

**T.C.**  
**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OTONOM ARAÇLARIN KAVŞAKTAN GÜVENLİ GEÇİŞİ İÇİN OYUN  
TEORİSİNE DAYALI BİR YÖNTEM**

**ELSHAD RAHİMOV**

**Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı**

**Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Programı**

**AĞUSTOS 2022**

**T.C.**  
**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OTONOM ARAÇLARIN KAVŞAKTAN GÜVENLİ GEÇİŞİ İÇİN OYUN  
TEORİSİNE DAYALI BİR YÖNTEM**

**ELSHAD RAHİMOV**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr.Üyesi MUHAMMED MİLANİ**

**Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı**

**Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Programı**

**AĞUSTOS 2022**

## ÖNSÖZ

Tezin yazımı sürecinde bana yardım eden, çalışmanın her aşamasına dikkat ederek beni yönlendiren, bilgilerini, tecrübelerini ve en çok da değerli zamanlarını esirgemeyerek her fırsatta yardımcı olan sayın danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Muhammed Milani`ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi'ne bana sevdiren değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Yabancı olduğuma bakmayarak beni kendi insanları gibi aralarına alan ve beni yalnız bırakmayan Bandırma Halkına teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, benim daha ilerilere gitmem için her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.



# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### OTONOM ARAÇLARIN KAVŞAKTAN GÜVENLİ GEÇİŞİ İÇİN OYUN TEORİSİNE DAYALI BİR YÖNTEM

**Elshad RAHİMOV**

**Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Muhammed MİLANİ**

**Ağustos 2022, 63 sayfa**

Günümüzde insan emeğinin minimuma düşürülmesi yönünde birçok işlerin hayata geçirildiği ve kendi karar verebilen teknolojilerin geliştiği görülmektedir. Ulaşım alanı da şu gelişim akımı ile ilerlemektedir. Otonom araçlar, artık ABD, Çin, İngiltere, Güney Kore, Yeni Zelanda gibi ülkelerde ulaşım, ticari, askeri ve diğer alanlarda çok yönlü amaçlar için kullanılmaktadır. İnsan kaynaklı hataları, zaman kayıpları ve doğa kirliliği gibi sorunların düşürülmesi yönünde olağanüstü avantajlar sağlayacak olan otonom araçların gelecekte çok sayıda piyasaya sunulacağı ve insanlar tarafından tercih edileceği öngörülmektedir. Fakat günümüzde altyapı ve teknik yetersizlik, yasal, güvenlik ve emniyet sorunları, satın alma, ulaşım ve işletme maliyetinin yüksek olması, otonom araçların yaygınlaşmasının önünde zorluklar oluşturmaktadır. Trafik sinyalleri ve dur işareti kontrolü gibi geleneksel trafik kontrol yöntemleri, literatürde gösterildiği gibi tüm talep seviyeleri için optimal değildir. Son zamanlarda, çok sayıda araştırma çalışması, kavşak kapasitesini artırmak ve dolayısıyla tıkanıklığı azaltmak için Akıllı Ulaşım Sistemi (AUS) uygulamalarını önermiştir. Bu türlü çalışmalar, geleneksel yöntemlerin optimizasyonu ve çağdaş teknolojilerle ilişkin yeni yaklaşımları içermektedir. Bu tez çalışmasında, otonom araçların kontrolsüz kavşaktan hızlı, güvenli ve konforlu geçişini sağlamayı hedefleyen

Kooperatif Adaptif Hız Sabitleyici (KAHS) sistemleri ile donatılmış otonom araç hareketlerini kontrol etmek için oyun teorisi tabanlı bir algoritma öneriyoruz.

**Anahtar Kelimeler:** Otonom Araçlar, Kontrolsüz Kavşaklar, 5G Teknolojisi, V2X Teknolojisi, Oyun Teorisi



# **ABSTRACT**

**M.Sc. THESIS**

## **A GAME THEORY-BASED METHOD FOR THE SAFE PASSAGE OF AUTONOMOUS VEHICLES THROUGH INTERSECTION**

**ELSHAD RAHIMOV**

**Bandırma Onyedi Eylül University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Intelligent Transportation Systems and Technologies**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Muhammed MİLANİ**

**August 2022, 63 pages**

Today, it is seen that many works have been implemented to minimize human labor, and technologies that can make their own decisions are developed. The field of transportation is also advancing with the following development trend. Autonomous vehicles are now used for versatile purposes in transportation, commercial, military, and other fields in countries such as the USA, China, England, South Korea, and New Zealand. It is foreseen that autonomous vehicles, which will provide extraordinary advantages in reducing problems such as human-induced errors, loss of time, and nature pollution, will be offered to many markets in the future and will be preferred by people. However, today, infrastructure and technical inadequacy, legal, security, and safety problems, and high purchasing, transportation, and operating costs create difficulties in front of the widespread use of autonomous vehicles. As shown in the literature, conventional traffic control methods such as traffic signals and stop sign control are not optimal for all demand levels. Recently, numerous research studies have suggested Intelligent Transportation System (ITS) applications to increase intersection capacity and thus reduce congestion. Such studies include optimizing traditional methods and new approaches to contemporary technologies. In this thesis, we propose a game theory-based algorithm to control autonomous vehicle movements equipped

with Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) systems, which aim to ensure fast, safe and comfortable passage of autonomous vehicles from uncontrolled intersections.

**Keywords:** Autonomous Vehicles, Intersections, 5G Technology, V2X Technology, Game Theory



# İÇİNDEKİLER

|                                                       | Sayfa |
|-------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                            | I     |
| ABSTRACT .....                                        | III   |
| İÇİNDEKİLER.....                                      | V     |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                   | VIII  |
| TABLO LİSTESİ.....                                    | IX    |
| KOD LİSTESİ.....                                      | X     |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                 | XI    |
| 1. GİRİŞ.....                                         | 1     |
| 1.1. ÇALIŞMANIN AMACI .....                           | 2     |
| 1.2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI .....                         | 3     |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI .....                           | 4     |
| 3. OTONOM ARAÇLAR .....                               | 6     |
| 3.1. OTONOM ARAÇLARIN ÖZELLİKLERİ .....               | 6     |
| 3.1.1. Otonom Araçların Çevre Algılama Cihazları..... | 7     |
| 3.1.2. Araçların Otonom Sürüş Seviyeleri.....         | 8     |
| 3.1.3. Otonom Araçların Rota Planlaması .....         | 10    |
| 3.2. OTONOM ARAÇLARIN GELİŞİMİ.....                   | 14    |
| 3.2.1. Otonom Araçların Tarihi.....                   | 14    |
| 3.2.2. Otonom Araçların Günümüzdeki Durumu .....      | 15    |
| 3.3. OTONOM ARAÇLARIN AVANTAJLARI .....               | 16    |
| 3.3.1. Kaza Oranı.....                                | 17    |
| 3.3.2. Trafik Sıkışıklığı .....                       | 18    |
| 3.3.3. Çevre Kirliliği .....                          | 18    |
| 3.3.4. Maliyet Avantajları .....                      | 19    |
| 3.4. OTONOM ARAÇLARIN GELECEK POTANSİYELİ .....       | 19    |
| 3.4.1. Hizmet Olarak Mobilite ve Otonom Araçlar ..... | 20    |
| 4. KAVŞAKLAR .....                                    | 21    |
| 4.1. KAVŞAK TÜRLERİ .....                             | 21    |



|        |                                                    |    |
|--------|----------------------------------------------------|----|
| 4.1.1. | Farklı Düzey Kavşaklar .....                       | 21 |
| 4.1.2. | Eşdüzey Kavşaklar .....                            | 22 |
| 4.1.3. | Kavşaktaki Çakışmalar .....                        | 24 |
| 4.1.4. | Kanalize Kavşak .....                              | 25 |
| 4.2.   | KAVŞAK KONTROL SEVİYELERİ .....                    | 26 |
| 4.2.1. | Pasif Trafik Kontrolü .....                        | 26 |
| 4.2.2. | Yarı Trafik Kontrolü .....                         | 27 |
| 4.2.3. | Aktif Trafik Kontrolü .....                        | 27 |
| 5.     | ARAÇ KONTROL MERKEZİ .....                         | 29 |
| 5.1.   | ARAÇ KONTROL MERKEZİ'NİN YARDIMCI CİHAZLARI .....  | 29 |
| 5.1.1. | AKM Kablosuz İletişim Kartı .....                  | 30 |
| 5.1.2. | AKM RAM Belleği .....                              | 31 |
| 5.1.3. | AKM İşlemci ve Sıvı Soğutma .....                  | 31 |
| 5.1.4. | AKM Hafıza Kartı .....                             | 32 |
| 5.1.5. | SIM Kart ve 5G Modemi .....                        | 32 |
| 5.1.6. | Hava Durumu Sensörü .....                          | 33 |
| 5.1.7. | Batarya ve Güneş Paneli .....                      | 33 |
| 5.2.   | ARAÇ KONTROL MERKEZİNİN ÇALIŞMA DÖNGÜSÜ .....      | 33 |
| 6.     | OYUN TEORİSİ .....                                 | 35 |
| 6.1.   | OYUN TEORİSİ İLK ÇALIŞMALARI VE UYGULAMALARI ..... | 35 |
| 6.2.   | OYUN TEORİSİNDE OYUN TÜRLERİ .....                 | 36 |
| 6.2.1. | İşbirlikçi ve İşbirlikçi Olmayan Oyunlar .....     | 36 |
| 6.2.2. | Sıfır Toplamlı Oyunlar .....                       | 37 |
| 6.2.3. | Sıfır Toplamlı Olmayan Oyunlar .....               | 38 |
| 6.3.   | TAVUK OYUNU .....                                  | 38 |
| 7.     | OTONOM ARAÇLARIN KONTOLSÜZ KAVŞAK PROBLEMİ .....   | 40 |
| 7.1.   | PROBLEMİN TANIMI .....                             | 40 |
| 7.2.   | ÖNERİLEN ÇÖZÜM ALGORİTMASI .....                   | 42 |
| 7.3.   | ÖNERİLEN ALGORİTMANIN UYGULANMASI .....            | 46 |
| 8.     | TARTIŞMA VE SONUÇ .....                            | 53 |
| 9.     | ÖNERİLER .....                                     | 55 |
| 10.    | KAYNAKLAR .....                                    | 56 |



## ŞEKİL LİSTESİ

| <u>Sekil</u>                                                                                  | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 3-1: Araçların çevreyi algılama teknolojileri.....                                      | 7            |
| Şekil 3-2: Araçların çevre algılama sensörleri.....                                           | 8            |
| Şekil 3-3: Araçların otonom sürüş seviyeleri .....                                            | 10           |
| Şekil 3-4: A* algoritması [18] .....                                                          | 11           |
| Şekil 3-5: Dijkstra algoritması [19] .....                                                    | 11           |
| Şekil 3-6: Durum Örgüsü algoritması [20] .....                                                | 12           |
| Şekil 3-7: Otonom araç sürüş planlaması döngüsü .....                                         | 13           |
| Şekil 4-1: (a)trompet kavşak,(b) yarı yonca kavşak,(c) yonca kavşak,(d) elmas kavşak.....     | 22           |
| Şekil 4-2: (a) T-kavşak, (b) Y-kavşak (çatal kavşak) .....                                    | 23           |
| Şekil 4-3: (a) dikey kavşak, (b) yatık kavşak.....                                            | 23           |
| Şekil 4-4: Dairesel dönel kavşak [59] .....                                                   | 24           |
| Şekil 4-5: Dört kollu eşdüzey kavşakta potansiyel çakışma noktaları.....                      | 25           |
| Şekil 4-6: (a) Kanalize edilmiş üç kollu kavşak, (b) Kanalize edilmiş dört kollu kavşak ..... | 25           |
| Şekil 5-1: AKM'nin yardımcı cihazları .....                                                   | 30           |
| Şekil 5-2: AKM kablosuz bağlantı kartı örneği [59] .....                                      | 31           |
| Şekil 5-3: AKM RAM belleği örneği [60]. .....                                                 | 31           |
| Şekil 5-4: AKM işlemci örneği [65]. .....                                                     | 32           |
| Şekil 5-5: Araç Kontrol Merkezi'nin çalışma döngüsü.....                                      | 34           |
| Şekil 5-6: Araç-AKM arasındaki kablosuz iletişim.....                                         | 34           |
| Şekil 7-1: Kavşağın üçgen görüş alanı [82] .....                                              | 40           |
| Şekil 7-2: İki otonom araç arasındaki Tavuk Oyunu modeli .....                                | 41           |
| Şekil 7-3: Aracın frenleme mesafesi.....                                                      | 45           |
| Şekil 7-4: Step fonksiyonu için akış diyagram .....                                           | 49           |
| Şekil 8-1: AKM etki mesafesi ile gecikme süreleri arasındaki ilişki .....                     | 53           |
| Şekil 8-2: Şerit genişliği ve gecikme süreleri arasındaki ilişki.....                         | 54           |

## TABLO LİSTESİ

| <b><u>Tablo</u></b>                                                                        | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Tablo 3-1: Rota planlaması için veri-harita katmanları.....</b>                         | <b>12</b>           |
| <b>Tablo 3-2: Bazı otonom araç modellerinin ulaştığı teknolojik durum (2020) [36].....</b> | <b>16</b>           |
| <b>Tablo 6-1: Sıfır toplamli oyun örneği matrisi [68].....</b>                             | <b>38</b>           |
| <b>Tablo 7-1: Dört kollu kavşağa yaklaşan iki araç arasında oyun matrisi .....</b>         | <b>41</b>           |



## KOD LİSTESİ

| <b><u>Kod</u></b>                                                   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Kod 7-1: Uygulamanın temel step adlı sözde kodu .....</b>        | <b>47</b>           |
| <b>Kod 7-2: Step fonksiyonunda kullanılan Alt algoritma 1 .....</b> | <b>50</b>           |
| <b>Kod 7-3: Step fonksiyonunda kullanılan Alt algoritma 2 .....</b> | <b>51</b>           |



## KISALTMA LİSTESİ

| Kısaltmalar | Açıklama                               |
|-------------|----------------------------------------|
| ABS         | : Anti-lock Braking System             |
| AHS         | : Adaptif Hız Sabitleyicisi            |
| AKM         | : Araç Kontrol Merkezi                 |
| DSRC        | : Dedicated Short-Range Communications |
| GPS         | : Global Positioning System            |
| KAHS        | : Kooperatif Adaptif Hız Sabitleyicisi |
| LIDAR       | : Light Detection and Ranging          |
| OA          | : Otonom Araçlar                       |
| OMD         | : Otomotiv Mühendisleri Derneği        |
| OOS         | : Otomatik Otoyol                      |
| OT          | : Oyun Teorisi                         |
| RADAR       | : Radio Detection And Ranging          |

# 1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrideki son yenilikler geliştirilmiş işlevsellik, hız ve güvenlik konusuna vurgu yaparak bilgisayar teknolojilerinin tüm alanlarda yükselen rolüne işaret ediyor. General Motors, Volkswagen, Toyota ve Google gibi küresel otomobil üreticileri ve bilgi teknolojisi şirketleri, otonom araçların üretimi ve yaygınlaşması için önemli derecede bir yatırımlar yapmıştır.

İnsanların sürücüsüz otomobillerde görmek istediği özelliklere ait, kalite, minimum gecikme ve konfordan daha önde gelen husus, güvenlidir. Şu yönde, otonom araçların pasif güvenliğini güzel bir şekilde tamamlayan aktif güvenlik konusu da devreye giriyor. Pasif güvenlik, öncelikle araçların genel yapılandırmasına odaklanır. Aktif güvenlik ise araçların sürüşü zamanı kazaları önlemek için, meydana gelebilecek acil durumlara karşı kullanılan güvenlik kavramıdır. Otomotiv Mühendisleri Derneği güvenli otonom sürüşü, araçların değişik göstergelerini hesaba katarak sınıflandırmıştır. Otonom sürüş seviyeleri 0 ile 5 arasında değerlendiriliyor. Yüzde yüz manuel kullanım gerektiren araçlar Seviye 0, insan dikkati gerektirmeyen ve tamamen otonom sürüşü gerçekleştiren araçlar ise 5'ci nesil araçlar olarak kabul edilmektedir.

Sürücüsüz araçların gelecekte insanlara birçok avantajlar sağlayacağı beklenmektedir. Trafik sıkışıklığının azaltılması, hızlı ve güvenli sürüş, insan kaynaklı hatalardan oluşan kazalardan kurtulmak, toplu taşıma, ticari ve lojistik amaçlarla ilgili, ekonomik fayda veren hedefler örnek beklentilerdir. Otonom sürüşü engelsiz yapmak, güvenlik, hız ve konforu yükseltmek için altyapı projelerinin gerçekleştirilmesi, bu yönde yatırımların daha fazla olması gerekmektedir.

Yol kavşaklarındaki en son kontrol sistemleri dur işaretleri, yol işaretleri veya trafik işaretleridir. Bu kontrol sistemlerinin temel tasarım amacı, trafiği yönetmek ve kavşaklarda güvenliği artırmaktır. Son zamanlarda, bu kontrol sistemlerini kullanan kavşakların verimliliği ve güvenliği ile ilgili bazı sorunlar gündeme gelmiştir. Görülen problemler, özellikle dünyadaki araç sayısının 2050 yılına kadar en az iki katına çıkacağını bildiğimizde, yenilikçi çözümlere ihtiyaç duymaktadır. Otonom araçların kullanımı, bu yönde gelişmeler vaat eden yenilikçi çözümlerden biridir.

Bilgisayarların ortaya çıkmasından önce bile amaç, mekanik sistemler ve radyo kontrolleri ile kontrol edilen tam otomatik araçlara ulaşmaktır. Bilgisayarların ortaya çıkışı, General Motors ve ABD Ulaştırma Bakanlığı'nı tam otomatik otoyol konseptini uygulamaya koymaya teşvik etti. Otomatik Otoyol Sistemleri programı, otomatik araç kontrolünü kullanarak trafik ağlarının gecikmesini azaltmak ve güvenliğini artırmak için ABD Ulaştırma Bakanlığı tarafından

kurulmuştur. OOS programının kurulduğu dönemde mevcut teknoloji yeterince olgunlaşmamış ve bu nedenle program devam edememiştir. Yine de OOS projesi, günümüz pazarında var olan birçok tahrik asistanı sisteminin yolunu açtı. Kablosuz teknolojilerdeki ve konumlandırma sistemlerindeki gelişmeler, araçlar, trafik ortamı ve kontrol sistemi arasında iletişim bağlantılarının kurulmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, takım halinde şerit değiştirme ve birleştirme için işbirlikçi sürüş, araçların sinyalizasyon olmayan kavşaklar (kör geçiş) aracılığıyla çarpışmasız hareket etmesi gibi yeni fırsatlar sunulmaktadır.

Araçların otonom sürüşüne yardımcı cihazlardan birisi, Kooperatif Adaptif Hız Sabitleyicilerdir. KAHS araçların ileride gelen araca kadar olan mesafeyi ve yaklaşma hızını ölçmek için uzak menzilli sensörler kullanan Adaptif Hız Sabitleyiciler üzerinde yapılan bir geliştirmedir. AHS, sensörlerin giriş sinyallerini gürültü ve gereksiz dalgalardan filtrelemek için yoğun işleme algoritmaları gerektirmektedir. Bu sinyal filtreleme, AHS'nin diğer önde gelen araçları doğru bir şekilde takip etme özelliğini sınırlayan gecikmelere neden olur. KAHS, kablosuz bir veri bağlantısı üzerinden iletilen ek bilgileri elde ederek bu sınırlamanın üstesinden gelmektedir. KAHS, araçtan araca (V2V) ve araçtan altyapıya (V2I) iletişim yoluyla bilgi alabilir ve bunu algılanan bilgilerle beraber kullanarak daha iyi ve hızlı kararlar verebilir. Aynı zamanda, önde gelen ikinci aracı daha yüksek doğrulukla takip edebilir. Bilgiyi birleştirdikten sonra KAHS tarafından alınan karar, hızlanmak, yavaşlamak veya mevcut hızı korumak olabilir. KAHS'nin mevcut nesli manevra özelliğinden sorumlu değildir. Bu çalışma, otonom araçlar için yeni bir kavşak yönetimi algoritması sunmaktadır. Algoritma Oyun Teorisine dayalıdır ve Tavuk Oyununu modeline aittir. Algoritma, araçtaki iki ana özellikten yararlanır. Birincisi, merkezi bir yönetim merkeziyle iletişim kurma, diğeri alınan kumandalara uygun eylem yapabilen KAHS'dir.

Kavşak yönetimi, kavşağa yaklaşan tüm araçlardan gelen bu bilgileri merkeze alır ve her araç için çarpışmayı önleyecek ve her araç için en düşük gecikmeyi sağlayacak eylemlere karar verir.

## 1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu araştırmada sürücüsüz araçların çalışma prensipleri, otonom sürüşte insanların güvenliği, konforu ve trafik hızı önünde bulundurulmuştur. Kontrolsüz kavşaklar ve otonom araçlar arasında ilişkiye bağlı bir problem gösterilmiş ve oyun teorisi tabanlı çözüm yöntemi algoritmik şekilde açıklanmıştır. MATLAB programı ile sonuçlar hesaplanmış ve oyun şartlarına göre incelenmiştir.



## 1.2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Tez çalışmasında, ikinci bölümde ilgili çalışmalara dayanan literatür taraması yapılmış, üçüncü bölümde otonom araçların tarihi, özellikleri ve gelecek potansiyeli, dördüncü bölümde kavşakların farklı özelliklere göre sınıflandırılması, beşinci bölümde kontrolsüz kavşaklar için önerdiğimiz Araç Kontrol Merkezi cihazı, altıncı bölümde oyun teorisi ile ilgili bilgiler verilmiş, yedinci bölümde kontrolsüz kavşaklardan otonom araçların hızlı, güvenli ve konforlu geçişi için algoritma kullanılmış, sekizinci bölümde sonuçlar incelenmiştir.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Kontrolsüz kavşaklar için algoritmaların temel amacı, geçiş yapan araçların kontrolsüz kavşakların çatışma bölgelerine erişmek için bilgi almak için pazarlık yapmak ve işbirliği yapmak için verimli bir yol sağlamaktır. Bir kavşaktaki çatışma bölgesi, iki farklı geçiş aracının aynı zaman aralığında geçiş yaptığı kavşak alanı olarak tanımlanır. Kontrolsüz kavşak algoritmaları iki geniş kategoride sınıflandırılabilir.

Yöntemlerin bir kategorisi merkezi kontrol kullanır. Kavşağa yaklaşan araçlar, kavşakta merkezi bir kontrolör ile haberleşir. Merkezi kontrolör, her aracın kavşağı güvenli bir şekilde geçmesi için gereken talimatlarla yanıt verir. Dresner ve Stone, İlk Giren İlk Çıkar (İGİÇ) önceliklerine dayalı basit bir merkezi çerçeve önermiştir [1]. Bu çalışmada yazarlar, kontrolör ve araçlardan oluşan çok aracılı bir zaman rezervasyon sistemi kullandılar. Bir araç kavşağa yaklaştığında, kavşağı geçmek için zaman fasilesi talep eder. Sürücü temsilcisi talebini aldıktan sonra, kontrolör, kavşağı geçen aracı simüle eder ve çıkış yörüngelerine dayanarak, çakışmaları önleyen kararlar alır.

Kontrolsüz kavşaklarda araçların güvenli geçişini bir planlama problemi olarak ele alan birkaç araştırma çabası vardır. Colombo ve Vecchio bu problemi, maksimum kontrollü değişmez seti bularak ve çözüme yaklaşan bir algoritma kullanarak problem kümesindeki üyeliği kontrol ederek çözdü [2]. Bu yaklaşık çözüm, denetleyiciyi çarpışmadan kaçınma için tasarlamak için kullanıldı. Kolombo ve Vecchio'nun yaklaşımı sınırlıdır, çünkü mükemmel bir anlık durum bilgisi gerektirir ve herhangi bir veri hatasının olmaması gerekir.

Bruni ve Colombo yukarıdaki sınırlamaları kaldırarak kontrolör tasarımını geliştirdi ve kusurlu durum bilgisi ve girdi belirsizlikleriyle başa çıkabilen bir kontrolör tasarladı [3]. Yukarıdaki kontrolörlerin her ikisi de tüm araçların sürücü yardım sistemleri (kontrollü araçlar) ile donatıldığını varsaymıştır. Ahn ve Colombo birden fazla kontrolsüz aracın varlığında kontrolör tasarımını mümkün kılmak için düşünülmüş bir boşta kalma çizelgeleme yaklaşımı [4] önerdi.

Diğer yöntem kategorisinde, dağıtılmış, yani merkezi olmayan kontrol kullanılmıştır. Bir kavşağa yaklaşan araçlar doğrudan birbirleriyle anlaşarak (V2V) hangi aracın hangi zamanda geçiş hakkını alacağına karar verirler. Guangquan ve Lumiao bir kavşaktan geçen araçlara öncelik vermek için kullanılan bir dizi kural tanımlamıştır [5]. Bu kurallara uymanın, çatışma sorunlarını çözdüğü ve çarpışmaları önlemeye yardımcı olduğu gösterildi. Kurallara bağlı olarak, yaklaşan her araba diğer araçlarla bilgi alışverişinde bulunur ve ardından diğer arabaları önleyip önlemeyeceğine veya “teslim” olup olmayacağına karar verir. Makarem ve Gillet, bir navigasyon

işlevi kullanarak merkezi olmayan bir algoritma önerdi [6]. Algoritmaları, güvenlik ve gecikmeyi optimize etmek için çeşitli faktörlere dayalı olarak araçlara öncelik verdi.

Van Middlesworth ve Dresner dur işaretlerini değiştirmek ve küçük kavşaklardaki geçiş araçlarını programlamak için taraflar arası iletişim gerektiren başka bir merkezi olmayan algoritma önerdi [7]. Bu algoritmanın dezavantajı, her bir aracın her adımında diğer tüm araçlarla iletişim kurması gerekliliğidir. Hassan ve Rakha, yalnızca komşu araçlar arasında iletişim gerektirdiğinden daha ölçeklenebilir olan tamamen dağıtılmış bir algoritma önerdi [8]. Tüm yaklaşma şeritlerinde önde gelen araçlar birbirleriyle bilgi paylaştıktan sonra eksiksiz bir kavşak kullanım planı oluşturulur. Algoritma, daha ağır şeritlerden gelen araçları tercih ederek genel kavşak gecikmesini en aza indirdi.

Zohdy ve Rakha'nın ilgili çalışmasında, merkezi kontrol simülatörü oluşturulmuştur [9]. Kontrol simülasyonu, kavşaktaki çatışma alanlarındaki doluluk süresinin en aza indirilmesi için araçların yörüngelerini sürekli olarak ayarlamak için bir optimizasyon algoritması kullandı. Oyun teorisine dayalı bu çalışma, trafik ışıklarının kullanımı veya dur işaretleri kullanımı gibi geleneksel kavşak kontrol yöntemlerine kıyasla araç gecikmesinde önemli bir azalma sağladı.

### 3. OTONOM ARAÇLAR

Günümüzde çeşitli trafik sıkışıklıkları, insan hatasından kaynaklanan kazalar, sürücü konforu, çevre kirliliği başta olmak üzere birçok sorunların çözümü, bilim insanları önünde geleneksel yaklaşımlar ile beraber, çağdaş teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması gibi görevler oluşturmıştır. Bu hususta, kendi kendine karar veren cihazların gelişimi, çok önemli yer kapsamaktadır. Otomatik sürüşün gelişmesi, özellikle insan kaynaklı trafik problemlerinin halledilmesi veya azaltılması anlamında müthiş sonuçlar vaat etmektedir. Ayrıca, otonom araç üreticilerinin elektrikle çalışma özelliğine odaklanmasıyla çevre kirliliğinin düşürülmesi ve doğal kaynaklara tasarruf, düşük maliyetli taşımacılar gibi sosyal ve ekonomik yönlerde faydalı bir gelecek öngörülmektedir.

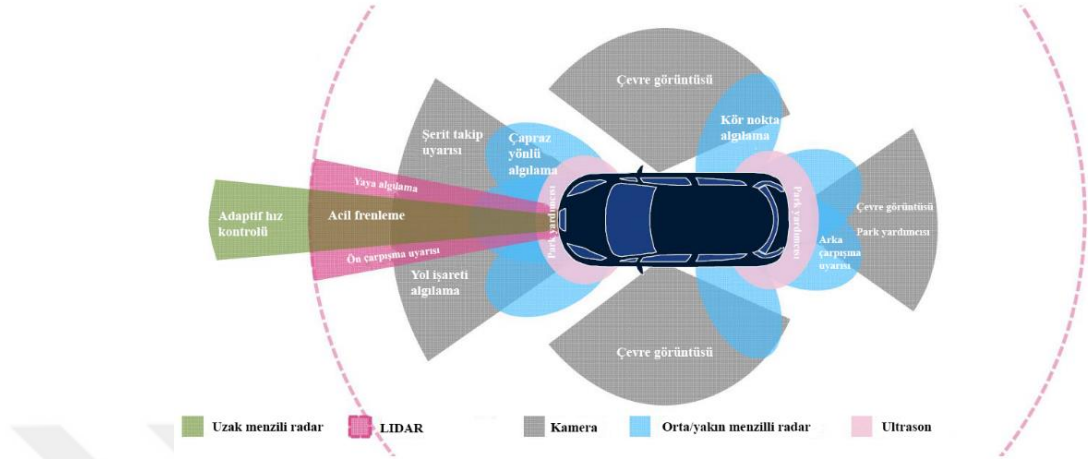
Bilgisayar bilimlerinin, nesnelerin interneti ve çevre algılama teknolojileri, çağdaş otomotiv endüstrisi geliştiği sürede otonom araçlar için de altyapı ve uygulamalar meydana gelmektedir. Bu açıdan, bir otonom özellikli aracın üretimi, farklı teknolojik alanların gelişimi ile sık şekilde bağlıdır.

#### 3.1. OTONOM ARAÇLARIN ÖZELLİKLERİ

Otonom sürüş denildiğinde, sürüş zamanı asistan sistemlerin sürücüye eşlik etmesi veya sürücünün hiçbir şekilde müdahale etmediği ve yüzde yüz otonom şekilde gerçekleşen sürüş kastedilmektedir. Otomatik sürüşü mümkün kılan özellikler kümesi için bir-biriyle ilişkin iki altküme yazabiliriz: Bu altkümelerden birincisi, çevreyi veya olayı algılama, diğeri algılanan durumlara tepki verme özellikleridir.

Otonom araçların ortam ve olay algılama özelliklerinin gelişme sürecinde otomotiv sektörünün birçok önemli yenilikleri bilim ve sanayi dünyasına sunulmuştur. Günümüzde otonom araçlar, yapay zekâ teknolojisi, yardımcı sensörler ve cihazlar kullanarak bir robot sürücü görevinde çevreyi algılamak ve kısmi otomatik sürüşü gerçekleştirmektedirler. Şekil 3-1, otonom araçların yolculuk yaparken çevreye ait önemli nesneleri veya olayları tanımlamasını yansıtmaktadır [10]. Bu hususta, derin öğrenme veya insan sürüşünden öğrenmek özelliğinin önemine vurgu yapmakta fayda vardır. Otonom araçlar, çevreyi tanıması, olaylara ve objelere gerekli tepki vermesi için RADAR (Radio Detection And Ranging), LIDAR (Light Detection and Ranging veya Laser Imaging Detection and Ranging), kameralar, DSRC (Dedicated Short-Range

Communications), GPS (Global Positioning System), Ultrasonic Sensör, Infrared Sensör, Çevre Haritası, Odometri gibi teknolojik elemanlar kullanıyor [11].



Şekil 3-1: Araçların çevreyi algılama teknolojileri

### 3.1.1. Otonom Araçların Çevre Algılama Cihazları

LIDAR cihazı, otonom araçlar için çevreyi görsel olarak modellemek görevini taşımaktadır. LIDAR, belirli mesafeye kadar lazer ışınları göndererek aracın önündeki engellerin yerleri, statik ve dinamik nesneler ve onlara kadar olan mesafeyi algılamak ve çevrenin 3B modelini oluşturmak için kullanılıyor.

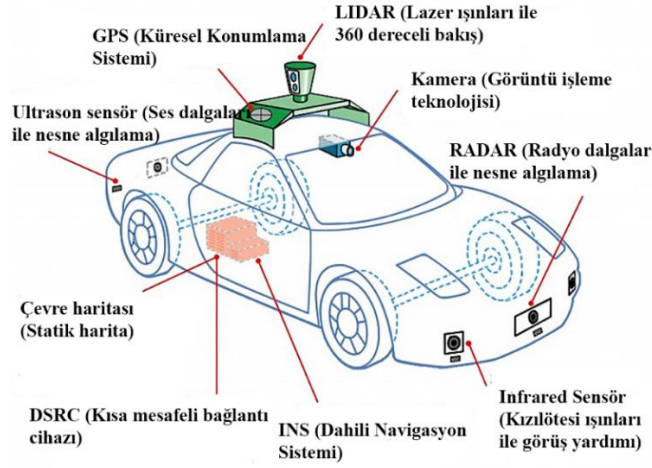
DSRC cihazı, aracın çevre ile kablosuz iletişim vasıtalarından birisidir. Bir araçta bulunan DSRC cihazı, aracın diğer hareket katılımcıları veya yol elemanları ile kısa ve orta mesafeli bağlantısını sağlamak ve gereken veriyi almak ve göndermek özelliği ile otonom sürüş yardımcılığını gerçekleştiriyor.

RADAR cihazı radyo dalgalar göndererek yakın mesafede bulunan nesneleri ve onların hareketliliğini belirliyor. Ultrasonic sensor cihazı ses dalgaları yardımı ile çevre ve nesne algılama için yardımcı oluyor ve çalışma prensibi RADAR cihazı ile benzerdir.

Infrared Sensor cihazının, başlıca çalışma prensibi kızılötesi ışığının kullanımıyla karanlık durumlarda LIDAR ve görüntü işleme özellikli kameraların görüşlerine yardım görevinin gerçekleştirilmesidir.

GPS cihazı, otonom sürüşte en önemli unsurlardan birisidir. Cihaz, aracın yerleştiği global konumu belirler ve “araç beyinde” yer alan çevre haritası üzerinde yerleşmesini tanımlamak için gereklidir. Aynı zamanda, GPS konumlanmasına yardımcı cihaz olan INS cihazı, aracın mutlak konumunu belirleyerek otomatik sürüşe yardımcı olmayı amaçlıyor.

Şekil 3-2’de, yukarıda belirtilen çevre algılama cihazlarının bir otonom araç üzerindeki yerleşmesi görülmektedir.



Şekil 3-2: Araçların çevre algılama sensörleri

Sensörlerden alınan verilere dayanarak otomatik tepki veren, fren kilitlenmesine karşı ABS sistemi, hava yastıkları, elektronik stabilite programı, hız kontrol özellikleri, günümüzde standart bilinen ve çoğu kısmi otonom araçlarda bulunan otomotiv asistanlardır. Bu sistemler, sürücüye bağımsız olarak devreye girer ve algılanan olaya gerekli tepkiyi verir.

### 3.1.2. Araçların Otonom Sürüş Seviyeleri

2013 yılında Otomotiv Mühendisleri Derneği, araçların otonom sürüş özelliklerini sınıflandıran bir yaklaşımda bulundu. OMD, araçlarda teknik tanımlamaları ön planda tutarak araçların otomasyon seviyelerini 0-5 aralığında değerlendirmiştir [12]. Bu değerlendirmelere göre, “Seviye 0” araçlar herhangi otomasyon özelliğine sahip değildir. Sürüşler tam zamanlı olarak sürücünün kontrolünde gerçekleşiyor. Birçoğu çağdaş otomobillerde, araç hızının sabitlenmesi, elektronik stabilite, acil durum frenleme ile sürücü asistanlığı mevcuttur [13]. Bu türlü araçlarda yalnız bir sürücü yardımcısı mevcut oluyor ve otomasyon değerlendirmesinin “Seviye 1” türüne ait edilmektedirler.

Günümüzde, kamu kullanımında yer alan araçlar sırasında şerit takip etme özelliğine sahip kısmi otonom araçlar önemli gelişme sürecinden geçmiştir. “Seviye 2” olarak tanımlanan araçlarda, iki veya daha fazla otomasyon sistemi yer alır ve aynı anda birkaç sürücü yardımcı özelliği taşıyor. Beklenmedik olaylara karşı gereken tepkileri vermediğinden dolayı, ikinci seviye

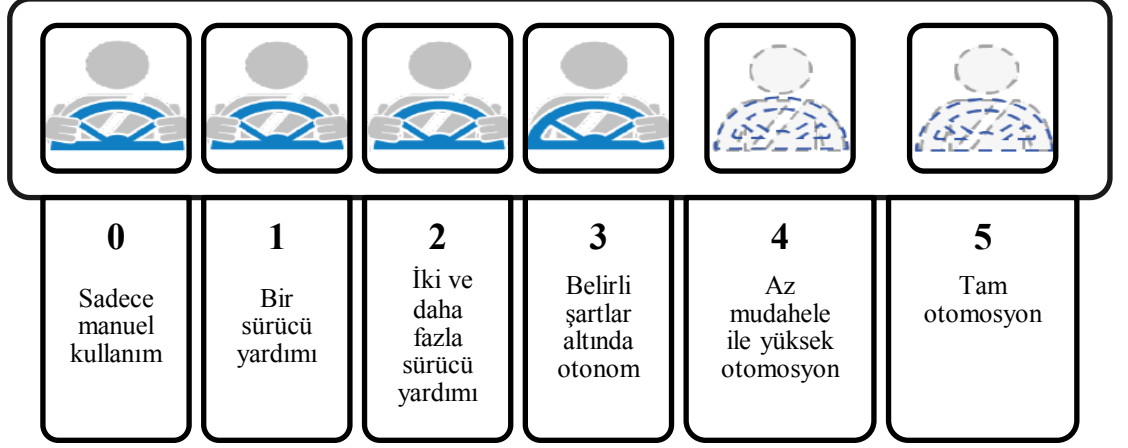
araçlar, yolculuk süresinde yol koşullarının, riskli olayların insan tarafından izlemesine ve müdahaleye gerek duymaktadırlar.

“Seviye 3” araçlar, çeşitli sensörler aracılığı ile sürüş ortamını, statik ve dinamik objeleri, çevredeki trafik olaylarını algılayarak şartlı otomasyonu gerçekleştiriyor. Bu araçlar, trafikte yer alan diğer hareket katılımcılarına ve yollarda bulunan altyapı elemanlarına kablosuz bağlantı gerçekleştirmek ve iletişim kurduğu cihazlarla veri gönderme ve veri alma özellikleri ile sürüş zamanı insan takibinin daha az gerektiği araçlardır. Bu araçlar koşullu otomasyon olarak algılanmaktadır. Yani, araç belirli şart dahilinde bağımsız sürülebilir. Örneğin, hava durumu veya yol türleri bu koşullara ait edilebilir.

Acil ve tehlikeli durumlarda insan tepkisi beklemeden dinamik sürüşün direksiyon ve hız değiştirme açısından otomatik yol alabilen, tanımlanan koşullarda minimum insan müdahalesi talep eden araçlar otomasyon sınıflandırılmasında “Seviye 4” olarak tanımlanmaktadır [14]. İkinci adıyla “Yüksek Otomasyon” özellikli araçlar önemli derecede bağımsız hareketi gerçekleştiriyor.

“Tam Otomasyon” araçlar sürüş zarfında insandan her hangi kumanda almaya gerek duymadan hedef adrese ulaşan araçlardır. Bu araçlar gelecekte kamu kullanımı öngörülen “Seviye 5” tanımına aittir [15]. Otonomluk derecelerine göre sınıflandırılan otomasyon seviyeleri Şekil 3-3’de gösterilmiştir.

Çeşitli kurumlar tarafından benimsenen araştırma yolları özellikle vurgulanmış olsa da, yüksek seviyeli Otonom araçlar için geliştirme kavramları, önceden tanımlanmış senaryolar altında belirli işlev geliştirmeyi gerçekleştirmek için temel olarak senaryo odaklı ve görev odaklı yaklaşımlara dayanmaktadır. Bu konsept, “Seviye 1” – “Seviye 3” sürüş yardım sistemlerinin geliştirilmesi için belirli bir yönlendirme işlevine sahiptir ve önceden tanımlanmış sahneler altında belirli işlevlerin uygulanmasına hizmet edebilir. “Seviye 3” ve “Seviye 4” otonom sürüş, görev odaklı olmakla birlikte, sınırlı koşullar altında insan-makine iş birliğine dayalı sürüşü gerçekleştirebilir. “Seviye 5” araçlarla ilgili olarak, senaryo odaklı konsept, sonsuz sayıda olası senaryo nedeniyle sorunlara neden olabilir, bu da araçların herhangi bir senaryoya uyum sağlaması gerektiğini ima eder. Daha fazla görev odaklı değerlendirmeler, aşırı sayıda kısıtlamaya neden olacak ve böylece özgürce ve koşulsuz olarak sürülebilen “Seviye 5” otonom araçların geliştirilmesini sınırlandıracaktır [16]. Örneğin, trafik kurallarına uyma bilinci yeterince güçlü olmayabilir. Trafik katılımcılarının belirli davranış kalıplarının varlığı ve sürüş ortamının özellikleri, mevcut senaryo odaklı ve görev odaklı geliştirme kavramlarıyla bağlantılı uygulama zorluklarını büyük ölçüde artırmıştır.



**Şekil 3-3:** Araçların otonom sürüş seviyeleri

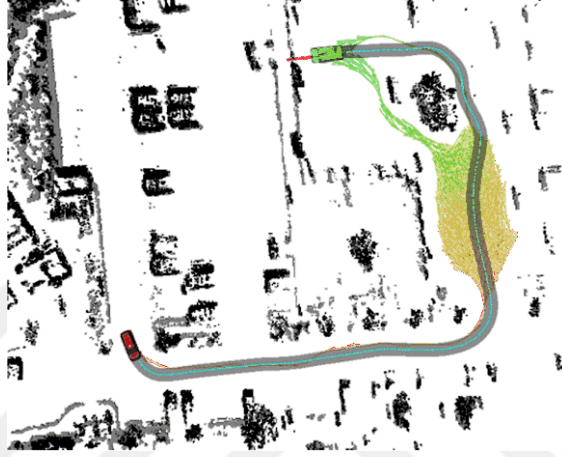
Bu nedenle, “Seviye 5” otonom araçların insan sürücülerin ötesinde performans seviyelerine ulaşması ve araç performansını önemli ölçüde iyileştirmesi bekleniyor. “Seviye 5” otonom araçların geliştirilmesi genellikle insan sürüş modunu öğrenmeye ve adapte etmeye dayanır ve bu araçların sonunda insan sürüş sınırlamalarının üstesinden gelmesi beklenmektedir. Aslında, üst düzey otonom sürüş sistemlerinin arkasındaki fiziksel mekanizmaları araştıran ve sürüşün doğasını yepyeni bir sistematik, birleşik ve dengeli perspektiften ortaya koyan birkaç araştırma paradigması var. Bu nedenle, mevcut yöntemlerin sınırlılıkları göz önüne alındığında, yeni bir akıl yürütme ve tündengeyim yöntemini benimseyerek geleneksel araştırma kavramlarını geride bırakmaya çalışılıyor. Önce beyin-beyincik-organ kavramlarına dayalı koordinasyon ve denge çerçevesini tartışmaya odaklanılıyor ve ardından kendi kendine öğrenme ve ön bilgi araştırma paradigması keşfediliyor. Öncü araştırmalar yürüterek, Otonom araçlar için kendi kendine öğrenme, kendi kendine adaptasyon ve kendini aşma özelliklerini gerçekleştirmek ve “Seviye 5” otonom araçların geliştirilmesi için yeni araştırma konseptleri sağlamak amaçlanıyor [17].

### 3.1.3. Otonom Araçların Rota Planlaması

Otonom araçlar, teorik olarak sürücü müdahalesi olmadan insan veya nesneyi belirli bir noktaya ulaştırmayı hedefleyen trafik katılımcısıdır. Bu türlü araçlar, insan karar vermesine benzer şekilde hedef konuma ulaşmak için seçilen yörünge üzerinde hareket etmeli ve son noktaya kadar optimum rota prensibini ön planda tutmalıdır. Otonom araçların ilerleme yolunu planlaması, genel ve anlık kararlara göre sınıflandırılmaktadır.

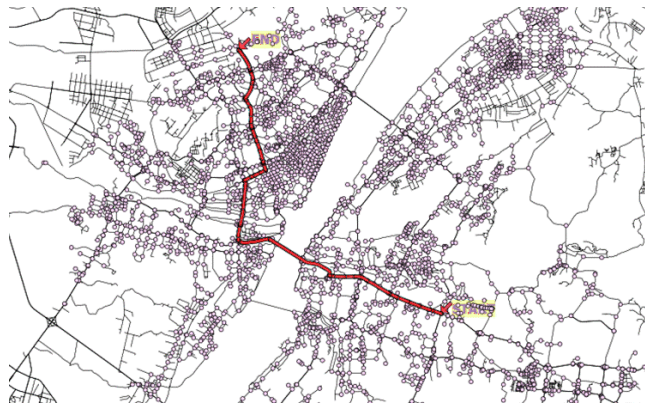


Genel karar verme, GPS cihazı kullanımı ile aracın konumunu belirlemek ve hedef noktaya kadar olan en kısa mesafeyi seçmek yöntemine bağlıdır. Bu türlü karar verme, rota planlamasının küresel planlama türüne aittir ve çevre haritasını geniş açıda göz önüne almaktadır. Küresel planlamaya ait olan planlama algoritmalarına örnek olarak A\* (Şekil 3-4) ve Dijkstra (Şekil 3-5) algoritmaları gösterilmektedir. Bu türlü planlama algoritmaları, görev kumandası alındığı anda en kısa yola dayanan rotayı belirler ve sürüş sürecinde sürekli planlamayı gerçekleştirememektedir. Bu sebepten dolayı daha gelişmiş yerel planlayıcı algoritmalara gerek duyulmaktadır.



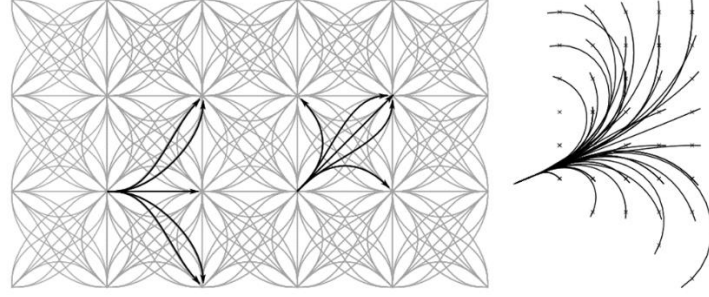
Şekil 3-4: A\* algoritması [18]

Genel karar vermeye ilişkin diğer rota seçimi ise yerel planlamadır. Bu planlamada, “araç beyni” çevre haritasına kısmi dar açıdan bakarak yörünge üzerinde bulunan yolların döngülerine odaklanmaktadır. Şekil 3-6’da literatürde Durum Örgüsü algoritması adıyla tanımlanan yerel planlama algoritması gösterilmiştir.



Şekil 3-5: Dijkstra algoritması [19]

Anlık karar verme ise davranışsal rota planlaması ile günümüzde ortam algılama ve bilgi işleme teknolojilerinin araca vermiş olduğu özelliklere dayanmaktadır. Bu türlü karar vermeler, görev sürecinde beklenmedik durumlara ve olaylara tepki vermekle rota planlamasında gereken düzeltmeleri gerçekleştirmektedir.



**Şekil 3-6:** Durum Örgüsü algoritması [20]

Küresel ve yerel planlama, görev yoluna statik yönden yaklaşırken, davranışsal planlama, algılanmış olan dinamik engellere ve olaylara gereken tepkileri vermekle yapılmaktadır. Fakat, rotanın seçilmesi sadece statik harita ve dinamik olaylara bağlı şekilde değil, çok katmanlı haritanın göz önünde tutulması ile daha optimum duruma gelebilir. Buraya, trafik sıkışıklığı, yol işaretleri ve kurallar, doğru şerit seçimi, altyapı ve diğer trafik katılımcılarından alınan veriler gibi bir çok önemli bilgiler dahil edilmektedir [21]–[22]. Doğru yol planlamasının gerçekleşmesi için araca gereken harita katmanları ve veri içerikleri Tablo 1-2’de gösterilmiştir.

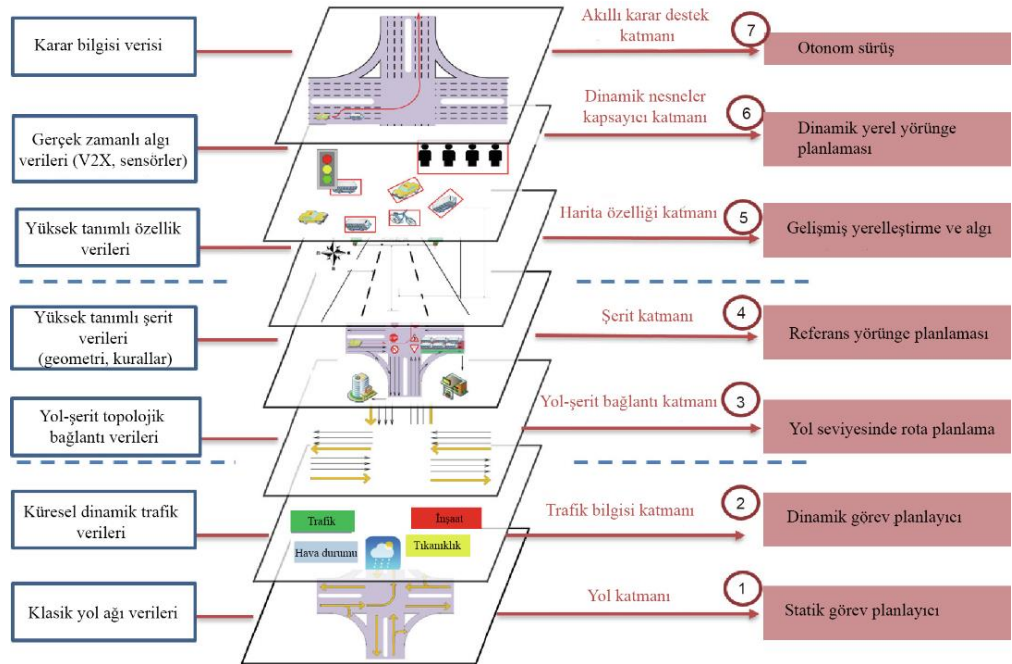
**Tablo 3-1:** Rota planlaması için veri-harita katmanları

| Katmanlar                | Katmanın amacı                                                                                                                                   |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Yol katmanı</b>       | Yol seviyesindeki görevler için kullanılmaktadır [23].                                                                                           |
| <b>Trafik katmanı</b>    | Dinamik trafik verilerini incelemek, trafik tıkanıklığından kaçınma prensipli planlama                                                           |
| <b>Yol-şerit katmanı</b> | Yol seviyesindeki ağ ile şerit seviyesindeki ağ arasında topolojik bir bağlantı sağlayan, şerit seviyesinde rota planlaması için tasarlanmıştır. |
| <b>Şerit katmanı</b>     | Yüksek çözünürlüklü şerit seviyesinde geometri, şerit seviyesinde trafik kuralları, yol işaretleri ve şeritle ilgili diğer bilgileri sağlar.     |

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Harita özelliği katmanı</b>            | Kendi kendine yerleştirme şerit düzeyinde gezinme için tasarlanmıştır; harita tabanlı yerleştirme veya algılama için kullanılabilen yüksek tanımlı özellik verileri sağlar.                                                                                                   |
| <b>Dinamik nesneler kapsayıcı katmanı</b> | Dinamik yerel yörünge planlaması için tasarlanmıştır ve diğer araçlar veya altyapı tarafından gözlemlenen hareketli engeller hakkında dinamik bilgi sağlar. Diğer yol kullanıcılarından alınan bilgilerle, dinamik durum güvenli yerel yörünge oluşturmak için düşünülebilir. |
| <b>Akıllı karar destek katmanı</b>        | Otonom sürüş için tasarlanmıştır ve sürüş bilgisi verileri sağlar. Bir sürücünün mantığını ve sürüş davranışlarını öğrenmek için bu katmana akıllı bir sürüş destek sistemi yerleştirilebilir.                                                                                |

Çevre ve trafik durumuyla ilgili yeterli bilgileri gerçek zamanlı takip etmek, anlık strateji seçimi ve rotanın doğru şekilde belirlenmesi için çok önemli otonom özelliklerden birisidir. Bu hususta, otonom araçlar çok katmanlı veri haritasına dayanarak, bilgi işleme teknolojisi ile gereken kararları verir ve hareket planlamasını optimum şekilde yapabilir.

Veri katmanlarına bağlı otonom sürüş planlaması döngüsü Şekil 3-5’de ayrıntılı şekilde yansıtılmıştır.



**Şekil 3-7:** Otonom araç sürüş planlaması döngüsü

### 3.2. OTONOM ARAÇLARIN GELİŞİMİ

Otonom sürüş özellikli araçların üretimi ile ilişkin ilk düşünceler 1920-30'lu yıllarda oluşmaya başlamıştır. O dönemde uzaktan kumanda alma özelliği ile başlanan otonom sürüş gelişim yolu 1980'li yıllarda düşük hızla kendi kendiliğinde basit sürüşlerle devam etti. Eureka Prometheus, ALV, navlab projeleri klasik otonom araç çalışmalarına örneklerdir. Günümüzde, Tesla, General Motors, Mercedes-Benz, Volkswagen, Nissan, Google gibi ünlü teknoloji devleri otonom özellikli araçların gelişimi yönünde çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar.

Sürücüsüz araçlara yönelik ilk girişim 1920'lerin başlarına kadar uzanıyor [24] ve araştırmacıların otomatik otoyol sistemleri geliştirmeyi başardığı çalışmalar 1980'lerde hız kazandı. Bu, yarı otonom ve otonom araçların karayolu altyapısına bağlanmasının önünü açtı. OA'ların otomatik pilotları, 1980 ile 2000 yılları arasında büyük ölçüde Almanya ve ABD'de yapıldı. OA'lar, ABD Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) olarak bilinen savunma sektörü tarafından yapılan insansız ekipman üzerine yapılan kapsamlı araştırmaya çok şey borçludur [25]. Temmuz 2015'te, Google'ın sürücüsüz filoları, halka açık yollarda yalnızca 14 küçük trafik kazasının kaydedildiği bir milyon milin üzerinde yol kat etti [26]. Ancak her durumda OA hatalı değildi; bunun yerine, ya manuel olarak sürülüyordu ya da diğer sürücü hatalıydı. Bununla birlikte, Google arabasının kusurlu bulunduğu ilk kaza, arabanın Silikon Vadisi'nin Mountain View kentinde bir halk otobüsünün yan tarafına çarptığı durum, 2016 yılında meydana geldi [27].

#### 3.2.1. Otonom Araçların Tarihi

Radio dalgaları kullanmakla arabaya uzaktan kumanda verme çalışması 1925 yılında Francis Houdi tarafından bilim ve sanayi dünyasına sunulmuştur. Bu yaklaşım, öndeki “sürücüsüz” araca monte edilen verici antene radyo sinyalleri göndermek için arkada ikinci bir arabaya ihtiyaç duymaktaydı [28]. Bu proje, otonom sürüş kavramı için ilk müjde olarak görülebilir. 1986-1987 yıllarında Münih Üniversitesi ekibi ve Ernst Dickens trafiksiz ortamda otonom şekilde sürüş yapabilen çalışmada bulundular. Münih Üniversitesinin 1990'lı yıllarda yaptığı Eureka Prometheus projesinde, ilk kez bilgisayar desteği kullanarak yolda önemli nesnelere odaklanarak otonom sürüşü gerçekleştirdiler [29]. 1986-1990 yıllarında otonom araç gelişiminin önemli isimlerinden olan navlab1 ve navlab2 projeleri gerçekleştirildi. Navlab1 projesinde geliştirilmiş araçlar güneş enerjisi kullanarak saatte 30 kilometreye varan hızla

ilerleyebildi. Bu projenin devamı olan navlab2, 110 km/saat hıza varan performans sergiledi [30]. Otonom sürüş çabaları 2000'li yıllarda da hızlı bir şekilde devam etti.

2006 yılında Volvo şirketi otonom araç gelişimi yolculuğuna başladı ve 2020'li yıllarda piyasada önemli derecede otomatik sürüş yapabilen araçların piyasaya sunulacağı planlarından bahsetti. Google, Waymo projesi ile 2009 yılında otonom araç üretimi girişiminde bulundu [31]. WAYMO, ABD'nin dört eyaletinde test ediliyor ve milyonlarca mil test sürüşleri yapmıştır. AUDI, BMW, Mercedes-Benz de otonom araç sektöründe önemli yer kapsamayı hedefleyen şirketlerdir.

### **3.2.2. Otonom Araçların Günümüzdeki Durumu**

Audi'nin siparişi ile Ipsos tarafından yapılan pazar araştırmasına göre, Çin'de otomotiv sektörü katılımcılarının %98 kadarı otonom araç üretimi ile ilgilenmektedir. ABD'de sadece %72, Almanya'da ise %77 katılımcı, otonom araç alanında girişimci olarak bulunmaktadır [32].

Günümüzde piyasada bulunan ve kamu kullanımına sunulan otonom araçlar, otomasyon sınıflandırmasında Seviye 2'de yer almaktadırlar. Tesla'nın Autopilot'u, GM'nin Super Cruise'u ve Nissan'ın ProPilot'u, Seviye 2 otonom sürüş sistemlerinin örnekleridir. Seviye 2 sürüş derecesinde olan araçlar, hem direksiyon, hem de hızlanma ve frenleme yönetimini ele aldıklarına rağmen, çeşitli sınırlamalarla çalışmaktadırlar. Bu yüzden her an kontrolü ele almaya hazırlıklı bir sürücüyü gerek vardır. Bu türlü araçlar, çevre haritası ve trafik verilerine dayanan rota planlama, görüntü işlemeye dayanan şerit takip özelliği ile otomatik sürüşü gerçekleştirmektedirler [33]. Fakat, altyapı yetersizliği ve yasal sıkıntılar, şimdiki durumda bu araçların tam potansiyelini kullanmayı bile kısıtlamaktadır. Örneğin, şerit boyasının yeterli çözünürlükte gözükmemesi, altyapıya dayanan sıkıntılar sırasındadır. Bununla beraber trafikte kaza ve kurallara uymamak gibi durumlarda cezanın sürücüyü veya araç üreticisi şirketine kesilmesi sorusu, tartışmalı problemler oluşturmaktadır.

Sanayi dünyası, 2017 yılından itibaren Seviye 3 araçlar ile tanışmıştır. Bu türlü araçlar, diğer trafik katılımcıları, trafik sinyalleri ve trafik elemanları ile bağlantı oluşturmak özelliği ile tanımlanmaktadır. Fakat, yasal olarak “gri alan”da bulunduğu karayollarında yaygın olarak mevcut değildir. Aslında, yeni Honda Legend gibi sadece az sayıda Seviye 3 özellikli araba var ve bunlar bile sadece belirli bölgelerde sınırlı miktarlarda mevcuttur. Audi, yeni A8'de Seviye 3 otonom sürüş sistemini devre dışı bıraktı. Çünkü teknolojik, altyapı ve yasal yönlerde bu araçların kullanım alanları önemli derecede kısıtlı bulunmaktadır [34].

Google Waymo filosu, ABD'nin birkaç eyaletinde test sürüşleri yapmakta olan ve Seviye 4 araçların sırasındadır. 4'cü nesil otonom araçlar, yüksek otonomluk özelliklerine sahip olmalarına rağmen, “en kötü durumda en yanlış karar” prensibini göze alarak, beklenmedik durumlara karşı her an hazırlıklı bulunan bir sürücüye gerek duymaktadırlar. Kendinden önceki araç nesillerinin karşılaştığı altyapı yetersizliğinden dolayı, bu araçlar da kamu kullanımında yer almamaktadır [26].

Seviye 5 araçlarda sürücünün kontrolü devralması ve olaylara müdahalesi için seçim imkanı mevcut değildir. Tam otomatik sürüşü vaat eden araç seviyesine örnek olarak, Audi'nin sunduğu Aicon konsepti gösterilebilir [35].

Kablosuz bağlantı teknolojilerinin, kameraların, çevre algılama sensörlerinin, program yazılımlarının tarihsel olarak günümüze kadar yüksek artışla kalkınması ve otomobil sektörünün gelişmesiyle beraber, kısmi otomatik sürüşün mümkün olması söz konusudur. Bu hususta 2020 yılına kadar, farklı otonom araç modellerinin günümüzde ulaştığı teknolojik durum Tablo 3-2'de yer almaktadır.

**Tablo 3-2:** Bazı otonom araç modellerinin ulaştığı teknolojik durum (2020) [36]

| <b>BMW 5</b>                | <b>Mercedes S500</b>               | <b>Waymo</b>             |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Şerit ve yol işareti takibi | 3B kamera                          | 3B LIDAR                 |
| Radar sensörleri            | Yol işareti ve trafik ışığı takibi | Kameralar                |
| Yan lazer tarayıcılar       | Kısa ve uzun menzilli radar        | Ön ve yan radar          |
| Ultrasonik sensörler        | Kızılötesi kamera                  | Dahili ölçüm ünitesi     |
| Diferansiyel GPS            |                                    | Tekerlek kodlayıcı       |
| Yüksek doğruluklu harita    |                                    | Yüksek doğruluklu harita |

### 3.3. OTONOM ARAÇLARIN AVANTAJLARI

İnsan ve toplum refahının yükselişi çağdaş teknolojilerin uygulanmasıyla paralel olarak ilerlemektedir. İnsana bağımsız, otomatik sistemlerin gelişmesi, farklı yönlerde insanların hayatını

etkiliyor. Bakış açısına ve gerçek sonuçlara bağlı olarak, bu türlü yükselişlerin olumlu ve olumsuz taraflarıyla ilgili çeşitli düşünceler mevcuttur. En başlıca husus olarak, güvenliğin, zamana ve maliyete tasarrufun, çevre kirliliğinin ön planda tutulduğu bu yaklaşımlar, teknolojik dünyanın son başarılarından olan otonom araçların potansiyelinin değerlendirilmesi açısından önemli yerlerde-dir.

### 3.3.1. Kaza Oranı

Karayolu trafik kazalarından kaynaklanan ölüm ve yaralanmalar her zaman ciddi bir sorundur. Dünya Sağlık örgütünün raporlarına göre, karayolu trafik ölümlerinin sayısı artmaya devam ederek 2016 yılında 1,35 milyona ulaşmıştır [37]. Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi tarafından 2018 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 33.645 ölümcül kaza ve 51.872 aracın ölümcül kazalara karıştığı bildirilmektedir [38]. Büyük Britanya Ulaştırma Bakanlığının istatistik bilgilerinde, 2018'de polis tarafından bildirilen karayolu trafik kazalarında tüm derecelerde toplam 160.597 yaralı olduğu belirtildi [39]. 2017 yılında Çin Kamu Güvenliği Bakanlığı, ülkede toplam 8.419 milyon trafik kazasıyla ilgili rapor verdi. Ölümlü ve ağır yaralanmalı 203.049 kaza meydana geldi ve 63.729 ölüm ve 209.654 ağır yaralanma ile sonuçlandı. Sadece araba hasarına veya hafif yaralanmalara neden olan ve 1.465 milyon kişinin hafif yaralanmasına neden olan 8.216 milyon trafik kazası meydana geldi. Karayolu trafik kazalarının neden olduğu genel ekonomik kayıplar hayal gücünün ötesindedir. Türkiye İstatistik Kurumunun raporlarına göre, 2021 yılında Türkiye'de, yaralanmalı ve ölümlü trafik kazasına neden olan toplam 224 418 hatanın %87,1'inin sürücü kaynaklı olduğu görülmüştür [40]. Ayrıca, Indiana Üniversitesi, incelenen kazaların yüzde %93'ünde insan faktörlerinin birincil neden veya katkıda bulunan unsur olduğunu ortaya koyan bir araştırma yapmıştır. Ayrıca, ABD'nin Ulusal Karayolu Taşımacılığı Güvenliği İdaresinin raporlarında insan hatasının sebep olduğu kazaların ortalama %90 olduğu görülmektedir [41]. Ülkemizde ve dünyada trafik kazasına sebep olan kusurların büyük oranda insanlara bağlı olması, hatasız çalışan, çevreyi ve olayları hızlı analiz yapan ve gereken yanıtı veren otonom araçlara ihtiyacın yüksek olduğunu göstermektedir. Gelecekte, otonom araçlardan beklenen avantajlardan birisi trafik kazaları sayısının büyük oranda inmesidir. İnsan güvenliği açısından, daha az kaza, daha az can kaybı ve ekonomik açıdan, kazalardan oluşan maliyet harçlarının düşürülmesi otonom araç teknolojilerinin topluma sağlayacağı faydalardan birisidir. Bu bilgilerden yola çıkarak, araçların tamamen sürücüsüz hale gelmesinin, %90 daha az trafik kazasını sağlayacağını söyleyebiliriz.

### 3.3.2. Trafik Sıkışıklığı

Otonom sürüşün trafik sıkışıklığına karşı etkisi, üç ana faktöre atıf ederek tarif edilebilir [42]: Bunlar, kaza oranının önemli derecede düşmesiyle trafik gecikmelerinin azalması; araç veriminin yükselmesi; kat edilen toplam araç kilometresindeki değişikliklerdir.

Araç kazalarında beklenen bir azalma, daha az gecikmeyle ve dolayısıyla ulaşım sisteminin daha yüksek güvenilirliğiyle sonuçlanacaktır. Otonom araçların ortaya çıkması nedeniyle toplam araç kilometresindeki değişiklikler belirsizliğini koruyor, ancak bazı araştırmacılar kilometrelerin aslında artacağı görüşündedirler [43]. Bunun için, kendi kendine yakıt doldurma ve kendi kendine park etme nedeniyle ek toplam araç kilometresi, araba kullanamayanlar tarafından Otonom araçların artan kullanımı, artan seyahat sayısı (hem boş hem de meşgul), araçtan uzaklaşma gibi faktörlerin bir kombinasyonu üzerinde spekülasyon yapıyorlar [44]. Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi, geri tepme oranının %10'da sabitleneceği sonucuna varmıştır.

Otonom araçların yaygın olması, tıkanıklık yükünü hafifletmek için bir fırsat da sağlayabilir. Dresner ve Stone [1], özellikle araçların birbirine bağlı olduğu kavşaklarda trafik sıkışıklığını azaltmak için rezervasyona dayalı bir sistem önermektedir. Sonuçlar, iletişimde olan otonom araçlar için tasarlanmış rezervasyon tabanlı sistemin trafik ışıklarından iki ila üç kat daha iyi performans gösterebileceğini gösteriyor. Sonuç olarak, çok daha sıkışık trafik koşullarının üstesinden sorunsuz bir şekilde gelebilir. Dresner ve Stone geliştirdikleri çalışmalarda yoldaki Otonom araçların sayısı arttıkça trafik gecikmelerinin önceki çalışmalarında sergilenen seviyelere doğru azaldığını göstermektedir. Benzer bir sonuca Fajardo ve diğerleri tarafından da ulaşılmıştır [45].

Sonuç olarak, otonom araç teknolojisinin, zaten sıkışık bir ağa daha fazla yük ekleyebilecek ek talebi teşvik etmedikçe, yakında trafik sıkışıklığının azaltılması üzerinde olumlu bir etkisi olacağı çok açık bulunmaktadır.

### 3.3.3. Çevre Kirliliği

Günümüzde, hava kirliliğine neden olan başlıca unsurlardan birisi araçların fazla oranda petrol ve dizel gibi sıvı yakıtlarla çalışmasıdır. Çevre Koruma Ajansı, araçların Amerika Birleşik Devletleri'ndeki karbon monoksit kirliliğinin yaklaşık yüzde 75'ine neden olduğunu tahmin ediyor [46]. Çağdaş otonom araç üreticileri, araçlar için elektrikle çalışma özelliğini geliştirmektedir. Bu açıdan, tamamen elektrikli otonom araçların trafik yollarında yaygınlaşmasıyla çevre kirliliği problemlerinde önemli düşüş beklenmektedir.



### 3.3.4. Maliyet Avantajları

Wijnen'in çalışmasında, 10 yüksek gelirli ülkenin ve 7 düşük ve orta gelirli ülkenin karayolu kazalarının ulusal maliyeti analiz edilmiş, maliyetlerin yüksek gelirli ülkelerde ortalama Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın (GSYİH) %2,7'sini ve düşük ve orta gelirli ülkelerde GSYİH'nın %2,2'sini oluşturduğu belirtilmiştir [47]. Ulusal Karayolu Güvenliği İdaresi'nin 2015 yılında yayınladığı istatistik bilgilere göre, ABD'de karayolu kazalarının ekonomik maliyeti 242 milyar dolardı. 242 milyar dolarlık araç kazası maliyeti, 14.96 trilyon dolarlık gerçek ABD'nin %1.6'sını temsil ediyor [48]. Hindistan için karayolu kazası maliyetinin değerlendirilmesi GSYİH'nın %0,65'ini oluşturuyor [48]. Araştırmalar sonucu, Avustralya'da karayolu trafik kazası yaralanmalarının yıllık maliyeti yaklaşık 17 milyar ABD dolarıydı ve bu GSYİH'nın yaklaşık %2,3'ü kadardı [49]. Karayolu trafik kazalarının toplam ekonomik maliyeti, ülkenin sınırlı kaynaklarının giderilebilir bir şekilde tüketilmesini temsil etmektedir. Yukarıda gösterilen rakamlardan yola çıkarak, trafik kazalarının düşürülmesi can ve zaman kaybı ile beraber ekonomik avantajları da getireceği düşünülmektedir.

Yollardaki tıkanıklık, çeşitli nedenlerden oluşan trafik sıkışıklıkları, trafik maliyetini kötü yandan etkileyen hususlardan birisidir. Bazı ülkelerde yıllık trafik sıkışıklığı maliyeti milyar dolarla ölçülmektedir. Örneğin, İngiltere'de trafik tıkanıklığı maliyeti 2014 yılına göre 20,5 milyar dolar olmuştur. Her geçen yıl bu rakamlar yükselmekte olmak üzere, 2030 yılında 33,4 milyar olacağı öngörülmektedir. Amerika Birleşik Devletlerine ait raporlarda trafik sıkışıklığının neden olduğu maliyet kaybının 124 milyar dolar olduğu görülmektedir ve 2030 yılına kadar maliyetin 186 milyar dolara ulaşacağı düşünülmektedir. Avustralya'da, yıllık tıkanıklık maliyet seviyelerinin Sidney için 3,5 milyar Avustralya Dolarından (2005) 7,8 milyar Avustralya Dolarına (2020) ve Melbourne için 3,0 milyar Avustralya Dolarından (2005) 6,1 milyar Avustralya Dolarına (2020) yükselmesi öngörülmüştür [50].

### 3.4. OTONOM ARAÇLARIN GELECEK POTANSİYELİ

Günümüzde kamu kullanımında olan otonom araçların büyük kısmı ikinci ve daha az oranda üçüncü otonom sürüş seviyesinde yer alan araçlardır. Şimdilik, sadece sürücü yardımıyla kısmi otonom sürüşün mümkün olduğu, fakat gelecekte diğer alanlarda gördüğümüz insana bağımsız teknolojiler gibi otonom araçların da kamu hayatında çok önemli potansiyele sahip olduğu göz önündedir.

Geleceğin mobilitesi, elektrikli otonom araçların yaygın kullanımı ve bunları barındırmak için yeterli donanıma sahip akıllı yollar ve altyapı ile karakterize edilecektir. Araçların ve altyapının bu tür teknolojik yenilenmesine, geleneksel Toplu Taşımacılığın (TT) iyileştirilmesi ve Yenilikçi Mobilite Hizmetlerinin (YMH) geliştirilmesi de eşlik edecek gibi görünmektedir. Bu nedenle, bağlantılı ve otomatik ulaşım sistemlerinin geniş potansiyel etkileri, bu sistemlerin hareketlilik senaryosuna getireceği değişikliklere karşı, ayrıca arazi kullanımı, sosyal içerme ve diğer dışsallıklar üzerindeki etkiler açısından dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir [51]. Arz tarafında ise ulaşım hizmetlerinin entegre, kullanıcı dostu, sorunsuz ve konforlu olması beklenmektedir. Geleceğin otonom mobilitesi üç ana özelliği kendinde birleştirecektir. Bu özellikler, her bireyin kişisel ihtiyaçlarına tatminlerini en üst düzeye çıkaracak şekilde uyum sağlayan tamamen kişiselleştirilmiş hizmetlere sahip olmak; başlangıç noktasından varış noktasına kadar yolculuğun her bölümünde bir dizi kesintisiz hareketlilik seçeneği sunmak; hareketlilik hizmetlerinin talebe duyarlı olmasıyla tarifeli ve sabit rotalı Toplu Taşımanın geleneksel işleyişini tamamlamaktır [52].

#### **3.4.1. Hizmet Olarak Mobilite ve Otonom Araçlar**

Kentsel mobilitenin imkanlarının yükseltilmesi, taksi ve lojistik taşımacılığı, araç kiralama hizmetlerini daha esnek hale getirmek için Hizmet Olarak Mobilite (HOM) [53] konsepti tanıtılmıştır. Bu iş modeli 2016 yılında Helsinki’de gerçekleşen “MaaS Global” sayesinde meşhur olmuştur. HOM konseptinde başlıca fikir, tek bir dijital platform menüsü kullanarak “kapıdan kapıya” seyahat etmektir.

HOM, otonom araçların uygulama alanlarından birisi olmakla gelecekte mobil yazılımlar üzerinden sürücüsüz taksilerin çağırılmasını ve toplu taşıma hizmetlerinin geliştirilmesini amaçlayan komple teknolojiler toplusudur. Aynı zamanda, günümüzde “Uber” ve “Taxify” gibi şirketlerin odaklandığı projelerin bir parçası olarak görülmektedir.

Gelecek yıllarda otonom araçların yaygın oluşu veya tamamen otonom sürüşün gerçekleşmesiyle beraber kaza ve trafik sıkışıklıklarının önemli seviyede düşüşü ve bu durumlardan doğan sorunların giderilmesinin sonucu olarak ülkeleri ve kamuyu ekonomik ve maliyet açısından müthiş avantajlara götüreceği göz önündedir.

## 4. KAVŞAKLAR

Kavşak, üç veya daha fazla trafik kolunun birleştiği ve farklı kol ve şeritlerden ilerleyen trafik akımının paylaşıldığı bir alandır. Aynı zamanda, bu alan, araçların istenilen noktalara ulaşmak için farklı yönlerde dönmeleri için ayrılmıştır. Trafik kavşakları, herhangi bir otoyoldaki karmaşık konumlar olarak tanımlanmaktadır. Bunun nedeni, farklı yönde hareket eden araçların aynı anda aynı alanı “işgal etmek” istemeleridir. Ayrıca yayalar da karşıya geçmek için bu alanı kullanmaktadır. Sürücüler, bir kavşakta rotasını, kavşak geometrisini, diğer araçların hız ve yönünü ve diğer hususları dikkate alarak bir kavşakta anlık karar vermek zorundadır. Karar vermelerde küçük bir hata, gecikmelere ve ciddi kazalara neden olabilir. Ayrıca kavşakların güvenliği ve hızı kavşak türüne, geometriye ve kontrol tipine bağlıdır. Genel trafik ağında araçların akışı, kavşakların performansı ile ilişkilidir. Aynı zamanda yolun kapasitesi de kavşakların performans durumlarını etkileyen hususlar sırasındadırlar.

Bu nedenle hem kaza perspektifinden hem de kapasite perspektifinden kavşakların incelenmesi özellikle kentsel senaryoda trafik mühendisleri için çok önemlidir. Kavşaklar, kol sayısına, tasarım şekline ve kontrol tiplerine göre farklı sınıflandırmalarda gösterilmektedir. Bu bölümde kavşaklar ve onların türlerine bağlı bilgiler ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

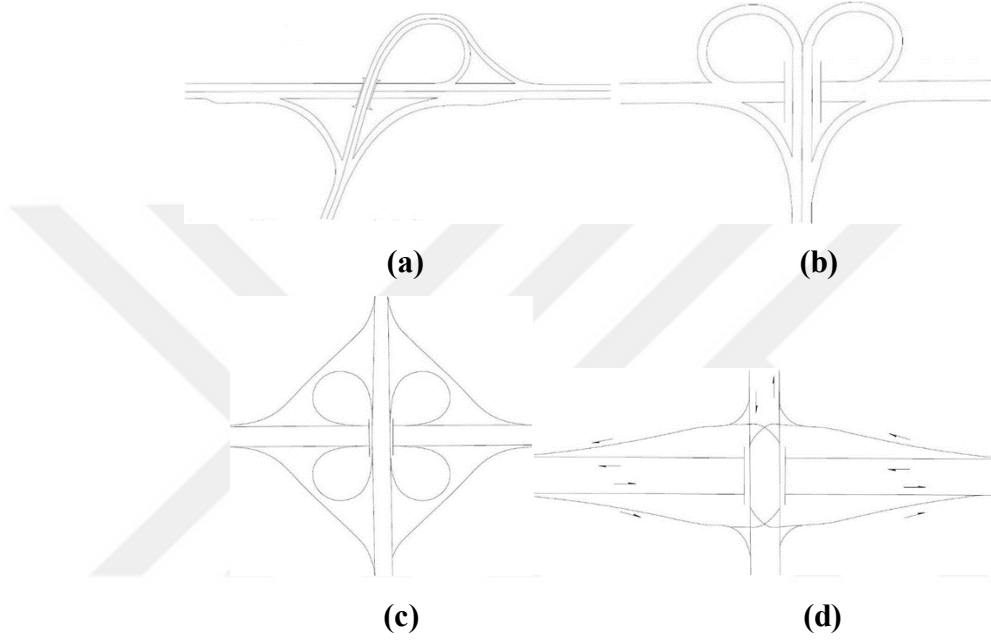
### 4.1. KAVŞAK TÜRLERİ

Kavşaklar çoğunlukla üç veya dört kollu tasarlanmaktadır. Fakat çok kollu kavşaklara (beş ve altı kollu kavşaklar) da rastlanmaktadır. İdeal olarak, üç kollu ve dört kollu kavşaklardaki caddeler dik açılarda veya buna yakın bir şekilde kesişir. Bununla birlikte, çarpık yaklaşımlar, kavşak tasarımının düzenli bir özelliğidir. Eğim açıları 60 dereceden az olduğunda, tasarımcı eğriliği azaltmak için kesişim değişikliklerini değerlendirmelidir [54]. Bu başlıkta, tasarımcı tarafından sıkça karşılaşılan kavşak konfigürasyonlarının örnekleri gösterilmektedir.

#### 4.1.1. Farklı Düzey Kavşaklar

Trafiği dikey eğimde ayırmak ve mümkün olduğu kadar kesintisiz hareketi sağlamak için eğimli kavşaklar tasarlanmıştır [55]. Demiryolu hattı yoldan geçtiğinde, aynı zamanda farklı sınıf ayırıcılar, farklı düzey kavşakları oluşturmaktadır. Farklı sınıf ayırıcı türleri, geçitler ve dikey değişimlerdir. Geçitlerin kendisi üstgeçit ve altgeçit olarak ikiye ayrılır. İki yol bir noktada kesiştiğinde, trafiğin yoğun olduğu durumlarda, araçların daha kesintisiz hareket etmesi için yol

daha yüksek bir seviyeye yükseltirirse, bu tür yapılara üst geçit denir. Aksi takdirde, bir alt köprü veya tünel vasıtasıyla geçiş için ana yol daha düşük bir seviyede yapılırsa, buna alt geçit denir. Farklı düzey kavşak, iki veya daha fazla karayolu arasındaki trafiğin, farklı yükseklik seviyelerinde aktığı bir sistemdir. Yaygın farklı düzey türleri arasında trompet tipli, elmas tipli ve yonca yaprağı tipli kavşaklar bulunur. Şekil 4-1’de farklı düzey kavşakların tasarım türleri gösterilmiştir.

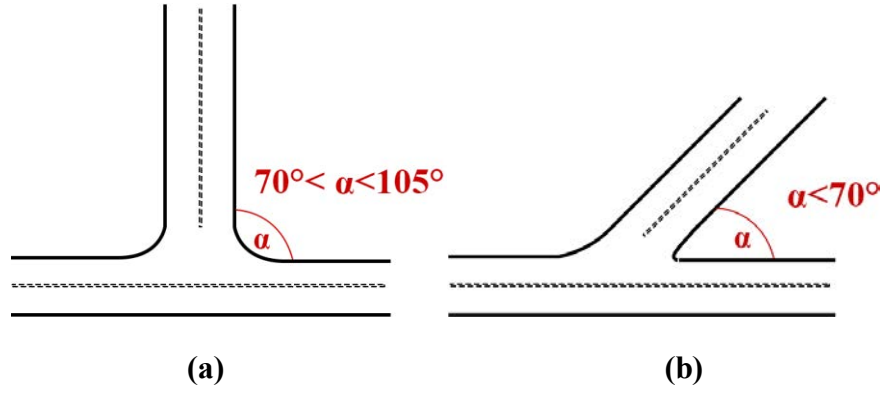


Şekil 4-1: (a) trompet kavşak, (b) yarı yonca kavşak, (c) yonca kavşak, (d) elmas kavşak [56]

#### 4.1.2. Eşdüzey Kavşaklar

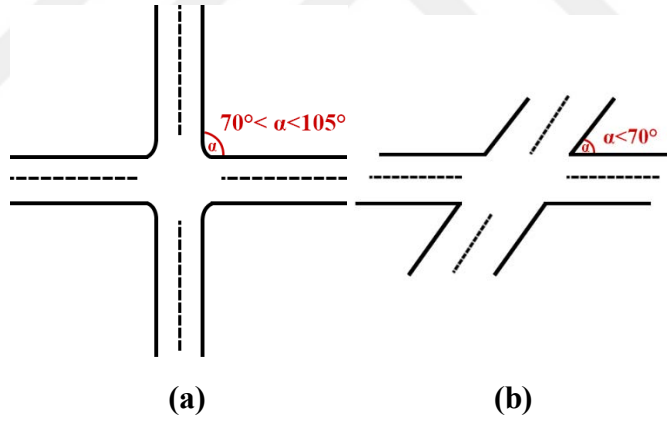
Farklı yönlerde ilerleyen trafik akımının aynı dikey seviyelerde kesiştiği alanlar eşdüzey kavşaklar adlandırılır. Eşdüzey kavşaklar kesişen kolların sayısına ve tasarım şekline göre sınıflandırılmaktadır. Kavşaklar, genellikle üç ve daha fazla yolun kesişmesinden meydana gelmektedir. Bu anlamda üç kollu, dört kollu ve çok kollu kavşaklara rast gelinir.

Üç yaklaşım kolunun aynı yükseklik derecesinde kesişmesinden meydana gelen yol ağlarına üç kollu eşdüzey kavşaklar denilir. Üç kollu kavşaklar kendi sırasında 2 türe ayrılır. Yaklaşım kollarının birleşme açısı  $70^\circ$ ’den büyük ve  $105^\circ$ ’den küçük olduğunda bu türlü üç kollu kavşaklara T-kavşaklar denilir. Kavşak kollarının kesişme açıları  $70^\circ$ ’den küçük ve  $105^\circ$ ’den büyük olduğunda ise bu türlü kavşak Y-kavşaklar olarak tanımlanır [57]. Şekil 4-2’de üç kollu T-kavşak ve Y-kavşak (çatal kavşak) geometrik tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 4-2: (a) T-kavşak, (b) Y-kavşak (çatal kavşak)

Aynı yükseklik seviyesinde dört trafik kolunun kesiştiği alanlar dört kollu kavşaklar adlandırılır. Kolların birleşmesinden oluşan eğim açısına göre dört kollu kavşaklar iki türde sınıflandırılır. Kolların kesişmelerinin eğim açısı  $70^\circ$  ile  $105^\circ$  arasında tasarlandığında bu türlü kavşaklara dik dört kollü eşdüzey kavşaklar denilir. Yolların birleşme açıları  $70^\circ$ 'den küçük ve  $105^\circ$ 'den büyük olduğunda ise bu türlü kavşaklar yatık dört kollü eşdüzey kavşaklar olarak tanımlanır. Dik ve yatık dört kollü eşdüzey kavşakların tasarlanması Şekil 4-3'de yansıtılmıştır.



Şekil 4-3: (a) dikey kavşak, (b) yatık kavşak

Eşdüzey kavşakların çok rastlanan diğer bir türü de dönel kavşaklardır. Döner kavşak, karayolu trafiğinin merkezi bir ada etrafında neredeyse sürekli olarak tek bir yönde aktığı bir kavşak türüdür. Dönel kavşakların en büyük faydası, dikey (T-kemik) çarpışmalarını ortadan kaldırmalarıdır. Diğer faydaları arasında, dikey kavşaklarla ilişkili sürücü karışıklığının azaltılması ve trafik ışıklarıyla ilişkili kuyrukların azaltılması yer alır. Diğer kavşak biçimlerinde genellikle mümkün olmayan normal trafik akışı içinde U dönüşlerine izin verirler. Döner kavşaklar yapılmadan önce, 1768'de tamamlanan “Bath Circus” alanı ve 1907'de açılışı yapılan Paris'teki Arc de Triomphe çevresindeki dairesel kavşaklar vardı. Bu dairelerin çalışma ve giriş özellikleri

modern döner kavşaklardan önemli ölçüde farklılık gösteriyordu. Yirminci yüzyılın başlarında, dairesel kavşaklarda yayalar için kısmen bir sığınak adası olarak tasarlandı. Dairesel dönel kavşakların aşağıdaki tasarım tipleri vardır [58]:

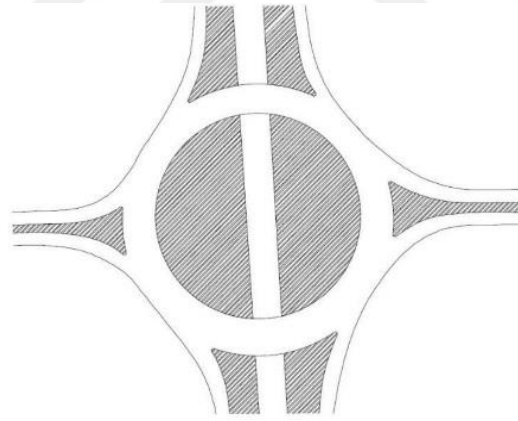
Konvansiyonel bir döner kavşak: Dairesel bir şekle sahip olan ve tüm araçların merkezi bir ada etrafında saat yönünde döndüğü bir kavşak olarak tanımlanır.

Mini dönel kavşak: Tamamen monte edilebilir bir merkezi adaya sahip dönel kavşak olarak tanımlanır. Mini döner kavşaklar, yasaklanmış veya kısıtlanmış kamyon hareketlerine sahip düşük hacimli, düşük hızlı yollarla sınırlandırılmalıdır.

Yağmur damlası dönel kavşakları: Tam bir daire oluşturmaz ve yağmur damlası veya oval şeklindedir. Rampalara serbest akışlı sola dönüşler sağlar ve dönüş sinyalleri ve şerit ihtiyacını ortadan kaldırır. Ayrıca iki şeritli dar köprülerde kuyruk oluşmasını da önlerler.

Turbo dönel kavşaklar: Sürücülerin dönel kavşağa girmeden önce seyahat yönlerini seçmelerini gerektiren, zorunlu bir sarmal trafik akışı sağlar. Dönel kavşağın kendisinde birçok çakışan yol ve seçeneği ortadan kaldırarak trafik güvenliğinin yanı sıra hız ve kapasite artırılır. Bir turbo döner kavşak, yalnızca iki yönden U dönüşlerine izin verecektir.

Dairesel dönel kavşakların tasarım şekli Şekil 4-4’de ayrıntılı şekilde yansıtılmıştır.

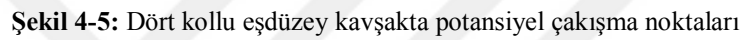


**Şekil 4-4:** Dairesel dönel kavşak [59]

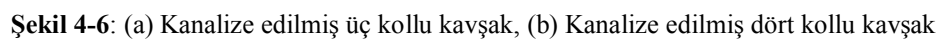
#### **4.1.3. Kavşaktaki Çakışmalar**

Bir kavşaktaki çakışmalar, farklı kavşak türleri için değişik sayda görülmektedir. Çakışma noktalarını görsel olarak görmek için Şekil 4-5’de gösterildiği gibi tipik bir dört ayaklı kavşak örneğine bakılabilir. Düz hareketler üzerinden bakıldığında çakışma sayısı 4, sağa dönüş ve düz hareketler için çakışma sayısı 8’dir. Sağa dönüş akımları arasındaki çakışma 4, sola dönüş ile

Şekil 4-5’de dört kollu eşdüzey kavşaklardaki potansiyel çakışma noktaları ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



Bir kavşağa yaklaşan araçlar, adalar, işaretlemeler ile belirli güzergâhlara yönlendirilir ve bu kontrol yöntemine kanallaştırma adı verilir. Kanalize kavşak daha fazla güvenlik ve verimlilik sağlar. Anayolda mevcut çakışma alanını azaltarak olası çakışmaların sayısını azaltır. Kanalizasyon sağlanmazsa, sürücünün anayoldan kavşağa girerken hızı düşürme eğilimi daha az olacaktır. Trafik adalarının, işaretlerin varlığı, sürücüyü hızı düşürmeye zorlar ve kavşakta manevra yaparken daha dikkatli olur. Kanalize bir ada aynı zamanda yayalar için bir sığınak görevi görür ve yaya geçidini daha güvenli hale getirir. Üç kolu ve dört kollu bir kavşak üzerinden trafiğin kanalize edilmesi Şekil 4-6’da gösterilmiştir.



## 4.2. KAVŞAK KONTROL SEVİYELERİ

Kavşak kontrolü, hem araç trafiğinin hem de yayaaların güvenli ve verimli hareketi için kavşaktaki bu çakışmaları çözmektir. İki kavşak kontrolü yöntemi vardır: zaman paylaşımı ve alan paylaşımı. Kabul edilmesi gereken kavşak kontrolünün türü trafik hacmine, yol geometrisine, ilgili maliyete, yolun önemine bağlıdır.

Bir kavşağın kontrolü farklı seviyelerde uygulanabilir. Pasif kontrol, yarı kontrol veya aktif kontrol olabilirler. Pasif kontrolde, sürüş üzerinde açık bir kontrol yoktur. Yarı kontrolde, sürücü üzerinde bir miktar kontrol trafik kurumunun elindedir. Aktif kontrol, trafiğin hareketinin tamamen trafik kurumu tarafından kontrol edildiği ve sürücülerin kendi seçimine göre kavşakta manevra yapamayacakları anlamına gelir.

### 4.2.1. Pasif Trafik Kontrolü

Trafik hacmi daha az olduğunda, açık bir kontrol gerekli değildir. Burada yol kullanıcılarının yolun temel kurallarına uymaları gerekmektedir. Kavşak kontrolünü tamamlamak için trafik işaretleri, yol işaretleri gibi pasif kontroller kullanılır. Pasif kontrol altında sınıflandırılan kavşak kontrolleri aşağıda belirtildiği gibidir.

Bir kavşağa gelen trafik düşükse yolun solundaki sürücü, yolun temel kurallarını uygulayarak yol vermeli ve geçiş hareketlerinden dönüş hareketlerinden önceliğe sahip olacaktır. Sürücünün yolun bu temel kurallarına uyması beklenir.

Trafikte uyarı işaretleri ve kılavuz işaretleri yardımıyla kavşakta bir miktar kontrol sağlanabilmektedir. “YOL VER” kontrolü, iki yönlü durdurma kontrolü ve çok yönlü durma kontrolü bunlara örneklerdir. “YOL VER” kontrolü, yan yoldaki sürücünün minimum hıza yavaşlamasını ve ana yoldaki aracın ilerlemesine izin vermesini gerektirir. Çift yönlü durdurma kontrolü, ara sokaklardaki araç sürücülerinin çakışmaların önlendiğini görmelerini gerektirir. Son olarak, bir kavşaktaki ana ve küçük yolları ayırt etmek zor olduğunda genellikle bir “all-way stop” kontrolü kullanılır. Böyle bir durumda kavşağa yapılan tüm yaklaşımlarda “DUR” işareti bulunur ve tüm yaklaşımlarda sürücünün aracı durdurması gerekir. Sağdaki araç, soldaki yaklaşıma göre öncelik kazanacaktır [55]. Düşük trafik durumlarında hemzemin kavşaktaki trafik kontrolü türü kontrolsüz olabilir. Burada yol kullanıcılarının yolun temel kurallarına uymaları gerekmektedir. Kavşak kontrolünü tamamlamak için trafik işaretleri, yol işaretleri gibi pasif kontroller kullanılır.



Trafik işaretlerine ek olarak, yol işaretleri de kavşaklardaki trafik kontrolünü tamamlar. Örneklerden bazıları, durma çizgisi işaretlemesini, akma çizgilerini, ok işaretlemesini gösterilebilir.

#### **4.2.2. Yarı Trafik Kontrolü**

Yarı kontrol veya kısmi kontrolde, sürücüler çakışmalardan kaçınmak için kısmen yönlendirilir. Kanalizasyon ve trafik rotaları buna iki örnektir.

Kanalizasyon: Kanalizasyon uygulamasında trafik, genellikle yol işaretleri ile ayırt edilen adalar olarak adlandırılan ortada yolun bir kısmını yükselterek belirli patikalardan akacak şekilde ayrılır. Böyle bir durumda trafik hareketlerindeki çakışmalar büyük ölçüde azalır. Kanalize kavşaklarda, adından da anlaşılacağı gibi trafik farklı kanallardan akmaya yönlendirilir ve bu fiziksel ayırım yoldaki trafik adaları, yol işaretleri gibi bazı engeller yardımıyla mümkün olur.

Trafik rotaları: Trafik rotaları ise trafiğin bir trafik adası etrafında tek bir yön boyunca akmasını sağlayan bir kavşak kontrolü şeklidir. Bu kontrolün temel prensibi, tam ve doğru dönüş gibi tüm şiddetli çakışmaları, birleşme, dokuma ve ayrılma gibi daha hafif çakışmalara dönüştürmektir [59]. Trafik rotaları, araçların hareketi için tasarlanmış ve hiçbir geçiş çakışması olmayan bir 'hemzemin' kavşak şeklidir. Trafik ve sağa dönüş trafiğinin merkezi ada etrafında düzenli bir şekilde saat yönünde hareket etmeye zorlandığı durumlarda serbest sola dönüşüne izin verilir. Birleştirme, dokuma ve iraksatma işlemleri, dönerdeki çakışan hareketleri azaltır.

#### **4.2.3. Aktif Trafik Kontrolü**

Aktif kontrol, yol kullanıcısının trafik kontrol kurumları tarafından önerilen yolu takip etmeye zorlanacağı anlamına gelir. İsteddiği gibi manevra yapamaz. Trafik işaretleri ve hemzemin kavşaklar bu sınıflandırmaya girer.

Trafik sinyali kullanarak kontrol, zaman paylaşımı yaklaşımına dayanmaktadır. Belirli bir zamanda, uygun sinyaller yardımıyla, trafik hareketleri kısıtlanırken, diğer hareketlerin kavşaktan geçmesine izin verilir. Kavşağın trafik durumuna göre iki veya daha fazla faz sağlanabilir. Kavşaktan geçen araçların sayısı çok yüksek olduğunda sinyaller yardımıyla kontrol yapılır. Sinyal için sağlanan fazlar iki veya daha fazla olabilir. İki'den fazla faz sağlanırsa buna çok fazlı sinyal denir.

En yaygın olanı, sabit zamanlı sinyaller ve araçla çalıştırılan sinyallerdir. Sabit zamanlı sinyallerde her bir sinyalin döngü süresi, fazları ve aralığı sabittir. Sinyalin her döngüsü tam olarak

bir diğeri gibi olacaktır. Ancak dalgalanan trafiğın ihtiyaçlarını karşılayamazlar [60]. Öte yandan, araç tahrikli sinyaller dinamik trafik durumlarına yanıt verebilir. Bunun için, kavşağa yaklaşan sokaklara araç detektörleri yerleştiriliyor ve detektör aracın varlığını algılayacak ve bilgileri bir kontrolöre iletecek sistem kurulumu yapılıyor. Kontrolör daha sonra döngü süresini ve faz uzunluklarını mevcut trafik koşullarına göre ayarlar.



## 5. ARAÇ KONTROL MERKEZİ

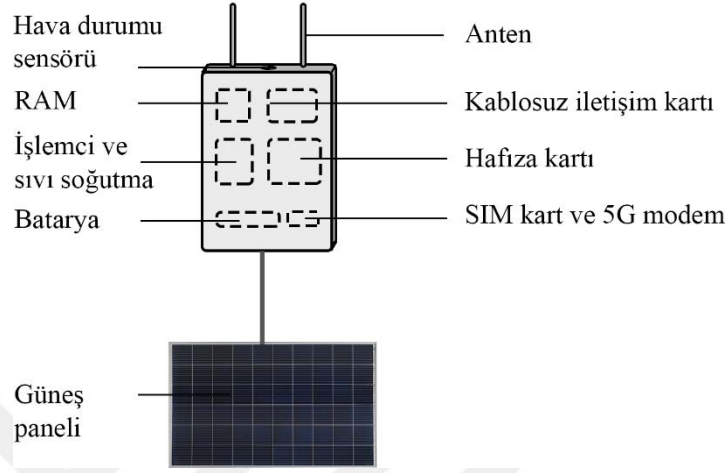
Otonom araçların güvenli, konforlu ve hızlı karar vermelerini sağlamak amacıyla çeşitli çalışmalar sonucu, birçok cihazlar, sensörler ve yazılımlar yapılmış ve günümüzde geliştirilmektedirler. Çevreyi algılama, bilgi işleme gibi önemli özellikler, araçların otonom şekilde menzil başına ulaşmasında başlıca önem kapsayan taraflardır. Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi'nin raporlarında yer alan tahminlere göre, tüm kazaların %36'ya kadarı, kavşaklarda meydana gelmektedir. Bu anlamda, geleneksel trafik kurallarına göre, trafik ışıkları ve tablolar bir sürücüyü kavşaktan geçiş için doğru kararları vermesi için yardımcı olmaktadır. Akıllı altyapı ile otonom araçlar için de trafik ışıklarından ve trafik tablolarından bilgi alma teknolojisi düşünülmüştür. Fakat, zaman kaybını daha optimum duruma getirmek, gereksiz kırmızı ışık beklemesinin önüne geçmek için, bu çalışmada otonom araçlar için Araç Kontrol Merkezi cihazı teklif ediliyor.

Araç Kontrol Merkezi, kavşakta yer alır ve kavşağa yaklaşan araçlarla V2X bağlantı oluşturur. Merkez, farklı kavşak kollarından ilerleyen araçların, güvenli, hızlı ve konforlu şekilde kavşaktan geçişini sağlamak için, araçlarla veri aktarımında bulunuyor. Değişik şartları göze alarak, bazı araçlara öncelik veriyor. Araçlardan alınan hız ve konum verilerine dayanarak, en hızlı, en güvenli ve en konforlu geçişi mümkün kılan kumandaları araçlara gönderiyor. Araç Kontrol Merkezi üzerinde bulunan hava durumu sensörü, araçlara uygulanmalı olan güvenli frenleme ve hızlanma değerlerini belirleyecektir. Bu bölümde, otonom araçların kavşak geçiş yardımcısı olabilecek Araç Kontrol Merkezi teklif edilmiştir.

### 5.1. ARAÇ KONTROL MERKEZİ'NİN YARDIMCI CİHAZLARI

Araç Kontrol Merkezinin enerji kaynağı güneş panelidir. Güneş ışığından toplanan elektrik enerjisi, Araç Kontrol Merkezinde bulunan bataryalarda depolanacak ve yenilenebilir enerji, 24 saatlik çalışmanı mümkün edecektir. İlk olarak, Araç Kontrol Merkezi belirli etki mesafesine ulaşmış araçlara bağlantı sağlamalıdır. Bunun için, kablosuz bağlantı cihazına gerek vardır. Cihazdan alınan araç hızı, araç konumu araç modeli ve hava durumu verileri Araç Kontrol Merkezinde bulunan birincil depolama kartına, yani, RAM belleğine gönderilecektir. Daha sonra, bu veriler, işlemciye aktararak algoritmik yazılımın şartlarına uygun şekilde işlenerek karar verilecek. Kararları yansıtan veriler hafıza kartına girilerek bağlantı cihazına gönderilecek. Bu işlemlerin sonucu, gereken kumanda bilgisi, bağlantı cihazı aracılığıyla araçlara aktarılacaktır. Ayrıca, gelecekte yaya geçidi sensörlerinden alınan bilgiler veya görüntü işleme teknolojisiyle

belirli trafik engelleri de göze alınarak, verilen kararların otonom araçlara gönderilmesi düşünülmektedir. Teklif edilen Araç Kontrol Merkezinin yardımcı cihazları (anten, kablosuz bağlantı kartı, RAM belleği, işlemci, hafıza kartı, batarya, güneş paneli, SIM kart ve mobil internet cihazı) Şekil 5-1’de gösterilmiştir.



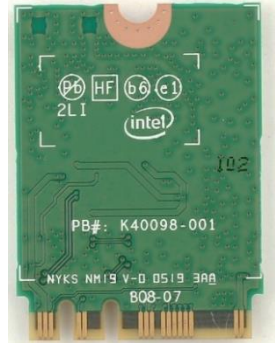
Şekil 5-1: AKM'nin yardımcı cihazları

#### 5.1.1. AKM Kablosuz İletişim Kartı

Kavşağa yaklaşan otonom araçlar, güvenli, konforlu ve hızlı şekilde geçişi gerçekleştirmek için, belirli etki mesafesine dahil olduğu andan itibaren Araç Kontrol Merkezine bağlantı sağlıyor. DSRC sistemi [61] adı verilen, araçların Kısa Mesafeli İletişim Sisteminin aracılığı ile AKM-Araç arasında veri aktarma ve kumanda alma prosedürü gerçekleşiyor. Bu anlamda, aracın hız, konum ve model verileri AKM tarafından “Sarı veri” olarak alınır.

Teklif ettiğimiz AKM’de bulunan kablosuz bağlantı kartı, Wi-fi 6 teknolojisine dayanan işlemcidir. Bağlantı kartı, Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan 802.11ax standartlı [62] ile çalışıyor. Aynı zamanda, çoğu sayıda cihazın bağlatmasını desteklemek, 9.6 Gbps hızla cihaz iletişimini mümkün etmek, güçlü bir güvenlik protokolünün sayesinde daha güvenli bağlantını sağlamak özelliklerini taşıyor. Yukarıda ön planda tutulmuş hız gösterilerine uygun olarak Araç Kontrol Merkezi için gereken özellikleri taşıyan bağlan kartının kurulumu teklif ediliyor.

Şekil 5-2’de Araç Kontrol Merkezi için önerilen kablosuz bağlantı kartı örneği gösterilmiştir.



Şekil 5-2: AKM kablosuz bağlantı kartı örneği [59]

### 5.1.2. AKM RAM Belleği

AKM etki alanına girmiş olan araçlardan alınan veriler, işlemcinin çalışması için, öncelikle kısa süreli hafıza deposuna gönderilecektir. Bunun için, Araç Kontrol Merkezinde, bir kaliteli ve hızlı çalışan RAM belleğine ihtiyaç vardır. Teklif edilen RAM belleği, DDR4 kullanım tipiyle çalışmaktadır. Önerilen RAM hafızası modelinin bellek kapasitesi 4GB, çalışma hızı 2666 MHz'ye ulaşmaktadır. Şekil 5-3'te Araç Kontrol Merkezi için teklif edilen RAM belleği gösterilmiştir.



Şekil 5-3: AKM RAM belleği örneği [60].

### 5.1.3. AKM İşlemci ve Sıvı Soğutma

Kavşağa yaklaşan otonom araçlardan alınmış olan konum, hız ve araç modeline bağlı veriler, sensörlerden gönderilmiş olan hava durumu ve yaya geçidi bilgileri, RAM belleğine aktarıldıktan sonra, algoritmik şartlara uygun şekilde işlenmesi ve doğru kararların alınması için işlemciye gönderilecektir. Bu amaçla, AKM içerisinde hızlı çalışabilen bir işlemciye gerek duyulmaktadır. İşlemci, araçlardan, hava durumu sensörlerinden ve akıllı yaya geçitlerinden aldığı verileri 3300-4800 Mhz hızla işleyerek, kararları ve giriş verilerini önce hafıza kartına depolayacak ve V2X bağlantı aracılığıyla gereken kumandaları kavşak üyelerine aktaracaktır. Şekil 5-4'te işlemci örneği gösterilmiştir. Ayrıca, sıcak hava durumunda çalışma ve karmaşık durumlarda sürekli işlemler göze alınarak, işlemcinin hızlı ve uzun süreli çalışmasını sağlamak için Araç Kontrol Merkezi içerisinde sıvı soğutma sisteminin kurulumu da amaçlanıyor.



Şekil 5-4: AKM işlemci örneği [65].

#### 5.1.4. AKM Hafıza Kartı

Araçlardan, akıllı yaya geçitlerinden ve hava durumu sensörlerinden alınan verilere dayanarak, işlemcinin verdiği kararlar ve giriş veriler istatistik amaçlar gereği, öncelikle hafıza kartında depolanacaktır. HDD (Sabit Disk sürücüsü) veya SD kartlar (Güvenli Sayısal Hafıza Kartları) hız rekabetinde daha arka sıralarda yer aldığından, AKM için önerilen bellek Katı Hal Sürücüsüdür. KHS veya SSD, saniyede 500 Megabayt hızla veri alış-verişi özelliğine sahiptir. AKM hafıza belleğinin veri tutumu 16 GB'dır ve Araç Kontrol Merkezi yazılımını ve günlük istatistik verileri hafızasında tutacaktır. Gün sonunda istatistik veriler, 5G internet bağlantısı aracılığıyla Merkezi Veri Bulutuna yüklenecektir.

#### 5.1.5. SIM Kart ve 5G Modemi

Gerektiğinde AKM yazılımının güncellenmesi ve günlük verilerin istatistik değerlendirmesini içeren dosyanın Merkezi Veri Bulutuna gönderilmesini sağlamak için Araç Kontrol Merkezinin mobil internet ağına bağlanması gerekmektedir. Nesnelerin İnterneti (IoT) adlandırılan bu yaklaşımın uygulanması için AKM içerisinde SIM kart ve 5G bağlantı modeminin kurulması amaçlanıyor. Önerilen AKM 5G bağlantı modemi saniyede 6 GB hızla veri indirme ve yükleme özelliğine sahip bulunacaktır. Altyapıya bağlı olarak, bu modemin aracılığıyla “mmWave” teknolojisi veya “Sub-6GHz” teknolojisi kullanılabilir. “MmWave” teknolojisi, günümüzde en yeni duyurulan ve 5G'ye dayanan teknolojilerden birisi olmakla beraber, 24-40 Ghz frekanslara bağlantı sağlayarak yüksek hız performansını gösterebilmektedir [66]. Altyapı açısından en yaygın olan ve daha düşük hız performansı sağlayan “Sub-6Ghz” 5G tabanlı teknoloji ise 3.4-6 Ghz-e kadar frekanslara atıf yapmaktadır [67]. Bu bağlantı, SIM kart yardımıyla gelecekte hızlı şekilde AKM yazılım güncellenmesi ve Merkezi Veri Bulutuna günlük istatistik raporların gönderilmesi için göze alınmaktadır.

### **5.1.6. Hava Durumu Sensörü**

Güvenli durma ve hızlanma açısından trafikte en önem verilen hususlardan birisi de asfaltın kuruluk ve yaşlık derecesidir. Araçlardan ve akıllı yaya geçitleri sensörlerinden alınan verilerle beraber hava durumuna bağlı bilgiler de verilen kararları etkilemektedir. Kuru ve yağışlı hava durumlarında araçların frenleme mesafeleri ve süreleri, aynı zamanda hızlanma süreleri farklı değerler alacaktır. Bu amaçla, Araç Kontrol Merkezi üzerinde hava durumunu belirleyen sensörün varlığı söz konusudur.

### **5.1.7. Batarya ve Güneş Paneli**

Günümüzde, tüm alanlarda doğal enerji kaynaklarına ve maliyete tasarruf amacıyla sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı için altyapı geliştirilmesi ön plandadır. Ülkemizde ve dünyada uygulanan birçok projelerin başlıca amaçları sırasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı söz konusudur. Bu açıdan, teklif edilen Araç Kontrol Merkezinin Güneş panelleri kullanması ve gereken enerjinin belirli kısmını bu kaynağın karşılaması düşünülmektedir. Günün uygun saatlerinde Güneş panellerinden alınan elektrik enerjisi bataryalarda depolanarak AKM'nin çalışmasını sağlayacaktır.

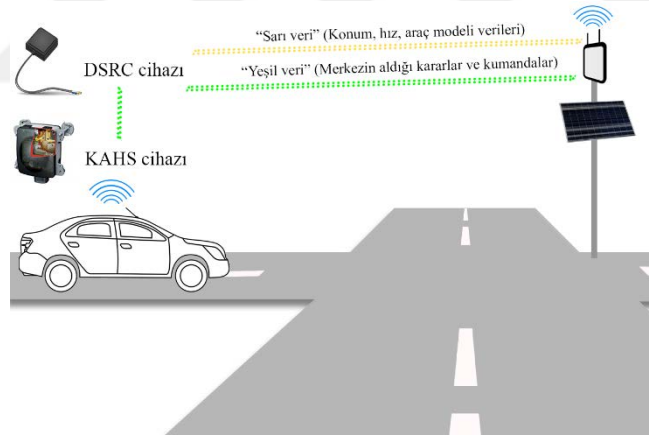
## **5.2. ARAÇ KONTROL MERKEZİNİN ÇALIŞMA DÖNGÜSÜ**

Genel olarak baktığımızda, AKM kavşağa yaklaşmakta olan araçları, belirli bir etki alanı dahilinde yönetmeye hesaplanmış bir aygıttır. Merkez, farklı kavşak kollarından ilerleyen araçların gereksiz kırmızı ışık beklemeleri, konforlu durma ve hızlanmalarını, güvenli ve hızlı geçişlerini sağlamayı amaçlamaktadır. Öncelikle, hava durumu sensörlerinden alınan veriler ve akıllı yaya geçitlerinden gelen bilgiler ön planda tutulacaktır. Araçlar belirli mesafeye ulaştığında AKM kablosuz iletişim cihazı ve araçlar arasında iletişim sağlanacaktır. Araçların konumu, hızı ve modeli RAM belleğine gönderilerek işlemciye aktarılacaktır. İşlemci hava durumu, yaya geçişi ve araçlardan alınmış olan bilgileri işleyerek giriş ve çıkış verilerini hafıza kartına depolayacak ve kablosuz bağlantı ile araçlara geri dönüş edecektir. Hafıza kartında depolanan bilgiler istatistik rapor dosyası haline dönüştürülecek ve 5G internet bağlantısı ile Merkezi Veri Bulutu'na yüklenecektir. Aynı zamanda, internet bağlantısı, Araç Kontrol Merkezinin gereken yazılım güncellemelerine erişimini sağlayacaktır. Şekil 5-5'de Araç Kontrol Merkezi'nin çalışma döngüsü ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



**Şekil 5-5:** Araç Kontrol Merkezi'nin çalışma döngüsü

Otonom araç içerisinde bulunan DSRC (Dedicated Short-Range Communications) cihazı, araçların kısa ve orta mesafeli iletişimlerin sağlanmasını amaçlıyor. Cihaz, Araç Kontrol Merkezinin etki alanına dahil olduğu zaman aracın hızı, konumu ve modelini içeren verileri Merkeze gönderecektir. Çalışmanın giriş verileri “Sarı veri” adıyla araçtan Araç Kontrol Merkezine aktarılacaktır. Güvenli, hızlı ve konforlu geçişi mümkün eden ve kumandaları içeren “Yeşil veri”, Araç Kontrol Merkezinden aracın DSRC cihazına gönderilecek ve Kooperatif Adaptif Hız Sabitleyicisine yönlendirilecektir. Şekil 5-8’de Araç-AKM arasında V2X iletişim ayrıntılı şekilde yansıtılmıştır.



**Şekil 5-6:** Araç-AKM arasındaki kablosuz iletişim

Şekil 5-8’den görüldüğü gibi, aracın hız, konum ve model verileri DSRC cihazı vasıtasıyla “Sarı veri” şeklinde Araç Kontrol merkezine gönderilecektir. Bu veriler AKM tarafından işlendikten sonra karar verileri (“Yeşil veri”) AKM-Araç bağlantısı çerçevesinde aracın DSRC cihazına ve oradan KAHS’e aktarılacaktır.



## 6. OYUN TEORİSİ

Oyun teorisi kavramları, farklı stratejik senaryoları formüle etmek, yapılandırmak, analiz etmek ve nihayetinde anlamak için ortak bir dil sağlar. Genel olarak oyun teorisi, çatışma durumlarını, ajanlar arasındaki etkileşimi ve onların kararlarını araştırır [68].

Oyun teorisi anlamında bir oyun, verilen kurallara göre etkileşime giren çoğunlukla sonlu sayıda oyuncu tarafından verilir. Bu oyuncular bireyler, gruplar, şirketler, dernekler ve sair olabilir. Etkileşimleri, oyuncuların her biri ve tüm oyuncu grubu üzerinde bir etkiye sahip olacak şekilde birbirlerine bağımlıdırlar. Daha açık tarif etmek gerekirse: Bir oyun, bir dizi oyuncu ve onların oyunu kurallara göre oynama olasılıkları, yani onların stratejileri ile tanımlanır. Bu açıklama, oyun teorisinin geniş bir tanımına yol açar: Oyun teorisinin konusu, bir oyuncunun sonucunun sadece kendi kararlarına bağlı olmadığı, aynı zamanda diğer oyuncuların davranışlarıyla da ilişkili olduğu durumlardır [68]. Oyun teorisinin tarihsel kökeni 1928 yılına dayanmaktadır. John von Neumann, salon oyunlarını analiz ederek, yaklaşımlarının uygulanabilirliğini çok hızlı bir şekilde fark etti. 1944 yılında Oskar Morgenstern ile birlikte yazdığı “Theory of Games and Economic Behavior” adlı kitabında matematiksel teorisini ekonomik problemlere uygulamıştır [69]. Bu kitabın yayınlanması genellikle modern oyun teorisinin başlangıç noktası olarak görülmektedir.

### 6.1. OYUN TEORİSİ İLK ÇALIŞMALARI VE UYGULAMALARI

“Oyun teorisi” kavramının meydana gelişi, 20. yüzyılın başlarında matematikçiler Ernst Zermelo ve John von Neumann’ın adlarıyla bağlıdır. İlk atılım, John von Neumann ve Oskar Morgenstern’in 1944’te yayınlanan “Theory of Games and Economic Behavior” adlı kitabıyla gelmiştir [69]. John Nash ve Lloyd Shapley’in 1950 ve 1953 aralığında yaptıkları önemli çalışmalar, bu atılımı başarıyla izlemiştir [70]. Oyun teorisi, ekonominin çeşitli dalları olan endüstriyel organizasyon, uluslararası ticaret, çalışma ekonomisi, makroekonomi gibi alanlarda uygulanmaya başlamıştır. Zamanla oyun teorisinin etkisi sosyal bilimlerin diğer dallarına (siyaset bilimi, uluslararası ilişkiler, felsefe, sosyoloji, antropoloji) ve sosyal bilimler dışındaki biyoloji, bilgisayar bilimi, mantık gibi alanlara da ulaştı. 1994’te ekonomide Nobel Memorial ödülü, ekonomide çok etkili olan oyun teorisindeki teorik çalışmaları nedeniyle üç oyun teorisyanı John Nash, John Harsanyi ve Reinhard Selten’e verildi. Aynı zamanda, ABD Federal İletişim Komisyonu, kişisel iletişim hizmetleri için radyo spektrumunun 7 milyar dolarlık açık artırmalarını tasarlamasına yardımcı olmak için oyun teorisini kullanmaya başladı. Ekonomide Nobel Memorial

ödülü 2005'te Robert Aumann ve Thomas Schelling, 2007'de Leonid Hurwicz, Eric Maskin ve Roger Myerson ve 2012'de Lloyd Shapley ve Alvin Roth olmak üzere üç kez daha oyun teorisyenlerine verilmiş oldu [71].

Oyun teorisi, etkileşimli durumların temsili ve analizi için resmi bir dil sağlar. Yani oyuncular olarak adlandırılan birkaç “varlığın” birbirini etkileyen eylemlerde bulunduğu durumlar OT'nin stratejiler kümesine dahil olan elemanlardır. Oyuncuların doğası, oyun teorik dilinin kullanıldığı bağlama göre değişir: evrimsel biyolojide oyuncular düşünmeyen canlı organizmalardır [72]; bilgisayar biliminde oyuncular yapay ajanlardır [73]; davranışsal oyun teorisinde oyuncular “sıradan” insanlardır [74] ve sair. Bununla birlikte, geleneksel olarak oyun teorisi, zeki, sofistike ve rasyonel bireyler arasındaki etkileşime odaklanmıştır. Örneğin, Robert Aumann oyun teorisini şu şekilde açıklar:

“Kısaca söylemek gerekirse, oyun ve ekonomik teori, Homo rasyonalistin – rasyonel insanın etkileşimli davranışıyla ilgilidir. Homo rasyonalist, her zaman hem amaçlı hem de mantıklı hareket eden, iyi tanımlanmış hedefleri olan, yalnızca bu hedeflere mümkün olduğunca yaklaşma arzusuyla motive olan ve bunu yapmak için gereken hesaplama özelliğine sahip türdür” [75].

## **6.2. OYUN TEORİSİNDE OYUN TÜRLERİ**

Oyun teorisi iki ana dala ayrılır. Birincisi, oyuncuların iletişim kurabileceğini, koalisyonlar kurabileceğini ve bağlayıcı anlaşmalar imzalayabileceğini varsayan işbirlikçi oyun teorisidir. İşbirlikçi oyun teorisi, örneğin, siyaset bilimi ve ilgili alanlarda oy verme davranışını ve diğer sorunları analiz etmek için kullanılmaktadır. İşbirlikçi olmayan oyun teorisi, oyuncuların iletişim kuramadığı veya iletişim kurabildiği ancak bağlayıcı sözleşmeler “imzalayamadığı” durumları modeldirler. Ayrıca, oyun türleri, oyuncuların kazanç ve kayıp değerleri arasındaki ilişkisine göre, sıfır toplam ve sıfır toplam olmayan oyunlar olarak da sınıflandırılmaktadır.

### **6.2.1. İşbirlikçi ve İşbirlikçi Olmayan Oyunlar**

İşbirlikçi oyun türleri, araçların değer yaratmak ve elde etmek için yapılandırılmamış etkileşimlerde koalisyonlar olarak nasıl rekabet ettiğini ve işbirliği yaptığını modeller. İşbirlikçi olmayan oyunlarsa, hareketlerin ayrıntılı açıklamasına 2 veya daha fazla araç için mevcut olan bilgilere dayanarak, tanımlanmış bir prosedürde faydalarını en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen ajanların eylemlerini modeller. İşbirlikçi oyunlar, bu ayrıntılardan özetler çıkarır ve her bir etmen koalisyonunun değer yaratma yeteneklerinin, oyun ajanlarının değer yakalama kabiliyetine nasıl

dayanabileceğine odaklanır. İşbirlikçi oyunlar, bu nedenle “koalisyon” olarak adlandırılabilirken, işbirlikçi olmayan oyunlar çoğunlukla “prosedürel” olarak tanımlanmaktadır. “İşbirlikçi” ve “işbirlikçi olmayan” kavramları teknik terimler olduğu ve modeldeki araçlar arasındaki işbirliği derecesinin bir değerlendirmesi olmadığı unutulmamalıdır. İşbirlikçi olmayan bir oyun işbirliği derecesini modelleyebildiği kadar, işbirlikçi bir oyun aşırı rekabeti modelleyebilir [76].

İşbirlikçi oyunlar, ajanların koalisyonlara katılarak değer yaratmak için işbirliği yapabilecekleri ve aynı zamanda ajanların değer elde etmek için rekabet ettiği durumları analiz edebilir. Bu türlü oyunların modelleri, bir etmen kümesini ve her bir etmen alt kümesinin (koalisyonun) kendi başına yaratabileceği değeri döndüren bir işlevden oluşur. Karakteristik fonksiyon, her bir etmen tarafından yakalanan değeri döndüren bir çözüm kavramının girdisidir.

Pazarlık prosedürüne herhangi bir yapı konmadığından, çözüm kavramı, her bir koalisyonun yaratabileceği değeri hesaba katarak temsilciler arasında gerçekleşen müzakerelerin sonucunu modeller [77]–[78].

Bir temsilcinin katma değeri (veya marjinal katkısı), temsilci dahil edilmezse büyük koalisyona (tüm ajanların koalisyonu) kaybettiği değerdir. Çekirdek tarafından ima edilen katma değer ilkesi, rekabetçi serbest biçimli etkileşim altında bir ajanın katma değerinden fazlasını yakalayamayacağını belirtir. Shapley değeri, bir temsilcinin tüm olası koalisyonlara ortalama katma değeridir. Her zaman vardır ve benzersizdir. Araçlar arasında değer dağılımının adaletini vurgular. Ortak bir tesisin kullanıcıları arasında maliyetlerin dağılımını modellemek ve siyasi gücü ölçmek için kullanılmıştır. Aynı zamanda, örneğin bir tedarik zincirindeki müzakereyi modellemek için, işbirlikçi olmayan bir müzakere prosedürünün beklenen sonucu olarak da görülebilir [79].

### 6.2.2. Sıfır Toplamlı Oyunlar

Bir oyuncu tarafından elde edilen herhangi bir kazanç rakibi tarafından benzer bir kayıpla sonuçlanırsa, bu türlü karar durumu iki kişilik sıfır toplamlı bir oyun olarak temsil edilebilir. Oyun teorisi açısından, bu sıfır toplam varsayımdır. Bu, bir oyuncunun kazancının diğer oyuncuya zarar vermesi anlamına gelir. Bunu görselleştirmenin bir yolu, bir poker oyunundaki potu düşünmektir. Kazanan oyuncu, diğer oyuncunun pahasına tüm kazancı elde eder. Oyun teorisi ayrıca iki oyuncunun rasyonel aktörler olduğunu ve her birinin kazancını en üst düzeye çıkarmaya veya kaybını en aza indirmeye çalıştığını varsayar. Bu varsayımlar, askeri karar alma sürecinin varsayımlarına çok benzemektedir. Oyun teorisinin askeri uygulamalarını geliştirmeden önce, oyun teorisini anlamak açıklık adına önemlidir. Burada Birinci Oyuncu veya Dost Oyuncu sıra

oyuncusudur. İkinci Oyuncu veya Düşman Oyuncu ise sütun oyuncusudur. Matristeki tüm değerler Dost Oyuncu getirileridir. Herhangi bir negatif değer, Dost Oyuncu kaybını ve Düşman Oyuncu için bir kazancı gösterir. Herhangi bir pozitif değer, Dost Oyuncu Kazanımı ve Düşmanı Oyuncu kaybını gösterir [68]. Durum, aşağıda Tablo 6-1’de gösterildiği gibi 2x2 matris oluşturur.

**Tablo 6-1:** Sıfır toplamlı oyun örneği matrisi [68]

| <b>Dost Oyuncu<br/>(Sıra<br/>oyuncusu)</b> | <b>Düşman Oyuncu<br/>(Sütun oyuncusu)</b> |         |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|---------|
|                                            | Karar 1                                   | Karar 2 |
| Karar 1                                    | 2                                         | 4       |
| Karar 2                                    | 2                                         | 0       |

### 6.2.3. Sıfır Toplamlı Olmayan Oyunlar

Oyunculardan birisinin kazanç değeri diğer oyuncu veya oyuncuların eşit derecede kaybı ile sonuçlanmayan oyun türleri sıfır toplamlı olmayan oyunlardır. Bu türlü oyunlarda oyuncuların kazanç veya kayıpları bireysel olup, genel oyun şartlarına ve oyun kazancına odaklanmış şekilde sürdürülür. Aynı zamanda, sıfır toplamlı oyunlarda bir oyuncunun kazancı, diğer oyuncu veya oyuncuların mutlak zararı ile sonuçlanma şartı ile çözülmemektedir [80]. Yukarıda belirtildiği gibi, oyunculardan birinin oyunu kazanması diğerinin aynı derecede kaybı ile sonuçlanan sıfır toplamlı olmayan oyun kavramlarından birisi de Tavuk Oyunudur. Aşağıdaki başlıkta Tavuk Oyunu ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

### 6.3. TAVUK OYUNU

Tavuk Oyunu, sıfır toplamlı olmayan oyunlara örnek olarak gösterilen bir Oyun Teorisi modelidir. Bu oyunu tanımlamak için, sadece bir aracın geçebileceği köprüden geçmek için karşı karşıya hareket eden iki araç düşünülebilir. Bu araçların her birisi, bir oyuncu, tek şeritli köprüye oyuncuların rekabet alanı olarak tanımlanıyor. Köprüyü geçmeye çalışan araçlar “devam etmek” ve “yoldan sapmak” seçimlerine dayanarak iki karardan birisini verebilir. Araçlardan birisinin devam ettiği, diğerinin hedeften saptığı durumda çakışma oluşmayacak ve köprüden devam eden araç, oyunu kazanacaktır. Yoldan sapmak veya durmak kararını vermiş oyuncu, oyunu kaybedecek ve “tavuk” adı taşıyacaktır. Her iki aracın köprüden ilerlediği durum, kazayla sonuçlanacaktır. Bu

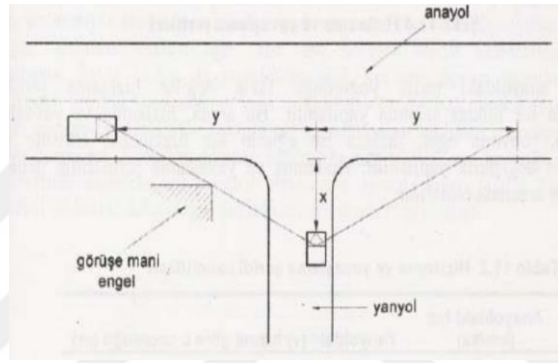
durum, tüm oyuncuların en fazla kayıpla oyundan ayrıldığı senaryo olarak tanımlanıyor. Tüm oyuncuların köprüden geçmeyi iptal ettiği durumda oyun, sıfır kazançla sonuçlanıyor.

Yedinci bölümde dört kollu kontrolsüz kavşaktan geçmeye çalışan iki otonom aracın rekabet problemi ayrıntılı şekilde tanımlanmış ve çözümü için Oyun teorisinin Tavuk oyunu modeline dayanan algoritmik yöntem gösterilmiştir.



## 7. OTONOM ARAÇLARIN KONTROLSÜZ KAVŞAK PROBLEMİ

ABD’de oluşan trafik kazalarına dayanan istatistik verilere göre, 2012 yılında kontrolsüz kavşaklarda görülen kazaların oranı %42’ye ulaşmıştır [81]. Kontrolsüz kavşaklarda, kazaların başlıca nedeni görüş mesafesine ve görüş üçgenine bağlıdır [82]. Kontrolsüz kavşaktan geçişi bekleyen sürücünün veya çevre algılama cihazının trafik ortamına bakış açısı, bu eylemde görüş üçgenini oluşturmaktadır. Görüş alanı içerisine reklam panosu, bina, levha, istinat duvarı, ağaç, köprü ayağı veya diğer maniler girdiğinde yeterli görüş açısı sınırlandırılarak kaza olasılığını artırabilir. Kavşağa yaklaşan aracın üçgen görüş alanını yansıtan çizim, Şekil 7-1’de gösterilmiştir.



Şekil 7-1: Kavşağın üçgen görüş alanı [82]

Görüş açısının kısıtlanması nedeniyle araçların hız seviyesini düşürmesi kontrolsüz kavşaklarda gecikme ve trafik sıkışıklığının meydana çıkmasına sebep olabilir. Ayrıca, kavşak durumu ve diğer kavşak kolları ile ilgili öngörünün olmaması, yanlış hız seçimine yol açmaktadır. Yani, önceden daha hızlı yaklaşan aracın, kavşağa diğer yönden giren araçlarla anlaşamaması, kaza dışında hem de konforsuz frenleme veya hızlanmaya neden olabilir. İnsan veya otonom sürücü için denetimsiz kavşakların yukarıda belirtilmiş dezavantajlarını önlemek, daha güvenli, hızlı ve konforlu kavşak geçişini simüle etmek için bu bölümde, iki otonom araç ve bir kontrolsüz kavşak bir oyun alanında düşünülmüştür.

### 7.1. PROBLEMİN TANIMI

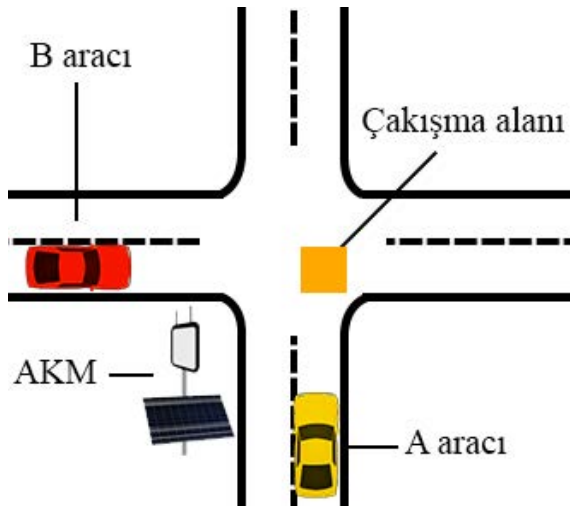
Çözümüne çalışılan problem, Oyun teorisinin sıfır toplamı olmayan oyun türüne ait Tavuk Oyunu modeline dayanmaktadır. Öncelikle, dikey yönlerden dört kollu kontrolsüz kavşağa iki otonom aracın yaklaştığı düşünülmüştür. A ve B araçları olarak adlandırılmış bu otonom araçların,

şeritlerin kesiştiği alanda çakışma oluşturma ihtimali göze alınmaktadır. Düşünülen oyunda A ve B araçları Oyuncular olarak tanımlanmıştır. Bu araçların ilerlediği şeritlerin kesiştiği alan, rekabet alanı veya çakışma alanı adlanmıştır. Gösterilen problemde iki araç arasındaki kazançları ve kayıpları içeren oyun matrisi Tablo 7-1’de gösterilmiştir.

**Tablo 7-1:** Dört kollu kavşağa yaklaşan iki araç arasında oyun matrisi

|         |       | A aracı               |                            |
|---------|-------|-----------------------|----------------------------|
| B aracı | Bekle | Eşit, Eşit (1, 1)     | Kayıp, Kazanç (-1, 1)      |
|         | Geç   | Kazanç, Kayıp (1, -1) | Olumsuz sonuç (-100, -100) |

Oyuncuların, ortak zamanda kavşağa girdiği durumlarda yüksek kaza olasılığı söz konusudur. Kavşağın tüm kollarındaki durumla ilgili öngörülerini içeren verilerin oyunculara aktarılması ve oyun kurallarına uygun kararların verilmesi için oyun alanına Araç Kontrol Merkezi dahil edilmiştir. Teklif edilen AKM, belirli mesafeye kadar kavşağa yaklaşmış olan araçlarla hızlı iletişime geçiyor. Araçların AKM ile iletişime geçebildiği en uzak mesafe AKM mesafesi adlanıyor. AKM ve aracın DSRC cihazı arasında bağlantı oluştuktan sonra araçla ilgili giriş verileri veya “Sarı veri” AKM’ye gönderiliyor. “Sarı veri”, aracın konumu, hızı ve modelini içeren bilgilerdir. Giriş verileri, AKM tarafından işlendikten sonra “Yeşil veri” adlandırılan çıkış verileri araca yönlendiriliyor. “Yeşil veri”, kavşaktan güvenli, hızlı ve konforlu geçişi sağlamak için gereken kumandalar toplusudur. Şekil 7-2’de kontrolsüz kavşağa yaklaşan iki otonom araç arasındaki Tavuk Oyunu modeli gösterilmiştir.



**Şekil 7-2:** İki otonom araç arasındaki Tavuk Oyunu modeli

## 7.2. ÖNERİLEN ÇÖZÜM ALGORİTMASI

A ve B araçları Şekil 7-2’de gösterildiği gibi dört kollu eş düzey kavşağa geçerli zaman ve hız aralıklarında rastgele olarak yaklaşmaktadır. Bu zaman araçların, turuncu bölgede çakışabileceği rekabet alanı veya çakışma alanı göz önüne alınmaktadır. Ortak zaman kesiminde turuncu bölgeye ulaşmış araçlar kaza oluşturacaktır. Kaza durumunu önlemek için araçların çakışma alanında bulunduğu zamanı farklı tutmak önemlidir. Zaman kesiminde oluşturulacak fark, en az gecikmeyle kavşak geçişini sağlamalıdır. Aynı zamanda, araçların diğerini beklediği ve yeniden hızlandığı durumlar için frenleme ve hızlanma değerleri en yüksek konfor şartlarına uymalıdır. Bu zaman, asfaltın kuruluk ve yaşlık derecesi, dolayısıyla hava durumu bilgileri ön planda tutulacaktır. AKM, öncelikle etki alanına girmiş olan aracın çakışma alanına yetişeceği ve oradan çıkacağı zamanı hesaplayacak. Çakışma alanına giriş ve alandan çıkış süreleri zaman dilimi olarak algılanacaktır. Zaman dilimleri arasında ortak zaman bölgesinin olduğu durumda AKM, kavşağa en yakın olan aracın devam etmesi, diğerinin kavşakta beklemesi kumandasını gönderecektir. Zaman dilimleri arasında ortak zaman bölgesi olmazsa, geçiş normal şekilde devam edecektir.

Durarak yeniden hızlanmalı olan aracın bu eylemi konforlu şekilde gerçekleştirmesi için araçlar için konforlu durma ve hızlanma değerleri göz önünde tutulmalıdır. Bu amaçla, araçların durma ve hızlanmasının konforunu ve güvenliğini test eden ve sonuçları belirten makaleler üzerinde literatür taraması yapılmıştır. Örnek problemde asfaltın yaşlık derecesi sıfır olarak varsayılmıştır.

Konforlu frenleme ve hızlanma değeri göze alınmakla araçların frene bastığı ve hızlanmaya başladığı anlar hesaplanacaktır. Bu hesaplama gereksiz bekleme önleyerek gecikme değerinin en düşük seviyede tutulması için kullanılacaktır.

Algoritmik hesaplamaların sonunda farklı sayıda geçişler için ortalama gecikme değeri gösterilecek ve değişkenler arasındaki ilişki, oyun şartlarına göre incelenecektir.

En az gecikme ile güvenli geçişi sağlamak için araçların frene basması ve yeniden hızlanması doğru zamanlamayla seçilmelidir. Bunun için, teklif edilen algoritmada araçlardan birisinin diğerinin hareketini öngörmesi söz konusudur. Bekleyen araç, yeniden hızlandıktan sonra çakışma alanına yetiştiği zamanda bu alanın güvenli olduğundan emin olmaktadır.

Araçların, AKM etki alanına giriş anı ( $T_{giriş}$ ) geçerli aralıkta rastgele seçilir. Aynı şekilde  $a$  ve  $b$  araçların giriş hızları ( $V_a$ , ve  $V_b$ ) maksimum 60 km/saat ~16 m/san olacaktır. Dolayısıyla  $V_a$  ve  $V_b$  hızları 1 ile 16 m/san arasında rastgele olarak seçilmektedir.



$T_{baş(a)}$  ve  $T_{bit(a)}$ , sırasıyla  $a$  aracının turuncu bölgeye girişinin başlangıç ve son anlarıdır. Bu değerler denklem (7.1) ve denklem (7.2)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$T_{baş(a)} = T_{giriş(a)} + \frac{AKM + GD}{V_a} \quad (7.1)$$

$$T_{bit(a)} = T_{giriş(a)} + \frac{AKM + GD + w + L_a}{V_a} \quad (7.2)$$

Burada  $w$ , şerit genişliği,  $L_a$ ,  $a$  aracının uzunluğu,  $AKM$ , AKM etki mesafesi ( $m$ ),  $GD$ , araçların güvenli durma mesafesi ( $m$ ) ve  $V_a$ ,  $a$  aracının hızı olarak varsayılmaktadır.

$T_{baş(b)}$  ve  $T_{bit(b)}$ , sırasıyla  $b$  aracının turuncu bölgeye girişinin başlangıç ve son anlarıdır. Bu değerler denklem (7.3) ve denklem (7.4)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$T_{baş(b)} = T_{giriş(b)} + \frac{AKM + GD + w}{V_b} \quad (7.3)$$

$$T_{bit(b)} = T_{giriş(b)} + \frac{AKM + GD + 2w + L_b}{V_b} \quad (7.4)$$

Burada  $w$ , şerit genişliği,  $L_b$ ,  $b$  aracının uzunluğu,  $AKM$ , AKM etki mesafesi ( $m$ ),  $GD$ , araçların güvenli durma mesafesi ( $m$ ) ve  $V_b$ ,  $b$  aracının hızı olarak varsayılmaktadır.

AKM etki mesafesine  $T_{giriş}$  anında giriş yapan araçların sabit  $V$  hızı ile ilerleyeceği varsayılıyor. AKM, eylemlerin ve emirlerin zaman anına odaklanarak, aşağıdaki sıralama ile hesaplama gerçekleştiriyor.

Araçlar aynı ayna turuncu bölgede bulunmazlarsa, kaza ortaya çıkmayacaktır. Dolayısıyla gecikme olmadan her iki araç normal şekilde kendi hızı ile kavşaktan geçecekler. Ancak turuncu alanda iki aracın bulunduğu kaza durumu ortaya çıkmaktadır. Kaza yapılacak durumda iki araçtan biri durdurulup, diğer araç devam edecek şekilde planlanmaktadır. Hangi aracın durması ve durdurulan aracın ne zaman frene basılması ve hangi sürede durduğu hesaplanması gerekiyor. Bu bölümde kaza durumu ile ilgili gereken bilgiler ve veriler hesaplanması tartışılmıştır.

$T_{giriş}$  anında kavşağa giren araçların  $T_{baş}$  ve  $T_{bit}$  anı hesaplanıyor. Bu değerler denklem (7.1)'den, denklem (7.4)'e kadar verilmiştir. Başlangıç ile bitiş anları arasındaki süre, zaman bölgesi olarak algılanıyor.

Araçların  $T_{baş}$  ve  $T_{bit}$  aralıklarında ortak zaman bölgesi olmazsa eylem normal şekilde devam eder. Normal geçiş süresi denklem (7.5) de gösterilmiştir.

$$T_{son(k)} = \frac{AKM + 2*0,5 + 2w + L_k}{V_k} \quad (7.5)$$

Burada  $T_{son(k)}$ , araçların bekleme yapmadan kavşaktan normal geçiş süresidir.

$T_{baş}$  ve  $T_{bit}$  aralıklarında ortak zaman bölgesi olursa  $T_{baş}$  büyük olan araç durdurulur.

Bu zaman araçların konforlu yavaşlaması kavramına bakılıyor. Bunun için, araçların frenlemesi konusunda literatür taraması yapılmıştır. Araçların frenlemesi üzerinde yapılan deneyimler sonucunda kuru asfaltta araçların konforlu yavaşlamanın medyan değeri,  $a_y = 3.4 \text{ m/s}^2$  olarak kabul ediliyor [83].

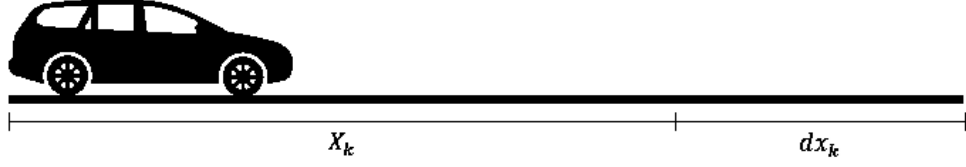
$T_{baş}$ -lar eşit olursa hızı ( $V$ ) küçük olan araç durdurulur. Hız eşit olursa rastgele seçilir. Durmuş olan aracın yeniden hızlanmasında konfor hususunun göze alınması için yapılmış çalışmalarda kabul edilen hızlanma değeri:  $a_h = 4 \text{ m/s}^2$  olmuştur. [84] Bekleyen araç, aşağıda belirtilen süreden sonra yeniden hızlanarak başlangıç  $V$  hızı kadar hızlanacaktır.

Durmuş olan araç  $a$  ise, o,  $b$  aracına ait  $T_{bit(b)} + 0,5$  san anında hızlanmaya başlar. Çünkü  $0,5$  saniye sonra  $b$  aracı minimum  $0,5$  metre yol kat eder ve çakışma alanından güvenli mesafede olur.

Durmuş olan araç  $b$  ise, o,  $t_{hk} = T_{bit(a)} - \sqrt{\frac{2w}{a_h}}$  saniye anında hızlanmaya başlar. Çünkü  $b$  aracı ile çakışma alanı arasında  $w + 0,5 \text{ m}$  mesafe vardır. Bu sürede  $b$  aracı maksimum  $w$  kadar ilerleyebilir ve  $0,5$  metre güvenlik mesafemiz sağlanmış olur. Bu durum denklem (7.6)'da gösterildiği ifadeler ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{cases} dt_k = \frac{V_k}{a_y} \\ dx_k = \frac{V_k^2}{2a_y} \\ X_k = AKM - dx_k \\ T_x = \frac{X_k}{V_x} \\ T_{durma} = T_x + dt_x \end{cases} \quad (7.6)$$

Denklem (7.6)'da verildiği ifadeler ile bir aracın ne kadar mesafe sonra ( $X_k$ ) ve durma noktasına ne kadar mesafenin kaldığı ( $dx_k$ ) hesaplanır. Bu durum Şekil 7-3'te gösterilmiştir.



Şekil 7-3: Aracın frenleme mesafesi

Durdurulacak aracın tekrardan 0 hızdan başlayarak frene basmadan önceki hıza ulaşana kadar hızlanma değeri ile hızlanıp, daha sonra sabit hızla yola devam etmesi gerekiyor. Burada iki farklı durum ortaya çıkabilir:

**I) Önceki hıza ulaşmadan önce son noktaya varma:**

Eğer  $\frac{v_k^2}{2a_y} \geq 2w+0.5+L_k$  olursa aracın önceki hıza ulaşmadan son noktaya vardığını anlayabiliriz. Burada denklem (7.7)'de gösterildiği gibi geçiş süresi basitçe hesaplanabilir.

$$T_{geçiş(k)} = t_{hk} + T_{hk} \quad (7.7)$$

Burada  $T_{geçiş(k)}$  aracın geçiş süresi,  $t_{hk}$  duran aracın tekrardan hızlanma zamanı ve  $T_{hk}$  kavşaktan geçiş süresidir.  $T_{hk}$  hesaplanması denklem (7-8)'de gösterilmektedir.

$$T_{hk} = \frac{V_k}{a_h} \quad (7.8)$$

**II) Son noktaya varmadan önceki hıza ulaşma:**

Eğer  $\frac{v_k^2}{2a_y} \leq 2w+0.5+L_k$  olursa bu durumun olduğunu anlayabiliriz. Burada  $T_{gecikme}$  zamanı denklem (7.9)'da gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{cases} T_{xh} = \frac{V_k}{a_h} \\ T_{ks} = \frac{X_{ks}}{V_k} \\ T_{geçiş} = t_{hk} + T_{kh} + T_{ks} \\ T_{gecikme} = T_{geçiş} - T_{son} \end{cases} \quad (7.9)$$

Her iki araç için bekleme süresi denklem (7.10)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{cases} T_{durma}(k) = T_{giriş}(k) + \frac{AKM}{V_k} \\ T_{bek}(a) = (T_{bit}(b) + 0.5) - T_{durma}(a) \\ T_{bek}(b) = T_{bit}(a) - \sqrt{\frac{w}{a_h}} - T_{durma}(b) \end{cases} \quad (7.10)$$

Durmuş olan aracın hızlanmaya başladığı andan kavşağın sonundaki Son hattını geçmesine kadar gereken süre denklem (7.11)'de verilmiştir.

$$T_{son} = \sqrt{\frac{2a_h}{L}} \quad (L=2 \times 0.5 + 2w + L_k) \quad (7.11)$$

Durmuş olan aracın kavşaktan toplam geçiş süresi ise denklem (7.12) ile hesaplanmaktadır.

$$T_{geçiş}(k) = T_{durma} + T_{bekleme} + T_{son} \quad (7.12)$$

Durmuş olan aracın normal geçiş süresi ile toplam geçiş süresinin farkı onun gecikme değeridir. Bu değer denklem (7.13) ile hesaplanmaktadır.

$$T_{gecikme} = T_{geçiş} - t_{geçiş} \quad (7.13)$$

### 7.3. ÖNERİLEN ALGORİTMANIN UYGULANMASI

Önerilen yöntemi simüle etmek için bir fonksiyon geliştirilebilir. Bu fonksiyon, AKM mesafesi de dahil olmak üzere problem için ilk ayarları ve problem tanımıyla ilgilenen diğer değerleri alır. Fonksiyonun çıktısı, rastgele bir çalıştırma için gecikme değeri olacaktır. Fonksiyonun başlangıcında, frenleme ve yeniden hareket için standart hızlanma değeri ayarlanır. Ardından, örnek çalışma için, A ve B arabalarının algılama alanına girme zamanı ve aracın hızını geçerli aralıklarda rastgele değerler üretilir.

Arabaların rastgele değerlerine sahip olarak, her bir arabanın kaza alanına girme zamanlarını hesaplamak mümkündür. Mevcut durumdaki araçların kaza yapma ihtimalinin olup olmadığını kaza alanına girme süreleri göz önüne alarak belirleyebilir.

Bir kaza olasılığı varsa, arabalardan hangisinin kaza alanına diğerinden daha erken girdiğine bağlı olarak çelişkili hesaplamalar yapılmalıdır. Kaza bölgesine daha erken giren arabalardan herhangi biri ve aynı zamanda varsa kaza ihtimali diğer arabanın durdurulması emrinin dikkate alınmasına neden olacaktır. Tabii ki, A ve B arabalarının, yoldaki konumlarından dolayı durduğunda farklı davranacağını unutmaması gerekiyor.

Hangi arabanın duracağı göz önüne alındığında, diğer arabanın normal hareket edeceği ve kavşaktan geçeceği anlaşılabilir. Bu nedenle, normal eden arabanın gecikme süresi sıfırdır ve diğer araba için gecikme süresi hesaplanmalıdır. Bir arabanın gecikme süresini hesaplamak için, arabanın son noktadan geçiş süresi hesaplanır ve başlangıçta hesaplanan normal geçiş süresinden çıkarılır. Sonunda yazılan fonksiyon, her iki arabanın gecikmelerinin toplamını döndürür.

Kod 7-1, bu işlevin sözde kodunu gösterir. Belli ki, arabalar için kaza durumu yoksa gecikme değeri sıfır olacaktır.

**Kod 7-1:** Uygulamanın temel step adlı sözde kodu

```
Algorithm step(AKM,W,L_a,L_b,Guvenli_Durma,distance_time,distance_v): [gecikme]
    // Bir rasgele ornek için gecikme süre hesaplama
    //input: AKM, W,L_a,L_b,Guvenli_Durma,distance_time,distance_v; ornek kavşak
    ve arabaların parametreleri
    //output: gecikme, bir ornek için gecikme süresi

    //Set constant values
    a_y ← 3.4
    a_h ← 4
    // Set Random parameters for vehicles
    v_a ← Random number between 1 and distance_v
    v_b ← Random number between 1 and distance_v
    t_a ← 0 or Random number between 1 and distance_time
    t_b ← 0 or Random number between 1 and distance_time

    //A ve B araçları için başlangıç değişkenlerini ayarlama
    //Tbas: Araç çarpışma bölgesinin başlangıç noktasına ne zaman ulaşacak.
    //Tbit: Araç çarpışma bölgesinin son noktasına ne zaman ulaşacak.
    //Tson: Araç hesaplama bölgesinin son noktasına ne zaman ulaşacak.
```

```

// A araç için
Tbas_a  $\leftarrow$  t_a + (AKM+Guvenli_Durma)/v_a
Tbit_a  $\leftarrow$  t_a + (AKM+Guvenli_Durma+W+L_a)/v_a
Tson_a  $\leftarrow$  t_a + (AKM+Guvenli_Durma+2*W+L_a)/v_a

// B araç için
Tbas_b  $\leftarrow$  t_b + (AKM+Guvenli_Durma+W)/v_b
Tbit_b  $\leftarrow$  t_b + (AKM+Guvenli_Durma+2*W+L_b)/v_b
Tson_b  $\leftarrow$  Tbit_b;

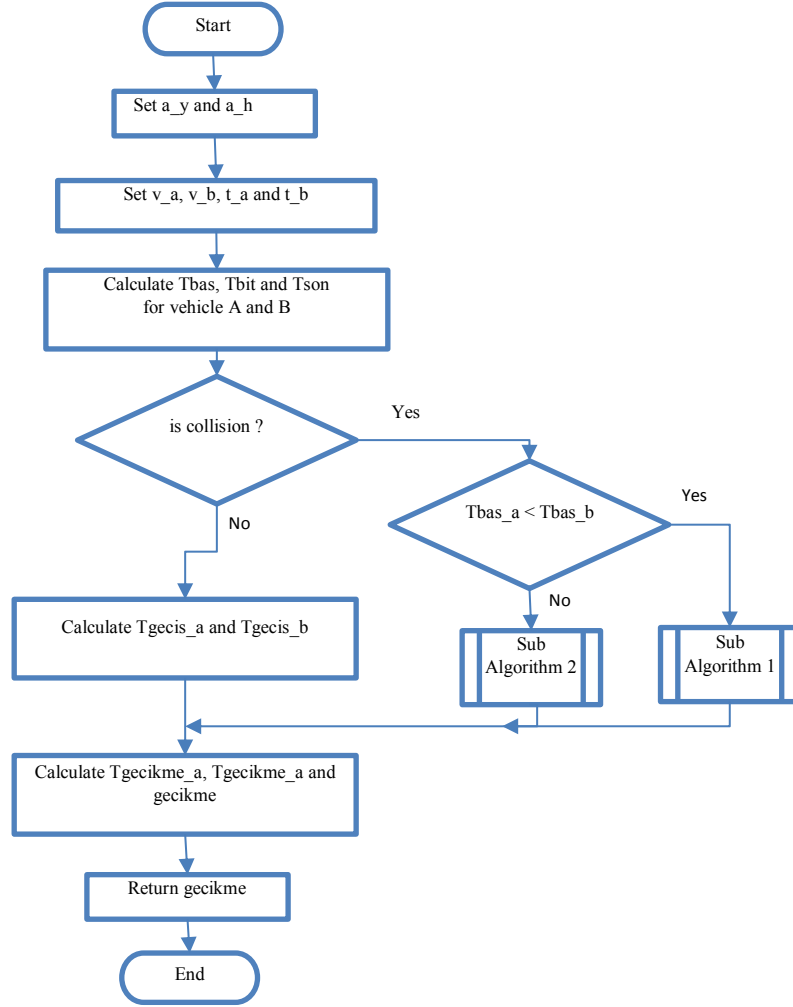
// Çarpışma olayın olduğu durumda
if çarpışma olursa:
    if Tbas_a < Tbas_b:
        Alt algoritma 1
    Else:
        Alt algoritma 1
Else:
    Tgecis_a  $\leftarrow$  t_a + (AKM+L_a+2*(W)+Guvenli_Durma)/v_a
    Tgecis_b  $\leftarrow$  t_b + (AKM+L_b+2*(W)+Guvenli_Durma)/v_b
    // Burada Tgecis, ilgili aracın son noktadan geçtiği zaman
// Tgecikme, araçların gecikme süreleri
Tgecikme_a = Tgecis_a - Tson_a;
Tgecikme_b = Tgecis_b - Tson_b;
// toplam gecikme hesaplama
gecikme = Tgecikme_a + Tgecikme_b;

return gecikme

```

Kod 7-1’de açıklanan işlev, rastgele bir örnek çalıştırma için kullanılabilir. Önerilen yöntemi simüle etmek ve etkinliğini belirlemek için istenilen fonksiyon istenildiği kadar

çağrılabilir ve gecikme değerleri incelenebilir. Önerilen algoritmanın daha iyi görülebilmesi için Kod 7-1'de verilen sözde kod, Şekil 7-4'e göre bir akış şeması şeklinde gösterilebilir.



Şekil 7-4: Step fonksiyonu için akış diyagram

“Step” fonksiyonunda ve buna karşılık gelen Şekil 7-4’deki akış şemasında görüldüğü gibi, arabaların son noktayı geçme sürelerini hesaplamak için alt programlar çağrılmıştır. Fonksiyona göre, A aracı B aracından daha önce kavşağı geçecekse, “alt algoritma 1” adı program çalışmalıdır. Bu durumda A aracı kavşaktan normal olarak geçecek ve B aracı A aracı kritik noktayı geçene kadar durmalıdır. Bunun için B aracının fren yaptığı an hesaplanmalıdır. Frenlemeden sonra B aracının durması için geçen süre de dikkate alınmalıdır. Ayrıca kaza olasılığının ortadan kalktığı zaman da belirtilmelidir. B aracının tam durma süresi, kaza olasılığının ortadan kalktığı zamandan daha az ise, B aracı bir süre beklemeli ve sonra hareket etmelidir. Ancak tam durma zamanı, kaza olasılığını ortadan kaldırmak için gereken zamandan daha geç ise, tam durur durmaz B aracı hareket etmeye başlamalıdır.

“Alt algoritma 1” tüm bu hesaplamaları yapar ve aynı zamanda son noktayı geçmek için gereken zamanı da elde eder. Bu süre, son gecikmeyi hesaplamak için *Step* fonksiyonunun devamında kullanılır. “Alt algoritma 1” için sözde kod, Kod 7-2’de verilmiştir.

**Kod 7-2:** Step fonksiyonunda kullanılan Alt algoritma 1

Alt algoritma 1:

```
// Tgecis, ilgili aracın son noktadan geçtiği zaman
Tgecis_a ← Tson_a

// B aracın durma zamanını hesaplama (Tdurma_b)
dt ←  $\frac{v_b}{a_y}$ 
dx ←  $\frac{v_b^2}{2*a_y}$ 
F_bas_b ← AKM - dx
F_bas_t_b ←  $\frac{F_{bas_b}}{v_b}$ 
Tdurma_b ← F_bas_t_b + dt

// B aracın beklemeden sonra tekrar hareket etme zamanı (Tbekleme_bas_b)
Tbekleme_bas_b = Tbit_a -  $\sqrt{\frac{W}{a_h}}$ 

if Tdurma_b > Tbekleme_bas_b:
    Tbekleme_bas_b ← Tdurma_b

İf  $\frac{v_b^2}{2*a_h} > 2W$ :
    T_b_2 ←  $\sqrt{\frac{2W}{a_h}}$ 
    Tgecis_b ← Tbekleme_bas_b + T_b_2;
Else:
    dx2 ←  $\frac{v_b^2}{2*a_h}$ 
    T_b_2_1 ←  $\frac{v_b}{a_h}$ 
    T_b_2_2 ←  $\frac{2W-dx2}{v_b}$ 
    Tgecis_b ← Tbekleme_bas_b + T_b_2_1 + T_b_2_2
```



Öte yandan, B aracı A aracından daha önce kavşağı geçecekse, *alt algoritma 2* adı program çalışmalıdır. Bu durumda B aracı kavşaktan normal olarak geçecek ve A aracı B aracı kritik noktayı geçene kadar durmalıdır. Bunun için A aracının fren yaptığı an hesaplanmalıdır. Frenlemeden sonra A aracının durması için geçen süre de dikkate alınmalıdır. Ayrıca kaza olasılığının ortadan kalktığı zaman da belirtilmelidir. A aracının tam durma süresi, kaza olasılığının ortadan kalktığı zamandan daha az ise, B aracı bir süre beklemeli ve sonra hareket etmelidir. Ancak tam durma zamanı, kaza olasılığını ortadan kaldırmak için gereken zamandan daha geç ise, tam durur durmaz A aracı hareket etmeye başlamalıdır.

“Alt algoritma 2” tüm bu hesaplamaları yapar ve aynı zamanda son noktayı geçmek için gereken zamanı da elde eder. Bu süre, son gecikmeyi hesaplamak için “Step” fonksiyonunun devamında kullanılır. Alt algoritma 2 için sözde kod Kod 7-3’te verilmiştir.

**Kod 7-3:** Step fonksiyonunda kullanılan Alt algoritma 2

Alt algoritma 2:

```
// Tgecis, ilgili aracın son noktadan geçtiği zaman
Tgecis_b=Tson_b;
// A aracın durma zamanını hesaplama (Tdurma_b)

$$dt \leftarrow \frac{v_a}{a_y}$$


$$dx \leftarrow \frac{v_a^2}{2*a_y}$$

F_bas_a  $\leftarrow$  AKM - dx;

$$F\_bas\_t\_a \leftarrow \frac{F\_bas\_a}{v_a}$$

Tdurma_a  $\leftarrow$  F_bas_t_a + dt;

// A aracın beklemeden sonra tekrar hareket etme zamanı (Tbekleme_bas_a)
Tbekleme_bas_a  $\leftarrow$  Tbit_b +Guvenli_Durma;

if (Tdurma_a>Tbekleme_bas_a):
    Tbekleme_bas_a  $\leftarrow$  Tdurma_a

if  $\frac{v_a^2}{2*a_h} > 2w$  :
```

$$T_{a\_2} \leftarrow \sqrt{\frac{2W}{a_h}}$$

$$T_{gecis\_a} \leftarrow T_{bekleme\_bas\_a} + T_{a\_2}$$

Else:

$$dx2 \leftarrow \frac{v_a^2}{2*a_h}$$

$$T_{a\_2\_1} \leftarrow \frac{v_a}{a_h}$$

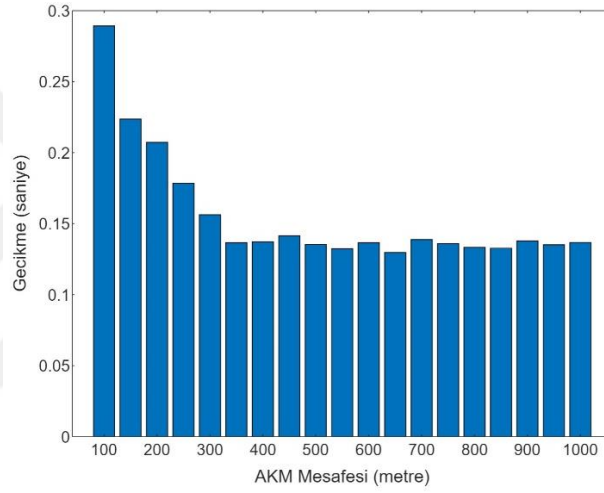
$$T_{a\_2\_2} \leftarrow \frac{2W-dx2}{v_a}$$

$$T_{gecis\_a} \leftarrow T_{bekleme\_bas\_a} + T_{a\_2\_1} + T_{a\_2\_2}$$



## 8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Önerilen algoritmanın test edilmesi için teklif edilen “Step” algoritması, MATLAB programıyla simüle edilmiş ve oyun şartlarındaki değişmelerin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Giriş verilerinde A ve B araçlarının uzunlukları 3 metre olarak varsayılmıştır. Bu araçların, 0 ile 16 m/s arasında rasgele seçilmiş hızlarla rastgele zamanda kavşağa yaklaşacağı düşünülmektedir. Prosedür, 30.000 kez tekrarlanmış ve rastgele durumlar için ortalama gecikme süreleri kaydedilmiştir. Öncelikle, Araç Kontrol Merkezi’nin etki mesafesinin, gecikmeler üzerindeki etkisi çözülmüştür. AKM etki mesafesi ile gecikme süreleri arasındaki ilişkinin grafiği Şekil 8-1’de yansıtılmıştır.

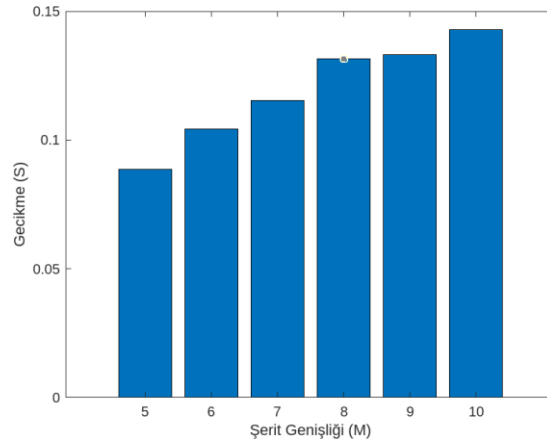


Şekil 8-1: AKM etki mesafesi ile gecikme süreleri arasındaki ilişki

Şekil 8-1’den görüldüğü gibi AKM’nin araçlar üzerindeki etki mesafesi 100 ile 1000 metre arasında değerler aldığı varsayılmıştır. Başlangıç etki mesafesinden itibaren 400 metreye kadar yükselmiş değerlerde gecikmelerin azalması görülmektedir. 400 ile 1000 metre arasındaki etki mesafesinde gecikme süreleri sabittir. Bu sonuçlara dayanarak Araç Kontrol Merkezi’nin araçlar üzerindeki etki mesafesinin optimum değeri 400 metre olarak kabul edilmiştir.

İkinci yaklaşımla şerit genişliği ve gecikme değerlerinin ilişkisine bakılmıştır. Bu amaçla, optimum etki mesafesi kullanılarak şerit genişliğinin farklı değerler alarak değiştiği durum incelenmiştir.

Şerit genişliği ve gecikme süreleri arasındaki ilişkinin grafiği Şekil 8-2’de gösterilmiştir.



**Şekil 8-2:** Şerit genişliği ve gecikme süreleri arasındaki ilişki

Şekil 8-2’de oyun alanında kullanılmış şerit genişliğinin 5 ile 10 metre arasında değiştiği ve şerit genişliği ile gecikme süresinin doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Oyun ortamına ait olan değerlerin değiştirilerek sonuçların incelemeleri, AKM için optimum etki mesafesinin 400 metre, oyun alanının şerit genişliğininse 5 metre olduğu varsayımıyla sonuçlanmıştır.

## 9. ÖNERİLER

Kavşaktan güvenli, hızlı ve konforlu geçişleri Oyun teorisine dayalı bir şekilde sağlamak için literatür taramasında ve örnek problem çözümünde görüldüğü gibi kavşak kollarından sadece bir aracın yaklaştığı varsayılmıştır. Bu araçlar birbirleriyle veya kontrol merkezi ile haberleşme çerçevesinde kararlar veya kumandalar alıyor. Ancak, kavşak kollarından birden fazla aracın geldiğini modelleyen çalışmalara gerek vardır. Bu zaman kavşağa yaklaşan araç, sadece diğer kavşak kolundan gelen araçları değil, hem de önünde ilerleyen araçla güvenli mesafe, gerektiğinde onun önüne geçme ve hızını öndeki araca uygun ayarlama kararlarını göze almalıdır. Bu zaman çalışma, merkezi yönetime bağlıysa (V2X) araç kontrol merkezinin etki alanı içerisinde değişken kararlarla çalışacaktır. Bu hususta, avantaj ve dezavantajlar kıyaslanarak, merkezi olmayan yöntemle, yani, araçların birbirleriyle haberleşerek (V2V) karar vermesi yöntemine de bakılabilir. Birkaç kavşağın birleştiği veya döner kavşakların işe katıldığı yüzeyde yapılan algoritmalar, bu konuda daha karmaşık problemlerin çözümüne yol açabilir.

Ayrıca, daha gerçekçi yaklaşımlar için araçların, yayaların geçişini gözlemleyen, yaya geçitlerine ait sensörlerden gelen bilgileri alabilen şekilde simüle edilmesi, otonom bir sürüşün güvenliğine fayda sağlayabilir. Araçların güvenli ve konforlu frenleme ve hızlanma şartlarını asfaltın kuruluk ve yaşlık derecesine göre ayarlamak amacıyla hava durumu sensöründen alınan verilerin işlenmesi ve kararlarda ön planda tutulması önemli yaklaşımlardan biri olabilir. Bunun üzerine, araçların kavşaklarda meydana çıkabilecek beklenmedik engellerden önceden haber almasını sağlamak için Araç Kontrol Merkezinde bazı çevre algılama sensörlerinin varlığına bakılabilir.

## 10. KAYNAKLAR

- [1] Dresner, K., & Stone, P. (2005, July). Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism. In Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (471–477).
- [2] Colombo, A., & Del Vecchio, D. (2012, April). Efficient algorithms for collision avoidance at intersections. In Proceedings of the 15th ACM international conference on Hybrid Systems: Computation and Control (145–154).
- [3] Bruni, L., Colombo, A., & Del Vecchio, D. (2013, December). Robust multi-agent collision avoidance through scheduling. In 52nd IEEE conference on decision and control (3944–3950).
- [4] Ahn, H., Colombo, A., & Del Vecchio, D. (2014, June). Supervisory control for intersection collision avoidance in the presence of uncontrolled vehicles. In 2014 American Control Conference (867–873).
- [5] Lu, G., Li, L., Wang, Y., Zhang, R., Bao, Z., & Chen, H. (2014, October). A rule based control algorithm of connected vehicles in uncontrolled intersection. In 17th international IEEE conference on intelligent transportation systems (itsc) (115–120).
- [6] Makarem, L., & Gillet, D. (2012, October). Fluent coordination of autonomous vehicles at intersections. In 2012 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC) (2557–2562).
- [7] VanMiddlesworth, M., Dresner, K., & Stone, P. (2008, May). Replacing the stop sign: Unmanaged intersection control for autonomous vehicles. In Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 3 (1413–1416).
- [8] Hassan, A. A., & Rakha, H. A. (2014). A fully-distributed heuristic algorithm for control of autonomous vehicle movements at isolated intersections. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 3(4), 297–309.
- [9] Zohdy, I. H., Kamalanathsharma, R. K., & Rakha, H. (2012, September). Intersection management for autonomous vehicles using iCACC. In 2012 15th international IEEE conference on intelligent transportation systems (1109–1114).
- [10] Bagloee, S. A., Tavana, M., Asadi, M., & Oliver, T. (2016). Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of modern transportation*, 24(4), 284–303.

- [11] Marsden, G., Docherty, I., & Dowling, R. (2020). Parking futures: Curbside management in the era of ‘new mobility’ services in British and Australian cities. *Land Use Policy*, 91, 104012.
- [12] Boesch, P. M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2016). Autonomous vehicle fleet sizes required to serve different levels of demand. *Transportation Research Record*, 2542(1), 111–119.
- [13] Van Arem, B., Van Driel, C. J., & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 7(4), 429–436.
- [14] Wadud, Z., MacKenzie, D., & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1–18.
- [15] Pendleton, S. D., Andersen, H., Du, X., Shen, X., Meghjani, M., Eng, Y. H., & Ang, M. H. (2017). Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles. *Machines*, 5–6.
- [16] Trommer, S., Kolarova, V., Fraedrich, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T., ... & Phleps, P. (2016). Autonomous driving-the impact of vehicle automation on mobility behaviour.
- [17] Rubin, J. (2016). Connected autonomous vehicles: Travel behavior and energy use. In *Road Vehicle Automation 3* (pp. 151–162). Springer, Cham.
- [18] Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143–163.
- [19] Gu, T., Snider, J., Dolan, J. M., & Lee, J. W. (2013, June). Focused trajectory planning for autonomous on-road driving. In *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 547–552).
- [20] Montemerlo, M., Becker, J., Bhat, S., Dahlkamp, H., Dolgov, D., Ettinger, S., ... & Thrun, S. (2008). Junior: The stanford entry in the urban challenge. *Journal of field Robotics*, 25(9), 569–597.
- [21] Li, Q., Zeng, Z., Yang, B., & Zhang, T. (2009, August). Hierarchical route planning based on taxi GPS-trajectories. In *2009 17th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1–5).

- [22] Ziegler, J., & Stiller, C. (2009, October). Spatiotemporal state lattices for fast trajectory planning in dynamic on-road driving scenarios. In 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 1879–1884).
- [23] Zhu, Q., & Li, Y. (2008). Hierarchical lane- oriented 3D road- network model. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(5), 479–505.
- [24] Jiang, K., Yang, D., Liu, C., Zhang, T., & Xiao, Z. (2019). A flexible multi-layer map model designed for lane-level route planning in autonomous vehicles. *Engineering*, 5(2), 305-318.
- [25] Zeng, W., & Church, R. L. (2009). Finding shortest paths on real road networks: the case for A. *International journal of geographical information science*, 23(4), 531–543.
- [26] Sentinel, M. (1926). Phantom Auto'will tour city. *The Milwaukee Sentinel*, 4.
- [27] Weber, M. (2014). Where to? a history of autonomous vehicles. *Computer History Museum*, 8.
- [28] <https://waymo.com/waymo-driver/> (Erişim tarihi: 15.07.2022)
- [29] Grush, B., Niles, J., & Baum, E. (2016). Driverless Cars Ahead: Ontario Must Prepare for Vehicle Automation. Residential and Civil Construction Alliance of Ontario (RCCAO).
- [30] Trommer, S., Kolarova, V., Fraedrich, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T., ... & Phleps, P. (2016). Autonomous driving-the impact of vehicle automation on mobility behaviour.
- [31] <http://publicaffairsresources.aaa.biz/wp-content/uploads/2015/04/Your-Driving-Costs-2015> (Erişim tarihi: 15.07.2022)
- [32] <https://www.ipsos.com/en-us/knowledge/customer-experience/Shifting-Autonomous-From-Scary-to-Safe-for-Drivers> (Erişim tarihi: 16.07.2022)
- [33] Ackerman, E. (2017). Toyota's gill pratt on self-driving cars and the reality of full autonomy. *IEEE Spectrum*, 23.
- [34] Papa, E., & Ferreira, A. (2018). Sustainable accessibility and the implementation of automated vehicles: Identifying critical decisions. *Urban Science*, 2(1), 5.
- [35] <https://www.audi.com/en/innovation/concept-cars/audi-aicon.html> (Erişim tarihi: 17.07.2022)
- [36] <https://www.technologyreview.com/s/520431/driverless-cars-are-further-away-than-you-think/> (Erişim tarihi: 17.07.2022)
- [37] Rosen, H. E., Bari, I., Paichadze, N., Peden, M., Khayesi, M., Monclús, J., & Hyder, A. A. (2022). Global road safety 2010–18: An analysis of Global Status Reports. *Injury*.



- [38] Blincoe, L., Miller, T. R., Zaloshnja, E., & Lawrence, B. A. (2015). The economic and societal impact of motor vehicle crashes, 2010 (Revised) (No. DOT HS 812 013).
- [39] <https://www.gov.uk/government/statistics/reported-road-casualties-in-great-britain-annual-report-2018> (Erişim tarihi: 17.07.2022)
- [40] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2021-45658> (Erişim tarihi: 17.07.2022)
- [41] <https://one.nhtsa.gov/people/injury/research/udashortrpt/background.html> (Erişim tarihi: 17.07.2022)
- [42] Anderson, J., Kalra, N., Stanley, K., Sorenson, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. (2014). Autonomous Vehicle Technology. A Guide for Policymakers. RAND Corporation. Arlington, Virginia, USA, 185.
- [43] Litman, T. (2017). Autonomous vehicle implementation predictions (p. 28). Victoria, BC, Canada: Victoria Transport Policy Institute.
- [44] Davidson, P., & Spinoulas, A. (2015, July). Autonomous vehicles: what could this mean for the future of transport. In Australian Institute of Traffic Planning and Management (AITPM) National Conference, Brisbane, Queensland.
- [45] Fajardo, D., Au, T. C., Waller, S. T., Stone, P., & Yang, D. (2011). Automated intersection control: Performance of future innovation versus current traffic signal control. Transportation Research Record, 2259(1), 223–232.
- [46] Kumar, A., Patil, R. S., Dikshit, A. K., Islam, S., & Kumar, R. (2016). Evaluation of control strategies for industrial air pollution sources using American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model with simulated meteorology by Weather Research and Forecasting Model. Journal of Cleaner Production, 116, 110-117.
- [47] Wijnen, W., Wesemann, P., & De Blaeij, A. (2009). Valuation of road safety effects in cost–benefit analysis. Evaluation and Program Planning, 32(4), 326–331.
- [48] Carey, M., & Srinivasan, A. (1993). Externalities, average and marginal costs, and tolls on congested networks with time-varying flows. Operations research, 41(1), 217–231.
- [49] <https://delhitrafficpolice.nic.in/about-us/statistics/> (Erişim tarihi: 17.07.2022)
- [50] Kokaz, K., & Rogers, P. (2002). Urban transportation planning for air quality management: Case study in Delhi, India, of role of social and economic costs in welfare maximization of mobility choice. Transportation research record, 1817(1), 42–49.

- [51] Sudmant, P. H., Rausch, T., Gardner, E. J., Handsaker, R. E., Abyzov, A., Huddleston, J., Korbel, J. O. (2015). An integrated map of structural variation in 2,504 human genomes. *Nature*, 526(7571), 75–81.
- [52] Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143–163.
- [53] Hietanen, S. (2014). Mobility as a Service. the new transport model, 12(2), 2–4.
- [54] Guerrieri, M. (2018). Tramways in urban areas: an overview on safety at road intersections. *Urban Rail Transit*, 4(4), 223–233.
- [55] Tang, B., Khokhar, S., & Gupta, R. (2015, June). Turn prediction at generalized intersections. In *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1399–1404.
- [56] Sarı, F. A. (2021). Kavşaklarda trafik simülasyon tekniklerinin kullanılması ve simülasyon programlarının karşılaştırmalı analizi (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- [57] Cenk, O. Z. A. N., Başkan, Ö., & Metin, M. (2020). Denetimsiz eş düzey kavşakların performans analizi: Aydın örneği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 637-648.
- [58] Ekanayake, E. M. C. B., & Mampearachchi, W. K. (2016). Review of Roundabout Design Standards and the Development of a Roundabout Design Guideline for Sri Lanka. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 49(4).
- [59] Zhong, D., Sun, P., & Boukerche, A. (2020, November). Empirical study and analysis of the impact of traffic flow control at road intersections on vehicle energy consumption. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Mobility Management and Wireless Access* 21–28.
- [60] Younis, O., & Moayeri, N. (2017). Employing cyber-physical systems: Dynamic traffic light control at road intersections. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 2286–2296.
- [61] Taliwal, V., Jiang, D., Mangold, H., Chen, C., & Sengupta, R. (2004, October). Empirical determination of channel characteristics for DSRC vehicle-to-vehicle communication. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks* (s. 88-88).
- [62] Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., & Bianchi, G. (2018). A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 197-216.
- [63] <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/189347/intel-wifi-6-ax200-gig/specifications.html> (Erişim tarihi: 18.07.2022).

- [64] <https://www.kingston.com/en/memory/gaming/kingston-fury-beast-ddr4-memory> (Erişim tarihi: 18.07.2022).
- [65] <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/96149/intel-core-i512600-processor-18m-cache-up-to-4-80-ghz/specifications.html> (Erişim tarihi: 18.07.2022).
- [66] Lopez, A. V., Chervyakov, A., Chance, G., Verma, S., & Tang, Y. (2019). Opportunities and Challenges of mmWave NR. *IEEE Wireless Communications*, 26(2), 4–6.
- [67] Coll-Perales, B., Gozalvez, J., & Gruteser, M. (2019). Sub-6GHz assisted MAC for millimeter wave vehicular communications. *IEEE Communications Magazine*, 57(3), 125–131.
- [68] Hotz, H. (2006). A short introduction to game theory. Retrieved on, 21, 2017.
- [69] Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of games and economic behavior*, 2nd rev.
- [70] Nash, J. F., Shapley, L. S., & Bohnenblust, H. F. (1950). A simple three-person poker game (Vol. 24). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- [71] Battigalli, P., & Bonanno, G. (1999). Recent results on belief, knowledge and the epistemic foundations of game theory. *Research in Economics*, 53(2), 149-225.
- [72] Smith, J. M. (1982). *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge university press.
- [73] Bonanno, G. (2015). *Parts I and II with 88 solved exercises*.
- [74] Camerer, C. F. (2003). Behavioural studies of strategic thinking in games. *Trends in cognitive sciences*, 7(5), 225-231.
- [75] Aumann, R. J. (1985). What is game theory trying to accomplish?. In *Frontiers of Economics*, edited by K. Arrow and S. Honkapohja.
- [76] Branzei, R., Dimitrov, D., & Tijs, S. (2008). *Models in cooperative game theory* (Vol. 556). Springer Science & Business Media.
- [77] Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. MIT press.
- [78] Owen, D. (1995). *Nietzsche, politics and modernity a critique of liberal reason*.
- [79] De Fontenay, C. C., & Gans, J. S. (2005). Vertical integration in the presence of upstream competition. *RAND Journal of Economics*, 544–572.
- [80] Norton, M. I., & Sommers, S. R. (2011). Whites see racism as a zero-sum game that they are now losing. *Perspectives on Psychological science*, 6(3), 215–218.
- [81] Ponnaluri, R. V. (2012). Road traffic crashes and risk groups in India: Analysis, interpretations, and prevention strategies. *IATSS research*, 35(2), 104–110.

- [82] Beckwith, D. M., & Hunter-Zaworski, K. M. (1998). Passive pedestrian detection at unsignalized crossings. *Transportation research record*, 1636(1), 96–103..
- [83] Greibe, P. (2007). Braking distance, friction and behaviour. Trafitec, Scion-DTU.
- [84] Da Lio, M., Biral, F., Bertolazzi, E., Galvani, M., Bosetti, P., Windridge, D., ... & Tango, F. (2014). Artificial co-drivers as a universal enabling technology for future intelligent vehicles and transportation systems. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 16(1), 244–263.

