

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİRBİRLERİYLE İLETİŞİMLİ ÇEVRESEL
ORTAMLARDAKİ TRAFİK AKIM
KARAKTERİSTİKLERİNİN MODELLENMESİ**



Ecem ŞENTÜRK BERKTAŞ

Ekim, 2018
İZMİR

BİRBİRLERİYLE İLETİŞİMLİ ÇEVRESEL ORTAMLARDAKİ TRAFİK AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN MODELLENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

Ecem ŞENTÜRK BERKTAŞ

Ekim, 2018

İZMİR

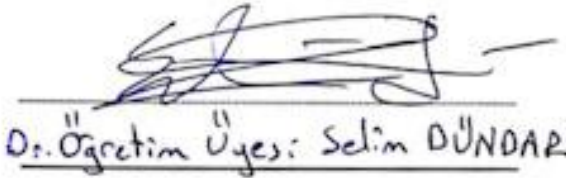
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ECEM ŞENTÜRK BERKTAŞ, tarafından PROF.DR. SERHAN TANYEL yönetiminde hazırlanan “BİRBİRLERİYLE İLETİŞİMLİ ÇEVRESEL ORTAMLARDAKİ TRAFİK AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN MODELLENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

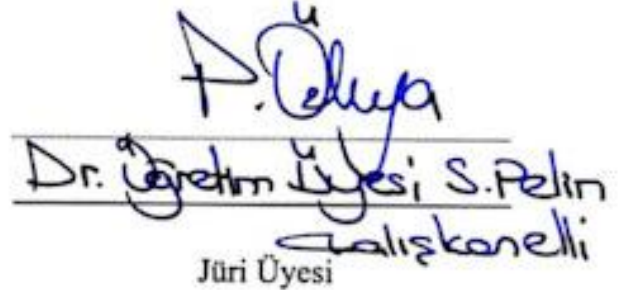


Prof.Dr. Serhan TANYEL

Yönetici



Jüri Üyesi



Jüri Üyesi



Prof.Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle lisans ve yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca benden desteğini ve emeğini hiç esirgemeyen, sonsuz yardım ve sabır gösteren değerli hocam ve tez danışmanım Sn. Prof.Dr. Serhan TANYEL' e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca her yardıma ihtiyaç duyduğumda benden zamanlarını ve desteklerini esirgemeyen Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı öğretim üyelerine yardımları için çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında TÜBİTAK tarafından desteklenen 110M677 nolu proje verilerinden yararlanılmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma kapsamında geliştirilen benzetim programı yazılırken destek olan, TÜBİTAK Marmara Teknokent içerisinde çalışmalarını yürüten Rut Yazılım çalışanlarına teşekkür ederim.

Her zaman yanımda oldukları ve güzel dostlukları için minnettar olduğum Nazlı Seda BİRCAN, Onur ALTAY ve Burcu YİĞİT' e ve en önemlisi benden kayıtsız şartsız sevgilerini hiç esirgemeyen desteklerini hep yanımda hissettiğim tüm aileme teşekkür ederim.

İhtiyacım olan destekten hep daha fazlasını bana sunan, yüzümü hep güldürdüğü ve verdiği büyük sevgi için sevgili eşim Erdost Onur BERKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ecem ŞENTÜRK BERKTAŞ

BİRBİRLERİYLE İLETİŞİMLİ ÇEVRESEL ORTAMLARDAKİ TRAFİK AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN MODELLENMESİ

ÖZ

Bilim ve teknolojiadaki büyük gelişmeler sayesinde, trafik kazalarına yol açan en büyük unsur olan sürücü davranış hatalarını azaltmak amacıyla otomobil iş kolunda sürüş destek sistemleri ve araç yardımcıları gibi uygulamaların kullanımı artmaktadır. Çok yakın bir gelecekte de sürücüsüz araçların insan sürücülerle birlikte trafikte kendilerine yer edinmeleri ile birlikte yakıt, enerji ve zaman tasarrufu, daha hızlı, güvenilir ve konforlu sürüş gibi kazanımların elde edilmesi beklenmektedir.

Bu tez kapsamında önümüzdeki on yıl içerisinde tüm dünyada önemli bir paya sahip olması beklenen sürücüsüz araçların, ülkemizde insan sürücülerle beraber trafiğe katılmaları durumunda karma trafik koşulları altında, birbirleriyle (V2V: vehicle to vehicle) ve altyapıyla (V2I: vehicle to infrastructure) iletişimli olup olmama durumlarına göre, ışıklı kavşak başarımına nasıl etki edebilecekleri üzerine incelemeler yapılmıştır.

İnsan sürücülerinin davranışsal özellikleri (tepki süresi, hızlanma ve yavaşlama, vb.) saha çalışmalarından toplanan verilerden elde edilirken, sürücüsüz araçların özellikleri literatürdeki varsayımlar temelinde belirlenmiştir. Tüm bu verilerin birlikte kullanılmasıyla, farklı sürücü çeşitlerinin davranışları ve aynı koşullar altındaki sürücüsüz araçların hareketleri SIDRA TRIP programı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Programın çıktıları kullanılarak üretilen farklı durumlar yardımıyla sürücüsüz araçlar için bir eşdeğer otomobil birimi elde edilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışması kapsamında sürücüsüz araçların katılabilecekleri karma trafik koşullarının tanımlanabildiği bir benzetim programı yazılmıştır. Program sayesinde sürücüsüz araçların birbirleriyle ve çevreleriyle iletişimde olup olmama durumlarına göre ışıklı kavşak başarımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar gecikme değerleri açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Işıklı kavşaklar, sürücüsüz araçlar, eşdeğer otomobil birimi, gecikme, benzetim programı algoritması



MODELING TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS IN CONNECTED ENVIRONMENTS

ABSTRACT

In the foreseeable future, it is expected that autonomous vehicles will take their place in the traffic together with the human drivers and provide some advantages such as saving fuel, energy and time, and faster, reliable and comfortable driving.

In the course of this thesis, under mixed traffic conditions, according to their communication with each other (V2V: vehicle to vehicle) and with infrastructure (V2I: vehicle to infrastructure), the signalized intersection performance of autonomous vehicles is examined, without the assumption of if autonomous vehicles, which are expected to have a significant share in the world over the next 10 years, participate in traffic together with human drivers in our country.

While the behavioral characteristics of human drivers (reaction time, acceleration etc.) are derived from data collected from field studies, the characteristics of autonomous vehicles are based on the assumptions in the literature. By using all these data together, the behavior of the different driver profiles and the movements of the autonomous vehicles under the same conditions were compared using the SIDRA TRIP program. With the help of different scenarios produced using the outputs of the program, an passenger car equivalence for autonomous vehicles was tried to be obtained.

Within the scope of this thesis, a simulation software, in which the mixed traffic conditions -including autonomous vehicles- defined, was written. Thanks to the software, signalized intersection performance of autonomous vehicles is examined according to their communication with each other and infrastructure and the results are evaluated in terms of delay values.

Keywords: Signalized intersections, autonomous vehicles, passenger car equivalence, delay, simulation algorithm



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür İncelemesi	2
1.2 Tezin Amacı.....	4
BÖLÜM İKİ – KAVŞAK SİSTEMLERİ	6
2.1 Kavşak Türleri.....	6
2.1.1 Eşdüzey Kavşaklar	6
2.1.1.1 Denetimli Eşdüzey Kavşakların Kontrol Yöntemleri	9
2.1.1.1.1 Sinyalizasyon Sistemleri	10
BÖLÜM ÜÇ – IŞIKLI KAVŞAKLARDA SÜRÜCÜ DAVRANIŞLARI.....	14
3.1 Başlangıç Tepki Süresi ve Başlangıç Kayıp Zaman	14
3.2 Boşaltım Aralığı.....	20
3.3 Araç Takip Modelleri.....	22
3.4 Gecikmeler.....	25
BÖLÜM DÖRT – SÜRÜCÜ DAVRANIŞLARININ IŞIKLI KAVŞAK KAPASİTESİ VE BAŞARIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İRDELENMESİ	29
4.1 Gönüllü Sürücülerin Belirlenmesi	29
4.2 JANUS Araç İçi Kameranın Özellikleri	31
4.3 SIDRA Trip Programından Verilerin Elde Edilmesi ve Değerlendirilmesi ..	34
4.4 Sürücüsüz Taşıtların Hızlanma ve Yavaşlama Nitelikleri	42

4.5 Senaryolar	44
4.6 Sürücüsüz Taşıtların Işıklı Kavşak Kapasite ve Başarımı Üzerindeki Etkisi Üzerine Bir Tartışma	48
4.6.1 Kavşakların SIDRA Intersection Programında Modellenmesi	48
4.6.2 Sürücüsüz Taşıtların Işıksız Kavşak Üzerindeki Etkisi.....	52

BÖLÜM BEŞ – SÜRÜCÜSÜZ ARAÇLARIN KARMA TRAFİK KOŞULLARINDA IŞIKLI KAVŞAK BAŞARIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 56

5.1 Algoritma	56
5.2 Benzetim Programı Çözümlemeleri	68
5.2.1 Hiç İletişim Yok	69
5.2.2 Taşıtlar Arasında ve Çevre/Altyapı İle İletişim Var (V2V+V2I).....	73

BÖLÜM ALTI – SONUÇ VE ÖNERİLER..... 76

KAYNAKLAR 79

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Eşdüzey kavşak tipleri	8
Şekil 2.2 Dönel kavşak	8
Şekil 3.1 Kuyruk numarasına bağlı olarak takip aralığı değerlerinin değişimi	16
Şekil 3.2 Kuyruk boşalımına ait değişkenlerin grafik üzerinde gösterimi.....	18
Şekil 3.3 Minh ve Sano tarafından önerilen model.....	20
Şekil 3.4 Jin ve diğ. (2009) tarafından elde edilmiş olan olasılık yoğunluk eğrileri .	21
Şekil 3.5 Gecikme tanımlamalarının yol-zaman grafiğinde gösterimi	26
Şekil 4.1 JANUS V2 kameranin genel görünümü	31
Şekil 4.2 JANUS kameradan elde edilmiş olan bir görüntü	32
Şekil 4.3 JANUS V2 kamerasına ait programın genel görünümü	33
Şekil 4.4 JDF dönüştürücü yazılıma ait görüntü	34
Şekil 4.5 SIDRA Trip veri giriş sayfası	36
Şekil 4.6 SIDRA TRIP'ten elde edilen zamana bağlı mesafe, hız ve ivme grafikleri	36
Şekil 4.7 SIDRA Trip programında tanımlanmış olan sürücü tipleri	38
Şekil 4.8 SIDRA Trip'te sürücüye ait ölçümleme katsayılarının tanımlanması	45
Şekil 4.9 SIDRA Trip'te sürücünün aracına ait niteliklerin tanımlanması	45
Şekil 4.10 Gönüllü sürücüler ve sürücüsüz taşıtlara ait senaryolardan elde edilen hız- yol grafikleri	46
Şekil 4.11 Alsancak rektörlük kavşağına ait SIDRA çizimi	49
Şekil 4.12 Şeritlere ait geometrik özelliklerin modele girişi	49
Şekil 4.13 Şerit başına araç bileşiminin tanımlanması	50
Şekil 4.14 Doygun akım ve şerit kullanım oranlarının modelde tanımlanması.....	51
Şekil 4.15 Bulundukları şeride göre araçlara ait niteliklerinin tanımlanması.....	51
Şekil 4.16 Dört kollu ışıklı kavşak modeli.....	54
Şekil 4.17 Farklı sürücüsüz araç yüzdeleri için güney yaklaşımına ait gecikme değerleri.....	55
Şekil 5.1 Kontrol uzunluğunun şematik gösterimi	60
Şekil 5.2 Benzetim programı akış şeması	66
Şekil 5.3 Örnek yol-zaman grafiği.....	67

Şekil 5.4 İletişim yokken gecikme grafikleri.....	71
Şekil 5.5 V2V+V2I iletişimli ortamda gecikme grafikleri	75



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1 Gönüllü sürücüler hakkında bilgiler	30
Tablo 4.2 JANUS V2 kameranın özellikleri	32
Tablo 4.3 Aktarılan verilerin görüldüğü örnek excel dosyası	35
Tablo 4.4 Yavaşlama ivmesi değerleri	37
Tablo 4.5 Hızlanma ivmesi değerleri	37
Tablo 4.6 SIDRA Trip'te önerilmiş olan sürücü ölçümleme katsayıları	38
Tablo 4.7 p_1 , p_2 , p_3 bağıntı katsayıları	39
Tablo 4.8 Gönüllü sürücülere ait ölçülendirme parametreleri	41
Tablo 4.9 Li ve diğ. tarafından kabul edilen araç ve kavşak ölçütleri	43
Tablo 4.10 Hızlanma sürelerine göre EOB değerleri.....	52
Tablo 4.11 Yavaşlama sürelerine göre EOB değerleri	53
Tablo 4.12 Örnek kavşağa ait trafik hacimleri	54
Tablo 5.1 Sürücülerin hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ve hızlanma ve yavaşlama ölçümleme katsayıları	58
Tablo 5.2 Zaman aralığının program çıktısında görünümü	58
Tablo 5.3 Işık sürelerinin ve renklerinin program çıktısındaki görünümü	59
Tablo 5.4 Tepki süreleri	60
Tablo 5.5 Program çıktısında araçlara ait yol ve hız kolonlarının görünümü	61
Tablo 5.6 Hızlanma/Yavaşlama uzunlukları için p_1 , p_2 , p_3 ve p_7 bağıntı katsayıları	65
Tablo 5.7 Hızlanma/Yavaşlama ivmeleri için p_1 , p_2 ve p_3 bağıntı katsayıları	65
Tablo 5.8 Regresyon analizi sonuç tablosu	69
Tablo 5.9 İletişimsiz ortamda kabul edilen tepki süreleri	69
Tablo 5.10 Hiç iletişim olmayan sistemde araç başına ortalama gecikme değerleri	70
Tablo 5.11 İletişimli ortamda kabul edilen tepki süreleri	73
Tablo 5.12 V2V+V2I iletişimli sistemde araç başına ortalama gecikme değerleri ...	74

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Ulaştırmanın çağlar boyunca insanlık tarihinin gelişmesine gerek ekonomik gerekse kültürel açılardan çok büyük etkileri olmuştur. Ulaştırma sistemleri bir yandan ülkelerin birbirleriyle olan sosyoekonomik ilişkilerinin gelişimine katkı sağlamakta bir yandan da ülkelerin refah düzeylerinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Günümüzde dünyanın bütün ülkelerinde nüfustaki ve otomobil sayılarındaki artışa bağlı olarak; daha hızlı ve yüksek kapasitede ama aynı zamanda da daha güvenli ve konforlu ulaştırma sistemlerine yönelik talep de giderek artmaktadır.

Ulaştırma hizmetlerine olan talep artışının trafik sıkışıklığı, zaman ve enerji kaybı, fazla yakıt tüketimi ve dolayısıyla doğaya zararlı gaz salınımının artması gibi maliyetlerinin yanında bazı ülkelerde kaza oranlarında da büyük artışa sebep olduğu gözlemlenmektedir. Bilim ve teknolojiye büyük gelişmeler sayesinde, trafik kazalarına yol açan en büyük unsur olan sürücü davranış hatalarını azaltmak amacıyla otomobil iş kolunda sürüş destek sistemleri ve araç yardımcıları gibi uygulamaların kullanımı artmaktadır. Ulaştırma sistemlerinin daha etkin ve güvenilir kullanılmasına ilişkin doğan bu ihtiyaç neticesinde, dünyada özellikle gelişmiş ülkelerde sürücüsüz araç teknolojisini geliştirmek amacıyla uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Çok yakın bir gelecekte de sürücüsüz araçların insan sürücülerle birlikte trafikte kendilerine yer edinmeleri beklenmektedir.

Sürücüsüz araç, insan sürücü etkisi ve uzaktan kumanda olmaksızın, aracı bir noktadan diğerine ulaştıran taşıt olarak tanımlanabilir. Sürücüsüz araçların çevreyle ve birbirleriyle olan iletişimleri ve bilgisayar destekli ileri sürüş sistemleri sayesinde trafikteki çoğu tehlikeli durumda insan sürücülere oranla olayı daha hızlı kavrayarak daha hızlı tepki verebilecekleri düşünülmektedir. Bunun yanında sürücüsüz araçların hayatımıza girmesiyle birlikte yakıt, enerji ve zaman tasarrufu, daha hızlı, güvenilir ve konforlu sürüş gibi kazanımların elde edilmesi beklenmektedir.

Birbirleriyle iletişimli çevresel ortam deyişi; iletişim kurabilen teknolojiye sahip araçların hem birbirleri ile hem de çevreleri ile iletişimde olabildikleri durumu anlatmaktadır. İletişimli araç teknolojisi sürücüye veya araca bilgi akışını sağlayarak daha güvenli bir sürüş için yardımcı olmaktadır. Bu teknoloji günümüzde yaygın olarak da kullanılmaktadır. Örneğin; son yıllarda piyasaya sürülen hemen hemen bütün araçlarda bulunan yol bulma sistemleri, oluşturulan yol geçkisi üzerindeki iletişim noktalarından (bir kavşaktaki sinyalizasyon sistemi vb.) bilgileri alıp farklı yol geçkileri önerirken iletişimli araç teknolojisini kullanmaktadır. Benzer şekilde günümüzde üretilip piyasaya sunulan çoğu araçta; kendi kendine park edebilme, çarpışma önleyici, şerit koruma veya hız sabitleme sistemleri gibi kendi kendine sürüş teknolojileri kullanılmaktadır.

1.1 Literatür İncelemesi

Sürücüsüz araçlar, büyük teknoloji şirketlerinin yakın geçmişte yaptıkları atılımlarla son yıllarda hayatımıza girmiş gibi görünseler de sürücüsüz araçlara dair kavramlar ve yapılan ilk çalışmalar 1920'li yıllarda başlamıştır.

Bilinen ilk çalışma 1925 yılında Houdina Radyo Kontrol şirketi tarafından geliştirilmiş olan radyo kontrolü ile çalışan sürücüsüz bir araca aittir. Francis P. Houdina önünde bulunan aracı, üzerine takılan bir anten yardımıyla, kendisinin de içinde bulunduğu takip eden ikinci araçtan yaydığı radyo sinyalleri sayesinde hareket ettirmeyi başarmıştır (Bimbrow, 2015).

1953 yılında Amerikan Radyo Kurumu (RCA)'nın laboratuvarlarında, zemine serili olan teller yardımıyla radyo kontrolünde yönlendirilen bir otomobil inşa edilmiştir. 1958 yılında, trafik mühendisleri Leland Hancock ve L.N. Ress, RCA'nın bu fikrini büyük ölçeğe taşıyarak 121,92 metre uzunluğundaki gerçek karayolu tesisleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu karayolu şeridi boyunca, üzerinden geçen herhangi bir metalik aracın varlığını ve hızını belirleyebilmek amacıyla bir dizi algılayıcı gömülmüştür (Bimbrow, 2015).

RCA ile deneylerinde iş birliği yapan General Motors şirketi 1959-1960 yılları süresince, özel radyo vericilerine sahip, ivmelenme ve frenleme davranışları ile modellenebilen iki modeli geliştirmiştir. (Cranswick, 2013; Temple, 2006)

Makine mühendisi Ralph Teetor tarafından icat edilen Hız Sabitleme Sistemi, ilk olarak 1958 yılında Chrysler Imperial’da kullanılmıştır (Girovsky ve Fekete, 2017).

1960’lı yıllar boyunca Birleşik Krallık’ın Ulaştırma ve Karayolu Araştırma Laboratuvarında sürücüsüz bir araç üzerinde denemeler yapılmıştır. Yol boyunca gömülmüş olan manyetik kablolar ile iletişim halinde hareket eden Citroen DS, herhangi bir hava koşulunda hız veya yön sapması olmaksızın 130 km/saat hızla deneme pistinden geçmiş ve sonuçlara göre insan kontrolündekine göre çok daha etkili bir sürüş gerçekleştirmiştir (Cardew, 1970; Pressnel, 1999).

Birçok tedarikçi firma ve araştırma enstitüsünün iş birliği ile 16 adet otomobil firması tarafından yürütülen ve 8 yıl süren PROMETHEUS projesi 1986 yılında başlamıştır. Amacı daha verimli, güvenli ve çevreye daha az zarar veren bir karayolu sistemi kavramı ve çözümleri üretmek olan projede; araçların birbirleriyle ve çevreyle olan iletişimlerine dair çalışmalara odaklanılmıştır. Proje kapsamında geliştirilen bir araç 1995 yılında Münih’ten Kopenhag’a neredeyse tamamen kendi kendine sürüş koşullarında 3000 km’lik yol kat etmiştir (EUREKA, 2015).

DARPA Büyük Yarışı, askeri amaçla kullanılabilecek sürücüsüz araç teknolojilerinin gelişimini desteklemek amacıyla düzenlenmiştir. Düzenlendiği ilk sene olan 2004 yılında yarışı hiçbir takım tamamlayamasa bile, dünya çapında katılımın olması ve bu alanda yapılan çalışmalara destek verilmesi açısından etkinliğin genel olarak amacına ulaştığı düşünülmektedir (DARPA, 2004). Yarış takip eden yıllarda da teknolojik gelişmelere ayak uydurarak düzenlenmeye devam edilmektedir.

2009 yılında sürücüsüz araç projesini başlatan Google 2016 yılında bu projeyi Waymo ismi ile bir sürücüsüz araç teknolojisi şirketine dönüştürmüştür (WAYMO, 2017).

Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers=SAE) 2014 yılında sürücüsüz araçları kendi kendine sürüş düzeylerine göre gruplandıran bir standart yayınlamıştır. Burada “Düzey 0” aracın hiçbir kendi kendine sürüş özelliği göstermediği, “Düzey 5” ise aracın hiç insan müdahalesi ya da uzaktan kontrol olmadan yolculuk yapabildiği durumu tanımlamaktadır (SAE, 2014). Bu standart sürücüsüz araçlar ile ilgili olarak uygulanan veya uygulanması planlanan yasaları ve politikaları düzenlemede yararlı bir çerçeve oluşturmuştur.

Günümüzde birçok araç SAE’nin standartlarına göre Düzey 1 ve Düzey 2’ye denk gelen otomatik park sistemi, şerit kontrol sistemi, tehlike uyarısı ve hız kontrol sistemi gibi kendi kendine sürüş teknolojilerine sahiptir. 2016 yılında Tesla CEO’su Elon Musk şirketinin bütün araçlarının SAE standartlarına göre 5.düzeye denk gelen tamamen kendi kendine sürüş donanımına sahip olacağını duyurmuştur (Litman, 2018). Waymo SAE’nin 4.düzeyine denk gelen kendi kendine sürüş teknolojilerine sahip olduğunu, Uber ise sürücüsüz taksi hizmeti için denemeler yapmaya başladıklarını açıklamışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Sürücüsüz araç teknolojisi çok hızlı ilerlese bile birbirleriyle iletişimli çevresel ortamların oluşturulabilmesi adına, gerek çevresel, altyapısal yatırımların yapılması gerek de hukuksal ve sosyal bazı gerekliliklerin yerine getirilmesi gibi nedenlerden ötürü tamamen sürücüsüz araçlardan oluşan trafik koşullarının hayatımızda yer edinmesi için uzun zamanlara ihtiyaç olabilir. Bu tez kapsamında önümüzdeki 10 yıl içerisinde tüm dünyada önemli bir paya sahip olması beklenen sürücüsüz araçların, ülkemizde insan sürücülerle beraber trafiğe katılmaları durumunda karma trafik koşulları altında, birbirleriyle (V2V: vehicle to vehicle) ve altyapıyla (V2I: vehicle to infrastructure) iletişimli olup olmama durumlarına göre, ışıklı kavşak başarımına nasıl etki edebilecekleri üzerine bir tartışma yapılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın giriş bölümünü izleyen ikinci bölümünde kavşak sistemleri genel olarak tanıtılmış, ışıklı kavşaklar ve kontrol yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ışıklı kavşaklarda sürücü davranışları ve bu davranışların

modellenmesinde belirleyici olabilecek olan temel kavramlar üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde sürücü davranışlarının ışıklı kavşak kapasitesi üzerine etkilerinin belirlenmesi için yapılan çözümlemelerden bahsedilmiştir. Beşinci bölümde ise çalışma kapsamında yazılmış olan program yardımıyla sürücüsüz araçların karma trafik koşulları altında ışıklı kavşak başarımı üzerine etkileri incelenmiştir. Altıncı ve son bölümde yapılan çözümlemeler değerlendirilmiş ve yeni araştırma önerileri sunulmuştur.



BÖLÜM İKİ

KAVŞAK SİSTEMLERİ

2.1 Kavşak Türleri

Farklı yönlerden gelen trafik akımlarının ortak kullanmak durumunda kaldıkları yol alanlarına kavşak adı verilmektedir. Kavşak noktalarında durma kalkma gecikmelerinin ve kaza riskinin artması gibi durumlar da bu farklı yön akımlarının yolu ortaklaşa kullanmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır (Gedizlioğlu, 1979; Yayla, 2011).

Kavşaklar iki ana grupta toplanabilmektedirler; trafik akımlarının kesişmelerini önlemek amacıyla farklı düzeylerde yapılmışlar ise katlı (köprülü) kavşak, aynı düzeyde yapılmışlar ise de eşdüzey (hemzemin) kavşak adını alırlar. Katlı kavşaklar kaza ve gecikmelere karşı en uygun çözümleri getirir de maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle eşdüzey kavşakların yapımına ağırlık verilmektedir (Yayla, 2011).

2.1.1 Eşdüzey Kavşaklar

Kavşaklar çevre koşullarına uygun olacak şekilde hem güvenlik yönünden hem de kapasite yönünden yüksek standartlarda olmalıdır. Aynı zamanda da ekonomik açıdan uygulanabilir standartlar içinde kalması planlanmalıdır. Belirtilen bu esaslar çerçevesinde kavşak planlanırken baz alınması gereken ölçütler şunlar olmaktadır;

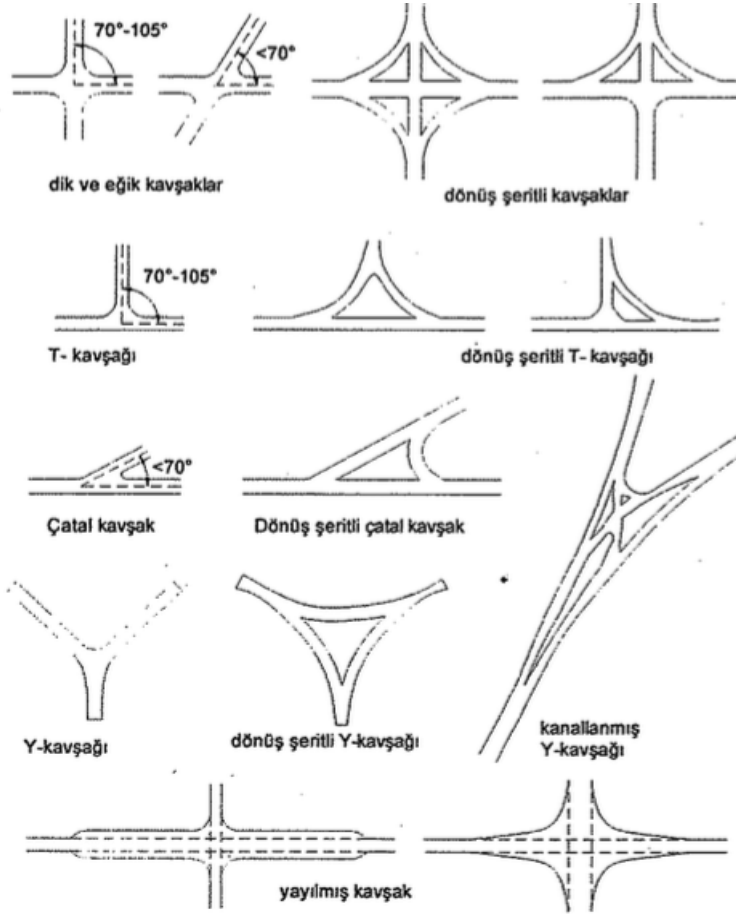
- Kavşağın yol ağı içerisindeki önemi
- Mevcut trafik özellikleri
- Kavşağı oluşturan anayol ve yan yolların geometrik özellikleri
- Sürücü ve yaya davranışları
- Çevredeki yakın kavşaklarda uygulanan ve uygulanması planlanan denetim şekilleri (Yayla, 2011).

Kavşakların düzenlenmesinde dikkat edilmesi gereken diğer bazı önemli noktalar aşağıda sıralanmıştır;

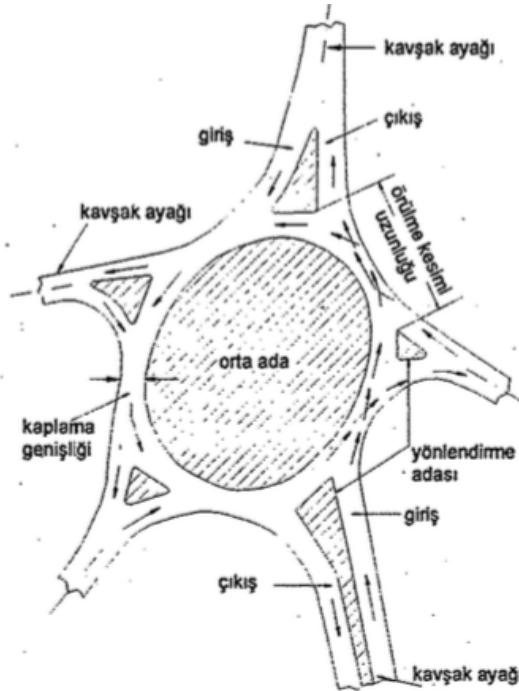
- Sürücünün dikkatini dağıtacak karmaşık düzenlemelere gidilmemelidir.
- Farklı trafik akımlarının kesişme açıları mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır.
- Kavşaktan geçen ana akım, akım yönünden en az sapan akım olmalıdır.
- Kavşaktan geçiş hızları gerekiyorsa fiziki yapı ile kontrol altına alınmalıdır.
- Kesişme noktalarında sollama ve geçme hareketlerini zorlaştırmak amacıyla fiziki düzenlemelere gidilmelidir.
- Kapasite ve özellikle güvenlik açısından işaretleme ve aydınlatmaya önem verilmelidir (Tanyel, 2001).

Eşdüşey kavşaklar geometrik şekillerine ve denetim şekillerine göre çeşitlere ayrılmaktadırlar. Denetim şekillerine göre eşdüşey kavşaklar;

- Denetimli Eşdüşey Kavşaklar
- Denetimsiz Eşdüşey Kavşaklar
- Yuvarlak Ada Kavşaklar olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Yayla, 2011).



Şekil 2.1 Eşdüzey kavşak tipleri (Yayla, 2011)



Şekil 2.2 Yuvarlak ada kavşak (Yayla, 2011)

Denetimsiz kavşaklardaki taşıt hareketleri trafik ışıkları dışında kalan trafik işaretleri ile düzenlenmektedir. Kavşağı oluşturan yollardan biri taşıdığı trafik miktarı veya geometrik standartları itibarıyla anayol durumundadır ve bu yolda seyreden taşıtlar diğer yollarda seyreden taşıtlara göre kavşakta ilk geçiş hakkına sahiptirler. Trafik güvenliği açısından yan yol (tali yol) durumunda bulunanlar için kavşağa girişte “Dur” ve “Yol Ver” mesajlı trafik işaretleri bulunur.

Dairesel veya buna benzer orta adası bulunan yuvarlak ada kavşaklarda hareket sürekliliği vardır. Aynı anda bütün yollardan kavşağa taşıt girebilir ve kavşaktan bu yollara ayrılmalara olabilir. Bu tip kavşaklarda kavşak içinde hareket halinde bulunan trafiğin geçiş önceliği olup kollardan gelen taşıtlar yavaş ve kontrollü bir hareketle orta ada etrafında hareket etmekte olan trafiğe katılırlar. Yuvarlak ada kavşaklarda tam olarak durma hareketi olmasa da hızlar önemli ölçüde azaltıldığından kazalara karşı güvenlik artmaktadır.

Denetimli eşdüzey kavşaklarda taşıt hareketleri trafik polisi veya daha yaygın olmak üzere ışıklı hareketlerle düzenlenir (Yayla, 2011).

2.1.1.1 Denetimli Eşdüzey Kavşakların Kontrol Yöntemleri

Denetimli eşdüzey kavşakların kontrol yöntemleri üç başlık altında toplanabilir;

- El ile kumanda
- Otomatik ışıkla kumanda
- Zamana bağlı ışıkla kumanda

El ile kumanda; bir yetkili veya trafik polisi tarafından idare edilen denetim yöntemidir.

Otomatik ışıkla kumanda yönteminde; kavşağa yaklaşma yönünde belli bir uzaklığa yerleştirilen algılayıcılarla kumanda sağlanır. Taşıt kavşağa gelirken, tekerleğin algılayıcıya yapacağı basınç ya da çökme etkisi bir kondansatör şarj eder ve taşıtın hızına göre kavşağı geçme süresince o yöndeki yeşil ışığı açık tutar. Bununla beraber

diğer yöndeki araçların gereğinden fazla beklememeleri için de yeşil ışık süresi sınırlandırılır.

Zamana bağlı ışıkla kumanda yöntemi denetimli kavşaklarda en sık kullanılan denetim şekli olup; yeşil, sarı ve kırmızı sürelerin kavşağı kullanan taşıt hacmi değerlerine bağlı olarak ayarlanması yöntemiyle çalışır (Tanyel, 2001).

Trafiğin ışıklı işaretler ve bunlara bağlı olan cihazlar kullanılarak yönetildiği sistemlere sinyalizasyon sistemleri denilmektedir. Sinyalizasyon sistemleri için kullanılan bazı temel trafik ve sinyalizasyon kavramları aşağıda açıklanmıştır.

Trafik Şeridi: Karayolunun tek bir sıra taşıta hizmet etmesi beklenen bölümüdür.

Sığınma Şeridi: Sağa veya sola dönüş yapacak araçların, düz giden taşıtların akım hattından ayrılarak hızlarını düşürebildikleri trafik şerididir.,

Trafik Hacmi: Bir yoldan birim zamanda geçen taşıtların sayısı.

Taşıt Bileşimi: Belli bir noktadan geçmekte olan farklı taşıt türlerinin toplam trafik hacmi içindeki oranları.

Kapasite: Herhangi bir yol, kavşak veya trafik şeridinden birim zamanda geçebilecek en fazla taşıt sayısı.

Bağımsız(Yalıtılmış) Sistem: Diğer sistemlerle herhangi bir bağlantısı bulunmayan ve tek başına çalışan sinyalizasyon sistemi.

Eş Güdümlü Sistem: Aynı yol üzerindeki en az iki kavşağın birbirine bağlı olarak çalışmasını sağlayan sinyalizasyon sistemi.

Eş Zamanlı Sistem: Koordine kavşakların hepsinde aynı anda aynı ışıklı sinyalleri veren sistem (Murat, 1996).

2.1.1.1.1 Sinyalizasyon Sistemleri. Sinyalizasyon sistemleri kontrol ettikleri kavşakların durumuna göre bağımsız ve eş güdümlü olmak üzere iki ana başlıkta incelenmektedirler.

- Bağımsız Sinyalizasyon Sistemleri
- Eş Güdümlü Sinyalizasyon Sistemleri

Bağımsız sinyalizasyon sistemleri çevresindeki kavşakların sinyalizasyon sistemleri ile herhangi bir bağı olmayan ve diğer sinyalizasyon tesislerinden etkilenmeyen sinyalizasyon sistemleridir. Bağımsız sinyalizasyon sistemlerinin dört çeşidi vardır:

- Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi
- Trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi
- Yaya uyarmalı sinyalizasyon sistemi
- El ile kumandalı sinyalizasyon sistemi

Sabit Zamanlı Sinyalizasyon Sistemi:

Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri daha önceden ayarlanmış olan zaman programlarına göre çalışmaktadırlar. Kavşağa farklı yönlerden yaklaşan trafik yükü değerlerine göre her bir yönden gelen trafiğin geçiş hakkı süreleri (yeşil süreler) hesaplanır. Geçiş hakkı sürelerinin doğru belirlenebilmesi ve dolayısıyla sistemin doğru çalışabilmesi için trafik sayımlarının çok sayıda ve detaylı olarak yapılması gerekir. Bu sinyalizasyon sistemleri sayesinde günlük ve saatlik olarak değişkenlik gösteren trafiğe uyumlu şekilde de düzenlemeler yapılabilmektedir.

Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerinin mevsim ve değişen trafik koşullarında her zaman doğru çalışabilmeleri için sürekli olarak kontrol altında tutulmaları gerekmektedir (Murat, 1996).

Bu çalışmada benzetim programı incelemeleri yapılırken bağımsız bir kavşak üzerinde sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi kullanılmıştır.

Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemlerinde geçiş hakkı sıraları ve süreleri algılayıcılar tarafından saptanan trafik yoğunluklarına göre oranlanarak belirlenmektedir. Trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemleri Yarı Trafik Uyarmalı ve Tam Trafik Uyarmalı Sistemler olarak iki şekilde uygulanmaktadırlar.

Yarı uyarmalı sinyalizasyon sisteminde genellikle anayol niteliğindeki yoldan gelen akımlara sürekli olarak yeşil ışık verilir, yan yolların herhangi birinden geçiş talebi uyarısı almadıkça da ışıklı sinyallerde değişiklik yapılmaz.

Tam uyarmalı sinyalizasyon sisteminde yaklaşım kollarının hepsinden geçiş talebi uyarıları toplanır. Trafik akım yoğunluklarına göre ayarlanan geçiş hakkı süreleri ve sıraları belirlenir ve sinyalizasyon sistemi çalıştırılır. Tam trafik uyarmalı sistemler trafik akım ve yoğunluk verilerini hemen hemen gerçek değerlerde topladıkları ve geçiş haklarını bu oranlara göre düzenledikleri için toplam gecikmeleri en aza indiren en uygun sistemlerdir.

Yaya Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Yayalara güvenli geçiş hakkı sağlamak üzere kurulan yay uyarmalı sinyalizasyon sistemleri, yarı veya tam uyarmalı sistemlerde kullanılabildiği gibi sabit zamanlı olarak çalışan kavşaklarda da kullanılabilmektedir. Özellikle bazı sabit zamanlı kavşaklarda zaman kaybını önlemek ve gecikmeleri azaltmak için yayalardan herhangi bir talep gelmediği sürece yayalar için olan sinyaller sürekli olarak kırmızı ışıklı yanmaktadır (Murat, 1996).

El ile Kumandalı Sinyalizasyon Sistemi

El ile kumanda edilen bu sistemlerde talepler dışarıdan gözlem ile değerlendirilir ve kavşaktaki bütün ışıklı sinyal grupları bir kumanda çizelgesine bağlanarak yönetilir.

Eş güdümlü sinyalizasyon sistemleri birbirine çok yakın iki veya daha fazla sayıdaki kavşaklarda fazla duruş kalkış hareketlerini ve gecikmeleri azaltmak ve birim zaman içerisinde mümkün olan en fazla sayıdaki taşıtın kavşaktan durmadan geçmesi amacıyla düzenlenirler. Birbirlerine çok yakın kavşaklarda biriken taşıt kuyruklarının kavşak alanlarına taşmamaları için de eş güdümlü sinyalizasyon sistemlerinin düzenlemesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Eş güdümlü sinyalizasyon sistemleri;

- Eş Zamanlı Sistem
- Eşil Sistem
- Aşamalı Sistem
- Arazi Trafik Kontrolü Sistemi olmak üzere dört farklı yöntemle uygulanmaktadır (Murat, 1996).



BÖLÜM ÜÇ

IŞIKLI KAVŞAKLARDA SÜRÜCÜ DAVRANIŞLARI

Planlaması düzgün yapılmış ve iyi projelendirilmiş olan bir ışıklı kavşak sistemi; kaza sayılarının azalması dolayısıyla yaya ve taşıt güvenliğinin artması, gelen talep karşılığında kavşak kapasitesinin artması ve bunun gibi birçok faydayı da beraberinde getirir. Ancak yanlış planlanan veya hatalı uygulanan ışıklı kavşak sistemleri kaza sayılarının artmasına neden olarak güvenli sürüş koşullarının azalmasına, uzun kuyrukların oluşmasına ve gecikmelerin artmasına neden olurlar.

Işıklı kavşakların başarımlarının belirlenmesinde sadece tasarım ölçütleri değil sürücü davranış farklılıkları da büyük önem taşımaktadır. Sürücülerin trafik kurallarına uyma oranları, birbirlerini takip aralıkları, tepki süreleri gibi etkenler kavşak kapasitesini etkileyen önemli unsurlarındandır.

3.1 Başlangıç Tepki Süresi ve Başlangıç Kayıp Zaman

Işıklı kavşakların kapasitelerinin belirlenmesinde en önemli unsurlardan birisi de doygun akım değeridir. Doygun akım ifadesi; kavşak yaklaşım kolunda sürekli olarak bir kuyruk bulunması ve ışığın bir saat süre boyunca yeşil yanması koşullarında bir şeritten geçebilecek olan en yüksek araç sayısı olarak tanımlanabilir (HCM, 2010).

Kavşakta ilk sırada bulunan araçlar, ışığın yeşile dönmesini gözlemleyerek harekete geçme kararı aldıklarından ötürü, kuyrukta daha arka sırada bekleyen araçlara oranla daha büyük başlangıç gecikmesi değerlerine sahip olurlar. İlk sıradaki aracın arkasında hareket eden araçlar için takip aralığı değeri azalarak yaklaşık altıncı araçtan sonra sabit bir değere ulaşır (Şekil 3.1) (Bester ve Meyers, 2007).

Doygun akım değeri takip aralığı değerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$S= 3600/h \quad (3.1)$$

S= Doygun akım değeri (araç/saat)

h= Ortalama doygun takip aralığı (saniye)

Doygun akım, hesaplamalarda kullanılırken inceleme yapılan kavşak yaklaşımındaki trafik akım ve yönetim özelliklerine, akım içerisindeki ağır araç oranına, şerit özelliklerine, topoğrafik özelliklere, yaya hareketliliğine ve kavşağın bulunduğu bölgenin özelliklerine bağlı olarak çeşitli düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir (HCM, 2000). Kapasite incelemelerinde kullanılan doygun akım değeri en uygun şartlar altında 1900 araç/şerit/saat olarak kabul edilmektedir (HCM, 2000). Ancak en uygun şartların geçerli olmadığı gerçekçi şartlar altında ışıklı kavşaklarda bir şerit grubuna ait doygun akım değeri aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir (HCM, 2000).

$$S = S_0 \times N \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{LU} \times f_{bb} \times f_a \times f_{RT} \times f_{LT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb} \quad (3.2)$$

S = Doygun akım oranı

S₀ = Temel doygun akım değeri

N = Şerit sayısı

f_w = Şerit genişlik katsayısı

f_{HV} = Ağır araç düzeltme katsayısı

f_g = Yaklaşım kolu eğim düzeltme katsayısı

f_p = Parklaşma düzeltme katsayısı

f_{LU} = Şerit kullanım oranı katsayısı

f_{bb} = Otobüs durağı etkisi düzeltme katsayısı

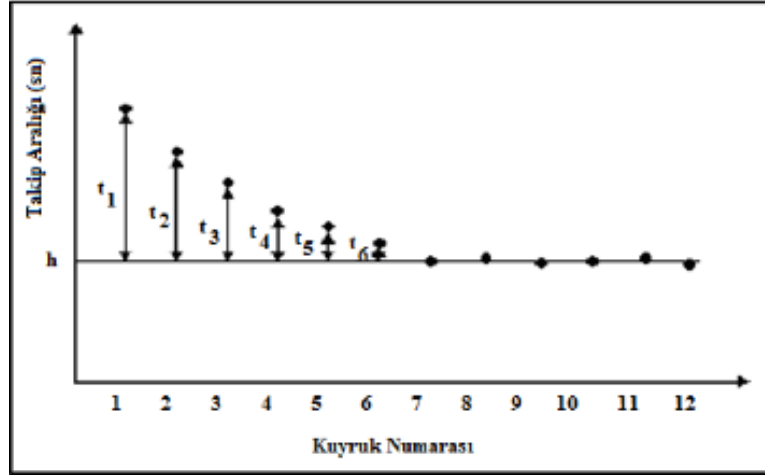
f_a = Bölge tipi katsayısı

f_{RT} = Sağa dönüş düzeltme katsayısı

f_{LT} = Sola dönüş düzeltme katsayısı

f_{Lpb} = Sola dönüşler için yaya düzeltme katsayısı

f_{Rpb} = Sağa dönüşler için yaya düzeltme katsayısı



Şekil 3.1 Kuyruk numarasına bağlı olarak takip aralığı değerlerinin değişimi (Bester ve Meyers, 2007)

Başlangıç tepki süresi, sürücünün yeşil yandığı andan itibaren ışığın değiştiğini fark ederek, ayağının pedala giderek aracı harekete geçirdiği ilk ana kadar geçen süre olarak tanımlanabilir (HCM, 2010). Şekil 3.2’de başlangıç tepki süresinin çizgesel anlatımı görülebilmektedir (Akçelik ve Besley, 2002). Akçelik ve diğer. (1999) başlangıç tepki süresini, kuyruk boşalım akım oranının, kuyruk boşalım hızının ve kuyruk boşalım zaman aralıklarının hesaplanmasında kullanmışlardır.

$$V_s = V_n [1 - e^{-m_v(t-t_r)}] \quad (3.3)$$

$$Q_s = Q_n [1 - e^{-m_q(t-t_r)}] \quad (3.4)$$

$$h_s = \frac{h_n}{[1 - e^{-m_q(t-t_r)}]} \quad (3.5)$$

Burada;

t = Yeşil sürenin başlangıcından itibaren geçen süreyi (saniye)

t_r = Başlangıç tepki süresini (saniye)

V_s = t anındaki kuyruk boşalım hızını (km/saat)

V_n = En yüksek kuyruk boşalım hızını (km/saat)

Q_s = t anındaki kuyruk boşalım akım oranını (araç/saat)

Q_n = En yüksek kuyruk boşalım akım oranını (araç/saat)

h_s = t anındaki kuyruk boşalım takip aralığını (saniye)

h_n = En küçük kuyruk boşalım takip aralığını (saniye)

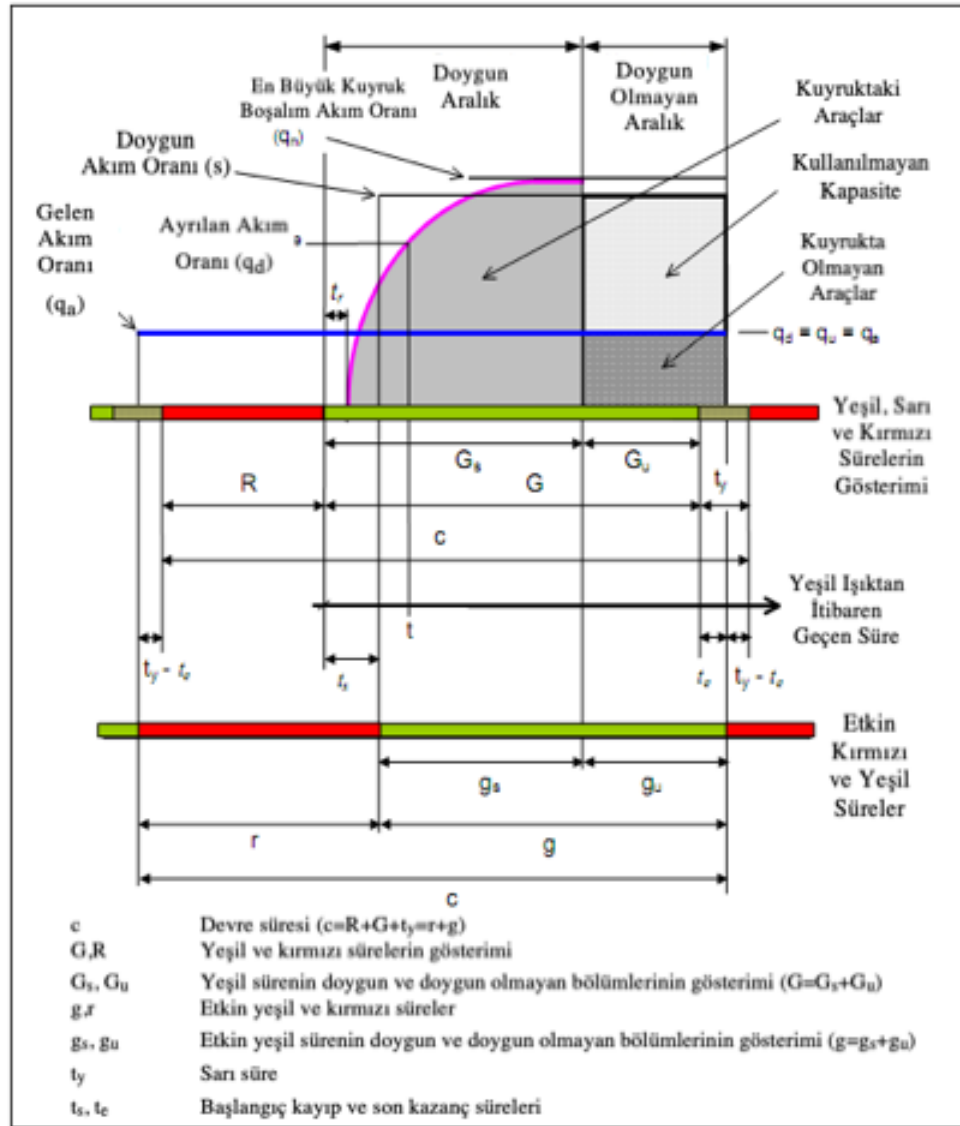
m_v = Kuyruk boşalım hız modeline ait bir değişkeni

m_q = Kuyruk boşalım akım oranı modelindeki bir değişkeni ifade etmektedirler.

Bilindiği üzere doymun akıma karşılık gelen zaman cinsinden takip aralığı değeri $h_n=3600/Q_n$ şeklinde de bulunabilmektedir. Akçelik ve diğer. (1999), başlangıç tepki süresi değerini kullanarak doymun akım takip aralığı değerinin aşağıdaki bağıntıdan elde edilebileceğini önermişlerdir:

$$h_n = t_r + d_a - t_s \quad (3.6)$$

Bağıntıda t_r , kuyrukta ilk sırada bekleyen sürücülerin ortalama başlangıç tepki süresini (saniye); d_a , araçların hızlanması süresindeki ortalama gecikme süresini (saniye), t_s ise başlangıç kayıp süreyi (saniye) göstermektedir.



Şekil 3.2 Kuyruk boşalmasına ait değişkenlerin grafik üzerinde gösterimi (Akçelik ve Besley, 2002)

Daha önce belirtildiği gibi kuyrukta ilk sıradaki birkaç aracın gecikmelerinden kaynaklanan süreye başlangıç kayıp zamanı verilmektedir. Başlangıç kayıp zamanı; araç tipi, eğim, kavşaktaki yaya hareketleri, sürücülerden sürücüye değişen tepki süresi, psikolojik unsurlar ve kavşak geometrisi gibi birçok faktörden etkilenmektedir.

Başlangıç kayıp zamanı farklı ülkelerde birçok araştırmacının geliştirdiği farklı hesap yöntemleri ile belirlenebilmektedir.

HCM 2010'da kuyruğun ilk dört sırasında duran araçların gecikmeleri kullanılarak hesaplanmaktadır (HCM, 2010).

Bonneson (1992), kuyruktaki ilk birkaç aracın istenen hıza ulaşırken gereğinden fazla boşalma aralığı kullandığına değinmiştir. Başlangıç kayıp zamanı, bu ilk birkaç aracın kaybettiği zamanları ekleyerek bulmuştur. Başlangıç zaman kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır:

$$t_s = \sum_{i=1}^m (h_i - h_n) \quad (3.7)$$

Burada;

t_s = Başlangıç kayıp zaman (sn/faz)

h_i = “i.” kuyruktaki aracın aralık değeri (sn);

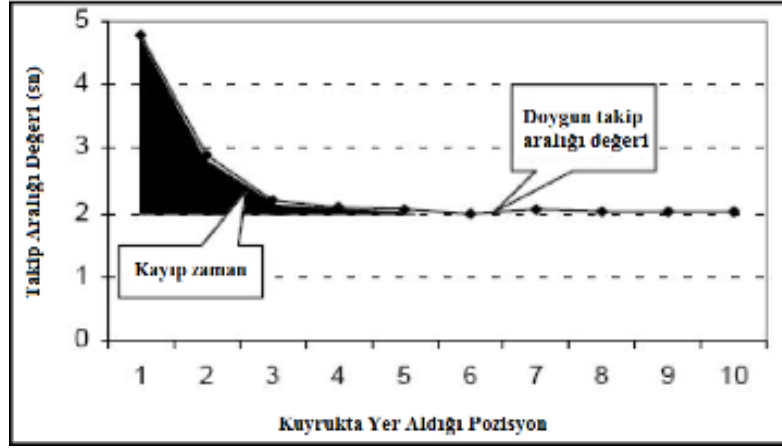
$m = h_n$ ’den büyük olan aralığa sahip araçların sayısı olarak ifade edilmiştir.

McShane ve diğer. (1998) yaklaşımına göre başlangıç kayıp zaman, gözlenen takip aralığı değerleri ile ilk dört aracın ideal doygun takip aralığı değerleri arasındaki farka eşittir.

$$t_s = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 (t_{ij} - h_n)}{n} \quad (3.8)$$

Burada i, devre sayısı; j, kuyruktaki aracın pozisyonu; n, toplam devre sayısı; t_{ij} , kuyruktaki her bir aracın takip aralığı olarak tanımlanmıştır.

Minh ve Sano (2003) başlangıç kayıp zamanı, her bir aracın gözlemlenen takip aralığı değerleri ile doygun takip aralığı değerleri arasındaki farkın toplamı olarak tanımlamışlardır. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3 Minh ve Sano tarafından önerilen model (Minh ve Sano, 2003)

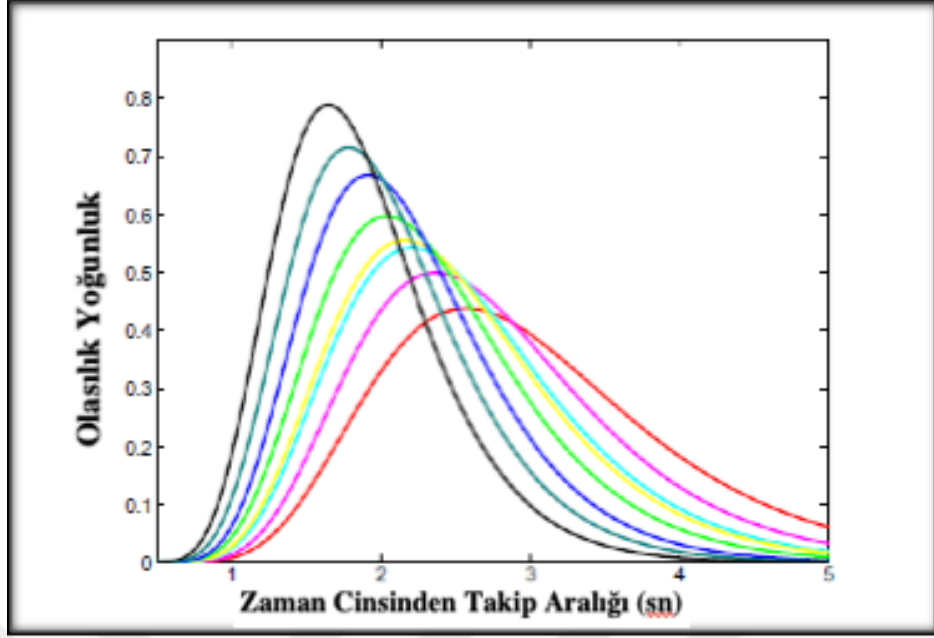
Sürücülere ait başlangıç tepki süresi ve kayıp zaman değerlerinin, ideal doygun akıma karşılık gelen h_n doygun takip aralığı değerinin belirlenmesinde büyük önem taşıdığı görülmektedir.

3.2 Boşaltım Aralığı

Boşaltım aralığı kavramı sinyalizasyon sisteminin başarımının belirlenmesi ve sinyal sürelerinin kararlaştırılması açısından son derece önemlidir. Kavşak başarımının belirlenmesinde hızlanma hareketleri daha önemli olduğundan genellikle bu alanda yapılan çalışmalar kuyruk boşaltımı üzerine yoğunlaşmaktadır (Nuttymaki ve Pursula, 1996; Joseph ve Chang, 2005; Lin ve Tseng, 2005).

Çalışkanelli (2010) çalışmasında, kuyrukta bekleyen araçların boşaltım aralıklarını, kuyrukta bulundukları sıra numarasına göre sınıflandırmış ve her bir araç grubu için takip aralıklarının uyduğu dağılımı belirlemeye çalışmıştır. Genel bir bulgu olarak sağ, orta ve sol şeritte yer alan tüm sıra numaralarına ait takip aralıkları için belirlenen dağılımlardan en uygununun Lognormal dağılım olabileceği sonucuna varmıştır.

Jin ve diğer. (2009) ise yaptıkları çalışmada kuyruktaki araçların takip aralıklarının Lognormal dağılıma uygun olduğu kabulünü yapmışlar ve kuyruktaki sırası arttıkça takip aralıklarının azaldığı sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 3.4)



Şekil 3.4 Jin ve diğ. (2009) tarafından elde edilmiş olan olasılık yoğunluk eğrileri

Çalışma kapsamında Her bir aracın sisteme giriş zamanı (zaman cinsinden takip aralıkları); ortalama 2 saniye aralıklarla geldikleri düşünülerek Negatif Üstel Dağılıma göre rastgele olarak türetilmiştir.

Burada $f(t)$; olasılık yoğunluk fonksiyonu, q ; hacim ya da akım oranı (araç/saat), t ; zaman (saniye) ve RND ise araç sayısına bağlı olarak rastgele olarak atanmış olan değeri göstermektedir.

$$f(t) = q \cdot e^{-qt} \quad (3.9)$$

$$RND = q \cdot e^{-qt} \quad (3.10)$$

$$\frac{RND}{q} = e^{-qt} \quad (3.11)$$

$$\ln\left(\frac{RND}{q}\right) = -qt \quad (3.12)$$

$$t = \frac{1}{q \ln(RND/q)} \quad (3.13)$$

3.3 Araç Takip Modelleri

Araç takip modelleri 1950~60'lı yılların başlarında bir aracın önündeki aracı takip hareketinin tanımlanabilmesi amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır. Bazı modeller sadece önündeki aracı takip ederken sürücünün davranışını tanımlarken bazıları da sürücünün her durumdaki davranışını belirlemeye çalışır. Bir araç takip modeli aracın hangi hareket evresi içerisinde olduğunu belirleyip, her bir durum için de hangi eylemlerin gerçekleştirilmesi gerektiği konusunda bir sonuca varmalıdır.

Araç takip modellerinin çoğu takipçi aracın davranışlarını tanımlamak için çeşitli sistemler kullanırlar. Genellikle serbest sürüş, normal takip hareketi ve acil yavaşlama hareketi olmak üzere 3 çeşit takipçi araç hareketi tanımlanır. Serbest sürüş davranışı içerisindeki araçlar başka bir araç tarafından kısıtlanmadıkları için bir sınır koşulu yoktur ve belirlenen hızda sürüşlerine devam ederler. Diğer yandan başka bir araç tarafından kısıtlananlar, öndeki taşıtın davranışlarına göre hızlarını ayarlarlar (Olstam ve Tapani, 2004).

Araç takip modelleri geliştirilirken göz önüne alınması gereken birçok husus vardır. Örneğin tepki süreleri sürücünden sürüye değişiklik göstermektedir. Hatta farklı ülkeler, bölgeler, cinsiyet farklılıkları, yaş meslek gibi birçok etken sürücü davranış farklılıklarının oluşmasına neden olabilir.

Araç takip modelleri genellikle kullanılan mantığa bağlı olarak sınıflara veya türlere ayrılır. Gazis-Herman-Rothery (GHR) model ailesi, muhtemelen en çok çalışılan model sınıflarından birisidir. İlk sürümü 1958'de sunulmuştur ve o zamandan bugüne çeşitli sürümleri geliştirilmiştir. GHR modeli sadece bir lider ve takipçi arasındaki uyarı-cevap şeklindeki bir fonksiyonu kontrol eder. Takipçinin ivmelenmesinin, takipçinin hızına, önündeki araç ile arasındaki hız farkına ve aralarındaki mesafe cinsinden takip aralığına bağlı olduğunu belirtir (Brackstone ve McDonald, 1998). GHR modelleri simetrik ve simetrik olmayan olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Simetrik modelde hızlanma ve yavaşlama davranışları için aynı katsayılar kullanılırken, simetrik olmayan modelde farklı katsayılar kullanılır.

Güvenlik mesafesi veya çarpışmadan kaçınma ilkesine dayalı modeller ise bir başka çeşit araç takip modelleridir. Bu modellerde takip eden sürücünün önündeki araç ile arasında her zaman güvenli bir takip mesafesi bıraktığı varsayılmaktadır. Bu mesafe bazı modellerde öndeki araç aniden yavaşlarsa çarpışmayı önleyecek olan gerekli mesafe olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma uygun ilk model 1959 yılında Kometani ve Sasaki tarafından sunulmuştur (Brackstone ve McDonald, 1998).

1963 yılında Michaels, araç takip modellerine yeni bir yaklaşım getirmiştir (Brackstone ve McDonald, 1998). Bu yaklaşımı kullanan modeller psiko-fiziksel veya eylem noktası modelleri olarak adlandırılmışlardır. GHR modelleri, takip mesafesi çok büyük olsa bile takip eden aracın, öndeki aracın her türlü eylemine tepki vereceğini ancak aralarındaki göreceli hız farkı sıfır olursa tepkisinin kaybolacağını varsaymaktadırlar. Psiko-fiziksel modeller ise sürücülerin davranışlarını değiştirdikleri anları ve eylem noktalarını dikkate alarak sadece bu eşik noktalara ulaşıldığında göreceli hızdaki değişimlere tepki verebileceklerini kabul ederler (Leutzbach, 1988).

Bulanık mantık ise araç takip modellemelerinde kullanılan bir başka yaklaşımdır. Daha önce bahsedilen modellerde sürücülerin hız ve mesafe verilerini tam olarak bildikleri varsayılmaktadır. Bulanık mantık modellerinde ise takipçi sürücülerin, önlerindeki aracın hızlanma veya yavaşlama hareketlerine göre sonuç çıkarabileceği varsayılmaktadır (Olstam ve Tapani, 2004).

Tepki süreleri hemen bütün araç takip modellerinde ortak olarak kullanılan bir değişkendir. Tepki sürelerinin çok uzun tutulması; uzun takip aralıklarına, kuyruk oluşumuna, gecikmelerin ve yoğunluğun artmasına neden olabilir. Sürücüler yoğun akım koşullarında daha dikkatli olabilir ve normalden daha kısa tepki sürelerine sahip olabilirler. Böyle karışıklıkların yaşanmaması adına genellikle araç takip modellerinde sürücüler için aynı tepki süresi kullanılmaktadır (Olstam ve Tapani, 2004).

General Motors'un araç takip modeli hem saha çalışmaları hem de matematiksel buluşları açısından, trafik akımının kaba ve ince boyutlu kuramları arasında bir köprü

oluşturduğundan önem taşımaktadır (May, 1990). Araştırma ekipleri 5 adet takip modeli önermiştir ve modellerin hepsi aşağıdaki forma uymaktadır.

Tepki=fonk. (duyarlılık, uyarıcı)

General Motors modellerinden birincisi duyarlılık teriminin sabit olduğunu varsayarken, ikinci modelde birbirini takip eden araçların takip aralıklarının az ya da çok oluşuna göre duyarlılık terimi iki farklı değer almaktadır. Üçüncü modelde duyarlılık terimi hem bir sabitin hem de mesafe cinsinden takip aralığının bir fonksiyonudur. Araçlar birbirlerine yaklaştıkça duyarlılık teriminin büyüdüğü kabul edilmiştir. Dördüncü modelde duyarlılık terimine takip eden aracın hızına bağlı olarak bir bileşen daha eklenmiştir. Beşinci model içlerinde en karmaşık ve en çok değişkene bağlı olan modeldir. Bu son modelde denkleme hız ve mesafe cinsinden takip aralıklarına bağlı bileşenler eklenmiştir (May, 1990).

MITSIM programında simetrik olmayan GHR modeline dayalı bir araç takip modeli kullanılmaktadır. Takip eden aracın önündeki araç ile arasındaki zaman cinsinden takip aralığı, takip eden aracın sürüşüne hangi hareketle devam edeceğini belirlemektedir.

VISSIM, Wiedemann tarafından önerilen psiko-fiziksel modele dayanan bir araç takip modelini içermektedir.

AIMSUN programında kullanılan araç takip modeli Gipps (1981) tarafından geliştirilen güvenlik mesafesine dayalı modeldir. Model günümüzde hala en yaygın olarak kullanılan modellerindendir. Bu modeller her zaman güvenli bir takip mesafesi belirleyerek takip eden sürücünün davranışını bu mesafeye göre belirlemektedirler. Temel fikir, önündeki araç aniden frene basıp dursa bile takip eden aracın güvenli bir şekilde durabileceği mesafenin ve zamanın sağlanmasıdır.

Bu çalışma kapsamında yazılan programda, Gipps tarafından geliştirilen güvenlik mesafesine dayalı araç takip modelinin prensipleri temel alınmıştır.

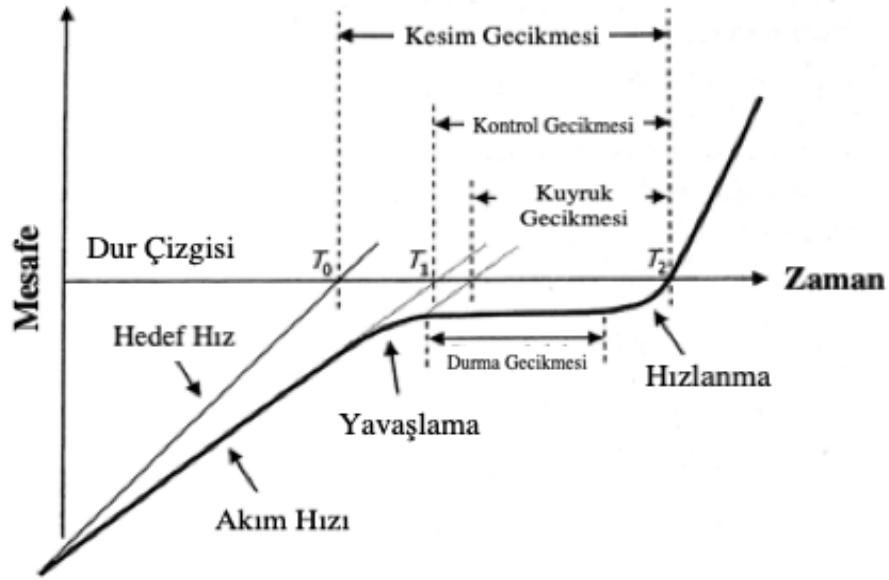
En uygun bir araç takip modeli kavramının geliştirilmemesi gerekmektedir. Birçok araç takip modeli olmakla birlikte, tercih edilen modelin bölge koşullarına ve hatta uygulama farklılıklarına göre bile değişkenlik göstereceği düşünülmelidir.

3.4 Gecikmeler

Işıklı kavşaklar, yol ağları içerisinde büyük öneme sahip olan bağlantı noktalarıdır. Işıklı kavşak başarımlarını ölçmek için; araç başına ortalama gecikme, ortalama kuyruk uzunluğu ve duraklama sayısı gibi ölçütler kullanılmaktadırlar.

Araç başına ortalama gecikme, ışıklı kavşaklardaki hizmet düzeyini belirleyen en önemli ölçütlerden birisidir. Aynı zamanda gecikme değerlerine bakıldığında, sürücüler açısından sürüş deneyimini doğrudan ilgilendiren ölçütlerin başında gelmektedir (Mathew, 2014).

Gecikme kestirimlerini yapmak, araçların rastgele gelişleri, doymuş akım koşulları ve araç hareketlerine bağlı olarak kaybedilen zaman gibi etkenlerin varlığı nedeniyle zordur. Gecikme ölçümleri yapılırken birçok farklı yöntem kullanılabileceği gibi, ölçümler yapılırken gözlemciler farklı sonuçlar doğuracak kararlar verebilirler. Bu nedenle, gecikme incelemeleri yapılırken bir tahmin modeli kullanılmalıdır. Şekil 3.5’te çeşitli gecikme tanımları grafik üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Gecikme tanımlamalarının yol-zaman grafiğinde gösterimi (HCM, 2010)

T_0 : Eğer araç hedeflenmiş olan hızda yolculuğuna devam ederse durma çizgisine ulaşacağı andaki zaman.

T_1 : Eğer araç çalışma hızında yolculuğuna devam ederse durma çizgisine ulaşacağı andaki zaman. Çalışma hızı trafik koşulları nedeniyle genellikle hedef hızdan küçüktür.

T_2 : Aracın durma çizgisinden ayrıldığı zaman.

Kontrol Gecikmesi: Kontrol gecikmesi bir kontrol cihazı, trafik sinyali ya da DUR işaretçisinin neden olduğu gecikmedir.

Kesim Gecikmesi: Bu gecikme türü bir önceki düğüm noktasından (genellikle bir önceki sinyalden) ayrıldığı andan itibaren her bir aracın yaşadığı gecikmeyi tanımlar. Kontrol gecikmesini ve trafik etkileşimlerinden kaynaklı diğer bütün gecikmeleri kapsamaktadır.

Durma Gecikmesi: Bir aracın gerçekten durduğu zaman miktarını yansıtır. Bir durma hareketinin başlangıcı ve bitişi genellikle araçlar ve sürücüler arasında farklılık gösterebilecek olan hız sınırı koşullarına bağlıdır.

Kuyruk Gecikmesi: Kuyruk gecikmesi bir kuyruğa katılmış olan aracın, harekete geçtiği an ile dur çizgisinden geçtiği an arasında geçen toplam zamandır. Kuyruğa birden fazla araç katıldığından bu gecikme türü sadece bir araç üzerinde inceleme yapılarak belirlenemez.

Akçelik (1998), Avustralya Yol Araştırma Kurulu (Australian Road Research Board) raporunda bir gecikme modeli önermiştir;

$$D = \frac{qc(1-u)^2}{2(1-y)} + N_0x \quad (3.14)$$

$$N_0 = \frac{Q.T_f}{4} \left(z + \sqrt{z^2 + \frac{12(x-x_0)}{Q.T_f}} \right) \quad (3.15)$$

$$x_0 = 0,67 + \frac{sg}{600} \quad (3.16)$$

D: Toplam gecikme

q: akım oranı (araç/saniye)

Q: kapasite (araç/saat)

c: devre süresi (saniye)

s: doymuş akım oranı

u: yeşil süre oranı (u=yeşil süre/devre süresi)

y: akım oranı

T_f: akım periyodu

x: doymuşluk derecesi (x=q/Q)

z: x-1

HCM (2000)'de kullanılan gecikme modeli, Akçelik'in gecikme modelinin bir sürümünü içermektedir;

$$d = d_1PF + d_2 + d_3 \quad (3.17)$$

$$d_1 = \frac{c}{2} \cdot \frac{(1-\frac{g}{c})^2}{1 - \left[\min \left(1, X \right) \left(\frac{g}{c} \right) \right]} \quad (3.18)$$

$$d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8klx}{cT}} \right] \quad (3.19)$$

$$PF = \left(\frac{(1-P)}{\left(1 - \left(\frac{g}{c}\right)\right)} \right) \cdot f_p \quad (3.20)$$

d: Kontrol gecikmesi (saniye/araç)

d₁: Tekdüze gecikme bileşeni (saniye/araç)

d₂: Üst akım gecikmesi (saniye/araç)

d₃: Önceden var olan kuyruk nedeniyle gecikme (saniye/araç)

T: Analiz periyodu (saat)

c: Kapasite (araç/saat)

P: Yeşil aralıkta gelen araçların oranı

f_p: Ek ayarlama katsayısı

l: Üst akım ayarlama katsayısı (tüm kavşak incelemeleri için 1,0)

k: Gecikme katsayısı (tüm önceden zaman ayarı yapılmış kontrolörler için 0,50)

BÖLÜM DÖRT

SÜRÜCÜ DAVRANIŞLARININ IŞIKLI KAVŞAK KAPASİTESİ VE BAŞARIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İRDELENMESİ

Işıklı kavşakların kapasite ve başarımlarında sadece kavşakların tasarımı değil, sürücü davranışları da büyük önem taşımaktadır. Dünyada yapılan çalışmalar, sürücü niteliklerinin (yaş, cinsiyet, öğrenim durumu v.b.) kavşak ve yol kapasitesi ile trafik kazalarında büyük önem taşıdığını göstermiştir. Sonuç olarak, bir sinyalizasyon sisteminin başarısı tamamen sistemi kullanan sürücü ve yayaların davranış özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması; buna bağlı olarak trafik yönetim ve kavşak tasarım ilkelerinin belirlenmesi; bu ilkeler doğrultusunda sürücü/yayaların bilgilendirilmesine ve sistemi bu bilgiler ışığında doğru kullanmalarına bağlıdır.

Çalışmada, İzmir kentinde araç kullanan dördü kadın 15 (on beş) gönüllü sürücü ile görüşülmüş; sürücülerin araçlarına JANUS araç içi kamera yerleştirilerek kendi araçları içinde ve sürekli kullandıkları geçkiler üzerindeki hareketleri kaydedilmiştir. Yapılan kayıtlardan, sürücülerin yolculuklarına ait GPS verileri de elde edilmiştir. Yapılan kayıtlar, büro ortamında değerlendirilerek GPS verileri ile görüntülerden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. JANUS'tan elde edilen veriler SIDRA Trip programı ile değerlendirilmiş ve gönüllü sürücülere ait hızlanma ve yavaşlama ölçümleme katsayıları bulunmuştur.

4.1 Gönüllü Sürücülerin Belirlenmesi

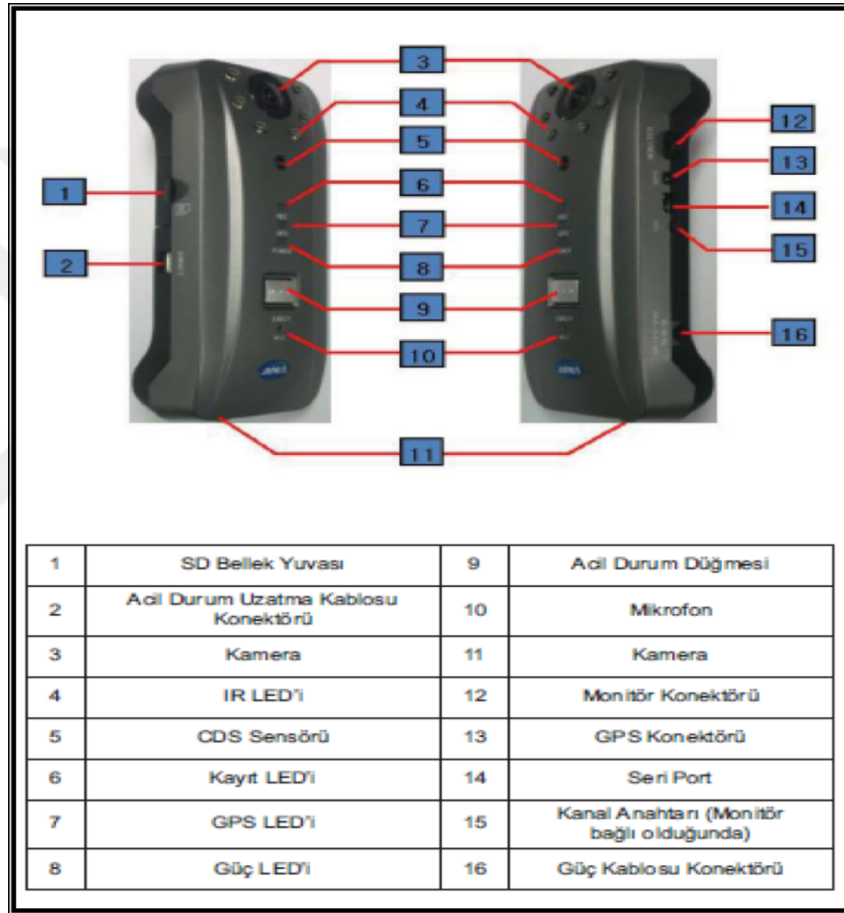
Proje kapsamında 23-66 yaş aralığında kendi aracı olan ya da kendisi adına tahsis edilmiş bir aracı kullanan, en az 1 yıl boyunca haftada en az 2 kere kendi aracı ile yolculuk yapmış ve/veya en az 5000 km araç kullanmış gönüllü sürücülerin trafikteki hareketleri araç içine takılan kamera aracılığıyla kaydedilmiştir. Bu gönüllü sürücülerin belirlenmesinde yaş, eğitim durumu, meslek, gelir ve cinsiyet gibi sosyoekonomik özellikler belirleyici olmuştur. Belirlenen 15 katılımcının özellikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Gönüllü sürücüler hakkında bilgiler

Gönüllü Sürücü No	Yaş	Meslek	Cinsiyet	Kaç yıldır ehliyet sahibi?	Kaç yıldır araç kullanıyor?	Hangi sıklıkta araç kullanıyor?
GS1	39	Memur	Erkek	6~10 yıl	6~10 yıl	Haftada 3~4 gün
GS2	40	Diğer	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS3	23	Öğrenci	Kadın	1~5 yıl	1~5 yıl	Seyrek
GS4	29	Memur	Erkek	6~10 yıl	1~5 yıl	Haftada 3~4 gün
GS5	47	Memur	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS6	55	Diğer	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS7	46	Diğer	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS8	35	Memur	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS9	27	İşçi	Erkek	6~10 yıl	6~10 yıl	Hergün
GS10	33	Memur	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Haftada bir gün
GS11	44	Diğer	Kadın	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS12	36	Memur	Kadın	>10 yıl	>10 yıl	Hergün
GS13	43	Ev Hanımı	Kadın	>10 yıl	>10 yıl	Haftada 3~4 gün
GS14	66	Memur	Erkek	>10 yıl	> 10 yıl	Hergün
GS15	34	Memur	Erkek	>10 yıl	>10 yıl	Haftada bir gün

4.2 JANUS Araç İçi Kameranın Özellikleri

Proje kapsamında gönüllü sürücülere ait trafik davranışlarının kaydedilebilmesi ve GPS verilerinin toplanabilmesi için kullanılan JANUS V2 araç içi kameraları, aracın DVR (dijital video kaydı) sistemini GPS ile birleştirmektedir. Kameranın genel görünümü ve tuşların özellikleri Şekil 4.1’de görülmektedir. Kameranın özellikleri ise Tablo 4.2’de verilmektedir.



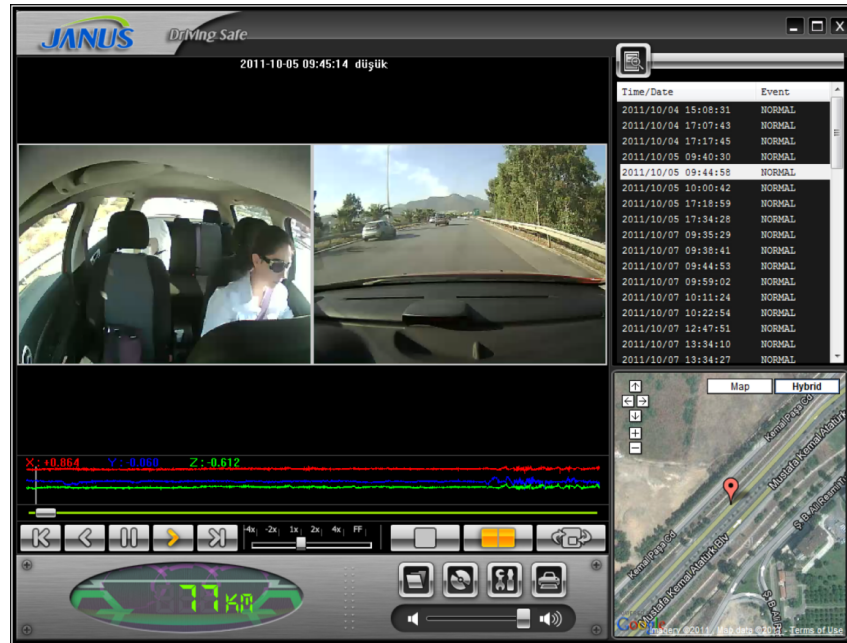
Şekil 4.1 JANUS V2 kamerasının genel görünümü

JANUS, araç hareket halindeyken aracın içinde ve dışında olanları kaydetme becerisine sahiptir. Bu aygıt, hızı mil/s veya km/s olarak izlemenin yanı sıra, MAKS.50fps (kanal/25fps), VGA (640 x 480) çözünürlükte video görüntüsü de sağlamaktadır. JANUS, bir kaza olduğunda kendiliğinden kaydetmekte (kayıt süresi olayın başlangıç ve bitiş süresinden 10’ar saniye önce ve sonrası olmak üzere toplam 20 saniyedir) ve acil bir durumda, acil durum düğmesine basılması halinde bu olayı da

kayıt altına almaktadır. Ani çarpma, hızlanma veya fren durumunda aygıt hemen kayıt yapmaya başlamaktadır. Canlı yayın kaydetme sürecinde içerideki sesleri, aracın hızını ve yerini aracın GPS sistemi üzerinden incelemektedir (Şekil 4.2).

Tablo 4.2 JANUS V2 kameranın özellikleri

KAMERA	2EA CMOS DAHİLİ
VIDEO GİRİŞİ	DİJİTAL 2 KANAL DAHİLİ
SES GİRİŞ/ÇIKIŞ	C- MİKROFON DAHİLİ
VIDEO SIKIŞTIRMA	H.264
SES SIKIŞTIRMA	AD PCM
KAYIT ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ	VGA 640x480
KAYIT HIZI	AZAMİ 50fps (CH/25fps)
ACİL DURUM DÜĞMESİ	ACİL DURUM KAYDI
TİTREŞİM SENSÖRÜ	ÇARPMA TESPİTİ VE KAYDI
GPS SENSÖRÜ	ANİ HIZLANMA VE FREDE ANINDA KAYIT YAPAR
KAYIT ORTAMI	SDHC BELLEK KARTI SINIF 6 (AZAMİ 32GB, VARSA YILAN 4 GB)
MERCEK	ÖNDE 120° VE İÇERİDE 175° GENİŞ AÇI
IR LED'İ	CDS SENSÖRLÜ 850 n 6PCS
GÖRÜNTÜLEYİCİ	WINDOWS XP/VISTA DESTEĞİ
GÜÇ	DC 7V-26v (OTOMOBİL AKÜSÜNDEN ÇALIŞIR)
ÇALIŞMA SICAKLIĞI	0°- 45° C (SAKLAMA SICAKLIĞI: -25° - 85° C)
NEM	%10-95
AĞIRLIK	150 g
BOYUTLAR (GxDxY)	65x140x30 mm



Şekil 4.2 JANUS kameradan elde edilmiş olan bir görüntü

JANUS Kameranın kurulum aşamaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. SD bellek kartı JANUS SD kart yuvasına takılır.
2. Harici GPS monitörü için, JANUS ‘Video ÇIKIŞ’ bileşeni LCD ekran üzerindeki ‘Video Giriş’ bileşenine bağlanır. Video çıkışının bağlanacağı özel LCD monitörü yoksa cihazın yeri sabitlenmeden önce farklı noktalardan kayıt alınıp sonrasında SD kart bilgisayara takılır ve izlenir. Böylece en iyi açı ve pozisyon belirlenir.
3. Cihazın takılması için en iyi yerin dikiz aynasının sağ yanı olduğu, üretici firma tarafından da vurgulanmaktadır. Önemli olan sürücünün dikkatini dağıtmadan araç içinden ve dışından istenilen görüntülerin sağlıklı bir şekilde elde edilmesidir.
4. JANUS V2 güç kablosu çakmak prizine bağlanır.

Cihazın açılması yaklaşık 30 saniye sürmektedir. Cihazın üzerinde 3 LED’ in yanması ve kısa bir uyarı sesi duyulması ile birlikte cihazın kayda hazır olduğu anlaşılır. Kayıt esnasında ve GPS çalışırken, 3 LED daima yanmalıdır. Kameradan, araç içi ve araç dışı görüntü ve ses kaydı yapılabilir. İstenildiği takdirde, ses kaydı ve/veya araç içi veya dışının video çekimleri iptal edilebilmektedir. Kamera GPS verileri yardımıyla aracın güzergahının izlenmesinin yanı sıra, araç sarsıntılarını da kaydedebilmektedir. Böylece, sürücünün davranışları hakkında daha detaylı bilgi alınması mümkün olabilmektedir (Şekil 4.3).

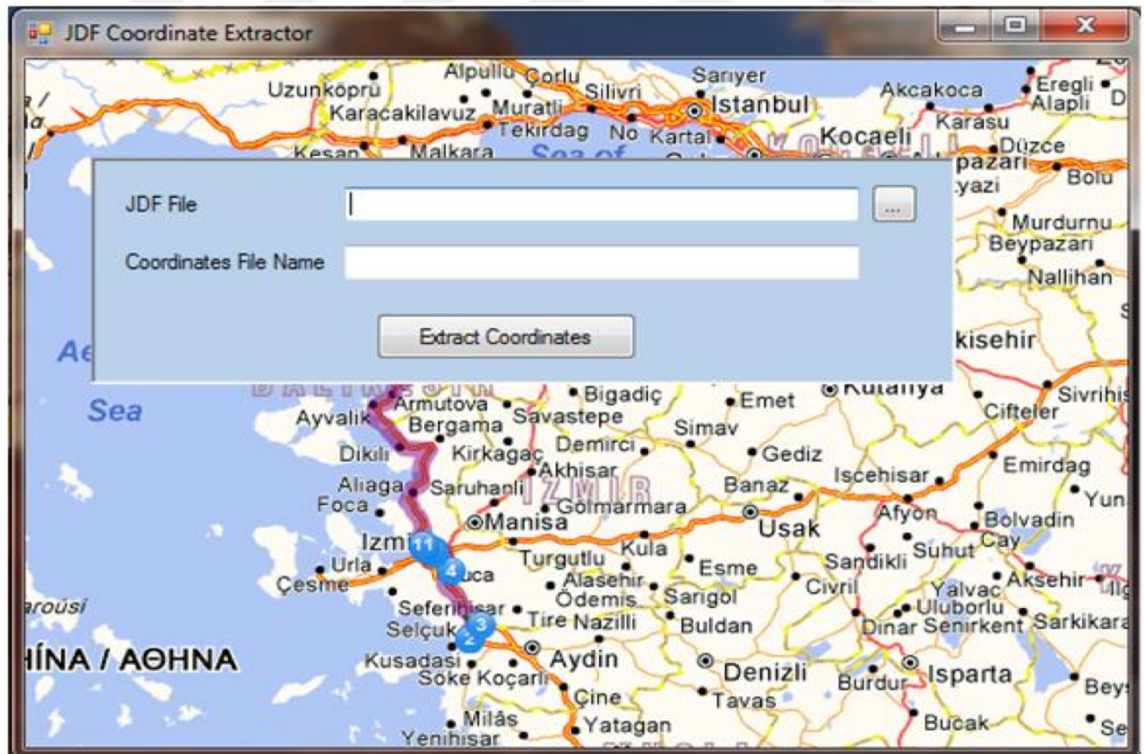


Şekil 4.3 JANUS V2 kamerasına ait programın genel görünümü

4.3 SIDRA Trip Programından Verilerin Elde Edilmesi ve Değerlendirilmesi

JANUS kameralar .JDF formatında veri kaydetmektedir. Bu dosyalar video kamera çekimleri, koordinat ve hız verilerini içermektedirler. Kamera görüntüleri JANUS programı kullanılarak bilgisayardan izlenebilmekte ancak çekimlere ait ham hız ve koordinat verilerine JANUS programı ile ulaşmak mümkün olmamaktadır. Bu sebeple JANUS dosyalarından (.JDF) değerlendirme amacı ile noktalar arası hız, süre ve uzunluk verilerini elde etmek için bir program yazılmış, bu program yardımıyla ".JDF" verileri ".TXT" uzantılı verilere dönüştürülerek gönüllü sürücüyü ait koordinat ve hız verileri elde edilmiştir. Şekil 4.4' te hazırlanan yazılıma ait bir görüntü verilmiştir.

Yazılım yardımı ile JDF formatından TXT formatına getirilen veriler, Microsoft Excel programına aktararak hız ve koordinatlara bağlı noktalar arası uzunluk, süre ve ivme değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4.3' te Excel dosyasına aktarılan verilere ait örnek bir görülmektedir.



Şekil 4.4 JDF dönüştürücü yazılıma ait görüntü

Tablo 4.3 Aktarılan verilerin görüldüğü örnek excel dosyası

Süre	Zaman	Hız	Mesafe	Toplam Mesafe	Kavşağa Mesafe	Enlem	Boylam	İvmelenme
1,03	0,00	39,02	11,14	11,14	-171,87	38,370915	27,195067	0,29
0,99	1,23	40,10	11,08	22,22	-160,79	38,371012	27,195035	-0,46
0,98	2,21	38,46	10,52	32,74	-150,27	38,371109	27,195006	-0,53
1,00	3,21	36,59	10,15	42,89	-140,12	38,371201	27,194978	-0,40
0,98	4,20	35,15	9,61	52,50	-130,51	38,371290	27,194952	-0,38
1,00	5,20	33,78	9,40	61,90	-121,11	38,371374	27,194926	-0,16
1,01	6,21	33,20	9,31	71,21	-111,80	38,371456	27,194900	-0,10
1,00	7,21	32,83	9,14	80,35	-102,66	38,371537	27,194873	-0,09
1,01	8,22	32,52	9,08	89,43	-93,58	38,371616	27,194844	-0,09
1,00	9,22	32,17	8,96	98,39	-84,62	38,371694	27,194813	-0,22
0,98	10,20	31,37	8,57	106,95	-76,06	38,371770	27,194779	-0,53
0,99	11,19	29,49	8,12	115,08	-67,93	38,371842	27,194744	-0,28
0,94	12,13	28,49	7,40	122,48	-60,53	38,371910	27,194710	-1,14
0,89	13,02	24,64	6,11	128,58	-54,43	38,371971	27,194676	-1,69
0,95	13,97	19,20	5,08	133,67	-49,34	38,372022	27,194650	-0,46
0,87	14,84	17,63	4,24	137,91	-45,10	38,372064	27,194627	-1,20
0,83	15,67	13,89	3,21	141,12	-41,89	38,372098	27,194605	-1,49
0,85	16,52	9,42	2,22	143,34	-39,67	38,372124	27,194589	-0,89
0,68	17,20	6,72	1,27	144,60	-38,41	38,372142	27,194578	-1,43
1,00	18,20	3,21	0,89	145,50	-37,51	38,372152	27,194571	-0,30
1,00	19,20	2,12	0,59	146,08	-36,93	38,372158	27,194567	0,32
1,00	20,20	3,28	0,91	146,99	-36,02	38,372164	27,194561	-0,91
1,00	21,20	0,00	0,00	146,99	-36,02	38,372164	27,194561	3,92
1,21	22,41	14,13	4,73	151,73	-31,28	38,372166	27,194559	1,31
1,06	23,46	19,82	5,81	157,54	-25,47	38,372202	27,194530	0,35
1,14	24,60	21,16	6,71	164,25	-18,76	38,372246	27,194494	1,22
1,15	25,76	26,18	8,39	172,64	-10,37	38,372295	27,194449	1,73
1,12	26,88	33,35	10,36	183,01	0,00	38,372354	27,194389	1,67
1,02	27,89	40,07	11,33	194,34	11,33	38,372425	27,194312	0,10
1,01	28,91	40,44	11,37	205,71	22,70	38,372500	27,194224	-0,27
0,99	29,90	39,47	10,87	216,58	33,57	38,372574	27,194134	-0,52
1,01	30,91	37,62	10,53	227,10	44,09	38,372644	27,194047	-0,20

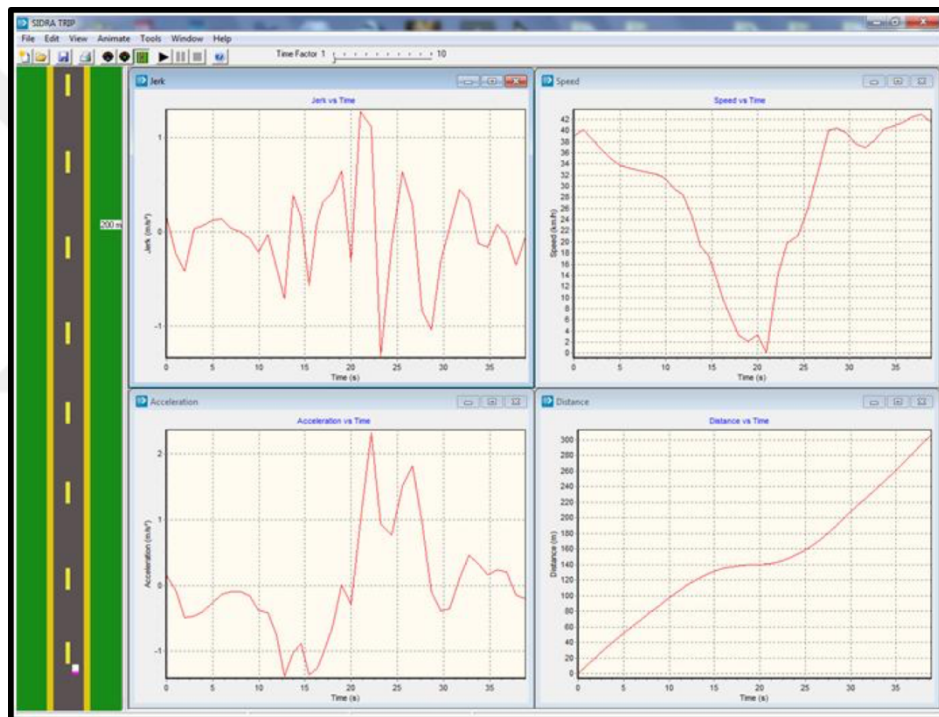
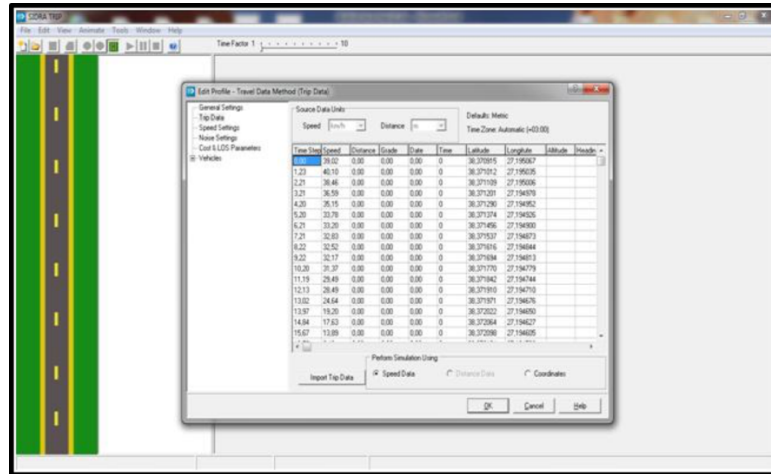
Gönüllü Sürücünün Kavşak
Öncesi Harekete Başladığı An



Gönüllü Sürücünün
Kavşak Ortasından
Geçtiği An



İkinci aşamada, veriler gönüllü sürücülerin Excel dosyalarından alınarak SIDRA Trip programının okuyabileceği şekilde kaydedilmiştir (Şekil 4.5). Sürücülerin kavşaktan geçişlerine ait veriler SIDRA Trip programında hız verilerine bağlı olarak çalıştırılmıştır. Ayrıca sürücülerin incelenen kavşaklardan geçişlerinde yolculuk sürelerinde oluşan gecikmeler gibi seyahat bilgileri de elde edilmiştir. Buna ek olarak SIDRA Trip programı ile yakıt tüketimi ve hava kirliliği açısından da sonuçlar elde edilebilmektedir. Yine benzer şekilde gönüllü sürücülere ait zamana bağlı uzunluk, hız, ivme ve sarsıntı grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.6).



Yapılan çalışmalar, araç yetenekleri ve karşılaşılan direnimler nedeni ile genellikle sürücülerin yavaşlama ivme değerlerinin, hızlanma ivme değerlerinden yüksek olduğunu göstermiştir. Tablo 4.4'te yavaşlama, Tablo 4.5'te ise hızlanma ivmeleri üzerine yapılmış olan çalışmaların birer özeti sunulmaktadır.

Tablo 4.4 Yavaşlama ivmesi değerleri

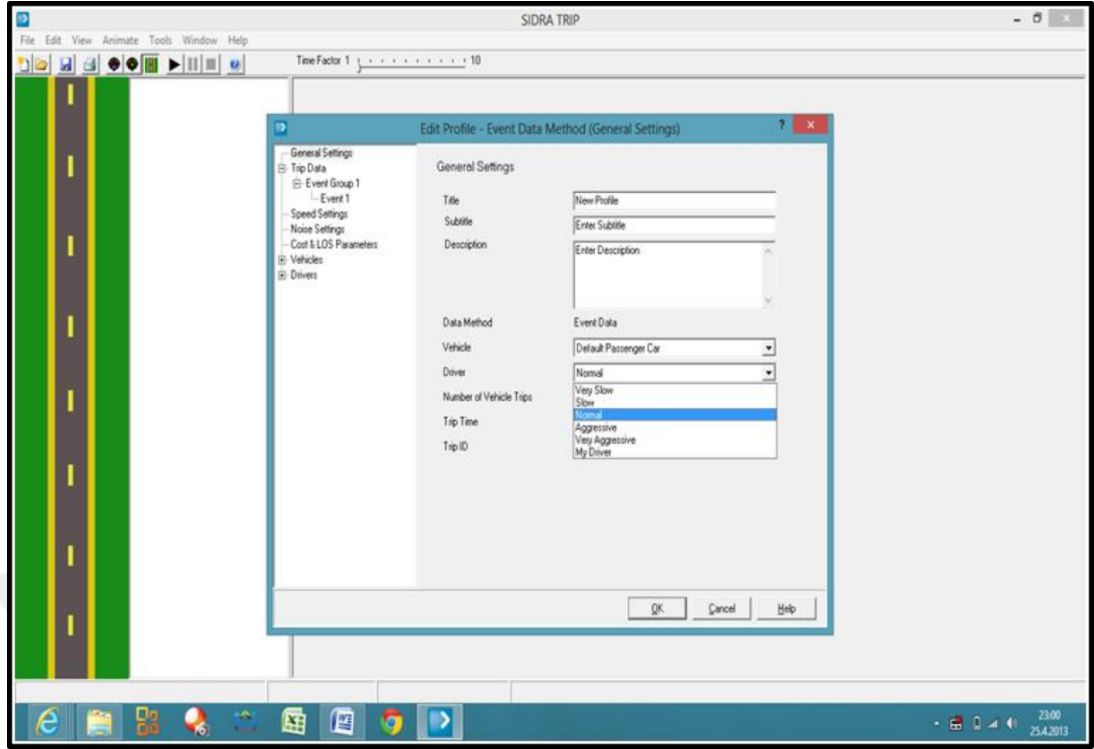
Yazar	Yıl	Değer
ITE (Trafik Mühendisliği El Kitabı)	2009	3,0 m/sn ²
Gazis ve diğer.	1960	4,9 m/sn ²
Williams	1977	2,95 m/sn ²
Parsonson ve Santiago	1980	3,0 m/sn ²
Wortman ve Matthias	1983	2,1~4,2 m/sn ²
Chang ve diğer.	1985	2,9 m/sn ²
Ihab ve diğer.	2007	3,27 m/sn ²

Tablo 4.5 Hızlanma ivmesi değerleri

Yazar	Yıl	Değer
ITE (Trafik Mühendisliği El Kitabı)	2009	1,48 m/sn ²
Loutzehheizer	1937	en fazla 1,74 m/sn ²
NCHRP Report 383	1996	1,5 m/sn ²
Long	2000	1,45 m/sn ²
Bham ve Benekohal	2001	1,43~0,83 m/sn ²

Sürücüler farklı trafik koşulları altında farklı hızlanma ve yavaşlama ivmelerine sahip olabilirler. Ancak davranış özellikleri, bu hızlanma ve yavaşlama ivmelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Akçelik (2011), SIDRA Trip 1.1 programında 5 (beş) farklı sürücü tipi önermiştir (Şekil 4.7):

1. Çok Yavaş
2. Yavaş
3. Normal
4. Saldırgan
5. Çok Saldırgan



Şekil 4.7 SIDRA Trip programında tanımlanmış olan sürücü tipleri

Şekil 4.7 incelendiğinde, "Benim Sürücüm (My Driver) olarak tanımlanmış bir seçeneğin daha olduğu görülmektedir. Bu da kullanıcıya, yolculuk verilerini elde ettiği bir sürücüye ait değerlerden yola çıkarak programı ayarlama (ölçümleme) olanağını sunmaktadır. Akçelik (2011), yukarıda açıklanan beş ayrı sürücü tipi için aşağıdaki ölçümleme katsayılarını önermiştir (Tablo 4.6).

Tablo 4.6 SIDRA Trip'te önerilmiş olan sürücü ölçümleme katsayıları

Sürücü tipi	Hızlanma ivmesi ölçümleme katsayıları	Yavaşlama ivmesi ölçümleme katsayıları
Çok yavaş	1,40	1,40
Yavaş	1,60	1,60
Normal	1,80	1,80
Saldırgan	2,00	2,00
Çok saldırgan	2,20	2,20

Akçelik ve Besley (2000), hızlanma ve yavaşlama ivmelerine ait değerlerin hesaplanabilmesi için aşağıdaki bağıntıları önermişlerdir:

$$a_{\text{hızlanma}} = f_a [p_1 + p_2 \sqrt{v_f - v_i} - p_3 v_i] / 3,6 \quad (4.1)$$

$$a_{\text{yavaşlama}} = f_d [p_1 + p_2 \sqrt{v_i - v_f} - p_3 v_f] / 3,6 \quad (4.2)$$

Burada, $a_{\text{hızlanma}}$, hızlanma ivmesini (m/sn^2), $a_{\text{yavaşlama}}$, yavaşlama ivmesini (m/sn^2), v_f , aracın son hızını (km/saat), v_i , aracın ilk hızını (km/saat), f_a , hızlanma ivmesi ölçümleme katsayısını, f_d , yavaşlama ivmesi ölçümleme katsayısını ifade etmektedir. p_1 , p_2 , p_3 bağıntı katsayıları olup, aldıkları değerler Tablo 4.7’de gösterilmiştir.

Tablo 4.7 p_1 , p_2 , p_3 bağıntı katsayıları

	p₁	p₂	p₃
Hızlanma İvmesi	2,08	0,127	0,005
Yavaşlama İvmesi	1,71	0,236	0,003

4.1 ve 4.2 bağıntıları kullanılarak, sürücülerin yolculuklarından elde dilmiş olan hızlanma ve yavaşlama ivmeleri kullanılarak yolculuklara ait " f_a ve f_d " değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin ortalaması alınarak, sürücülere ait ölçümleme katsayıları elde edilebilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen sürücülere ait ölçümleme katsayıları Tablo 4.8’de sunulmuştur.

Tablo incelendiğinde dikkati çeken en önemli nokta, sürücülerin genelinin hızlanma ölçümleme katsayılarının, yavaşlama ölçümleme katsayılarından daha yüksek olduğudur.

Dikkati çeken diğer bir konu ise, gönüllü sürücülerin sergilediği davranış biçimlerindeki farklılıklardır. Örneğin hızlanma katsayıları göz önüne alındığında 12 numaralı gönüllü sürücünün “Çok Yavaş” sürücü standart değerlerinin altında kaldığı, 8, 13, 14 numaralı gönüllü sürücülerin “Yavaş” sürücü davranışı, 7, 9 numaralı gönüllü sürücülerin “Normal” sürücü davranışı, 3, 6, 10, 11, 15 numaralı gönüllü sürücülerin ise “Saldırgan” sürücü davranışı gösterdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra 1, 2, 4, 5 numaralı gönüllü sürücülerin “Çok Saldırgan” sürücü standart değerinin üstüne çıktığı görülmüştür.

Yavaşlama katsayıları göz önüne alındığında ise 7, 8, 10, 12, 13 numaralı gönüllü sürücülerin “Çok Yavaş” sürücü standart değerinin altında kaldığı, diğer gönüllü sürücüler incelendiğinde 9 numaralı gönüllü sürücünün “Çok Yavaş” sürücü davranışı, 5 numaralı gönüllü sürücünün “Normal” sürücü davranışı gösterdiği 1, 6, 11 numaralı gönüllü sürücülerin “Saldırgan” sürücü davranışı gösterdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra 2, 3, 4, 14, 15 numaralı gönüllü sürücülerin “Çok Saldırgan” sürücü standart değerinin üstüne çıktığı görülmüştür.

Sürücülerin hızlanma ivmeleri açısından %60'ının, yavaşlama ivmeleri açısından %53'ünün SIDRA Trip katsayılarına göre “Saldırgan” ve “Çok Saldırgan” sürücü sınıfına girdikleri belirlenmiştir. Bu durum, ülkemizdeki saldırgan sürücü kavramının ve davranışlarının trafik psikolojisi açısından irdelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.8 Gönüllü sürücülere ait ölçülendirme katsayıları

Gönüllü Sürücü No	Hızlanma İvmesi (m/sn ²)				Yavaşlama İvmesi (m/sn ²)				Hızlanma Katsayısı f_a				Yavaşlama Katsayısı f_d			
	<i>En Küçük</i>	<i>En Büyük</i>	<i>Ort.</i>	<i>St.Sap.</i>	<i>En Küçük</i>	<i>En Büyük</i>	<i>Ort.</i>	<i>St.Sap.</i>	<i>En Küçük</i>	<i>En Büyük</i>	<i>Ort.</i>	<i>St.Sap.</i>	<i>En Küçük</i>	<i>En Büyük</i>	<i>Ort.</i>	<i>St.Sap.</i>
GS1	1,01	3,03	1,80	0,57	0,82	3,20	1,68	0,83	1,40	3,07	2,39	0,71	1,06	3,64	2,07	0,93
GS2	1,40	3,83	2,10	0,62	1,10	6,00	2,20	1,23	1,90	3,90	2,64	0,50	1,49	3,99	2,36	0,67
GS3	0,75	2,38	1,60	0,39	0,79	3,10	1,83	0,83	1,04	3,28	2,14	0,51	1,09	3,97	2,53	1,08
GS4	0,29	3,87	2,22	0,97	0,15	3,70	2,49	1,01	1,90	3,89	2,69	0,55	1,50	3,99	2,21	0,53
GS5	0,77	2,51	1,81	0,56	0,85	4,70	1,68	0,86	1,14	3,48	2,44	0,72	1,21	2,54	1,91	0,34
GS6	0,88	2,29	1,58	0,43	1,00	2,50	1,61	0,48	1,40	3,01	2,13	0,57	1,25	3,35	2,05	0,60
GS7	0,45	3,69	1,54	0,98	0,52	2,60	0,99	0,64	0,56	3,99	1,89	1,20	0,54	1,77	1,21	0,79
GS8	0,57	2,98	1,47	0,83	0,53	2,09	1,04	0,50	0,71	3,66	1,80	1,01	0,64	2,57	1,28	1,61
GS9	0,87	2,64	1,51	0,54	0,58	2,72	1,28	0,77	1,07	3,24	1,85	0,67	0,71	3,34	1,57	0,95
GS10	0,65	2,72	1,71	0,85	0,67	2,24	1,10	0,76	0,80	3,34	2,10	1,04	0,83	2,75	1,34	0,94
GS11	0,78	2,42	1,58	0,43	1,00	2,90	1,67	0,46	0,96	3,19	2,11	0,65	1,04	3,51	2,06	0,63
GS12	0,83	1,56	1,07	0,33	0,29	1,38	0,80	0,38	0,75	1,93	1,31	0,40	0,57	1,70	0,98	0,46
GS13	0,50	2,27	1,40	0,59	0,44	1,71	1,09	0,45	0,62	2,78	1,72	0,72	0,53	2,11	1,34	0,55
GS14	0,41	2,60	1,33	0,61	1,20	3,40	1,95	0,68	0,50	3,37	1,73	0,80	1,27	3,70	2,31	0,71
GS15	0,65	2,47	1,57	0,57	0,88	3,30	1,90	0,77	1,24	3,30	2,10	0,77	0,87	3,37	2,28	0,88

4.4 Sürücüsüz Taşıtların Hızlanma ve Yavaşlama Nitelikleri

Literatürde sürücüsüz araçların trafik akımına etkisi üzerine yapılmış olan çalışmalar; otoyol üzerindeki trafik akımının incelendiği (Kanaris ve diğer., 1997; Vander Werf ve diğer., 2002; Van Arem ve diğer., 2006; Kesting ve diğer., 2008) ve kavşak üzerindeki trafik akımının incelendiği (Dresner ve Stone, 2008; Li ve diğer., 2014; Le Vine ve diğer., 2015) çalışmalar olarak iki ana grupta toplanabilir.

Kavşak üzerindeki trafik akımının incelendiği çalışmaların bir bölümünde geleneksel sinyal kontrol sistemleri ile kavşak başarımı üzerine (Le Vine ve diğer., 2015), diğer bir bölümünde ise sanal trafik ışıkları ile beraber araçların birbirleri ile iletişimli (V2V) ve/veya altyapıyla iletişimli (V2I) olup olmama durumlarına göre kavşak başarımına etkileri üzerine (Ferreira ve d'Orey, 2012; Li ve diğer., 2014; Dresner ve Stone, 2008) çalışılmıştır.

Bunların yanı sıra sürücüsüz araçların kapasiteye etkisini gözlemlemek amacıyla yapılmış olan çalışmalar (Kanaris ve diğer., 1997; Vander Werf ve diğer., 2002) ve ışıklı olmayan kavşaklarda sürücüsüz araçların hızları ve kavşaktan geçiş sürelerinin en iyilenmesi üzerine yapılmış olan çalışmalar da vardır.

Abraham (2015), çalışmasında insan sürücülerin ve sürücüsüz araçların birlikte bulunduğu bir benzetim ortamı yaratılmıştır. Çalışmada insan sürücüler ile sürücüsüz araçlar arasındaki tek niteliksel farkın tepki süresi olduğu düşünülmüş, insan sürücüler için tepki süresi 0,8 saniye alınırken, sürücüsüz araçlar için tepki süresi 0 (sıfır) kabul edilmiştir.

Le Vine ve diğer. (2015) araçların birbirleriyle iletişimlerinin olduğu (V2V) bir ortamda sürücüsüz araçların ışıklı kavşaklardaki kuyruk boşaltma işlemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Çalışmada tüm araçlar sürücüsüz olarak kabul edilmiş, araçların takip mesafesi 1,83m, en büyük ivmelenme değeri $1,50 \text{ m/sn}^2$, en büyük hızları ise 13,9 m/s alınmıştır.

Niels ve diğ. (2018) iletişimli ortamlarda sürücüsüz araçların Münih'teki ışıklı kavşakların kapasitesi üzerindeki etkisi üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar, sadece sürücüsüz araçlarla değil, aynı zamanda insan sürücülerin kullandığı araçları da içeren karma trafik koşullarına odaklanmışlar ve sürücüsüz araçlar için en büyük hızlanma ivmesini $3,0 \text{ m/sn}^2$ olarak almışlardır.

Li ve diğ. (2014) ışıklı bir kavşak üzerinde bütün araçların tamamen sürücüsüz olduğu, sinyal denetleyicisi ve araçlar arasında iki yönlü bir iletişime izin verilen (V2I) ortam için bir en iyileme algoritması önermişlerdir. Çalışmada kabul edilmiş olan araç ve kavşak nitelikleri Tablo 4.9'da görülmektedir.

Tablo 4.9 Li ve diğ. tarafından kabul edilen araç ve kavşak ölçütleri

Ölçütler	Kabul Edilen Değerler
En Büyük Seyahat Hızı (km/saat)	56
En Büyük Hızlanma İvmesi (m/sn^2)	1,37
En Küçük Hızlanma İvmesi (m/sn^2)	0,76
En Büyük Yavaşlama İvmesi (m/sn^2)	3,35
En Küçük Yavaşlama İvmesi (m/sn^2)	1,83
En Küçük Yeşil Süre (saniye)	4
En Büyük Yeşil Süre (saniye)	25

Çalışkanelli ve diğ. (2013) tarafından yapılmış olan çalışmada, ışıklı bir kavşakta ilk sırada bekleyen sürücünün tepki süresinin “1 saniye” olması durumunda, doymun akım değerinin 2118 araç/saat değerine erişebileceği gösterilmiştir. Özellikle ışıktaki ilk sırada bekleyen aracın sürücüsüz olduğu ve başlangıç tepki süresinin “0” saniye olduğu düşünüldüğünde, doymun akım değerinin çok büyük değerlere çıkabileceği ve kavşak kapasitesini arttırabileceği açıktır. Ancak bu koşul, sürücüsüz araçların trafik sinyalizasyon altyapısı ve/veya diğer araçlarla haberleşebildiği ortamlar için geçerlidir.

Le Vine ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, sürücüsüz araçlarla altyapı sistemi ve diğer araçlar arasında herhangi bir haberleşme olmayan koşullardaki bir trafik

içinde hareket eden sürücüsüz araçlar ile kavşak kapasitesinde %4~%53 arasında bir düşüş olabileceğini bulmuşlardır.

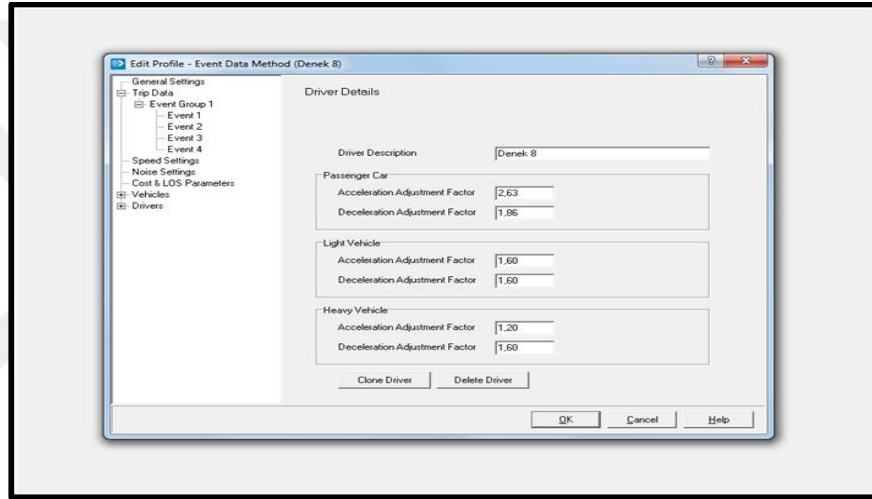
Çalışmada, sürücüsüz araçların hızlanma ivmeleri için üst eşiğin (sınırın) $1,37 \text{ m/sn}^2$; alt eşiğin $0,76 \text{ m/sn}^2$; yavaşlama ivmesi için ise üst eşiğin $3,35 \text{ m/sn}^2$ ve alt eşiğin, $1,83 \text{ m/sn}^2$ olduğu kabul edilmiştir. Sürücüsüz taşıtların, yavaşlama ivmelerinin insan sürücülere göre daha yüksek olmasının ana sebebi, özellikle çarpışma olasılığı ortaya çıktığında herhangi bir kaza olmadan durabilmesini sağlamaktır. Buna bağlı olarak, sürücüsüz taşıtların hızlanma katsayılarının, yavaşlama katsayılarından daha küçük olacağı açıktır.

4.5 Senaryolar

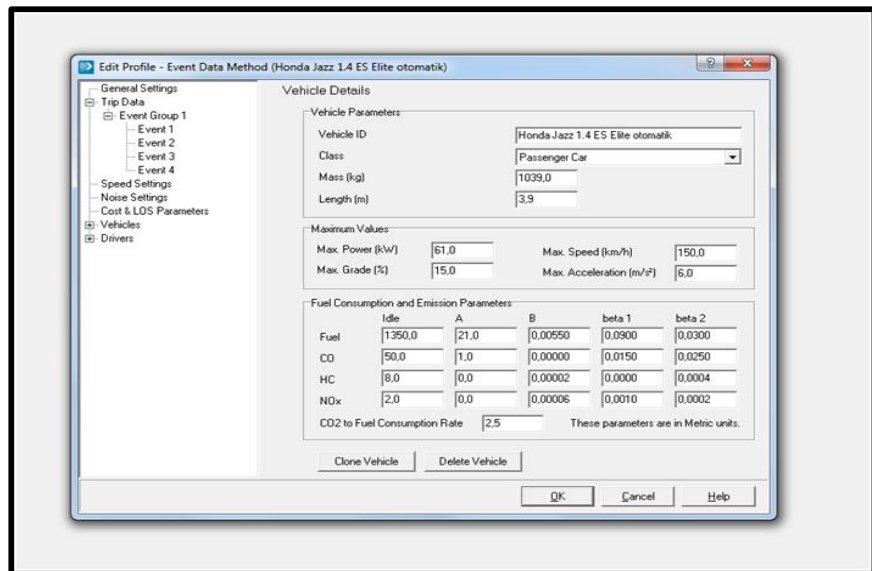
Sürücüsüz taşıtlar ile, sürücülü taşıtların ışıklı kavşaklardaki davranış farklılıklarını daha sağlıklı anlayabilmek için SIDRA Trip programında oluşturulan senaryolardan yararlanılmıştır. Gönüllü sürücülerin ölçümleme katsayıları kullanılarak, SIDRA Trip programının "Event" seçeneğinde, tüm sürücülerin aynı kavşaktan geçişleri, benzetim yöntemiyle modellenenilmektedir. Örnek olarak, yaklaşık 200 m uzunluğunda bir ana yolda yer alan bir trafik sinyali senaryosu oluşturulmuştur. Senaryoda yapılan kabuller aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Sinyal, ana yolun başlangıcından 100 m uzaklıkta yer almaktadır.
- Araçların normal akım hızları 40 km/saat olarak kabul edilmiştir.
- Sinyale ait kırmızı süre 40 saniyedir. Sürücülerin, gerçekleştirilen senaryolarda sırasıyla 5, 10, 20, 30 ve 40 saniye boyunca bekledikleri düşünülmüştür.
- Her bir senaryo, sürücünün sinyalden 100 kez geçtiği kabul edilerek çalıştırılmıştır.
- Sürücü kırmızı ışıkta durduktan sonra hızını ilk olarak 24 km/saat'e çıkarmakta; bu hızda yaklaşık 50 metre ilerledikten sonra hızlanarak 40 km/saat'e ulaşmaktadır.
- Her bir sürücünün kullandığı araç, benzetimde aynı araç tipi olarak tanımlanmıştır. Böylece sürücüye bağlı hızlanma ve yavaşlama özellikleri de benzetime yansıtılmaya çalışılmıştır.

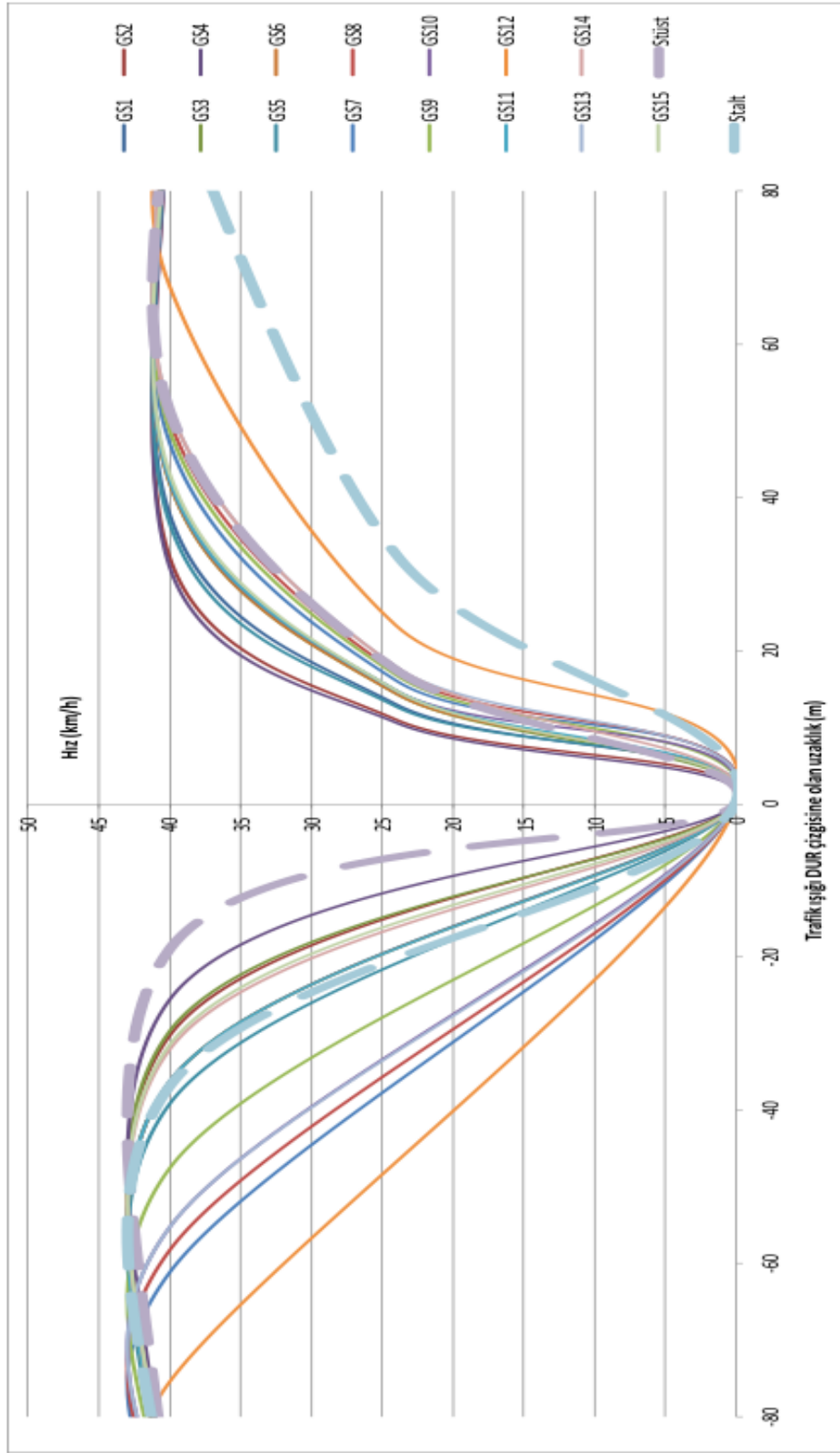
SIDRA Trip programında her bir sürücüye ait hızlanma ve yavaşlama katsayıları tanımlanmıştır (Şekil 4.8). Ayrıca her sürücünün kullandığı aracın teknik özellikleri de programa girilebilmektedir (Şekil 4.9). Böylece sürücü, benzetim modeli kapsamında tüm özellikleriyle tanımlanabilmektedir. Diğer yandan, sürücüsüz taşıtlar ile ilgili alt ve üst hızlanma sınır değerleri ve taşıtların ilk ve son hızları dikkate alınarak hızlanma ve yavaşlama ölçümleme katsayıları hesaplanmış ve senaryolar sürücüsüz taşıtlar için de çalıştırılmıştır. Böylece gönüllü sürücüler ile sürücüsüz taşıtların ışıklı kavşaklardaki hızlanma ve yavaşlama davranışlarını karşılaştırılmasına olanak veren bir yol-hız grafiği elde edilebilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.8 SIDRA Trip'te sürücüye ait ölçümleme katsayılarının tanımlanması



Şekil 4.9 SIDRA Trip'te sürücünün aracına ait niteliklerin tanımlanması



Şekil 4.10 Gönüllü sürücüler ve sürücüsüz taşıtlara ait senaryolardan elde edilen hız-yol grafikleri

Grafik incelendiğinde gönüllü sürücülerin hızlanma davranışlarının, yavaşlama davranışlarına kıyasla daha fazla benzerlik gösterdiği ve hızlanma aşamasında çoğu sürücünün yüksek hızlanma ivmesi ile hareket ettiği söylenebilir. Bu durum, daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere sürücülerin hızlanma parametrelerinin agresif (saldırgan) sürücü davranışına uyduğu sonucuyla tutarlıdır.

Sürücülerin yavaşlama davranışları incelendiğinde ise, sürücüler arasındaki farklılıkların daha belirgin olduğu söylenebilir. Sürücülerin önemli bir kısmı, sinyalden çok önce yavaşlamaya başlamaktadır. Bu şekilde, kırmızı ışıktaki daha az bekleyerek veya hiç beklemeden kavşağı terk etmek istedikleri söylenebilir. Nitekim, yavaşlama parametreleri çoğu sürücü için hızlanma parametrelerinden daha küçük bulunmuştur. Buradan, sürücülerin sinyalde bekleme yapmak istemediği için yavaşlamaya erken başladıkları ve kalkış için acele ettikleri sonucu çıkarılabilir.

Sonuç olarak sürücülerin hızlanma davranışlarının, yavaşlama davranışlarına kıyasla daha fazla benzerlik gösterdiği ve hızlanma aşamasında çoğu sürücünün yüksek hızlanma ivmesi ile hareket ettiği görülmüştür. Sürücülerin yavaşlama davranışları incelendiğinde ise sürücüler arasındaki farklılıkların daha belirgin olduğu söylenebilir. Sürücülerin önemli bir kısmı, sinyalden çok önce yavaşlamaya başlamaktadır. Bu şekilde, kırmızı ışıktaki daha az bekleyerek veya hiç beklemeden kavşağı terk etmek istedikleri söylenebilir.

Diğer yandan, sürücüsüz taşıtlara ait eğriler irdelendiğinde, sürücüsüz taşıtların yavaşlama manevralarının çok saldırgan sürücülere yakın olduğu; hızlanma davranışlarının ise yavaş veya çok yavaş sürücülerle benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Sürücüsüz taşıtlara ait bu davranış (hareket/manevra) şekli, bu taşıtların özellikle kazaları azaltmaya yönelik olarak tasarlanmalarından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, sürücüsüz taşıtların ülkemizi trafiğine ilk katılımlarında kavşak başarımını nasıl etkileyeceklerinin irdelenmesinin önemini de ortaya koymaktadır.

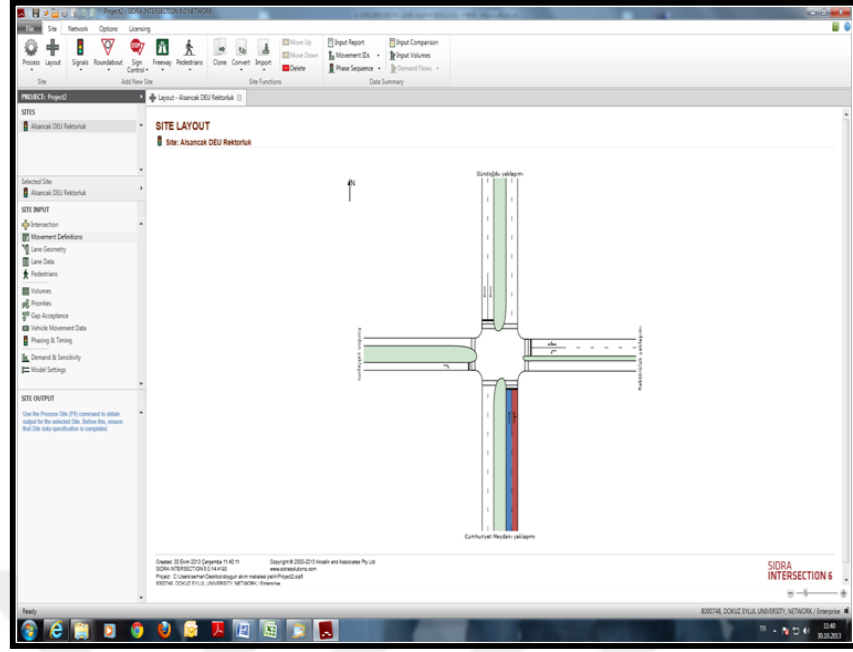
4.6 Sürücüsüz Taşıtların Işıklı Kavşak Kapasite ve Başarımı Üzerindeki Etkisi Üzerine Bir Tartışma

Sürücüsüz taşıtlar ile insan sürücülü taşıtların bulunduğu karma trafik koşulları altında ülkemizdeki ışıklı kavşakların başarımlarının ne olabileceği üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Çalışmanın bu kısmında, aaSIDRA TRIP ve aaSIDRA Intersection programlarından da yararlanarak sürücüsüz taşıtların özellikle gerekli altyapının bulunmaması koşulunda ışıklı kavşakların başarımlarını nasıl etkileyecekleri tartışılacaktır. Bu bölümde ilk olarak aaSIDRA Intersection programı tanıtılarak yazılımın nasıl ölçümlendiği açıklanacaktır. Sonraki bölümde ise oluşturulan senaryolar tanıtılarak incelemeler sunulacaktır.

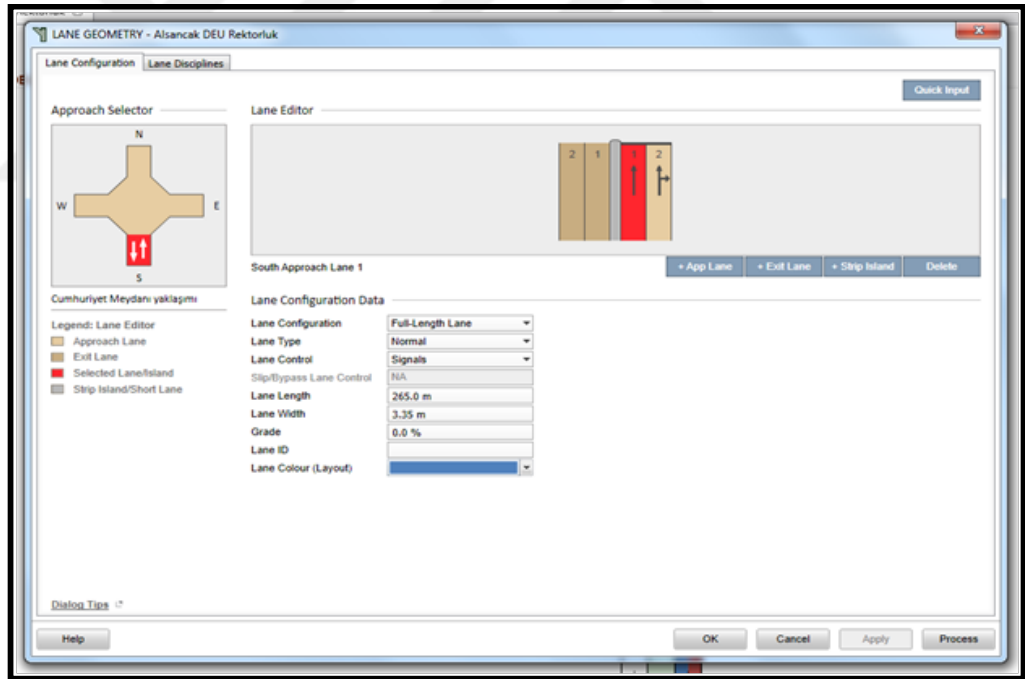
4.6.1 Kavşakların SIDRA Intersection Programında Modellenmesi

Benzetim programları mühendislere ve araştırmacılara önemli bilgiler sunmakla birlikte çoğu zaman çok sayıda ve detayda veri gerektirmektedirler. Bu da modelleme aşamasında kullanıcıların hata yapma olasılıklarını arttırmaktadır. SIDRA gibi analitik ve ampirik hesap yöntemlerine dayalı çözümleme programları ise kullanıcıların kavşak modeline daha fazla hakim olmalarını ve değişkenlerin etkilerinin neler olabileceğini daha sağlıklı öngörebilmelerini sağlayabilirler. Bu sebeple çalışma kapsamında SIDRA 6.0 programının kullanılmasında yarar olduğu düşünülmüştür.

SIDRA programında modelin oluşturulmasında kavşağın geometrisinin doğru oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla SIDRA’da farklı alt menülerde veri girişi yapılması gerekmektedir. Şekil 4.11’de dört kollu bir kavşağa ait SIDRA çizimi görülmektedir. Şekil 4.12’de de şerit geometrik özelliklerinin giriş menüsü yer almaktadır.



Şekil 4.11 Alsancak rektörlük kavşağına ait SIDRA çizimi

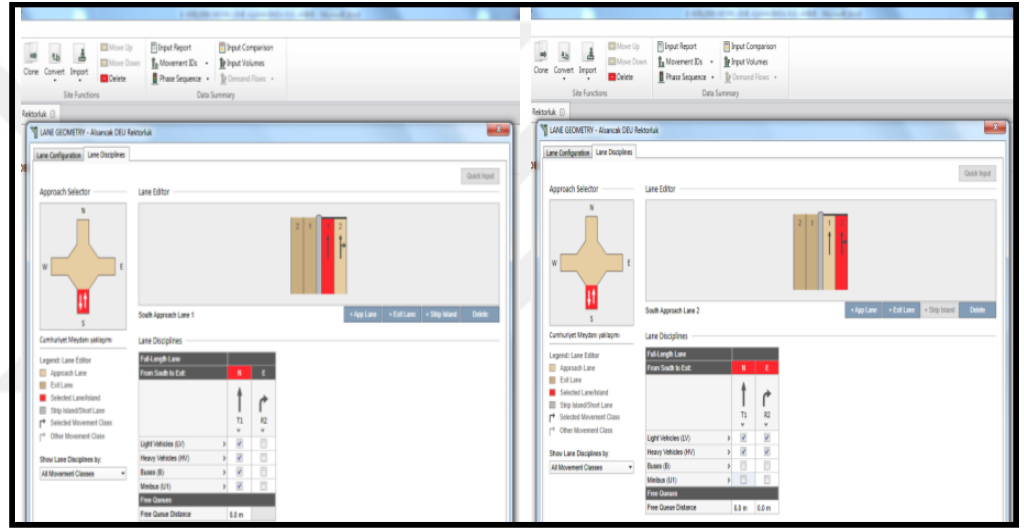


Şekil 4.12 Şeritlere ait geometrik özelliklerin modele girişi

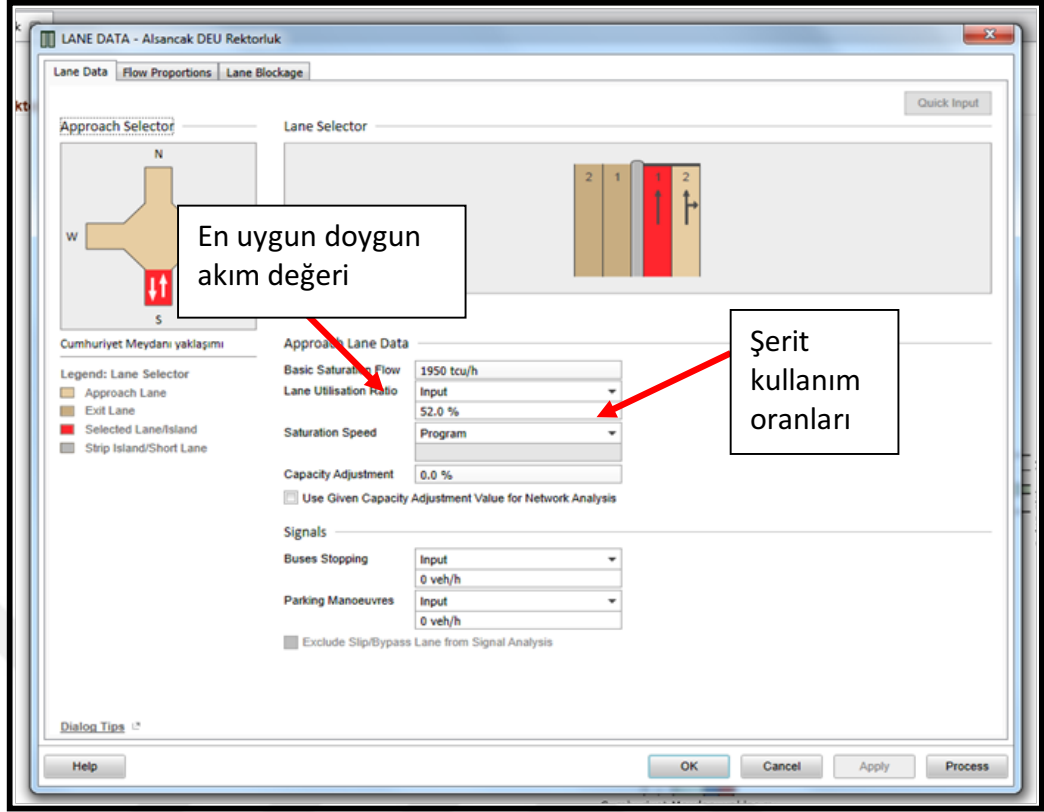
SIDRA 6.0'da yeni bir özellik olarak, farklı araç tipleri ve bu araçların hangi yaklaşımların hangi şeritlerini kullandıkları model oluşturulurken veri olarak girilebilmektedir (Şekil 4.13). Bu şekilde farklı araç bileşimlerini şerit bazında irdelemek olanaklı olabilmektedir. Şekil 4.13(a)'da sol şeridin otobüsler ve minibüsler

tarafından kullanıldığı görülmektedir. Ancak Şekil 4.13(b)'de sağ şeridin otobüsler tarafından kullanılmadığı anlaşılmaktadır.

Ayrıca, her şerit için en uygun doygun akım değeri ve şerit kullanım oranı da tanımlanabilmektedir. Böylece sürücülerin şerit kullanım tercihleri ile başlangıç tepki süresi, sinyal boşalım aralıkları gibi çalışma kapsamında toplanmış olan verilerin programa modelleme aşamasında katılması mümkün olmaktadır (Şekil 4.14). Ayrıca program, değişik araç türlerinin niteliksel özelliklerinin tanımlanmasına da olanak vermektedir (Şekil 4.15).



(a) (b)
Şekil 4.13 Şerit başına araç bileşiminin tanımlanması



Şekil 4.14 Doymun akım ve şerit kullanım oranlarının modelde tanımlanması

Movement Calibration Data		
From South to Exit:	N	E
	↑ T1	↗ R2
Queue Space	13.0 m	13.0 m
Vehicle Length	10.0 m	10.0 m
Vehicle Occupancy (pers/veh)	1.2	1.2
Turning Vehicle Effect	Factor	Factor
Turning Vehicle Factor	1.0	1.09
Turn Radius		
Gap Acceptance Factor	1.5	1.5
Opposing Vehicle Factor	1.5	1.5
Prac. Deg. of Saturation	Program	Program

Passenger Car equivalents for signals and uninterrupted (continuous) movements are given in Model Settings dialog, Model Parameters tab.

Şekil 4.15 Bulundukları şeride göre araçlara ait niteliklerinin tanımlanması

4.6.2 Sürücüsüz Taşıtların Işıksız Kavşak Üzerindeki Etkisi

Daha önce belirtildiği gibi, çalışmada İzmir kentindeki 15 sürücüye ait hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ile, hızlanma ve yavaşlama sürücü ölçümleme katsayıları elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak, iki ayrı senaryo önerilmiştir: İlk senaryoda, sürücülerin ışıklı bir kavşakta, durma halinden (0 km/saat’lik bir hızdan), 35~60 km/saat’lik bir hıza eriştikleri, ikinci senaryoda ise sürücülerin 35~60 km/saat’lik bir hızla hareket ederken frene basarak durdukları kabul edilmiştir.

Her iki senaryo için, Akçelik (2011) tarafından önerilmiş olan normal sürücü ölçümleme katsayısı “1,80” için ve sürücüsüz araçlara ait üst ve alt eşik değerleri için hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ile hızlanma ve yavaşlama süreleri hesaplanmıştır. Sürücüsüz araçlara ait üst ve alt eşik değerleri kullanılarak hesaplanan süreler, gönüllü sürücülerin ortalama ivmelenme süreleri ile Akçelik tarafından tanımlanmış olan “normal” sürücüye ait sürelerle oranlanarak EOB değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, Tablo 4.10 ile Tablo 4.11’de görülmektedir.

Tablo 4.10 Hızlanma sürelerine göre EOB değerleri

Son erişilen hız (km/saat)		Hızlanma süresi (saniye)						
		Hızlanma ivmesi (m/sn ²)	Sürücülü Taşıtlar için	Sürücüsüz Sürücüsüz		EOB sürücüsüz üst	EOB sürücüsüz alt	EOB Ortalama
				taşıtlar için (a=1.37 m/sn ²)	taşıtlar için (a=0.76 m/sn ²)			
35	Sürücü ort.	1,68	20,83	25,55	46,05	1,23	2,21	1,72
	SIDRA	1,45	24,14	25,55	46,05	1,06	1,91	1,48
40	Sürücü ort.	1,71	23,39	29,20	52,63	1,25	2,25	1,75
	SIDRA	1,48	27,03	29,20	52,63	1,08	1,95	1,51
45	Sürücü ort.	1,74	25,86	32,85	59,21	1,27	2,29	1,78
	SIDRA	1,50	30,00	32,85	59,21	1,09	1,97	1,53
50	Sürücü ort.	1,77	28,25	36,50	65,79	1,29	2,33	1,81
	SIDRA	1,52	32,89	36,50	65,79	1,11	2,00	1,55
55	Sürücü ort.	1,79	30,73	40,15	72,37	1,31	2,36	1,83
	SIDRA	1,55	35,48	40,15	72,37	1,13	2,04	1,59
60	Sürücü ort.	1,82	32,97	43,80	78,95	1,33	2,39	1,86
	SIDRA	1,57	38,22	43,80	78,95	1,15	2,07	1,61
Ortalama EOB değerleri							Sürücü ort	1,79
							SIDRA	1,55

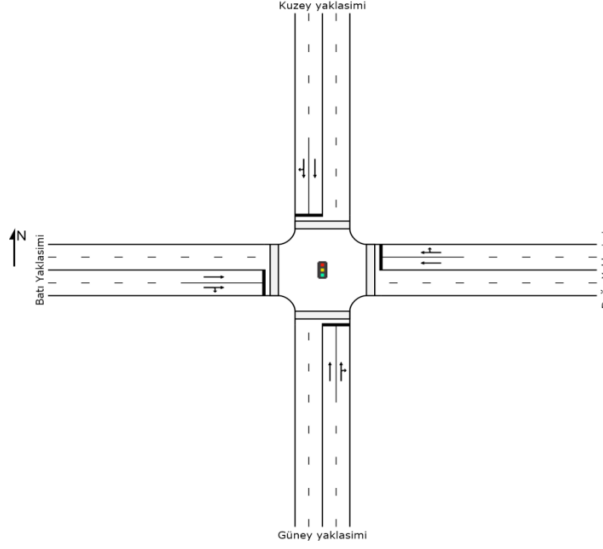
Tablo 4.11 Yavaşlama sürelerine göre EOB değerleri

Son erişilen hız hız (km/saat)		Yavaşlama süresi (saniye)						
		Yavaşlama ivmesi (m/sn ²)	Sürücülü Taşıtlar için	Sürücüsüz	Sürücüsüz	EOB sürücüsüz üst	EOB sürücüsüz alt	EOB Ortalama
				taşıtlar	taşıtlar			
			için (a=3.35 m/sn ²)	için (a=1.83 m/sn ²)				
35	Sürücü ort.	1,63	21,47	10,45	19,13	0,49	0,89	0,69
	SIDRA	1,55	22,58	10,45	19,13	0,46	0,85	0,65
40	Sürücü ort.	1,68	23,81	11,94	21,86	0,50	0,92	0,71
	SIDRA	1,60	25,00	11,94	21,86	0,48	0,87	0,68
45	Sürücü ort.	1,73	26,01	13,43	24,59	0,52	0,95	0,73
	SIDRA	1,65	27,27	13,43	24,59	0,49	0,90	0,70
50	Sürücü ort.	1,78	28,09	14,93	27,32	0,53	0,97	0,75
	SIDRA	1,69	29,59	14,93	27,32	0,50	0,92	0,71
55	Sürücü ort.	1,81	30,39	16,42	30,05	0,54	0,99	0,76
	SIDRA	1,73	31,79	16,42	30,05	0,52	0,95	0,73
60	Sürücü ort.	1,86	32,26	17,91	32,79	0,56	1,02	0,79
	SIDRA	1,77	33,90	17,91	32,79	0,53	0,97	0,75
				Ortalama EOB değerleri			Sürücü ort	0,74
							SIDRA	0,70

Tablolar incelendiğinde taşıtların hızlanma ve yavaşlama hareketlerine bağlı olarak EOB değerlerinde önemli değişikliklerin olduğu görülmektedir. Ancak bir kavşağın kapasitesinin belirlenmesinde hızlanma ivmesi daha çok önem taşımaktadır. Taşıtlar ne kadar hızla hareket ederek sinyalden ayrılırlarsa, kavşağın kapasitesinin de o oranda yüksek olabileceği söylenebilir.

Tablo 4.10'dan, sürücüsüz araçların, diğer araç ve altyapı sistemi ile haberleşmemesi durumunda EOB değerlerinin 1,48~1,86 arasında değişebileceği anlaşılmaktadır. Bu durum, özellikle ışıklı kavşak kapasitesinde önemli bir azalmaya yol açabilecektir.

Çalışmada, aaSIDRA programı kullanılarak sürücüsüz araçların ışıklı kavşaklardaki etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Şekil 4.16'da görülen dört kollu bir ışıklı kavşak modeli oluşturulmuştur. Tablo 4.12'de ise kavşağa gelen trafik hacimleri gösterilmiştir. Kavşağın Kuzey-Güney aksına ait yeşil sürenin 50 saniye, doğu-batı aksına ait yeşil sürenin 35 saniye olduğu ve toplam devre süresinin ise 85 saniye olduğu kabul edilmiştir. Senaryolarda, bir şeride ait ideal doygun akım değeri 1720 taşıt/saat olarak tanımlanmıştır (Çalışkanelli ve Tanyel, 2018).

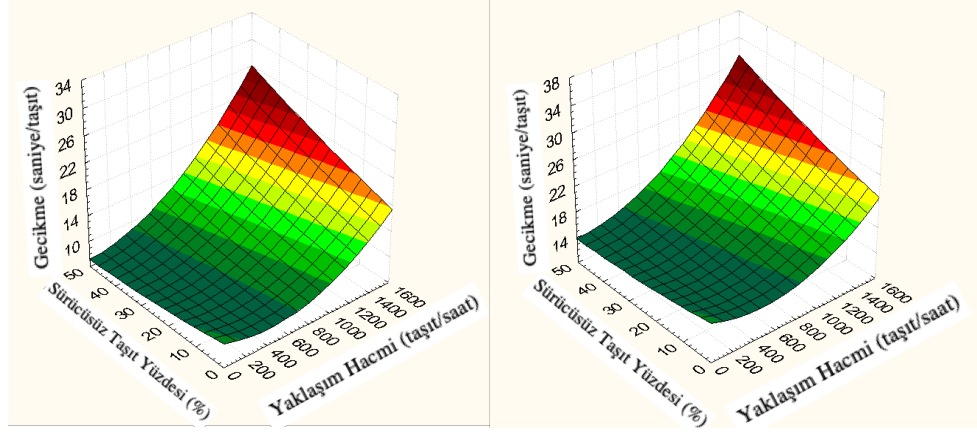


Şekil 4.16 Dört kollu ışıklı kavşak modeli

Tablo 4.12 Örnek kavşağa ait trafik hacimleri

Yaklaşım Kolu	Hacim (otomobil/saat)	
	Doğru Geçen	Sağa Dönen
Güney	1~1200	1~500
Kuzey	500	200
Doğu	250	100
Batı	250	100

aaSIDRA programında sürücüsüz araçlar, ayrı bir araç sınıfı olarak kabul edilmiştir. Sürücüsüz araçlara ait EOB değeri Akçelik (2011) tarafından tanımlanmış normal sürücülere kıyaslanarak ve “1,55” alınmıştır. Çalışmada, sürücüsüz araçlar dışında trafiğin tamamen otomobillerden oluştuğu düşünülmüştür. Sürücüsüz araçların kavşağa sadece güney yaklaşımından geldiği öngörülerek, farklı sürücüsüz araç yüzdeleri için güney yaklaşımına ait gecikme değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, Şekil 4.17’de görülmektedir.



(a) Doğru Geçen Akım (b) Sağa Döner Akım
Şekil 4.17 Farklı sürücüsüz araç yüzdeleri için güney yaklaşımına ait gecikme değerleri

Şekil 4.17 incelendiğinde, sürücüsüz araçların oranı arttıkça, güney yaklaşım koluna ait gecikme değerlerinin de önemli oranda arttığı görülmektedir. Buradan da sürücüsüz araçların diğer araçlarla ve altyapı sistemleriyle haberleşmemeleri durumunda kavşak başarımında önemli bir düşüşe yol açabilecekleri sonucuna ulaşılabilir. Bu sonuç, Le Vine ve diğer. (2015) tarafından bulunmuş olan sonuçla da örtüşmektedir.

BÖLÜM BEŞ

SÜRÜCÜSÜZ ARAÇLARIN KARMA TRAFİK KOŞULLARINDA IŞIKLI KAVŞAK BAŞARIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi tamamen sürücüsüz araçlardan oluşan ve çevreyle iletişimde olabilen sistemlerin hayatımıza girebilmeleri için gerek ekonomik gerek de sosyolojik ve hukuki açılardan büyük yatırımların yapılması gerekmektedir. Bu yatırımların yapılmasının da uzun süreler alacağı öngörülerek sürücüsüz araçların katıldığı karma trafik koşullarını incelemenin daha gerçekçi sonuçlara ulaştıracığı düşünülmüştür.

Günümüzde birkaç tane trafik akım karakteristiğinin bir arada incelenmesine olanak sağlayan VISSIM, AIMSUN, TRANSYT, SimTraffic gibi birçok benzetim programı bulunmaktadır (Çalışkanelli ve Tanyel, 2016). Bu programların birçoğunun ülkemiz trafik koşullarını tam olarak yansıtamamasının yanı sıra bu programları kullanarak sürücüsüz araçların da içinde bulunduğu karma bir trafik tanımlamak pek mümkün olamamaktadır. PTV VISSIM' in de aralarında olduğu bazı programlarda eklenen yeni modüllerle beraber sürücüsüz araçların da katıldığı karma trafik koşulları modellenebilmektedir. Ancak bu çalışmada sürücüsüz araçlarla ilgili olarak kabul edilen değerlerin programda tanımlanmış olan alt sınır değerlerinin dışında kalması, yeni bir benzetim modeli oluşturulması ihtiyacını doğurmuştur.

Böylece tek şeritli bir yaklaşım koluna sahip, bağımsız ışıklı bir kavşak için sürücüsüz araçların da katıldığı karma trafik koşulları altında, çevreyle iletişimin olup olmaması durumuna göre trafik akım niteliklerindeki değişimlerin incelenebileceği bir benzetim programı yazılmıştır. Programın kodu Visual Basic dilinde yazılmış olup raporlama çıktıları Excel programı üzerinden alınmaktadır.

5.1 Algoritma

Programda dikkate alınmış olan bazı konular, yapılmış olan kabuller ve programın işleyiş adımları aşağıda sıralanmıştır;

- a) Trafik akım niteliklerinin daha iyi modellenenebilmesi ve farklı koşullar altında karşılaştırılabilmesi amacı ile tanımlanmış olan değişkenler aşağıdaki gibi belirlenmiştir;
- Sistemdeki sürücü tipi oranı,
 - Sinyal süreleri,
 - Kavşak girişinden sinyal noktasına olan uzunluk ve sinyal noktasından kavşak çıkışına olan uzunluk (kontrol uzunluğu),
 - Sisteme katılacak toplam araç sayısı,
 - Zaman aralığı.
- b) Çözümler yapılırken hem çok fazla veri girişine gerek duyulması hem de sonuçlar yorumlanırken kolaylık sağlanması adına, 4.bölümde de bahsedildiği gibi 15 adet gönüllü sürücü benzer niteliklere sahip sürücüler aynı başlık altında gruplandırılarak 5 adete indirilmiştir. Bu 5 adet sürücü tipi belirlenirken SIDRA TRIP programında tanımlanmış olan sürücü tipleri temel alınmış ve başlıklar “Çok Saldırgan, Saldırgan, Normal, Yavaş, Çok Yavaş” olarak belirlenmiştir. Sisteme son halinde 5 adet sürücülü ve 1 adet sürücüsüz olmak üzere toplamda 6 adet araç tipi tanımlanmıştır.

Sürücülerin Bölüm 4’te anlatılan şekilde belirlenmiş olan hızlanma/yavaşlama ivmeleri ve hızlanma/yavaşlama ölçümleme katsayıları belirlenen sürücü tipi gruplarına göre ortalamaları alınarak yeniden hesaplanmıştır. Sürücüsüz araç tipi için ise bu değerler Bölüm 4’te değinilen alt ve üst sınır değerleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Sürücü tipleri, bunların hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ve hızlanma ve yavaşlama ölçümleme katsayıları Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Sürücülerin hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ve hızlanma ve yavaşlama ölçümleme katsayıları

Sürücü Tipi	Hızlanma İvmesi (m/sn ²)	Yavaşlama İvmesi (m/sn ²)	Hızlanma Ölçümleme Katsayıları	Yavaşlama Ölçümleme Katsayıları
Çok Yavaş	1,08	1,17	1,31	1,25
Yavaş	1,45	1,34	1,75	1,42
Normal	1,53	1,87	1,85	1,99
Saldırgan	1,75	2,08	2,12	2,20
Çok Saldırgan	2,17	2,48	2,62	2,63
Sürücüsüz	1,13	2,83	1,37	3,00

c) İstenilen çalışma duyarlılığına göre belirlenen zaman aralığı sisteme girilir. Zaman aralığı sonuç çıktısında ilk kolonda görülmektedir. (Tablo 5.2)

Programın en önemli özelliklerinden birisi zaman aralığının çok küçük duyarlılıklarla incelenebiliyor olmasıdır. Genellikle 1 saniye olarak kullanılan zaman aralığı 0,5 sn, 0,2 sn hatta 0,1 sn gibi duyarlılıklarda da çalışılabilmektedir. Böylece araçların hareketlerini çok küçük zaman aralıklarında inceleme üstünlüğü elde edilmekte ve daha detaylı gözlem yapılabilmektedir. Çalışmada 0,1 sn zaman aralığı seçildiğinde grafik çıktıları üzerinde araç hareketlerinin fazlaca detaylı olmasından ötürü yorum yapmanın zorlaşması nedeniyle 0,2 sn zaman aralığının kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 5.2 Zaman aralığının program çıktısında görünümü

ZAMAN(s)	ISIK	1. ARAÇ YOL(3)	2. ARAÇ YOL(6)	3. ARAÇ YOL(6)	4. ARAÇ YOL(3)	5. ARAÇ YOL(3)	6
8,8	Y	86,11111111	58,33333333	16,66666667			
9	Y	88,88888889	61,11111111	19,44444444			
9,2	Y	91,66666667	63,88888889	22,22222222			
9,4	Y	94,44444444	66,66666667	25			
9,6	Y	97,22222222	69,44444444	27,77777778			
9,8	Y	100	72,22222222	30,55555556	2,77777778		
10	Y	102,77777778	75	33,33333333	5,55555556		
10,2	S	105,55555556	77,45020964	35,90322591	8,002848567		
10,4	S	108,33333333	79,64904818	38,2933879	10,19298811		
10,6	S	111,11111111	81,65023818	40,52641653	12,17755514		
10,8	S	113,88888889	83,49275244	42,62080394	13,99412045		
11	S	116,66666667	85,20556281	44,59192344	15,67084607		
11,2	S	119,44444444	86,96370534	46,60837511	17,23012394		
11,4	S	122,22222222	88,76718004	48,67015894	18,68991966		
11,6	S	125	90,6159869	50,61029871	20,06420288		
11,8	S	127,77777778	92,51012594	52,59577065	21,49959078		
12	S	130,55555556	94,44959714	54,62657476	22,99608336		
12,2	S	133,33333333	96,43440051	56,70271103	24,40872072		
12,4	S	136,11111111	98,29864571	58,65425631	25,88246275		
12,6	S	138,88888889	100,2082231	60,65113376	27,41730946		
12,8	S	141,66666667	102,1631326	62,69334338	28,86884341	2,424944789	
13	S	144,44444444	104,1633743	64,61456035	30,38148203	4,569291826	
13,2	K	147,08333333	106,2089482	66,58110949	31,95522532	6,488080185	
13,4	K	149,5906241	108,2998542	68,5929908	33,44540402	8,222387458	
13,6	K	151,9732058	110,4360924	70,65020428	34,99668739	9,804587111	
13,8	K	154,2375889	112,4483272	72,58579834	36,46929962	11,25948484	
14	K	156,3899275	114,505894	74,56672458	38,00301653	12,60717138	

- d) Bağımsız ışıklı bir kavşak üzerinde sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi uygulanmasına karar verilmiş ve “Kırmızı=37sn”, “Sarı=3sn”, “Yeşil=50sn” ve devre süresi 90 saniye olmak üzere sinyal süreleri belirlenmiştir. Sistem çalıştırıldıktan 10 saniye sonra kırmızı ışık yandığı kabul edilmiştir. Belirlenmiş olan sinyal sürelerine göre kırmızı (K), yeşil (Y) ve sarı (S) süreler sonuç çıktısına 2.kolona denk gelecek şekilde yerleştirilir (Tablo 5.3).

Tablo 5.3 Işık sürelerinin ve renklerinin program çıktısındaki görünümü

ZAMAN(s)	ISIK	1. ARAÇ YOL(3)	2. ARAÇ YOL(6)	3. ARAÇ YOL(6)	4. ARAÇ YOL(3)	5. ARAÇ YOL(3)	6.
8,0	Y	86,11111111	58,33333333	16,66666667			
8,0	Y	88,88888889	61,11111111	19,44444444			
9,0	Y	91,66666667	63,88888889	22,22222222			
9,0	Y	94,44444444	66,66666667	25			
9,0	Y	97,22222222	69,44444444	27,77777778			
9,0	Y	100	72,22222222	30,55555556	2,77777778		
10,0	Y	102,77777778	75	33,33333333	5,55555556		
10,0	S	105,55555556	77,45020964	35,90322591	8,002848567		
10,0	S	108,33333333	79,64904818	38,2933879	10,19298811		
10,0	S	111,11111111	81,65023818	40,52641653	12,17755514		
10,0	S	113,88888889	83,49275244	42,62080394	13,99412045		
11,0	S	116,66666667	85,20556281	44,59192344	15,67084607		
11,0	S	119,44444444	86,96370534	46,60837511	17,23012394		
11,0	S	122,22222222	88,76718004	48,67015894	18,68991966		
11,0	S	125	90,6159869	50,61029871	20,06420288		
11,0	S	127,77777778	92,51012594	52,59577065	21,49959078		
12,0	S	130,55555556	94,44959714	54,62657476	22,99608336		
12,0	S	133,33333333	96,43440051	56,70271103	24,40872072		
12,0	S	136,11111111	98,29864571	58,65425631	25,88246275		
12,0	S	138,88888889	100,2082231	60,65113376	27,41730946		
12,0	S	141,66666667	102,1631326	62,69334338	28,86884341	2,424944789	
13,0	S	144,44444444	104,1633743	64,61456035	30,38148203	4,569291826	
13,0	K	147,08333333	106,2089482	66,58110949	31,95522532	6,488080185	
13,0	K	149,5906241	108,2998542	68,5929908	33,44540402	8,222387458	
13,0	K	151,9732058	110,4360924	70,65020428	34,99668739	9,804587111	
13,0	K	154,2375889	112,4483272	72,58579834	36,46929962	11,25948484	
14,0	K	156,3899275	114,505894	74,56672458	38,00301653	12,60717138	

- e) Araçlar, tepki süreleri de eklenerek kendileri için belirlenmiş olan sisteme giriş zamanları ve sıralarına göre kavşağa gönderilmeye başlanır. Sürücülerin çevre ile iletişimde olup olmama durumlarına göre tepki süreleri Tablo 5.4’te verilmiştir.

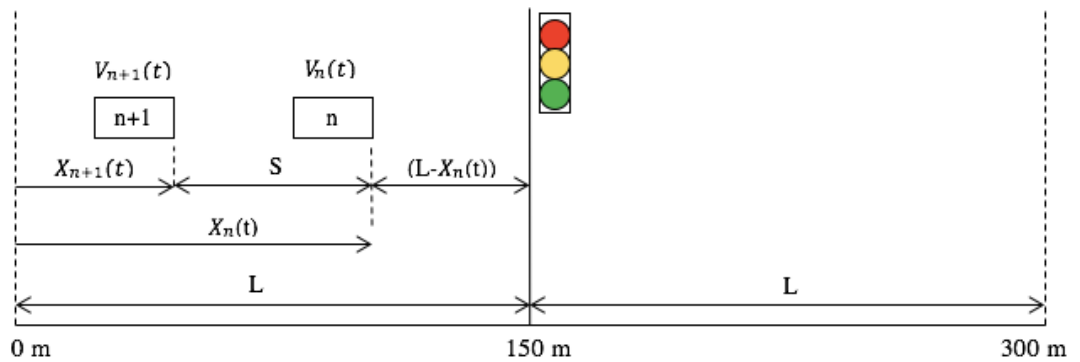
Sistemde karma trafik oluşturulabilmekte, istenilen oranda sürücü tipi oluşturulan tablolar sayesinde sisteme eklenebilmektedir. Burada tabloların çalışma düzeni rassallık üzerine kurgulanmıştır. Kendilerine birer kimlik numarası atanan her sürücü tipi için sistemde bulunması istenilen oranlar

belirlendikten sonra Excel’de tanımlı algoritmalarla normal dağılım koşullarında “Rastgele Sırala” komutu çalıştırılarak araçların sisteme giriş sıraları rassal olarak belirlenmiştir. Trafik akım hacmi ise 700 araç/saat olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5.4 Tepki süreleri

Sürücü Tipi	İletişim Yok	Araçlar Arası İletişim ve Altyapı ile İletişim Var (V2V+V2I)
Çok Yavaş	2,0	2,0
Yavaş	1,8	1,8
Normal	1,4	1,4
Saldırgan	1,0	1,0
Çok Saldırgan	0,8	0,8
Sürücüsüz	0,6	0,4

- f) Araçların kavşağa girdikleri noktadan sinyalin olduğu noktaya kadar olan uzunluk ve sinyalin olduğu noktadan araçların kavşaktan çıktıkları noktaya kadar olan uzunluk kontrol uzunluğu olarak tanımlanmıştır. Çalışmada kontrol uzunluğu, araçların durma uzunlukları göz önünde bulundurularak güvenli sınırlar içinde kalmalarını sağlayan 150 m olarak kabul edilmiştir. (Şekil 5.1)



Şekil 5.1 Kontrol uzunluğunun şematik gösterimi

n: öndeki araç

n+1: takip eden araç

X_n : öndeki aracın konumu (m)

X_{n+1} : takip eden aracın konumu (m)

V_n : öndeki aracın hızı (km/sa)

V_{n+1} : takip eden aracın hızı (km/sa)

S: bir aracın etkili uzunluğu= araç uzunluğu + araçlar arası uzunluk (m)

L: kontrol uzunluğu (m)

- g) Sistemdeki tüm araçların belirlenmiş olan zaman aralığına göre her an için kavşaktaki sinyal noktasına olan uzunlukları hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu uzunluk verileri sonuç çıktısında her aracın kendine ait olan kolon sütunlarından ilkinde eklenik olarak yazdırılmaktadır. Bu uzunluk verileri yardımıyla araçların seçilen zaman aralığına göre her an için hesaplanan hız verileri de sonuç çıktısında kendilerine ait olan kolonlardan ikincisine yazdırılmaktadır. (Tablo 5.5)

Tablo 5.5 Program çıktısında araçlara ait yol ve hız kolonlarının görünümü

ZAMAN(s)	ISIK	1. ARAÇ YOL(3)	1. ARAÇ HIZ(3)	2. ARAÇ YOL(6)	2. ARAÇ HIZ(6)	3. ARAÇ YOL(6)	3. ARAÇ HIZ(6)	4. ARAÇ YOL(3)	4. ARAÇ HIZ(3)
4,8	Y	30,55555556	50	2,777777778	50				
5	Y	33,33333333	50	5,555555556	50				
5,2	Y	36,11111111	50	8,333333333	50				
5,4	Y	38,88888889	50	11,11111111	50				
5,6	Y	41,66666667	50	13,88888889	50				
5,8	Y	44,44444444	50	16,66666667	50				
6	Y	47,22222222	50	19,44444444	50				
6,2	Y	50	50	22,22222222	50				
6,4	Y	52,77777778	50	25	50				
6,6	Y	55,55555556	50	27,77777778	50				
6,8	Y	58,33333333	50	30,55555556	50				
7	Y	61,11111111	50	33,33333333	50				
7,2	Y	63,88888889	50	36,11111111	50				
7,4	Y	66,66666667	50	38,88888889	50				
7,6	Y	69,44444444	50	41,66666667	50				
7,8	Y	72,22222222	50	44,44444444	50	2,777777778	50		
8	Y	75	50	47,22222222	50	5,555555556	50		
8,2	Y	77,77777778	50	50	50	8,333333333	50		
8,4	Y	80,55555556	50	52,77777778	50	11,11111111	50		
8,6	Y	83,33333333	50	55,55555556	50	13,88888889	50		
8,8	Y	86,11111111	50	58,33333333	50	16,66666667	50		
9	Y	88,88888889	50	61,11111111	50	19,44444444	50		
9,2	Y	91,66666667	50	63,88888889	50	22,22222222	50		
9,4	Y	94,44444444	50	66,66666667	50	25	50		
9,6	Y	97,22222222	50	69,44444444	50	27,77777778	50		
9,8	Y	100	50	72,22222222	50	30,55555556	50	2,777777778	50
10	Y	102,7777778	50	75	50	33,33333333	50	5,555555556	50
10,2	S	105,5555556	50	77,45020964	50	35,90322591	50	8,002848567	50
10,4	S	108,3333333	50	79,64904818	44,10377358	38,2933879	46,25806634	10,19298811	44,0512742

- h) Araçların birbirlerini takip hareketleri modellenirken Gipps (1981) tarafından geliştirilmiş olan güvenli aralık hareketine dayalı bir araç takip modeli oluşturulmuştur. Gipps tarafından geliştirilmiş olan bu model aynı zamanda AIMSUN programının araç takip modeli oluşturulurken de temel alınmıştır (Olstam ve Tapani, 2004).

Gipps'in araç takip modelinde araçlar serbest veya önünde araç olan olarak 2 şekilde sınıflandırılmışlardır. Serbest araç, sadece istenilen hız ve ivmelenme oranları ile sınırlandırılırken, takip eden araç olarak sınıflandırılmış araçlar önündeki araca çarpmamak ve güvenli bir sürüş ortamı yaratmak adına güvenli olarak tanımlanan bir takip uzunluğuna uymakla sınırlandırılır. Bu güvenli takip uzunluğunu korumak amacıyla takip eden araç hızını öndeki aracın hareketine göre ayarlamaya çalışır.

Tıpkı Gipps'in modelinde olduğu gibi bu model oluşturulurken de sistemde araçların ilk sırada olmaları veya takip eden araç olmaları durumlarına göre iki farklı çözümleme yapılmaktadır. İlk sırada olan araç için öncelikle sinyalin kırmızı veya yeşil yanma durumu değerlendirilir. Aracın sinyale ulaştığı anda ışığın yandığı renge bakılarak aracın hareketine devam ediş şekli belirlenir. Eğer araç sinyale vardığında ışık yeşil yanıyorsa, hızını değiştirmeden kavşaktan geçip gider. Fakat ışık kırmızı yanıyorsa araç hızını ayarlamalıdır. Bu durumda, aracın o an sahip olduğu hıza ve ivmeye göre yavaşlama uzunluğu hesaplanır. Yavaşlama uzunluğu sinyale kalan uzunluktan büyük ise araç Gipps tarafından önerilmiş olan (5.2a) bağıntısına göre yeniden en yüksek güvenli hızını ayarlar. Eğer yavaşlama uzunluğu sinyale kalan uzunluktan küçük ise araç kalan yolu normal yavaşlama süresinde alacak şekilde (5.2b) bağıntısına göre hızını ayarlar.

Her aracın ön tamponu ile arkasındaki aracın ön tamponu arasındaki uzunluk (bir aracın etkili uzunluğu) $S=7$ metreden daha az olmayacak şekilde kabul edilmiştir.

İlk araç için;

$$V_n(t+T) = \begin{cases} V_n(t+T)^*, & \text{Sinyal Kırmızı (K)} \\ V_n(t), & \text{Sinyal Yeşil (Y)} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$V_n(t+T)^* = \begin{cases} d_n^{max} \cdot T + \sqrt{(d_n^{max} \cdot T)^2 - d_n^{max} \cdot \left[2\{X_{n-1}(t) - S - X_n(t)\} - V_n(t) \cdot T - \frac{(V_{n-1}(t))^2}{\hat{d}_{n-1}} \right]}, & (L - X_n(t)) < L_d \\ \frac{(L - X_n(t))}{t_d}, & (L - X_n(t)) \geq L_d \end{cases} \quad (5.2a)$$

$$(5.2b)$$

Önünde araç olan yani takip eden araçlar için ise durum biraz daha farklıdır. Burada güvenli takip uzunluğunun sağlanabilmesi için sınır koşul olarak bir aracın etkili uzunluğu göz önüne alınmaktadır. Eğer takip eden araç için o anda etkili araç uzunluğu (S) kabul edilen sabit değerinden (7m) büyük ise araç hızın değiştirmesine gerek olmadan devam eder. Ancak etkili araç uzunluğu kabul edilen değerden küçük ise araç güvenli sürüşüne devam edebilmek için hızını yeniden ayarlamak zorundadır. Yine Gipps tarafından önerilmiş olan (5.3a) bağıntısına göre en büyük güvenli hızını ayarladıktan sonra yoluna devam eder.

Takip eden araçlar için ;

$$V_n(t+T) = \begin{cases} d_n^{max} \cdot T + \sqrt{(d_n^{max} \cdot T)^2 - d_n^{max} \cdot \left[2\{X_{n-1}(t) - S - X_n(t)\} - V_n(t) \cdot T - \frac{(V_{n-1}(t))^2}{\hat{d}_{n-1}} \right]}, & S < 7m \\ V_n(t), & S \geq 7m \end{cases} \quad (5.3a)$$

$$(5.3b)$$

- i) Araçların hızlanma/yavaşlama uzunluğu ve hızlanma/yavaşlama süresi değerleri, Akçelik ve Besley (2002)'in önerdiği (5.4) ve (5.5) bağıntıları yardımıyla hesaplanmıştır.

$$L_a = m_a (V_i + V_f) t_a / 3.6 \quad (5.4)$$

$$m_a = p_1 + p_2 V_f - p_3 V_i^{p_7} \quad (5.5)$$

L_d : hızlanma uzunluğu (m)

V_i : hızlanmada ilk hız (km/sa)

V_f : hızlanmada son hız (km/sa)

t_d : hızlanma süresi (sn)

m_d : model katsayısı

$$L_d = m_d (V_i + V_f)t_d/3.6 \quad (5.6)$$

$$m_d = p_1 + p_2 V_i - p_3 V_f^{p_7} \quad (5.7)$$

L_d : yavaşlama uzunluğu (m)

V_i : yavaşlamada ilk hız (km/sa)

V_f : yavaşlamada son hız (km/sa)

t_a : yavaşlama süresi (sn)

m_a : model katsayısı

$$t_a = \frac{(V_f - V_i)}{a_a} \quad (5.8)$$

$$a_a = f_a[p_1 + p_2 (V_f - V_i)^{0.5} - p_3 V_i]/3.6 \quad (5.9)$$

t_d : hızlanma süresi (s)

V_i : hızlanmada ilk hız (km/sa)

V_f : hızlanmada son hız (km/sa)

a_d : hızlanma ivmesi (m/sn²)

f_d : hızlanma ivmesi ölçümleme katsayısı

$$t_d = \frac{(V_i - V_f)}{a_d} \quad (5.10)$$

$$a_d = f_d[p_1 + p_2 (V_i - V_f)^{0.5} - p_3 V_f]/3.6 \quad (5.11)$$

t_a : yavaşlama süresi (sn)

V_i : yavaşlamada ilk hız (km/sa)

V_i : yavaşlamada son hız (km/sa)

a_i : yavaşlama ivmesi (m/sn²)

f_i : yavaşlama ivmesi ölçümleme katsayısı

p_1 , p_2 , p_3 ve p_7 bağıntı katsayıları olup aldıkları değerler Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

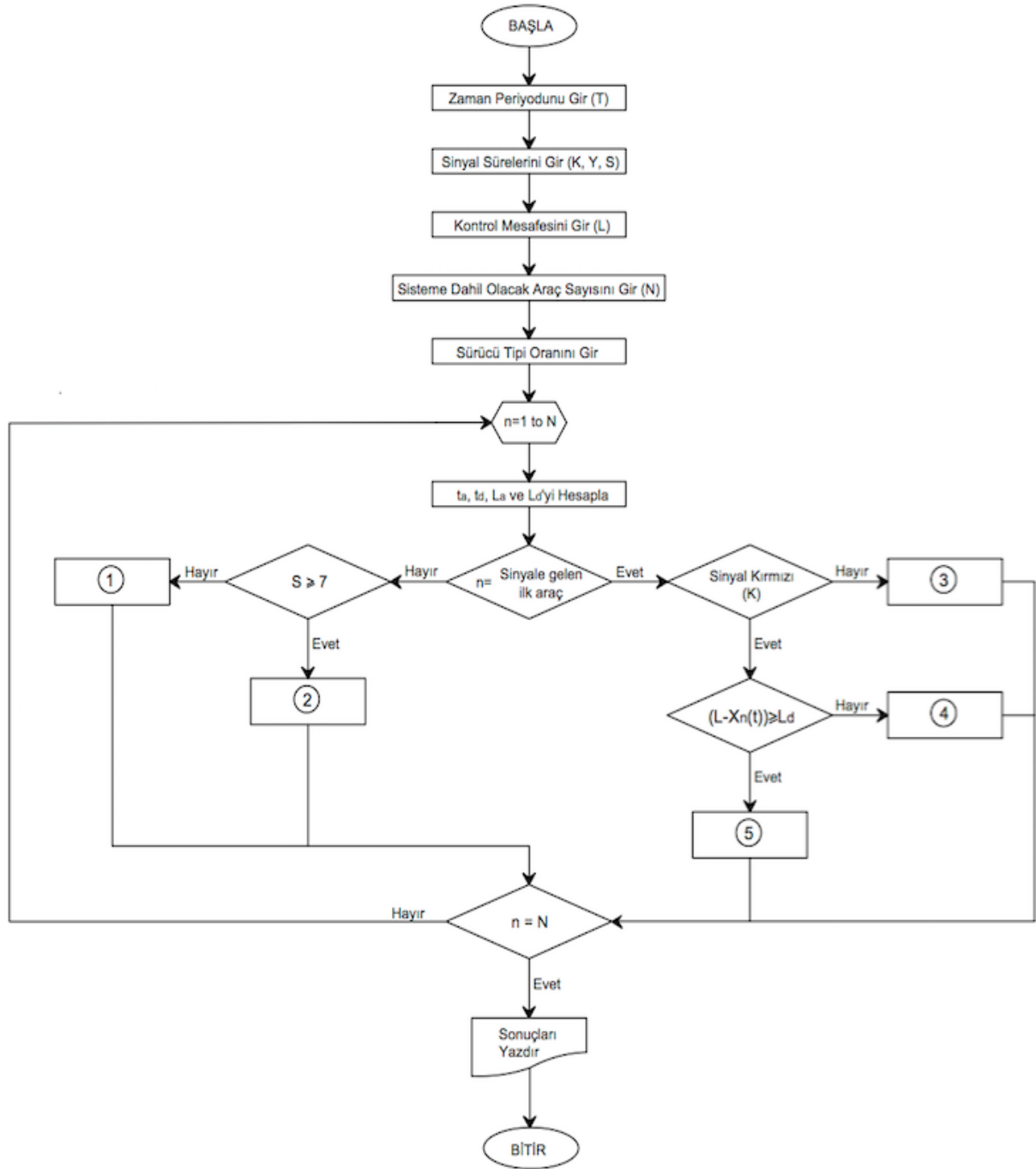
Tablo 5.6 Hızlanma/yavaşlama uzunlukları için p_1 , p_2 , p_3 ve p_7 bağıntı katsayıları

	p_1	p_2	p_3	p_7
Hızlanma Uzunluğu	0.467	0.00200	0.0100	0.8
Yavaşlama Uzunluğu	0.473	0.00155	0.0070	0.8

Tablo 5.7 Hızlanma/yavaşlama ivmeleri için p_1 , p_2 ve p_3 bağıntı katsayıları

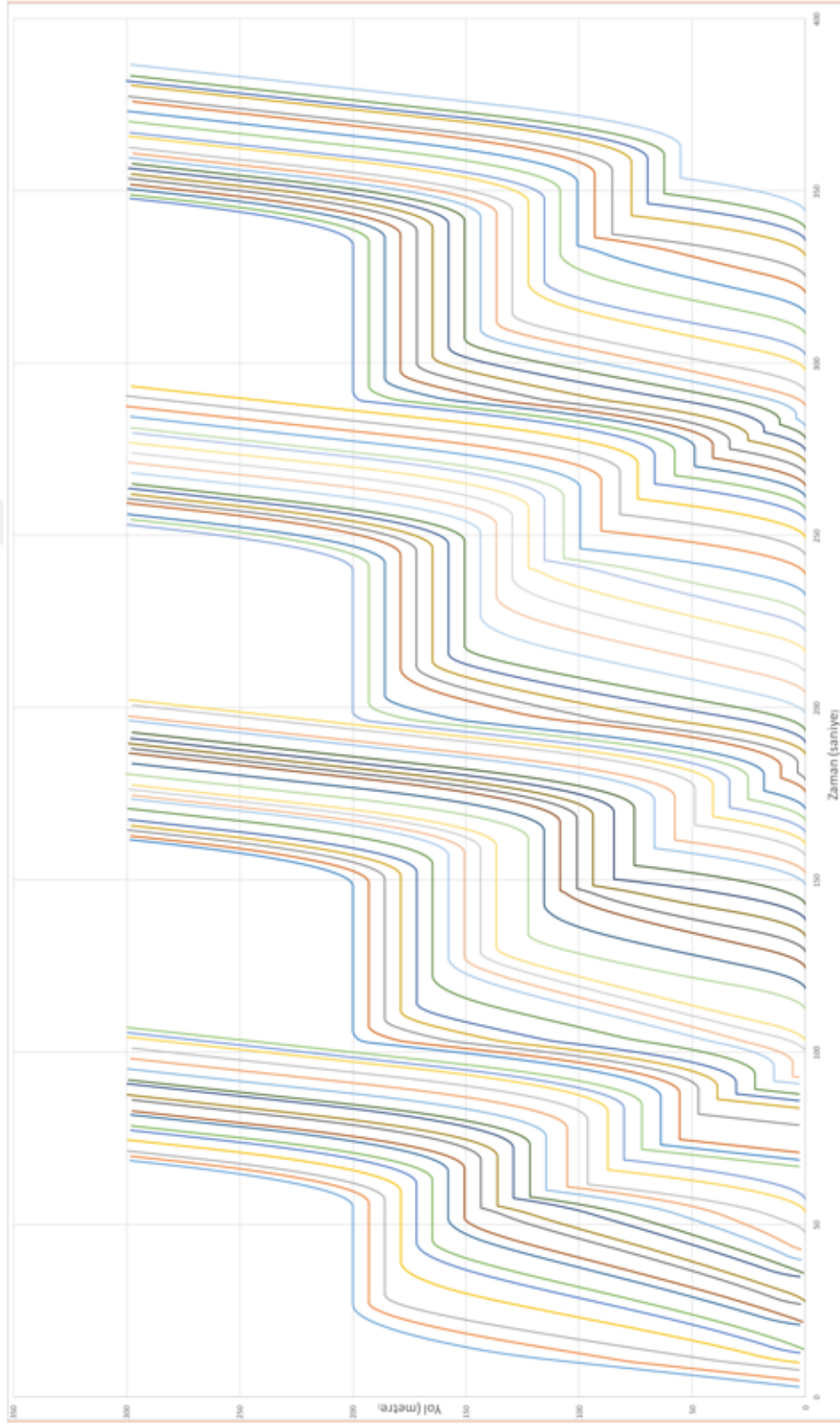
	p_1	p_2	p_3
Hızlanma İvmesi	0.467	0.00200	0.0100
Yavaşlama İvmesi	0.473	0.00155	0.0070

Benzetim programına ait akış şeması Şekil 5.2’ de gösterilmektedir. Şekil 5.3’te ise çözümlemeler sonucunda elde edilen yol-zaman grafiklerine ait bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Benzetim programı akış şeması

Akış şemasında numaralandırılarak gösterilmiş olan işlem kutularından; 1 numara denklem (5.3a)' yı, 2 numara denklem (5.3b)' yi, 3 numara denklem (5.1b)' yi, 4 numara denklem (5.2a)'yı, 5 numara ise denklem (5.2b)'yi simgelemektedir.



Şekil 5.3 Örnek yol-zaman grafiği

5.2 Benzetim Programı Çözümlmeleri

Çalışma kapsamında araçların birbirleriyle ve/veya çevreyle iletişimde olup olmama durumları, tepki sürelerindeki farklılıklarla modellenmeye çalışılmıştır. Her araç tipi için tepki süreleri belirlenmiş olup, sürücüsüz araçların tepki süreleri iletişim olup olmaması durumlarına göre değişkenlik göstermektedir (Tablo 5.4).

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere sürücüsüz araçların katıldığı trafik akım koşullarında güvenliğin ve kavşak kapasitelerinin artması, gecikmelerde azalma görülmesi gibi kazançların elde edilmesi beklenmektedir. Bu durumu gözlemleyebilmek amacıyla araçların farklı iletişim koşulları altında gecikme değerleri hesaplanmıştır.

Gecikme çözümlmeleri, her sürücülü araç tipi için sürücüsüz araçlarla birlikte trafikte bulunma oranlarına göre (%0, %10, %20,...., %100) ikili karşılaştırmalar şeklinde (Çok Yavaş ve Sürücüsüz, Yavaş ve Sürücüsüz, Normal ve Sürücüsüz, Saldırgan ve Sürücüsüz, Çok Saldırgan ve Sürücüsüz) yapılmıştır. Böylece sürücüsüz araçların hangi sürücü tipi davranışına yakın olduğunun bulunması amaçlanmıştır.

Araç başı ortalama gecikme değerleri; her bir aracın sistemde geçirdiği sürelerin toplamından, her bir aracın hiç durmadan sistemden çıkması için gereken süre çıkarılıp toplam araç sayısına bölünmesi ile bulunmuştur.

$$d = \frac{\sum T - N \cdot t}{N} \quad (5.12)$$

d: araç başına ortalama gecikme (sn)

T: her bir aracın sistemde geçirdiği toplam zaman (sn)

t: bir aracın hiç durmadan sistemden geçmesi için gereken zaman (sn)

N: araç sayısı

Her bir gecikme incelemesi 10 tekrarlı olarak çalıştırılmış ve yapılan Anova analizi sonucunda $p>0,05$ olduğundan örneklem sayısını artırmaya gerek duyulmamış, seriler arasında anlamlı bir fark bulunmadığından 10 tekrar yeterli görülmüştür (Tablo 5.8).

Tablo 5.8 Regresyon analizi sonuç tablosu

ANOVA						
	SS	df	MS	F	P-değeri	F kritik
Gruplar Arasında	2,49252	9	0,27695	0,0084	1	1,99911
Gruplar İçinde	2637,56	80	32,9694			
Toplam	2640,05	89				

5.2.1 Hiç İletişim Yok

Sistemde hiç iletişim olmaması durumunda araçlar birbirlerinden veya çevredeki herhangi bir uyarıcıdan sinyal alamayacaklarından ötürü tepki sürelerinin çok küçük olması beklenemez. Sürücü tiplerine göre değişkenlik gösteren tepki sürelerinin saldırgan sürücülerde yavaş sürücülere oranla daha düşük olduğu bilinmektedir. Sürücüsüz araçlar ise çevreden gelebilecek ani tehlikelere karşı güvenli sürüşe devam edebilmeleri için çok yüksek ivmelenme değerlerine sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu nedenle tepki süreleri açısından değerlendirildiklerinde, hızlı bir şekilde hareket almaları için küçük tepki sürelerine sahip olmaları gerektiği anlaşılmaktadır. İletişimsiz ortamlarda araç tiplerine göre belirlenmiş olan tepki süreleri Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9 İletişimsiz ortamda kabul edilen tepki süreleri

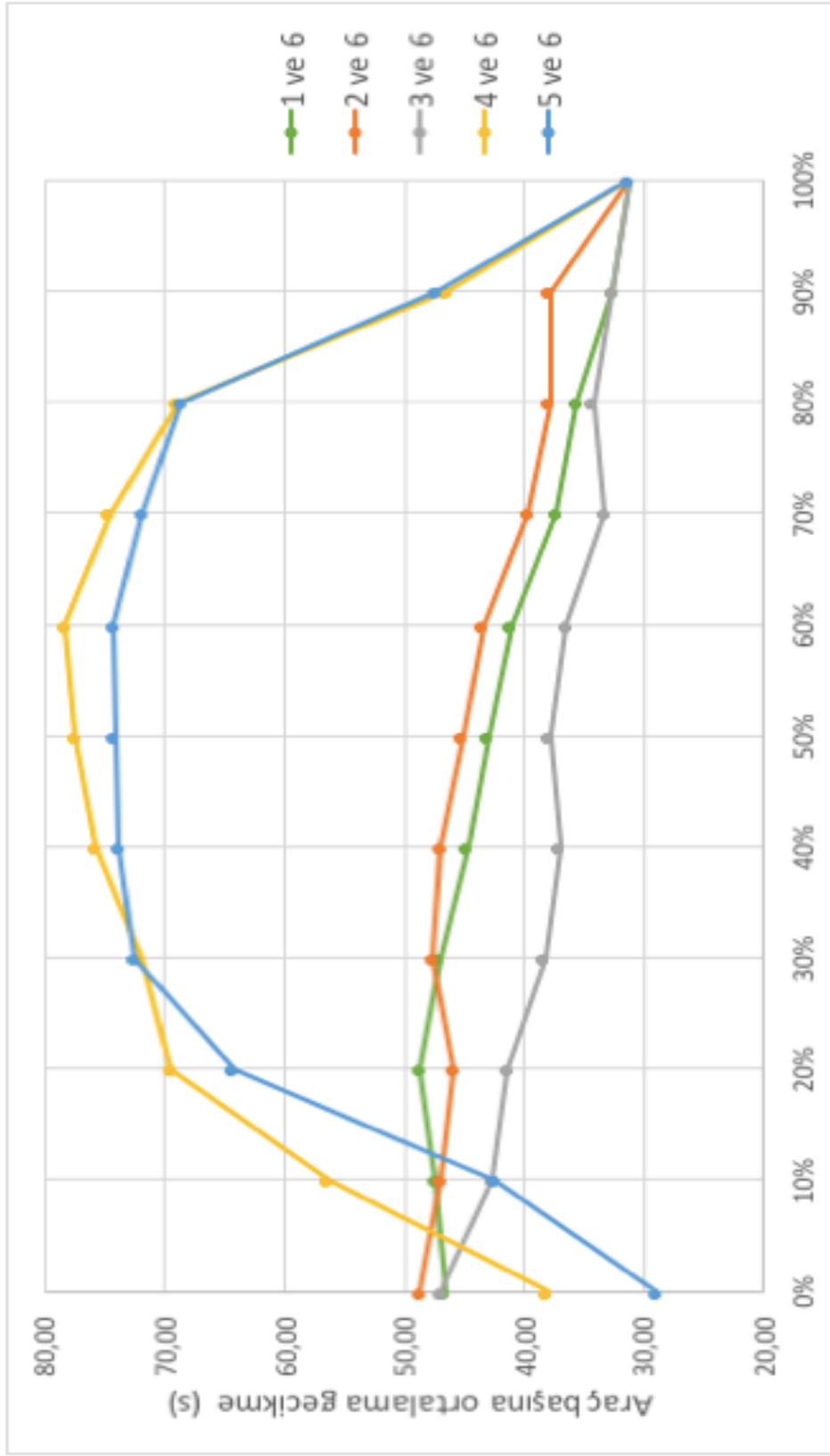
	Çok Yavaş	Yavaş	Normal	Saldırgan	Çok Saldırgan	Sürücüsüz
Tepki Süresi (sn)	2,0	1,8	1,4	1,0	0,8	0,6

Önceki bölümde anlatıldığı şekilde hesaplanan araç başına ortalama gecikme değerleri Tablo 5.10’da verilmiş olup, sürücüsüz araçların trafikte bulunma oranlarına göre gecikmelerdeki değişim grafiği Şekil 5.4’te görülmektedir. Grafikte numaralandırılmış şekilde gösterilen araç tipleri aşağıdaki gibidir;

- 1- Çok Yavaş
- 2- Yavaş
- 3- Normal
- 4-Saldırgan
- 5- Çok Saldırgan
- 6- Sürücüsüz

Tablo 5.10 Hiç İletişim olmayan sistemde araç başına ortalama gecikme değerleri

	İletişim Yok										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1 ve 6	46,67	47,32	48,62	47,07	44,69	42,94	40,99	37,32	35,62	32,61	31,16
2 ve 6	48,68	46,91	45,92	47,55	46,93	45,13	45,40	39,70	36,81	38,78	31,16
3 ve 6	46,93	42,63	41,37	38,29	36,98	38,78	36,48	33,21	34,22	32,54	31,16
4 ve 6	38,00	56,32	68,50	71,97	75,74	77,39	78,25	74,53	68,97	46,46	31,16
5 ve 6	28,89	42,46	64,20	72,49	73,79	74,08	74,20	71,79	68,62	47,34	31,16



Şekil 5.4 İletişim yokken gecikme grafikleri

Şekil 5.4'teki grafik incelendiğinde trafik akımı içerisindeki sürücüsüz araç yüzdelilerindeki değişimin araç başına ortalama gecikmeler üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. Gecikmelerin azalmasında sürücüsüz araçların tepki sürelerinin düşük olması sebebiyle kavşakta kuyruk boşalımının hızlı olmasını sağlamaları ve hızlanma ve yavaşlama ivmeleri yüksek olduğundan ötürü durma ve kalkma gecikme sürelerinin az olmasının etkisi vardır.

Çok Yavaş, Yavaş ve Normal sürücü tipleri için, sürücüsüz araçlarla birlikte katıldıkları trafik akım koşullarında sürücüsüz araç yüzdeleri arttıkça araç başına ortalama gecikme değerlerinin de azaldığı görülmektedir. En düşük gecikme değerlerinin sürücüsüz araçların Normal sürücülerle birlikte trafiğe katıldıkları senaryolarda olduğu görülmektedir. Bu da en ideal trafik akım koşullarının Normal sürücü davranışları gözlemlendiğinde oluşacağını göstermektedir.

Saldırgan ve Çok Saldırgan sürücüler için ise sürücüsüz araç yüzdeleri %60 oranlarına kadar yükseldikçe diğer sürücü tiplerinde görülenin tam tersine, gecikme değerlerinde büyük bir artış gözlemlenmektedir. Ancak sürücüsüz araç yüzdesi %60'ı geçip %100'e doğru ilerledikçe gecikmeler azalmaya başlayıp sürücüsüz araçların oranının %0 olduğu zamanki değerlere kadar düşmektedir. Bu durumda, trafik akımında homojenliğin azalmasının gecikmelerin artmasına neden olduğu sonucuna varılabilir. Grafik incelendiğinde ilk başlarda çok düşük olan sürücüsüz araç yüzdelilerinde gecikmelerin de az olduğu ancak sürücü tiplerinin oranları eşitlenmeye başladıkça (homojenlik azaldıkça/araç türleri farklılaştıkça) gecikmelerin arttığı daha sonra ise sürücüsüz araç yüzdesi %100'e yaklaştıkça yani trafik tekrar homojen haline geri dönmeye başladıkça gecikmelerin azalarak ilk baştaki değerlerine geri döndüğü görülmektedir.

Grafikten görülebileceği üzere Saldırgan ve Çok Saldırgan sürücülerle beraber trafik akımına katılmış olan sürücüsüz araç oranlarının %0 ve %100 olduğu durumlarda gecikme değerleri birbirlerine çok yakındır. Fakat burada sürücüsüz araç oranının %100 olduğu koşullarda güvenlik düzeyinin %0 olduğu duruma göre çok daha yüksek olacağı unutulmamalıdır.

5.2.2 Taşıtlar Arasında ve Çevre/Altyapı ile İletişim Var (V2V+V2I)

Hem taşıtlar arasında hem de altyapı ile iletişimin olduğu sistemlerde sürücüsüz araçların gecikmelerin azaltılmasında ve kavşak başarımında önemli etkilerinin olması beklenmektedir. Hem sistemle hem de birbirleriyle iletişimde olmalarının üstünlüğü ile sürücüsüz araçların tepki süreleri çok küçük değerler alabilirler. Ancak bu durumun sürücülü araç tipleri üzerinde bir etkisi olmayacağından, onların tepki süreleri hiç iletişim olmayan sistemdeki değerlerle aynı alınmıştır. İletişimli ortamlarda araç tiplerine göre belirlenmiş olan tepki süreleri Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11 İletişimli ortamda kabul edilen tepki süreleri

	Çok Yavaş	Yavaş	Normal	Saldırgan	Çok Saldırgan	Sürücüsüz
Tepki Süresi (sn)	2,0	1,8	1,4	1,0	0,8	0,4

Hesaplanan araç başına ortalama gecikme değerleri Tablo 5.12’de verilmiş olup, sürücüsüz araçların trafikte bulunma oranlarına göre gecikmelerdeki değişim grafiği Şekil 5.5’te görülmektedir. Grafikte numaralandırılmış şekilde gösterilen araç tipleri yine aşağıdaki gibidir;

- 1- Çok Yavaş
- 2- Yavaş
- 3- Normal
- 4-Saldırgan
- 5- Çok Saldırgan
- 6- Sürücüsüz

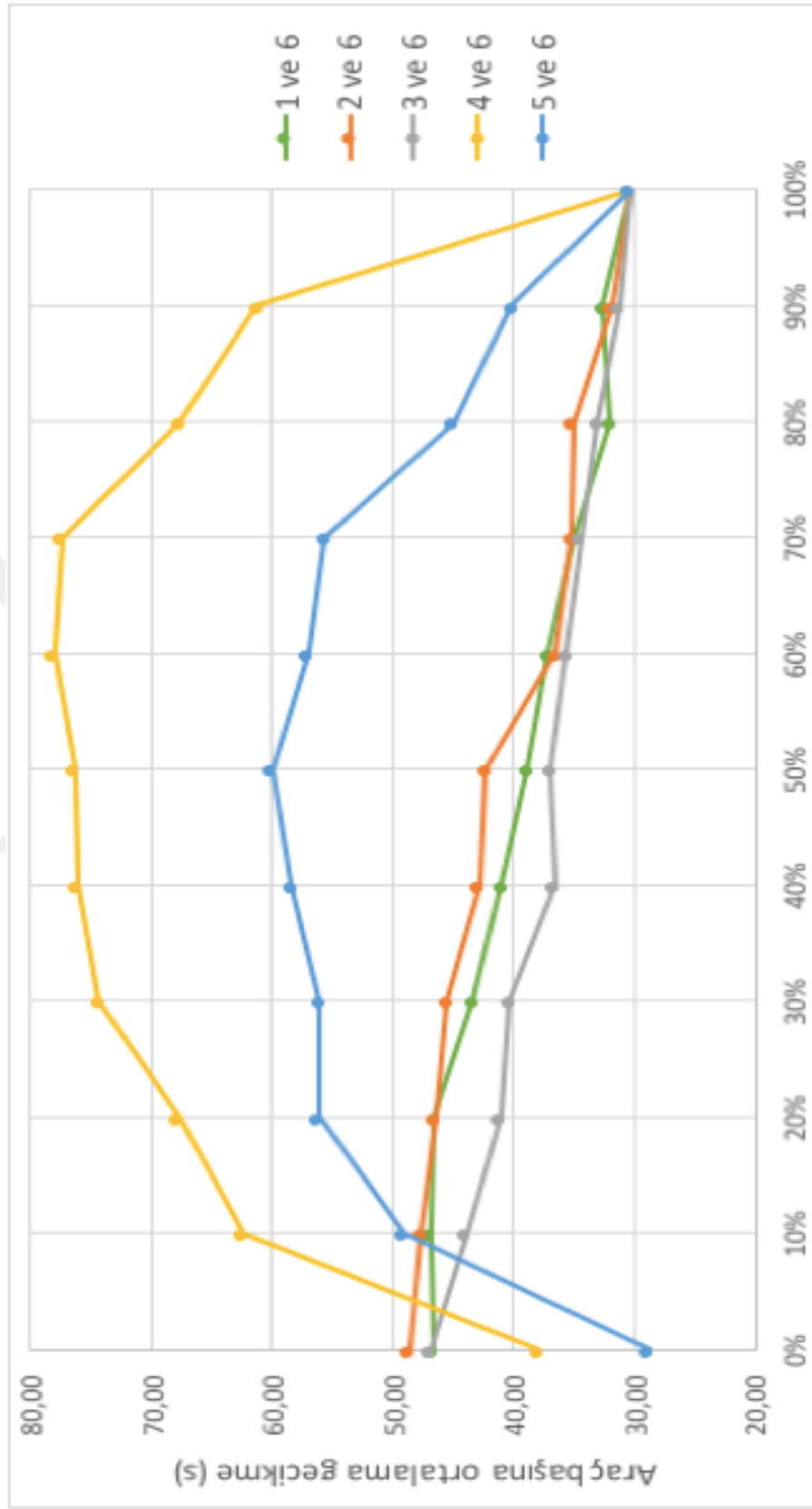
Şekil 5.5’teki grafik incelendiğinde, hiç iletişim olmayan sistemde olduğu gibi Çok Yavaş, Yavaş ve Normal sürücüler için sürücüsüz araç yüzdeleri arttıkça araç başına ortalama gecikme değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Bu durumu sürücüsüz araçların tepki sürelerinin ve durma/kalkma gecikmelerinin az olması sağlamaktadır.

Burada da en düşük gecikme değerlerinin Normal sürücülerle sürücüsüz araçların birlikte katıldığı trafik akım koşullarında olduğu açıkça görülmektedir.

Yine Şekil 5.5'teki grafikten, Saldırgan ve Çok Saldırgan sürücüler için sürücüsüz araç yüzdeleri %50-%60 oranlarına ulaştıkça gecikme değerlerinin artmakta olduğu görülmektedir. Sürücüsüz araç oranı %100 oranına yaklaştıkça ise yine azalarak %0 olduğu zamanki değerlere inmektedir. Ancak burada hiç iletişim olmayan ortamdan farklı olarak Çok Saldırgan ve sürücüsüz araçların birlikte bulunduğu akım koşullarında ortalama gecikme değerlerinin hiç iletişim olmayan ortama kıyasla belirgin ölçüde azaldığı görülmektedir.

Tablo 5.12 V2V+V2I iletişimli sistemde araç başına ortalama gecikme değerleri

	V2V+V2I										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1 ve 6	46,67	46,88	46,59	43,35	40,99	38,86	37,20	35,00	32,02	32,59	30,42
2 ve 6	48,68	47,69	46,52	45,51	40,81	42,30	36,53	35,21	35,16	31,85	30,42
3 ve 6	46,93	43,87	41,13	40,36	36,64	36,95	35,63	34,44	33,05	31,28	30,42
4 ve 6	38,00	62,45	67,75	74,33	76,19	76,39	78,09	77,39	67,67	61,21	30,42
5 ve 6	28,89	49,03	56,14	56,05	58,46	60,02	57,08	55,60	43,96	40,13	30,42



Şekil 5.5 V2V+V2I iletişimli ortamda gecikme grafikleri

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yakın gelecekte hayatımıza girmesi beklenen sürücüsüz araçların katılacağı trafik akım koşullarında, çevresel ortamların birbirleri ile iletişimli olup olmama durumları da göz önünde bulundurularak, trafik akım niteliklerinde oluşabilecek değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Öncelikle sahadan toplanan veriler yardımıyla gönüllü sürücülerin trafik içerisindeki davranışlarının belirlenmesi için çözümlemeler yapılmıştır. Bu çözümlemeler sonucunda sürücülerin hızlanma ve yavaşlama davranış farklılıklarının modellenmesini sağlayan sürücü nitelikleri belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre sürücüler SIDRA TRIP programında kabul edilmiş olan sürücü tiplerine göre (Çok Yavaş, Yavaş, Normal, Saldırgan ve Çok Saldırgan) sınıflara ayrılmıştır. Çözümlemelere göre sürücülerin hızlanma davranışlarının, yavaşlama davranışlarına kıyasla daha fazla benzerlik gösterdiği ve hızlanma aşamasında çoğu sürücünün yüksek hızlanma ivmesi ile hareket ettiği görülmüştür. Sürücülerin yavaşlama davranışları incelendiğinde ise sürücüler arasındaki farklılıkların daha belirgin olduğu söylenebilmektedir.

Bu farklı sürücü türlerinin ve aynı koşullar altındaki sürücüsüz araçların davranışları SIDRA TRIP programında üretilen senaryolar yardımıyla çözümlenmiş ve program çıktıları kullanılarak sürücüsüz araçlar için birer eşdeğer otomobil birimi değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu analizler, sürücüsüz araçların birbirleriyle ve çevreyle iletişimlerinin olmadığı durum için yapılmıştır. Sürücüsüz araçların yavaşlama hareketleri açısından 0,65 ile 0,79 eşdeğer otomobil birimi arasında, hızlanma hareketleri açısından ise 1,48 ile 1,86 eşdeğer otomobil birimi değerleri arasında yer aldığı bulunmuştur. Çözümlemeler sonucunda sürücüsüz araçların birbirleriyle ve altyapı sistemleriyle iletişimde olmamaları halinde karma trafik koşullarında kavşak performansında önemli bir azalmaya yol açabilecekleri görülmüştür.

Araçların trafik akımı içerisindeki hareketlerinin modellenmesinde önemli etkileri olan yavaşlama/hızlanma ivmeleri ve tepki süreleri gibi değişkenlerin, sürücüsüz araçlar için de hazır benzetim programlarındaki sınır değerlerine bağlı kalınmadan seçilebilmesi amacıyla çalışma kapsamında bir program yazılmıştır. Bu program sayesinde hem sürücülü hem de sürücüsüz araçların birlikte katıldıkları karma trafik akımlarında birçok farklı koşul ve değişkenler belirlenerek çözümlemelerin yapılması sağlanmıştır. Araçların hiç iletişim olmayan ve çevreyle ve birbirleriyle iletişimlerinin olduğu farklı çevre koşulları altında trafik akım niteliklerine etkileri gecikmeler açısından incelenmiştir.

Gecikme çözümlemelerinin sonuçları incelendiğinde sürücüsüz araçların hem iletişimsiz ortamlarda hem de çevreyle ve birbirleriyle iletişimde oldukları ortamlarda, en düşük gecikme değerlerinin Normal sürücü davranışı gösteren araçlarla birlikte katıldıkları akım koşullarında görüldüğü saptanmıştır.

Sürücüsüz araçların Çok Yavaş, Yavaş ve Normal sürücülerle birlikte katıldıkları trafik akım koşullarında, gecikme değerlerinin hem iletişimli hem de iletişimsiz ortam koşullarında sürekli olarak azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

İletişimsiz ortam koşulları altında sürücüsüz araçların Saldırgan ve Çok Saldırgan sürücülerle birlikte yapılmış olan gecikme analizleri ve grafikler incelendiğinde; değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Akım içerisindeki sürücüsüz araç yüzdesi arttıkça %60~70 oranlarına kadar gecikmelerin de artarak en yüksek değerlerine ulaştığı fakat sürücüsüz araç oranı daha da yükseldikçe gecikmelerin azalmaya başlayarak hiç sürücüsüz araç olmadığı zamanki gecikme değerlerine yaklaştığı görülmüştür.

Sürücüsüz araçların birbirleriyle ve çevreyle iletişimde oldukları çevresel ortamlarda Saldırgan ve Çok Saldırgan sürücülerle birlikte yapılan analizlerde; iletişimsiz ortamlarda olduğu gibi sürücüsüz araç yüzdesi arttıkça %60~70 oranlarına kadar gecikmelerin de artarak en yüksek değerlerine ulaştığı fakat sürücüsüz araç oranı daha da yükseldikçe gecikmelerin azalmaya başlayarak hiç sürücüsüz araç olmadığı

zamanki gecikme değerlerine yaklaştığı görülmüştür. Fakat iletişimsiz ortam koşullarından farklı olarak, çok Saldırgan sürücülerle birlikte katıldıkları akım koşullarında sürücüsüz araçların gecikme değerlerini büyük oranda düşürdüğü sonucunu elde edilmiştir.

İleride sürücüsüz araçlarla ilgili olarak yapılması planlanan çalışmalarda ülkemiz trafik akım koşullarının ve iletişimsiz/iletişimli  evre koşullarının daha iyi tanımlanabileceği benzetim programları oluşturularak, farklı sürücüsüz araç ortamları için çözümler yapılması önerilmektedir. Bu sayede sürücüsüz araçların ve iletişimli ortamları tanımlayan uygun altyapı sistemlerinin getireceği üstünlüklerden en etkin şekilde faydalanılması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abraham, Z., (2015) *Identifying the Optimal Highway Driving Conditions for the Integration of Manned and Autonomously Vehicles*. B.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, ABD.
- Akçelik, A. (1998), *Roundabouts: Capacity and Performance Analysis*. ARRB Transportation Research Ltd. Research Report ARR 321. Australia.
- Akçelik, R. ve Besley, M. (2002). *Queue discharge flow and speed models for signalised intersections*. Adelaide: 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
- Akçelik, R., (2011) *SIDRA TRIP User Guide*, Akçelik & Associates Pty. Ltd.
- Akçelik, R., Besley, M., (2001) “*Acceleration and Deceleration Models*”. In: 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR). University of South Australia, Adelaide, Australia.
- Akçelik, R., Besley, M., & Roper, R. (1999). *Fundamental relationships for traffic flows at signalized intersections*. ARRB Transportation Research Ltd., Research Report ARR 340.
- Bester, C. J. & Meyers, W. L. (2007). *Saturation flow rates*. In Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference (560-568), Pretoria.
- Bham, G.H.; Benekohal, R.F. (2001) “*Acceleration Behavior of Drivers in a Platoon*” Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design Snowmass Village at Aspen, Colorado SA August 14-17; 280-285.

- Bimbraw, K., (2015). “*Autonomous Cars: Past, Present and Future: A Review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology*”. ICINCO 2015- 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 191-198.
- Bonneson, J. A. (1992). *Study of headway and lost time at single-point urban interchanges*. Transportation Research Record, 1365, 30-39.
- Chang M. S., Messer C. J. and Santiago A. J. (1985) “*Timing traffic signal change intervals based on driver behavior.*” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1027, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 20-30.
- Cranswick, M., (2013). Pontiac Firebird: The Auto-Biography. Veloce Publishing Ltd.
- Çalışkanelli S. P., Özuysal M, Coşkun, F., Tanyel S, (2013) "*Sinyalize Kavşaklardaki Başlangıç Tepki Süresinin İncelenmesi*" 10. Ulaştırma Kongresi, İzmir, 167-177.
- Çalışkanelli, S. P. (2010). *Sinyalizasyon sistemlerinden ayrılan araçların takip aralığı dağılımının incelenmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Çalışkanelli, S.P., Tanyel, S. (2016). “*Denetimsiz Kavşaklarda Yanyol Katılım Kapasitesinin Modellenmesi*”. İMO Teknik Dergi, 7309-7324, 446.
- Çalışkanelli, S.P., Tanyel, S. (2018). “*Investigating the driver’s response time at signalized intersections*”. Transport, 33, 380–388.
- DARPA, (2004). *Grand Challenge Final Report*. 4 Nisan 2018. http://archive.darpa.mil/grandchallenge/docs/Grand_Challenge_2005_Report_to_Congress.pdf

- Dresner, K., Stone, P., (2008) “*A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management*”. Journal of Artificial Intelligence Research 31, 591–656.
- EUREKA, (2015). *30th Anniversary Report*. 4 Nisan 2018, <http://www.eurekanetwork.org/content/making-history-eureka-30th-anniversary-report>
- Ferreira, M., d’Orey, P.M., (2012) “*On the Impact of Virtual Traffic Lights on Carbon Emissions Mitigation*”. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 13, 284–295.
- Gazis, D., Herman R. and Maradudin A. (1960) “*The problem of the amber signal in traffic flow*”. Operations Research 8, 112-132.
- Gedizlioğlu, E. (1979). *Denetimsiz Kavşaklarda Yanyol Sürücülerinin Davranışlarına Göre Pratik Kapasite Saptanması İçin Bir Yöntem*. Doktora Tezi, İ.T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Girovský, P., & Fekete, J., (2017). “*Maintaining Vehicle Speed Using A Mechanical Cruise Control*”. Acta Electrotechnica et Informatica, 17, (2).
- Institute of Transportation Engineers (2009) *Traffic Engineering Handbook*, 5th Edition, Publication No. TB-010A, Washington D.C., A.B.D.
- Jin X., Zhang Y., Wang F., Li L., Yao D., Su Y., Wei Z. (2009). *Departure headways at signalized intersections: A log-normal distribution model approach*. Transportation Research Part C, 17, 318-327.
- Joseph, J., & Chang, G. L. (2005). *Saturation flow rates and maximum critical lane volumes for planning applications in Maryland*. Journal of Transportation Engineering, ASCE 131, 946-952.

- Kanaris, A., Ioannou, P., Ho, F.S., (1997) “*Spacing and Capacity Evaluations for Different AHS Concepts. Automated Highway Systems*”, Ioannou, P. (Ed.), Springer US, 125-171.
- Kesting, A., Treiber, M., Schonhof, M., Helbing, D., (2008) “*Adaptive Cruise Control Design for Active Congestion Avoidance*”. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 16, 668-683.
- Le Vine, Liu, X., Zhenh, F., Polak, J., (2015b) “*Automated Cars: Queue Discharge at Signalized Intersections with ‘Assured-Clear-Distance-Ahead’ Driving Strategies*”. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 62, 35-54.
- Leutzbach, W., (1988) “*Introduction to the theory of traffic flow*”, Berlin, Springer Verlag.
- Li, Z., Elefteriadou, L., Ranka, S., (2014) “*Signal Control Optimization for Automated Vehicles at Signalized Intersections*” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 49, 1-18.
- Lin, F. B., & Tseng, P. Y. (2005). *Fallacies and implications of conventional saturation flow model of queue discharge behavior at signalized intersections*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, 1610-1623.
- Litman, T., (2018). “*Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*”. Victoria Transport Policy Institute.
- Long, G. (2000) “*Acceleration Characteristics of Starting Vehicles*”, Transportation Research Board 79th Annual Meeting January 9-13, Washington, DC.
- Mathew, Tom V., (2014). *Signalized Intersection Delay Models*. Transportation Systems Engineering.

- May, A. D. (1990), *Traffic Flow Fundamentals*. Printince Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- McShane W. R., Roess R. P. ve Prassas E. S. (1998). *Traffic Engineering* (2nd edition). New Jersey: Prentice Hall.
- Minh, C. C. ve Sano, K. (2003). *Analysis of motorcycle effects to saturation flow rate at signalized intersection in developing countries*. Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5, 1211-1222.
- Murat, Y. (1996). *Denizli Şehiriçi kavşaklarındaki trafik akımlarının bilgisayarla incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Denizli, Pamukkale Üniversitesi.
- Nuttymaki, J., & Pursula, M. (1996). *Saturation flows at signal-group-controlled traffic signals*. Transportation Research Record 1572, 970233.
- Niels, T.; Erciyas, M.; Bogenberger, K. (2018). “*Impact of connected and autonomous vehicles on the capacity of signalized intersections - Microsimulation of an intersection in Munich*”; Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018. Vienna, Austria.
- Olstam J. J., Tapani A., (2004). “*Comparison of Car-following Models*”, VTI meddelande 960A, Swedish National Road and Transport Research Institute.
- Society of Automotive Engineers, (2014). *J3016 Numaralı Standart*. 5 Nisan 2018. https://www.smmmt.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/automated_driving.pdf
- Tanyel, S. (2001). *Türkiye’deki Dönel Kavşaklar İçin Kapasite Hesap Yöntemi*. Doktora Tezi. İ.T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İstanbul
- Temple, D. W., Dennis A., Chuck J., (2006). *GM's Motorama: the glamorous show cars of a cultural phenomenon*, Motorbooks.

Transportation Research Board (1996). NCHRP Report No:383 *Intersection Sight Distance*, National Academy Press, Washington, DC.

Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual 2000*. National Research Council Special Report 209, Washington D.C.

Transportation Research Board (TRB) (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: National Research Council.

Van Arem, B., van Driel, C.J.G., Visser, R., (2006). “*The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics*” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 7, 429–436.

Vander Werf, J., Shladover, S.E., Miller, M., Kourjanskaia, N., (2002). “*Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity*” Transportation Research Record, 1800, 78-84.

WAYMO, (2017). *Safety Report*. 4 Nisan 2018, <https://waymo.com/safety/>

Williams W. W., (1977). “*Driver behavior during yellow interval*” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 644, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 75-78.

Yayla, N., (2011). *Karayolu Mühendisliği*, İstanbul, Birsen Yayınevi.