

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAVŞAK PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE
GEOMETRİK TASARIMLARININ ETKİSİNİN BENZETİM
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ: SEDAŞ KAVŞAĞI ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Atilla TALU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir ÖZDEN

Ağustos 2024

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAVŞAK PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE
GEOMETRİK TASARIMLARININ ETKİSİNİN BENZETİM
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ: SEDAŞ KAVŞAĞI ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Atilla TALU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 14/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir ÖZDEN	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Serdar GEÇER	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Çağdaş KARA	BAŞARILI

BEYAN

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

Atilla TALU

14/08/2024

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir ÖZDEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatları boyunca beni destekleyen, sevinç ve üzüntülerini paylaşan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	4
1.2. Tezin Kapsamı.....	4
1.3. Tezin Yöntemi.....	4
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Kavşak Tipleri ve Trafik Akımına Etkileri	7
2.1.1. Eşdüzey Kavşaklar ve Tasarım Parametreleri	9
2.1.2. Farklı Düzeyli Kavşaklar ve Tasarım Parametreleri.....	13
2.1.3. Trafik Sinyalizasyonu	17
2.1.3.1. Sinyalizasyon Kavramları	19
2.1.3.2. Kavşak Kapasitesini Etkileyen Parametreler	21
2.1.3.3. Webster (İngiliz) Yöntemi	24
2.1.3.4. Yolların Kapasitesi El Kitabı Yöntemi (HCM: Highway Capacity Manual, 1985).....	26
2.1.3.5. Avustralya (Akçelik) Yöntemi.....	29
2.2. Sürdürülebilir Ulaşım	34
2.3. Kentsel Hareketlilik ve Planlama	36
2.4. Kentsel Ulaşım Planlamalarında Benzetim Yöntemleri.....	39
BÖLÜM 3.	
YÖNTEM.....	45

3.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi	45
3.2. Verilerin Toplanması.....	47
3.3. Senaryoların Belirlenmesi	48
3.4. Vissim Programında Analiz Uygulaması	51

BÖLÜM 4.

SONUÇLAR	53
4.1. Webster Yöntemi ile Sinyalizasyon Hesaplarının Sonuçları	53
4.2. Sinyalizasyon Senaryosunda Minimum Döngü Süresine Göre Sonuçlar	57
4.3. Sinyalizasyon Senaryosunda Ortalama Döngü Süresine Göre Sonuçlar	57
4.4. Sinyalizasyon Senaryosunda Maksimum Döngü Süresine Göre Sonuçlar	58
4.5. Mevcut Durum Senaryosuna Göre Sonuçlar	59
4.6. Katlı Kavşak Senaryosuna Göre Sonuçlar	59
4.7. Senaryoların Analiz Sonuçlarına Göre Grafikler ile Karşılaştırılması.....	60

BÖLÜM 5.

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİ.....	65
------------------------------------	-----------

KAYNAKLAR	68
------------------------	-----------

KISALTMALAR

Ad	: Adet
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
gr	: Gram
km	: Kilometre
m	: Metre
max	: Maksimum
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
NO _x	: Azot Oksitleri
sa	: Saat
SEDAŞ	: Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş.
sn	: Saniye
ST	: Senaryo Türü
ta	: Taşıt
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
VOC	: Emisyon Uçucu Organik Bileşikler
YK	: Yaklaşım Kolları

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2. 1 : Ulaşımın sürdürülebilirlik üzerine etkileri.....	34
Tablo 3. 1 : Sedaş Kavşağı mevcut araç sayısı.	48
Tablo 3. 2 : Kavşakta bulunan araçların tiplerine göre yüzdesel dağılımı.....	48
Tablo 4. 1 : Minimum döngü süresine göre analiz sonuçları-1.....	57
Tablo 4. 2 : Minimum döngü süresine göre analiz sonuçları-2.....	57
Tablo 4. 3 : Ortalama döngü süresine göre analiz sonuçları-1.....	58
Tablo 4. 4 : Ortalama döngü süresine göre analiz sonuçları-2.....	58
Tablo 4. 5 : Maksimum döngü süresine göre analiz sonuçları-1.	58
Tablo 4. 6 : Maksimum döngü süresine göre analiz sonuçları-2.	59
Tablo 4. 7 : Mevcut durum simülasyon analiz sonuçları-1.....	59
Tablo 4. 8 : Mevcut durum simülasyon analiz sonuçları-2.....	59
Tablo 4. 9 : Katlı Kavşak simülasyon analiz sonuçları-1.	60
Tablo 4. 10 : Katlı Kavşak simülasyon analiz sonuçları-2.....	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1 : Tipik dört kollu ve dönel bir kavşağın genel tasarımı.	2
Şekil 2. 1 : Trafik hacmi ve kavşak seçimi ilişkisi (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).....	9
Şekil 2. 2 : Eşdüzey kavşak uygulamalarında trafik akışı (KGM Yayınları, 2016)...	10
Şekil 2. 3 : 3 kollu kavşakların çakışma noktaları (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).	12
Şekil 2. 4 : 4 kollu kavşakların çakışma noktaları (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).	12
Şekil 2. 5 : Farklı düzeyli kavşak tiplerinin standart uygulamaları (KGM Yayınları, 2016).....	13
Şekil 2. 6 : Trafik yoğunluğuna göre katlı kavşak gereksinimi (KGM Yayınları, 2016).....	14
Şekil 2. 7 : Trompet kavşak tipi örneği.	15
Şekil 2. 8 : Yonca tipi kavşak örneği.	16
Şekil 2. 9 : Üç çeyrek yonca tipi kavşak örneği.	16
Şekil 2. 10 : Direksiyonel farklı düzeyli kavşak örneği.	17
Şekil 2. 11 : Sinyalizasyonun gecikmelere etkisi (Ayfer, 1977).....	18
Şekil 2. 12 : Faz düzeni örneği.....	20
Şekil 2. 13 : Devre düzeni örneği (Çetinkaya, 2008).....	21
Şekil 2. 14 : Yeşil süre boyunca trafik akımının kavşağa giriş durumu (Çetinkaya, 2008).....	22
Şekil 2. 15 : Sinyalize kavşak içerisindeki bir aracın gecikme süresi diyagramı (Çakıcı ve Murat, 2016).	23
Şekil 2. 16 : Farklı türden taşıtların birim oto eşdeğerleri (Çetinkaya, 2008).	24
Şekil 2. 17 : Tekrar eden akımlarda akım düzeni (Çetinkaya, 2008).....	33
Şekil 2. 18 : Kavşakta kentsel hareketlilik örneği (Boğaziçi Proje, 2024).	37
Şekil 2. 19 : Trafik simülasyon modelleri.	40
Şekil 3. 1 : Sakarya ilinden geçen anayolların uydu görüntüsü.	46
Şekil 3. 2 : Sedaş Kavşağı'nın uydu görüntüsü.	46
Şekil 3. 3 : Sedaş Kavşağı'nın Sokak Görünümü.	47
Şekil 3. 4 : Sedaş Kavşağı yaklaşım kolları.	48
Şekil 3. 5 : Minimum döngü süresine göre devre diyagramı.	49
Şekil 3. 6 : Ortalama döngü süresine göre devre diyagramı.	50
Şekil 3. 7 : Maksimum döngü süresine göre devre diyagramı.....	50
Şekil 3. 8 : Simülasyon çalışma anı.	51
Şekil 3. 9 : Simülasyon çalışma anı.	52
Şekil 3. 10 : Simülasyon çalışma anı.	52
Şekil 4. 1 : Zirve saat verileri için kavşaktaki hacim değerleri.....	53
Şekil 4. 2 : Sedaş Kavşağı için önerilen faz düzeni.	53
Şekil 4. 3 : Düzeltilmiş doygun hacim değerleri.....	55
Şekil 4. 4 : Zirve saat verileri için emisyon değerleri değişimleri.	61
Şekil 4. 5 : Zirve saat verileri için yakıt tüketimi değişimleri.....	61
Şekil 4. 6 : Zirve saat verileri için ortalama hız değişimleri.	62

Şekil 4. 7 : Zirve saat verileri için kuyruklanma uzunluğu değerleri değişimleri.....	63
Şekil 4. 8 : Zirve saat verileri için taşıt gecikmesi değerleri değişimleri.....	63
Şekil 4. 9 : Zirve saat verileri için hizmet düzeyleri değişimleri.....	64



KAVŞAK PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİNDE GEOMETRİK TASARIMLARININ ETKİSİNİN BENZETİM YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ: SEDAŞ KAVŞAĞI ÖRNEĞİ

ÖZET

Ulaşım, insanlığın varoluşundan itibaren toplumsal etkileşimin sağlanmasında en temel unsurlardan biri olarak kabul edilmektedir. Nüfusun artışı ve teknolojik ilerlemeler, kentsel bölgelerde hareketlilikte sürekli bir artış sağlamakta olup şehir içindeki ulaşım dinamiklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durum, bireylerin yaşam kalitesini artırmak ve ekonomik faaliyetleri desteklemek amacıyla etkili bir ulaşım sistemi gerekliliğini vurgulamaktadır. Sürdürülebilir ulaşım, hem çevresel etkileri azaltarak şehirlerin yaşanabilirliğini artırmakta hem de toplumsal refahı ve ekonomik kalkınmayı desteklemektedir. Bu sebeple, kentsel hareketliliğin artışıyla birlikte sürdürülebilir ulaşım sistemlerine duyulan ihtiyaç giderek artmakta olup, bu alana yönelik daha fazla önem ve yatırım gerekmektedir.

Ulaşım sistemlerinin önemli bir bileşeni olan karayolu ulaşımında kavşaklar, hem insan hem de yük taşımacılığı açısından kritik rol oynamaktadır. Kavşaklardaki artan araç sayısı, trafik yükünü artırmakta olup kavşak performansının etkin bir şekilde planlanması gerekmektedir. Bu çalışmada Sakarya ili Adapazarı ilçesinde bulunan, insanların yoğun olarak kullandığı Sedaş Kavşağı için kavşak performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Sedaş Kavşağı'ndan alınan veriler PTV Vissim mikrosimülasyon programı ile analiz edilmiştir. Bu programda mevcut durum senaryosu ve kavşak performansının artmasını sağlayabilecek iyileştirme yöntemleri olarak katlı kavşak senaryosu ve 3 farklı sinyalizasyon sistemi kullanılarak toplamda 5 adet senaryo oluşturulmuştur. Sedaş Kavşağı için oluşturulan bu senaryoların analizlerinden çıkan veri sonuçları değerlendirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, sinyalizasyon sistemi kullanılarak oluşturulan senaryoların beklenen performans iyileştirmelerini sağlayamadığı ve aksine bazı olumsuz sonuçlara yol açtığı görülmüştür. Buna karşın, kavşak geometrisinde yapılan değişikliklerle uygulanan katlı kavşak senaryosunun, Sedaş Kavşağı'ndaki trafik akışını önemli ölçüde iyileştirdiği ve hizmet düzeylerini artırdığı belirlenmiştir. Örneğin, hizmet düzeyi mevcut durumda yaklaşım kollarında B,B,E iken katlı kavşak senaryosunda yaklaşım kollarının tamamı A hizmet düzeyine yükselmiştir. Performans artırma önerilerinde toplu taşıma araçlarının teşvik edilmesi, park ve durma yasaklarının getirilmesi gibi stratejiler de bulunmaktadır. Bu çalışma, kavşak performansının iyileştirilmesine yönelik somut bir adım olup, benzer sorunlarla karşılaşan diğer yerlerde de örnek alınabilir. Bu sebeple, bu çalışmanın sonuçları, benzer problemlere çözüm arayan diğer araştırmacılara ve yerel yönetimlere ışık tutacak niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Ulaşım, Kavşak Performansı, Sedaş Kavşağı

EVALUATING THE IMPACT OF GEOMETRIC DESIGNS ON INTERSECTION PERFORMANCE THROUGH SIMULATION: THE CASE OF SEDAŞ INTERSECTION

ABSTRACT

Transportation has been considered one of the most fundamental elements in ensuring social interaction since the existence of humanity. Population growth and technological advances provide a continuous increase in mobility in urban areas and significantly affect transportation dynamics within the city. This situation emphasizes the need for an effective transportation system in order to increase the quality of life of individuals and support economic activities. Sustainable transportation both increases the livability of cities by reducing environmental impacts and supports social welfare and economic development. For this reason, the need for sustainable transportation systems is increasing with the increase in urban mobility, and more importance and investment is required in this area.

In road transportation, which is an important component of transportation systems, intersections play a critical role in terms of both human and freight transportation. The increasing number of vehicles at intersections increases traffic load and intersection performance needs to be planned effectively. In this study, intersection performance evaluation was made for Sedaş Intersection, which is located in Adapazarı district of Sakarya province and is used intensively by people. The data obtained from Sedaş Intersection was analyzed with PTV Vissim microsimulation program. In this program, a total of 5 scenarios were created using the current situation scenario and the multi-level intersection scenario and 3 different signaling systems as improvement methods that can increase intersection performance. The data results obtained from the analysis of these scenarios created for Sedaş Intersection were evaluated.

As a result of this study, it was observed that the scenarios created using the signaling system did not provide the expected performance improvements and on the contrary, led to some negative results. On the other hand, it was determined that the multi-level junction scenario implemented with the changes made in the intersection geometry significantly improved the traffic flow at the Sedaş Intersection and increased the service levels. For example, while the service level is currently B, B, E on the approach arms, all of the approach arms increased to A service level in the multi-level junction scenario. Performance improvement suggestions also include strategies such as encouraging public transportation vehicles and imposing parking and stopping bans. This study is a concrete step towards improving intersection performance and can be taken as an example in other places facing similar problems. For this reason, the results of this study will shed light on other researchers and local governments seeking solutions to similar problems.

Keywords: Sustainable Transportation, Intersection Performance, Sedaş Interchange

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ulaşım, insanların veya eşyaların bir yerden başka bir yere taşınması anlamına gelmektedir ve bu hareketler trafik olarak adlandırılır. Dünya genelinde hızla artan nüfus, gelişen teknoloji ve buna bağlı olarak yükselen araç sahipliği, mevcut yolların yetersiz hale gelmesine yol açmaktadır (Baş ve diğ, 2020). Bu durum, kentsel hareketliliğin artışına yol açarken, aynı zamanda sürdürülebilirlik ilkelerinin önemini de vurgulamaktadır.

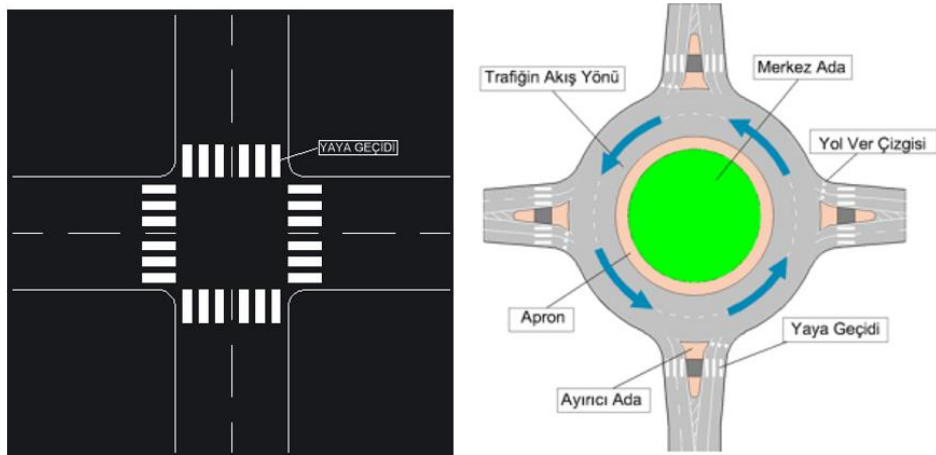
İnşaat sektörü, toplumsal, çevresel ve ekonomik etkileri nedeniyle hem ulusal hem de uluslararası düzeyde büyük bir öneme sahiptir ve sürdürülebilirlik kavramıyla yakından ilişkilidir. Doğal kaynakların büyük bir bölümünü tüketerek çevre kirliliğine yol açan bu sektör, hammaddelerin çıkarılmasından yapım, kullanım ve yıkım aşamalarına kadar enerji tüketmektedir. Ayrıca, inşaat projeleri genellikle ulaşım altyapısını da kapsadığından, bu projelerin sürdürülebilir ulaşım ilkelerine uygun olarak planlanması büyük önem arz etmektedir. Hem inşaat hem de ulaşım sektörlerinde enerji verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılması, sürdürülebilirlik açısından kritik unsurlardır. Bu nedenle, sürdürülebilirlik, inşaat ve ulaşım sektörleri için giderek daha cazip bir konu haline gelmiştir (Dikmen ve Gültekin, 2011). Bu kapsamda hava kirliliğine neden olan kirleticilerin dağılımına baktığımızda, özellikle sanayi sektörü %19, meskenler %16, termik santraller %18 ve motorlu taşıtlar %47 oranında katkı sağlamaktadır (İ. Acar, 1996).

Sürdürülebilir ulaşım, toplumun tüm kesimlerinin erişim ihtiyaçlarını adil ve dengeli bir şekilde, makul maliyetlerle ve çevreye zarar vermeden karşılamayı amaçlamaktadır. Bu hedef, doğanın kendini yenileyebileceği sınırları aşmadan, verimli kaynak kullanımı ve düşük çevresel etkilerle gerçekleştirilir (Öncü ve Yıldız, t.y.). Sürdürülebilir ulaşımın temeli, erişilebilirlik, ekonomik uygunluk, sosyal eşitlik, güvenlik, konfor ve kolaylık gibi birçok sosyal ve ekonomik faktörlerin güçlendirilmesine dayanır (Çöreköztaş, 2023). Bu kavram, dünya genelinde toplu

ulaşım sistemlerinin öneminin artması ve verimliliğin ön planda tutulmasıyla dikkat çeken bir yaklaşımdır. (Topal, 2019).

Ulaşım alanındaki çalışmaların en temel amaçlarından ikisi olan konfor ve güvenlik, Türkiye'de yaralanmaların önde gelen nedenlerinden biri olan trafik kazalarına odaklanmaktadır. Kamu kurumları, kazaları azaltmak için yoğun bir şekilde çalışmaktadır ve trafik kazaları, topluma büyük bir mali yük getirmektedir (Abdel-Aty ve Radwan, 2000). Trafik kazalarının meydana gelmesinde genellikle önemli rol oynayan iki ana faktör bulunmaktadır. İlki sürücüyle ilgili iken, ikincisi yol tasarımıyla ilgilidir (Peden, 2004). Ulaştırma mühendisleri ve planlamacılar, trafik kazalarını önlemek için kavşak geometrisi ve sinyalizasyon gibi karayolu tasarım unsurlarını araştırmalıdır (Golias, 1997).

Sosyo-ekonomik maliyetler değerlendirildiğinde, trafik kazaları bu maliyetlerin en önemli bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kazaların %90'ı şehir bölgelerinde gerçekleşmekte ve milyonlarca lira ekonomik kayba yol açmaktadır. Özellikle kavşaklarda yoğunlaşan kazalar, kentlerde meydana gelen tüm kazaların %75'ini oluşturmaktadır (TK, 2010). Kavşaklardaki bu yoğunluk ve kazaların getirdiği riskler göz önüne alındığında, gelecekte oluşabilecek problemlerin tahmin edilmesi ve önlemlerin alınması, planlamaların yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, öngörülü bir yaklaşımın benimsenilmesiyle trafik güvenliğinin artırılması ve potansiyel kazaların nlenilmesine katkı sağlanabilir. şekil 1.1'de tipik dört kollu ve dönel bir kavşağın genel tasarımını göstermektedir.



şekil 1. 1 : Tipik dört kollu ve dönel bir kavşağın genel tasarımı.

Ulaşım sistemlerinde, güvenli, konforlu ve hızlı bir ulaşım sağlamak için yol güzergahları, kavşak tipleri ve sinyalizasyon gibi unsurların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, mevcut ve gelecekteki trafik artışları öngörülerek ulaşım sistemi, yollar ve trafiğe etki eden tüm faktörler buna göre modellenmelidir. Modellemeler yapılırken, benzetim yöntemlerinden yararlanır ve bu yöntemler içinde trafik simülasyonları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Simülasyonlar, alternatif çözüm önerilerinin etkili bir şekilde analiz edilmesini sağlayarak, güvenli ve düşük maliyetli çözümlerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Park ve Schneeberger, 2003).

Simülasyon programları, örneğin Vissim, Aimsun ve Sumo gibi yazılımlar, trafik mühendisleri ve planlamacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu programlar, ulaşım sistemlerinin modellenmesi ve analiz edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Simülasyonlar, alanda gerçekleştirilecek uygulamalardan önce farklı senaryoların test edilmesine imkan tanımaktadır. Örneğin, bir kavşak veya yol düzenlemesi önerisine ilişkin simülasyonlar sayesinde, olası trafik akışı ve etkileşimleri önceden gözlemlenerek potansiyel sorunlar tespit edilebilir ve çözümler üretilebilmektedir. Bu sayede, maliyetli ve zaman alıcı fiziksel uygulamalardan önce alternatif çözümler analiz edilerek en etkili ve verimli seçenek belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada, Adapazarı ilçesinde bulunan Sedaş kavşağı için çeşitli senaryoların incelenmesine odaklanılmıştır. Bu çerçevede, kavşağın geometrik tasarımında yapılan değişikliklerin ve sinyalizasyon sistemi kurulmasının kavşak performansına olan etkisi araştırılmıştır. Simülasyonlar yardımıyla, mevcut trafik akışı ve kavşak geometrisi göz önünde bulundurularak, önerilen değişikliklerin kavşakta ne tür sonuçlar doğurabileceği önceden değerlendirilmiştir. Bu simülasyonlar, özellikle Vissim mikrosimülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma, kavşakta gerçekleştirilmeden önce potansiyel sonuçların tespit edilmesine ve en uygun çözüme yönelik öneriler geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, maliyetli fiziksel değişikliklerden önce alternatif çözümlerin analiz edilerek en etkili ve verimli yolun belirlenmesi sağlanmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışma, ulaşımın en önemli parçalarından biri olan kavşak performanslarının değerlendirilmesinde geometrik tasarımların etkilerini, özellikle Sakarya ili Adapazarı ilçesinde bulunan Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş. alanı önünde yer alan Sedaş Kavşağı için simülasyon yöntemi kullanarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Araştırma, kavşağın mevcut geometrik yapısını, trafik akış parametrelerini ve kavşak performans göstergelerini kapsamlı bir şekilde inceleyecek ve oluşturulacak senaryolar eşliğinde potansiyel iyileştirmeler için bilimsel dayanaklar sunacaktır. Simülasyon modeli, farklı trafik yoğunlukları altında kavşağın işleyişini ve çeşitli geometrik tasarım senaryolarının trafik akışı üzerindeki etkilerini değerlendirecektir. Bu çalışmanın sonucunda, Sakarya Sedaş Kavşağı'nın ve benzer kavşakların daha verimli ve güvenli hale getirilmesine yönelik pratik öneriler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, kentsel ulaşım planlamasında kavşakların performansının değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Araştırmanın ana amacı, trafik akışını etkileyen faktörlerin analiz edilmesi ve kavşakların verimliliğini artırmaya yönelik pratik önerilerin sunulmasıdır. Tez, bir kavşağın geometrik tasarımı, trafik yönetim stratejileri ve çevresel koşullar gibi çeşitli faktörlerin kavşak performansına etkisini değerlendirmektedir. Bu kapsamda, farklı senaryolar oluşturulacak ve Vissim simülasyon yazılımı kullanılarak kavşakta oluşan trafik akışı simüle edilecektir. Sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda, kavşakların tasarımında ve trafik yönetiminde çevresel etkilerin minimize edilmesine yönelik stratejiler de incelenecek ve önerilecektir. Bu çalışma, kavşak planlaması ve yönetimi konularında mevcut literatüre katkıda bulunmayı hedeflemekte ve daha yaşanabilir şehirlerin oluşturulmasına bilimsel bir temel sağlamayı amaçlamaktadır.

1.3. Tezin Yöntemi

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde, bu tez çalışmasının gerekliliği ve ulaşımında neden simülasyon yöntemine ihtiyaç duyulduğu ele alınmaktadır.

İkinci bölümde, literatür araştırması kapsamında kavşak tipleri ve trafik akımına etkileri, sürdürülebilir ulaşım, kentsel hareketlilik ve planlama, kentsel ulaşım planlamalarında benzetim yöntemleri konuları incelenmektedir. Ayrıca, literatürde mevcut olan benzer çalışmalar değerlendirilerek bu çalışmanın literatüre katkısı belirlenmektedir.

Üçüncü bölümde, Sedaş Kavşağı'ndan elde edilen veriler, kullanılan veri toplama yöntemleri ve oluşturulan senaryolar detaylandırılmaktadır. Farklı geometrik tasarım ve trafik yönetim stratejilerinin kavşak performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, Vissim programında bu analizlerin nasıl uygulandığı, simülasyon sürecinin adımları ve kullanılan parametreler açıklanmaktadır.

Dördüncü bölümde, Vissim simülasyon yazılımı kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Bu bölümde, simülasyon senaryolarından elde edilen veriler ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş ve her bir senaryonun kavşak performansına olan etkisi değerlendirilmiştir.

Beşinci ve son bölümde ise, analiz sonuçları değerlendirilmiş ve bu bulgular temel alınarak tavsiyelerde bulunulmuştur. Bu bölüm, çalışmanın genel sonuçlarını özetlemekte ve kentsel ulaşım planlaması için pratik öneriler sunmaktadır. Elde edilen bulgular, kavşakların verimlilik ve güvenlik açısından iyileştirilmesine önemli katkılarda bulunmaktadır. Ayrıca, yerel yönetimlerin ve şehir planlamacılarının karar alma adımlarına bilimsel bir temel oluşturarak, daha yaşanabilir kentler oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ulaşım sistemlerindeki aksamalar, şehirlerdeki trafik sıkışıklığı gibi faktörler aracılığıyla çeşitli zararlara neden olabilmekte ve toplum üzerinde büyük etkiler yaratabilmektedir. Bu durum, bireylerin günlük yaşamlarında uzun sürelerde harcanan zaman ve enerji kaybına yol açarak verimliliği düşürür ve stres düzeylerini artırır. Ayrıca, trafik sıkışıklığı işletmeler için zaman kaybı ve taşıma maliyetlerinde artışa neden olarak ekonomik açıdan da olumsuz etkiler meydana getirebilir. Ekonomik maliyetler açısından bakıldığında, trafik sıkışıklığının işletmeler için büyük maliyetler oluşturduğu bilinmektedir. Bu durum, ekonomik büyümeyi ve rekabet gücünü olumsuz etkilemektedir.

Trafik sıkışıklığının neden olduğu çevresel ve sağlık sorunları göz ardı edilemez durumdadır. Bu sorunlara bağlı olarak artan hava kirliliği ve sera gazı emisyonları, çevresel sağlık sorunlarını artırarak toplumun genel refahını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla, ulaşım sistemlerindeki aksamaların toplum üzerindeki önemini göz önünde bulundurarak, şehir planlaması ve ulaşım politikalarının geliştirilmesi acil bir gereklilik haline gelmektedir. Bu da hem yerel yönetimlerin hem de bireylerin bu konuya dikkat etmesi ve çözüm için iş birliği yapması gerektiğini vurgulamaktadır.

Ulaşım sistemlerindeki aksamaların azaltılması için kavşak geometrik tasarımları, sinyalizasyon sistemleri ve sürdürülebilir ulaşım yaklaşımları gibi faktörlerin önemi büyüktür. Kavşaklar, trafik akışının düzenlenmesi ve güvenliği açısından kritik bir role sahiptir. Doğru geometrik tasarım ve etkili sinyalizasyon sistemleri, trafik sıkışıklığını azaltmakta, trafik akışını hızlandırmakta ve kazaları önleyebilmektedir. Örneğin, kavşakların yeterli kapasiteye sahip olması ve uygun sinyalizasyon sistemleriyle donatılması, trafik akışının daha düzenli ve hızlı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, sürdürülebilir ulaşım yaklaşımları, toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, bisiklet yollarının oluşturulması ve yaya dostu altyapıların inşası gibi önlemleri içerir. Bu önlemler, trafiği çeşitlendirerek ve araç kullanımını azaltarak

çevresel etkileri azaltabilir ve toplumun yaşam kalitesini artırabilmektedir. Dolayısıyla, kavşak geometrik tasarımları, sinyalizasyon sistemleri ve sürdürülebilir ulaşım yaklaşımları gibi faktörler, ulaşım sistemlerindeki aksamaların azaltılması ve toplumun yaşam kalitesinin artırılması için önem kazanmaktadır.

2.1. Kavşak Tipleri ve Trafik Akımına Etkileri

Kavşaklar, karayolu ulaşım ağının kritik bileşenleridir ve iki veya daha fazla yolların kesişim, birleşim veya ayrılma noktaları olarak tanımlanmaktadır. Kavşakların tasarımı, yol performansı, hız parametresi, güvenlik durumu, işletme maliyeti ve kapasite gibi faktörleri büyük ölçüde etkilemektedir (KGM Yayınları, 2016). Kavşak tipinin seçiminde ise, güvenlik, ortalama gecikme süresi, arazi şartlarının uygunluğu ve ekonomik faktörler gibi parametreler göz önünde bulundurularak, bu kriterlere en iyi şekilde uygun olan kavşak tipinin tercih edilmesi gerekmektedir (Öğütveren, 2019).

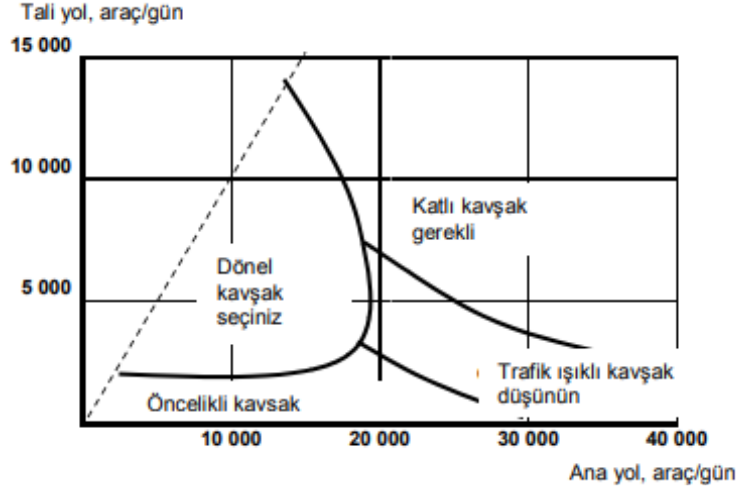
Şehir içi ulaşımında, kavşaklar genellikle trafiğin durma ve yavaşlama noktaları olup, bu bölgeler kaza olasılığının ve gecikmelerin en yoğun olduğu alanlar olarak öne çıkmaktadır (Gedizlioğlu, 1979). Araçların farklı yönlere gitme ihtiyacı, hızların düşmesine, gecikmelerin artmasına ve çevresel kirliliğin yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, kavşakların doğru seçilip en verimli şekilde tasarlanması ve yönetilmesi, trafik akışını iyileştirerek güvenliği artırmak ve çevresel sorunları azaltmak için hayati önem taşımaktadır (Öğütveren, 2019).

Karayollarında motorlu taşıtların artmasından dolayı trafik sorunlarını çözmek için araştırmacılar ulaşım bilimi kapsamında trafik yönetimine odaklanmıştır. Özellikle kavşaklarda meydana gelen kazaların maddi ve manevi zararlarını azaltmak amacıyla, karayolu kesişim noktalarında çeşitli trafik denetim yöntemleri geliştirilmiştir. Sinyalize kavşaklar, dönel kavşaklar ve sinyalize dönel kavşaklar bu denetim tekniklerinin örnekleridir. Bu yöntemlerin temel amacı, araçların kavşakları daha hızlı ve güvenli bir şekilde geçmesini sağlamak ve trafik sıkışıklığını azaltmaktır. Bu sayede, kavşaklardaki trafik akışı düzenlenerek genel yol güvenliği artırılmakta ve trafik tıkanıklıkları minimuma indirilmektedir (Çakıcı, 2014).

Kavşak tipi seçiminde ve planlamasında, bilinmesi gereken trafik özellikleri ve yol geometrik özellikleri şunlardır (Güçmen, 1998):

- Kavşağa gelen taşıt miktarı,
- Trafiğin gün ve hafta içerisindeki değişim dinamikleri,
- Trafiğin bileşimi, yani otomobil, kamyon gibi taşıt türlerinin toplam trafikteki oranları,
- Her kavşak kolundan gelmekte olan trafiğin, sağ yöne ve sol yöne dönüşler ile düz geçişler için pik saatlerdeki miktarları,
- Kent içindeki kavşaklar için, kavşağın çevresindeki terminal, otopark, garaj gibi yerlerin durumları ve kavşağa olan mesafeleri,
- Kent içi kavşaklar için, yolcu taşımacılığı yapan kamu araçlarının miktarı ve bu araçlara ait tesislerin kavşağa olan mesafeleri,
- Kavşağa bağlanan yolların sayısı,
- Kavşaktaki görüş mesafeleri,
- Kavşaktan önce ve kavşaktan sonra bulunan kavşaklara mesafeleri,
- Kavşak bölgesinin topografik durumu,
- Kavşağa bağlanan yolların eğimleridir.

Sinyalize kavşakların daha uygun ve sosyoekonomik açıdan avantajlı olduğu durumlar dışında, genellikle daha güvenli kabul edilen dönel kavşaklar tercih edilmelidir. Ancak, dönel kavşakların kullanımının zor olduğu yollar ve arazi koşullarının elverişsiz olduğu bölgelerde sinyalize kavşaklar tercih edilebilmektedir. Kavşağın, çoğunlukla sinyalize kavşakların kullanıldığı bir bölgede yer alması veya eşgüdümlü çalışan kavşak grubunun bir parçası olması durumunda sinyalize kavşak seçimi daha uygun olacaktır. Trafik yoğunluğunun fazla olduğu yollarda, dönel kavşaklara kıyasla sinyalize kavşaklarda oluşan gecikmelerin daha kısa olması nedeniyle sinyalize kavşaklar tercih edilmektedir. Trafik hacmi ve kavşak seçimi ilişkisi grafiği Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, anayol ve yan yollardaki günlük trafik hacminin artması, kavşak çözümlerinin sinyalize ve katlı kavşak tasarımlarını gerektirdiğini göstermektedir (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).



Şekil 2. 1 : Trafik hacmi ve kavşak seçimi ilişkisi (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).

2.1.1. Eşdüzey Kavşaklar ve Tasarım Parametreleri

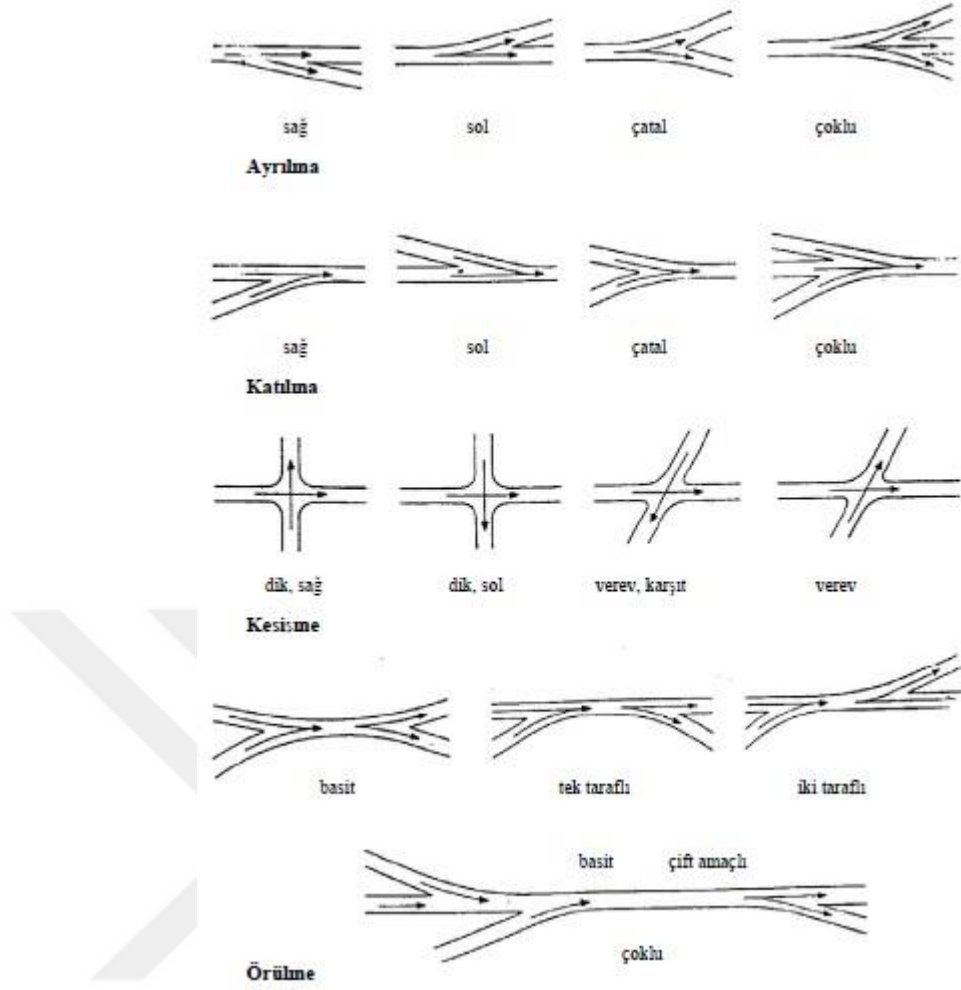
Eşdüzey (hemzemin) kavşaklar, birden çok karayollarının aynı seviyede kesiştiği noktalardır ve farklı yönlerde ait trafik akımlarının ortak kullandığı yol alanlarıdır. Kavşağa giren ve çıkan yolların trafik hacimleri, arazi durumu ve yaya ile taşıt güvenliği kriterleri dikkate alınarak öncelikli şekilde değerlendirilir (KGM Yayınları, 2016).

Eşdüzey kavşaklar, yaklaşım kolları sayısı yönünden üç kollu kavşaklar (T veya Y kavşak tipleri), dört kollu kavşaklar ve çok kollu kavşaklar olarak gruplanmaktadır (KGM Yayınları, 2016).

Trafik kontrol sistemi bakımından eşdüzey kavşaklar, sinyalize olan kavşaklar ve sinyalize olmayan kavşaklar olarak gruplandırılmaktadır (KGM Yayınları, 2016).

Kapasiteyi artırmak ve trafik akışını yönlendirmek amacıyla eşdüzey kavşaklar, kanalize edilmiş kavşaklar ve kanalize edilmemiş kavşaklar olarak sınıflandırılmaktadır (KGM Yayınları, 2016).

Eşdüzey kavşaklarda dört ana trafik hareketi bulunmaktadır: ayrılma, katılma, kesişme ve örülme şeklinde sıralanabilir (KGM Yayınları, 2007). Eşdüzey kavşak uygulamalarında trafik akışı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2 : Eşdüzey kavşak uygulamalarında trafik akışı (KGM Yayınları, 2016).

Kentsel ulaşım ağlarında kavşaklar çoğunlukla eşdüzey kavşaklar olarak planlanmakta ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak kontrollü veya kontrolsüz şekilde işletilmektedir. Düşük trafik yoğunluğuna sahip kavşaklar kontrolsüz, yüksek yoğunluğa sahip olanlar ise kontrollü olarak yönetilmektedir. Kontrollü eşdüzey kavşaklar, genellikle sinyalizasyon ve dönel kavşaklar olarak tasarlanmaktadır. Sinyalizasyon kavşaklar trafik ışıkları ile yönlendirilirken, dönel kavşaklar trafiği döner bir yapı içinde akıcı hale getirmektedir. Bu tasarımlar, kent içi trafik hareketlerini düzenlemek ve güvenliği artırmak için kullanılmaktadır (Erol, 2018).

Eşdüzey kavşaklar trafik kazalarının, taşıt gecikmelerinin ve trafik tıkanıklıklarının daha sık görüldüğü noktalardır. Yatırım maliyetlerinin ekonomik olması ve yolların geometrik özelliklerinin uygulanabilirliği açısından tercih edilmektedirler (Öğütveren, 2019).

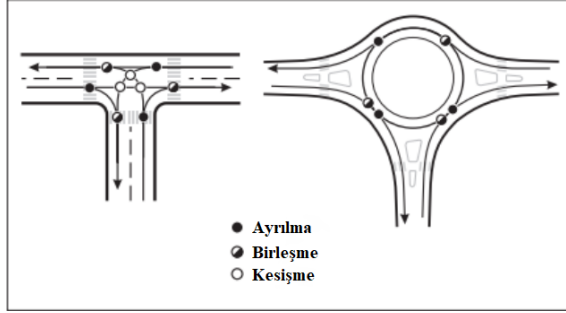
Eşdüzey kavşağın bir çeşidi olan dönel kavşaklar, özellikle İngiltere'de Kasım 1966'da "Dönen araç geçiş önceliğine sahiptir" kuralının kabul edilmesinden sonra hızla gelişmiş ve Avrupa'da yaygınlaşmıştır. Bu kural, dönel kavşakların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamakta ve trafik akışını düzenlemektedir (Öğütveren, 2019). Dönel kavşakların çalışması, güvenliği ve kapasitesi, geometrik elemanlarına bağlıdır. Doğru tasarlanmış bir dönel kavşak, güvenliği en üst düzeye çıkarmakta ve kullanım verimliliğini artırmaktadır. Kavşağın beklenen performansta çalışması için geometrik elemanların standartlara uygun bir biçimde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu tasarım, olası kaza riskini azaltmakta ve kavşak performansını büyük ölçüde artırmaktadır (Çakıcı, 2014). Bu nedenle, dönel kavşakların tasarım ve projelendirme süreci büyük önem taşımaktadır; geometrik elemanların uyumlu ve etkileşim halinde çalışması sağlanmalıdır (Özinal ve Uz, 2021).

Modern dönel kavşaklarda, trafik akışı merkezi bir ada etrafında yönlendirilmekte ve adada bulunan araçlara öncelik verilmektedir. Bu yöntemle kesişmelerin kısmen kontrol altına alınması amaçlanmaktadır. Araştırmalar, bu tip kavşaklarda yakıt tüketimi, hava kirliliği, durma ve gecikme sürelerinde, kaza sayılarında ortalama %40 düzeyinde azalma sağlandığını göstermektedir (Güzel, 2021).

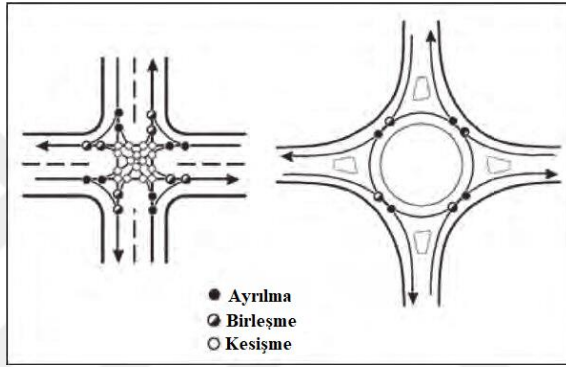
Dönel kavşaklar, klasik kavşak türlerine göre daha az çakışma noktası barındırır ve kesişme çakışmaları yerine daha az tehlikeli olan örülme çakışmalarına sahiptir. Merkez adanın hız azaltma etkisi ve dik, kafa kafaya çarpışmaları önlemesi, dönel kavşakları kontrolsüz kavşaklara göre daha güvenli yapmaktadır (Saplıoğlu ve Karşahin, 2010).

Dönel kavşaklar çoğunlukla üç veya dört kollu olarak tasarlanır, çünkü dörtten fazla kola sahip olmaları trafik akışını zorlaştırıp ve güvenliği olumsuz etkilemektedir (Ordu ve Kırbaş, 2021). Klasik üç kollu kavşaklar ile üç kollu dönel kavşaklar karşılaştırıldığında, taşıtların muhtemel çakışma noktaları klasik üç kollu kavşaklarda 9, üç kollu dönel kavşaklarda ise 6 olduğu Şekil 2.3'de görülmektedir. Ayrıca, dönel kavşaklarda kesişme türü çakışmaların olmaması, kaza riskini azaltan önemli bir faktördür. Aynı durum hemzemin kontrolsüz dört kollu kavşaklar ve dört kollu dönel kavşaklar karşılaştırıldığında da görülmektedir. Şekil 2.4'de kontrolsüz dört kollu kavşakta çakışma noktalarının sayısının 32 adet, dört kollu dönel kavşak tipinde ise bu sayı 8 adet olmaktadır. Bu durum, dönel kavşakların yol güvenliğini artırdığını ve

sürücülerin hızlarını düşürmek zorunda kalmaları nedeniyle kaza risklerinin azaldığını göstermektedir (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).



Şekil 2. 3 : 3 kollu kavşakların çakışma noktaları (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).



Şekil 2. 4 : 4 kollu kavşakların çakışma noktaları (Bozkurt ve Yılmaz, 2020).

Dönel kavşak tiplerinin geometrik özellikleri, kavşak performansını önemli ölçüde etkilemektedir. İyi projelendirilmiş bir kavşak, kapasitenin yanı sıra güvenliği de artıracaktır. Dönel kavşak tiplerinin tasarımlarında göz önüne alınması gereken ana elemanlar şunlardır (Tanyel, 2001):

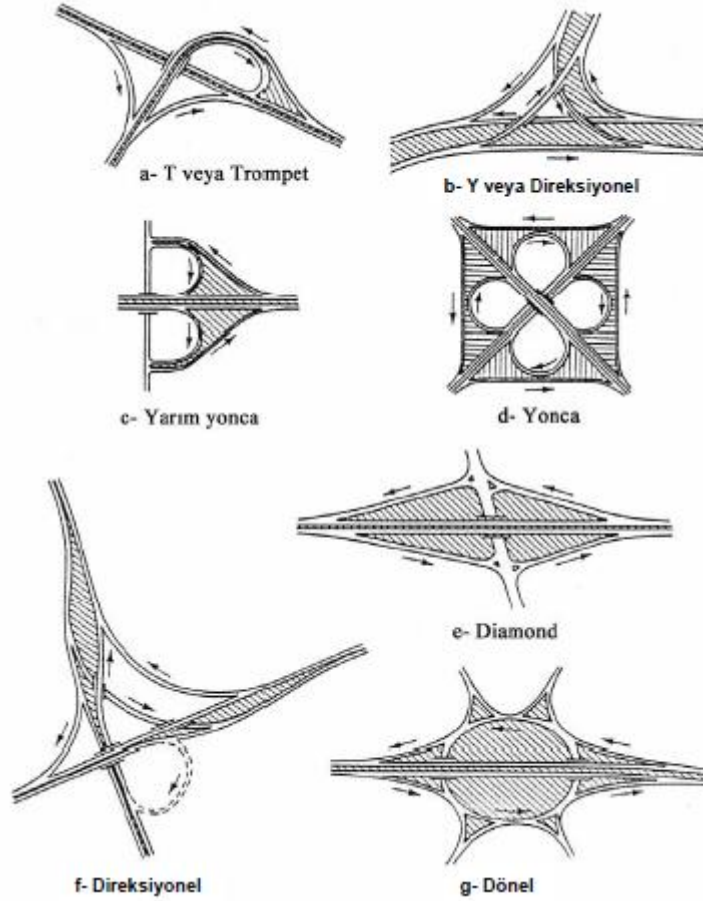
- Proje kapsamındaki araç türü ve hızı,
- Görüş mesafeleri,
- Sapma derecesi miktarı,
- Merkez adası çap uzunluğu,
- Dönüş şeridi ölçüsü,
- Giriş ve çıkış şerit miktarı,
- Ayırıcı ada,
- Yatay ve düşey işaretlemeler,

- Aydınlatma yer almaktadır.

Bu elemanların doğru bir şekilde ele alınması, kavşakların verimli ve güvenli bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır.

2.1.2. Farklı Düzeyli Kavşaklar ve Tasarım Parametreleri

Farklı seviyeli kavşaklar, birden fazla karayolunun çeşitli yüksekliklerde kesişmesi ve birleşmesiyle oluşturulan kavşaklardır. Bu tür kavşaklar, karşılıklı geçişlerdeki çakışmaları tamamen ortadan kaldırmak ve dönüşlerdeki çakışmaları minimize etmek amacıyla planlanır. Ayrıca maksimum kavşak kapasitesi farklı düzeyli kavşaklar ile sağlanmaktadır. Farklı düzeyli kavşakların standart uygulamaları Şekil 2.5’de gösterilmektedir (KGM Yayınları, 2016).

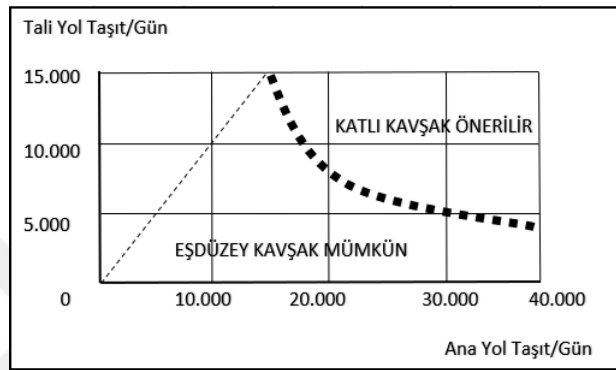


Şekil 2. 5 : Farklı düzeyli kavşak tiplerinin standart uygulamaları (KGM Yayınları, 2016).

Farklı düzeyli kavşaklar, yoğun trafik hacmine ve sıkışıklığa sahip kesişim noktalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kavşakların tasarımı geniş alanlar gerektirdiğinden, maliyetler yükselmektedir. Ancak, bu kavşaklarda kaza

oranları ve ortalama taşıt gecikmeleri oldukça düşük seviyelerde tutulabilmektedir. Bu nedenle, farklı düzey kavşaklar hem güvenliği artırmakta hem de trafik akışını daha verimli hale getirmektedir (Öğütveren, 2019).

Kapasite göz önünde bulundurulduğunda, belirli bir trafik yoğunluğuna kadar eşdüzey kavşak tipleri yeterli performans gösterebilirken, daha fazla yoğunluklarda katlı kavşaklara gereksinimleri bulunmaktadır. Trafik yoğunluğuna göre katlı kavşak gereksinimi aşağıdaki Şekil 2.6'da gösterilmiştir (KGM Yayınları, 2016).



Şekil 2. 6 : Trafik yoğunluğuna göre katlı kavşak gereksinimi (KGM Yayınları, 2016).

Katlı kavşaklar yalnızca farklı yolları birbirine bağlamayarak, kavşağı kullanan değişik türdeki kullanıcı gruplarının yollarını birbirinden ayırabilmektedir. Örneğin, yayaların ana yoldan geçişlerini kesip, tali yolu bağlayan katlı kavşak koluyla ulaşımı sağlamak mümkün olmaktadır (Camcı, 2019).

Farklı düzeyli kavşakların tasarımında en temel unsur, kavşak tipinin doğru seçilmesidir. Bu tür kesişmelerde dönen trafiği düzenlemek için çeşitli temel köprülü kavşak tipleri bulunmaktadır.

Farklı düzeyli kavşak tipinin seçiminde göz önüne alınması gereken faktörler arasında şunlar sıralanabilir:

- Kesişen kolların miktarı,
- Kesişen yolların önemi ve fonksiyonu,
- Transit ve sağ/sol yönlere dönen trafik yoğunluğu,
- Kapasite ve hizmet düzeyi,
- Trafik kompozisyonu ve ağır taşıt oranı,

- Proje tasarım hız oranı,
- Erişim kontrol derecesi,
- Yeryüzü şekilleri ve zemin koşulları,
- Arazi kullanımını ve nüfus yoğunluğu,
- Doğal ve kültürel özellikler,
- Kamulaştırma imkanı ve maliyeti,
- Yakındaki diğer kavşaklarla ilişkisi,
- Yaya hareketleri,
- Tasarım kriterleri ve yapım maliyeti yer almaktadır.

Her bir kavşak tipinin sahip olduğu avantajlar ve dezavantajlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Tasarımcının kavşak tipinin seçimi ve konfigürasyonu üzerinde büyük rolü olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca, işaretleme ve işletme, köprülü kavşak tasarımında önemli bir yer tutmaktadır (KGM Yayınları, 2016).

Trompet kavşak tipleri, ana yolun yoğun olduğu, tali yol ise seyrek trafik yoğunluğunun varlığında katlı kavşak tasarımı olarak tercih edilmektedir. Bu tür kavşaklar, ana yoldaki trafiği düzenlerken tali yolun geğişini de etkili bir şekilde yönlendirmek için kullanılmaktadır. (Camcı, 2019). şekil 2.7'de trompet kavşak örneği verilmiştir.



şekil 2. 7 : Trompet kavşak tipi örneği.

Yonca tipi kavşaklar yaklaşım kollarının kesişme noktalarında sol yöne dönüşü sonlandıran kavşak tipidir. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da farklı yonca tipi kavşak örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 8 : Yonca tipi kavşak örneği.



Şekil 2. 9 : Üç çeyrek yonca tipi kavşak örneği.

Direksiyonel farklı düzeyli kavşak tipleri, kavşağın her rotasına bağlantının yönsel olarak yapıldığı, hızın, kapasitenin ve güvenlik düzeyinin artırıldığı, örülmelerin sonlandırıldığı, yüksek kapasiteli ve nitelikli kavşak tipidir; fakat, birçok yapıya gereksinimi olduğundan maliyeti yüksek olmaktadır. Şekil 2.10’da direksiyonel farklı düzeyli kavşak tipi örneği gösterilmiştir.



Şekil 2. 10 : Direksiyonel farklı düzeyli kavşak örneği.

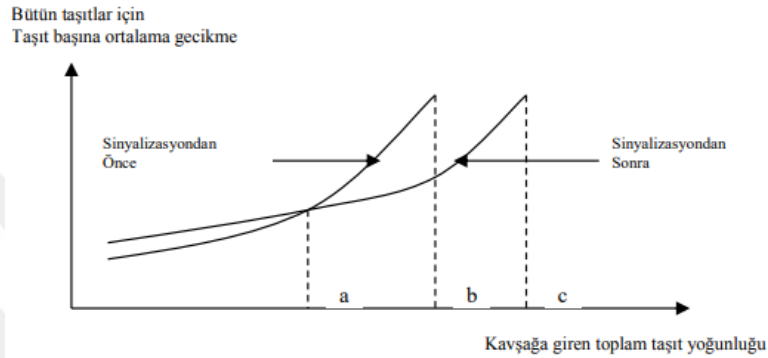
2.1.3. Trafik Sinyalizasyonu

Trafik sinyalizasyon sistemleri, motorlu taşıtlar ve yayaların ışıklı ikazlarla yönlendirilmesi ve geçiş üstünlüklerinin düzenlenmesini sağlayan kritik bir trafik yönetim aracıdır (Firdous ve diğ, 2019). Trafik kazalarını önlemek amacıyla farklı sinyalizasyon sistemleri uygulamaya alınmıştır. Ancak, günümüzdeki sistemler artan trafik yoğunluğunu yeterince düzenleyemediğinden sık sık duraklamalara sebep olmaktadır. Bundan dolayı motorlu araç sürücülerine zaman kaybettirmekte ve araçların daha fazla yakıt tüketimine sebebiyet vermektedir. Artan yakıt tüketimi, ülkenin ekonomisine ve çevreye zarar vermektedir. Günümüzde uygulanan akıllı sistemler yardımıyla trafik akışını optimize ederek insanların trafikte harcadığı zamanı azaltmak hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, kavşaklardaki sinyalizasyon sistemleri trafik yoğunluğunu tespit edebilecek bir biçimde tasarlanmaktadır. Taşıt yoğunluğunun olduğu yöne geçiş üstünlüğü verilerek trafik akışı hızlandırılmakta ve gereksiz beklemeler önlenmektedir (Pamuk, 2021). Trafik sinyalleri şu amaçlarla kullanılmaktadır (Ayfer, 1977):

- Trafik tıkanıklıklarını önlemek,
- Yayalar ve araçlar için güvenli geçiş sağlamak ve kaza riskini azaltmak,
- Akım yönlerine göre uygun zaman dilimleri oluşturularak taşıtların bekleme sürelerini dengelemek,
- Trafik hacmi fazla olan yolların yan yollarından gelen sürücülere geçiş hakkı vermek.

Trafik yoğunluğunun taşıt başına ortalama gecikmesinin sinyalizasyona bağlı olarak değişim grafiği Şekil 2.11'de verilmiştir. Taşıt yoğunluklarının düşük olduğu

durumlarda sinyalizasyonun daha yüksek gecikmelere yol açtığı, ancak taşıt yoğunluğu arttıkça sinyalizasyonun olmadığı kavşaklarda gecikmelerin hızla arttığı gözlemlenmiştir. Sinyalizasyonun mevcut olduğu kavşaklarda ise toplam gecikme artsa da, artış hızı daha yavaş seyretmektedir. Şekildeki a noktası, sinyalizasyonun faydalı olmaya başladığı toplam taşıt yoğunluğunu; b noktası, kavşağın normal kapasitesini; c noktası ise sinyalizasyonun kavşağın kapasitesini temsil etmektedir (Ayfer, 1977).



Şekil 2. 11 : Sinyalizasyonun gecikmelere etkisi (Ayfer, 1977).

Mühendislik uygulamaları kullanılarak, trafik akışına ve bölgenin topoğrafyasına uygun kavşaklar belirlenip, sinyalizasyon sistemleri planlanmaktadır (Pamuk, 2021). Büyükşehirlerde artan trafik yoğunluğuna karşı, sürekli aktif sinyal süreleri gerekmektedir (Azimirad ve diğ., 2010). Sinyalize kontrol uygulamaları, sinyal zamanları ve faz değerleri doğrultusunda iki, üç veya dört yönlü trafik kontrolü sağlamaktadır (Ramzanzad ve Rashidy Kanan, 2013). Sinyalize yönetim teknikleri aşağıda açıklanmıştır:

Sabit zamanlı sinyal yönetimi: Araç yoğunluğu miktarının düzenli olduğu kavşaklarda kullanılmaktadır (Dağüstü, 2010). Trafik yoğunluğuna bağlı olarak hesap yapılan sinyal süreleri ve faz sıralamaları kavşak için kaydedilmektedir. Ülkemizde genellikle sabit zamanlı trafik sinyalizasyon sistemleri tercih edilmektedir. Bu sistemlerde, kavşaklar için belirlenen süre programlamalarına göre taşıt ve yaya trafiği eş zamanlı olarak planlanmaktadır. Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri, trafik yoğunluğunun düzenli olduğu kavşaklarda ana yolun sürekli kullanılabilmesini sağlamaktadır (Balta ve Özçelik, 2018).

Trafik uyarlamalı (TU) sinyal yönetimi: Ana yollardaki araç yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde kullanılmakta ve trafik lambalarının yeşil renkte kalma sürelerini

trafik yoğunluğuna göre ayarlanmaktadır (Güler, 2013). Kavşaklardaki sensörler, yan yollardan gelen araçları tespit ederek sinyal sürelerini düzenlemekte ve bu yollardan gelen araçların geçişine izin vermektedir. Trafik kontrol merkezi ile kavşaklar arasındaki düzenli iletişim sayesinde, trafikteki yoğunluk kesişim süreleri ayarlanmaktadır ve sistem verimliliği artırılmaktadır (Pamuk, 2021).

Dinamik sinyal yönetimi: Anayol ve yan yollar için vasıta yoğunlukları sensörler aracılığıyla belirlenmekte ve sinyal süreleri anlık durumlara göre ayarlanmaktadır (Yılmaz ve diğ, 2019). Bu sistemde, vasıta yoğunluğu arttıkça yeşil ışık sürelerinin devamlı değişerek sinyal yönetimi yapılmaktadır (Pamuk, 2021).

Adaptif sinyal yönetimi: Vasıta algılayıcı denetimlerdeki iletişim ve mikro kontrol teknolojilerine dayalı olarak gelişmekte olup, ileri trafik yönetim sistemlerinin bir faktörü olarak tanımlanmaktadır (Gülsün ve Gonca, 2019). Bu sistemde, tüm kollardan gelen araçlar algılanarak ve araç yoğunluğuna göre geçiş önceliği belirlenmektedir. Algılayıcılar ve sensörlerden gelen veriler farklı algoritmalarla işlenerek kavşanın ihtiyaı olan sinyal zamanları eşgüdümlü olarak ayarlanmaktadır. Sistemin ne çıkan avantajları, trafik akış halindeki değişime hızla tepki verebilmesi, trafikteki kuyruk mesafesini algılayarak gecikmeleri en aza indirmesi ve araç hızlarına göre gecikme sürelerini otomatik olarak ayarlayabilmesidir (Pamuk, 2021).

Yeşil dalga koordinasyonu ve sinyal yönetimi: Yeşil dalga koordinasyonu, ardışık kavşaklarda optimal sinyalizasyon yönetimi ile vasıtaların bir kavşaktan yeşil ışıkta hareket ederek diğer kavşaklarda da kırmızı ışık beklemeden yeşil ışıkta geçmelerini sağlamaktadır (zkaya ve Seyfi, 2016)

2.1.3.1. Sinyalizasyon Kavramları

ışıklı sinyal: Bir veya birçok ünitenin ışıkla anlamlı bir komut vermesi.

Yeşil ışık: Yolun geçişe uygun olduğunu belirten işaret.

Sarı ışık: Araçların beklemeye hazırlanmaları amacıyla uyaran işaret ışığı olup, kırmızı ışıkla kullanıldığında kalkmaya hazırlanması gerektiği komutunu verir.

Kırmızı ışık: Yaya ve taşıtların durma komutu işareti.

Uyarıcı (Dedektör): Araç yoğunluğuna göre geçiş sürelerini ayarlamak için veri kaydeden cihaz.

İzole sistem: Bağımsız çalışan sinyalizasyon sistemi.

Koordine sistem: Aynı yolda en az iki farklı sinyalizasyon sistemlerinin birbiriyle uyumlu çalışması.

Senkronize sistem: Koordine kavşaklarda eş zamanlı olarak aynı ışıklı sinyalleri veren sistem.

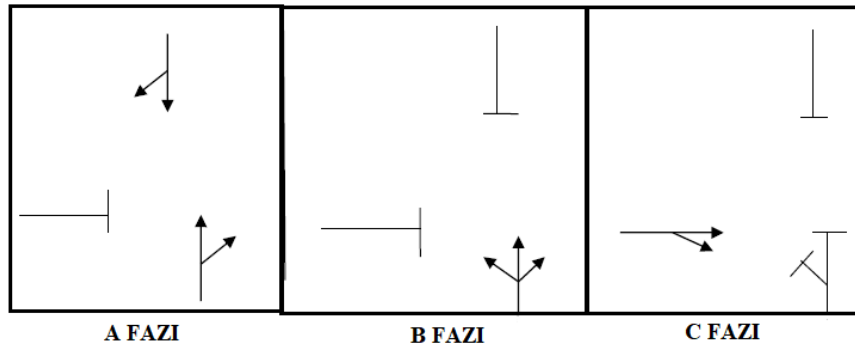
Alternatif sistem: Sıralı kavşaklarda sırayla birbirlerine karşıt sinyaller veren sistem.

Progresif sistem: Kavşak noktasında geçme hakkına sahip olan taşıtın, diğer koordine kavşaklar içerisinde de beklemeden geçme hakkına sahip olmasını sağlayan sistem.

Trafik uyarımalı sinyal düzeni (TUSD): Taşıt yoğunluğunu dikkate alarak geçiş hakkının sırası ve sürelerinin ayarlandığı düzen.

Yaya uyarımalı sinyal düzeni: Yayaların sinyalleri tetiklemesine göre ayarlanan düzen.

Faz: Bir veya birçok aralığı kapsayarak ve sinyal devresinin belirli bir trafik akımını veya akımlarını yönettiği bölümdür. Şekil 2.12'de bir devrenin faz düzeni örneğini göstermektedir.



Şekil 2. 12 : Faz düzeni örneği.

Sinyal devresi: Sıralı ışıkların bir devri.

Devre süresi: Devrenin tamamlanma süresi.

Yeşiller arası süre: Yeşil sinyalin yanmadığı sürenin toplamı.

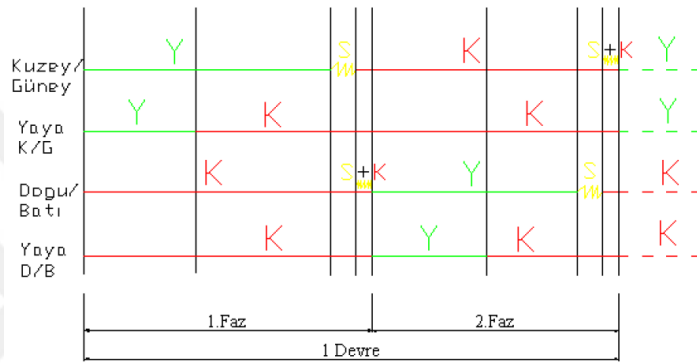
Koruma süresi: Yol içerisinde bulunan son yaya veya taşıtların yol içerisinden çıkıp, başka bir akımın yola giriş yapmasına izin verilen süre.

Kayıp zaman: Bir devre süresince tüm yönlerde yeşil ışığın yanmadığı zamanların toplamı.

Doygun akım: Sürekli kuyruklanma olan kavşakta, serbest geçiş hakkıyla akan trafik akımı.

Doygun akım hacmi: Bir saatlik sürede doygun akımın geçtiği araç sayısı.

Devre düzeni: Kavşağa girecek akımların hangi süre içerisinde yeşil, sarı ve kırmızı ışık olduklarının zaman diyagramında gösterimi. Şekil 2.13'de devre düzeni örneği gösterilmiştir.



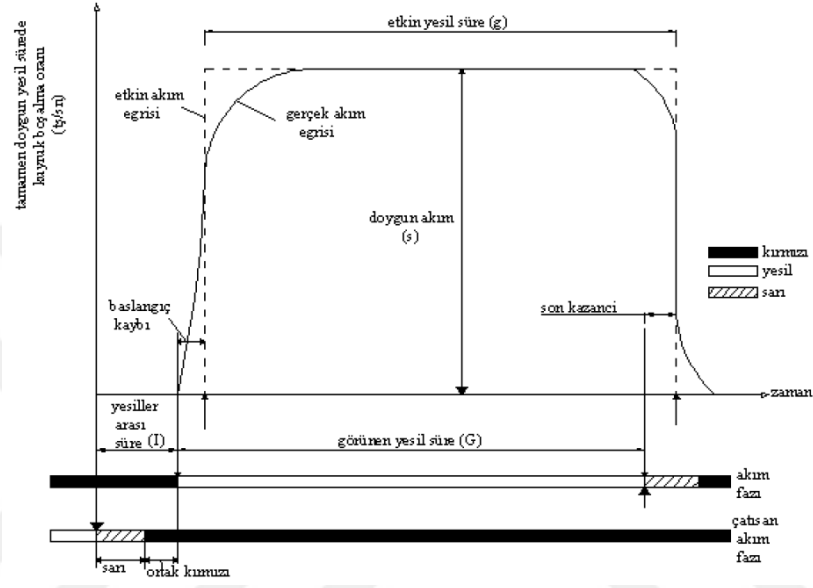
Şekil 2. 13 : Devre düzeni örneği (Çetinkaya, 2008).

2.1.3.2. Kavşak Kapasitesini Etkileyen Parametreler

Işıklı kavşaklarda kırmızı ışıkta taşıtların toplanıp yeşil ışıkta düzenli hareket edebilmeleri, kavşaklarda kapasite kaybının kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu sayede denetimsiz kavşaklara kıyasla %50'ye varan kapasite artışı elde edilebilmektedir. Işıklı bir kavşakta kapasite, şerit sayısı ve türüne bağlı olmasının yanı sıra akım ve devre düzenine göre belirlenmektedir. Kavşağa gelen her akım, belirli aralıklarla ve belirli zaman süresince kavşağa giriş hakkı almaktadır. Bu süre, akımın yeşil süresi olarak adlandırılmaktadır. Yeşil süre, kavşak kapasitesinde önemli rol oynayan faktörlerden biridir (Gedizlioğlu, 2007).

Kavşağın kapasitesini etkileyen başka bir önemli faktör de doygun akım değeridir. Araçların kavşak içerisine girdiği sabit trafik hacmine "doygun akım" denilmektedir. Doygun akım, sonsuz bir kuyruğun kavşağa sürekli giriş hakkı aldığı durumda ortaya çıkan hacimdir. Bir akım için belirlenen yeşil sürenin başlangıcında, durmakta olan araçlar hareket haline geçip kuyruklanma sabit hızla azalmaya başlayana kadar kısa

bir süre kaybı yaşanmaktadır. Başlangıç kaybı olarak adlandırılan bu süreden sonra, kuyruk boyunca beklemekte olan yeterli araç bulunuyorsa, araçlar sabit hızla ve dolayısıyla sabit bir hacimde kavşağa giriş yapmaktadır. Bu sabit hacim, yoldan geçebilecek maksimum hacmi ifade etmektedir. Bu durum, trafik akımına sarı ışık yanana kadar devam etmektedir. Bu durum Şekil 2.14'de gösterilmektedir (Çetinkaya, 2008).



Şekil 2. 14 : Yeşil süre boyunca trafik akımının kavşağa giriş durumu (Çetinkaya, 2008).

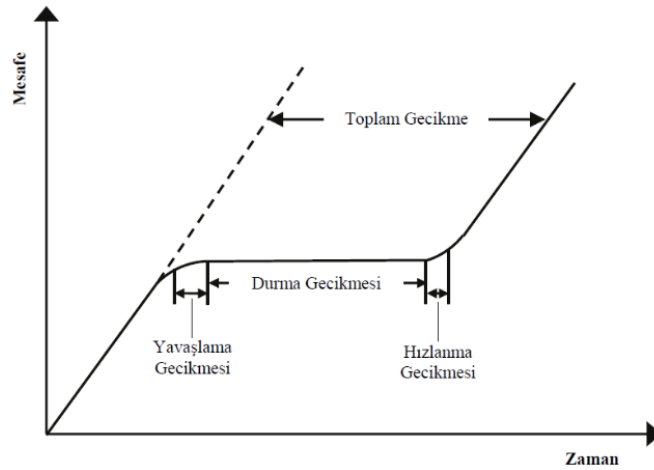
Doygun akım değeri aşağıdaki parametrelere bağlıdır (Çetinkaya, 2008):

- Kavşak geometrisine,
- Kavşak kolunun genişlik ve eğimine,
- Sağ ve sol yöne dönen araçların sayısına,
- Trafik düzenine ve özellikle de ağır taşıt sayısına,
- Yaya faktörüne,
- Park yapan araçların varlığına.

Bu parametreler dışında diğer etkenler de doymuş akım üzerinde etkili olmaktadır. Doymuş akım ve kayıp süre direkt olarak sahada ölçülebilmektedir (Çetinkaya, 2008).

Gecikme, kavşağa yaklaşan taşıtların diğer araçlar, kavşağın geometrik özellikleri, trafik işaretleri ve sinyalizasyon sistemleri gibi nedenlerden dolayı kaybettikleri zaman olarak tanımlanmaktadır. Bu gecikme zamanı, sinyalize olan kavşakların performansını ve hizmet düzey seviyesini belirlemede önemli bir parametredir. Taşıt gecikmesini doğru tahmin edebilmek için Webster, Avustralya (Akçelik) ve HCM (Highway Capacity Manual) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Çakıcı ve Murat, 2016). Hatalı veya eksik gecikme süresi ölçümleri, sinyal sürelerinin etkin belirlenememesine ve uygun olmayan kavşak tasarımlarına neden olabilmektedir. Ölçümlerin dikkatle yapılması, doğru kavşak tasarımı için gereklidir (Ban ve diğ, 2009).

Sinyalize kavşak içerisindeki taşıt gecikmeleri; yavaşlama, durma ve hızlanma gecikmesi ile üç bileşene ayrılmaktadır (Dion ve Kang, 2004). Yavaşlama gecikmesi, sürücünün sinyalizasyon sistemi nedeniyle hızını yavaşlatmaya başladığı andan durmaya başladığı zamana kadar geçmiş süreyi tanımlamaktadır. Durma gecikmesi, aracın sinyalize kavşak içerisinde kırmızı ışık veya yeşil ışıkta durmasından dolayı kaybettiği zamanı, hızlanma gecikme süresi ise kırmızı ışıktan yeşil ışığa dönmesinden sonra aracın tekrardan hızlanması için geçen süreyi kapsamaktadır (Çakıcı ve Murat, 2016). Sinyalize kavşak içerisindeki bir aracın gecikme süresi diyagramı Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2. 15 : Sinyalize kavşak içerisindeki bir aracın gecikme süresi diyagramı (Çakıcı ve Murat, 2016).

Farklı türdeki taşıtların doygun akım üzerindeki etkisi, Şekil 2.16'da gösterilen birim oto eşdeğerleri ile değerlendirilmektedir. Bu birim oto eşdeğerleri kullanılarak hacim düzeltmeleri yapılmaktadır.

1 ağır taşıt	1,75 bo
1 otobüs	2,25 bo
1 tramvay	2,50 bo
1 hafif taşıt	1,00 bo
1 motosiklet	0,33 bo
1 bisiklet	0,20 bo

Şekil 2. 16 : Farklı türden taşıtların birim oto eşdeğerleri (Çetinkaya, 2008).

2.1.3.3. Webster (İngiliz) Yöntemi

Webster yöntemi gereğince, sinyal kontrollü bir kavşağın kapasitesi, bu kavşaktan geçebilecek taşıt miktarına bağlıdır; bu miktar ise trafiğe verilen yeşil ışık süresine ve yeşil ışık süresince dur çizgisinden geçen en yüksek taşıt sayısına bağlı olmaktadır. Yeşil ışık yandığında, taşıtların normal akış hızına ulaşmaları için birkaç saniyeye ihtiyaçları bulunmaktadır. Bu süre geçtikten sonra, kuyruklanma sabit bir oranda çözülmektedir ve bu sabit orana doygun akım denilmektedir (Çetinkaya, 2008).

Yeşil ışık ve sarı ışık sürelerini kapsayan zaman diliminde bir "etkin yeşil süre" ve bir "kayıp süre" tanımlanabilmektedir. Trafik akımın hacminin doygun akım olarak geçtiği süreye etkin yeşil süre denilmektedir. Kayıp süre ise, trafik akımının durduğu zamandır, yani kavşağa yeşil ışık anında giren son taşıtın kırmızı ışık yandıktan sonra kavşaktan güvenle çıkabilmesi için ihtiyaç duyulan süre olmaktadır. Kayıp süreye, koruma süresi veya yeşiller arası süre de denilmektedir. Kapasiteye bu bağlamda, etkin yeşil süre değeri ile doğru orantılı olmaktadır (Çetinkaya, 2008).

Kavşak kolunun kapasitesini hesaplama amacıyla kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

$$c = \frac{g * s}{D} (ta/sa) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de görülen parametreler:

c: Kavşak kolundaki kapasite oranı (ta/sa),

g: Etkin yeşil süresi (sn),

s: Doygun akım değeri (ta/sa),

D: Devre süresi değeri (sn).

Etkin yeşil süre değeri, aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır:

$$g = G - l \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de görülen parametreler:

G: Görünen yeşil süresi (sn)

l: Kayıp süre değeri (sn)

Webster yönteminde, kavşak kapasitesi devre içerisindeki kayıp sürelerinin toplamına (L) bağlıdır. Aşağıdaki formülle toplam kayıp süre hesaplanır:

$$L = \sum(I - a) + \sum l \quad (2.3)$$

Denklem 2.3’ de görülen parametreler:

I: Yeşiller arası süre,

a: Sarı ışık süresi,

l: Bir fazdaki kayıp süre.

Webster yönteminde, bir faz içindeki kayıp süre toplamı, yeşiller arası süreden sarı ışık süresi çıkartılarak ve bir fazdaki kayıp sürelerin toplamı ile hesaplanmaktadır. Bir fazdaki kayıp süre (l), başlangıç kaybı ve fazın sarı ışık süresinin ikinci yarısının toplamıdır. Bir devrenin tüm fazlarındaki kayıp sürelerinin dışında olan süreye yararlı süre denilmektedir ve bu süre fazlar arasında dağıtılır.

Her faz içindeki ağırlıklı akım hacim değerinin, doygun akım değerine olan oranı akım oranı olarak tanımlanmaktadır. Webster yöntemi için buradaki oran, doygunluk derecesi olarak tanımlanmaktadır. Doygunluk derecesi değeri “y” harfi ile gösterilirse, kavşağa bir devrede gelen tüm trafiği geçirecek uygun uzunlukta devre süresi (D_m) denklem 2.4 ile hesaplanır:

$$D_m = \frac{L}{1 - Y} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4’de görülen “Y” değeri, her bir fazdaki “y” değerlerinin toplamı olmaktadır.

Kavşaktaki toplam gecikme süresi değerini minimuma indirecek yeterli devre süresi için F.V. Webster tarafından geliştirilmiş Optimum Devre Süresi modeli kullanılır:

$$D_0 = \frac{\phi * L + 5}{1 - Y} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5’de görülen parametreler:

D₀: Optimum devre süresi (sn),

L: Bir devredeki toplam kayıp süre,

Y: Her fazın kritik akımlar doğrultusunda doyumluk derecelerinin toplamı,

φ: 1,2-1,8 arasında şartlara bağlı olarak seçilen değişken katsayı değeri.

Hesaplanmış devre süresi değerinin her faza dağıtılması için, ilk önce etkin yeşil süre değeri, devre süresi değerinden kayıp süresi değeri çıkartılarak bulunmaktadır ve her faz için kritik akım oranı doğrultusunda dağıtılmaktadır. Denklem 2.6’da hesap formülü gösterilmektedir:

$$g_{etkin} = D - L \quad (2.6)$$

Etkin yeşil süresi değerinin iki fazı olan devre için fazlara dağılımı şu şekilde yapılır:

$$g_1 = \frac{g_{etkin} * y_1}{Y} \quad (2.7)$$

$$g_2 = \frac{g_{etkin} * y_2}{Y}$$

2.1.3.4. Yolların Kapasitesi El Kitabı Yöntemi (HCM: Highway Capacity Manual, 1985)

Yolların kapasitesi el kitabı yöntemi doğrultusunda yolların kapasitesi, kavşak kolları için ayrı olarak tanımlanmaktadır. Kavşak kolunun kapasite değeri, mevcut durumdaki trafik, geometri biçimi ve sinyalizasyon koşullarına göre kolun kavşak içerisinden geçirebileceği maksimum kapasitesi olarak belirlenmektedir. Kavşak

kolu içindeki akım oranı, kolun geçirdiği gerçek hacmin doymun akıma oranı olarak tanımlanmaktadır.

Bir kavşak kolunun veya şerit grubunun kapasitesi şu denklem ile tanımlanabilir:

$$c_i = s_i * \left(\frac{g}{D}\right)_i \quad (2.8)$$

Denklem 2.8’de görülen parametreler:

c_i : i kavşak kolunun veya şerit grubunun kapasite değeri (ta/sa),

s_i : i kavşak kolu veya şerit grubunun doymun akım değeri,

$(g / D)_i$: i kavşak kolunun veya şerit grubunun yeşil süre oranı.

Akım değerinin kapasite değerine oranı (q/c), doymunluk derecesi olarak tanımlanmaktadır. Bir kavşak kolunun veya şerit grubunun doymunluk derecesi denklem 2.9 ile tanımlanabilmektedir:

$$x_i = \left(\frac{q}{c}\right)_i = \frac{(q * D)_i}{(s * g)_i} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9’ da görülen parametreler,

x_i : i kavşak kolunun veya şerit grubunun doymunluk derecesi,

q_i : i kavşak kolunun veya şerit grubunun akım değeri,

g_i : i kavşak kolunun veya şerit grubunun etkin yeşil süresi.

Kavşak için kritik hacim/kapasite oranı (doymunluk derecesi) denklem 2.10 ile tanımlanabilmektedir:

$$x_c = \sum \left(\frac{q}{s}\right)_{ci} * \left[\frac{D}{D - L}\right] \quad (2.10)$$

Denklem 2.10’da görülen parametreler,

x_c : Kavşağın kritik hacim/kapasite oranı (doymunluk derecesi),

$\sum(q/s)_{ci}$: Tüm fazların kritik akım veya akımlara ait akım oranları toplamı değeri,

D : Devre süresi değeri (sn),

L : Devre içindeki toplam kayıp süresi değeri (sn).

Yolların kapasitesi el kitabı yöntemine göre, tüm kavşak kollarında aynı anda doygun hale gelmesinin nadir görüldüğünü belirterek, kavşak kapasitesini en önemli parametre olarak kabul etmemektedir. Bu yöntem, akımların gecikme yaşamadan kavşaktan geçip geçememesine öncelik vermektedir.

Yolların kapasitesi el kitabı yöntemine göre sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri için devre süresi değeri, denklem 2.11 ile aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$D = \frac{L * X_c}{[X_c - \sum \left(\frac{q}{s}\right)_{ci}]}$$
 (2.11)

Denklem 2.11’de görülen parametreler,

D: Devre süresi değeri (sn),

L: Devre içindeki toplam kayıp süre değeri (sn),

x_c: Kavşağın kritik hacim/kapasite oranı değeri (doygunluk derecesi),

$\sum(q/s)_{ci}$: Her fazdaki kritik akım veya fazların akımlarına ait akım oranları toplamı.

Devre süresi değerinin fazlara dağılımı yapıldığında yeşil süreler aşağıdaki denklem 2.12 ile hesaplanmaktadır. Örnek olarak, iki fazı olan devre için, ilk fazın kritik akımı veya akımların ihtiyacı olan en kısa yeşil süresi uzunluğu, aşağıdaki denklem 2.12 ile belirlenmektedir. İkinci faza ait olan kritik akım veya akımlara ait olan yeşil süre uzunluğu, ilk fazda hesaplanan yeşil süresi değeri ile kayıp süresi değeri toplamının devre süresi değerinden çıkarılmasıyla elde edilen farka eşit olmaktadır.

$$g_i = \frac{q_i * D}{S_i * X_i} = \left(\frac{q}{s}\right)_i * \left(\frac{D}{X_i}\right)$$
 (2.12)

$$g_i - \text{diğer} = D - (g_i + L)$$

Denklem 2.12’ de görülen parametreler,

$(q/s)_i$: i akımına ait akım oranı,

D: Devre süresi (sn),

x_i: i akımının q/c oranı.

2.1.3.5. Avustralya (Akçelik) Yöntemi

Dr. Rahmi Akçelik tarafından hazırlanan ve Avustralya yöntemi olarak bilinen yöntem, ilk kez Avustralya Yol Araştırma Kurumu 1981 yılında yayımlamıştır. Bu yöntemle, sinyalizasyon olan kavşaklar için kapasite ve zaman çözümlenmeleri yapılmaktadır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, fazlar yerine akımlar tek tek dikkate alınmaktadır. Faz kayıp zamanına eşdeğer olarak akım kayıp zaman değerinin kullanılması, önemli bir değişiklik olarak kabul edilmektedir.

Avustralya yönteminde, akımlar ayrı ayrı değerlendirilir. Doymun akım değeri ve akım oranı tüm akımlar için belirlenir; bu verilerle doymunluk derecesi değeri hesaplanabilmektedir. Doymunluk derecesi değerlerine göre kritik akımlar bulunarak bunlar devre süresi ve yeşil ışık süre hesaplamalarında uygulanmaktadır. Bu yöntem bağlamında, ışık olan kavşak içerisinde bir akımın kapasite değeri, kavşakta bu akımın yer aldığı koldan geçebilecek en yüksek hacim değerine (doymun akım) ve bu akım için aktif yeşil sürenin devre süresindeki payına (g/D) bağlı olmaktadır.

Bu yöntemde göre kapasite aşağıdaki denklem 2.13’de tanımlanmaktadır :

$$c = s * \left(\frac{g}{D}\right) \quad (2.13)$$

Denklem 2.13’ de görülen parametreler,

c : Akım kapasite değeri (ta/sa),

s : Doymun akımı,

(g / D) : Yeşil süre oranı,

Başka yöntemlerde ki gibi, bu yöntem içerisinde de akım oranı, akım hacim değerinin doymun akıma oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$y = \frac{q}{s} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14’de görülen parametreler,

y : Akım oranı,

s : Doymun akımı,

q : Akım hacim değeri,

Avustralya yönteminde yer alan ve diğer yöntemlerden farklı olarak kullanılan bir diğer önemli değişken ise, etkin yeşil süresi değerinin devre süresine olan oranı "yeşil süre oranı"dır. Denklem 2.15'e göre yeşil süre oranı hesaplanmaktadır.

$$u = \frac{g}{D} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15'de görülen parametreler,

u : Yeşil süre oranı,

g : Etkin yeşil süresi değeri,

D: Devre süresi.

Başka bir akım değişkeni, varış akımının hacminin doymuş akım değerine oranı şeklinde hesaplanan akım oranıdır.

Akımın kapasiteye oranı, yani doymuşluk derecesi, yeşil süre oranı kullanılarak da ifade edilebilir. Başka bir deyişle, doymuşluk derecesi, akım oranının yeşil süre oranına bölünmesiyle hesaplanmaktadır.

$$x = \left(\frac{q}{c}\right) = \frac{(q * D)}{(s * g)} = \frac{y}{u} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'da görülen parametreler,

x: Doymuşluk derecesi değeri,

q: Akım değeri,

s: Doymuş akım,

g: Etkin yeşil süre.

Bu ifade içerisindeki, akım oranı ve yeşil süre oranı "talep ve arz" ifadelerini temsil eden kontrol parametreleri olarak kabul edilmektedir. Doymuşluk derecesi, bu iki parametreyi birleştiren orandır.

Akım kapasitesi değeri, yeşil süre oranı arttıkça artmaktadır. Yeterli akım kapasitesi sağlamak için aşağıdaki şartlara göre hesaplandırılmalıdır.

$$\begin{aligned} c > q \quad \text{veya} \quad x < 1 \\ s * g > q * D \quad \text{veya} \quad u > y \end{aligned} \quad (2.17)$$

Devre Süresinin değeri optimum devre süresi ve pratik devre süresi olmak üzere iki şekilde hesaplanabilmektedir.

Optimum devre süresi: Optimum devre süresi şu bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$D_0 = \frac{(1,4 + k) * L + 6}{1 - Y} \quad (2.18)$$

Denklem 2.18'de görülen parametreler,

D_0 : Optimum devre süresi (sn)

L: Kavşak kayıp süresi, (Toplam yeşiller arası süre + toplam başlangıç kaybı– toplam son kazancı), (sn)

Y: Kavşak akım oranı (Σy_i)

k: Yakıt tüketimi parametresi (minimum yakıt tüketimine göre $k=0,4$; gecikme zamanının varlığında minimum maliyet olması için $k=0,2$; minimum gecikme değeri hesabı için $k=0$ kullanılabilir.)

Pratik devre süresi: Belirlenmiş olan maksimum kabul edilebilir doygunluk derecesi değerinin altında kalan akımlar için minimum devre süresini belirleyen süre, pratik devre süresi olarak adlandırılmaktadır ve aşağıdaki şekil ile ifade edilebilmektedir:

$$D_p = \frac{L}{1 - U} \quad (2.19)$$

Denklem 2.19'da görülen parametreler,

D_p : Pratik devre süresi (sn)

L: Kavşak kayıp süresi, (Toplam yeşiller arası süre + toplam başlangıç kaybı – toplam son kazancı), (sn)

U: Kavşak yeşil süre oranı,

Devre süresi seçimi: Teoride, D_0 ve D_p için kullanılan bağıntılar ile devre süresi hesaplanabilmektedir. Ancak, her iki devre süresinin hesaplanmasından sonra, uygun bir devre süresinin seçilmesi tavsiye edilmektedir. Ayrıca, maksimum kabul edilebilir devre süresi (D_{max} ; örneğin 120 saniye) gibi bir kısıtlama da bulunmaktadır. Bu nedenle, seçilen devre süresinin ideal olarak $D \leq D_{max}$ şartını sağlaması gerekmektedir (Çetinkaya, 2008).

Seçimi yapılan bir devre süresine göre yeşil ışık süreleri 3 adımda hesaplanabilmektedir (Çetinkaya, 2008):

- Kritik akımların yeşil süre uzunluklarının belirlenmesi,
- Kritik olmayan akımların yeşil süre uzunluklarının belirlenmesi,
- Yeşil sürelerinin fazlar için belirlenmesi.

Kritik akım araştırma diyagramına göre hesap işlemleri yapılmalıdır. Bu diyagram, genellikle tekrarlı akımların (art arda gelen iki ya da daha çok faz süresince geçiş hakkına sahip olan; yeşil süreye sahip akımların) yer aldığı durumlarda, kritik ve kritik olmayan akımların birbiri ile ilişkisini ve akımlar ile fazların arasındaki bağlantıyı yansıtmada faydalı olmaktadır. Bu yöntemine göre, denklem 2.20'de belirtilen genel akım-faz süresi arasındaki ilişki, yeşil süre hesaplamaları için formüllerin temelini oluşturmaktadır (Çetinkaya, 2008).

$$\sum_{i=1}^k (g + l) = \sum_{i=1}^{k-1} (G + I) \quad (2.20)$$

Denklem 2.20'de görülen parametreler,

$\Sigma(g+l)$: i fazından k-1 fazına kadar geçiş hakkı bulunan trafik akımlarının toplam süre uzunluğu,

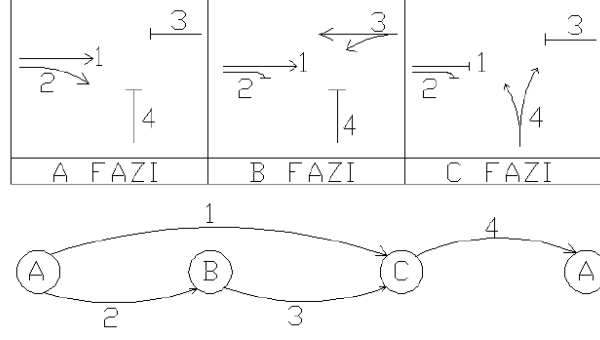
g: Akım yeşil süresi (sn),

l: Kayıp süreler (sn),

G: Faz yeşil süresi değeri (sn),

I: Yeşiller arası süre değeri (i: başlangıç fazı, k: bitiş fazı).

Tekrar eden akımlarda akım faz süresi ilişkisi aşağıdaki Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 17 : Tekrar eden akımlarda akım düzeni (Çetinkaya, 2008).

A ve B fazları süresince geçiş hakkına sahip olan yani tekrarlı akım 1 Akımı gibi akımlarda akım faz süresi ilişkisi denklem 2.21'de gösterilmiştir:

$$g_1 + l_1 = G_A + I_A + G_B + I_B = g_2 + l_2 + g_3 + g_3 \quad (2.21)$$

C fazı süresince geçiş hakkına sahip olan 4 Akımı için akım faz süresi ilişkisi denklem 2.22 ile ifade edilmektedir:

$$g_4 + l_4 = G_C + I_C \quad (2.22)$$

Kritik akım yeşil süreleri: Bir devre süresi hesabı için toplam etkin yeşil süre, (D-L) ile ifade edilmektedir. Burada ki L parametresi, kritik akımların kayıp sürelerinin toplamı olmaktadır. Toplam etkin yeşil süresi (g_{etkin}) kritik akımlara denklem 2.23'de belirtildiği gibi dağıtılabilmektedir (Çetinkaya, 2008).

$$g = \left(\frac{D - L}{U} \right) * u \quad (2.23)$$

Denklem 2.23'de görülen parametreler,

u : Kritik akım,

U : Kavşak yeşil süre oranı.

Kritik olmayan akım yeşil süreleri: Kritik olmayan bir akımın, kritik bir akımla aynı faz içerisinde geçiş hakkına sahip olduğu durumda, etkin yeşil süresi denklem 2.24 ile hesaplanmaktadır.

$$g = (g_c + l_c) - l \quad (2.24)$$

Denklem 2.24'de görülen parametreler,

g : Kritik akım yeşil süre değeri,

l : Kritik akım kayıp süre değeri,

I : incelenen akımın kayıp süresi değeri.

Faz yeşil süreleri: Verilen fazın içindeki görünen yeşil süresi değeri denklem 2.25 ile tanımlanmaktadır.

$$G = (g + l) - I \quad (2.25)$$

Denklem 2.25’de görülen parametreler,

$(g + l)$: Sadece o fazda geçiş hakkı tanınan akıma atanılmış süre değeri,

I : Yeşiller arası süre değeri.

2.2. Sürdürülebilir Ulaşım

Sürdürülebilir ulaşım, çevreye minimum zarar vererek insanların, malların ve bilgilerin hareketlilik gereksinimlerini karşılamayı amaçlamaktadır (Yalçiner Ercoşkun, 2021). Ulaşım sistemlerinde sürdürülebilirlik, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlar için önemli bir rol oynamaktadır (Tarhan ve Ercoşkun, 2023). Bu bağlamda, ulaşımın sürdürülebilirlik üzerine etkileri Tablo 2.1’de sunulmuştur. Sürdürülebilir ulaşım için arazi kullanımı ve ulaşımın etkin yönetimi, istikrarlı ve verimli fonlama, gerekli altyapı yatırımları ve komşuluk birimi tasarımına öncelik verilmesi gereken dört temel bileşen olarak belirtilmektedir (Kennedy ve diğ, 2005). Bu kapsamda, çevresel etkilerin en aza indirgenmesi, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımının desteklenmesi ve toplumun genel erişimine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Tablo 2. 1 : Ulaşımın sürdürülebilirlik üzerine etkileri.

Ekonomik	Sosyal	Çevresel
Trafik Tıkanıklığı	Eşitsizlik etkileri	Hava ve su kirliliği
Kazalar	İnsan sağlığına etkileri	Yaşam alanlarının kaybolması
Tesis maliyetleri	Topluluk etkileşimi	Hidrolojik (su kaynakları) etkileri
Tüketici maliyetleri	Topluluk yaşanabilirliği	Yenilenemez doğal kaynakların tükenmesi

Günümüzde ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliği üzerine yapılan araştırmalar, farklı taşıma modlarının etkilerini değerlendirerek sürdürülebilir ulaşım politikaları ve altyapı projelerinin önemini ortaya koymuştur. İstanbul ve Berlin şehirleri incelendiğinde, ulaşımın planlanması ve yönetiminde kurumsallaşmanın ve mevzuat altyapısının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, ulaşım ile ilgili kararların merkezi ve etkili bir şekilde alınması, diğer kurumlarla koordinasyon içinde çalışılması ve arazi kullanımı ve ulaşım planlamasının birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Altuntaş ve Eyigün, 2021).

Sürdürülebilir ulaşım politikaları, toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve bisiklet yollarının teşvik gibi önlemlerle bireylerin araç kullanımını azaltmayı ve çevre dostu ulaşımı teşvik etmeyi hedeflemektedir. Bu politikalar, çekme (pull) ve itme (push) politikaları olarak iki başlık altında ele alınmaktadır. Çekme politikaları, insanları çevre dostu ve ekonomik ulaşım türlerini kullanmaya teşvik etmeyi amaçlamakta, itme politikaları ise insanları ekonomik ve çevresel anlamda verimsiz ulaşım türlerini kullanmaktan vazgeçirmeyi hedeflemektedir (Cirit, 2014).

Sürdürülebilir ulaşımın çevresel boyutu, ulaşım sistemlerinin çevresel etkilerini azaltmayı ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını özendirme hedeflemektedir. Ulaşım, zararlı emisyonların, gürültü kirliliğinin ve iklim değişikliğinin artmasına neden olmaktadır. Toplam sera gazlarının yaklaşık %15'i ve CO₂ emisyonlarının %22'si, ulaşım faaliyetleriyle ilişkilendirilmektedir (Danışmanlık, t.y.). Bu çerçevede, fosil yakıt kullanımının azaltılması, sera gazı emisyonlarının kontrol altına alınması, hava kalitesinin korunması ve biyoçeşitliliğin korunması gibi unsurlar öne çıkmaktadır. Örneğin, toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması ve enerji verimliliğinin artırılması, karbon emisyonlarını ve hava kirliliğini azaltırken, yeşil altyapı projeleri de çevresel etkileri azaltarak kentsel yaşam kalitesini artırmaktadır. Bu şekilde, sürdürülebilir ulaşım çevresel kaynakların muhafazası ve doğal dengenin sürdürülebilmesi için önemli bir role sahiptir.

Sürdürülebilir ulaşımın ekonomik boyutu, ulaşım sistemlerinin uzun vadeli maliyet etkinliği ve ekonomik kalkınmaya katkısına odaklanmaktadır. Bu kapsamda, taşıma maliyetlerinin azaltılması, ulaşım altyapısının sürdürülebilir finansmanı, işletme maliyetlerinin optimize edilmesi ve ekonomik eşitsizliklerin azaltılması gibi unsurlar önem taşımaktadır. Örneğin, toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması ve ulaşım

altyapısının düzenli bakımı, uzun vadede ulaşım maliyetlerini azaltabilir ve bireylerin harcamalarını düşürebilir. Ayrıca, sürdürülebilir ulaşım, işletmelerin verimliliğini ve rekabet gücünü artırabilmekte ve çalışanların ulaşım maliyetlerini azaltabilecek iş yeri ulaşım programları aracılığıyla ekonomik katkı sağlayabilmektedir. Bu sayede, toplumun genel ekonomik refahını artırarak sürdürülebilir kalkınmayı desteklemektedir. Ancak, günümüzde ulaştırma sistemlerinde kazalar, çevre kirliliği ve trafik sıkışıklığı gibi ortaya çıkan sorunların yarattığı yüksek maliyetler, sektörün sürdürülebilir gelişmesini engellemektedir. Bu maliyetler, büyük ölçüde karayolu taşımacılığının yaygın bir şekilde kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Eryiğit, 2012).

Sürdürülebilir kentsel ulaşımın sosyal eşitlik, sosyal dışlanma ve yaşam kalitesi gibi konularla ilişkilendirildiği ve bu tür ulaşımın kentsel fırsatlara erişimi kolaylaştırarak sosyal dışlanmayı azalttığı ve kişilerin yaşam kalitesini artırdığı ifade edilmektedir (Boschmann ve Kwan, 2008). Bu kapsamda, ulaşım hizmetlerine erişimde eşitlik, toplumsal katılımın artırılması, sağlık ve güvenliğin iyileştirilmesi gibi unsurlar önemlidir. Örneğin, toplu taşıma sistemlerinin artırılması ve bisiklet yollarının oluşturulması, toplumun farklı kesimlerinin ulaşım ihtiyaçlarını karşılayarak sosyal katılımı artırabilmekte ve ulaşılabilirliği sağlayabilmektedir. Ayrıca, yaya dostu şehir tasarımları ve kentsel dönüşüm projeleri, toplumsal etkileşimi artırarak insanların sağlık ve refahını olumlu yönde etkilemektedir. Sosyal adaleti ve toplumsal eşitliği destekleyen ulaşım politikaları ve programlar, dezavantajlı grupların ulaşım erişimini artırarak toplumun genel sosyal refahını güçlendirmektedir. Bu şekilde, sürdürülebilir ulaşımın sosyal boyutu, kapsayıcı ve adil bir ulaşım sistemine yönelik adımlar atarak toplumsal iyilik ve eşitlik için önemli bir rol oynamaktadır.

2.3. Kentsel Hareketlilik ve Planlama

Kentsel hareketliliği geniş bir çerçevede tanımlarsak, insanların ihtiyaçlarından kaynaklanan işlevlerin, kent mekânlarında yer değiştirmesi ve bu işlevleri kullanan insanların kent mekânlarında gerçekleştirdiği hareketlerin birleşimi, kentsel hareketliliği oluşturur (Kaygusuz, 2009). Ulaşım ve kentsel hareketlilik, bir şehirdeki insanların günlük yaşamlarını sürdürebilmek için kullandıkları önemli unsurlardır. Bu kavramlar, karayolu, demiryolu, su yolu ve havayolu gibi çeşitli ulaşım modlarını içerir ve insanların işe gitme, alışveriş yapma, eğlenceye katılma ve sosyal

etkileşimde bulunma gibi faaliyetlerini yerine getirebilmesini sağlamaktadır. Şekil 2.18’de şehir içi kentsel hareketliliğin bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 2. 18 : Kavşakta kentsel hareketlilik örneği (Boğaziçi Proje, 2024).

Ulaşım ve kentsel hareketlilik, şehirlerin sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir ve şehir planlaması, ulaşım politikaları ve altyapı geliştirme gibi alanlarda sürekli olarak değerlendirilmektedir. Sürdürülebilir kentsel hareketliliğin sağlanabilmesi için toplu taşıma, bisiklet, yaya odaklı faaliyetlerin erişilebilirliğinin artırılması gerekmektedir. Sürdürülebilir kentsel hareketlilik kavramı, erişilebilirlik, herkes için güvenli olan taşıma sisteminin iyileştirilmesi, hava ve gürültü kirliliğinin azaltılması, sera gazı emisyonlarının ve enerji tüketiminin azaltılması kapsamaktadır (Acar, 2021). Ayrıca, trafik sıkışıklığının azaltılması, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve kentsel yaşam kalitesinin artırılması gibi hedeflerle sürdürülebilir kentsel hareketlilik politikaları uygulanmaktadır. Sürdürülebilir kentsel ulaşım politikaları en başta, kentsellik ve kentleşme bağlamında hususan şehir içi yolculuklarda kişisel araç kullanımının düşürülmesi ve sürdürülebilir ulaşım modlarının genişletilmesiyle kaliteli toplumsal ve kentsel ağı oluşturulmasıdır (Korkmazıyrek ve Polat, 2019).

Kentsel nüfusun artması, şehir içi ulaşım talebini artırırken, bu durum kentsel hareketliliği etkilemektedir. Yoğun şehir trafiği, toplu taşıma sistemlerine olan talebi artırırken, aynı zamanda bireylerin kişisel araç kullanımına olan ihtiyacını da artırmaktadır. Bu durum, altyapı yatırımları ve ulaşım politikalarında dengelenmiş bir yaklaşım gerektirir. Toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, bisiklet yollarının oluşturulması ve yürüyüş alanlarının artırılması gibi çevre dostu ulaşım seçeneklerinin teşvik edilmesi, artan kentsel nüfusun hareketliliğini sürdürülebilir bir şekilde destekleyebilir. Ayrıca, şehir planlaması ve trafik yönetimi stratejileri, kentsel alanlarda ulaşımın verimli bir şekilde yönetilmesini sağlayarak, ulaşımın ve

kentsel hareketliliğin daha dengeli bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olmaktadır. Kentlerin planlanması ve idaresi, sürdürülebilir kalkınmanın vazgeçilmez bir unsuru olarak öne çıkmaktadır. (Egger, 2006). Bu kapsamda, kentsel nüfus artışıyla birlikte artan ulaşım talebi, sürdürülebilir ve erişilebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesiyle dengelenebilir, şehirlerin yaşam kalitesi ve sürdürülebilirliği desteklenmektedir.

Kentsel hareketlilik, insanların yoğun yaşam temposuyla birlikte zamanın öneminin artmasıyla sıkı bir ilişki içindedir. Modern şehir hayatında, iş, eğitim, ve sosyal yaşam gibi pek çok aktivite için zamanın etkin ve verimli bir şekilde kullanılması önemlidir. Yoğun yaşam temposu, insanları hızlı ve etkili bir şekilde şehir içinde hareket etmeye yönlendirirken, zaman kaybını minimize etmek ve faaliyetler arasında geçişleri kolaylaştırmak için etkin ulaşım sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, toplu taşıma, bisiklet ve yaya yolları gibi çevre dostu ulaşım seçenekleri, kısa mesafelerde zaman kazandırırken, trafik sıkışıklığının ve stresin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, zamanın verimli kullanılması, iş ve sosyal yaşam dengesini korumak, aile ile vakit geçirmek ve kişisel gelişim için önemli bir tutmaktadır. Dolayısıyla, kentsel hareketlilik ve zamanın önemi arasındaki ilişki, modern şehir yaşamının dinamiklerini belirlerken, etkin ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin önemini vurgulamaktadır.

Ulaşım planlaması, kentlerin kurulmasında ve kentsel yaşam kalitesinin artırılmasında önemli bir etkiye sahiptir. Kent kalkınması için kritik bir unsurdur ve daha yaşanabilir kentlerin oluşması için gereklidir. "Yaşanabilir kent", ulaşım sistemlerinin ve diğer yaşam alanlarının yüksek standartlarda olması anlamına gelmektedir (Dissart ve Deller, 2000). Ulaşım planlaması kapsamında çeşitlilik ve gelişmişlik, kentsel yaşam kalitesinin artmasına ve kent sakinlerinin daha iyi hissetmelerine katkı sağlayacaktır. Ulaşım ihtiyaçlarını uygun fiyatlarla karşılayan ve yeterli kapasite sunan ulaşım sistemleri, kent içi hareketliliği artırarak sosyal iletişimi ve etkileşimi teşvik eder. Bu durum da kentsel yaşam kalitesinin yükselmesine katkı sağlar (Vuchic, 2001).

Şehirlerin ulaşım sistemlerini düzenlemek ve yönetmek için kullanılan bir stratejik yaklaşım olan ulaşım planlaması, şehirlerin büyüme eğilimleri, nüfus artışı ve ekonomik değişimler gibi faktörleri göz önünde bulundurarak gelecekteki ulaşım ihtiyaçlarını öngörmekte ve bu ihtiyaçlara uygun çözümler geliştirmektedir. Proaktif bir yaklaşımla yapılan ulaşım planlaması, düzenli trafik ve kavşak düzenlemeleri gibi

önemli konuları ele alırken aynı zamanda sürdürülebilirlik ilkelerini de gözetmektedir Şehir içi ulaşım planlaması ve yönetiminde kritik rol oynayan kavşaklarda da sürdürülebilirlik ilkesi gözetilmelidir. Kavşak geometrisi ve trafik sinyalizasyon sistemleri gibi parametreler kavşağın sürdürülebilir olması için dikkatle planlanmalıdır. Bu kapsamda, taşıt gecikme süresi, taşıt kuyruk uzunluğu ve yakıt tüketimi gibi faktörler proaktif bir şekilde ele alınarak, trafik akışının iyileştirilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması hedeflenmektedir. Bu sayede, şehirlerin yaşam kalitesi artırılarak sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturulması amaçlanmaktadır.

2.4. Kentsel Ulaşım Planlamalarında Benzetim Yöntemleri

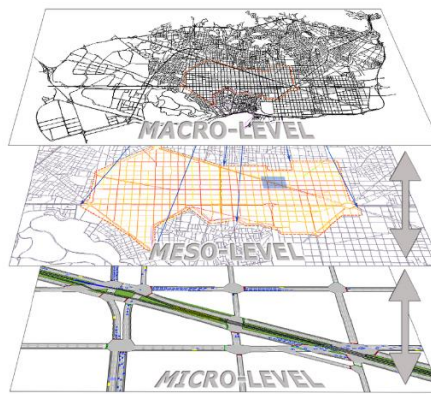
Trafik talebindeki artış ve altyapının sınırlı kapasitesi, doğrudan veya dolaylı maliyetleri katlanarak artan birçok soruna neden olmaktadır. Esas olarak tekrarlanan ve tekrarlanmayan tıkanıklık olgusuyla ilgili bu sorunlar, birçok ulaşım kurumunun en çok meşgul ettiği konulardan birini oluşturmaktadır. Buna göre, trafik olaylarını incelemek, mevcut altyapının en iyi şekilde kullanılması için etkili stratejiler uygulamak ve trafik sıkışıklığının etkilerini en aza indirmek için birçok çalışma yapılmaktadır (El Hmam ve diğ, 2006). Trafik sıkışıklığı, özellikle toplum ve çevre üzerinde olumsuz etkileri olan çok olumsuz bir olgudur (Solecka ve Zak, 2014) . Bu nedenle, trafik yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve mevcut altyapının verimli bir şekilde kullanılması son derece önemlidir.

Mevcut trafik koşullarını anlamak, alternatif ulaşım stratejilerini değerlendirmek ve trafik yönetimi çözümlerini optimize etmek için analitik yöntemler yetersiz kalabilmektedir. Karmaşık trafik akışlarını, ulaşım sistemlerinin performansını ve gelecekteki ulaşım senaryolarını analiz etmek ve çeşitli ulaşım stratejilerini test etmek için benzetim yöntemi kullanılmaktadır. Benzetim yöntemi, bilgisayar ortamında çalışmaların yapılarak bir sistemin yapay geçmişinin oluşturulması ve gerçek sistemle ilgili çıkarımların yapılması için kullanılan bir modelleme yaklaşımıdır (Aydın, t.y.).

Simülasyon ise dinamik olarak değişen çok çeşitli sistemleri analiz etmek için kullanılan popüler ve etkili bir yöneylem araştırması tekniğidir (Sokolowski ve Banks, 2009). Araştırmacılar simülasyonu kontrollü istatistiksel örnekleme tekniği olarak tanımlamaktadır (Hillier ve Lieberman, 2015). Genel bir kentsel trafik ağı

simülasyon sistemi, trafik mühendisleri ve planlamacıların trafik sorunlarına alternatif çözümleri incelemelerine yardımcı olmak amacıyla tasarlanmış ve programlanmıştır (Morgan, 1970).

Trafik simülasyonu, makroskobikten mezoskopik ve mikroskobik modellere kadar farklı ayrıntı seviyelerini temsil eden simülasyon modelleriyle vurgulanarak gerçekleştirilebilir (Lieberman ve Rathi, 1997). Trafik simülasyon modelleri mikroskobik, mezoskopik ve makroskobik olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.19). Mikroskobik modeller, bireysel araçların durumunu sürekli veya ayrı ayrı tahmin eden modellerdir. Mikroskobik ölçümler bireysel araç hızları ve konumlarıdır. Makroskobik modeller trafik akışının tanımını bir araya getirir. Etkinliğin makroskobik ölçüleri hız, akış ve yoğunluktur. Mezoskopik modeller hem makro hem de mikroskobik modellerin özelliklerini taşıyan modellerdir (Boxill ve Yu, 2000). Bu tür modeller, trafiği hem genel hem de özel bir şekilde tanımlar ve esas olarak stratejik planlamanın taktik sorunları ile akış kontrolü ve düzenlemesini ele almak için kullanılır (Buisson ve diğ., 1996). Bir trafik akışını simüle etmek için büyük miktarda veriyi işlemek amacıyla önemli veri işleme kaynaklarına ihtiyaç vardır (El Hmam ve diğ., 2006). Bu veriler, trafik yoğunluğu, araç hızları, yol koşulları ve sürücü davranışları gibi çeşitli faktörleri içerir ve bu faktörlerin doğru bir şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi, simülasyonun doğruluğunu ve gerçekçiliğini artırmak için önemlidir.



Şekil 2. 19 : Trafik simülasyon modelleri.

Ulaşım simülasyon modelleri, modern kentlerin karmaşık ulaşım sistemlerini analiz etmek ve geliştirmek için önemli araçlardır. Bu modeller, farklı düzeylerde detaylılık sunarak, trafik akışını, araç ve yayaların hareketlerini ve bu unsurlar arasındaki

etkileşimleri çeşitli düzeylerde simüle etmektedir. Mikro simülasyon modelleri bu detaylı yaklaşım ile belirli ulaşım bölümlerini incelemek ve optimize etmek için kullanılırken, makro simülasyon modelleri geniş kapsamlı sistem analizleri için tercih edilmektedir. Orta simülasyon modelleri ise bu iki yaklaşım arasında bir denge sağlamaktadır. Mikro simülasyon araçları arasında Vissim, Aimsun, Corsim, Mitsim, Paramics bulunurken, mezo simülasyon araçları arasında Sumo, Netflo, Dynasmart ve Transims öne çıkar, makro simülasyon modelleri arasında ise Visum 10, Cube Suit simülasyon programları bulunmaktadır (Stevanovic ve diğ, 2008). Bu çeşitli araçlar, kentsel ulaşım planlamasında karar vericilere çeşitli analiz ve optimizasyon araçları sunmaktadır.

Ulaşım planlamasında önemli bir rol oynayan yazılımların başında gelen Vissim, mikroskobik trafik simülasyon yazılımıdır ve PTV Grup tarafından 1979 yılında Almanya'nın Karlsruhe şehrinde geliştirilmiştir. Bu yazılım, kentsel yollar ve otoyollarda trafik operasyonlarını modellemek için kullanılır (Fellendorf ve Vortisch, 2010). Özellikle kavşak performansını ve geometrik değişimleri analiz etmek için etkili bir araçtır. Vissim, farklı geometrik yapıların, ışıklandırma düzenlemelerinin ve trafik yönetim stratejilerinin etkilerini değerlendirerek, kentsel ulaşımın verimliliğini artırmaya yönelik çözümler geliştirmeye yardımcı olmaktadır.

Karayolu ulaşımının önemli bir parçası olan kavşak üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda kavşakların performanslarına yönelik değerlendirmeler yapabilmek için mevcut durumları hakkında sahadan veriler toplanmış, benzetim yöntemiyle veriler değerlendirilmiştir. Bu bağlamda literatüre katkıda bulunan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

2005 yılında yapılan bir çalışmada İstanbul ilinin Kadıköy-Üsküdar-Ümraniye ilçelerini birbirine bağlayan Altunizade Kavşağı içinde oluşan trafik problemlerine yönelik çözümler araştırılmıştır. Araştırma kapsamında katlı kavşakların tipleri, tasarım esasları, yapım nedenleri ve bu kavşağa bağlanan bağlantı yolları dikkate alınarak Altunizade Katlı Kavşağı örneği incelenmiştir. Kavşak içerisinde sayımlar ve gözlemler ile yapılan analizler doğrultusunda yeni tasarım önerileri sunulmuştur. Bu tasarımlarda mevcut arazinin kullanımı, ulaşım altyapısı, yol ağı bilgileri, taşıt-yaya dolaşım sistemi, toplu taşıma bilgileri gibi parametreler dikkate alınmıştır. Bu önerilen tasarım sayesinde trafiğin azaltılması hedeflenmiştir (Tunalıoğlu, 2005).

2010 yılında yapılan bir çalışmada İstanbul'un Üsküdar ilçesinde bulunan Nuhkuyusu Caddesi'nde ki 9 adet kavşak araştırılmıştır. Kavşakların seçilme nedenleri açıklandıktan sonra kavşaklardan veriler toplanmıştır. Bu veriler ve kavşakların tasarımlarıyla birlikte simülasyon programında modellemeleri oluşturulmuştur. Ayrıca bu kavşakların performansında artış sağlayabilmesi için 2 adet senaryo oluşturulmuş olup mevcut durum analizleriyle beraber oluşturulan bu senaryoların analizleri karşılaştırılmıştır. Bu senaryolardan elde edilen analiz sonuçlarına göre F hizmet düzeyine sahip olan kavşak sadece sinyal sürelerinde yapılan değişiklik ile C hizmet düzeyine yükselmiş olacağı görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen diğer avantajlar ile kavşakların daha ekonomik olabileceği, karbon emisyonlarında azalma sağlanabileceği ve insanların psikolojik sağlığında artış sağlanacağı görülmüştür (Ocakdan, 2010).

2012 yılında yapılan çalışmada orta ölçekli bir metropol alanı için VISUM mikro simülasyon programını kullanarak analizler sonucunda entegre bir kentsel ulaşım sistemi planlama sürecini sunulmuştur (Fierek ve Zak, 2012).

2016 yılında yapılan bir çalışmada Erzurum ili Atatürk Üniversitesi kampüs içerisindeki en yoğun trafik hacmine sahip olan ve yılda birçok kazanın olduğu Teknokent kavşağı araştırılmıştır. Kavşaktan toplanan araç verileri kullanılarak PTV Vissim mikrosimülasyon programı yardımı ile analizleri yapılmıştır. Teknokent kavşağı için sinyalizasyon sistemi ve kavşak geometrik tasarım düzenlemeleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu uygulamalar yapıldıktan sonra bir buçuk yıl süreyle kavşak içerisinde trafik kazası oluşmamıştır (Bayrak ve diğ, 2016).

2018 yılında yapılan çalışmada Adana şehir merkezi içerisinde bulunan bir döner kavşak için Vissim mikrosimülasyon programı aracılığıyla sinyalizasyon sisteminde yapılan değişiklikler ile kavşak performans değerlendirmesi yapılmıştır (Uludamar ve Tüccar, 2018).

2019 yılında yapılan çalışmada Afganistan'ın şehri Mezar-ı-şerifte yer alan iki kavşak için simülasyon programları kullanılarak senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolarda mevcut durum ve geometrik iyileştirmeler dışında 40 adet farklı senaryo oluşturulmuş ve alınan sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda kavşakların geometrisi iyileştirilmeden sadece sinyal koordinasyonu uygulanması halinde toplam taşıt gecikmelerinde %3,36'ya varan düşüşler olduğu tespit edilmiştir.

Kavşak geometrik tasarımı iyileştirildikten sonra ise kavşaklar arasında koordinasyon sağlanması halinde sistem için toplam taşıt gecikmelerinde yüzde 8,85'a varan düşüşler görülmüştür. Simülasyondan elde edilen sonuçlara göre kavşakların mevcut durumlarda D ve C hizmet düzeyleri, geometrik iyileştirilmelerinden sonra C ve B hizmet düzeylerine ulaşmıştır (Ahadi, 2019).

2019 yılında Sakarya ili Serdivan ilçesinde bulunan araçların en yoğun kullandığı 2 kavşak olan Sapak Cami Kavşağı ve D-100 Dörtyol Sanayi Kavşağı simülasyon yöntemi ile analiz yapılması için seçilmiştir. Bu kavşaklar içerisinde alınan veriler doğrultusunda simülasyon programı içerisinde modelleri oluşturulup analizleri yapılmıştır. Kavşaklar için farklı senaryo çalışmaları geliştirilmiş olup analizlerden sonra tespitler oluşturulmuştur. Bu kavşaklar için gelecek dönemde artacak trafik yoğunluğu düşünülerek mevcut duruma ilaveten yüzde 30 oranında trafik hacmi artırılmış şekliyle senaryolar geliştirilmiştir. İncelenen bu kavşaklardan alınan çıktılarına göre simülasyon programının getirdiği uygulama kolaylığı, karşılaşılabilecek problemlere karşı çözüm üretilebilmesi gibi avantajları anlatılmıştır (Camcı, 2019).

2020 yılında Erzurum Tebrizkapı Kavşağı için Aimsun simülasyon programı kullanılarak kavşağın performansı değerlendirilmiş ve analizler sonucunda çalışmanın yapıldığı bölgeye uygun kavşak tipi önerilmiştir (Baş ve diğ., 2020).

2022 yılında Bursa Durmazlar Kavşağı için yapılan bir çalışmada, PTV Vissim programı kullanılarak üç farklı hemzemin kavşak türü modellenmiştir: sinyalize dönel kavşak, sinyalize dört kollu kavşak ve modern dönel kavşak. Çalışmada, kavşak geometrisi düzenlenmiş ve kontrol sistemi değiştirilerek seyahat süresi, durma sayıları, araç hızları ve kuyruk uzunluğu gibi parametreler iyileştirilmiştir. Bu iyileştirmeler, CO ve NOx emisyonları ile yakıt tüketimini azaltmıştır (Kayacan ve diğ., 2022).

2022 yılında İstanbul'un Esenyurt ilçesinde yer alan Ahmet Arif Caddesi üzerinde yapılan bir çalışmada, PTV Vissim mikro simülasyon programı kullanılarak önerilen modelin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, performans kriterlerinin büyük çoğunluğunda iyileştirmeler kaydedilmiştir (Suri ve Şeker Murat, 2022).

2023 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, Vissim simülasyon programı kullanılarak çeşitli senaryolar oluşturulmuş ve dönel kavşak performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca, kapasite ve gecikme hesaplamaları için kullanılan yöntemlerle senaryolar yeniden hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar, Akçelik gecikme formülü ile karşılaştırıldığında, değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir (ırak, 2023).

Bu tez çalışması, trafik mühendisleri ve planlamacılar tarafından kullanılan mikroskobik trafik simülasyon yazılımını Vissim aracılığıyla farklı geometrik yapıların ve trafik yönetim stratejilerinin performansa etkileri incelenmiştir. Çalışma, Sakarya'nın merkezi olan Adapazarı ilçesindeki Sedaş Kavşağı'nda, anayollar üzerinden merkeze gelen ve merkezden anayollara gitmek isteyen araçların oluşturduğu trafik yoğunluğunu ele almaktadır. Simülasyon senaryolarında, her bir durumda aynı hacim yani taşıt sayısı kullanılarak kavşak performansı değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımla, kavşağın geometrik tasarımının trafik akışına etkisi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Elde edilen bulgular, kavşakların daha verimli ve güvenli hale getirilmesi için pratik öneriler sunarak, yerel yönetimlerin ve Şehir planlamacılarının karar alma süreçlerine bilimsel bir temel oluşturarak daha yaşanabilir kentler oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 3. YÖNTEM

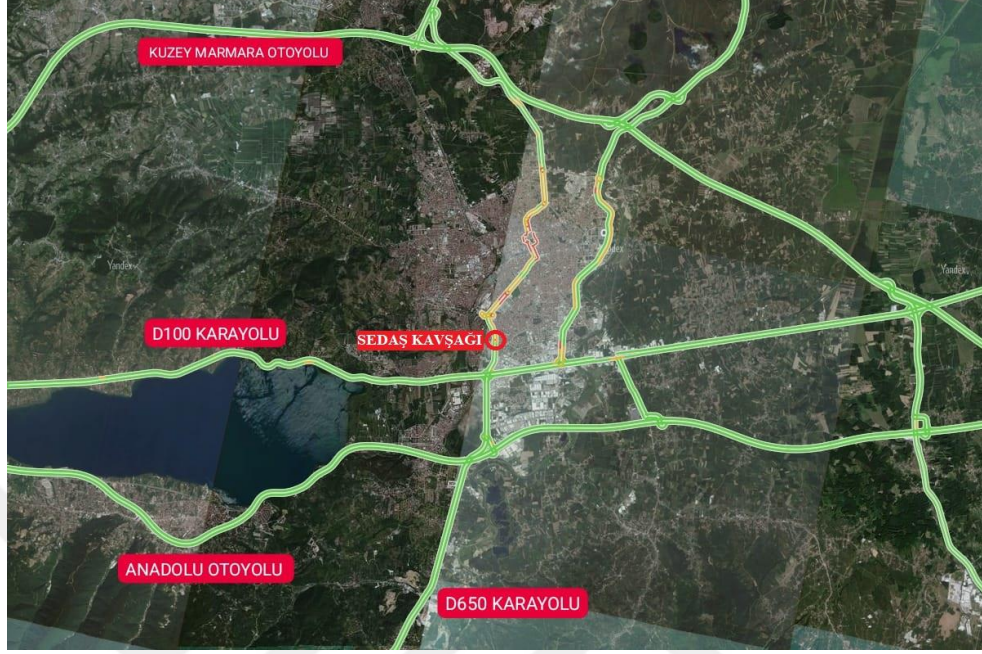
3.1. Çalışma Alanının Belirlenmesi

Ülkemizin sanayi, ticaret, turizm açısından en yoğun bölgelerinden biri olan Marmara Bölgesi'nin gelişmiş şehirlerinden Sakarya ili karayolu, demiryolları üzerinden hem Anadolu ile Avrupa arasında hem de Türkiye'nin en kalabalık şehri İstanbul ile olan bağlantısı sayesinde stratejik bir öneme sahiptir. Sakarya ilinden geçen 4 ana yol; Anadolu Otoyolu (E80 Otoyolu), Kuzey Marmara Otoyolu (O-7 Otoyolu), Antalya-Adapazarı Yolu (D650 Karayolu) ve Edirne-Ağrı Yolu (D100 Karayolu) aracılığıyla diğer illeri birbirine bağlamaktadır.

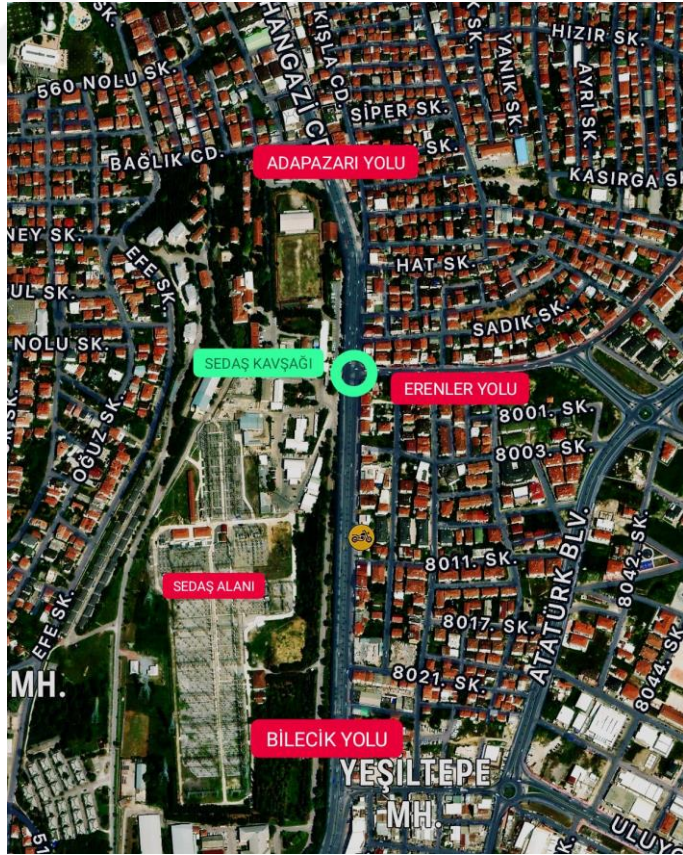
Sanayi, ticaret, turizm ve tarım gibi sektörlerin gelişmesi, Sakarya ilinin göç almasına ve dolayısıyla nüfusunun artmasına neden olmuştur. Bu nüfus artışı, Sakarya'da trafik sorununu giderek büyüyen bir problem haline getirmiştir. Sakarya ilinin merkez ilçesi olarak bilinen Adapazarı ilçesi içerisinde büyükşehir belediye binası, valilik, hastaneler, fabrikalar, okullar, alışveriş merkezleri gibi insanların ihtiyaçlarını karşılayabileceği birçok hizmet noktasına ev sahipliği yapmaktadır. Bu da anayollardan gelen araçlar için Adapazarı'nın ana giriş noktalarından biri olan Sedaş Kavşağı ve çevresindeki trafik yoğunluğunu artırmaktadır. Fiziksel iyileştirme ve yol genişletmelerine de pek imkan vermeyen sıkışık bir kentsel alan içerisinde olan bölgede mevcut trafik hacminin yönlendirilmesinde sıkıntılar yaşanmaktadır. Ayrıca Sedaş Kavşağı'nın üç ana kolu yoğun bir trafik akışı sağlarken, dördüncü kol ise daha az aktif kalarak sadece Sedaş binasına giriş sağlamaktadır. Bu sebeplerden dolayı Adapazarı İlçesinde bulunan Sedaş Kavşağı bu çalışma için ideal bir örnek olarak seçilmiştir.

Sakarya ilinden geçen anayolların uydu görüntüsü Şekil 3.1'de, Sedaş Kavşağı'nın genel uydu görüntüsü, kavşağın yapısal özelliklerini ve trafik akışını daha iyi anlamak için Şekil 3.2'de sunulmuştur. Bu görüntü, kavşağın konumunu, ana yollarla etkileşimini ve trafik gözlemiyle toplanan verilerin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, Sedaş

Kavşağı'nın sokak görünümü, kavşağın detaylarını göstermek amacıyla eklenmiş olup, bu görüntü de Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 : Sakarya ilinden geçen anayolların uydu görüntüsü.



Şekil 3. 2 : Sedaş Kavşağı'nın uydu görüntüsü.



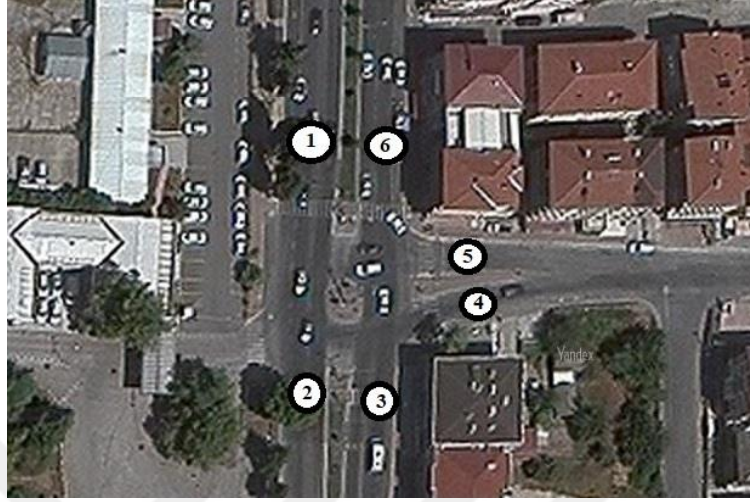
Şekil 3. 3 : Sedaş Kavşağı'nın Sokak Görünümü.

3.2. Verilerin Toplanması

Sedaş Kavşağı'nda trafiğin en yoğun olduğu zirve saatlerde kavşak çevresinde, kavşağın tamamını görebilen noktalardan kamera ile çekimler yapılmıştır. Bu çekimler, bölgede trafik yoğunluğunun sık olarak gözlemlendiği hafta içi günlerde sabah işe ve okula gidiş saatleri olan 07.00-08.00 ile akşam iş ve okul çıkış saatleri olan 17.00-19.00 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Bölgedeki trafik yoğunluğu gerek bölge halkı gerekse araç kullanıcıları tarafından uzun zamandır şikayet konusu olacak seviyede gözlenmektedir. Kavşak, fiziksel genişletmeye çok imkan vermeyecek durumda olması sebebi ile kapasite üstünde hizmet vermekte, bölgede uzun kuyruklanmalar ve gecikmeler gözlenmektedir.

Sedaş Kavşağı'nda yapılan kamera çekimleri izlenerek, kavşağın yaklaşım kollarından gelen araçlar için sayımlar yapılmıştır. Bu sayımlar sonucunda yaklaşım kolları için taşıt hacimleri, araçların tipleri (otomobil, kamyonet, motosiklet, otobüs) ve araç güzergahları belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan kamera çekimleri sırasında kavşakta bulunan trafik işaret ve yönlendirme sistemlerinin etkinliği ve kullanımı, sürücüler tarafından nasıl algılandığı ve uyulduğu gözlemlenmiş ve analiz edilmiştir. Kavşağın yaklaşım kollarının şerit sayıları modellemeye ekleneceği için şerit sayıları da dikkate alınmıştır. Kavşağın Adapazarı ve Bilecik yönünde bulunan kolların şerit sayısı 2, Erenler yönünde bulunan kolların şerit sayısı ise 1 olarak gözlemlenmiştir. Kavşakta bulunan yaklaşım kollarının uydu görüntüsü Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Ayrıca, gözlemler sonucunda pik saat olarak kabul edilen akşam saatinin sayımları Tablo 3.1'de

gösterilmiş olup, bu saat içerisinde kavşaktan geçen araçların araç tiplerine göre yüzdesel dağılımı Tablo 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3. 4 : Sedaş Kavşağı yaklaşım kolları.

Tablo 3. 1 : Sedaş Kavşağı mevcut araç sayısı.

	1-2	1-4	3-6	3-4	5-2	5-6
Otomobil	1668	591	1464	48	339	588
Otobüs	291	33	228	3	48	90
Akşam Kamyon	12	0	12	0	0	0
Kamyonet	51	18	36	3	6	48
Motosiklet	39	36	78	6	6	60

Tablo 3. 2 : Kavşakta bulunan araçların tiplerine göre yüzdesel dağılımı.

	1	3	5
Otomobil	%82,47	%80,51	%78,23
Otobüs	%11,83	%12,3	%11,65
Kamyon	%0,44	%0,64	%0
Kamyonet	%2,52	%2,08	%4,56
Motosiklet	%2,74	%4,47	%5,56

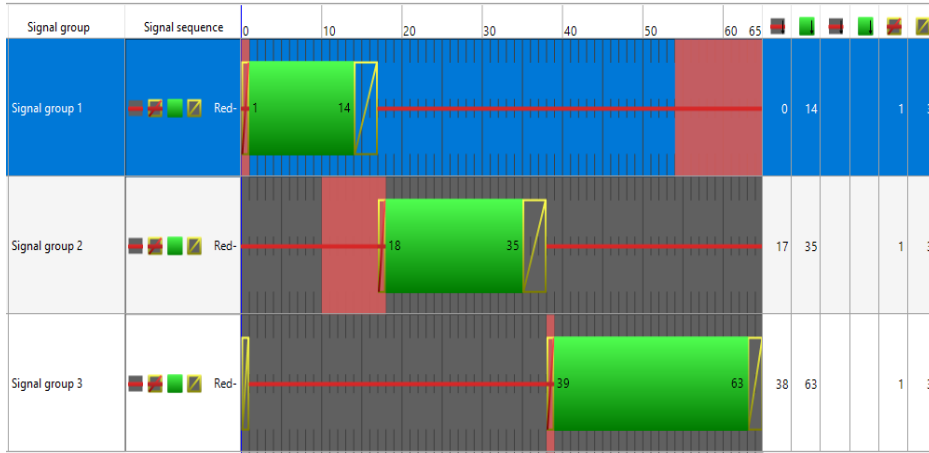
3.3. Senaryoların Belirlenmesi

Bu çalışmada, Sedaş Kavşağı için Vissim simülasyon programında 5 farklı senaryo oluşturulmuştur. İlk senaryo, mevcut durumun performansını belirlemek amacıyla mevcut araç sayısı ve geometrik şekli kullanılarak belirlenmiş ve dönel kavşak olarak

incelenmiştir. Bir diğer senaryoda ise Sedaş Kavşağı için Bilecik ve Adapazarı yönlerinde hareketliliği kolaylaştıracak altgeçit türü kavşak tasarımı olarak oluşturulmuş ve simülasyon değerlendirmesi yapılmıştır.

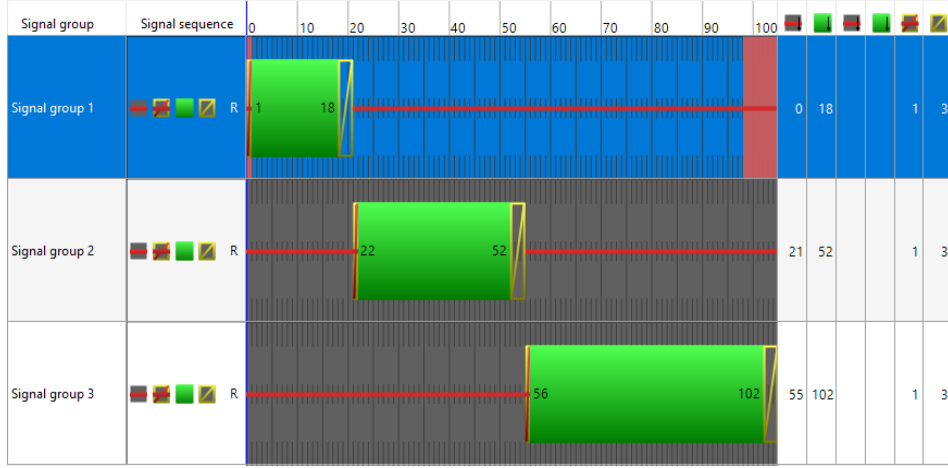
3 senaryo ise kapsamlı bir geometrik düzenlemeye ihtiyaç duymayacak şekilde sinyalizasyon alternatifleri üzerine değerlendirilmiştir. Bu senaryolar oluşturulurken Webster yöntemi ve Avustralya yöntemi ile döngü süreleri hesaplanmış olup, yapılan hesaplamalarda genel anlamda, bazı fazlar için negatif yeşil ışık süreleri elde edilmiştir. Bu durum, formülün paydasındaki yüklü oranlar toplamının (ΣY) 1'den büyük olmasından kaynaklanmış olup, bu nedenle, ilgili yöntemler kullanılarak uygun döngü süreleri belirlenememiş; düşük, orta ve yüksek döngü süreleri kullanılarak yeşil ışık süreleri pay edilmiştir. Bu yöntemle, daha dengeli ve uygulanabilir faz süreleri elde edilmiştir. Ayrıca, sinyalizasyon senaryoları, kavşak içerisindeki mevcut ada kaldırılarak analiz edilmiştir.

Minimum döngü süresi dikkate alınarak oluşturulan sinyalizasyon senaryosunda, 9 saniyelik kayıp zaman göz önünde bulundurularak Adapazarı kolu için 25 saniye, Bilecik kolu için 18 saniye ve Erenler kolu için 14 saniye yeşil ışık süreleri belirlenmiştir. Şekil 3.5'de bu senaryo süresine göre devre diyagramı gösterilmektedir.



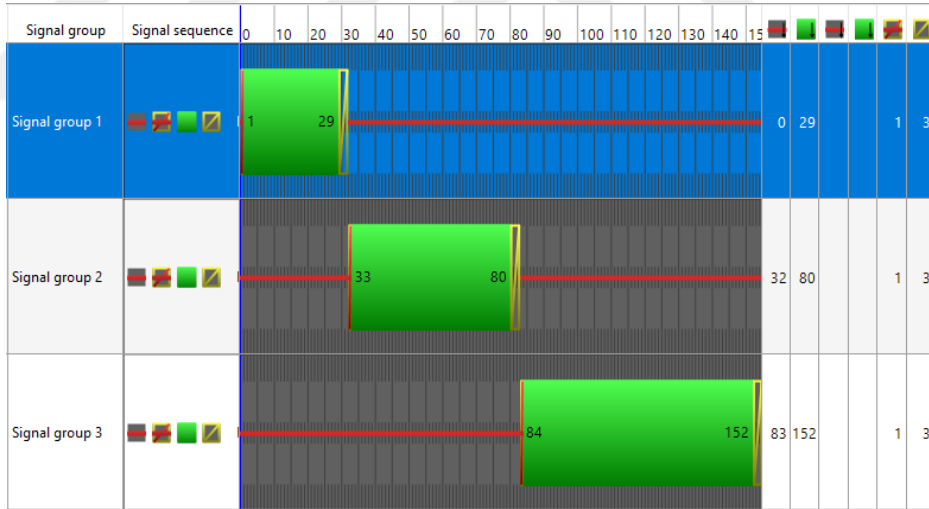
Şekil 3. 5 : Minimum döngü süresine göre devre diyagramı.

Ortalama döngü süresi dikkate alınarak oluşturulan sinyalizasyon senaryosunda, 9 saniyelik kayıp zaman göz önünde bulundurularak Adapazarı kolu için 47 saniye, Bilecik kolu için 31 saniye ve Erenler kolu için 18 saniye yeşil ışık süreleri belirlenmiştir. Şekil 3.6'da bu senaryo süresine göre devre diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3. 6 : Ortalama döngü süresine göre devre diyagramı.

Maksimum döngü süresi dikkate alınarak oluşturulan sinyalizasyon senaryosunda, 9 saniyelik kayıp zaman göz önünde bulundurularak Adapazarı kolu için 69 saniye, Bilecik kolu için 48 saniye ve Erenler kolu için 29 saniye yeşil ışık süreleri belirlenmiştir. Şekil 3.7’de bu senaryo süresine göre devre diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3. 7 : Maksimum döngü süresine göre devre diyagramı.

Toplamda 5 adet senaryo oluşturulmuş olup, mevcut durum senaryosu, katlı kavşak senaryosu ve üç farklı sinyalizasyon senaryosu bulunmaktadır. Bu senaryolar, simüle edilerek programın verdiği araç gecikmeleri, taşıtların ortalama hızları, araçların kuyruk uzunlukları, hizmet düzeyi, taşıt gecikmesi, emisyon değerleri ve yakıt tüketimleri gibi veriler ışığında performans değerlendirmesi yapılmıştır.

3.4. Vissim Programında Analiz Uygulaması

Bu çalışmada, Sedaş Kavşağı'ndaki trafik durumunu değerlendirmek ve iyileştirme senaryolarını analiz etmek amacıyla Vissim simülasyon programı kullanılmıştır. Elde edilen trafik verileri doğrultusunda çeşitli modeller oluşturulmuş ve bu modellerin simülasyonu yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Vissim programında modelleri oluştururken ilk olarak kavşağın ve bağlantılı yolların geometrik yapısı çizilmiştir. Daha sonra, kavşağın yaklaşım kollarından gelen araç hacim verileri programa girilmiştir. Araçların tiplerine (otomobil, kamyonet, motosiklet, otobüs) ve gittiği güzergahlara göre veri girişleri yapılmıştır. Ayrıca, kavşakta araç çakışma noktalarında araçların geçiş üstünlükleri belirlenmiş ve kavşak içerisinde olan araçlara öncelik verilmiştir. Bu adımlar, simülasyonun gerçeğe uygun ve detaylı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamıştır.

Vissim programında yapılan analizlerde, kavşaktaki araç kuyruk uzunluklarının ortalaması ve maksimum değerleri, trafik akışının kalitesini ve kavşağın hizmet düzeyini belirleyen hizmet düzeyi, taşıt gecikmesi ve duraklama gecikmesi gibi performans göstergeleri incelenmiştir. Çevresel etkiler açısından, karbon emisyonu, azot emisyonu, uçucu organik bileşiklerin emisyonu ve yakıt tüketimi değerlendirilmiştir. Bu veriler, farklı senaryoların karşılaştırılması ve kavşağın iyileştirilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır.

Vissim simülasyon çalışma anına ait görüntüler Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 8 : Simülasyon çalışma anı.



Şekil 3. 9 : Simülasyon çalışma anı.

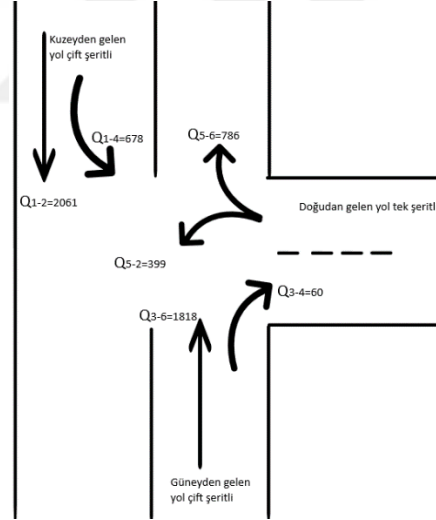


Şekil 3. 10 : Simülasyon çalışma anı.

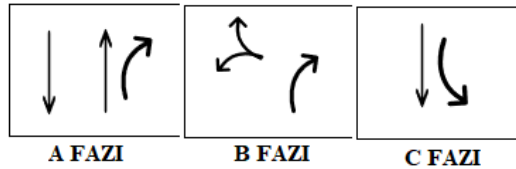
BÖLÜM 4. SONUÇLAR

4.1. Webster Yöntemi ile Sinyalizasyon Hesaplarının Sonuçları

Bu tez çalışmasında Webster yöntemi kullanılarak yeşil ışık sürelerinin hesaplanması hedeflenmiştir. Hesaplamalar sonucunda negatif döngü süreleri elde edildiği görülmüştür. Bu durum, kavşağın aşırı sıkışıklığından, yani doyumluk hacminin temel doyumluk hacmini önemli ölçüde aşmasından kaynaklanmaktadır. Webster yöntemiyle yapılan hesaplamalar detaylı olarak aşağıda sunulmuştur. Zirve saat verileri için kavşaktaki hacim değerleri Şekil 4.1’de, sinyalizasyon uygulamasına yönelik önerilen faz düzeni ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1 : Zirve saat verileri için kavşaktaki hacim değerleri.



Şekil 4. 2 : Sedaş Kavşağı için önerilen faz düzeni.

Adapazarı kolundan Bilecik koluna giden trafik hacminin birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacmi denklem 4.1’de gösterilmiştir.

$$q_{m-n} = q_{oto\ ve\ hafif\ taşıt} * 1 + q_{moto} * 0,33 + q_{otobüs} * 2,25 + q_{ağır} * 1,75 \quad (4.1)$$

$$q_{1-2} = 1668 + 39 * 0,33 + 291 * 2,25 + 51 + 12 * 1,75 = 2407$$

Adapazarı kolundan Erenler koluna giden trafik hacminin birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacmi denklem 4.2’de gösterilmiştir.

$$q_{1-4} = 591 + 36 * 0,33 + 33 * 2,25 + 18 = 695 \quad (4.2)$$

Bilecik kolundan Adapazarı koluna giden trafik hacminin birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacmi denklem 4.3’de gösterilmiştir.

$$q_{3-6} = 1464 + 36 + 78 * 0,33 + 228 * 2,25 + 12 * 1,75 = 2060 \quad (4.3)$$

Bilecik kolundan Erenler koluna giden trafik hacminin birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacmi denklem 4.4’de gösterilmiştir.

$$q_{3-4} = 48 + 3 + 6 * 0,33 + 3 * 2,25 = 60 \quad (4.4)$$

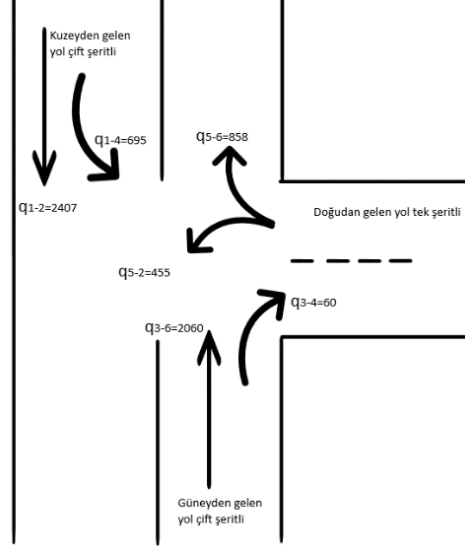
Erenler kolundan Bilecik koluna giden trafik hacminin birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacmi denklem 4.5’de gösterilmiştir.

$$q_{5-2} = 339 + 6 + 6 * 0,33 + 48 * 2,25 = 455 \quad (4.5)$$

Erenler kolundan Adapazarı koluna giden trafik hacminin birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacmi denklem 4.6’da gösterilmiştir.

$$q_{5-6} = 588 + 60 * 0,33 + 90 * 2,25 + 48 = 858 \quad (4.6)$$

Buradan birim oto eşdeğerleri ile düzeltilmiş hacimlerin kavşak üzerinde gösterimi aşağıdaki Şekil 4.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 : Düzeltilmiş doygun hacim değerleri.

Düzeltilmiş doygun akım değerleri içerisinde doğru giden akımlar için hesaplanmış değer denklem 4.7'de gösterilmiştir. Formül içerisinde bulunan ağır taşıt faktörü $f_{HV}=0,93$ olarak alınmıştır.

$$S = S_0 * N * f_w * f_{HV} * f_g * f_{BB} * f_{sağdönen} * f_{soldönen} \quad (4.7)$$

$$S_{doğru} = 1900 * 2 * 0,93 = 3534$$

Düzeltilmiş doygun akım değerleri içerisinde hem sağa hem sola dönen akımlar için hesaplanmış değer denklem 4.8'de gösterilmiştir. Formül içerisinde bulunan dönme faktörü $f_{sağdönen}=0,85$ ve $f_{soldönen}=0,95$ olarak alınmıştır.

$$S_{dönen} = 1900 * 0,93 * 0,85 * 0,95 = 1427$$

$$S_{sağdönen} = 1900 * 0,93 * 0,85 = 1502 \quad (4.8)$$

$$S_{soldönen} = 1900 * 0,93 * 0,95 = 1679$$

Düzeltilmiş doygun akım değerleri içerisinde hem düz giden hem dönen şerit akımları için hesaplanmış değer denklem 4.9' da gösterilmiştir. Hesaplanmış karma akımda yer alan dönme faktörü $f_{dönen}=0,97$ olarak alınmıştır.

$$S_{karma} = 1900 * 2 * 0,93 * 0,97 = 3427 \quad (4.9)$$

A fazı için doygunluk oranı denklem 4.10'da hesaplanmıştır.

$$y = \frac{q_{toplam}}{S_{toplam}}$$
$$y_{1-2} = \frac{2407}{3534} = 0,68 \quad (4.10)$$
$$y_{3-6 \text{ ve } 3-4} = \frac{2060 + 60}{3534 + 1502} = 0,42$$

B fazı için doygunluk oranı denklem 4.11'de hesaplanmıştır.

$$y_{5-6 \text{ ve } 5-2} = \frac{858 + 455}{1427} = 0,92 \quad (4.11)$$
$$y_{3-4} = \frac{60}{1502} = 0,04$$

C fazı için doygunluk oranı denklem 4.12'de hesaplanmıştır.

$$y_{1-2 \text{ ve } 1-4} = \frac{2407 + 695}{3534 + 1679} = 0,59 \quad (4.12)$$

Buradan her fazın doygunluk derecelerinin toplamı olan 'Y' değeri aşağıdaki denklem 4.13 ile bulunmuştur.

$$Y = \sum(y) = 0,68 + 0,92 + 0,59 = 2,2 \quad (4.13)$$

Bu sonuç ile optimum devre süresi modeli kullanılarak aşağıdaki denklem 4.14'de devre süresi hesabı yapılmıştır. Kayıp süre 9 saniyedir. ϕ değişken katsayısı 1,5 olarak seçilmiştir.

$$D_0 = \frac{\phi * L + 5}{1 - Y} \quad (4.14)$$
$$D_0 = \frac{1,5 * 9 + 5}{1 - 2,2} = -15,41$$

Bu tez çalışmasında, Webster ve Avustralya yöntemleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, devre süresi için negatif değerler elde edilmiştir. Bu sorun, formüllerin paydasındaki doygunluk dereceleri toplamının ($\sum Y$) 1'den büyük

olmasından kaynaklanmaktadır ve bu nedenle uygun döngü süreleri belirlenememiştir. Kavşakta aşırı sıklıkta durumlarında çıkan bu sonuçtan dolayı maksimum döngü süresi olarak 120-150 saniye kullanılması önerilmektedir.

4.2. Sinyalizasyon Senaryosunda Minimum Döngü Süresine Göre Sonuçlar

Trafik sinyalizasyonlarında minimum döngü süresi 60 saniye olarak değerlendirilmektedir. Bu sinyalizasyon senaryosu çalışması kapsamında, sinyalizasyon için oluşturulan minimum döngü süresi 65 saniye olarak belirlenmiştir. Bu süre kullanılarak yapılan hesaplamalarda, her bir faz için yeşil ışık süreleri dengeli bir şekilde dağıtılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde emisyon, yakıt tüketimi ve kuyruklanma uzunluklarının yüksek olduğu görülmektedir. Hizmet düzeylerine baktığımızda 1, 3, 5 numaralı kollarda sırasıyla C, C, F hizmet düzeylerine ulaşılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen veriler aşağıdaki Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1 : Minimum döngü süresine göre analiz sonuçları-1.

Senaryo Türü	Emisyon Değerleri			Yakıt Tüketimi		Araç Sayısı (Ad)	Ortalama Hız (km/sa)
	CO (gr)	Nox (gr)	VOC (gr)	US Galon	Litre		
S-min	11735	2283	2720	168	630	5368	25,6

Tablo 4. 2 : Minimum döngü süresine göre analiz sonuçları-2.

S.T./Y.K.	Kuyruklanma Uzunluğu (max) (m)			Gecikme (sn/ta)			Hizmet Düzeyi		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
S - min	122,72	68,03	409,93	21,2	22,18	259,23	C	C	F

4.3. Sinyalizasyon Senaryosunda Ortalama Döngü Süresine Göre Sonuçlar

Trafik sinyalizasyonlarında ortalama döngü süresi 100 saniye olarak değerlendirilmektedir. Bu sinyalizasyon senaryosu çalışması kapsamında, sinyalizasyon için oluşturulan ortalama döngü süresi 105 saniye olarak belirlenmiştir. Bu süre

kullanılarak yapılan hesaplamalarda, fazlar arası geçişlerin daha akıcı ve düzenli olması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde emisyon, yakıt tüketimi, kuyruklanma uzunluklarının yüksek olduğu görülmektedir. Hizmet düzeylerine baktığımızda 1, 3, 5 numaralı kollarda sırasıyla C, C, F hizmet düzeylerine ulaşılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen veriler aşağıdaki Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 3 : Ortalama döngü süresine göre analiz sonuçları-1.

Senaryo Türü	Emisyon Değerleri			Yakıt Tüketimi		Araç Sayısı (Ad)	Ortalama Hız (km/sa)
	CO (gr)	Nox (gr)	VOC (gr)	US Galon	Litre		
S- ort	11112	2162	2575	159	600	5181	27,8

Tablo 4. 4 : Ortalama döngü süresine göre analiz sonuçları-2.

S.T./Y.K.	Kuyruklanma Uzunluğu (max) (m)			Gecikme (sn/ta)			Hizmet Düzeyi		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
S- ort	147,91	113,11	220,59	24,98	31,24	345,47	C	C	F

4.4. Sinyalizasyon Senaryosunda Maksimum Döngü Süresine Göre Sonuçlar

Trafik sinyalizasyonlarında maksimum döngü süresi 150 saniye olarak değerlendirilmektedir. Bu sinyalizasyon senaryosu çalışması kapsamında, sinyalizasyon için oluşturulan ortalama döngü süresi 155 saniye olarak belirlenmiştir. Bu süre kullanılarak yapılan hesaplamalarda, fazlar arası geçişlerin daha akıcı ve düzenli olması sağlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen veriler aşağıdaki Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4. 5 : Maksimum döngü süresine göre analiz sonuçları-1.

Senaryo Türü	Emisyon Değerleri			Yakıt Tüketimi		Araç Sayısı (Ad)	Ortalama Hız (km/sa)
	CO (gr)	Nox (gr)	VOC (gr)	US Galon	Litre		
S- max	11389	2215	2639	162	615	5222	29,2

Tablo 4. 6 : Maksimum döngü süresine göre analiz sonuçları-2.

S.T./Y.K.	Kuyruklanma Uzunluğu (max) (m)			Gecikme (sn/ta)			Hizmet Düzeyi		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
S- max	192,94	126,01	220,6	34,98	47,84	335,87	C	D	F

4.5. Mevcut Durum Senaryosuna Göre Sonuçlar

Sakarya Sedaş Kavşağı için mevcut durum senaryosu simülasyon programında analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde emisyon değerinin, yakıt tüketiminin, kuyruklanma uzunluklarının yüksek olduğu görülmüştür. Kavşak hizmet düzeylerini değerlendirirken, 5 numaralı kolda E hizmet düzeyine ulaşılması, trafik akışının zorluğunu ve etkin bir şekilde yönetilemediğini işaret etmektedir. Kavşağın pik saati olan akşam zirve saatine bağlı olarak oluşturulan senaryonun analizlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 7 : Mevcut durum simülasyon analiz sonuçları-1.

Senaryo Türü	Emisyon Değerleri			Yakıt Tüketimi		Araç Sayısı (Ad)	Ortalama Hız (km/sa)
	CO (gr)	Nox (gr)	VOC (gr)	US Galon	Litre		
Mevcut	7385	1437	1712	106	400	5805	18,9

Tablo 4. 8 : Mevcut durum simülasyon analiz sonuçları-2.

S.T./Y.K.	Kuyruklanma Uzunluğu (max) (m)			Gecikme (sn/ta)			Hizmet Düzeyi		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Mevcut	96,11	75,71	282,65	9,2	11,63	38,46	B	B	E

4.6. Katlı Kavşak Senaryosuna Göre Sonuçlar

Katlı kavşak senaryosuna ait veri sonuçları incelendiğinde, emisyon, yakıt tüketimi ve kuyruklanma uzunluklarında azalmalar, taşıt gecikmelerinde ise iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca hizmet düzeyleri incelendiğinde 1,3,5 numaralı kollar sırasıyla A, A, A hizmet düzeylerine ulaşmış olduğu görülmektedir. Katlı kavşak senaryosunda

bulunan araçların da ortalama hızlarında yüksek artışlar gözlemlenmiştir. Kavşağın pik saati olan akşam zirve saatine bağlı olarak oluşturulan senaryonun analizlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Tablo 4. 9 : Katlı Kavşak simülasyon analiz sonuçları-1.

Senaryo Türü	Emisyon Değerleri			Yakıt Tüketimi		Araç Sayısı (Ad)	Ortalama Hız (km/sa)
	CO (gr)	Nox (gr)	VOC (gr)	US Galon	Litre		
Katlı Kavşak	4427	861	1025	63	240	5816	40,7

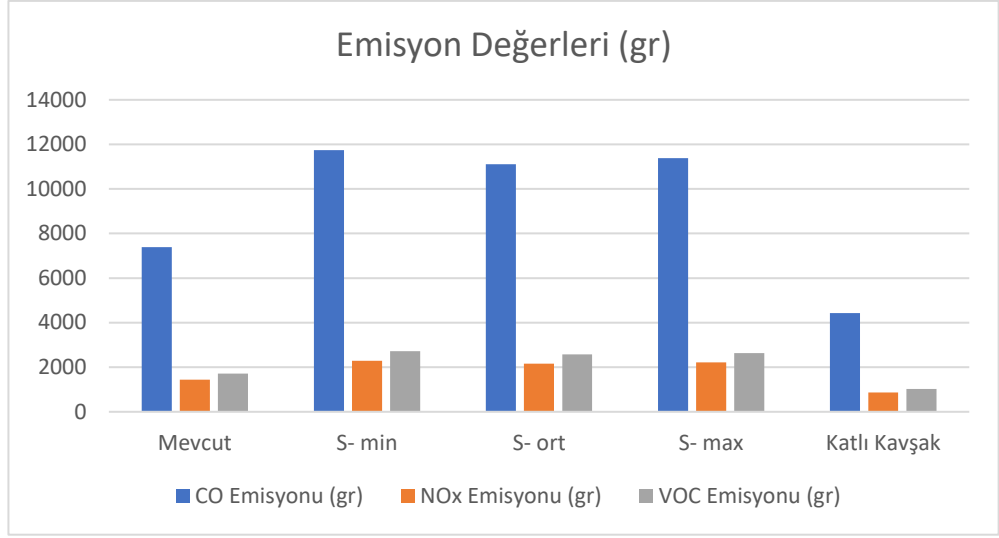
Tablo 4. 10 : Katlı Kavşak simülasyon analiz sonuçları-2.

S.T./Y.K.	Kuyruklanma Uzunluğu (max) (m)			Gecikme (sn/ta)			Hizmet Düzeyi		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Katlı Kavşak	0	15,02	68,99	3,8	4,73	8,45	A	A	A

4.7. Senaryoların Analiz Sonuçlarına Göre Grafikler ile Karşılaştırılması

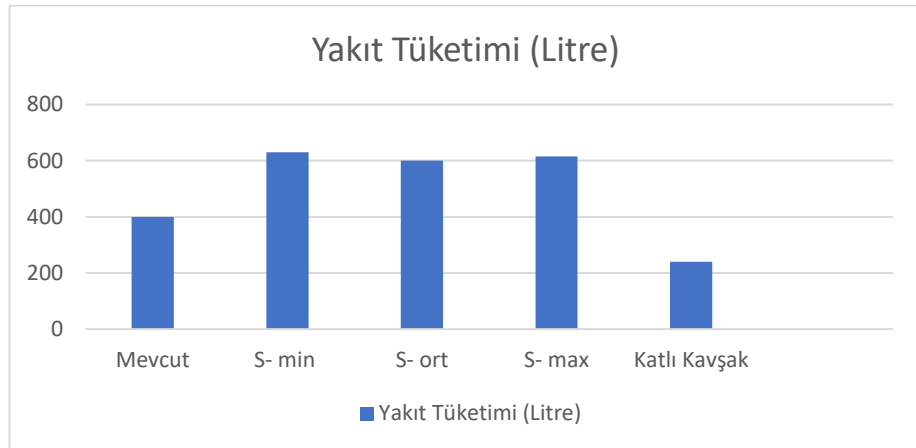
Simülasyon programı her bir senaryoda aynı simülasyon süresini kullanarak analiz yapmakta olup, kavşakta ortaya çıkan problemlere bağlı olarak araç sayısında farklılıklar gözlemlenmektedir. Her senaryoda aynı trafik simülasyon süresiyle çalışılmasına rağmen, kavşak geometrisi, sinyalizasyon sistemi ve diğer faktörlerin etkisiyle araçların kavşak içindeki hareketleri ve dolayısıyla trafik akışı önemli ölçüde değişebilmektedir. Bundan dolayı simülasyona göre yaklaşım kollarında bulunması gereken araç sayısı kapasitesini geçtiği için maksimum araç sayılarına göre analiz yapılmıştır.

Emisyon değerleri; simülasyon analizi süresince kavşakta bulunan taşıtların gram cinsinden salınım değerleridir. Analiz sonuçlarından elde edilen emisyon değerleri incelendiğinde tüm senaryolarda CO emisyonu çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Tüm sinyalizasyon senaryolarındaki emisyon değerleri, mevcut durumun simülasyon analizi ile elde edilen verilere göre yaklaşık %60 yükselmiştir. Katlı kavşak senaryosundaki emisyon değerleri, mevcut durum değerlerine göre yaklaşık %40 düşmüştür. Analizler sonucunda elde edilen emisyon değerleri, aşağıdaki Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 4 : Zirve saat verileri için emisyon değerleri değişimleri.

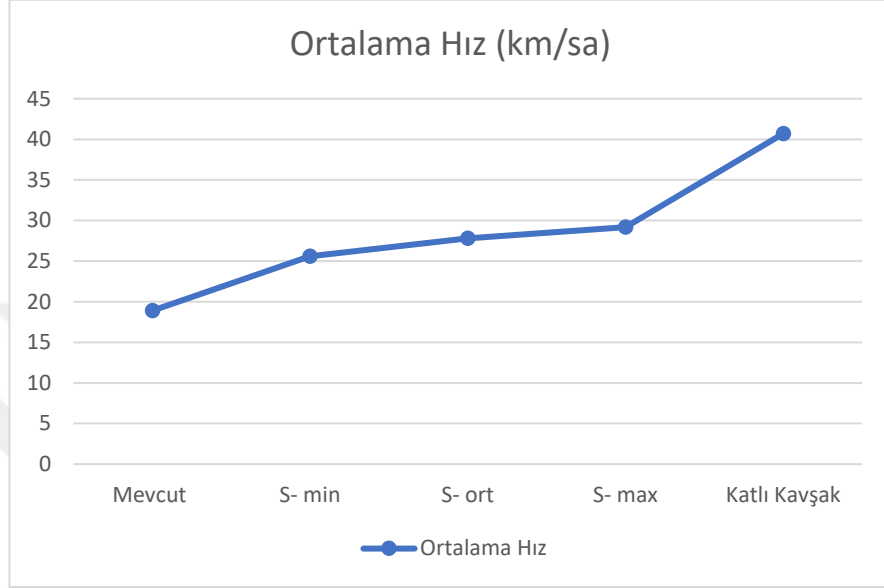
Yakıt tüketimi; simülasyon analizinde, analiz süresi boyunca sistemde bulunan tüm araçların inceleme kapsamındaki bölge içerisinde gerçekleşen tüketim miktarını ifade etmektedir. Senaryoların analiz sonuçlarına göre elde edilen yakıt tüketim değerleri incelendiğinde sinyalizasyon senaryolarında mevcut durum senaryosu değerlerine göre %58'e yakın artışlar gözlenmiştir. Katlı kavşak senaryosunda ise %40 düşüş görülmektedir. Analizler sonucunda elde edilen yakıt tüketimi verileri aşağıdaki Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 : Zirve saat verileri için yakıt tüketimi değişimleri.

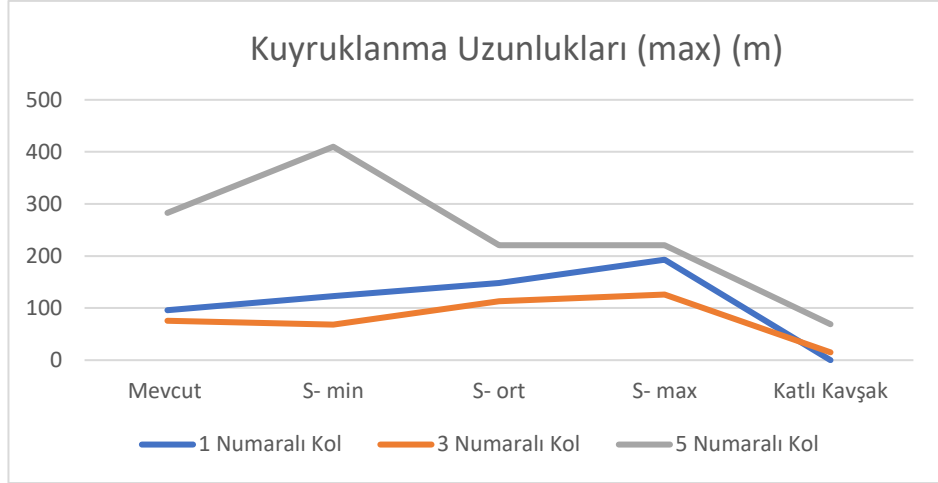
Ortalama hız; simülasyon analizinde sistemde bulunan tüm araçların katettiği toplam mesafenin toplam seyahat süresine oranı ile bulunmaktadır. Senaryoların analiz sonuçlarına göre elde edilen ortalama hız değerleri incelendiğinde sinyalizasyon

senaryolarında mevcut durum senaryosuna göre %35 ile %55 arasında yükselişler olmuştur. Katlı kavşak senaryosunda ise mevcut durum senaryosuna göre %115 artış görülmektedir. Analizler sonucunda elde edilen ortalama hız verileri aşağıdaki Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



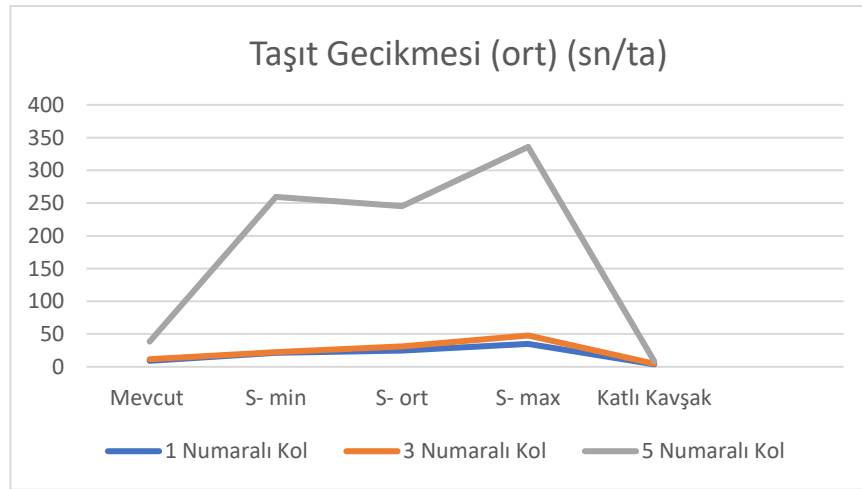
Şekil 4. 6 : Zirve saat verileri için ortalama hız değişimleri.

Kuyruklanma uzunlukları; simülasyon analizinde yaklaşım kollarında bulunan araçların oluşturduğu en yüksek kuyruk uzunluğu ihtimali olarak tanımlanmıştır. Kuyruklanma uzunlukları değerlerinde 5 numaralı yaklaşım kolunda kuyruklanma uzunlukları en yüksek olarak görülmektedir. Katlı kavşak senaryosunda tüm kolların kuyruklanma uzunluklarında düşüşler kaydedilmiştir. Kuyruklanma uzunlukları verileri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 7 : Zirve saat verileri için kuyruklanma uzunluğu değerleri değişimleri.

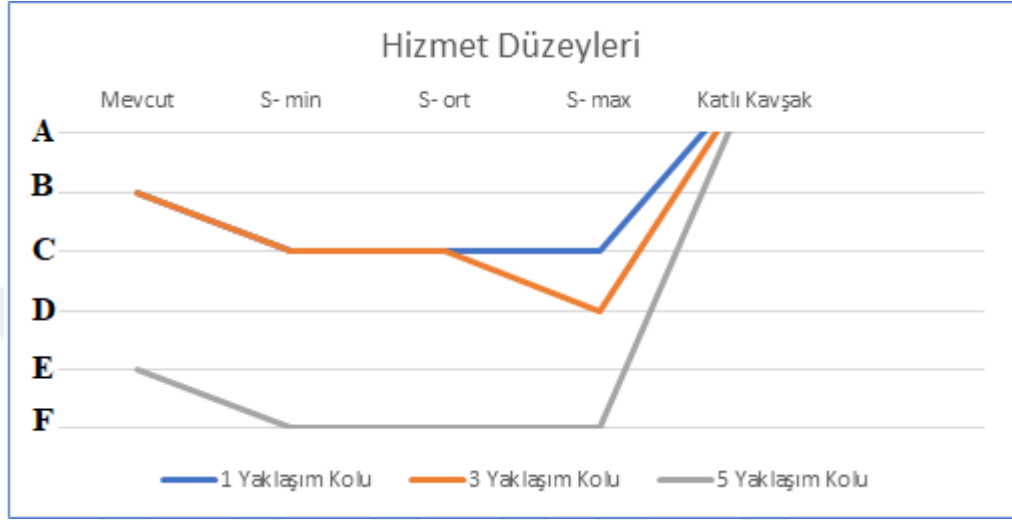
Gecikme, bir taşıtın gerçek yolculuk süresi ile teorik (ideal) yolculuk süresi arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Simülasyon analizleri sonucunda elde edilen ortalama gecikme değeri ise, simülasyon süresince tüm araçlar için hesaplanan toplam gecikme süresinin, bu araçların sayısına bölünmesiyle elde edilen bir ortalamadır. Sinyalizasyon senaryolarının analizleri sonucunda tüm yaklaşım kolları için gecikme sürelerinde yükseliş gözlenmektedir. Katlı kavşak senaryosunda ise tüm senaryolar karşılaştırıldığında gecikme değerleri için en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Taşıt gecikmesi verileri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 8 : Zirve saat verileri için taşıt gecikmesi değerleri değişimleri.

Hizmet düzeyi; simülasyon analizleri sırasında kavşak kollarında bulunan araçların gecikme sürelerine ve trafik akışına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Hizmet düzeyi

veri sonuçları daha net görülmesi için grafik üzerinde Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Mevcut durumda hizmet düzeyleri 1,3,5 yaklaşım kolları için sırasıyla B,B,E hizmet düzeylerine sahipken sinyalizasyon senaryolarında F hizmet düzeylerine çıktığı görülmüştür. Katlı kavşak senaryosunda ise tüm yaklaşım kollarında A hizmet düzeyi gözlenmektedir.



Şekil 4. 9 : Zirve saat verileri için hizmet düzeyleri değişimleri.

BÖLÜM 5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİ

Sürdürülebilir ulaşım ve kentsel hareketlilik, modern şehirlerin uygulamada zorlandığı en önemli kavramlardır. Artan nüfus ve motorlu taşıt sayısı, şehir içi ulaşımın etkin ve çevre dostu çözümler gerektirdiği gerçeğini ortaya koymaktadır. Sürdürülebilir ulaşım, yalnızca çevreyi koruma ile kalmaz, bununla birlikte toplumsal yaşam kalitesini de artırmaktadır. Bu kapsamda, toplu taşıma sistemlerinin iyileştirilmesi, bisiklet ve yaya yollarının geliştirilmesi, enerji verimli araçların teşvik edilmesi gibi stratejiler hayati öneme sahiptir. Kentsel hareketliliğin sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi, gelecekteki şehir yaşamının kalitesini belirleyecektir.

Kavşak bölgesinde yaşanan trafik yoğunluğu; zaman kaybı, çevre kirliliği ve ekonomik maliyetler gibi ciddi problemlere yol açmaktadır. Bu çalışmada, bu problemlerin çözüm yolları için benzetim yöntemlerinden faydalanılmıştır. Özellikle Vissim programı kullanılarak, farklı senaryolar simüle edilerek Sedaş Kavşağı'nın mevcut durumu ve olası iyileştirme yöntemleri analiz edilmiştir. Ayrıca, Sedaş Kavşağı'nda trafik yoğunluğunun yüksek olduğu ve gelecek yıllarda da artış olacağı beklentisi bulunmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, veri girişlerinde yaklaşım kollarının hacimlerinin her simülasyon modeline aynı şekilde girilmesine rağmen araç sayısı sonuçlarında farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılığın sebebi kavşakta oluşan sıkışıklıklardan dolayı sisteme simülasyon esnasında daha fazla araç girememesinden kaynaklanmaktadır. Sonuçlarda görüldüğü üzere sistemin rahatladığı katlı kavşak senaryosunda araç sayısı için bir artış elde edilmiştir. Sinyalizasyon senaryolarında ise oluşan sıkışıklıklardan dolayı simülasyon kapasitesini aştığı için araç sayısında azalma kaydedilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde emisyon değerleri ve yakıt tüketimi verilerinde doğru orantı olduğu görülmektedir. Minimum döngü seviyesine göre yapılan senaryo analiz sonuçlarında bu verilerin en yüksek olduğu senaryo olmuştur. Bu senaryonun trafik

akışını rahatlatmadığı aksine problemlere sebep olduğu görünmektedir. Katlı kavşak senaryosu ise mevcut durum analiz sonuçlarına göre iki parametrede de %40 azalma kaydedilmiştir. Bu sonuca göre katlı kavşak senaryosunda çevreye zarar boyutu küçültülmüş olup sürdürülebilir ulaşımın amacına ulaşılmıştır.

Kuyruklanma uzunluk verileri incelendiğinde 5 numaralı yaklaşım kolunda maksimum değerlere ulaşılmıştır. Tüm senaryolar bu parametre bazında incelendiğinde 5 numaralı yaklaşım kolu trafik akışı için kötü performans göstermektedir. Katlı kavşak senaryosunda ise emisyon değerleri ve yakıt tüketimi verilerinde yaşadığı düşüşü bu parametre için de yaşamıştır. Katlı kavşak senaryosu tüm senaryolar karşılaştırıldığında kuyruklanma uzunlukları verileri için en iyi performansı sağlamıştır. Gecikme sonuçlarına baktığımızda 5 numaralı kavşakta yaşanan kuyruklanmalardan dolayı gecikme değerleri de en yüksek değerlere ulaşmıştır. Katlı kavşak senaryosunda ise gecikme değerlerinin en düşük seviyede olduğu görülmüştür.

Ortalama hız verileri tüm senaryo analiz sonuçlarında yükselmiştir. Bu parametre için istenilen performans artırma amacına ulaşılmıştır. En iyi performansı ise 40,7 km/sa ile katlı kavşak senaryo analiz sonuçları vermiştir.

İncelenen bu parametrelerin genel bir ifadesi olarak görülen hizmet düzeyi parametresi değerlendirildiğinde mevcut durumda 1,3,5 yaklaşım kollarında sırasıyla B,B,E hizmet düzeyleri elde edilmiştir. Sinyalizasyon senaryolarında hizmet düzeyi değerleri daha kötü hizmet düzeylerine ulaştığı görünmektedir. Katlı kavşak senaryosunda ise tüm yaklaşım kolları A hizmet düzeyine ulaşmış olup en iyi performansı gösteren senaryo olmuştur.

Katlı kavşak uygulamasının Sedaş Kavşağı'nda trafik akışını önemli ölçüde iyileştirdiği, hizmet düzeylerini artırdığı ve çevresel etkileri azalttığı görülmüştür. Ancak, bu tür altyapı projelerinin maliyeti ve uygulanabilirliği göz önünde bulundurulmalıdır. Sinyalizasyon senaryoları ise beklenen performans iyileşmelerini sağlayamamış, aksine bazı olumsuz sonuçlara sebep olmuştur. Bu bağlamda, sürdürülebilir ulaşım çözümleri için daha kapsamlı ve entegre yaklaşımlar geliştirilmelidir.

Kavşakta yaşanan problemler ve simülasyon analiz sonuçları değerlendirildiğinde, trafik yoğunluğunun azaltılması ve ulaşımın daha sürdürülebilir hale getirilmesi için çeşitli öneriler sunulabilir. Bu kapsamda yerel yönetimlerin ve şehir planlamacılarının, makro

düzeyde simülasyon yöntemlerini kullanarak kapsamlı planlar yapmaları büyük önem taşımaktadır. Kavşağın geometrik tasarımının gözden geçirilerek daha etkin ve verimli bir yapıya kavuşturulması gerekmektedir. Toplu taşıma araçlarının kullanımı teşvik edilmeli, özel araç kullanımının azaltılması için politikalar geliştirilmelidir. Kavşak bölgesinde park ve durma yasakları getirilerek, trafiğin akışını engelleyen unsurlar minimize edilmelidir. Ayrıca, trafiğin akışını sürekli takip eden ve anlık verilerle güncellenen sistemler kurulmalı, bu sistemler aracılığıyla sürücülere alternatif güzergahlar hakkında bilgilendirme yapılmalıdır. Kavşak bölgesinde trafik yoğunluğu varken, sürücülerin kavşağa gelmeden önce bilgilendirme ekranları aracılığıyla alternatif yolları kullanmaları sağlanmalıdır. Bu alternatif güzergahlar ve çevresindeki kavşaklar ile birlikte yapılabilecek mezoskopik düzeydeki analizler, sadece kavşağın değil, aynı zamanda bölgesel trafik dinamiklerinin de kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmesine olanak tanıyarak daha geniş bir perspektif sunmaktadır. Bu stratejiler, şehir içi ulaşımın daha sürdürülebilir, verimli ve çevre dostu olmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Aty, M. A., ve Radwan, A. E. (2000), Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention*, 32(5), 633-642, [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00094-9).
- Acar, İ. (1996), Motorlu Taşımacılığın Ortaya Çıkarttığı Çevre Kirliliği ve Önlemler. *Birinci Ulusal Ulaşım Sempozyumu*, İETT Genel Müd., İstanbul, 405-413.
- Acar, S. (2021, 3 Ocak). Sürdürülebilirlik ve Ulaşım İlişkisi. Medium. <https://selmaacar.medium.com>
- Ahadi, S. (2019). *Vissim Yazılımı Kullanarak Mezar-ı-Şerif (Afganistan) Örnek Çalışması İçerikli Kavşak Gecikme Analizleri*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Altuntaş, S. T., ve Eyigün, Y. (2021), Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım Politikaları Raylı Sistemler Örneği, *Journal of Technology and Applied Sciences*, 3(2), 217-233.
- Aydın, İ. (t.y.). *Benzetim ve Modelleme*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ders Notları, Samsun.
- Ayfer, M. Ö. (1977). *Trafik Sinyalizasyonu*, T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, 226, 46-67, Ankara.
- Azimirad, E., Pariz, N., ve Sistani, M. B. N. (2010). A Novel Fuzzy Model and Control of Single Intersection at Urban Traffic Network, *IEEE Systems Journal*, 4(1), 107-111, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2010.2043159>.

- Balta, M., ve Özçelik, İ. (2018). Şehir içi kavşak yönetim sistemleri için SDN temelli bir VANET mimari önerisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1451-1468, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460544>.
- Ban, X. (Jeff), Herring, Hao, P., ve Bayen, A. (2009). Delay Pattern Estimation for Signalized Intersections Using Sampled Travel Times. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2130, 109-119, <https://doi.org/10.3141/2130-14>.
- Baş, F. İ., Çolak, M. A., Demiriz, A. O., Bayata, H. F., Bayrak, O. Ü., Keleş, Ö. F., Mazlum, Y., Gürel, M. O., ve Demircioğlu, M. S. (2020). Kentiçi Kavşakların Mikrosimülasyon Yöntemiyle Modellenmesi: Erzurum İli Örneği, *European Journal of Science and Technology*, 444-451, <https://doi.org/10.31590/ejosat.araconf58>
- Bayrak, O. Ü., Çolak, M. A., Bayata, H. F., ve Hattatoğlu, F. (2016). Mikrosimülasyon Kullanılarak Bir Kavşağın Trafik Yönetim Ölçümlerinin Değerlendirilmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 87-96.
- Boğaziçi Proje. (2024). Antalya Kısa Dönem Ulaşım ve Trafik İyileştirme Etüt ve Projeleri—Projelerimiz. Boğaziçi Proje. <http://www.bogaziciproje.com>
- Boschmann, E. E., ve Kwan, M.-P. (2008). Toward Socially Sustainable Urban Transportation: Progress and Potentials. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2(3), 138-157. <https://doi.org/10.1080/15568310701517265>
- Boxill, S. A., ve Yu, L. (2000). *An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development*. Center for Transportation Training and Research Texas Southern University.

- Bozkurt, H., ve Yılmaz, H. (2020). Dönel Kavşakların Kavşak Güvenliği Üzerine Etkisinin Analizi. *Academic Perspective Procedia*, 3(2), 893-902. <https://doi.org/10.33793/acperpro.03.02.25>.
- Buisson, C., Lebacque, J. P., ve Lesort, J. B. (1996). *Strada, a Discretized Macroscopic Model od Vehicular Traffic Flow in Complex Networks Based on the Godunov Scheme*. Symposium on Modelling, Analysis and Simulation (1996: Lille France). CESA' 96: IMACS multiconference Vol. 2. 976-981 <https://trid.trb.org/View/495534>
- Camcı, A. A. (2019). *Kavşak Tasarımında Trafik Simülasyon Tekniklerinin Kullanımı ve Sakarya İçin Uygulamalar*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Cirit, F. (2014). *Sürdürülebilir Kentiçi Ulaşım Politikaları ve Toplu Taşıma Sistemlerinin Karşılaştırılması*, (Uzmanlık Tezi), T.C. Kalkınma Bakanlığı, Ankara.
- Çakıcı, Z. (2014). *Sinyalize Dönel (Yuvarlakada) Kavşakların Tasarım Esaslarının Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Çakıcı, Z., ve Murat, Y. Ş. (2016). Sinyalize Dönel Kavşaklar için Hesap Yöntemi Önerisi ve Performans Analizi, *İMO Teknik Dergi*, 461, 7569-7592.
- Çetinkaya, G. (2008), *Işıklı Kavşaklarda Değişik Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çırak, G. (2023). *Sinyalize Dönel Kavşakların Tasarım Yöntemlerinin Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Çöreköztaş, Ç. (2023, 19 Aralık). Kent İçi Sürdürülebilir Ulaşım Kavramı ve Bileşenleri Her Şehirde Aynı Şekilde Algılanmıyor. TheCityFix Türkiye. <https://thecityfixturkiye.com>
- Dağüstü, H. Ş. (2010). *Trafik Yönetiminde Kavşak Trafiğinin Kontrolü için Bir Sinyal Zamanlama Modeli*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Danışmanlık, T. (t.y.). Sürdürülebilir Ulaşım. Taksim Danışmanlık. <https://www.taksimdanismanlik.com>
- Dikmen, Ç. B., ve Gültekin, A. B. (2011). Usage Of Renewable Energy Resources In Buildings in The Context Of Sustainability. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(3), 96-100.
- Dion, F., ve Kang, Y. S. (2004). Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38, 99-122, [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(03\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00003-1)
- Dissart, J. ve Deller, S. C. (2000). Quality Of Life In The Planning Literature. *Journal Of Planning Literature*, 15(1), 135-161.
- Egger, S. (2006). Determining a sustainable city model, *Environmental Modelling and Software*, 21(9), 1235-1246. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.04.012>
- El Hmam, M. said, Abouaissa, H., Jolly, D., ve Benasser, A. (2006). Macro- Micro Simulation of Traffic Flow, *12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Saint Etienne, 39(3), 351-356.

- Erol, D. (2018). *Kentiçi Işıklı ve Dönel Kavşak Uygulamalarının Performans Kriterlerine Etkisi: Denizli Örneği*, (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Eryiğit, S. (2012). *Sürdürülebilir Ulaşımın Sosyal Boyutunda Bisikletin Yeri*, (Doktora Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Şehir ve Bölge Planlama Ana Bilim Dalı, Konya.
- Fellendorf, M., ve Vortisch, P. (2011). Microscopic traffic flow simulator VISSIM. *Fundamentals of Traffic Simulation*, 145, 63-93, https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_2
- Fierek, S., ve Zak, J. (2012). Planning of an Integrated Urban Transportation System based on Macro – Simulation and MCDM/A Methods, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 567-579. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.774>
- Gedizlioğlu, E. (1979). *Denetimsiz Kavşaklarda Yanyol Sürücülerinin Davranışlarına Göre Pratik Kapasite Saptanması İçin Bir Yöntem*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gedizlioğlu, E. (2007). *Trafik Yönetimi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Ders Notları, İstanbul.
- Golias, J. C. (1997). Effects of signalisation on four-arm urban junction safety, *Accident Analysis and Prevention*, 29(2), 181-190. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(96\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(96)00072-3)
- Güçmen, Ö. (1998). *Otoyolların Geometrik Planlaması*, İstanbul Teknik Üniversitesi Ders Notları, İstanbul.
- Güler, Z. (2013). *Akıllı Trafik Kontrol Sistemi*, (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Gülsün, B., ve Gonca, C. K. (2019). Adaptif Trafik Yönetim Sistemleri, *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi*, 2(1), 32-40.
- Güzel, İ. (2021). Bingöl Düzağaç Kavşağının Rotor Tipi Turbo Dönel Kavşak Olarak Düzenlemesi Durumu için Kapasite Hesaplarının Ön Çalışması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 11-25.
<https://doi.org/10.35234/fumbd.684519>
- Hillier, F. S., ve Lieberman, G. J. (2015). *Introduction to operations research*. McGraw-Hill.
- Kayacan, A., Yılmaz, B., ve Rizelioğlu, M. (2022). Hemzemin Kavşak İyileştirmelerinin Kavşak Performansı ve Taşıt Emisyonları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi: Bursa Örneği, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27(2), 717-730. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1056004>
- Kaygusuz, S. (2009). *Mersin' de Kentsel Hareketlilik: Mersin Esnafının Mekansal Hareketliliği Üzerine Bir Araştırma*, (Yüksek Lisans Tezi), Mersin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mersin.
- Kennedy, C., Miller, E., Shalaby, A., Maclean, H., Coleman, J., Ltd, F., ve Sgm. (2005). The Four Pillars of Sustainable Urban Transportation. *Transport Reviews*, 25, 393-414. <https://doi.org/10.1080/01441640500115835>
- KGM Yayınları. (2007). *Karayolu Trafik Güvenliği El Kitabı*, Trafik Şubesi Müdürlüğü.
- KGM Yayınları. (2016). *Karayolu Tasarım El Kitabı*, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Korkmazyürek, B., ve Polat, E. (2019). Kentsel Ulaşımında Esnek, Akıllı ve Yeni Bir Planlama Yaklaşımı: Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları, *Kent Akademisi*, 12(2), 225-240. <https://doi.org/10.35674/kent.537224>

- Lieberman, E., ve Rathi, A. K. (1997). Traffic Simulation, *Transportation research board special report*, 268-270.
- Morgan, H. L. (1970). UTS-I: A macro system for traffic network simulation. *Proceedings of the May 5-7, 1970, Spring Joint Computer Conference on - AFIPS '70 (Spring)*, New York, 217-222. <https://doi.org/10.1145/1476936.1476974>
- Ocakdan, S. (2010). *Arterlerin Yeniden Yapılandırılmasında Simülasyon Tekniği ile Karar Verme ve Bir Kavşak Uygulaması*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ordu, H., ve Kırbaş, U. (2021). Dönel kavşaklarda meydana gelen dengesiz akımlara bir çözüm önerisi olarak kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar: Bir literatür araştırması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 674-683.
- Öğütveren, E. (2019). *Modern Dönel Kavşakların Geometrik Tasarımı ve Kapasite İlişkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Öncü, E., ve Yıldız, A. Ö. (t.y.). Sürdürülebilir Ulaşım: Devlet bunun neresinde?, *Sürdürülebilir Ulaştırma*, 9, 15-28.
- Özinal, Y., ve Uz, V. (2021). Dönel Kavşak Geometrik Elemanlarının Kavşak Güvenliği Üzerine Etkisinin Literatür Işığında Değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 24(1), 283-297. <https://doi.org/10.2339/politeknik.630947>
- Özkaya, U., ve Seyfi, L. (2016). A Novel Fuzzy Logic Model for Intelligent Traffic Systems, *Electronics World*, 122, 36-39.

- Pamuk, N. (2021). Trafik Sinyalizasyon Sisteminde Akıllı Kavşak Kontrolü, *European Journal of Science and Technology*, 28, 312-319, <https://doi.org/10.31590/ejosat.998887>
- Park, B. (Brian), ve Schneeberger, J. D. (2003). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1856(1), 185-192. <https://doi.org/10.3141/1856-20>
- Peden, M. M. (2004). *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. World Health Organization.
- Ramzanzad, M., ve Rashidy Kanan, H. (2013). A new method for design and implementation of intelligent traffic control system based on fuzzy logic using FPGA, *2013 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC)*, Kazvin, 1-4. <https://doi.org/10.1109/IFSC.2013.6675630>
- Saplıoğlu, M., ve Karaşahin, M. (2010). Şehir içi Kontrolsüz Eşdüzey Kavşak Kazalarını Etkileyen Unsurların Değerlendirilmesi, *SDU International Technologic Science*, 2, 26-49.
- Sokolowski, J. A., ve Banks, C. M. (2009). Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach, *Journal of Statistical Software*, 31, 3. <https://doi.org/10.18637/jss.v031.b03>
- Solecka, K., ve Zak, J. (2014). Integration of the urban public transportation system with the application of traffic simulation, *Transportation Research Procedia*, 3, 259-268.

- Stevanovic, J., Stevanovic, A., Martin, P. T., ve Bauer, T. (2008). Stochastic optimization of traffic control and transit priority settings in VISSIM, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(3), 332-349. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.01.002>
- Suri, L., ve Şeker Murat, M. (2022). Kent İçi Ulaşım Projelerinde Mikrosimülasyon Yönteminin Kullanılması: Esenyurt Ahmet Arif Caddesi Örneği, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22(43), 152-178. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1150425>
- Tanyel, S. (2001). *Türkiye’deki Dönel Kavşaklar için Kapasite Hesap Yöntemi*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tarhan, A. K., ve Ercoşkun, O. (2023). İstanbul Park Et Devam Et Sisteminin Sürdürülebilir ve Entegre Ulaşım Etkisi, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6(2), 446-465. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1069890>
- Topal, O. (2019). Türkiye Toplu Ulaşımında Elektrikli Otobüsler, *European Journal of Science and Technology*, 15, 155-167. <https://doi.org/10.31590/ejosat.512606>
- Tunalıoğlu, N. (2005). *Katlı Kavşakların ve Bağlantı Yollarının Planlanması Örnek Uygulama Olarak Altunizade Katlı Kavşağı*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TÜİK. (2010). *Trafik Kazası İstatistikleri 2009*. TÜİK Basımevi.
- Uludamar, E., ve Tüccar, G. (2018). Döner Kavşaklarda Farklı Sinyalizasyon Zamanlamasındaki Trafik Yoğunluğunun Karşılaştırılması, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 217-223. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.386593>

Vuchic, V. R. (2001). Transportation for Livable Cities, *Journal of Housing and the Built Environment*, 16, 245-247, <https://doi.org/10.1023/A:1017551925033>

Yalçiner Ercoşkun, Ö. (2021). *Ulaşım ve Sürdürülebilirlik*, Gazi Üniversitesi Ders Notları, Ankara.

Yılmaz, M., Altinkaya, H., ve Ekmekçi, D. (2019). Control of Railway Signalization Between Zonguldak Ankara with Neuro-Fuzzy Approach, *2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics and Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT)*, İstanbul, 1-4. <https://doi.org/10.1109/EBBT.2019.8741690>

