır.

Bu analiz süreci, deney tasarımı yaklaşımına benzer şekilde yürütülmelidir. Modeli kuran kişi, başlangıçta belirlediği performans ölçütlerini (ortalama gecikme, maksimum kuyruk uzunluğu, ortalama hız vb.) her senaryo sonunda karşılaştırmalıdır. Böylece hangi değişkenin trafiği ne yönde etkilediği anlaşılır. Elde edilen çıktı verileri tablolar ve grafikler halinde sunulur, sonuçlar yorumlanır.

Son olarak, simülasyondan elde edilen bulgular gerçek sistem için alınacak kararlarda kullanılır. Örneğin model üzerinde farklı sinyal planları denenerek en iyisi seçilmişse, bu plan gerçek kavşakta uygulanabilir. Simülasyon sonuçları, karar vericiler için öngörü niteliğindedir ancak mutlak değildir; bu nedenle yorumlanırken uzman değerlendirmesiyle birlikte ele alınmalıdır. Bu şekilde, başlangıçta konulan amaca uygun çözümler geliştirilip gerçek sistemin işletilmesi konusunda daha sağlıklı kararlar verilebilir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Giriş

Tez kapsamında uygulama alanı olarak Erzurum kent merkezinde yer alan E80 karayolu üzerindeki Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşakları seçilmiştir. Bu bölümde söz konusu kavşaklar için aşağıdaki aşamalar sırasıyla ele alınmıştır:

- Ulaşım ağı tasarımı ve trafik verilerinin toplanması,
- Doygunluk akımlarının belirlenmesi,
- Mevcut durum değerlendirmesi;
- o Kavşakların izole (bağımsız) kontrol altındaki performansı,
- o Koordineli kontrol altındaki durumu,
- Sinyal optimizasyon çalışmaları;
- o İzole kontrol için devre süresi iyileştirmesi,
- o Kavşaklar arası ofset sürelerinin hesaplanması,
- o Koordineli sinyal kontrol analizleri.

Bu güzergâhta sinyal süreleri optimize edilerek koordineli sinyal planları oluşturulmuştur. Kavşaklar arasında iteratif (tekrarlamalı) yöntemlerle ofset süreleri farklı değerlerde denenmiş, bu denemeler sonucunda gecikme süreleri analiz edilmiştir. Böylece, sistemde toplam gecikmeyi en aza indiren ofset süreleri belirlenmiştir.

Ağ Tasarımı ve Trafik Etütleri

Bu çalışmada, kavşaklardaki trafik hacimlerinin belirlenmesi amacıyla İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak trafik sayımları gerçekleştirilmiştir. Sayım verileri ile kavşaklara ait sinyal planı bilgileri alınmıştır. İHA görüntüleri sayesinde kavşakların geometrik ve fiziksel özellikleri detaylı şekilde analiz edilmiştir.

İHA ile yapılan çekimler 27.01.2025 tarihinde sabah 08:00–09:00 saatleri arasında (yoğun saatler) ve akşam 17:00–18:00 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Koordineli sinyal kontrolü hedeflendiğinden dolayı, Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşaklarında trafik sayımları eş zamanlı olarak yapılmıştır.

Saha çalışmaları sonucunda; kavşak vaziyet planları, trafik hacim değerleri, faz planları ve sinyal süreleri olmak üzere üç temel başlık altında veriler toplanmış ve analiz edilmiştir.

Kavşak Geometrik Durumu; Kavşağa ait fiziksel özelliklerin belirlenmesi kapsamında; yaklaşım kollarının genişlikleri, şerit başına düşen ortalama genişlikler, toplam şerit sayıları, orta refüj ölçüleri ve sağa/sola dönüşler için ayrılmış cep şeritlerinin varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca yaklaşım kolu sayısı, dönüş kısıtlamaları, giriş ve çıkış yollarının eğim durumu, kısa mesafeli dönüş ya da park şeritleri gibi detaylar gözlemlenmiştir. Bunun yanında, kavşak çevresinde bulunan park alanları, toplu taşıma durakları, tramvay gibi ulaşımı etkileyen unsurlar da kaydedilmiştir.

Trafik Hacimleri; Kavşağa ait trafik verilerinin elde edilmesi amacıyla, tüm yaklaşım kollarından gelen araçların sayımları gerçekleştirilmiştir. Bu sayımlar sonucunda taşıt türlerinin dağılımı (taşıt kompozisyonu), ağır taşıt yüzdesi ve oluşan kuyruklanma seviyeleri gibi önemli trafik parametreleri belirlenmiştir.

Sinyal Planları; Kavşaklara ait sinyalizasyon sistemleri kapsamında; faz planları, devre şemaları, yeşil ışık süreleri, fazlar arası geçiş (ara yeşil) süreleri ve toplam sinyal devre süreleri gibi temel bilgiler tespit edilmiştir.

Saha çalışmaları ve yerinde yapılan gözlemler sonucunda elde edilen kavşakların geometrik özellikleri, trafik hacmi verileri ve sinyal planlarına ait bilgiler, bir sonraki aşamada trafik analiz ve simülasyon yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında; gecikme süresi, kuyruk uzunluğu ve ortalama seyahat hızı gibi performans göstergeleri hesaplanmıştır.

Üniversite Kavşağı

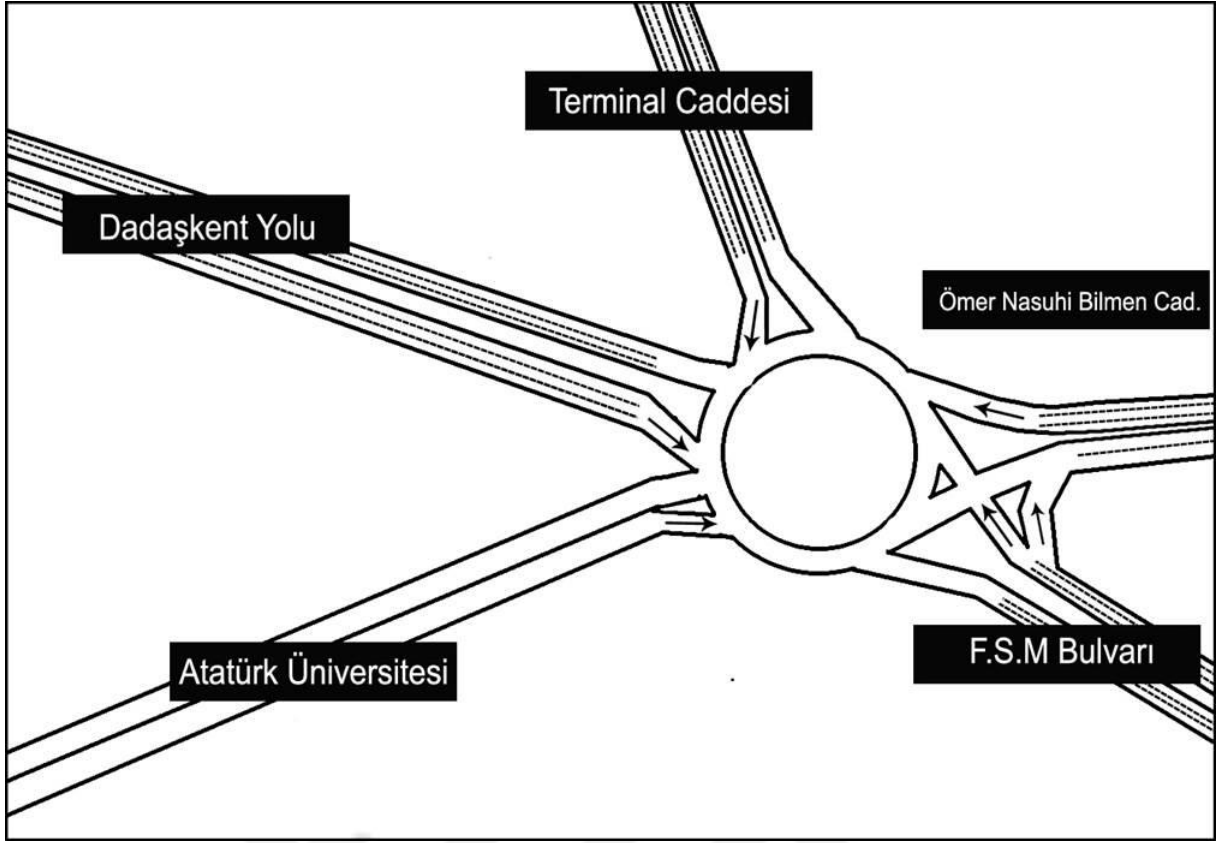
Üniversite Kavşağı; Fatih Sultan Mehmet Bulvarı, Ömer Nasuhi Bilmen Caddesi, Terminal Caddesi, Dadaşkent Yolu ve Atatürk Üniversitesi'nin kesişim noktasında konumlanmaktadır. Beş yaklaşım koluna sahip olan bu kavşakta, özellikle Fatih Sultan Mehmet Bulvarı ile Dadaşkent Yolu üzerinden gelen taşıtlar, kavşağın ana trafik akımını oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, kavşak kuzey-güney doğrultusunda koordineli bir sinyalizasyon sistemiyle işletilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, kavşak; Terminal Caddesi, MNG Alışveriş Merkezi ve Atatürk Üniversitesi gibi önemli trafik çekim ve üretim merkezlerine doğrudan erişim sağlaması nedeniyle stratejik bir konuma sahiptir. Kavşağın konumsal yerleşimi ve insansız hava aracı (İHA) görüntüsü sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de, taslak planı ise Şekil 13'te sunulmaktadır.



Şekil 11. Üniversite Kavşağı konumu



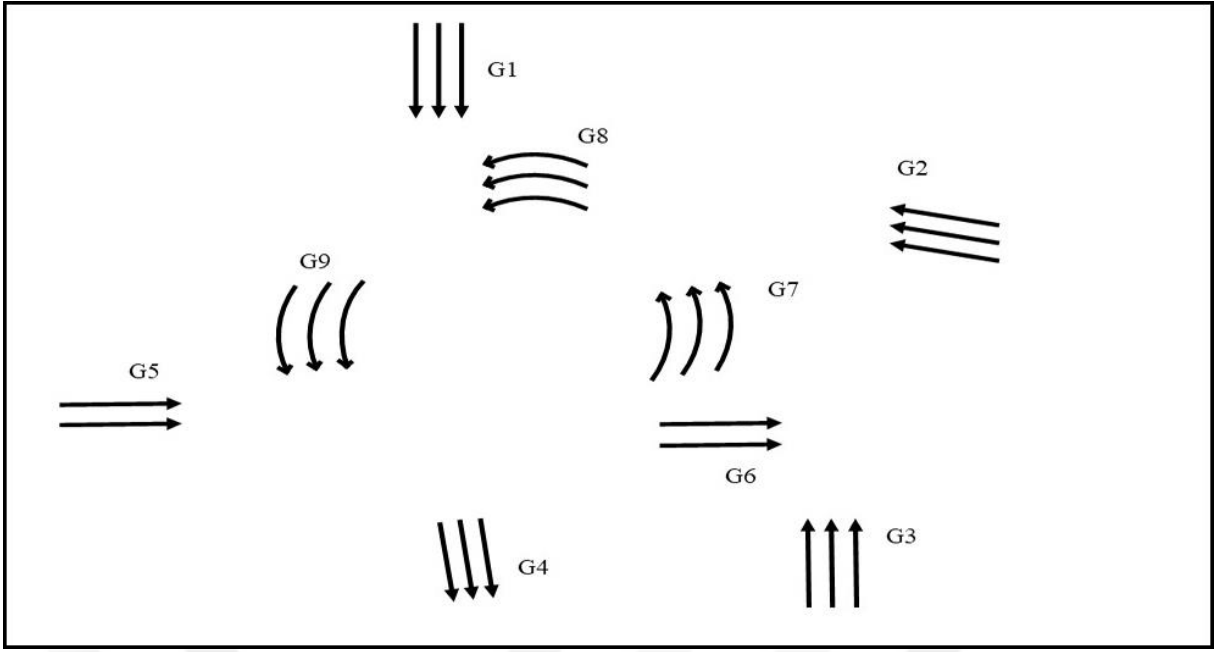
Şekil 12. Üniversite Kavşağı İHA görüntüsü



Şekil 13. Üniversite Kavşağı taslak planı

Sabah zirve saat trafik bilgileri

Üniversite Kavşağı, sabah zirve saatinde 90 saniyelik çevrim süresiyle üç fazlı bir sinyalizasyon planına göre işletilmektedir. Kavşağa ait sinyal grupları, yaklaşım kollarındaki şerit sayıları ve zirve saatine ait faz planları Şekil 14’te sunulmaktadır. Zirve saatinde uygulanan sinyal programına göre; Terminal Caddesi yönünden gelen taşıtlara 17 saniye, Dadaşkent yönünden 28 saniye, Ömer Nasuhi Bilmen Caddesi ile Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönlerinden ise 20’şer saniye yeşil süre tahsis edilmiştir. Üniversite Kavşağı’nın sabah zirve saatine ilişkin sinyal planı ise Şekil 15’te ayrıntılı biçimde gösterilmiştir. Ayrıca kavşak, E80 Karayolu’nun şehir içi kesimindeki başlangıç noktası olması nedeniyle, koordineli sinyal sisteminde anahtar kavşak olarak belirlenmiştir.



Şekil 14. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat faz planı

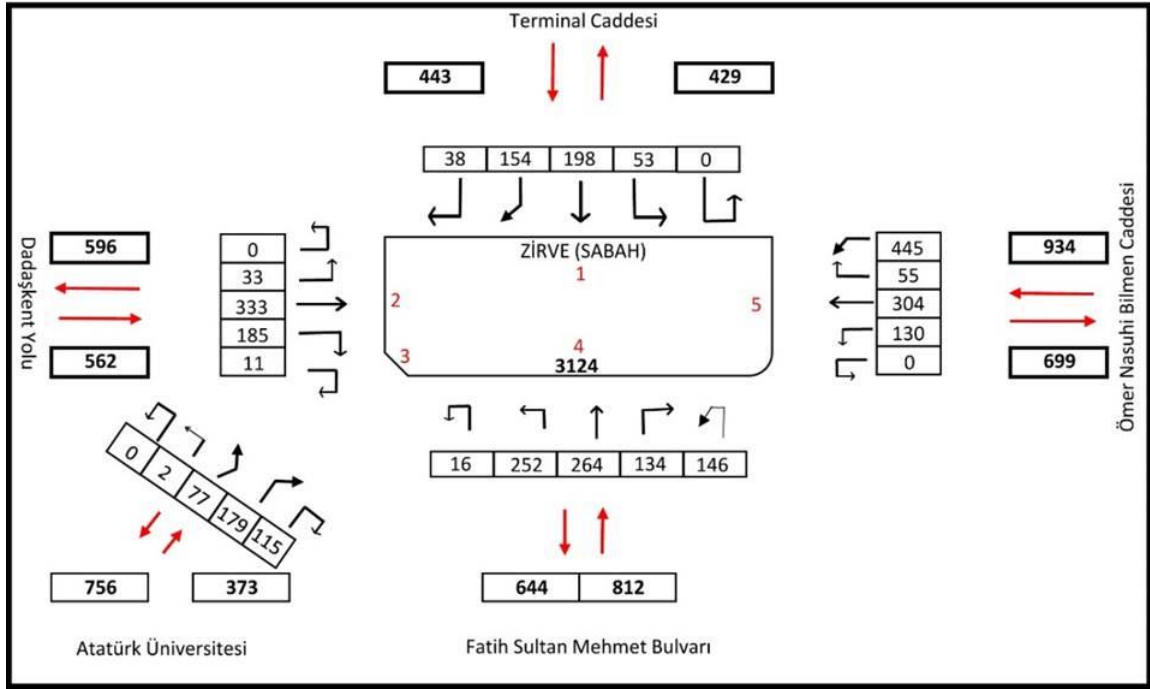


Şekil 15. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat devre diyagramı

Üniversite Kavşağı'na ait yaklaşım kollarının adlandırılması Şekil 11'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen trafik sayımları bu isimlendirmeler referans alınarak düzenlenmiş ve buna bağlı olarak trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Sabah zirve saatine ait taşıt hacimleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Söz konusu kavşakta sabah zirve saatinde yaklaşık 3124 taşıt/saat düzeyinde bir trafik hacmi olduğu tespit edilmiştir. Ana akım trafiğini oluşturan Dadaşkent yönünden 562 taşıt/saat, Terminal Caddesi yönünden 443 taşıt/saat, Ömer Nasuhi Bilmen Caddesi yönünden 934 taşıt/saat, Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönünden 812 taşıt/saat ve Atatürk Üniversitesi yönünden ise 373 taşıt/saat taşıt girişi kaydedilmiştir. Üniversite Kavşağı'nın sabah zirve saatine ait taşıt hacimleri şematik olarak Şekil 16'da sunulmaktadır.

Tablo 2. Üniversite Kavşağı Sabah Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00-09:00)

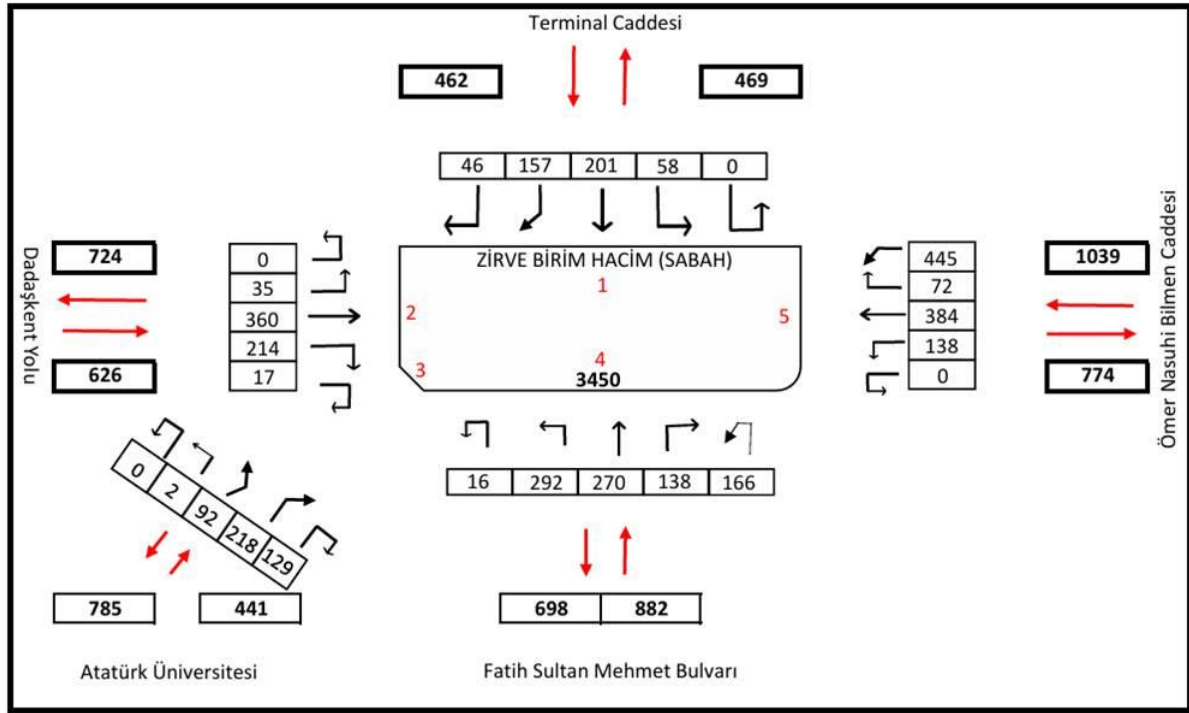
08:00-09:00	Terminal				Ömer N. Bilmen				F.S.M				Üniversite				Dadaşkent				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Terminal	0	0	0	0	48	4	0	1	193	0	1	4	150	1	0	3	30	8	0	0	443
Ömer N. Bilmen	36	15	0	4	0	0	0	0	122	8	0	0	445	0	0	0	220	44	20	20	934
F.S.M	256	4	0	4	130	4	0	0	16	0	0	0	126	20	0	0	221	0	31	0	812
Üniversite	60	12	0	5	139	32	4	4	100	12	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	373
Dadaşkent	30	0	0	3	305	20	4	4	152	5	12	16	4	4	0	3	0	0	0	0	562
TOPLAM	382	31	0	16	622	60	8	9	583	25	13	23	725	25	0	6	473	52	51	20	3124

**Şekil 16.** Üniversite Kavşağı sabah zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi

Kavşaklardaki gecikme süresini etkileyen başlıca etkenlerden biri de ağır taşıtların trafik içindeki oranıdır. Kavşaklara ait trafik hacimleri ve taşıt türü dağılımları belirlendikten sonra, analizlerde kullanılmak üzere bu veriler birim otomobil cinsine dönüştürülmüştür. Söz konusu dönüşüm, Tablo 1’de sunulan birim otomobil eşdeğerlik katsayıları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, Tablo 3’te birim otomobil bazında taşıt sayıları ve dönüş hacimleri şeklinde özetlenmiştir. Üniversite Kavşağı’na ait sabah zirve saat birim otomobil trafik hacimleri ise Şekil 17’de şematik olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Üniversite Kavşağı Sabah Zirve Saat Birim Otomobil Hacimleri (taşıt/saat) (08:00-09:00)

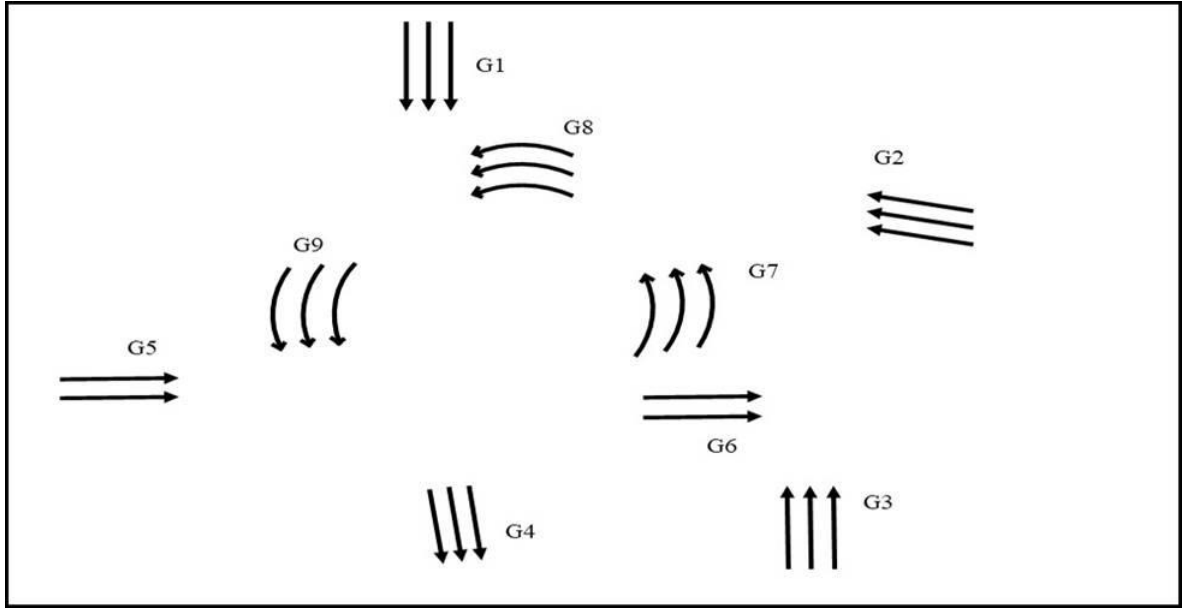
08:00-09:00	Terminal				Ömer N. Bilmen				F.S.M				Üniversite				Dadaşkent				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Terminal	0	0	0	0	48	8	0	2	193	0	2	6	150	2	0	5	30	16	0	0	462
Ömer N. Bilmen	36	30	0	6	0	0	0	0	122	16	0	0	445	0	0	0	220	88	46	30	1039
F.S.M	256	8	0	6	130	8	0	0	16	0	0	0	126	40	0	0	221	0	71	0	882
Üniversite	60	24	0	8	139	64	9	6	100	24	0	5	0	0	0	0	2	0	0	0	441
Dadaşkent	30	0	0	5	305	40	9	6	152	10	28	24	4	8	0	5	0	0	0	0	626
TOPLAM	382	62	0	25	622	120	18	14	583	50	30	35	725	50	0	10	473	104	117	30	3450



Şekil 17. Üniversite Kavşağı sabah zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi

Akşam zirve saat trafik bilgileri

Üniversite Kavşağı, akşam zirve saatinde 90 saniyelik çevrim süresi ile üç fazlı bir sinyalizasyon düzenine göre işletilmektedir. Bu saat dilimine ilişkin sinyal grupları ile faz planları Şekil 18’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Akşam yoğunluk döneminde; Terminal Caddesi yönünden gelen taşıtlara 17 saniye, Dadaşkent yönünden 28 saniye, Ömer Nasuhi Bilmen Caddesi ve Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönlerinden ise 20’şer saniye yeşil süre tahsis edilmiştir. Bu uygulamaya ait sinyal programı Şekil 19’da şematik biçimde gösterilmektedir. Üniversite Kavşağı, E80 Karayolu’nun şehir içi kesiminde önemli bir geçiş noktası konumunda olması nedeniyle, koordineli sinyal kontrol sisteminde zamanlama ve senkronizasyon açısından referans alınan temel kavşaklardan biri olarak belirlenmiştir.



Şekil 18. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat faz planı

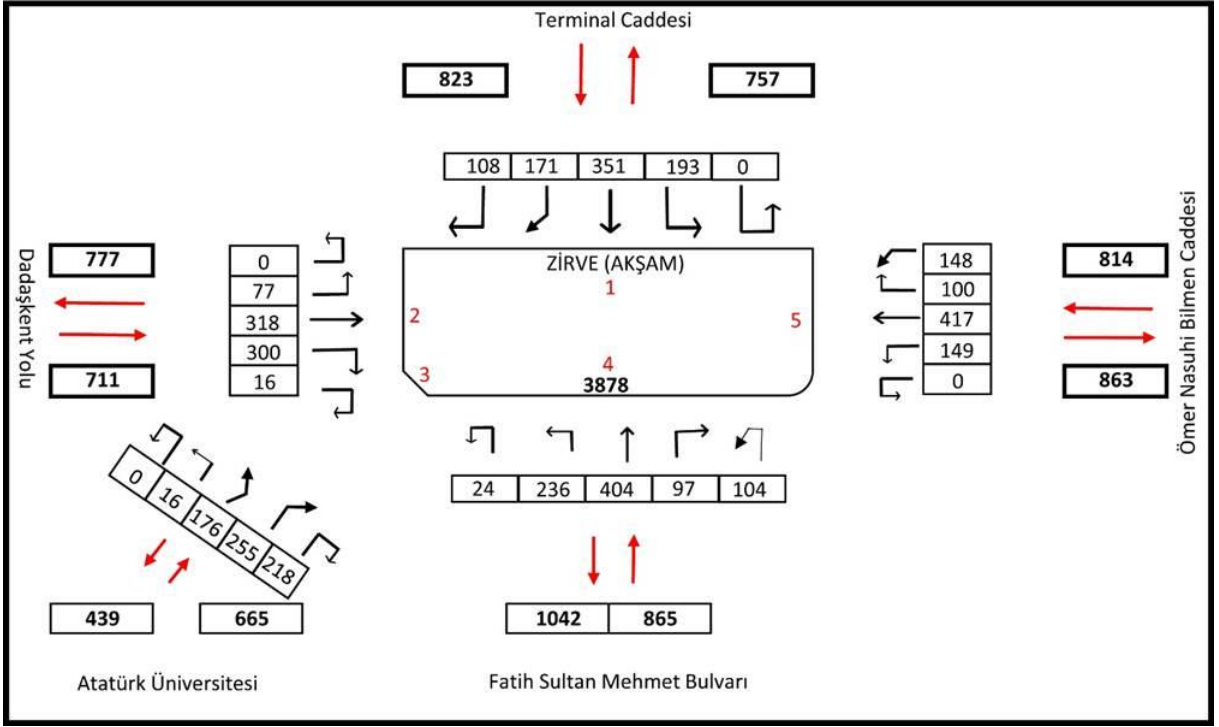


Şekil 19. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat devre diyagramı

Üniversite Kavşağı'na ait yaklaşım kollarının adlandırılması Şekil 11'de sunulmuştur. Yapılan trafik sayımları, bu isimlendirmeler temel alınarak değerlendirilmiş ve buna göre trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Akşam zirve saatine ilişkin taşıt hacmi verileri Tablo 4'te yer almaktadır. Bu saat diliminde kavşakta yaklaşık 3878 taşıt/saat düzeyinde bir trafik yoğunluğu gözlemlenmiştir. Ana akımın yoğun olarak aktığı Dadaşkent yönünden 711 taşıt/saat, Terminal Caddesi yönünden 823 taşıt/saat, Ömer Nasuhi Bilmen Caddesi yönünden 814 taşıt/saat, Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönünden 865 taşıt/saat ve Atatürk Üniversitesi yönünden ise 665 taşıt/saat taşıt girişi kaydedilmiştir. Üniversite Kavşağı'nın akşam zirve saatine ait taşıt hacimleri Şekil 20'de şematik biçimde görselleştirilmiştir.

Tablo 4. Üniversite Kavşağı Akşam Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00-18:00)

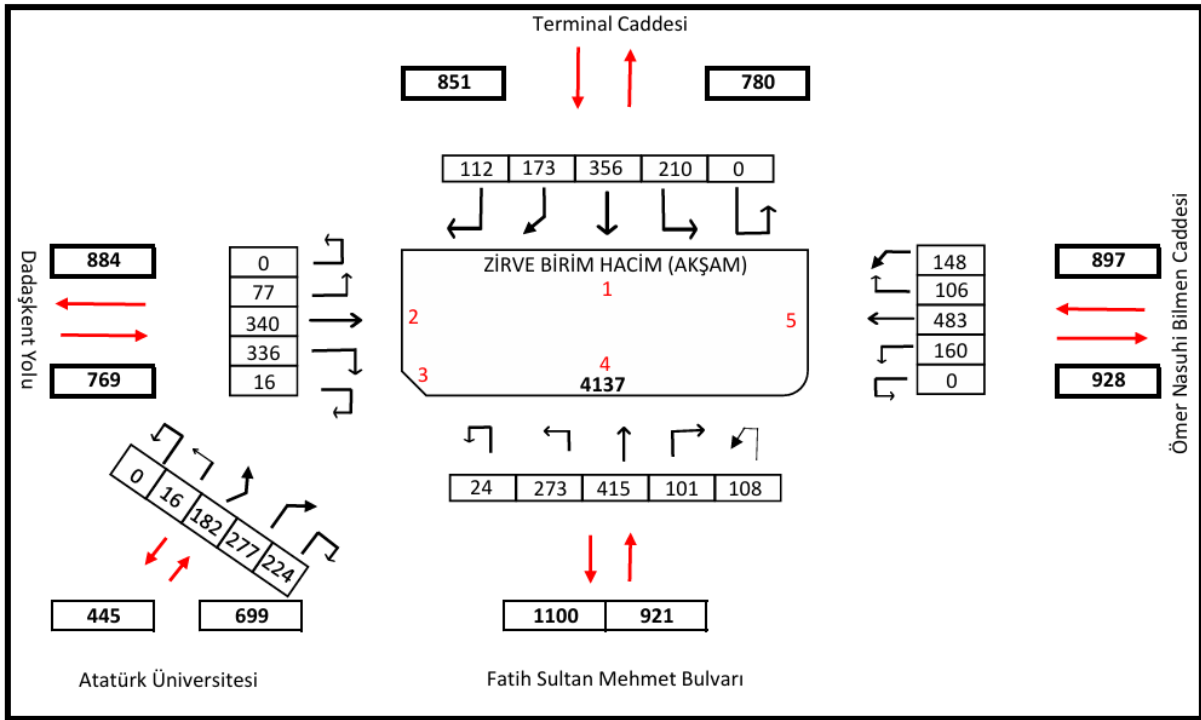
17:00-18:00	Terminal				Ömer N. Bilmen				F.S.M				Üniversite				Dadaşkent				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Terminal	0	0	0	0	176	16	0	1	344	1	1	5	168	1	0	2	104	4	0	0	823
Ömer N. Bilmen	92	4	0	4	0	0	0	0	137	4	4	4	148	0	0	0	341	44	8	24	814
F.S.M	391	8	1	4	92	3	0	2	24	0	0	0	100	4	0	0	204	4	24	4	865
Üniversite	168	4	0	4	228	12	3	12	210	4	0	4	0	0	0	0	16	0	0	0	665
Dadaşkent	77	0	0	0	292	12	4	10	264	16	12	8	16	0	0	0	0	0	0	0	711
TOPLAM	728	16	1	12	788	43	7	25	979	25	17	21	432	5	0	2	665	52	32	28	3878

**Şekil 20.** Üniversite Kavşağı akşam zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi

Kavşak performansını doğrudan etkileyen unsurlardan biri, trafik akışı içerisindeki ağır taşıt oranıdır. Üniversite Kavşağı'na ait trafik hacimleri ve taşıt türü dağılımları belirlendikten sonra, analizlerde karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla tüm veriler birim otomobil cinsine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sürecinde, Tablo 1'de belirtilen birim otomobil eşdeğerlik katsayıları esas alınmıştır. Elde edilen birim otomobil değerlerine göre taşıt sayıları ve dönüş hacimleri Tablo 5'te sunulmaktadır. Üniversite Kavşağı'nın akşam zirve saatine ait birim otomobil bazlı taşıt hacimleri ise Şekil 21'de şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 5. Üniversite Kavşağı Akşam Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00-18:00)

17:00-18:00	Terminal				Ömer N. Bilmen				F.S.M				Üniversite				Dadaşkent				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Terminal	0	0	0	0	176	32	0	2	344	2	2	8	168	2	0	3	104	8	0	0	851
Ömer N. Bilmen	92	8	0	6	0	0	0	0	137	8	9	6	148	0	0	0	341	88	18	36	897
F.S.M	391	16	2	6	92	6	0	3	24	0	0	0	100	8	0	0	204	8	55	6	921
Üniversite	168	8	0	6	228	24	7	18	210	8	0	6	0	0	0	0	16	0	0	0	699
Dadaşkent	77	0	0	0	292	24	9	15	264	32	28	12	16	0	0	0	0	0	0	0	769
TOPLAM	728	32	2	18	788	86	16	38	979	50	39	32	432	10	0	3	665	104	73	42	4137



Şekil 21. Üniversite Kavşağı akşam zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi

Çat Yolu Kavşağı

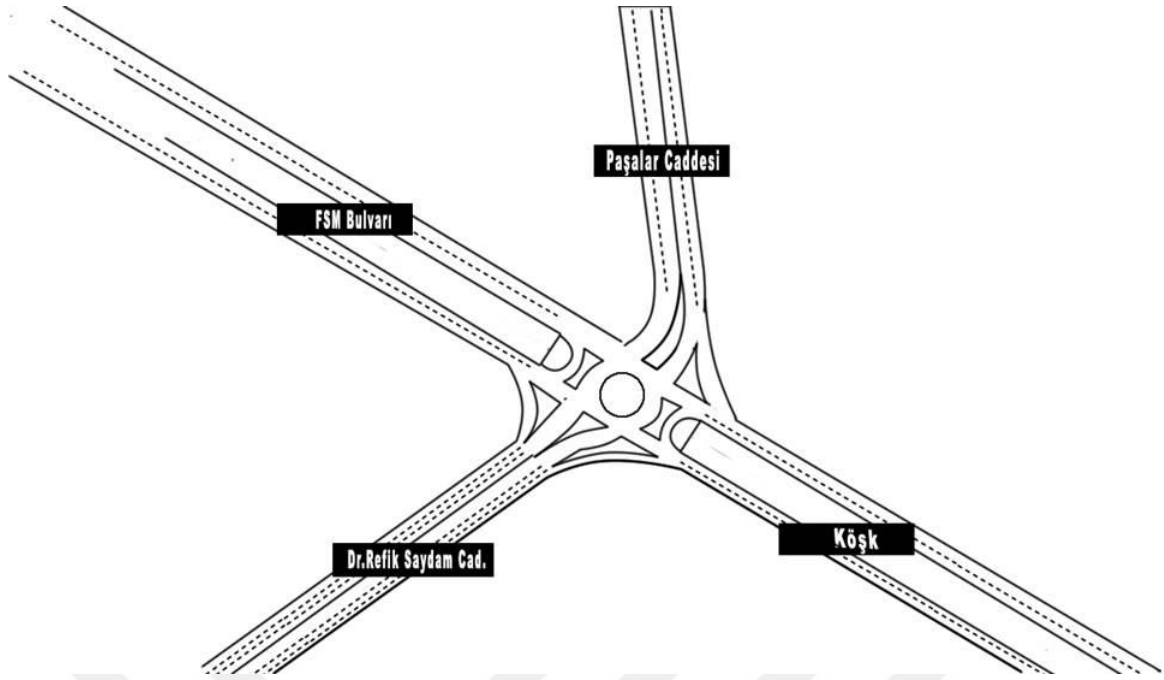
Çat Yolu Kavşağı, Fatih Sultan Mehmet Bulvarı, Paşalar Caddesi, Dr. Refik Saydam Bulvarı ve Köşk Yolu'nun kesişim noktasında yer almaktadır. Mevcut durumda dört yaklaşım koluna sahip olan kavşakta, E80 Karayolu'nun kuzey-güney aksı ana trafik akışını oluşturmaktadır. Kavşak; Cumhuriyet Caddesi, Havuzbaşı, MNG Alışveriş Merkezi ve Atatürk Üniversitesi gibi önemli çekim ve üretim merkezlerinin bağlantı noktası üzerinde bulunmaktadır. Çat Yolu Kavşağı'nın konumsal yerleşimi ve insansız hava aracı (İHA) görüntüleri sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23'te, kavşağın taslak planı ise Şekil 24'te sunulmuştur.



Şekil 22. Çat Yolu Kavşağı konumu



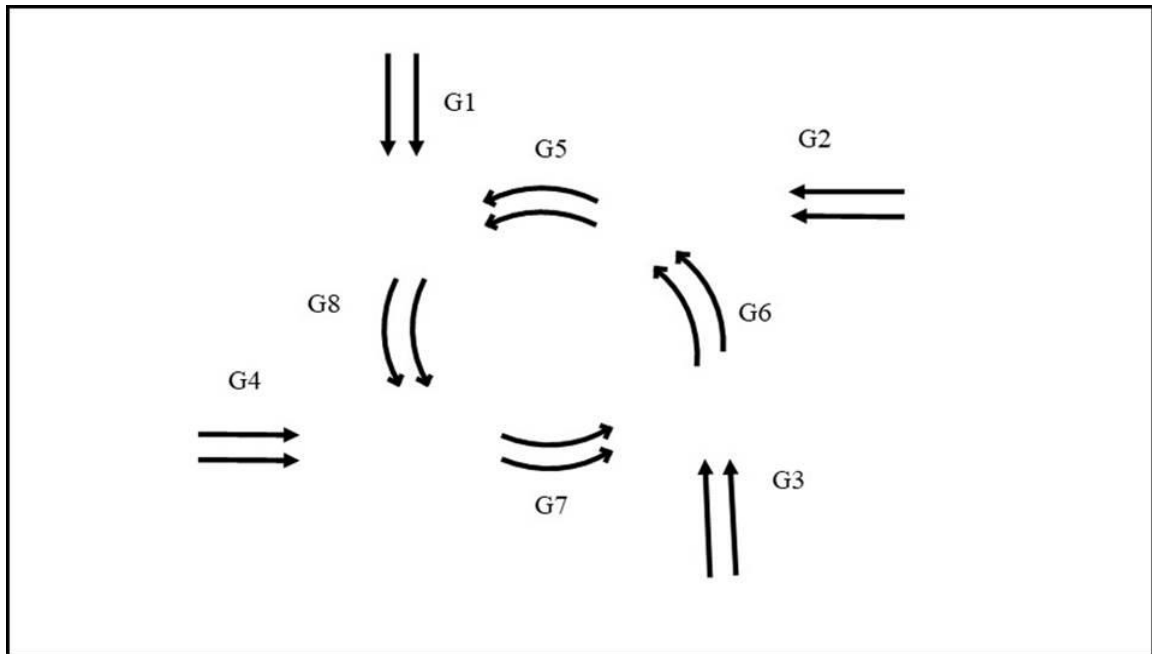
Şekil 23. Çat Yolu Kavşağı İHA görüntüsü



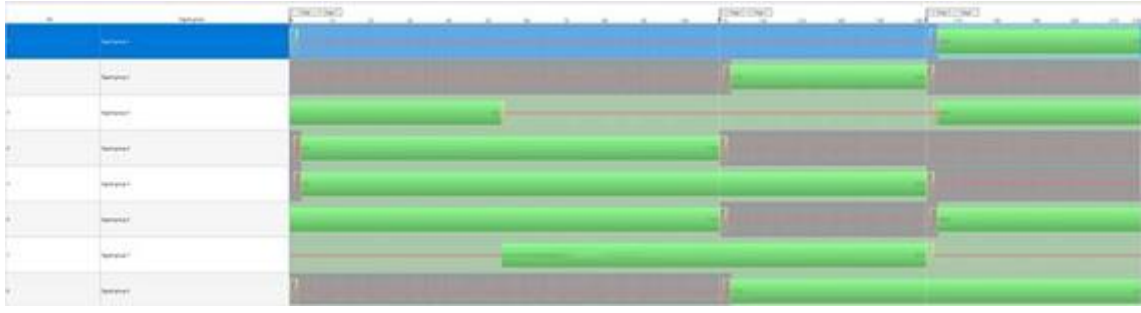
Şekil 24. Çat Yolu Kavşağı taslak plan

Sabah zirve saat trafik bilgileri

Çat Yolu Kavşağı, sabah zirve saatinde 120 saniyelik çevrim süresiyle üç fazlı bir sinyal kontrol planına göre işletilmektedir. Kavşağa ait sinyal grupları ile bu zaman diliminde uygulanan faz planları Şekil 25'te sunulmaktadır. Sabah zirve saatinde; Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönünden 12 saniye, Paşalar Caddesi yönünden 20 saniye, Köşk Yolu yönünden 17 saniye ve Dr. Refik Saydam Bulvarı yönünden ise 31 saniye yeşil süre tahsis edilmiştir. Kavşağın bu saat dilimine ait sinyalizasyon programı ayrıntılı olarak Şekil 26'da gösterilmektedir.



Şekil 25. Çat Yolu Kavşağı sabah zirve saat faz planı

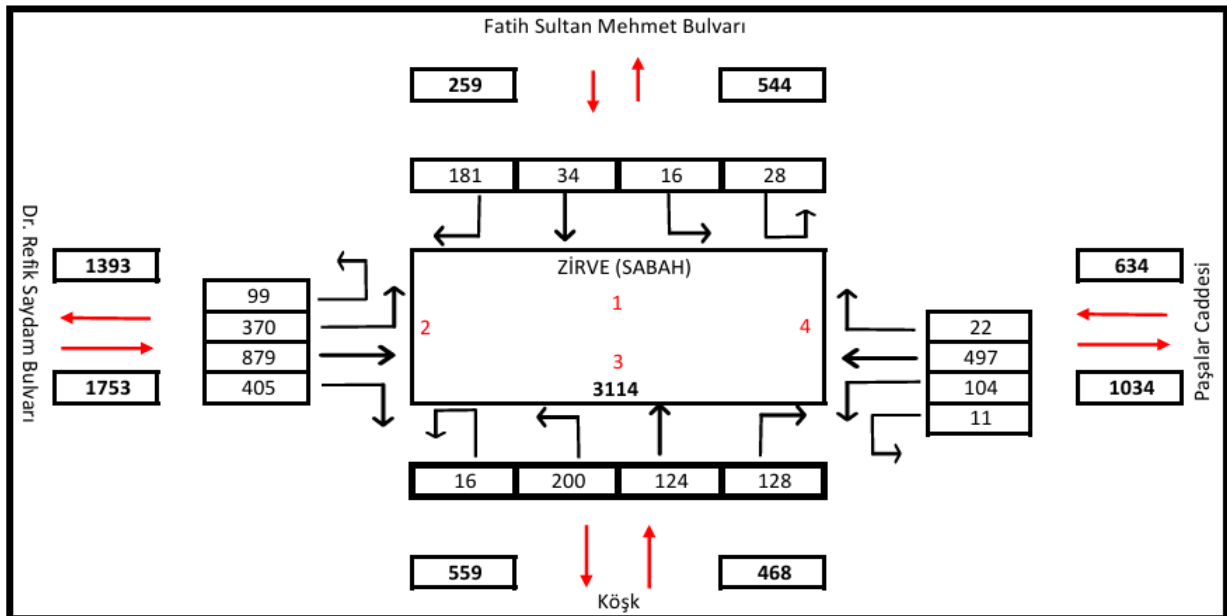


Şekil 26. Çat Yolu kavşağı sabah zirve saat devre diyagramı

Çat Yolu Kavşağı'na ait yaklaşım kollarının adlandırılması Şekil 22'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen trafik sayımları, bu isimlendirmeler dikkate alınarak değerlendirilmiş ve buna göre trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Sabah zirve saatine ilişkin taşıt hacmi değerleri Tablo 6'da sunulmaktadır. Bu saat aralığında kavşakta yaklaşık 3114 taşıt/saat düzeyinde bir trafik yoğunluğu olduğu belirlenmiştir. Ana akım trafiğin aktığı kollardan Köşk yönünden 468 taşıt/saat, Dr. Refik Saydam Bulvarı yönünden 1753 taşıt/saat, Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönünden 259 taşıt/saat ve Paşalar Caddesi yönünden ise 634 taşıt/saat trafik girişi tespit edilmiştir. Kavşağın sabah zirve saatine ait taşıt hacimlerinin şematik gösterimi Şekil 27'de sunulmuştur.

Tablo 6. Çat Yolu Kavşağı Sabah Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00-09:00)

08:00-09:00	Paşalar Caddesi				Köşk				Dr. Refik Saydam				F.S.M				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Paşalar Cad.	10	0	0	1	71	20	0	13	462	10	12	13	20	0	0	2	634
Köşk	103	5	6	14	16	0	0	0	189	3	4	4	88	10	2	24	468
Dr. Refik Saydam	830	15	16	18	364	5	21	15	96	0	3	0	362	4	1	3	1753
F.S.M	12	0	4	0	18	6	0	10	165	4	9	3	28	0	0	0	259
TOPLAM	955	20	26	33	469	31	21	38	912	17	28	20	498	14	3	29	3114

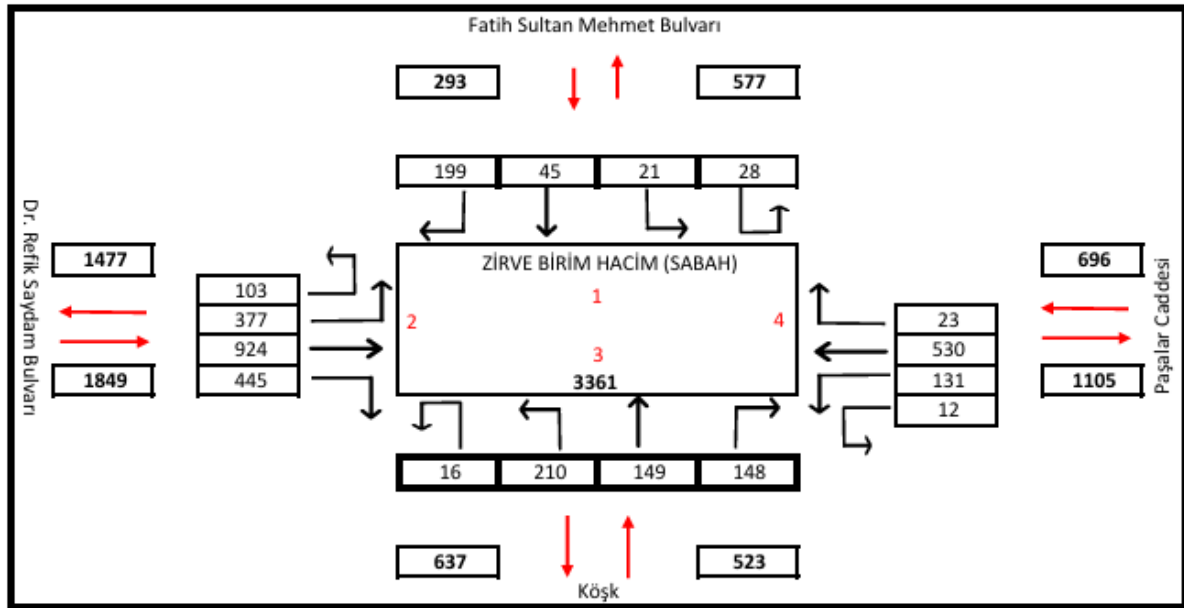


Şekil 27. Çat Yolu Kavşağı sabah zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi

Kavşaklardaki ortalama gecikme sürelerini etkileyen temel etkenlerden biri, trafik akışı içerisindeki ağır taşıt oranıdır. Bu nedenle, analizlerde sağlıklı karşılaştırmalar yapılabilmesi amacıyla tüm taşıt hacimleri, Tablo 1’de verilen birim otomobil eşdeğerlik katsayıları kullanılarak standart birimlere dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sonucunda elde edilen birim otomobil cinsinden taşıt sayıları ve ilgili dönüş hacimleri Tablo 7’de sunulmaktadır. Çat Yolu Kavşağı’na ait sabah zirve saat birim otomobil trafik hacimleri ise Şekil 28’de şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 7. Çat Yolu Kavşağı Sabah Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00 09:00)

08:00-09:00	Paşalar Caddesi				Köşk				Dr. Refik Saydam				F.S.M				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Paşalar Cad.	10	0	0	2	71	40	0	20	462	20	28	20	20	0	0	3	696
Köşk	103	10	14	21	16	0	0	0	189	6	9	6	88	20	5	36	523
Dr. Refik Saydam	830	30	37	27	364	10	48	23	96	0	7	0	362	8	2	5	1849
F.S.M	12	0	9	0	18	12	0	15	165	8	21	5	28	0	0	0	293
TOPLAM	955	40	60	50	469	62	48	58	912	34	65	31	498	28	7	44	3361

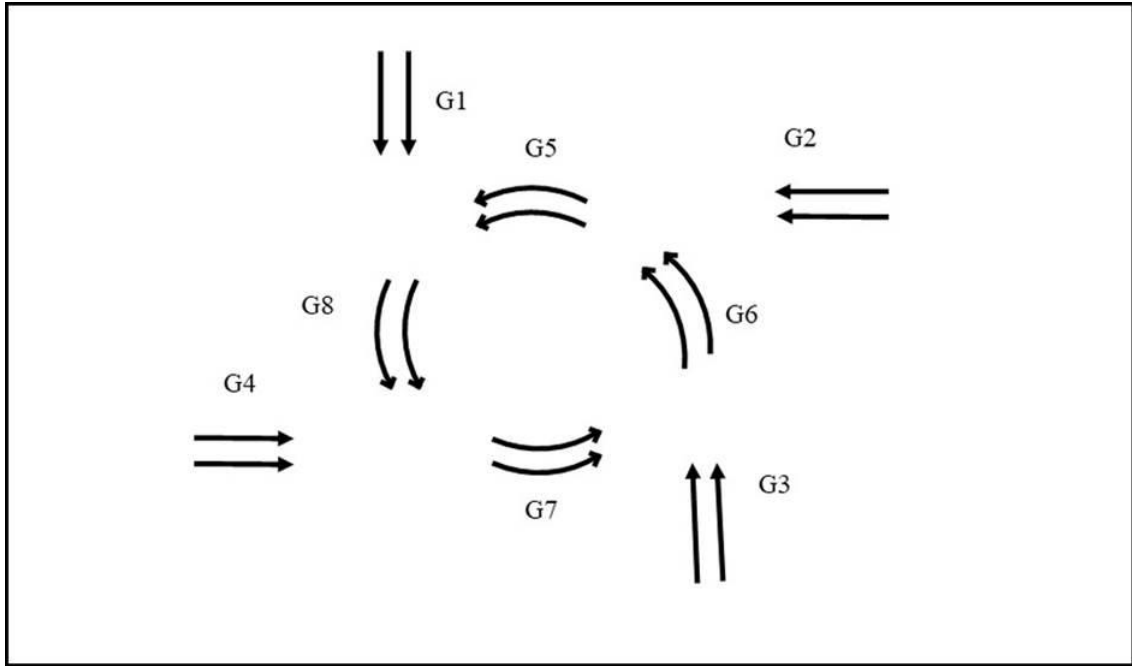


Şekil 28. Çat Yolu Kavşağı sabah zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi

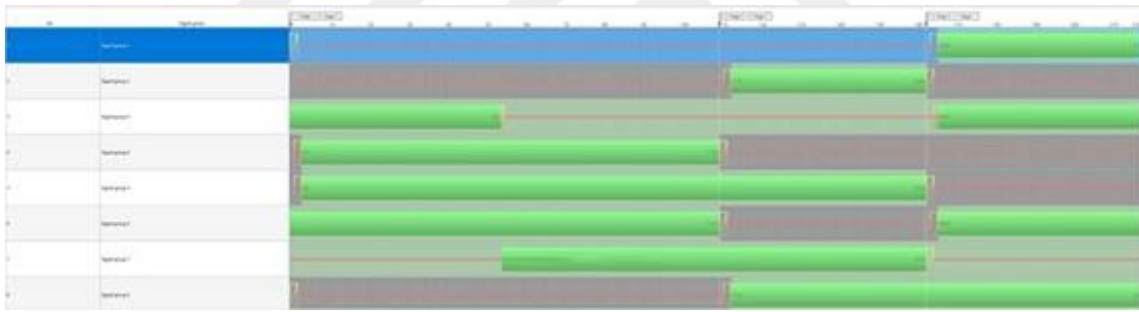
Akşam zirve saat trafik bilgileri

Çat Yolu Kavşağı, akşam zirve saatinde 120 saniyelik çevrim süresi ile üç fazlı bir sinyalizasyon planı çerçevesinde işletilmektedir. Kavşağa ait sinyal grupları ve bu zaman dilimine yönelik faz planları Şekil 29’da sunulmuştur. Uygulanan sinyal düzenine göre; Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönünden 12 saniye, Paşalar Caddesi yönünden 20 saniye, Köşk yönünden 17 saniye ve Dr. Refik Saydam Bulvarı yönünden ise 31 saniye yeşil süre tahsis

edilmiştir. Akşam zirve saatine ait sinyal zamanlaması Şekil 30'da şematik olarak gösterilmektedir.

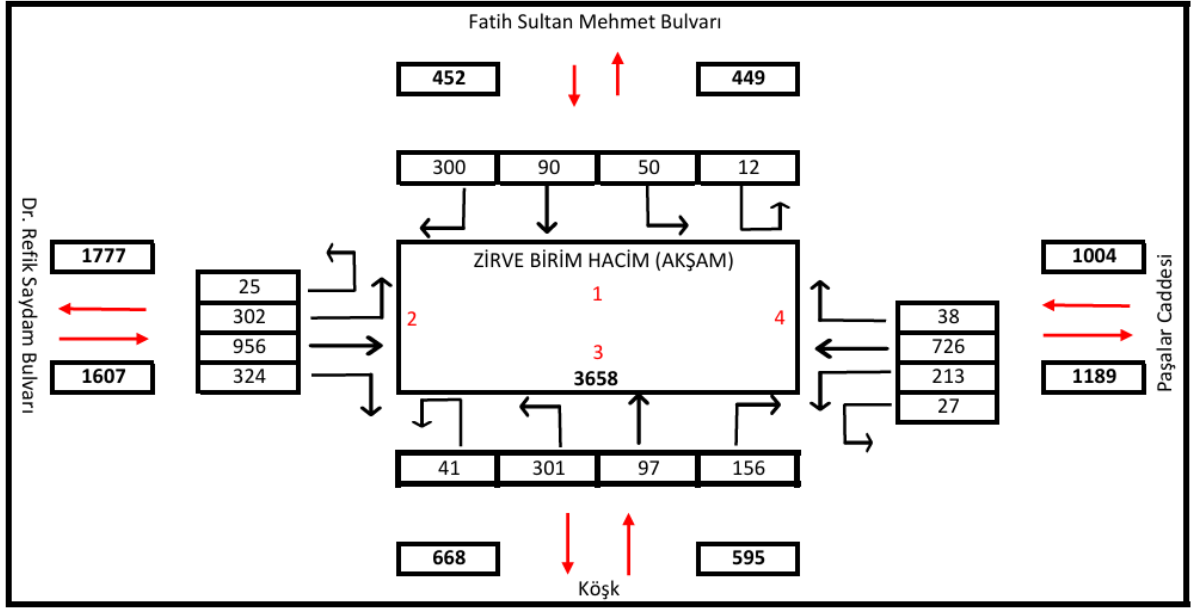


Şekil 29. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat faz planı



Şekil 30. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat devre diyagramı

Çat Yolu Kavşağı'na ait yaklaşım kollarının adlandırılması Şekil 22'de sunulmuştur. Trafik sayımları, bu adlandırmalar esas alınarak gerçekleştirilmiş ve buna göre trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Akşam zirve saatine ilişkin taşıt hacimleri Tablo 8'de gösterilmektedir. Bu zaman diliminde kavşakta toplam yaklaşık 3434 taşıt/saat düzeyinde bir trafik yoğunluğu meydana gelmiştir. Ana trafik akımının sağlandığı yönlerden Köşk istikametinden 556 taşıt/saat, Dr. Refik Saydam Bulvarı'ndan 1512 taşıt/saat, Fatih Sultan Mehmet Bulvarı'ndan 422 taşıt/saat ve Paşalar Caddesi'nden ise 944 taşıt/saat trafik girişi tespit edilmiştir. Söz konusu verilere ait şematik gösterim Şekil 31'de sunulmuştur.



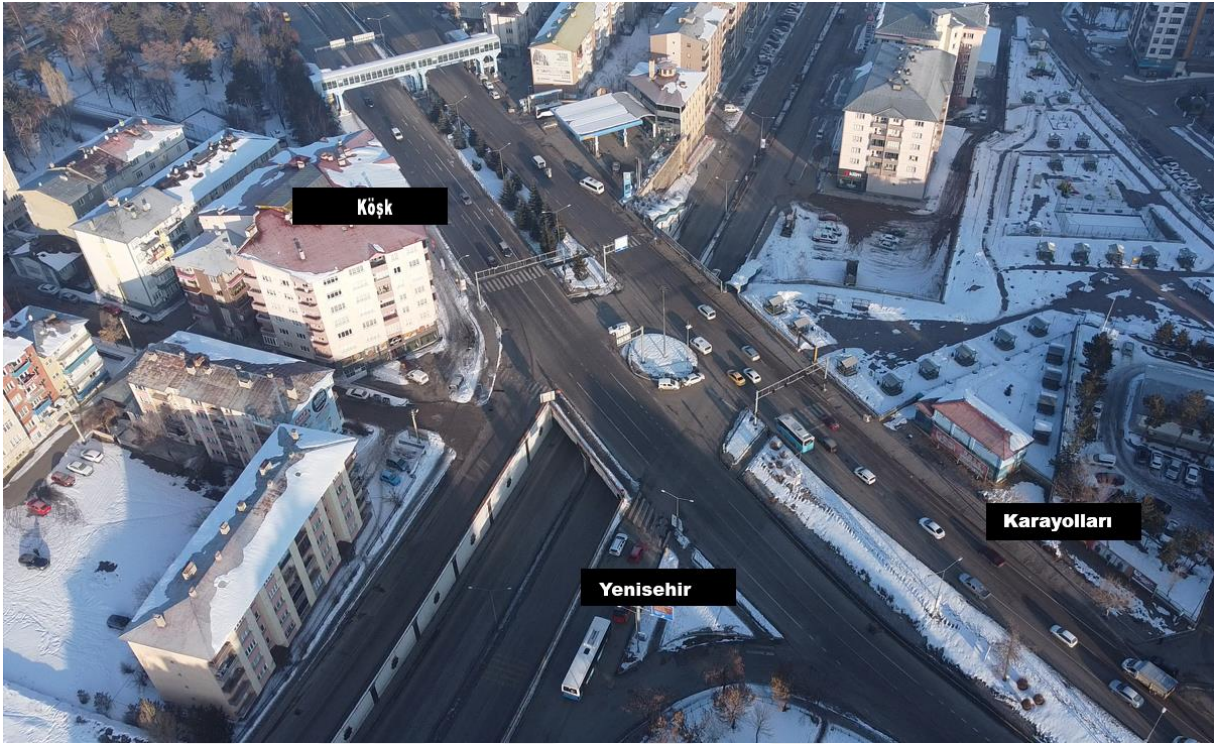
Şekil 32. Çat Yolu Kavşağı akşam zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi

Yenişehir Kavşağı

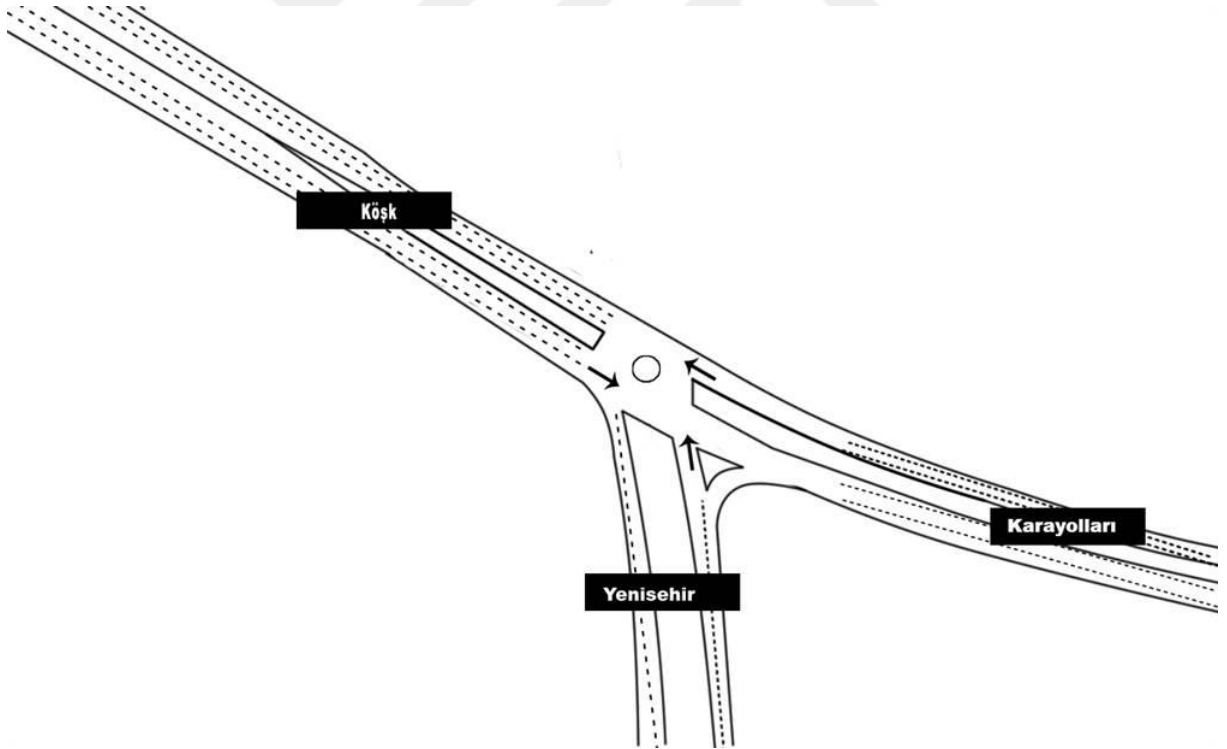
Yenişehir Kavşağı; Köşk Yolu, Karayolları Yolu ve Yenişehir istikametlerinin kesişim noktasında yer almaktadır. Mevcut durumda üç yaklaşım koluna sahip olan kavşakta, E80 Karayolu'nun kuzey-güney aksı, ana trafik hareketini oluşturmaktadır. Kavşak; Forum Alışveriş Merkezi, Buhara Hastanesi ve Ejder 3200 Kayak Merkezi gibi yüksek çekim ve üretim potansiyeline sahip alanların ulaşım güzergâhı üzerinde yer almaktadır. Yenişehir Kavşağı'nın konumu ve insansız hava aracı (İHA) görüntüsü sırasıyla Şekil 33 ve Şekil 34'te, kavşağın taslak planı ise Şekil 35'te sunulmaktadır.



Şekil 33. Yenişehir Kavşağı konumu



Şekil 34. Yenişehir Kavşağı İHA görüntüsü

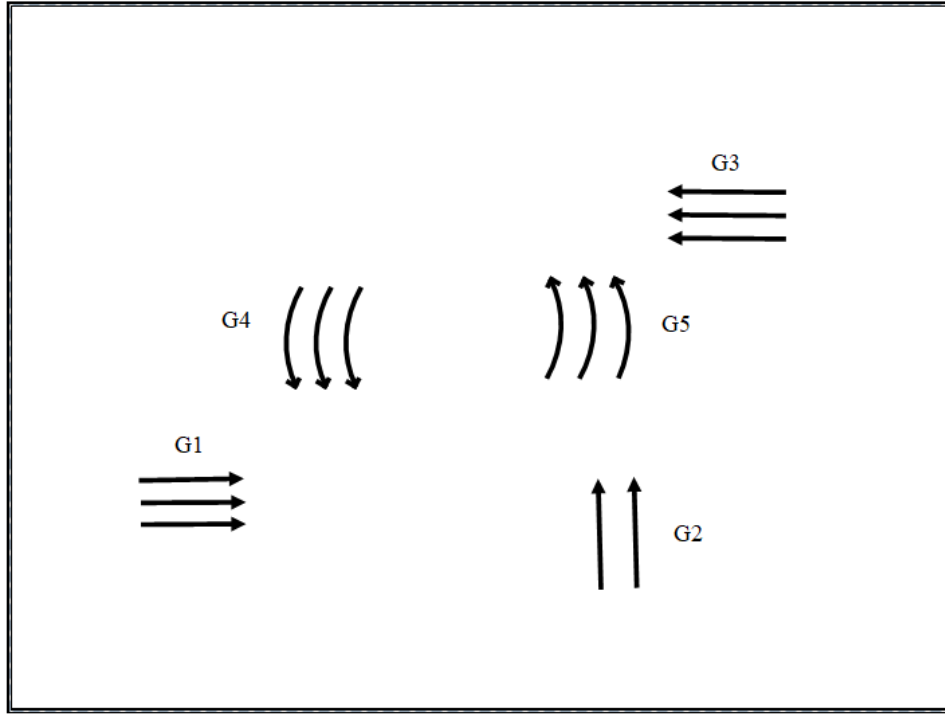


Şekil 35. Yenişehir Kavşağı taslak planı

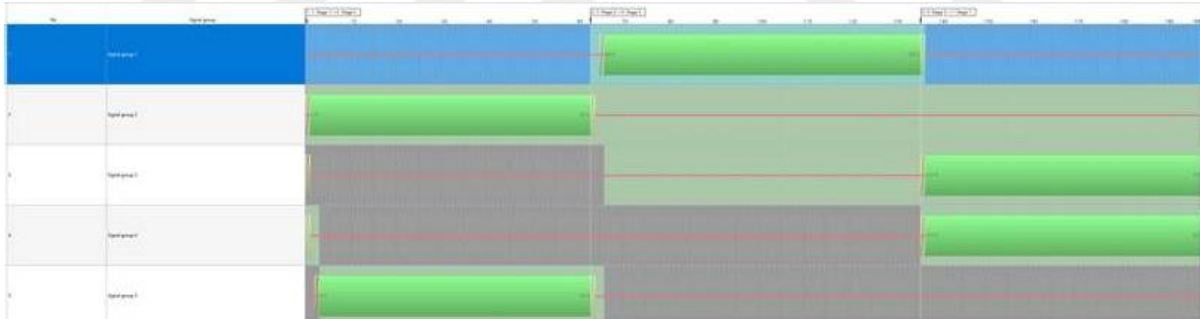
Sabah zirve saat trafik bilgileri

Yenişehir Kavşağı, sabah zirve saatinde 90 saniyelik çevrim süresi ile üç fazlı bir sinyal kontrol planına göre işletilmektedir. Kavşağa ait sinyal grupları ve bu saat diliminde uygulanan faz planları Şekil 36’te sunulmaktadır. Sinyal planlaması kapsamında; Köşk yönünden gelen

taşıtlara sırasıyla 25 saniye, Karayolları yönünden 25 saniye ve Yenişehir yönünden ise 15 saniye yeşil süre tahsis edilmiştir. Bu saat dilimine ait sinyal zamanlama yapısı Şekil 37’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 36. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat faz planı

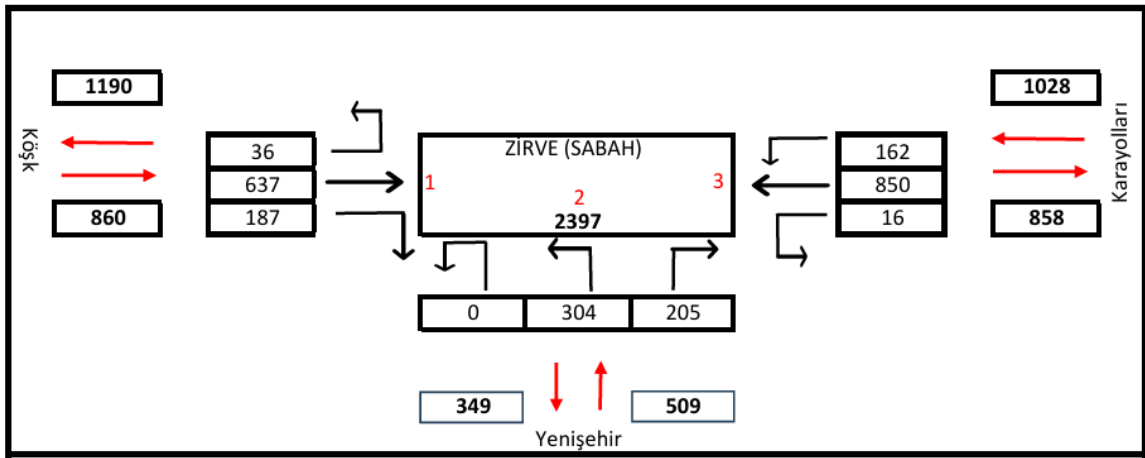


Şekil 37. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat devre diyagramı

Yenişehir Kavşağının yaklaşım kolu isimleri Şekil 33’de verilmiştir. Trafik sayımlarında bu isimlendirmeler baz alınarak trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Tablo 10’da Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat taşıt hacimleri verilmiştir. Yenişehir Kavşağında sabah zirve saatte 2397 taşıt/saat mertebesinde trafik oluşmaktadır. Kavşağın ana akım yaklaşım kollarından biri olan Karayolları yönünde sabah zirve saatte 1028 taşıt/saat, Köşk yönünde 860 taşıt/saat ve Yenişehir yönünde ise 509 taşıt/saat’lık trafik gelmektedir. Şekil 38’de Yenişehir Kavşağının sabah zirve saat trafik hacimleri şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 10. Yenişehir Kavşağı Sabah Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00 09:00)

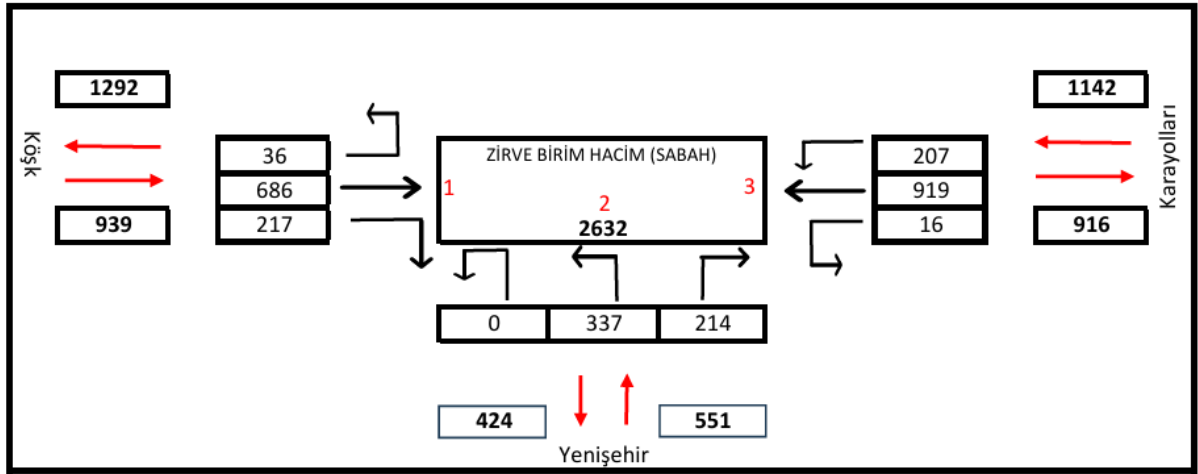
08:00-09:00	Yenişehir				Köşk				Karayolları				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Yenişehir	0	0	0	0	260	17	2	25	192	4	1	8	509
Köşk	148	15	3	21	36	0	0	0	587	12	22	16	860
Karayolları	113	15	16	18	775	20	27	28	16	0	0	0	1028
TOPLAM	261	30	19	39	1071	37	29	53	795	16	23	24	2397

**Şekil 38.** Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat trafik hacimleri

Kavşaklardaki taşıt gecikmelerini etkileyen başlıca faktörlerden biri, ağır taşıtların trafik içerisindeki oranıdır. Bu bağlamda, analizlerin standartlaştırılabilmesi amacıyla taşıt türleri, Tablo 1’de belirtilen birim otomobil eşdeğerlik katsayılarına göre dönüştürülmüştür. Dönüşüm sonucunda elde edilen birim otomobil cinsinden taşıt sayıları ve ilgili dönüş hacimleri Tablo 11’de sunulmuştur. Yenişehir Kavşağı’nın sabah zirve saatine ait birim otomobil bazlı trafik hacimlerinin şematik gösterimi ise Şekil 39’da yer almaktadır.

Tablo 11. Yenişehir Kavşağı Sabah Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (08:00 09:00)

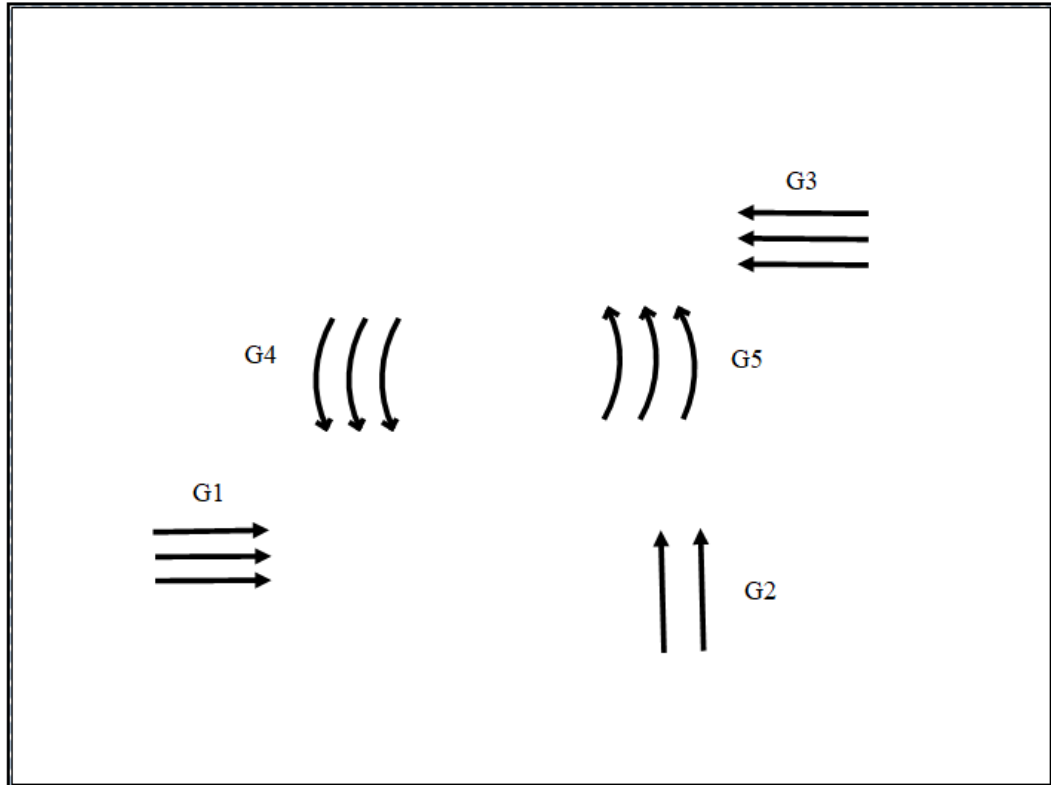
08:00-09:00	Yenişehir				Köşk				Karayolları				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Yenişehir	0	0	0	0	260	34	5	38	192	8	2	12	551
Köşk	148	30	7	32	36	0	0	0	587	24	51	24	939
Karayolları	113	30	37	27	775	40	62	42	16	0	0	0	1142
TOPLAM	261	60	44	59	1071	74	67	80	795	32	53	36	2632



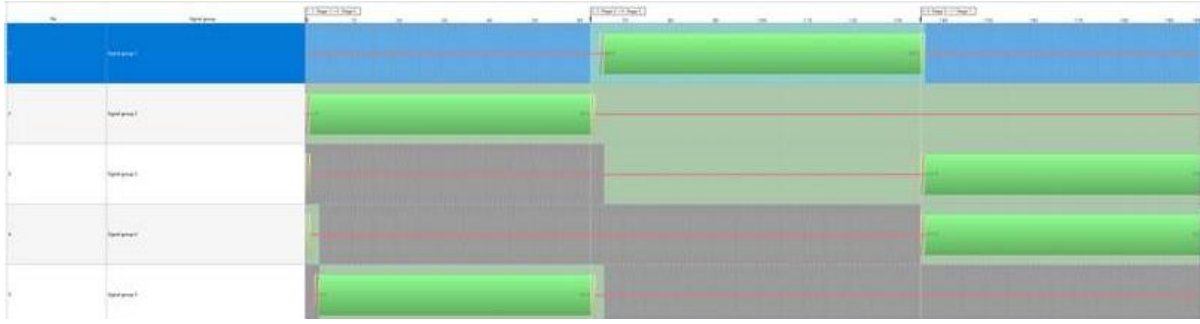
Şekil 39. Yenişehir Kavşağı sabah zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi

Akşam zirve saat trafik bilgileri

Yenişehir Kavşağı, akşam zirve saatinde 90 saniyelik çevrim süresi ile üç fazdan oluşan bir sinyalizasyon programına göre işletilmektedir. Bu saat diliminde uygulanan faz planları ve sinyal gruplarına ilişkin bilgiler Şekil 40’da verilmektedir. Plan kapsamında; Köşk yönünden gelen taşıtlara 25 saniye, Karayolları yönünden 25 saniye ve Yenişehir yönünden ise 15 saniye yeşil süre tahsis edilmiştir. İlgili zaman dilimine ait sinyal faz dağılımı ve zamanlama yapısı, Şekil 41’de ayrıntılı biçimde sunulmuştur.



Şekil 40. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat faz planı

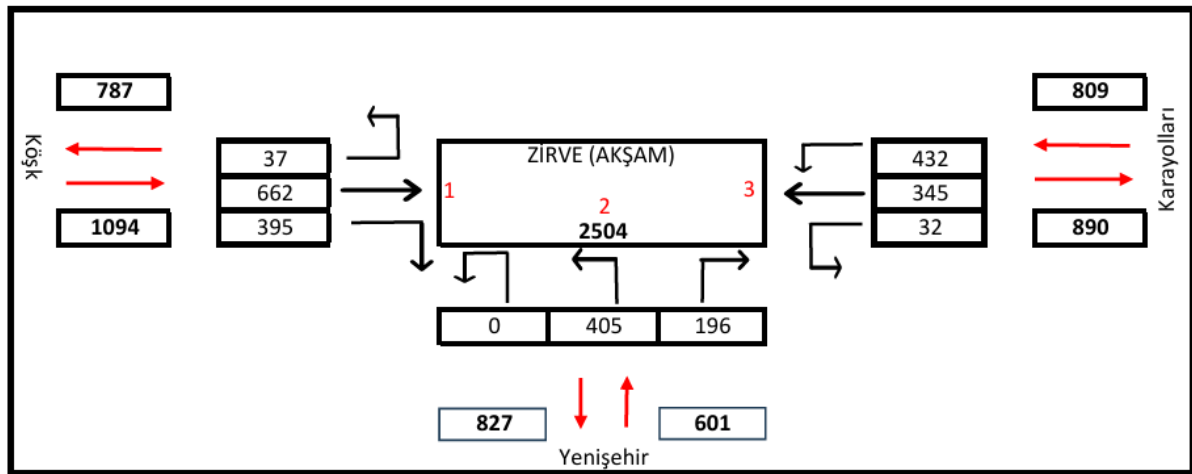


Şekil 41. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat devre diyagramı

Yenişehir Kavşağı'na ait yaklaşım kollarının adlandırılması Şekil 33'te sunulmuştur. Gerçekleştirilen trafik sayımları, bu isimlendirmeler esas alınarak değerlendirilmiş ve bu doğrultuda trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Akşam zirve saatine ilişkin taşıt hacimleri Tablo 12'de verilmiştir. Bu saat diliminde kavşakta yaklaşık 2504 taşıt/saat düzeyinde bir trafik yoğunluğu olduğu tespit edilmiştir. Ana akım trafiğin sağlandığı yönlerden Karayolları yaklaşım kolundan 809 taşıt/saat, Köşk yönünden 1094 taşıt/saat ve Yenişehir yönünden ise 601 taşıt/saat giriş yaptığı belirlenmiştir. Söz konusu verilerin şematik gösterimi Şekil 42'de sunulmaktadır.

Tablo 12. Yenişehir Kavşağı Akşam Zirve Saat Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00 18:00)

17:00-18:00	Yenişehir				Köşk				Karayolları				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Yenişehir	0	0	0	0	365	20	0	20	184	8	1	3	601
Köşk	352	12	3	28	36	0	0	1	628	12	20	2	1094
Karayolları	396	20	8	8	328	2	12	3	32	0	0	0	809
TOPLAM	748	32	11	36	729	22	12	24	844	20	21	5	2504

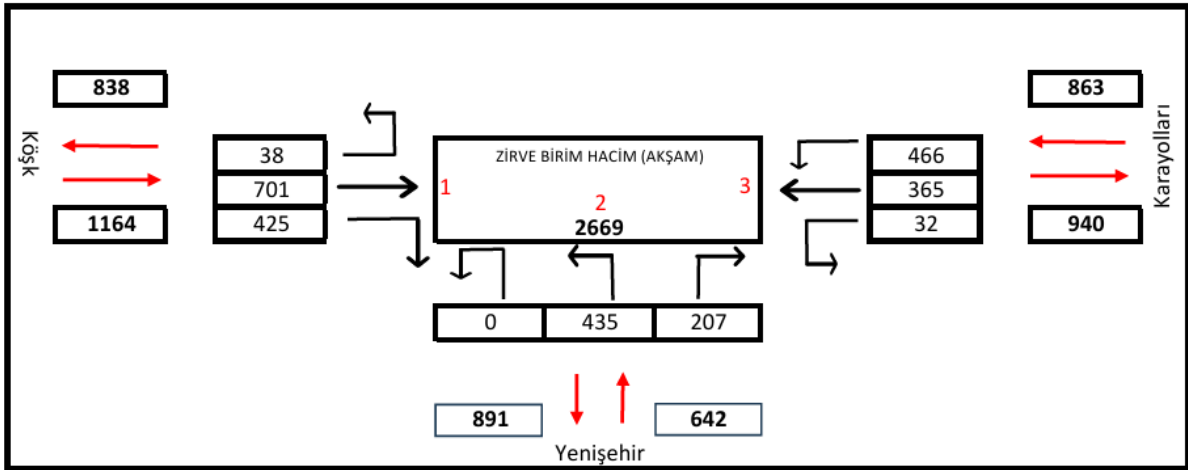


Şekil 42. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat trafik hacimleri şema gösterimi

Kavşaklardaki gecikme süresini etkileyen temel faktörlerden biri, trafik akışı içerisinde yer alan ağır taşıt oranıdır. Bu nedenle, trafik analizlerinde karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla taşıt hacimleri, Tablo 1’de belirtilen birim otomobil eşdeğerlik katsayıları esas alınarak dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sonucunda elde edilen birim otomobil cinsinden taşıt sayıları ve ilgili dönüş hacimleri Tablo 13’de sunulmuştur. Yenişehir Kavşağı’nın akşam zirve saatine ait birim otomobil bazlı trafik hacimlerinin şematik gösterimi ise Şekil 43’de yer almaktadır.

Tablo 13. Yenişehir Kavşağı Akşam Zirve Saat Birim Otomobil Taşıt Hacimleri (taşıt/saat) (17:00 18:00)

17:00-18:00	Yenişehir				Köşk				Karayolları				TOPLAM
	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	Otomobil	Otobüs	Kamyon	Minibüs	
Yenişehir	0	0	0	0	365	40	0	30	184	16	2	5	642
Köşk	352	24	7	42	36	0	0	2	628	24	46	3	1164
Karayolları	396	40	18	12	328	4	28	5	32	0	0	0	863
TOPLAM	748	64	25	54	729	44	28	37	844	40	48	8	2669



Şekil 43. Yenişehir Kavşağı akşam zirve saat birim otomobil hacimleri şema gösterimi

Doygun Akım Hesabı

Doygun akım hesaplamalarında, Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşaklarına ait geometrik özellikler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, kavşaklara ilişkin havadan görüntüleme çalışmaları insansız hava aracı (İHA) kullanılarak gerçekleştirilmiş; video ve fotoğraf kayıtları elde edilmiştir. Elde edilen görsel veriler daha sonra ofis ortamında detaylı biçimde analiz edilmiş ve doymuş akım hesaplamaları Microsoft Excel yazılımı aracılığıyla, Denklem (6) ve

Denklem (7) temel alınarak yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan eğim değeri, Şekil 44'te gösterildiği üzere, üç kavşağın ortalama eğimi dikkate alınarak %5 olarak belirlenmiştir.

Yürütülen analizler doğrultusunda, trafik etütleri bölümünde açıklanan geometrik özellikler temel alınarak aşağıdaki tablolar oluşturulmuştur: Tablo 14'te Üniversite Kavşağı'nın Terminal Caddesi yönüne ait doygun akım değerleri, Tablo 15'te Üniversite Kavşağı'nın Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönüne ait değerler, Tablo 16'da Çat Yolu Kavşağı'nın Fatih Sultan Mehmet Bulvarı yönüne ait değerler, Tablo 17'de Çat Yolu Kavşağı'nın Köşk yönüne ait değerler, Tablo 18'de Yenişehir Kavşağı'nın Köşk yönü ve Tablo 19'da ise Karayolları yönüne ait doygun akım değerleri sunulmuştur. Tüm yönlerle ilişkin doygun akım hesaplamaları tamamlanmıştır.



Şekil 44. Kavşaklar arası eğim bilgisi

Tablo 14. Üniversite Kavşağı Terminal Cad. Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)

Parametre	Sol Şerit	Orta Şerit	Sağ Şerit
dn	1	0	1
dg	1	1	1
G	5	5	5
w	3,5	3,5	3,5
f	%22.4	%43.9	100%
r	30	20	15
S ₀	1895	1895	1895
S ₁	1735,56	1834,6	1595,45

Tablo 15. Üniversite Kavşağı Fatih Sultan Mehmet Bul. Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)

Parametre	Sol Şerit	Orta Şerit	Sağ Şerit
dn	1	0	1
dg	0	0	0
G	5	5	5
w	3,5	3,5	3,5
f	%76.0	%67.8	%0.0
r	30	30	-
S ₀	2105	2105	2105
S ₁	1893,1	2035,97	1965

Tablo 16. Çat Yolu Kavşağı Fatih Sultan Mehmet Bul. Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)

Parametre	Sol Şerit	Sağ Şerit
dn	1	1
dg	1	1
G	5	5
w	3,5	3,5
f	100%	0%
r	30	-
S ₀	1895	1895
S ₁	1671,43	1755

Tablo 17. Çat Yolu Kavşağı Köşk Yolu Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)

Parametre	Sol Şerit	Sağ Şerit
dn	1	1
dg	0	0
G	5	5
w	3,5	3,5
f	100%	0%
r	30	-
S ₀	2105	2105
S ₁	1871,43	1965

Tablo 18. Yenişehir Kavşağı Köşk Yolu Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)

Parametre	Sol Şerit	Sol Orta Şerit	Sağ Orta Şerit	Sağ Şerit
dn	1	0	0	1
dg	1	1	1	1
G	5	5	5	5
w	3,25	3,25	3,25	4
f	13.6%	0.0%	0.0%	100%
r	30	-	-	30
S ₀	1870	1870	1870	1945
S ₁	1718,31	1870	1870	1719,05

Tablo 19. Yenişehir Kavşağı Karayolları yolu Geliş Yönü Doygun Akım Değerleri (otomobil/saat/şerit)

Parametre	Sol Şerit	Orta Şerit	Sağ Şerit
dn	1	0	1
dg	0	0	0
G	5	5	5
w	3,5	3,5	3,5
f	100%	0.0%	0.0%
r	30	-	-
S ₀	2105	2105	2105
S ₁	1871,43	2105	1965

Mevcut Durum Analizi

Bu tez çalışmasında örneklem alanı olarak belirlenen E80 Karayolu üzerindeki Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşaklarının trafik değerleri, geometrik özellikleri ve sinyalizasyon planları, sırasıyla ayrıntılı olarak sunulmuştur. Arazi çalışmaları ve İHA çekimleri ile elde edilen veriler kullanılarak, “PTV VISSIM” trafik simülasyon ve analiz programı kullanılarak mevcut duruma ilişkin bir benzetim modeli oluşturulmuştur. Ulaşım ağı, sabah zirve saatler ve akşam zirve saatler için ayrı ayrı olmak üzere trafik hacmi ve sinyalizasyon planları temel alınarak değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir.

Kalibrasyon

Çalışma alanı kapsamında bulunan kavşakların analizine geçilmeden önce, “PTV VISSIM” programı kullanılarak modellenen ulaşım ağının kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, kurulan modelin doğruluğunu test etmek amacıyla GEH istatistiği kullanılmıştır.

Geoffrey E. (1970) tarafından geliştirilen GEH istatistiği, trafik mühendisliğinde ve trafik tahmin/modelleme çalışmalarında iki trafik hacminin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. GEH istatistiği, “Model” ve “Ölçüm” olmak üzere iki değişkene dayanmaktadır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M-C)^2}{M+C}} \quad (16)$$

Burada,

M: Model ile elde edilen trafik hacmini,

C: Saha çalışmaları sonucu elde edilen trafik hacmini (ölçüm) ifade etmektedir.

Bu çalışmada, "ölçüm" kavramı saha sayımlarıyla belirlenen kesitten geçen gerçek trafik hacmini, "model" kavramı ise PTV VISSIM modelinde linkler üzerinden ölçülen trafik hacmini temsil etmektedir.

GEH değeri genel olarak 0 ila 5 arasında veya 5 ila 10 arasında olmalıdır. Kabul edilebilir bir kalibrasyon için tüm GEH değerlerinin en az %80–85’inin 5’in altında olması beklenmektedir. Çalışmada, her sınıfa göre belirlenen kesitlerin ortalama GEH değerleri Tablo 20’de sunulmuştur.

Tablo 20. Sabah ve Akşam Zirve Saat GEH Değerleri

Kavşaklar	Yönler	Zirve (Sabah)		Zirve (Akşam)		GEH	
		Ölçüm	Model	Ölçüm	Model	Sabah	Akşam
Üniversite Kavşağı	Terminal	443	465	823	837	1	0
	Ömer Nasuhi B.	934	867	814	785	2	1
	FSM	812	900	865	950	3	3
	Atatürk Üniversitesi	373	357	665	636	1	1
	Dadaşkent	562	586	711	740	1	1
Çat Yolu Kavşağı	Paşalar	634	624	944	838	0	3
	Köşk	884	807	956	870	3	3
	Refik Saydam	1753	1600	1512	1405	4	3
	FSM	259	230	422	390	2	2
Yenişehir Kavşağı	Yenişehir	509	450	601	520	3	3
	Köşk	860	950	1094	1054	3	1
	Karayolları	1028	1015	809	700	0	4

Kalibre edilen ulaşım ağında, sabah ve akşam zirve saatler boyunca tüm bağlantılar için GEH istatistik değeri 5’in altında kalarak modelin gözlem verileriyle yüksek uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Üniversite Kavşağı

Üniversite Kavşağı, mevcut koşullar altında üç fazlı bir sinyalizasyon sistemiyle işletilmektedir. Kavşağa ait trafik hacimleri, geometrik özellikler ve sinyalizasyon programına ilişkin veriler ilk kısımda sunulmuştur. Tanımlanan parametrelere dayanarak kavşağın izole şekilde çalıştığı senaryoda elde edilen performans göstergeleri ise Tablo 21’de yer almaktadır. Bu senaryoda, kavşakta sabah zirve saatinde ortalama gecikme süresi 35,13 saniye/taşıt, akşam zirve saatinde ise 36,28 saniye/taşıt olarak hesaplanmıştır. Şekil 45’te, kavşağın izole mevcut durumu esas alınarak oluşturulan simülasyon modeline ait bir görsel sunulmaktadır. Bu bölümde ortalama gecikme ve duruş verileri, kavşak geneli için değil; Delay Evaluation bölümünde belirlenen Üniversite ve Çat Yolu kavşakları için dört, Yenişehir kavşağı için ise üç spesifik güzergah üzerinden hesaplanmıştır. Bu nedenle toplam gecikme süreleri tüm kavşak giriş hacmi ile doğrudan orantılı değildir. Ancak bu yaklaşım, seçilen senaryo ve plato analizi için yeterli temsil gücü sağlar.



Şekil 45. Üniversite Kavşağı mevcut durum simülasyonu

Tablo 21. Üniversite Kavşağı Mevcut Durum Performansı

Mevcut Durum	Sabah	Akşam
Ortalama Araç başı Gecikme (sn/ta)	35,13	36,28
Araç başına Ortalama Duruş Sayısı	0,94	1,01
Ortalama Hız (km/s)	28,93	26,25
Toplam Gecikme (saat)	11,17	13,02

Çat Yolu Kavşağı

Çat Yolu Kavşağı, mevcut durumda üç fazlı sinyal kontrolüyle işletilmektedir. Kavşağa ilişkin trafik hacmi verileri, geometrik özellikler ve sinyal planları ilk kısımda gösterilmektedir. Tanımlanan değişkenler doğrultusunda kavşağın izole şekilde işletildiği senaryoda elde edilen performans sonuçları ise Tablo 22’de sunulmuştur. Bu senaryoya göre, sabah zirve saatinde

ortalama taşıt başına gecikme süresi 49,06 saniye, akşam zirve saatinde ise 60,56 saniye olarak hesaplanmıştır. Şekil 46’da kavşağın izole mevcut durumu temel alınarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmasına ait bir görsel yer almaktadır.



Şekil 46. Çat Yolu Kavşağı mevcut durum simülasyon

Tablo 22. Çat Yolu Kavşağı Mevcut Durum Performansı

Mevcut Durum	Sabah	Akşam
Ortalama Araç başı Gecikme (sn/ta)	49,06	60,56
Araç başına Ortalama Duruş Sayısı	1,44	1,60
Ortalama Hız (km/s)	24,26	24,39
Toplam Gecikme (saat)	22,12	26,68

Yenişehir Kavşağı

Yenişehir Kavşağı, mevcut durumda üç fazlı bir sinyalizasyon sistemiyle kontrol edilmektedir. Kavşağa ait trafik verileri, geometrik yapısı ve sinyalizasyon programı ilk kısımda detaylı olarak sunulmuştur. Tanımlanan parametrelere göre kavşağın izole çalıştığı senaryoda elde edilen performans göstergeleri Tablo 23’te verilmiştir. Bu kapsamda, sabah saatlerinde ortalama gecikme süresi 32,90 saniye/taşı, akşam saatlerinde ise 31,26 saniye/taşı olarak belirlenmiştir. Şekil 47’de, kavşağın izole mevcut durumu dikkate alınarak oluşturulan simülasyon modeline ait bir görsel yer almaktadır.



Şekil 47. Yenisehir Kavşağı mevcut durum simülasyon

Tablo 23. Yenisehir Kavşağı Mevcut Durum Performansı

Mevcut Durum	Sabah	Akşam
Ortalama Araç başı Gecikme (sn/ta)	32,90	31,26
Araç başına Ortalama Duruş Sayısı	0,72	0,87
Ortalama Hız (km/s)	29	28,91
Toplam Gecikme (saat)	5,31	9,56

İzole durum analizi

Üniversite, Çat Yolu ve Yenisehir Kavşaklarının izole şekilde çalıştığı senaryo esas alınarak, ulaşım ağı genelinde gecikme analizi gerçekleştirilmiştir. Her üç kavşağın mevcut çevrim süreleri dikkate alınmış ve aralarında herhangi bir ofset uygulanmamıştır. Bu analiz kapsamında, “PTV VISSIM” mikroskobik trafik simülasyon yazılımı kullanılarak gecikme süresi, ortalama araç hızı ve durma sayısı gibi performans göstergeleri değerlendirilmiştir.

Tanımlanan parametreler doğrultusunda, kavşakların izole şekilde işletildiği durumda elde edilen performans göstergeleri Tablo 24’de yer almaktadır. Ulaşım ağının koordine mevcut işletme senaryosunda, sabah zirve saatinde ortalama taşıt başına gecikme süresi 68,54 saniye, akşam zirve saatinde ise 78,15 saniye olarak hesaplanmıştır.



Şekil 48. E80 Karayolu ulaşım ağı mevcut durum simülasyon

Tablo 24. Ulaşım Ağı Genelinin İzole Durum Performans Sonuçları

Mevcut Durum	Sabah	Akşam
Ortalama Araç Başı Gecikme (sn/ta)	68,54	78,15
Araç başına Ortalama Duruş Sayısı	1,67	1,84
Ortalama Hız (km/s)	21,73	18,08
Toplam Gecikme (saat)	106,05	135,36

Koordine durum analizi

Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir Kavşakları mevcut durumda birbirleriyle koordine edilmemiş olup, izole sinyal planlarıyla çalışmaktadır. Üniversite Kavşağı ile Çat Yolu Kavşağı arasında yaklaşık 830 metrelik bir mesafe bulunmaktadır. Öte yandan, Üniversite ile Yenişehir Kavşağı arasında ise yaklaşık 1.500 metre mesafe bulunmakta olup bu güzergâhta taşıt akışını rahatlatmak amacıyla inşa edilmiş bir battı-çıkı (altgeçit) sistemi bulunmaktadır. Ancak bu yapı, fiziksel olarak taşıt hareketlerini yönlendirse de sinyal koordinasyonu açısından zamanlama uyumu sağlayan bir sistem değildir. Çat Yolu Kavşağı ile Yenişehir Kavşağı arasındaki mesafe ise yaklaşık 500 metredir ve bu kesimde de koordineli sinyalizasyon uygulanmamaktadır. Bu nedenle kavşaklar arası geçişlerde plato oluşumu sınırlı kalmakta, ulaşım ağı genelinde sürekli ve verimli bir trafik akışı sağlanamamaktadır.

Optimizasyon

Bu bölümde, çalışma alanında yer alan kavşaklara yönelik sinyal optimizasyonu süreci ele alınmıştır. E80 karayolu üzerinde yer alan ve mevcut durumda koordinesiz olarak işletilen Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir Kavşaklarına ait trafik hacim değerleri ve mevcut durum analizleri ilk kısımda detaylı biçimde sunulmuştur. Öncelikle, her üç kavşağın izole işletme

durumundaki gecikme değerleri değerlendirilmiştir. Mevcut durum analizlerinin tamamlanmasının ardından, koordineli sinyalizasyonun daha verimli işlemesi amacıyla optimum çevrim süreleri ile ofset sürelerinin belirlenmesine yönelik optimizasyon çalışmalarına geçilmiştir. Bu kapsamda yapılan analizler sonucunda, her üç kavşak için en uygun çevrim ve ofset süreleri elde edilmiştir.

Kavşak sinyal sürelerinin optimizasyonuna yönelik çeşitli yöntemler mevcut olmakla birlikte, bu çalışmada çevrim süresi hesaplamalarında Webster ve Cobbe (1966) tarafından geliştirilen model esas alınmıştır. Bu amaçla Denklem (14) kullanılarak yapılan hesaplamalar doğrultusunda, sabah zirve saati için Tablo 25’de Üniversite Kavşağı’nın izole işletme durumuna göre belirlenen optimum çevrim ve yeşil süreleri sunulmuştur. Benzer şekilde, Tablo 26’da Çat Yolu Kavşağı için elde edilen izole optimum çevrim ve yeşil süreleri verilmiştir. Yenışehir Kavşağı’na ait izole optimizasyon sonuçları ise Tablo 27’de yer almakta olup, bu tabloda kavşağın en uygun çevrim süresi ve ilgili fazlara ait yeşil süre dağılımları gösterilmektedir.

Tablo 25. Üniversite Kavşağı Sabah Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler

	Taşıt Hacmi (B.O/Saat)	Hacim/ Kapasite	Faz Sayısı	Kayıp Süre	Opt. Devre Süresi	Yeşil Süreler
Terminal	462	0,085				12
Ömer N. B.	1039	0,192	3	9	90	27
FSM	744	0,137				19
Dadaşkent	626	0,173				24

Tablo 26. Çat Yolu Kavşağı Sabah Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler

	Taşıt Hacmi (B.O/Saat)	Hacim/ Kapasite	Faz Sayısı	Top. Kayıp Süre	Opt. Devre Süresi	Yeşil Süreler
Paşalar	696	0,193				21
Köşk	794	0,22	3	9	120	24
Refik Saydam	1404	0,39				42
FSM	77	0,021				10

Tablo 27. Yenışehir Kavşağı Sabah Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler

	Taşıt Hacmi (B.O/Saat)	Hacim/ Kapasite	Faz Sayısı	Top. Kayıp Süre	Opt. Devre Süresi	Yeşil Süreler
Yenışehir	337	0,094				17
Köşk	939	0,13	3	9	90	25
Karayolları	1142	0,211				39

Kavşakların zirve saatlerdeki çevrim süreleri optimize edildikten sonra, her bir yaklaşım kolu için optimum yeşil süreler belirlenmiştir. Ancak kavşaklar arasında koordinasyon sağlanabilmesi amacıyla, farklı çevrim süreleri eşitlenmiştir. Bu kapsamda her üç kavşak için sabah zirve saat çevrim süresi 107 saniye olarak belirlenmiştir.

Sabah zirve saat uygulamasına benzer şekilde, akşam zirve saatinde de koordinasyonun sağlanabilmesi amacıyla, bu döneme ait trafik değerleri esas alınarak çevrim süresi optimizasyonu yeniden gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda; Tablo 28’de Üniversite Kavşağı’nın, Tablo 29’da Çat Yolu Kavşağı’nın ve Tablo 30’da ise Yenişehir Kavşağı’nın akşam zirve saatine ait optimum çevrim ve yeşil süreleri sunulmuştur.

Tablo 28. Üniversite Kavşağı Akşam Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler

	Taşıt Hacmi (B.O/Saat)	Hacim/ Kapasite	Faz Sayısı	Kayıp Süre	Opt. Devre Süresi	Yeşil Süreler
Terminal	823	0,152	3	9	90	19
Ömer N. B.	814	0,150				19
FSM	768	0,142				18
Dadaşkent	711	0,197				25

Tablo 29. Çat Yolu Kavşağı Akşam Zirve Saat İzole Durum Optimum devre ve Yeşil Süreler

	Taşıt Hacmi (B.O/Saat)	Hacim/ Kapasite	Faz Sayısı	Top. Kayıp Süre	Opt. Devre Süresi	Yeşil Süreler
Paşalar	1004	0,279	3	9	120	33
Köşk	823	0,229				27
Refik Saydam	1283	0,356				42
FSM	140	0,039				10

Tablo 30. Yenişehir Kavşağı Akşam Zirve Saat İzole Durum Optimum Devre ve Yeşil Süreler

	Taşıt Hacmi (B.O/Saat)	Hacim/ Kapasite	Faz Sayısı	Top. Kayıp Süre	Opt. Devre Süresi	Yeşil Süreler
Yenişehir	435	0,121	3	9	90	22
Köşk	1164	0,162				30
Karayolları	863	0,16				29

Kavşakların akşam zirve saatindeki çevrim sürelerinin optimizasyonu tamamlandıktan sonra, her bir yaklaşım kolu için optimum yeşil süreler belirlenmiştir. Ancak, hesaplanan çevrim sürelerinin birbirinden farklı olması nedeniyle kavşaklar arasında koordinasyonun sağlanabilmesi amacıyla çevrim süreleri eşitlenmiştir. Bu doğrultuda, her üç kavşağın akşam zirve saat çevrim süresi 107 saniye olarak belirlenmiştir.

Ofset süresinin belirlenmesi

Ulaşım ağının PTV VISSIM ile modellenmesinin ardından, kavşaklara ait çevrim süreleri optimize edilmiştir. Sonrasında ise, ofset süresi sıfırdan başlatılarak çevrim süresi boyunca artırılmış ve her bir ofset süresi için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, her bir ofset süresi adımımda gecikme süresi ve durma sayısı gibi performans parametreleri ölçülmüştür. Bu analizler sonucunda, ulaşım ağı genelinde ofset süresine bağlı olarak oluşan minimum ve maksimum gecikme değerleri belirlenmiştir. Kavşaklar arasında etkili bir koordinasyonun sağlanabilmesi için, gecikme süresi ve durma sayısını en aza indiren ofset süresi tercih edilmiştir.

Tablo 31. Üniversite Kavşağı Optimize Sinyal ve Devre Süreleri

	İzole Durum		Koordine Durum	
	Sabah	Akşam	Sabah	Akşam
Terminal	12	19	20	22
Ömer N. Bilmen	27	19	41	21
F.S.M.	19	18	36	23
Dadaşkent	24	25	37	28
Devre Süresi	90	90	107	107

Tablo 32. Çat Yolu Kavşağı Optimize Sinyal ve Devre Süreleri

	İzole Durum		Koordine Durum	
	Sabah	Akşam	Sabah	Akşam
Paşalar	21	33	19	28
Köşk	24	27	14	23
Refik Saydam	42	42	52	35
FSM	10	10	10	10
Devre Süresi	120	120	107	107

Tablo 33. Yenişehir Kavşağı Optimize Sinyal ve Devre Süreleri

	İzole Durum		Koordine Durum	
	Sabah	Akşam	Sabah	Akşam
Yenişehir	17	22	27	30
Köşk	25	30	30	36
Karayolları	39	29	36	27
Devre Süresi	90	90	107	107

Kavşakların koordineli çalışabilmesi için ortak bir çevrim süresine ihtiyaç duyulduğundan, her üç kavşak için çevrim süresi 107 saniye olarak alınmıştır. Kavşakların

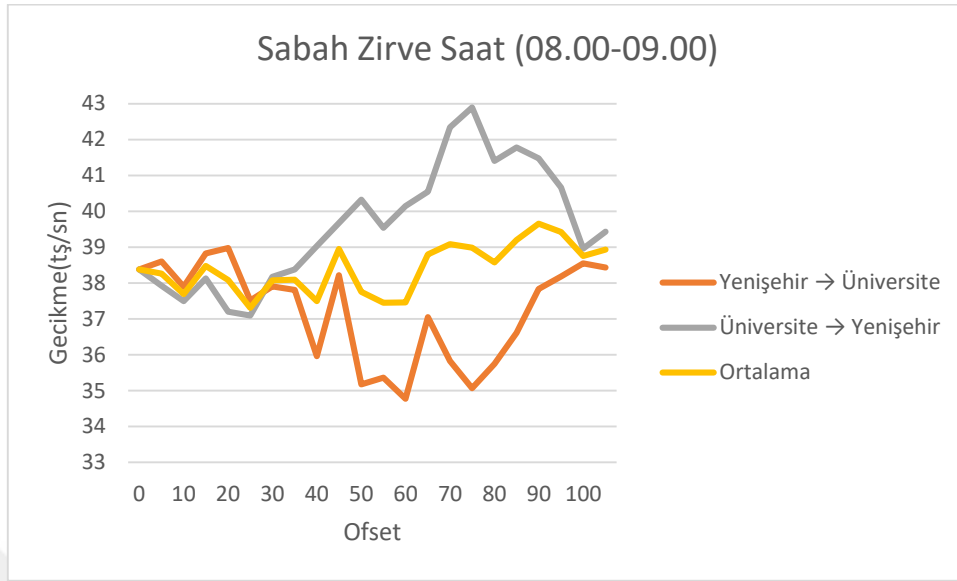
akşam saatlerinde de koordineli çalışabilmesi amacıyla çevrim süresi tüm kavşaklar için 107 saniye olarak eşitlenmiştir. Koordine akstaki performans değerlendirmeleri kapsamında, Tablo 34’de zirve saatler için farklı ofset sürelerine bağlı olarak durma gecikmesi (sn/taşıt), durma sayısı ve araç başı gecikme (sn/taşıt) değerleri verilmiştir. Ayrıca, Şekil 49’de ofset süresine bağlı olarak değişen toplam gecikme değerleri grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 34. Koordine Aksların Sabah Saati İçin Ofset/Gecikme Değerleri

Ofset Süresi	Üniversite → Yenişehir			Yenişehir → Üniversite			Toplam Ortalama Durma Gecikmesi (sn/ta))	Toplam Ortalama Gecikme (saat)
	Ortalama Gecikme	Durma Sayısı	Durma Gecikmesi	Ortalama Gecikme	Durma Sayısı	Durma Gecikmesi		
0	52,972008	1,345007	38,381715	52,972008	1,345007	38,381715	38,381715	81,93004
5	53,12342	1,354758	38,598804	52,412025	1,321121	37,924838	38,26182	81,62883
10	52,329733	1,336027	37,893142	52,06497	1,332435	37,492739	37,69294	80,7319
15	53,481427	1,357759	38,828034	52,976307	1,351652	38,127696	38,478	82,32731
20	54,212181	1,413254	38,97513	52,264678	1,354705	37,200198	38,08767	82,3421
25	52,426086	1,373563	37,517476	52,539054	1,410201	37,097329	37,3074	81,17304
30	53,323241	1,417205	37,908948	53,616992	1,426545	38,170362	38,07993	82,70045
35	52,917538	1,397989	37,808104	54,277843	1,469468	38,378085	38,0931	82,89776
40	50,813281	1,363147	35,965515	55,014878	1,491559	39,031162	37,49834	81,84044
45	53,906789	1,436243	38,222073	55,529302	1,490122	39,669631	38,94585	84,63058
50	50,263455	1,364943	35,177586	56,091696	1,461386	40,32555	37,75157	82,24798
55	50,146783	1,349497	35,363037	54,766579	1,411279	39,536603	37,44982	81,133
60	49,362729	1,313757	34,772681	55,31306	1,398527	40,146144	37,45941	80,94928
65	52,090759	1,365302	37,047401	55,713883	1,422773	40,549809	38,79861	83,36892
70	50,461019	1,321659	35,830554	57,889024	1,460848	42,343687	39,08712	83,7907
75	49,300146	1,276221	35,071232	58,357262	1,457795	42,894263	38,982748	83,25506
80	50,129938	1,290409	35,744074	56,52939	1,424389	41,40277	38,573422	82,48321
85	51,152591	1,295079	36,616122	56,959923	1,404993	41,778346	39,197234	83,60701
90	52,418422	1,302083	37,83443	56,542109	1,403017	41,473066	39,653748	84,26281
95	52,696792	1,299569	38,186816	55,714198	1,398168	40,662323	39,42457	83,83783
100	53,181615	1,322557	38,545635	53,652808	1,342313	38,956608	38,751122	82,61862
105	52,794508	1,318247	38,430212	54,290214	1,363685	39,435627	38,93292	82,81218

Tablo 34'te sunulan durma gecikmesi hesaplamaları, toplu taşıma araçlarının duraklarda yaptığı kısa süreli duraklamalar ile yol kenarındaki park kaynaklı gecikmeler dikkate alınmaksızın gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, farklı gecikme kaynaklarının etkilerini daha sağlıklı şekilde ayırtırmak amacıyla, çalışmada performans analizleri yapılırken araç başına durma gecikmesi temel değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır. Ayrıca aynı tabloda, ulaşım

ağı genelinde ortaya çıkan toplam gecikme değerine de yer verilmiştir. Bu kapsamda, taşıtların gecikmesine neden olan tüm faktörler bütüncül biçimde dikkate alınarak analiz yapılmıştır.



Şekil 49. Ulaşım ağının sabah zirve saat ofset/gecikme değerleri

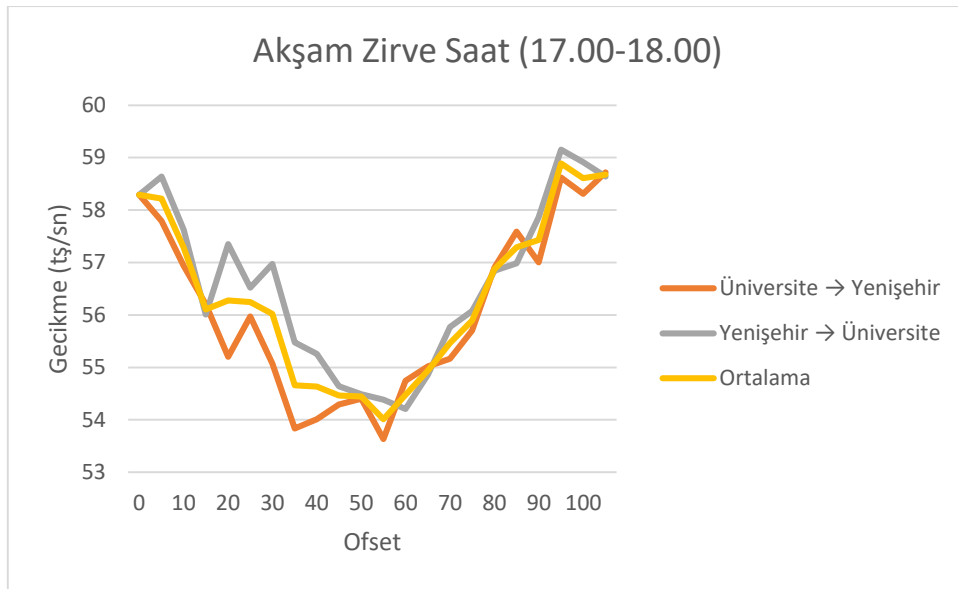
Tablo 34 ve Şekil 49 incelendiğinde, ofset süresindeki değişimlerin, koordine akslarda oluşan toplam gecikme üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda toplam ortalama durma gecikmesi değerlerinin 37,45 saniye/taşıt ile 39,65 saniye/taşıt arasında değiştiği belirlenmiştir. Aksın her iki yönünde de minimum gecikmenin elde edildiği 60 saniyelik ofset değeri, kavşaklar arasında koordinasyon sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Bu optimize edilmiş ofset ile, aksın Üniversite → Yenişehir yönünde ortalama durma gecikmesi 34,77 saniye/taşıt, durma sayısı ise 1,31 olarak hesaplanmıştır. Aksın ters yönünde ise durma gecikmesi 40,15 saniye/taşıt, durma sayısı ise 1,40 olarak tespit edilmiştir.

Çalışmada yer alan Tablo 34, koordineli aksların sabah zirve saatlerinde farklı ofset sürelerine göre değişen durma gecikmesi (sn/ta), durma sayısı ve araç gecikmesi (sn/ta) gibi performans göstergelerini kapsamlı bir biçimde sunmaktadır. Buna ek olarak, Şekil 49’da ise ofset süreleri ile gecikme arasındaki ilişki grafiksel olarak ortaya konmuştur.

Tablo 35. Koordine Aksların Akşam Saati İçin Ofset/Gecikme Değerleri

Üniversite → Yenişehir			Yenişehir → Üniversite			Toplam Ortalama Durma Gecikmesi (sn/ta)	Toplam Ortalama Gecikme (saat)
Ofset Süresi	Ortalama Gecikme	Durma Sayısı	Durma Gecikmesi	Ortalama Gecikme	Durma Sayısı	Durma Gecikmesi	
0	75,05639	1,777917	58,28833	75,05639	1,777917	58,28833	58,288329 133,1208
5	74,608706	1,780683	57,793114	75,198215	1,743464	58,638325	58,21572 132,1078
10	73,831021	1,783593	56,934957	74,261689	1,73762	57,628173	57,281565 130,8563
15	72,6737	1,731765	56,203811	72,568581	1,696328	56,007199	56,105505 128,5697
20	71,513706	1,739335	55,199473	74,347286	1,793076	57,352939	56,276206 128,9512
25	72,53565	1,741839	55,972791	73,341969	1,754504	56,522644	56,247718 129,2137
30	71,741914	1,723186	55,071828	73,947332	1,770807	56,972886	56,022357 128,3286
35	70,000656	1,68315	53,83385	72,093264	1,715925	55,478443	54,656147 125,4291
40	70,393274	1,678137	54,014599	71,835601	1,740094	55,257228	54,635914 125,3911
45	70,66754	1,704535	54,2924	70,883624	1,695072	54,639685	54,466041 124,8507
50	70,368345	1,648183	54,401072	70,892585	1,713748	54,490296	54,445684 124,6054
55	69,86365	1,674957	53,63489	70,62938	1,660561	54,38701	54,01095 124,2991
60	70,938739	1,675343	54,741894	70,290502	1,63767	54,210217	54,476056 124,9654
65	71,268597	1,690289	55,021283	70,926028	1,648527	54,859959	54,940621 126,5314
70	71,500564	1,699341	55,167391	71,899776	1,679304	55,767709	55,46755 127,0589
75	71,974245	1,694245	55,705155	72,534818	1,706382	56,075002	55,890079 128,0097
80	73,453284	1,723028	56,903122	73,149314	1,711466	56,841842	56,872482 129,5388
85	73,984361	1,722818	57,590119	73,327913	1,719287	56,984389	57,287254 130,369
90	73,342368	1,705514	57,000872	74,310076	1,743895	57,86147	57,431171 130,9598
95	75,526431	1,78441	58,621438	75,846419	1,764743	59,154784	58,888111 133,2414
100	75,159626	1,754408	58,309322	75,550125	1,763174	58,91334	58,611331 133,2113
105	75,678758	1,791955	58,718309	75,2623	1,749803	58,639093	58,678701 133,3629

Tablo 35’de sunulan durma gecikmesi değerleri, toplu taşıma araçlarının duraklarda gerçekleştirdiği kısa süreli beklemler ile yol kenarındaki park kaynaklı gecikmeler göz önünde bulundurulmadan hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, gecikmeye neden olan farklı faktörlerin etkilerini birbirinden ayırabilmek adına tercih edilmiştir. Bu nedenle, çalışmada performans değerlendirmeleri yapılırken araç başına durma gecikmesi temel ölçüt olarak esas alınmıştır. Aynı tabloda, ulaşım ağı genelinde oluşan araç başı toplam gecikme değerlerine de yer verilmiştir. Bu kapsamda, taşıt gecikmelerine katkıda bulunan tüm parametreler bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.



Şekil 50. Ulaşım ağının akşam zirve saat ofset/gecikme değerleri

Tablo 35 ve Şekil 50 incelendiğinde, ofset süresindeki değişimlerin, koordine aks üzerindeki toplam gecikme üzerinde önemli düzeyde etkili olduğu gözlemlenmektedir. Analizler sonucunda, toplam gecikme değerlerinin 54,01 saniye/taşıt ile 58,68 saniye/taşıt arasında değiştiği belirlenmiştir. Aksın her iki yönünde de minimum gecikmenin elde edildiği 55 saniyelik ofset değeri, kavşaklar arasında senkronizasyon sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Bu optimize edilmiş ofset süresiyle, Üniversite → Yenisehir yönünde durma gecikmesi 53,63 saniye/taşıt, ortalama durma sayısı 1,67 olarak hesaplanmıştır. Ters yönde ise durma gecikmesi 54,39 saniye/taşıt, durma sayısı ise 1,66 olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar

Sabah zirve saat

Zirve saatlerdeki trafik yoğunlukları dikkate alınarak, ulaşım ağı PTV VISSIM trafik simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, optimum sinyal çevrim süreleri belirlenmiş ve bu verilere dayalı olarak koordinasyon planı hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, ulaşım ağı genelinde performansın iyileştiğini ortaya koymuştur.

Kavşaklar arası senkronizasyonun sağlanabilmesi için optimum ofset süresi, aşamalı (iteratif) bir yöntemle belirlenmiştir. Bu süreçte, ofset süresi sıfırdan başlanarak çevrim süresi sonuna kadar belirli aralıklarla artırılmış; her adımda aks üzerindeki trafik performansları izlenmiştir. Zirve saat için en düşük gecikme ve durma sayısını sağlayan ofset süresi 60 saniye olarak belirlenmiştir.

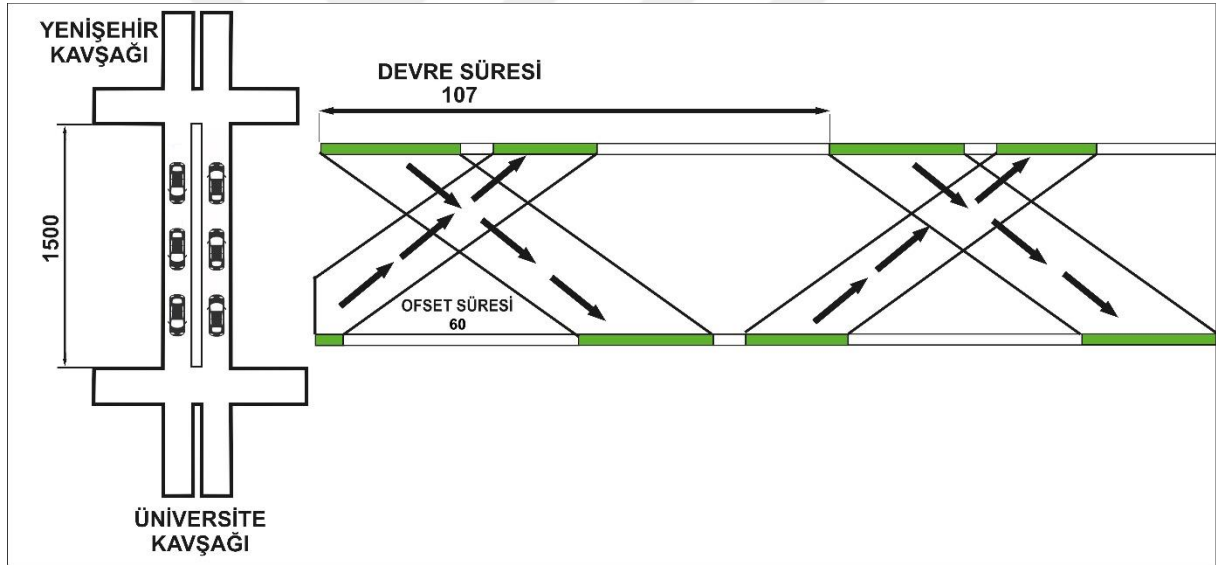
Tablo 36'da, mevcut durum ile optimize edilmiş planın karşılaştırmalı sonuçları sunulmuştur. Buna göre:

- Araç başına ortalama gecikmede yaklaşık %45,33 oranında azalma,
- Araç başına ortalama durma sayısında ise %18,56 düzeyinde iyileşme sağlanmıştır.

Ayrıca, optimize sinyal planı ile birlikte ortalama seyahat hızı 24,79 km/sa değerine ulaşmıştır. Şekil 51'de ise, zirve saat koşulları için oluşturulan optimum çevrim sürelerine göre düzenlenmiş yer-zaman diyagramı yer almaktadır.

Tablo 36. Ulaşım Ağı Geneline Sabah Zirve Saat Performans Değerleri

Zirve Saat	Mevcut	Optimize	Değişim
Ortalama Araç Başı Gecikme (sn/ta)	68,54	37,46	%45,33
Araç Başına Ortalama Duruş Sayısı	1,67	1,36	%18,56
Ortalama Hız (km/s)	21,73	24,79	%14,06
Toplam Gecikme (Saat)	106,05	80,95	%23,69



Şekil 51. Sabah zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı

Akşam zirve saat

Zirve saatlerdeki trafik yoğunlukları dikkate alınarak, ulaşım ağı PTV VISSIM trafik simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, optimum sinyal çevrim süreleri belirlenmiş ve bu verilere dayalı olarak koordinasyon planı hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, ulaşım ağı genelinde performansın iyileştiğini ortaya koymuştur.

Kavşaklar arası senkronizasyonun sağlanabilmesi için optimum ofset süresi, aşamalı (iteratif) bir yöntemle belirlenmiştir. Bu süreçte, ofset süresi sıfırdan başlanarak çevrim süresi

sonuna kadar belirli aralıklarla artırılmış; her adımda aks üzerindeki trafik performansları izlenmiştir. Zirve saat için en düşük gecikme ve durma sayısını sağlayan ofset süresi 55 saniye olarak belirlenmiştir.

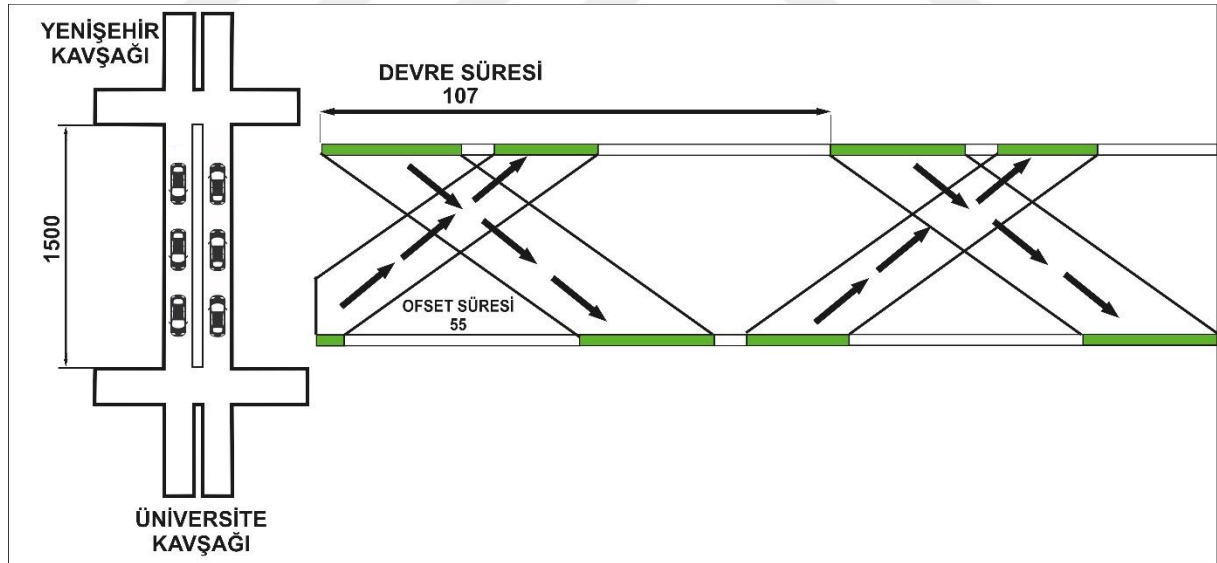
Tablo 37'de, mevcut durum ile optimize edilmiş planın karşılaştırmalı sonuçları sunulmuştur. Buna göre:

- Araç başına ortalama gecikmede yaklaşık %30,91 oranında azalma,
- Araç başına ortalama durma sayısında ise %9,24 düzeyinde iyileşme sağlanmıştır.

Ayrıca, optimize sinyal planı ile birlikte ortalama seyahat hızı 19,04 km/sa değerine ulaşmıştır. Şekil 52'de ise, zirve saat koşulları için oluşturulan optimum çevrim sürelerine göre düzenlenmiş yer-zaman diyagramı yer almaktadır.

Tablo 37. Ulaşım Ağı Geneline Akşam Zirve Saat Performans Değerleri

Zirve Saat	Mevcut	Optimize	Değişim
Ortalama Araç Başı Gecikme (sn/ta)	78,15	54,01	%30,91
Araç Başına Ortalama Duruş Sayısı	1,84	1,67	%9,24
Ortalama Hız (km/s)	18,08	19,04	%5,31
Toplam Gecikme (Saat)	135,36	124,3	%8,17



Şekil 52. Akşam zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Bu çalışmada, Erzurum kentinde yer alan Üniversite, Çat Yolu ve Yenişehir kavşakları arasında koordineli sinyalizasyonun trafik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı; söz konusu kavşaklar arasında farklı ofset senaryoları altında uygulanan koordinasyonun, taşıt gecikmesi, durma sayısı ve durma gecikmesi gibi temel performans göstergeleri üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Bu kapsamda, sahadan elde edilen trafik verileriyle PTV VISSIM mikro simülasyon modeli oluşturulmuş ve her bir senaryo altında performans ölçütleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, çevrim süresi ve ofset ayarlarının koridor düzeyindeki senkronizasyon başarısına etkisi de analiz edilmiştir.

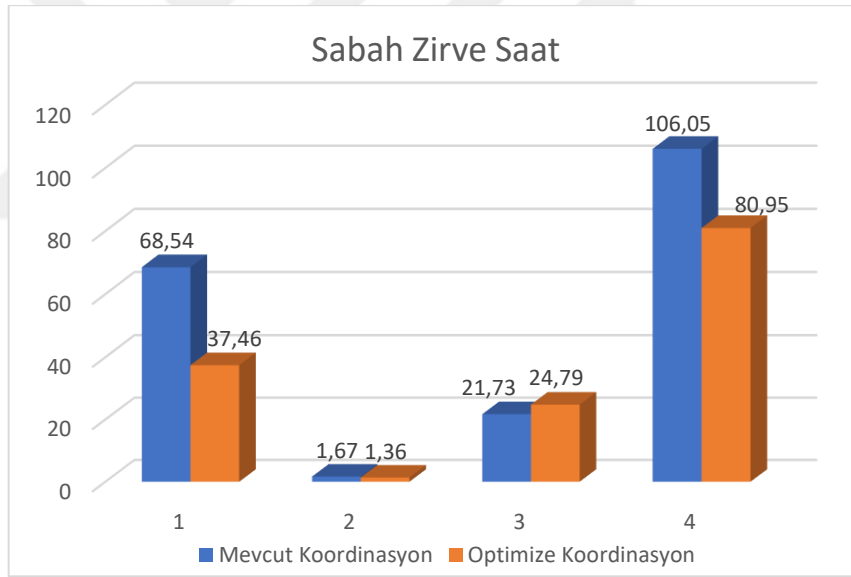
Çalışmanın ikinci bölümünde, koordineli sinyalizasyon kavşak sistemlerine ve adaptif sinyalizasyon yaklaşımlarına yönelik kapsamlı bir literatür incelemesi yapılmış; farklı koordinasyon türleri, analiz yöntemleri ve tarihsel gelişim süreci ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, şehir içi sinyalizasyon kavşakları izole ve koordine olmak üzere sınıflandırılmış; her iki yapı altındaki sistem türleri detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, gecikme hesaplamaları kapsamında Webster yöntemi ele alınmış ve gecikme üzerinde etkili olan doymuş akım, devre süresi ve taşıt kompozisyonu gibi parametreler matematiksel olarak değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, simülasyon kavramı ve PTV VISSIM yazılımına ilişkin teknik açıklamalara yer verilmiş, trafik modelleme süreci ve senaryo üretim teknikleri detaylandırılmıştır. Uygulama aşamasında ise çalışma alanındaki kavşakların geometrik ve sinyalizasyon özellikleri belirlenmiş; doymuş akım değerleri hesaplanarak izole ve koordine işletme senaryolarına göre gecikme performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, koordinasyonun özellikle zirve saatlerde ağ performansını anlamlı ölçüde artırdığını göstermiştir.

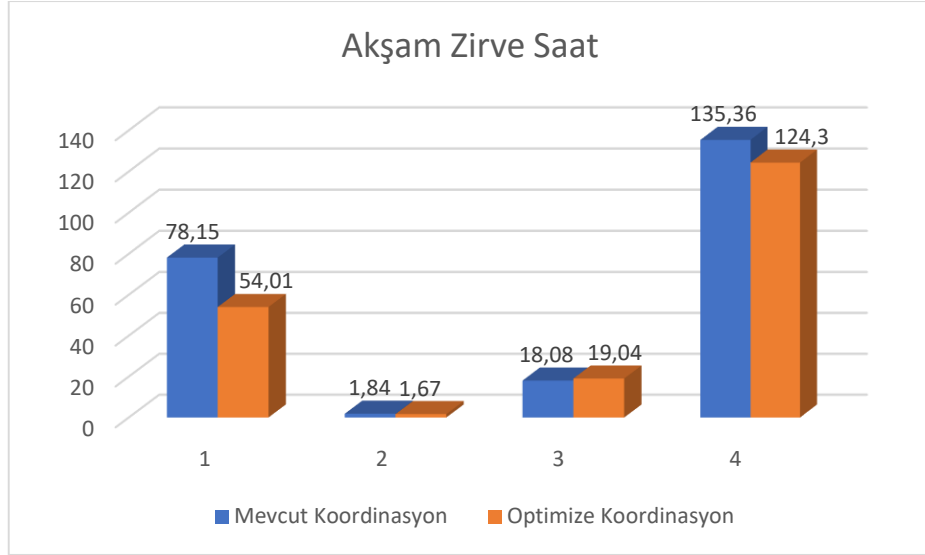
Yapılan analizler, koordinasyonun sadece ortalama taşıt gecikmesini değil, aynı zamanda durma sayısını ve durma gecikmesini de önemli oranda azalttığını ortaya koymuştur. Bu durum, hem sürüş konforunun artmasına hem de çevresel etkilerin azalmasına katkı sağlamaktadır. Gerçekleştirilen senaryolar sonucunda, 107 saniyelik çevrim süresi ile oluşturulan koordine planların, üç kavşak arasında tutarlı ve akıcı bir trafik akışı sağladığı; böylece ortalama taşıt gecikmesinde ve durma süresinde iyileşmeler meydana getirdiği belirlenmiştir.

Ayrıca çalışma, gerçek zamanlı veri altyapısı bulunmayan kentsel bölgelerde dahi kavşaklar arası koordinasyonun, sınırlı kaynaklarla etkin biçimde kurulabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle şehir geçişlerinde yer alan ana arterlerde ve devlet karayollarında saatlik trafik ölçümleriyle oluşturulan analizlerin, düşük maliyetli veri toplama yöntemleriyle entegre edilerek sürdürülebilir trafik yönetimi çözümleri üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Son olarak, kavşakların mevcut durumu esas alınarak Webster yöntemi ile devre süresi optimizasyonu yapılmış; elde edilen optimum değerler, koordinasyonun kurulabilmesi amacıyla sabitlenmiştir. Sabah zirve saati için 60 saniye, akşam zirve saati için ise 55 saniyelik çevrim süresi belirlenerek koordine senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar altında sabah saatlerinde ortalama 37,46 sn/ta, akşam saatlerinde ise 54,01 sn/ta gecikme değerleri elde edilmiştir. Böylece ulaşım ağında mevcut koordine duruma kıyasla sabah saatinde %45,33, akşam saatinde ise %30,91 oranında gecikme iyileşmesi sağlanmıştır. Ulaşım ağının izole, mevcut koordine ve optimize edilmiş koordine durumlarına ait analiz sonuçları ise Şekil 53 ve Şekil 54'te gösterilmiştir.



Şekil 53. Sabah zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı



Şekil 54. Akşam zirve saat optimum devre süresi ve koordinasyon planı

Öneriler

Kent içi ulaşımında yaşanan gecikmelerin azaltılmasına yönelik çeşitli yöntemler literatürde yer almakta olup; sinyalize kavşaklar arasında koordinasyon sağlanması, kavşak geometrisinin iyileştirilmesi ve yol kapasitesinin artırılması gibi uygulamalar, kısa vadede olumlu etkiler sağlayabilmektedir. Ancak bu tür mühendislik temelli çözümler, trafik sorunlarının temel nedenlerini ortadan kaldırmakta yetersiz kalmakta ve uzun vadede sürdürülebilir sonuçlar üretmemektedir. Özellikle hızlı kentleşme ve buna paralel olarak motorlu taşıt sahipliğinin artması, mevcut ulaşım altyapısının kapasitesini zorlamakta ve trafik gecikmelerinin sistematik bir soruna dönüşmesine neden olmaktadır.

Bu çerçevede, bireysel araç kullanımının azaltılması yönünde talep yönetimi politikalarının hayata geçirilmesi önem arz etmektedir. Toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması, aktif ulaşım modlarının (yaya ve bisiklet) teşvik edilmesi, çevreci ve sürdürülebilir ulaşım alternatiflerinin entegrasyonu gibi stratejiler, uzun vadeli çözümler açısından kritik öneme sahiptir. Söz konusu dönüşümün sağlanabilmesi ise yalnızca yerel düzeyde alınacak önlemlerle sınırlı kalmayıp, ulusal ulaşım politikaları ile desteklenmeli ve bütüncül bir planlama anlayışıyla yürütülmelidir.

KAYNAKÇA

- Abbas, M., ve diğ. (2017). Coordinated Signal Control to Enhance Traffic Safety. *Transportation Research Record*.
- Akçelik, R. (1998). Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis. Australian Road Research Board, Research Report ARR No. 123.
- Bretherton, R. D., ve diğ. (2004). SCOOT and Adaptive Traffic Control Systems. *Traffic Engineering & Control*, 45(9).
- Chen, Y., ve diğ. (2021). Impact of Signal Timing on Pedestrian and Vehicular Delay. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*.
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. *Fundamentals of Traffic Simulation*, 63-93.
- Kimber, R. M., ve diğ. (1986). Traffic Management and Road Safety. London: HMSO.
- Lee, ve diğ. (2020). Environmental Impacts of Coordinated Traffic Signals. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.
- Li, Y., ve diğ. (2019). Effects of Coordinated Signal Control on Traffic Congestion and Emissions. *Journal of Advanced Transportation*, Volume 2019.
- Lowrie, P. R., ve diğ. (1990). SCATS – Sydney Coordinated Adaptive Traffic System. *Proceedings of International Conference on Road Traffic Control*.
- Ocaktan, E. (2010). Trafik Sinyalizasyonu ve Mikro Simülasyon Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Papageorgiou, M., ve diğ. (2003). Review of Road Traffic Control Strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12).
- Pursula, M., & Niittymäki, J. (1996). Traffic Flow Theory and Capacity Analysis. *Helsinki University of Technology Publications*.
- Robertson, D. I., & Bretherton, R. D. (1991). Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time – The SCOOT Method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(1).
- Roess, R. P., & Prassas, E. S. (2004). Traffic Engineering. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Stevanovic, A., ve diğ. (2008). Genetic Algorithm-based Optimization for Coordinated Traffic Signal Systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5), 573-591.
- TÜİK (2022). Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri, Erzurum İli Taşıt Sayıları, Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim: www.tuik.gov.tr (Erişim tarihi: 19.03.2025).
- Webster, F. V. (1958). Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39. Road Research Laboratory, HMSO, London.
- Yayla, N. (2002). Şehir içi Trafik Sorunları ve Çözüm Önerileri. Ankara: Gazi Üniversitesi Yayınları.

- Yun, I., & Park, B. (2012). Stochastic Optimization of Coordinated Actuated Traffic Signal System Using Genetic Algorithms. *Journal of Transportation Engineering*, 138(7), 819-829.
- PTV Group. (2021). *PTV VISSIM 2021 SP13 (Version 2021) [Computer software]*. Karlsruhe, Germany: PTV Planung Transport Verkehr GmbH.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ahmet AKBULUT
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Uğur Temel Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği – İnşaat Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Uluslararası Multidisipliner Bilimsel Araştırma Kongresi Bildiri Kitabı	