

# Sürücüsüz Taşıtların Katıldığı Trafik Akım Koşullarının Modellenmesi

## **Ecem Şentürk Berktaş**

Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, Tınaztepe Kampüsü, 35160  
Buca/İZMİR  
Tel: (543) 936 20 70  
E-Posta: ecem.senturk@gmail.com

## **Serhan Tanyel**

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Tınaztepe Kampüsü, 35160 Buca/İZMİR  
Tel: (232) 301 70 18  
E-Posta: serhan.tanyel@deu.edu.tr

## **Öz**

Bu çalışmada, insan sürücüler ve otonom araçlardan oluşan karma bir sistemde trafik akım karakteristiklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu alandaki teknolojik ve altyapısal yatırımların uygulanabilirliğinin zaman alacağı öngörülürse, tamamen otonom araçlardan oluşan bir sistem yerine otonom araçların ve insan sürücülerin kullandığı araçların birlikte ele alındığı bir sistemin incelenmesinin araştırmayı daha gerçekçi sonuçlara ulaştıracağı düşünülmüştür. Çalışmada otonom araçların buldukları ortamda hem araçlar arası iletişimin (V2V: Vehicle to vehicle) hem de araçların çevreyle ve altyapıyla iletişimlerinin (V2I: Vehicle to intersection) olmadığı kabul edilmiştir. İnsan sürücülerin davranış karakteristikleri (tepkime süresi, hızlanma ve yavaşlama ivmeleri, vb.) arazi çalışmalarıyla toplanan verilerden edilmiş, diğer yandan otonom araçların karakteristikleri yapılan bazı kabullere dayanarak belirlenmiştir. Elde edilen tüm bu veriler kullanılarak aaSIDRA programında otonom araçların bulunduğu trafik koşulları modellenmiştir. aaSIDRA programında, farklı sürücü profillerinin davranışları ile otonom taşıtların aynı koşullardaki hareketleri, çevresel etkileri karşılaştırılmış; farklı senaryolar üretilerek otonom taşıtlar için bir eş değer otomobil birimi (EOB) katsayısı önerilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Otonom araçlar, Trafik akım karakteristikleri.

## **Giriş**

Günümüzde dünyanın bütün ülkelerinde nüfustaki ve otomobil sayılarındaki artışa bağlı olarak trafik sıklığı problemiyle karşı karşıya gelmektedir. Bu durum önemli miktarda zaman ve enerji kaybına neden olmakla birlikte, ölümlü ve kalıcı sakatlıkla sonuçlanan kaza oranlarının da giderek arttığı gözlemlenmektedir. Sürücü davranış hatalarının trafik kazalarına neden olan en büyük unsur olduğu bilinmektedir. Teknolojideki gelişmeler sayesinde, trafik kazalarında insan hatalarını azaltmak amacıyla, araç asistanı, sürüş destek sistemleri gibi yeniliklerle otomobil sektörü geliştirilmektedir. Yakın gelecekte sürücüsüz araçların insan sürücülerle birlikte trafikte kendilerine yer edinmeleri beklenmektedir.

Otonom araç, insan sürücü müdahalesi ve uzaktan kumanda olmaksızın, aracı bir noktadan diğer bir noktaya ulaştırabilen taşıt olarak tanımlanabilir. Otonom araçların

trafikteki kimi tehlikeli durumları insanlara oranla daha hızlı fark edebilecekleri ve daha hızlı tepkime gösterebilecekleri düşünülmektedir. Bunun sonucu olarak otoyol ve kavşak kapasitelerinin artması, kaza sayılarının azalması, zaman, yakıt ve enerji verimliliğinin artması vb. kazanımların elde edilmesi beklenmektedir (Noor ve Beiker, 2013).

Society of Automotive Engineers (SAE) 2016 yılında araçların otomasyon seviyelerini 0'dan 5'e kadar sınıflandıran bir standart yayınlamıştır (Li ve diğ., 2014). Bu standart otonom araçlar konusunda yapılmış veya yapılması planlanan yasaları, politikaları ve şartnameleri düzenlemede yararlı bir çerçeve oluşturmaktadır. Burada seviye 0; aracın hiçbir otonom özellik göstermediği, seviye 5 ise; aracın hiç insan müdahalesine gerek duymadan yolculuk yapabildiği durumu tanımlamaktadır.

Daha önce otonom araçların trafik akımına etkisi üzerine yapılmış olan çalışmalar; otoyol üzerindeki trafik akımının incelendiği (Kanaris ve diğ., 1997; Vander Werf ve diğ., 2002; Van Arem ve diğ., 2006; Kesting ve diğ., 2008) ve kavşak üzerindeki trafik akımının incelendiği (Dresner ve Stone, 2008; Li ve diğ., 2013; Le Vine ve diğ., 2015) çalışmalar olarak iki ana grupta toplanabilir.

İkinci gruptaki araştırmaların bir bölümü geleneksel sinyal kontrol sistemleri ile kavşak başarımı üzerine (Le Vine ve diğ., 2015), diğer bir bölümü ise sanal trafik ışıklarıyla beraber araçlar arası iletişimli V2V (Ferreira ve d'Orey, 2012; Sinha ve diğ., 2013) veya araç-altyapı arası iletişimli V2I (Li ve diğ., 2013; Dresner ve Stone, 2008) ortamlardaki kavşak başarımı üzerine çalışmışlardır. Bunların yanında kapasiteyi artırıp arttırmadığını görmek için otonom araçlarla yapılan çalışmalar (Kanaris ve diğ., 1997; Vander Werf ve diğ., 2002; Milakis ve diğ., 2015) veya ışıklı olmayan kavşaklarda otonom araçların hızlarının ve kavşaktan geçiş sürelerinin optimizasyonu üzerine yapılmış çalışmalar (Dresner ve Stone, 2004) da vardır.

Bu çalışmada, insan sürücüler ve otonom araçlardan oluşan, karma bir sistemde trafik akım karakteristiklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Arazi çalışmalarından toplanan verilerden elde edilmiş insan sürücülerin davranış karakteristikleri ile bazı kabullere dayanarak belirlenmiş olan otonom araçların davranış karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla aaSIDRA programında oluşturulan senaryolar yardımıyla bazı modellemeler yapılmıştır.

## **İzmir'de Sürücü Davranışı Özellikleri**

Dünyada yapılan çalışmalar, sürücü karakteristiklerinin (yaş, cinsiyet, öğrenim durumu v.b.) kavşak ve yol kapasitesi üzerinde büyük önem taşıdığını göstermektedir. 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 ve bu ilkeler doğrultusunda sürücü/yayaların bilgilendirilmesine ve sistemin bu bilgiler ışığında doğru kullanılmasına bağlıdır.

Çalışmada, İzmir kentinde araç kullanan 23-66 yaş aralığında, kendi aracı olan ya da kendisi adına tahsis edilmiş bir aracı kullanan, en az bir yıl boyunca haftada en az iki kere kendi aracı ile yolculuk yapmış ve en az 5000 km araç kullanmış, dördü kadın 15 (on beş) gönüllü sürücü ile görüşülmüş; sürücülerin araçlarına JANUS araç içi kamera

yerleştirilerek kendi araçları içinde ve sürekli kullandıkları güzergahlar üzerindeki hareketleri kaydedilmiştir. Gönüllü sürücülere ait bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1** Gönüllü Sürücülere Ait Bilgiler

Gönüllü Sürücü No	Yaş	Eğitim Durumu	Meslek	Gelir (TL)	Cinsiyet
1	39	Üniversite	Memur	4001 ve üstü	Erkek
2	40	Üniversite	Diğer	4001 ve üstü	Erkek
3	23	Üniversite	Öğrenci	4001 ve üstü	Kadın
4	29	Üniversite	Memur	2001-3000	Erkek
5	47	Üniversite	Memur	4001 ve üstü	Erkek
6	55	Üniversite	Diğer	4001 ve üstü	Erkek
7	46	Lise	Diğer	4001 ve üstü	Erkek
8	35	Üniversite	Memur	4001 ve üstü	Erkek
9	27	Ortaokul	İşçi	1001-2000	Erkek
10	33	Üniversite	Memur	3001-4000	Erkek
11	44	Üniversite	Diğer	4001 ve üstü	Kadın
12	36	Üniversite	Memur	3001-4000	Kadın
13	43	Üniversite	Ev Hanımı	3001-4000	Kadın
14	66	Üniversite	Memur	4001 ve üstü	Erkek
15	34	Üniversite	Memur	4001 ve üstü	Erkek

Yapılan çalışmalar, genellikle sürücülerin yavaşlama ivme değerlerinin, hızlanma ivme değerlerinden yüksek olduğunu göstermiştir. Tablo 2’de yavaşlama, Tablo 3’te ise hızlanma ivmeleri üzerine yapılmış olan çalışmalardan örnekler verilmiştir (Kamalanathsharma, 2013).

**Tablo 2** Yavaşlama İvmesi Değerleri

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

**Tablo 3** Hızlanma İvmesi Değerleri

Yazar	ITE (Trafik Mühendisleri El Kitabı)	Loutzehheizer	NCHRP Report 383	Long	Bham ve Benekohal
Yıl	2009	1937	1996	2000	2001
Değer	1,48 m/sn <sup>2</sup>	Maks. 1,74 m/sn <sup>2</sup>	1,5 m/sn <sup>2</sup>	1,45 m/sn <sup>2</sup>	1,43-0,83 m/sn <sup>2</sup>

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 ve bu 5 sürücü için de Tablo 4’teki kalibrasyon parametrelerini önermiştir.

**Tablo 4** Hızlanma ve Yavaşlama İvmesi Kalibrasyon Parametreleri

Sürücü Tipi	Çok				Çok Saldırgan
	Yavaş	Yavaş	Normal	Saldırgan	
<b>Hızlanma İvmesi Kalibrasyon Parametresi</b>	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20
<b>Yavaşlama İvmesi Kalibrasyon Parametresi</b>	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20

Akçelik ve Besley (2001)'in önerdiği 1 ve 2 bağıntıları yardımıyla, sürücülerin yolculuklarından elde edilmiş olan hızlanma ve yavaşlama ivmeleri kullanılarak yolculuklara ait "f<sub>a</sub> ve f<sub>d</sub>" değerleri hesaplanmıştır. Burada, a<sub>hızlanma</sub>, hızlanma ivmesini (m/sn<sup>2</sup>), a<sub>yavaşlama</sub>, yavaşlama ivmesini (m/sn<sup>2</sup>), V<sub>f</sub>, aracın son hızını (km/saat), V<sub>i</sub>, aracın ilk hızını (km/saat), f<sub>a</sub>, hızlanma ivmesi kalibrasyon parametresini, f<sub>d</sub>, yavaşlama ivmesi kalibrasyon parametresini ifade etmektedir. p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, ve p<sub>3</sub> bağıntı katsayıları olup, aldıkları değerler Tablo 5' te gösterilmiştir. f<sub>a</sub> ve f<sub>d</sub> değerlerinin ayrı ayrı ortalamaları alınarak, sürücülere ait kalibrasyon parametreleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen sürücülere ait kalibrasyon parametreleri Tablo 6' da sunulmuştur.

$$a_{hızlanma} = f_a [p_1 + p_2 (V_f + V_i)^{1/2} - p_3 V_i] / 3,6 \quad (1)$$

$$a_{yavaşlama} = f_d [p_1 + p_2 (V_i + V_f)^{1/2} - p_3 V_f] / 3,6 \quad (2)$$

**Tablo 5** p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub> Bağıntı Katsayıları

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

**Tablo 6** Gönüllü Sürücülere Ait Kalibrasyon Parametreleri

Gönüllü Sürücü No	Kalibrasyon Katsayıları	
	Hızlanma (f <sub>a</sub> )	Yavaşlama (f <sub>d</sub> )
1	2,38	2,07
2	2,80	2,48
3	2,15	2,52
4	2,87	2,90
5	2,44	1,91
6	2,13	2,06
7	1,89	1,21
8	1,80	1,28
9	1,85	1,57
10	2,10	1,34
11	2,11	2,06
12	1,31	0,98
13	1,72	1,34
14	1,73	2,31
15	2,10	2,37

Tablo incelendiğinde dikkati çeken en önemli husus, sürücülerin genelinin hızlanma kalibrasyon parametrelerinin, yavaşlama kalibrasyon parametrelerinden daha yüksek olduğudur. Sürücülerin hızlanma ivmeleri açısından %60'ının, yavaşlama ivmeleri

açısından %53'ünün SIDRA Trip parametrelerine göre “Saldırgan” ve “Çok Saldırgan” sürücü sınıfına girdikleri belirlenmiştir.

## Otonom Araçların Karakteristikleri

1984 yılında Carnegie Mellon Üniversitesi'nde yürütülen Navlab ve ALV projeleri ve 1987'de Mercedes-Benz ve Bundeswehr Üniversitesi'nin Münih'teki Eureka Prometheus Projesi ile gerçekten otonom olan ilk araçlar ortaya çıkmaya başlamışlardır (Yetim, 2016). O zamandan beri bazı büyük şirketler ve araştırmacılar otonom araçlarla ilgili birçok çalışma yapmış ve örnekler geliştirmişlerdir.

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

Le Vine ve diğ. (2015) araçların birbirleriyle iletişimlerinin olduğu (V2V) bir ortamda otonom araçların ışıklı kavşaklardaki kuyruk boşaltma işlemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Çalışmada tüm araçlar otonom olarak kabul edilmiş, araçların takip mesafesi 1,83m, maksimum ivmelenme değeri 1,50 m/sn<sup>2</sup>, maksimum hızları ise 13,9 m/s alınmıştır.

Li ve diğ. (2014) ışıklı bir kavşak üzerinde bütün araçların tamamen otonom olduğu, sinyal denetleyicisi ve araçlar arasında iki yönlü bir iletişime izin verilen (V2I) ortam için bir optimizasyon algoritması önermişlerdir. Çalışmada araç ve kavşak karakteristiklerine ait Tablo 7'deki değerler kabul edilmiştir.

**Tablo 7** Li ve diğ. Tarafından Kabul Edilen Araç ve Kavşak Parametreleri

Parametreler	Kabul Edilen Değerler
Maksimum Seyahat Hızı (km/saat)	56
Maksimum Hızlanma İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	1,37
Minimum Hızlanma İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	0,76
Maksimum Yavaşlama İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	3,35
Minimum Yavaşlama İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	1,83
Minimum Yeşil Süre (saniye)	4
Maksimum Yeşil Süre (saniye)	25

Çalışmada otonom araçlara ait EOB değerlerini belirleyebilmek için insan sürücülerin ve Akçelik (2000) tarafından önerilmiş olan “normal” sürücü için kabul edilmiş hızlanma ve yavaşlama kalibrasyon parametrelerinden ve hesaplanan hızlanma ve yavaşlama ivme değerlerinden yararlanılmıştır. Otonom sürücülerin hızlanma ve yavaşlama ivmeleri için Tablo 8'deki alt ve üst sınır değerleri kabulleri kabul edilmiştir. Akçelik (2011) tarafından önerilmiş olan normal sürücü kalibrasyon parametresi “1,80” için ve otonom araçlara ait üst ve alt eşik değerleri için hızlanma ve yavaşlama süreleri de hesaplanmıştır. Otonom araçlara ait sürelerin, gönüllü sürücülerin ortalama ivmelenme süreleri ile Akçelik tarafından tanımlanmış olan “normal” sürücüyeye ait sürelerle oranlanması ile EOB değerleri elde edilmiştir.

**Tablo 8** Kabul Edilen Hızlanma ve Yavaşlama İvmeleri

Parametreler	Kabul Edilen Değerler
Maksimum Hızlanma İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	1,37
Minimum Hızlanma İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	0,76
Maksimum Yavaşlama İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	3,35
Minimum Yavaşlama İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	1,83

### Otonom Araçlara Ait Eşdeğer Otomobil Birim Değerinin İncelenmesi

Otonom araçlarla, sürücüler tarafından kullanılan araçların karma olarak kullandıkları trafik akım koşullarında genel beklenti, otonom araçların trafik güvenliğinin yanı sıra, kavşak kapasitesini de arttırıcı bir etkiye sahip oldukları yönündedir. Bu durum özellikle birbiriyle iletişimli ortam olarak ele alınan sistemde sadece araçların birbirleriyle iletişimde olduğu ve araçların çevreyle ve altyapıyla iletişiminin olduğu koşullar için geçerli olabilir. Özellikle otonom araçların tepkime sürelerinin “0” saniye olarak kabul edilmesi durumunda, ışıklı kavşak kapasitelerinin önemli oranda yükseleceği beklenebilir. Çalışkanelli v.d. (2013) tarafından yapılmış olan çalışmada, ışıklı bir kavşakta ilk sırada bekleyen sürücünün tepkime süresinin “1 saniye” olması durumunda, doymuş akım değerinin 2118 araç/saat değerine erişebileceğini göstermiştir. Özellikle ışıkta ilk sırada bekleyen aracın otonom olduğu ve başlangıç tepki süresinin “0” saniye olduğu düşünüldüğünde, doymuş akım değerinin çok büyük değerlere çıkabileceği ve kavşak kapasitesini arttırabileceği açıktır.

Ancak bu koşul, otonom araçların trafik sinyalizasyon altyapısı ve/veya diğer araçlarla haberleşebildiği ortamlar için geçerlidir. Le Vine v.d. (2015) yaptıkları çalışmada, otonom araçlarla altyapı sistemi ve diğer araçlar arasında herhangi bir haberleşme olmaması durumunda bir trafik içinde hareket eden otonom araçlar ile kavşak kapasitesinde %4~%53 arasında bir düşüş olabileceğini bulmuşlardır.

Çalışmada, otonom araçların hızlanma ivmeleri için üst eşiğin (sınırın) 1,37 m/sn<sup>2</sup>; alt eşiğin 0,76 m/sn<sup>2</sup>; yavaşlama ivmesi için ise üst eşiğin 3,35 m/sn<sup>2</sup> ve alt eşiğin, 1,83 m/sn<sup>2</sup> olduğu kabul edilmiştir. Bu kabulün detayları önceki bölümde açıklanmıştır. Bu değerlerden yararlanarak, otonom araçlar için eşdeğer otomobil birim değeri önerilmeye çalışılmıştır.

Daha önce belirtildiği gibi, çalışmada İzmir kentindeki 15 sürücüye ait hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ile, hızlanma ve yavaşlama sürücü kalibrasyon değerleri 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 kalibrasyon parametresi “1,80” için ve otonom araçlara ait üst ve alt eşik değerleri için hızlanma ve yavaşlama ivmeleri ile hızlanma ve yavaşlama süreleri hesaplanmıştır. Otonom araçlara ait üst ve alt eşik değerleri kullanılarak hesaplanan süreler, gönüllü sürücülerin ortalama ivmelenme süreleri ile Akçelik tarafından tanımlanmış olan

“normal” sürücüye ait süreler oranlanarak EOB değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, Tablo 9 ile Tablo 10’da görülmektedir.

**Tablo 9** Hızlanma Sürelerine Göre EOB Değerleri

Son erişilen hız (km/saat)		Hızlanma ivmesi (m/sn <sup>2</sup> )	Sürücülü Taşıtlar için	Hızlanma süresi (saniye)		EOB Otonom üst	EOB Otonom alt	EOB Ortalama
				Otonom taşıtlar için (a=1.37 m/sn <sup>2</sup> )	Otonom taşıtlar için (a=0.76 m/sn <sup>2</sup> )			
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
<b>Ortalama EOB değerleri</b>							<b>Sürücü ort.</b>	<b>1,79</b>
							<b>SIDRA</b>	<b>1,55</b>

**Tablo 10** Yavaşlama Sürelerine Göre EOB Değerleri

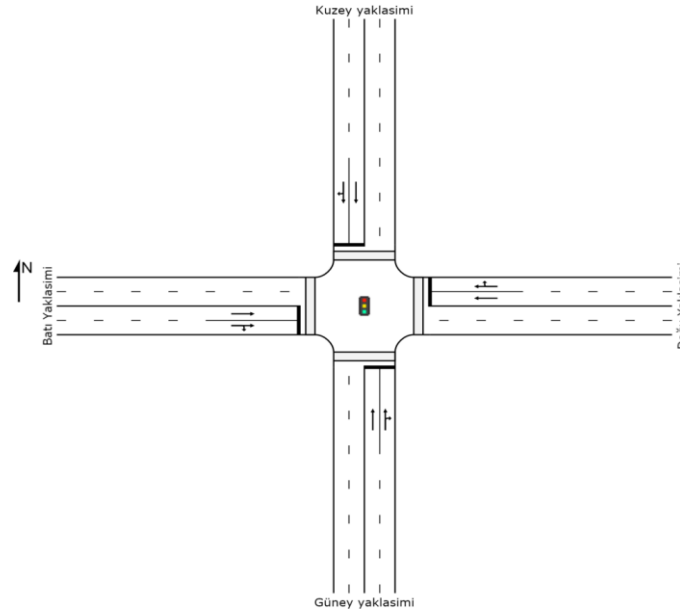
Son erişilen hız (km/saat)		Yavaşlama ivmesi (m/sn <sup>2</sup> )	Sürücülü Taşıtlar için	Yavaşlama süresi (saniye)		EOB Otonom üst	EOB Otonom alt	EOB Ortalama
				Otonom taşıtlar için (a=3.35 m/sn <sup>2</sup> )	Otonom taşıtlar için (a=1.83 m/sn <sup>2</sup> )			
35	Sürücü ort.	1,63	21,47	10,45	19,13	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
<b>Ortalama EOB değerleri</b>							<b>Sürücü ort.</b>	<b>0,74</b>
							<b>SIDRA</b>	<b>0,70</b>

Tablolardan da görülebileceği üzere taşıtların hızlanma ve yavaşlama özelliklerine bağlı olarak EOB değerleri önemli oranda değişmektedir. Otonom taşıtların, yavaşlama ivmelerinin sürücülere göre daha yüksek olmasının ana sebebi, özellikle çarpışma olasılığı ortaya çıktığında herhangi bir kaza olmadan durabilmesini sağlamaktır. Diğer yandan, bir kavşağın kapasitesinin belirlenmesinde özellikle hızlanma ivmesi önem taşımaktadır. Taşıtlar ne kadar hızla hareket ederek sinyalden ayrılırlarsa, kavşağın kapasitesinin de o oranda yüksek olabileceği söylenebilir.

Tablo 9'dan, otonom 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 otonom araçların ışıklı kavşaklardaki etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Şekil 1'de görülen dört kollu bir ışıklı kavşak modeli oluşturulmuştur. Tablo 11'de 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.

aaSIDRA programında otonom araçlar, ayrı bir araç sınıfı olarak kabul edilmiştir. Otonom araçlara ait EOB değeri Akçelik (2011) tarafından tanımlanmış normal sürücü için hesaplanmış ve "1,55" alınmıştır. Çalışmada, otonom araçlar dışında trafiğin tamamen otomobillerden oluştuğu düşünülmüştür. Otonom araçların kavşağa sadece güney yaklaşımından geldiği öngörülerek, farklı otonom araç yüzdeleri için güney yaklaşımına ait gecikme değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, Şekil 2'de görülmektedir.

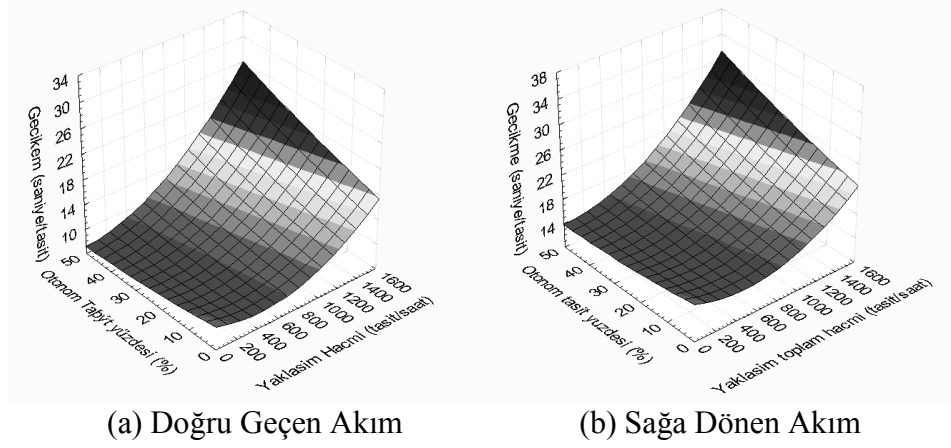


**Şekil 1** Dört Kollu Işıklı Kavşak Modeli

**Tablo 11** 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





**Şekil 2** Farklı Otonom Araç Yüzdeleri İçin Güney Yaklaşımına Ait Gecikme Değerleri

Şekil 2 incelendiğinde, otonom araçların yüzdesi arttıkça, güney yaklaşım koluna ait gecikme değerlerinin de önemli oranda arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar değerlendirilirken, otonom araçlara ait EOB değerinin sabit alındığı unutulmamalıdır.

## Sonuç ve Öneriler

Çalışmada, önümüzdeki on yıl içerisinde tüm dünyada önemli bir paya sahip olması beklenen otonom araçların, ülkemizde trafiğe katılmaları durumunda karma trafik koşullarında ışıklı kavşak başarımına nasıl etki edebilecekleri üzerine bir tartışma yapılması hedeflenmiştir. Analizler sonucunda, otonom araçların diğer araçlarla ve altyapı sistemleriyle haberleşmemeleri durumunda kavşak başarımında önemli bir düşüşe yol açabilecekleri anlaşılmıştır. Bu sonuç, Le Vine v.d. (2015) tarafından bulunmuş olan sonuçla da örtüşmektedir.

İlerideki çalışmalarda, ülkemiz trafik akım koşullarını tanımlayan benzetim modelleri oluşturularak, farklı otonom araç ortamları için analizler yapılabilir. Bu sayede, otonom araçların ve uygun altyapı sistemlerinin ülkemiz açısından getirecekleri faydalardan en etkin şekilde yararlanılabilmesi mümkün olacaktır.

## Kaynaklar

Abraham, Z., (2015) Identifying the Optimal Highway Driving Conditions for the Integration of Manned and Autonomous Vehicles. Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, ABD.

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., (2011) SIDRA TRIP User Guide, Akçelik & Associates Pty. Ltd.

Dresner, K., Stone, P., (2008) A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. *Journal of Artificial Intelligence Research* 31, pp. 591–656.

Ferreira, M., d'Orey, P.M., (2011) On the Impact of Virtual Traffic Lights on Carbon Emissions Mitigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (1), pp. 284–295.

Kanaris, A., Ioannou, P., Ho, F.S., (1997) Spacing and Capacity Evaluations for Different AHS Concepts. *Automated Highway Systems*, Ioannou, P. (Ed.), Springer US, pp. 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 (6), pp. 668-683.

Le Vine, S., Zolfaghari, A., Polak, J., (2015) Autonomous Cars: The Tension Between Occupant-Experience and Intersection Capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 52, pp. 1–14.

Le Vine, Liu, X., Zhenh, F., Polak, J., (2015) Automated Cars: Queue Discharge at Signalized Intersections with ‘Assured-Clear-Distance-Ahead’ Driving Strategies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 62, pp. 35-54.

Li, Z., Chitturi, M., Zheng, D., Bill, A., Noyce, D., (2013) Modeling Reservation-Based Autonomous Intersection Control in VISSIM. *Transportation Research Record*, 2381, pp. 81–90.

Li, Z., Elefteriadou, L., Ranka, S., (2014) Signal Control Optimization for Automated Vehicles at Signalized Intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 49, pp. 1-18.

Noor, A.,K., Beiker, S. A., (2013) İletişim Kurabilen Otomatik Araçlar. *Mühendis ve Makina*, 54 (642), pp. 18-23.

Sinha, R., Roop, P.S., Ranjitkar, P., (2013) Virtual Traffic Lights in a Robust, Practical, and Functionally Safe Intelligent Transportation System. *Transportation Research Record*, 2381, pp. 73–80.

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 (4), pp. 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, pp. 78-84.

Yetim, S., (2016) Sürücüsüz Araçlar ve Getirdiği/Getireceği Hukuki Sorunlar. *Ankara Barosu Dergisi*, 2016 (1), pp. 125-184.