

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK ŞERİTLİ YOLLARDA SÜRÜCÜ ŞERİT  
SEÇİM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

**Metin Mutlu AYDIN**

**Aralık, 2012**

**İZMİR**

# **ÇOK ŞERİTLİ YOLLARDA SÜRÜCÜ ŞERİT SEÇİM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı**

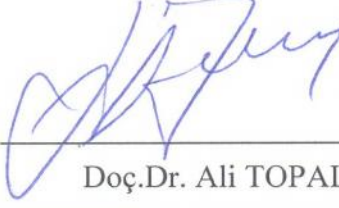
**Metin Mutlu AYDIN**

**Aralık, 2012**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

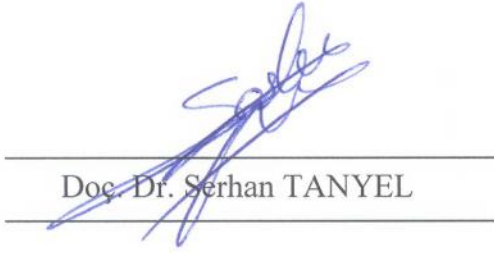
**METİN MUTLU AYDIN**, tarafından **DOÇENT DR. ALİ TOPAL** yönetiminde hazırlanan “**ÇOK ŞERİTLİ YOLLARDA SÜRÜCÜ ŞERİT SEÇİM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



---

Doç.Dr. Ali TOPAL

Danışman



---

Doç. Dr. Serhan TANYEL

Jüri Üyesi



---

Yrd. Doç. Dr. Hilmi Evren ERDİN

Jüri Üyesi



---

Prof.Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlık aşamasında değerli bilgi birikimi ve önerilerinden yararlandığım, çalışmamın oluşmasında büyük katkısı olan danışmanım Doç. Dr. Ali TOPAL'a yardımları için en derin teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda tezimin her aşamasında beni yönlendiren ilgi ve desteğinin hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Serhan TANYEL'e, yüksek lisans eğitimimin başından beri tez çalışmamın tamamlandığı son güne kadar benden desteğini esirgemeyen babam Celal AYDIN ve annem Ayşe AYDIN'a gösterdikleri sabır ve verdikleri büyük sevgi için çok teşekkür ederim.

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı değerli öğretim üyesi Doç Dr. Burak ŞENGÖZ'e çalışmamın her aşamasında fikir ve görüşleriyle benden yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım İnş. Yük. Müh. Kiarash GHASEMLOU'ya, ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca hep yanımda olan değerli dostlarım İnş. Yük. Müh Peyman AGHAZADEH DOKANDARI, İnş. Yük. Müh Alper DERİ, İnş. Yük. Müh Çağrı GÖRKEM, İnş. Yük. Müh Amir ONSORİ ve değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Mustafa ÖZUYSAL, Dr. S.Pelin ÇALIŞKANELLİ ve İnş. Yük. Müh Jülide OYLUMLOĞLU'na gösterdikleri ilgi ve yakınlıktan dolayı teşekkürlerimi sunar destekleri için teşekkür ederim.

Metin Mutlu AYDIN

# ÇOK ŞERİTLİ YOLLARDA SÜRÜCÜ ŞERİT SEÇİM DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

## ÖZ

Yol yüzey bozuklukları (deformasyonlar) Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde sıkça görülen bir durumdur. Özellikle şehir içi ve şehirlerarası yollar, alt ve üst yapı tasarımındaki eksiklikler ve aşırı ağır araç yüklerinden dolayı çeşitli yol yüzey bozuklukları oluşmaktadır. Bu tür yüzey bozuklukları Türkiye'deki yüksek trafik kaza oluşumunun ana nedenlerinden birisidir. Diğer taraftan deformasyonlar, planlanan işletme takviminden önce yeniden inşaat ya da bakım gerektirmektedir. Sonuç olarak işletme maliyetinde artışa sebep olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, deformasyonlu yollarda araçların şeritler üzerinde yanıl yöndeki konumları ve boyuna yönde içinde bulunduğu mevcut trafik akımı içerisinde hareketi incelenmiştir. Ayrıca çalışmada yol yüzey bozukluklarının sürücülerin, şerit seçim eğilimi ve mevcut akımın hareketi üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Yol bozukluklarının olduğu kesimlerde geriye doğru şok dalgası oluşumunu belirleyebilmek amacıyla kritik hız değerinin hesaplanmasına yönelik yeni bir model önerilmiştir. Elde edilen sonuçlardan deformasyonların büyüklüğünün ve sürücü karakteristiklerinin, araçların deformasyonlu yollardaki hareketini etkileyen en önemli parametreler olduğu görülmüştür. Ayrıca yol bozukluklarının derinlik veya yüksekliğine göre deformasyonlu yolların kapasite değerlerinde dalgalanmalar olduğu ve deformasyon olan kesimlerde kapasitenin önemli miktarda azaldığı saptanmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Yol yüzey bozuklukları, sürücü karakteristikleri, yanıl yöndeki konum, kritik hız.

# **MODELING OF DRIVER LANE CHOICE BEHAVIOUR AT MULTILANE ROADS**

## **ABSTRACT**

Road surface deteriorations (deformations) are commonly seen in developing countries like Turkey. Especially various road surface deformations generally occur in urban and interurban roads due to infrastructure and superstructure deficiencies and excessive heavy vehicle loads. These kinds of deformations are one of the main reasons of high traffic accident rate in Turkey. On the other hand, deformations necessitate reconstruction or maintenance before the scheduled operational plan. Consequently it may result overrun in operation cost.

In this study, the lateral positions and longitudinal movements of vehicles on lanes are investigated in current traffic flow. Also deformation effects on drivers' tendencies of lane selection and on the movement of current traffic flow are tried to be determined. A new critical speed calculation method is suggested to predict backward shock waves caused by deformed road sections. According to obtained results; it is seen that the degree of deformations and driver characteristics are one of the most important parameters for the movement of vehicles. In addition, road capacity values fluctuate by these sections and noticeable decrease in capacity values that are generally assigned depend on depth and height of deformations.

**Keywords:** Road surface deformations, driver characteristics, lateral position critical speed.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – ŞERİT DEĞİŞTİRME DAVRANIŞI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Şerit Değişirme İşlemi.....	5
2.2 Şerit Değişirmenin Sınıflandırılması.....	6
2.2.1 Şerit Değişirme.....	6
2.2.2 Aralık Kabulü.....	7
2.3 Şerit Değişirme Modelleri.....	11
2.3.1 Temel Şerit Değişirme Modelleri.....	12
2.3.2 Zorunlu Şerit Değişirme (ZŞD) ve Keyfi Şerit Değişirme (KŞD) Modelleri.....	13
2.3.3 Zorlamalı Şerit Değişirme Modeli.....	17
2.3.4 Birleşik Modeller.....	19
2.4 Şerit Değişirme Davranışına Ait Hesap Yöntemleri.....	23
2.4.1 Çok Şeritli Kinematik Dalga (KW) modeli.....	25
2.4.1.1 Süreklilik Formülasyonu.....	25
2.4.1.2 Ayırık Zaman Formülasyonu.....	26
2.4.1.3 L,T ve M için Hesap Yöntemi.....	27
2.4.1.4 IT Prensibi.....	29
2.4.2 Ayırık Şerit Seçim Parçacıkları.....	30
2.5 Şerit Değişirmeden Dolayı Oluşan Gecikmenin Belirlenmesi.....	30

## **BÖLÜM ÜÇ – GÖZLEM YAPILAN DEFORMASYON NOKTALARININ TANITILMASI, VERİLERİN TOPLANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.32**

3.1 Çok Şeritli ve Deformasyonlu Yollarda Taşıtların Hareketlerinin Video Kamera Yardımıyla Analizi.....	32
3.1.1 Gözlem Yeri ve Zamanının Seçimi.....	32
3.1.2 Gözlem Yöntemi.....	32
3.1.3 Gözlem Yapılan Deformasyon Noktalarının Tanıtılması .....	33
3.1.3.1 Deformasyon Noktası 1 (DN-1).....	33
3.1.3.2 Deformasyon Noktası 2 (DN-2).....	35
3.1.3.3 Deformasyon Noktası 3 (DN-3).....	37
3.1.4 Verilerin Analizi .....	38
3.2 Çok Şeritli ve Deformasyonlu Yollarda Taşıtların Hareketlerinin GPS Cihazı Yardımıyla İncelenmesi.....	48
3.2.1 Tez Kapsamında Kullanılan Teçhizat ve Bilgisayar Programlarının Tanıtılması.....	50
3.2.1.1 Janus V2 kamera ve GPS sistemi .....	50
3.2.1.2 Sıdra trip 1.1 .....	54
3.2.2 Araçların Konum ve Hız Verilerinin Janus V2 GPS Cihazı Yardımıyla Ölçülmesi .....	55
3.2.3 Araçların Konum ve Hız Verilerinin Hesaplanması .....	57
3.2.4 Araçların İvmelenme ve Ters İvmelenmesinin Hesaplanması .....	61
3.2.5 Gecikme Değerlerinin Hesaplanması.....	63
3.2.6 Veri Toplama Yöntemlerinin Kıyaslanması.....	72

## **BÖLÜM DÖRT – ÇOK ŞERİTLİ YOL YÜZEYLERİNDE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN TRAFİK AKIMINDA ŞOK DALGASI ve ŞİŞEBOYNU OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ .....73**

4.1 Trafik Akımının Şok Dalgası Oluşması Durumundaki Davranışı .....	73
4.2 Trafik Akımının Şişe Boynu Oluşması Durumundaki Davranışı .....	79



4.3 Deformasyon Etkisiyle Oluşan Şok Dalgasına Ait Kritik Hız Değerinin Modellenmesi.....	81
4.3.1 Şişeboynu Kesimler için Matematik Modeller .....	83
<b>BÖLÜM BEŞ – DEFORMASYONLARIN ŞERİT KULLANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>91</b>
5.1 Yol Yüzey Bozuklukları .....	91
5.1.1 Kalıcı deformasyon .....	92
5.1.1.1 Tekerlek İzi Oluşumu .....	92
5.1.1.2 Ondülasyon ve Çökmeler .....	92
5.1.1.3 Kabarmalar .....	93
5.1.1.3 Yığılmalar .....	94
5.1.2 Çatlaklar .....	94
5.1.2.1 Yorulma Çatlakları .....	94
5.1.2.2 Düşük Sıcaklık Çatlakları .....	95
5.1.3 Suya Bağlı Bozulmalar.....	95
5.2 Çok Şeritli ve Deformasyonlu Yollarda Araçların Şerit Üzerindeki Yanal Konumlarının İncelenmesi.....	96
5.3 Verilerin Toplanması ve Analizi .....	98
5.4 Bulgular .....	104
<b>BÖLÜM ALTI – SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER .....</b>	<b>114</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>117</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>125</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde şehir içi ve şehirlerarası yolların üst yapı tasarımında petrolde dışa bağımlılık, ekonomik imkânsızlıklar, eğitim/bilgi yetersizliği vb. nedenler ile eksik ya da yanlışlıklar görülmektedir. Bu eksik veya yanlış tasarım ve yapıma ek olarak denetim eksikliği, ağır araçların izin verilenden fazla yük taşıması ve iklim koşullarından dolayı yollar tasarlandıklarından daha büyük yüklerle maruz kalmakta ve planlanandan daha kısa sürede deforme olmaktadır. Oluşan bu yol yüzey deformasyonları (bozulmaları) sonucu yeniden inşa, bakım ve onarım sebebiyle belirlenenden önce ve fazla bir maliyet oluşmaktadır. Fazla maliyetin yanı sıra mevcut yolların planlanan kapasiteleri düşmekte buda hem gecikmeye neden olmakta hem de ilave yakıt masraflarını arttırmaktadır. Ayrıca deforme olmuş yollar, sürücülerin bozuk kısımları fark etmemeleri ya da yüksek hızla hareket ederken geç fark etmeleri ve aniden şerit değiştirmeleri sonucunda ölümle sonuçlanan kazalara neden olmaktadır.

Trafik mühendisleri yollarda çeşitli etkilerle meydana gelecek olan sürücü davranışlarını farklı yöntem ve tekniklerle incelemektedirler. Yol karakteristiklerine bağlı olarak sürücü davranışlarını incelemek amacıyla yapılan çalışmaların en önemlilerinden birisini sürücülerin şerit değiştirme davranışları oluşturmaktadır. Bu amaçla Sparmann (1978), şerit değiştirme davranışını açıklayabilmek amaçlı ilk mikro-benzetim sistemi oluşturmuştur. Oluşturulan bu modelde şerit değiştirme isteği ve bu isteğin gerçekleştirilmesi arasında bir ayırım yapılmıştır. Bu model ayrıca otoyol üzerinde yer alan giriş ve çıkış rampalarına yakın veya uzak yollardaki şerit değiştirmeleri de ayırt etmektedir. Otoyol çıkış rampası yönünde yapılan şerit değişikliklerinde araçlar en sağ şeritte ise çıkış rampasına geçiş haricinde bir şerit değişikliği olmamakta ve dolayısıyla herhangi bir engelle karşılaşmamaktadır. Fakat araçlar çok şeritli bir otoyolda en sol şeritten çıkış rampasına doğru yöneliyorsa o şeride geçişleri sırasında çeşitli engellemelere maruz kalmaktadır (Örneğin yavaş taşıtlar vb.). Sparmann tarafından önerilen bu modelde ayrıca, sürücülerin fiziksel davranışlarına, aracın hız ve takip mesafesi kabulüne göre sınır değerler

tanımlanmaktadır. Sürücünün bu değerlere vereceği tepkide detaylı bir şekilde incelenmektedir. Modelde şerit değişikliğinin gerçekleşme olasılığı seçilen şeritteki mevcut aralığın durumuna göre belirlenmiştir. Şerit değiştirme davranışlarını incelemek amacıyla Ramanujam (2007), çevreyolları için önerilmiş olan bir şerit seçim modelini, sürücü davranışlarına ve şerit seçim kararlarına bağlı olarak geliştirerek arterler için uygulamaya çalışmıştır. Arterler üzerindeki trafiğin çevreyollarındaki trafik akımından farklılıklarını açıklamaya çalışan Ramanujam, bu farklılıkların arterler için geliştirilecek farklı modeller ile incelenmesi gerektiğini belirtmiştir. Toledo, T., Koutsopoulos, H. ve Ben-Akiva, M. (2003) şerit değiştirmeyi incelemek amacıyla birleşik şerit değiştirme modeli geliştirmişlerdir. Oluşturdukları model Zorunlu Şerit Değiştirme (ZŞD) ve Keyfi Şerit Değiştirme (KŞD) durumlarının ortak bir şekilde değerlendirilmesine izin vermektedir. Bu modelde ZŞD ve KŞD'ye ait ilişki, çıkış rampasına olan uzaklık vb. açıklanan değişkenlere göre değişiklik göstermektedir. Hunt ve Lyons (1994), yol trafik sistemlerinde sürücü davranışlarının modellenmesi amacıyla alternatif bir model olarak sinir ağlarını kullanmışlardır. Bu modelde sürücünün, bulunduğu mevcut yol durumuna göre kararlar aldığı kabul edilmiştir (Örneğin sürücünün önündeki ve arkasındaki aracın konumuna göre gerçekleştirdiği eylemler). Hunt ve Lyons (1994) oluşturdukları bu modelde görsel şablonları kullanarak sürücünün etrafındaki taşıt ve yol durumuna göre yol etkileri oluşturmaya çalışmış ve buna bağlı olarak da şerit değişiklikleri incelenmiştir. Oluşturulan bu model büyük sayıda veri ve buna karşılık gelen karar ve cevaplar ile kalibre edilmiştir.

Jiang ve Li (2002), yukarıdaki araştırmacılardan farklı olarak inşaat ve bakım çalışmaları sebebiyle kısmi olarak kapalı olan yollardaki trafik akımının özelliklerini belirleyebilmek amacıyla çeşitli araştırmalar yapmıştır. Yapılan araştırmalar kapsamında bu tür yollardaki mevcut trafik akımı içerisinde hareket eden taşıtlara ait detaylı bilgi edinebilmek amacıyla GPS cihazı takılı gözlem aracının mevcut akım boyunca hareketini gözlemlemişlerdir. Gözlem aracı vasıtasıyla, akımın yol çalışması olan kesite gelmeden önceki, yol çalışması olan bölgedeki ve yol çalışmasından sonraki kesimdeki ortalama hızları elde edilmiş ve araçların hızlarına ait standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde

araçların yol çalışması olmayan kesimde daha kararlı hareket ettiği ve araçların hızlarında pek fazla değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Jiang ve Li yaptıkları çalışmada elde edilen sonuçlardan araçların yol çalışmasının olduğu bölgeye yaklaşırken özellikle bir şeridin kapalı olduğu durum için önceden ters ivmelenerek yavaşladığı ama noktasal bazdaki çalışmalarda ise aniden yavaşladığını görmüşlerdir. Yol çalışmaları nedeniyle araçların hızlarını çok düşürmesinden kaynaklı olarak oluşan gecikmeyi 7 farklı gözlem bölgesi içinde hesaplamış ve elde edilen sonuçlara göre oluşan gecikmenin mevcut yolun saatlik hacmiyle çarpıldığında çok büyük değerlere ulaştığını belirtmişlerdir. Xuan ve Coifman (2006) ise araçların bir yol boyunca taşıt, yol çalışması nedeniyle şerit değiştirmelerini incelemek amacıyla mevcut GPS cihazlarından biraz farklı bir özelliğe sahip olan Diferansiyel Küresel Konumlandırma Sistemi (DGPS) cihazı kullanmışlardır. Çalışma kapsamında ilk olarak yol güzergâhını göstermesi amacıyla bir referans mesafe–zaman (trajectory) grafiği oluşturulmuştur. 24 km’lik belirli bir yol güzergâhı boyunca her gün aynı saatte ve aynı güzergâhta hareket eden bir gözlem aracına ait 24 turluk konum-zaman verileri toplanmış ve bu verilere göre aracın mesafe-zaman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen konum-zaman grafikleri, ilk başta oluşturulan referans konum-zaman grafiğiyle kıyaslanarak aracın yaptığı manevra değerlerinin belirlenen eşik değeri aştığında, aracın nerelerde şerit değiştirdiği, şerit değiştirmenin zorunlu şerit değiştirme (ZŞD) mi yoksa keyfi şerit değiştirme (KŞD) mi olduğu konum bazlı olarak incelenmeye çalışılmıştır.

Yukarıdaki çalışmalarda araçların çok şeritli bir yol üzerinde herhangi bir şeridin trafiğe kapanması, yan yol katılımlarının anayol üzerinde oluşturacağı etki, sürücülerin bulunduğu şeritte sunulan olanaklardan memnun olmaması gibi sorunlar incelenmiş ve bunların akım üzerinde oluşturduğu etkiler belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların çoğunda şerit değiştirme davranışı yeterli gözlem verisi olmadığı için benzetim odaklı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Şerit değiştirme davranışlarını belirlemek amacıyla toplanan veriler ise sadece GPS cihazının tek bir araca takıldığı durum için elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen çalışmalarda göz ardı edilen fakat aslında çok sık görülen bir durum olan ve trafik akımını özellikle şehir içi ve şehirlerarası çok şeritli

yollarda etkileyen yol yüzey bozuklukları incelenmiştir. Özellikle gelişmemiş ya da Türkiye gibi gelişmekte ve petrole bağımlı ülkelerde görülen çeşitli iç ve dış çevresel faktörlerin etkisiyle yol yüzeyinde oluşan deformasyonların trafik akımı üzerindeki etkileri farklı yönleriyle ele alınmış ve değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, farklı deformasyon türlerinin etkilerini belirlemek amacıyla hem video kamera hem de GPS cihazı vasıtasıyla veriler toplanmış, GPS cihazı aynı yolu kullanan birçok araca takılarak farklı sürücü karakteristiklerine ait veriler elde edilmiştir. En doğru veriyi elde etmek için Video kamera ve GPS cihazından elde edilen veriler birbirleriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca araçların deformasyon etkisine maruz kalmamak için şerit değiştirmesi durumu incelenmiş ve bu amaçla deformasyonla şerit değiştirme arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Deformasyonlu yollarda deformasyon etkisi ile akımda şok dalgası oluşumunu açıklamak amacıyla kritik hız değerini tanımlamak için yeni bir matematiksel model önerilmiştir.

## BÖLÜM İKİ

### ŞERİT DEĞİŞTİRME DAVRANIŞI

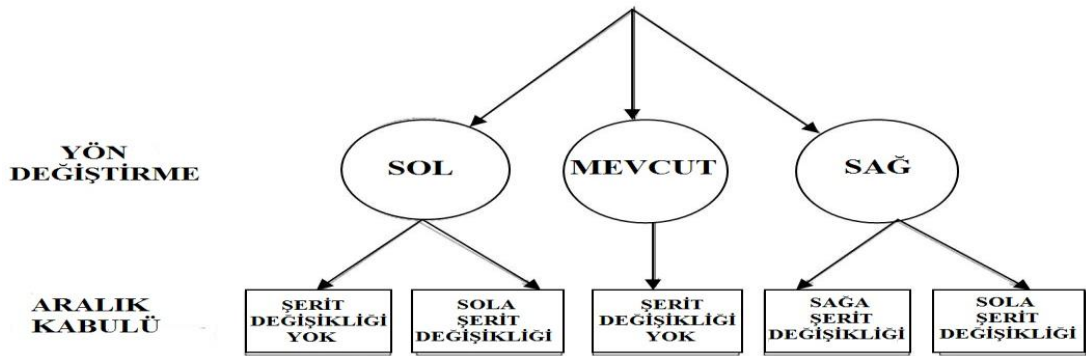
Bir taşıtın bir şeritten komşu diğer şerit veya şeritlere geçerek hareketine buradan devam etmesi şerit değiştirme olarak tanımlanabilmektedir. Şerit değiştirme trafik akımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Bu yüzden şerit değiştirme modelleri mikroskobik trafik benzetim yazılımlarının önemli bir bileşeni olmaktadır. Bu benzetim yazılımları işletimsel seviyedeki trafik ilişkili uygulamaların geniş bir ölçekte seçim aracı olmaktadır. Taşıtların şerit içindeki davranışları hız ve konum olarak incelendiğinde bunları modellemek günümüzde oldukça kolay olmaktadır. Bununla birlikte şerit değiştirme işlemi ise oldukça karmaşık olmaktadır. Çünkü şerit değiştirme kararları bir dizi etmenlere bağlı olmakta ve zamanla bu etmenler karmaşık bir hal alabilmektedir.

#### 2.1 Şerit Değiştirme İşlemi

Şerit değiştirme işlemi ardışık 3 adımda modellenmektedir.

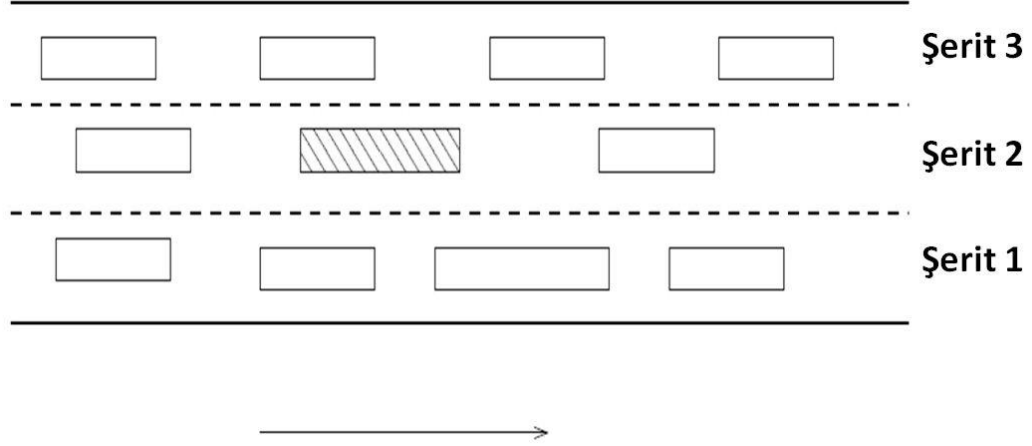
- Hedef şeridin seçimi
- Aralık kabulü
- Düşünülen şerit değiştirme işlemine karar verme

Şerit değiştirme işlemi Şekil 2.1'de gösterilen örnek kullanılarak açıklanabilmektedir.



Şekil 2.1 Toledo, T., Koutsopoulos, H. ve Ben-Akiva, M. (2003) tarafından önerilen şerit değiştirme modelinin yapısı.

Şerit değiştirme işleminde s¼r¼c¼ler Şekil 2.2'deki Şerit değiştirmeye karar vermekte, daha sonra bir hedef Şerit seğmekte bu belki Şerit 1 ya da Şerit 3 olmaktadır.



Şekil 2.2 Şerit değiştirme işleminin Şekil ¼zerinde g¼sterimi.

## 2.2 Şerit Değiştirmenin Sınıflandırılması

Şerit değiştirme işlemi genel olarak aşağıda verilen 2 durum ile sınıflandırılabilir.

- Şerit değiştirme
- Aralık kabul¼

### 2.2.1 Şerit değiştirme

**A. Zorunlu Şerit Değiştirme (ZŞD):** Bir s¼r¼c¼n¼n izlediği rotayı takip etmek amacıyla zorunlu olarak yaptığı Şerit değiştirmedir. Örneğin bir s¼r¼c¼ bir sonraki kavşaktan sağa d¼necekse bu s¼r¼c¼n¼n sağ Şeride geğmek amacıyla yaptığı Şerit değiştirme ZŞD olarak tanımlanabilir.

**B. Keyfi Şerit Değiştirme (KŞD):** Bir s¼r¼c¼n¼n geğmek istediği hedef Şeridin s¼r¼c¼ye daha iyi trafik koşulları önermesinden dolayı meydana gelen Şerit

değiştirmedi. Çünkü sürücü arzu ettiği hıza ulaşarak kamyon vb. ağır araçları izlemek zorunda kalmayacak ve yol birleşimlerinden sakınabilecektir.

**C. Aralık Kabulü ile Şerit Değiştirme:** Mevcut ve hedef şeritte, öndeki ve arkadaki araçlar, şerit değiştirmek isteyen aracın manevrasını etkileyebilmekte ve buda şerit değiştirmek isteyen aracın aralık kabulü yaparak şerit değiştirmesine sebep olmaktadır.

**D. Gecikmeli Şerit Değiştirme:** Mevcut taşıtın şerit değiştirme işleminin öndeki araçtan etkilenmesi durumudur.

**E. Karmaşık Şerit Değiştirme:** Mevcut taşıtın şerit değiştirme işleminin arkadaki araçtan etkilenmesi durumudur.

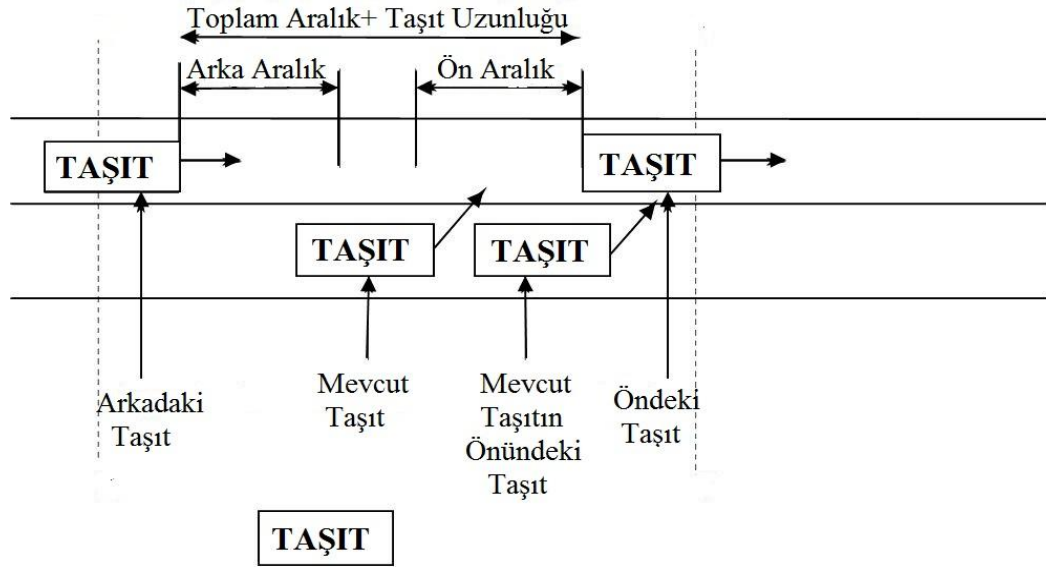
**F. Serbest Şerit Değiştirme:** Mevcut taşıtın şerit değiştirme işleminin öndeki ve arkadaki araçtan etkilenmemesi durumudur.

Önerilen bu şerit değiştirme modellerinin çoğu, şerit değiştirme modellerinin uygulamalarının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır.

### **2.2.2 Aralık Kabulü**

Şerit değiştirilecek olan hedef şeritte önde ve arkada yer alan araçlar arasındaki mesafe, araçlar arasındaki aralık olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.3). Aralık kabulü hesap yöntemlerinde, sürücülerin önde ve arkada yer alan araçlarla asgari kabul edilebilir aralıklara sahip oldukları varsayılmakta ve bu aralıklar sırasıyla öndeki ve arkadaki kritik aralıklar olarak adlandırılmaktadır.





Şekil 2.3 Şerit değiştirme işlemindeki aralıkların gösterimi.

Birçok model öndeki ve arkadaki bu aralık değerlerinin arasında kabul edilebilir olması hususunda çeşitli ayrımlar yapmaktadır. Ön aralık, mevcut araç ve hedef şeritte mevcut aracın önünde yer alan araçla olan aralık olarak tanımlanmaktadır. Arka aralık ise, mevcut araç ve hedef şeritte mevcut aracın arkasında bulunan araçla olan mesafe olarak tanımlanmaktadır.

Kritik aralık kabul değeri  $t$  süresinde, sürücü  $n$  için aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$G_n^{g,cr}(t) = \exp[X_n^g(t)\beta^g + \alpha^g v_n + \sum_n^g(t)] \quad (1)$$

burada:

$G_n^{g,cr}(t)$  :  $t$  süresinde sürücü  $n$  tarafından aralık  $G$  için ölçülen kritik aralık değeri,

$X_n^g(t)$  :  $G_n^{g,cr}(t)$  ortalamasını nitelendirmek için kullanılan açıklayıcı değişken,

$\sum_n$  : Lognormal dağılımda kullanılan rastgelelikler,

$\alpha^g$  : Sürücü için rastgelelik parametresi,

$v_n$  :  $\sum_n^g(t) \approx N(0, \sigma_z^2)$

Kritik aralık değerinin tanımlanması farklı modellerde değişiklik göstermektedir. Highway Capacity Manual (1997)'de iki yönlü dur kontrollü kavşaklarda kritik aralık değeri, yan yoldan ana yola girecek olan araçlar için gerekli minimum aralık değeri olarak tanımlanmaktadır CORSİM (Halati, A., Lieu, H. ve Walker, S., 1997). benzetim modelinde kritik aralık değerleri risk faktörleriyle tanımlanmaktadır. Bu benzetim modelinde risk faktörleri eğer öndeki araç fren yaparak duracaksa o zaman ters ivmelenecektir yani yavaşlayacaktır şeklinde tanımlanmaktadır. Risk faktörleri şerit değiştirecek olan aracın önündeki ve arkasındaki aracın mevcut hız ve konumuna göre hesaplanmakta ve sabırsız sürücülerin davranışlarıyla birleştirilmektedir. Yang ve Koutsopoulos (1996) ve Ahmed (1999) ise kritik aralık değerini, minimum uzay boşlukları olarak tanımlamaktadırlar.

$$Y_{nt} = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{ve if } G_{nt} \geq G_{nt}^{cr} \\ 0, & \text{ve if } G_{nt} < G_{nt}^{cr} \end{cases} \quad (2)$$

burada:

$Y_{nt}$  : Seçim gösterge değişkeni olmakta ve aralık kabul edilirse 1 değilse 0 değerini almaktadır.

$G_{nt}$  : Mevcut olan aralık,

$G_{nt}^{cr}$  : Kritik aralık değeridir.

Herman ve Weiss (1961) Kritik aralık değerinin üstel dağılıma, Drew, D. R., LaMotte, L. R., Buhr, J. H. ve Wattleworth, J. A. (1967) lognormal dağılıma ve Miller (1972) ise normal dağılıma uyduğunu varsaymışlardır. Dagonzo (1981), zaman içinde bireysel sürücülerin yanı sıra popülasyondaki kritik aralık değerlerindeki ele almak için yeni bir yapı önermiştir. Dagonzo (1981), bu yapı için multinominal probit hesap yöntemini önermiş olup bu hesap yöntemini kritik aralık değerlerinin dağılım parametrelerini tahmin etmek amacıyla kullanmıştır. Mahmassani ve Sheffi (1981) ortalama kritik aralık değerinin, açıklayıcı değişkenlerin bir fonksiyonu olduğunu varsaymış ve bu sayede aralık kabul davranışını etkileyen değişik faktörler elde edildiğini belirtmişlerdir. Mahmassani ve Sheffi (1981), dur kontrollü bir kavşak için bir model hesaplamış ve bu modelde çeşitli reddedilen aralık kabulleri

bulmuştur. Elde edilen bu reddedilen aralık kabul değerlerinin sürücülerin sabırsızlığını ele aldığını ve bu durumun kritik aralık değeri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu vurgulamıştır.

Madanat, S. M., Cassidy, M. J. ve Wang, M. H. (1993), toplam sürücü sabırsızlığını belirlemek amacıyla toplam kuyruk süresini ele almıştır. Cassidy, M.J., Madanat, S.M., Wang, M., ve Yang, F. (1995) ilk aralık değerini diğer aralıklardan farklılaştırmış ve bu farklılaştırmayı en yakın şeritteki aralıklardan en uzak şeritteki aralıklara göre yapmıştır. Bu değişkenler modelin uygunluğunu önemli derecede iyileştirmiştir. Kritik aralık değerlerini etkileyen diğer parametreler Brilon (1988, 1991), Adebisi ve Sama (1989), Saad, F., Delhomme, P. ve Van-Elslande, P. (1990) ve Hamed, M. M., Ease, S. M. ve Batayneh, R. R. (1997) tarafından manevranın türü, ana yollardaki taşıtların hızı, yol geometrik karakteristikleri, görüş mesafeleri, kavşaklardaki kontrol türü, yayaların varlığı, polis aktiviteleri ve gündüz koşulları olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte yapılan çalışmaların birçoğu, makroskobik karakteristiklerin mikroskobik sürücü davranışlarına göre daha doğru sonuçlar verdiğini işaret etmektedir.

Sıkışık trafik durumlarında, kabul edilebilir aralıklar yoğun şekilde görülememekte ve çok karmaşık aralık kabul durumları gözlenebilmektedir. Örneğin sürücüler ya hedef şeritte arkada yer alan aracın durumuna göre nezaket göstererek ya da arkadaki araçları onların hızlarını azaltmaya ve yönlerini değiştirmeye zorlayarak şerit değiştirmektedir. AIMSUN<sup>®</sup>, PARAMICS<sup>®</sup> ve VISSIM<sup>(c)</sup> gibi mevcut mikroskobik trafik benzetim programlarının normal aralık kabul modellerinin basit ya da modifiye edilmiş versiyonları otoyol birleşim davranışlarını incelemek amacıyla kullanılmaktadır (TSS, 2004; Quadstone, 2004; PTV, 2004). Bu modeller, aralıkların komşu taşıtlar tarafından yaratıldığını düşünmektedir. Tıkanık koşullarda aralık kabul eşik değerleri önerilen bu modeller tarafından azaltılmaktadır. Fakat sürücüler arasındaki ileriye dönük işbirliğinin yönü ve sabırsız sürücüler tarafından gerçekleştirilen agresif birleşmeler, belirtilen bu benzetim programları tarafından açık bir şekilde düşünülememektedir.

### 2.3 Şerit Değişirme Modelleri

Literatürde sürücü şerit seçim davranış modelleri iki temel yaklaşıma dayanarak açıklanmaktadır. Bunlar;

- Boyuna sürüş hareketleri (car following theory) ya da hızlanma hareketleri,
- Aralık kabulü ve şerit seçim/değişirme kararlarına bağlı olarak yapılan yatay doğrultudaki hareketlerdir.

Sürücülerin şerit değiştirme davranışlarını modellemek amacıyla yapılan çalışmalar, şehirlerarası trafiğe hizmet eden çevreyolları ve şehir içi trafiğine hizmet eden arterlerde yapılmaktadır. Çevreyolu trafiği, sürücü davranışını modelleyebilmek amacıyla yapılan araştırmalar için odak noktası olmuştur, bunun iki ana nedeni bulunmaktadır. Birincisi çevre yollarının uluslararası trafiğe hizmet etmesi ve bazı çevreyollarındaki sıkışıkların dünyanın çeşitli bölgelerindeki ulaşım ağlarını etkilemesi sebebiyle bu durumu azaltmak için önceden araştırmalara başlanmış olmasıdır. İkincisi ise sürüş modellerinin değerlendirmesini ve gelişmesini kolaylaştıran çevreyolu trafiği için detaylı veri bulunmasıdır. Bu iki nedenden dolayı çevre yolu sürüş modelleri hakkında geniş bir literatür mevcutken, şehir içi trafiğine hizmet eden arterlerde daha az çalışma bulunmaktadır.

Ramanujam (2007) çevreyolları için önerilmiş olan bir şerit seçim modelini sürücü davranışlarına ve şerit seçim kararlarına bağlı olarak geliştirerek arterler için uygulamaya çalışmıştır. Arterler üzerindeki trafiğin çevreyollarındaki trafik akımından farklılıklarını açıklamaya çalışan Ramanujam, bu farklılıkların arterler için geliştirilecek farklı modeller ile incelenmesi gerektiğini belirtmiştir. Büyükşehirlerdeki trafiğin hızla arttığını belirten araştırmacılar, arterlerin çevre yollarındaki yaklaşımdan farklı trafik yönetim uygulamaları ve arter üzerindeki araç hareketlerine uygun yaklaşımlarla değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir.

### 2.3.1 Temel Şerit Değişirme Modelleri

İlk şerit değiştirme modeli mikro-benzetim amaçlı olarak Sparmann (1978) tarafından oluşturulmuştur. Bu modelde şerit değiştirme isteği ve bu isteğin gerçekleştirilmesi arasında bir ayırım yapılmıştır. Bu model ayrıca otoyol üzerinde yer alan giriş ve çıkış rampalarına yakın veya uzak yollardaki şerit değiştirmeleri de ayırt etmektedir. Otoyol çıkış rampası yönünde yapılan şerit değişikliklerinde araçlar en sağ şeritte ise çıkış rampasına geçiş haricinde bir şerit değişikliği olmamakta ve dolayısıyla herhangi bir engelle karşılaşmamaktadırlar. Fakat araçlar çok şeritli bir otoyolda en sol şeritten çıkış rampasına doğru yöneliyorsa o şeride geçişleri sırasında çeşitli engellemelere maruz kalmaktadırlar (Örneğin yavaş taşıtlar vb.). Önerilen bu modelde ayrıca, sürücülerin fiziksel davranışlarına, aracın hız ve takip mesafesi kabulüne göre sınır değerler tanımlanmakta ve sürücünün bu değerlere vereceği tepkide detaylı bir şekilde incelenmektedir. Modelde şerit değişikliğinin gerçekleşme olasılığı seçilen şeritteki mevcut aralık durumuna göre belirlenmiştir.

Gipps (1986) yaptığı çalışmada kural bazlı ve bölge bağımlı bir model geliştirmiştir. Bu model özellikle şerit değiştirme zorunluluğu, isteği ve şerit değişiminin güvenliğine dikkat çekmektedir. Bu model de sürücü davranışı iki basit düşünceyle ilişkilendirilmiştir. Bunlar mevcut hızı korumak ve dönüş manevrası için uygun şeritte olmaktır. Kural bazlı modellerde ise şerit seçim kuralları ardışık olarak değerlendirilerek sınırlandırılmıştır. Önerilmiş olan bu modele ait parametrelerin tahmininde sıkı bir ölçüt söz konusu değildir.

Basit şerit değiştirme modelleri Şekil 2.1'deki çerçeve kullanılarak tanımlanmaktadır. Kendi şeridinde hareket halinde olan bir taşıt şerit değiştirmek amacıyla yönünü ya sola ya da sağa çevirmektedir. Seçilen şeritteki aralık kabul edilebilir ise şerit değiştirme gerçekleşmekte ve araç şerit değiştirerek hareketine devam etmektedir. Modellerin çoğu şerit değiştirmeleri ya Zorunlu Şerit Değişirme (ZŞD) ya da Keyfi Şerit Değişirme (KŞD) olarak sınıflandırmaktadır.

### 2.3.2 Zorunlu Şerit Değişirme (ZŞD) ve Keyfi Şerit Değişirme (KŞD) Modelleri

Zorunlu şerit değişirme (ZŞD), sürücünün bir ZŞD koşuluna ya yanıt vermediği ya da ZŞD koşullarının uygulanmadığı duruma karşılık gelmektedir. Bir sürücü daha sonra keyfi şerit değişirme (KŞD)'yi gerçekleştirip gerçekleştirilmeye karar vermektedir. Keyfi sürüş koşulları terimi, sürücünün mevcut şeridin sürüş koşullarından memnuniyetini ima etmektedir. Sürüş koşullarının keyfi olup olmadığı kararlarını etkileyen önemli faktörler, sürücünün arzuladığı sürüş hızıyla mevcut hız arasındaki durum ve mevcut aracın önünde ve arkasındaki ağır araçların mevcudiyetidir.

Eğer sürüş koşulları keyfi değilse, sürücü mevcut şeridin sürüş koşullarını komşu diğer şeritlerin sürüş koşulları ile kıyaslamaktadır. Bu kararı etkileyen önemli faktörler, farklı şeritlerde trafik hızlarının farklılığı ve sürücünün arzuladığı hız, farklı şeritlerdeki trafik yoğunluğu, aracın hedef şeridindeki arkadaki araca göre hızı, mevcut aracın önünde ve farklı şeritlerde ağır araçların mevcudiyetidir. İlave olarak her ne kadar ZŞD gerekli olsa da sürücü bunu bazen KŞD olarak düşünebilmektedir. Fakat sürücü zorunlu şerit değişirme koşullarına tepki vermemektedir.

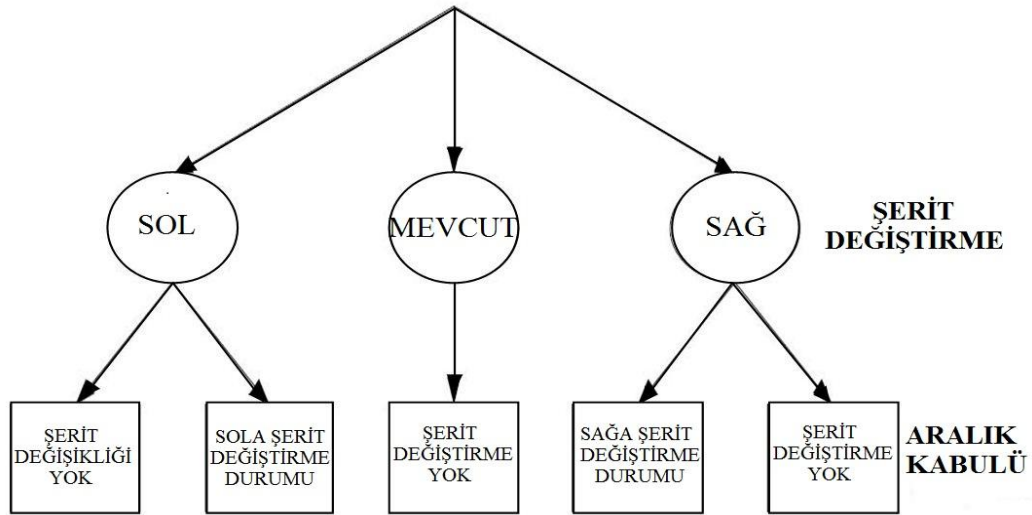
Deterministik kural bazlı modellerin aksine, Yang ve Koutsopoulos (1996) oluşturdukları modelde, şerit seçim davranışını rastgele bir kullanıma dayandırmaktadırlar. Ayrıca bu davranışın şerit seçimini etkileyen diğer faktörleri de ele aldığını belirtmişlerdir. (Örneğin hız avantajı, ağır araçların varlığı, yollarda giriş ve çıkış rampasının mevcudiyeti vb. durumlar).

Ahmed (1999), oluşturduğu şerit değişirme modelinde şerit değişirme kararlarını modellemek amacıyla daha sıkı ayırık seçim sistemleri kullanmıştır. Oluşturduğu bu sistemi üç ana adımda tanımlamıştır. Bunlar; bir şerit değişikliğine karar vermek, hedef şeridi seçmek (sağ ve sol şerit) ve bu şeritteki uygun aralık kabulünü yapmaktır. Ahmed (1999) tarafından tanımlanan modelin yapısı Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



edilmiştir. ZŞD modeli ise bütün taşıtların ZŞD şartları altında olduğu varsayımı yapılarak otoyol giriş ve çıkış rampalarındaki özel durum için tahmin edilmeye çalışılmıştır. KŞD modeli ise otoyol çıkış rampasına çok uzak bir mesafeden bir otoyol kesitinde veriler toplanarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ahmed (1999) tarafından önerilen bu model de sürücü mevcut alternatifler arasından bir şerit seçer ve hedef şeritteki komşu aralıkları değerlendirir. Karar ağacındaki en alt seviye Şekil 2.4'te oval olarak gösterilmiş olup modelde aralık kabul işlemlerine karşılık gelmektedir.

Toledo, T., Koutsopoulos, H. ve Ben-Akiva, M. (2003) şerit değiştirmeyi incelemek amacıyla birleşik şerit değiştirme modeli geliştirmişlerdir. Bu model ZŞD ve KŞD durumlarının ortak bir şekilde değerlendirilmesine izin vermektedir. Bu modelde ZŞD ve KŞD'ye ait ilişki, çıkış rampasına olan uzaklık vb. açıklanan değişkenlere göre değişiklik göstermektedir. ZŞD durumuna ilişkin farkındalık, düzenli artan fonksiyon ile daha gerçekçi gösterilmektedir. Belirtilen bu modelin yapısı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Toledo vd. (2003) tarafından önerilen şerit değiştirme modelinin yapısı.

Şekil 2.5'ten de görüldüğü üzere model yapısı 2 seviyeden oluşmaktadır. Bunlar şerit değişikliğinin uygulanması amacıyla şerit değiştirmenin seçimi ve aralık kabul kararlarıdır. Yapılan hesaplamalar sonucunda modele ait yörünge-plan değişkenlerinin sürücülerin şerit değiştirme davranışı üzerinde önemli bir rol



oynadığı görülmektedir. Modelin yapısında yörünge-plan etkileri çeşitli grup değişkenleri ile birlikte ele alınmaktadır. (Örneğin sürücülerin olması gereken herhangi bir şeritteki belirli bir noktaya olan mesafeleri ve bu noktaya ulaşmaları için gerekli olan şerit değiştirme miktarları gibi). Model kapsamında şerit değiştirme parametreleri ve aralık kabul modelleri, otoyollardan geçen araçların saniye bazında araç konum grafikleri oluşturularak ve analizleri yapılarak belirlenmiştir.

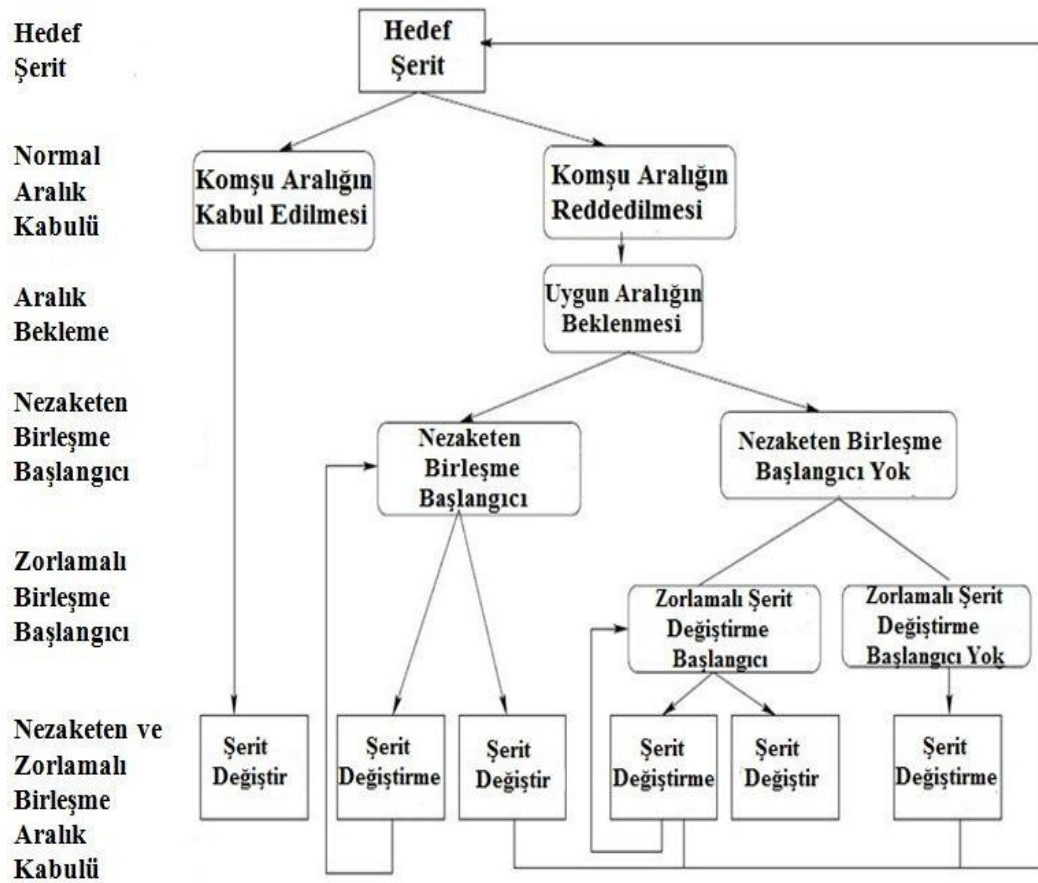
Var olan şerit değiştirme modellerinin çoğu, otoyol senaryolarına göre geliştirilmiştir. Wei, C.H., Meyer, E., Lee, J. ve Feng, C. (2000) iki şeritli kent içi arterlerden (Kansas City, Missouri şehirlerinden) elde edilen verileri kullanılarak bir deterministik kural bazlı model geliştirmişlerdir. Şerit seçimi, otoyol üzerindeki konum, yön ve gidilecek olan yere göre belirlenmiştir. Bu modelde de şerit seçim davranışı diğer modellerde olduğu gibi zorunlu ve keyfi olarak sınıflandırılmıştır. Modelde sürücüler bir sonraki kavşak, kesişim vb ayırım noktalarını kullanarak mevcut yoldan ayrılacaksa yapacakları şerit değiştirmeler ZŞD olarak nitelendirilmiştir. Eğer sürücülerin gidecekleri yörünge için yapacakları mecburi şerit değiştirmeler çok ilerideyse o zaman yapacakları şerit değiştirmeler keyfi olarak nitelendirilmektedir. Sürücüler gidecekleri yer için çoktan doğru şeridi kullanıyorlarsa o zaman yaptıkları şerit değiştirmeler KŞD veya keyfi geçiş ve dönüşler olarak nitelendirilmektedir. Yapılan tüm bu şerit değişiklikleri hız avantajı ya da daha konforlu bir yolculuk amacı taşımaktadır. Model, aracın bulunduğu ve yan yoldaki şeritte, önünde ve arkasında bulunan araçlarla arasındaki mesafenin bilinmesini gerektirmektedir.

Hunt ve Lyons (1994), yol trafik sistemlerinde sürücü davranışlarının modellenmesi amacıyla alternatif bir model olarak sinir ağlarını kullanmışlardır. Bu modelde sürücünün, bulunduğu mevcut yol durumuna göre kararlar aldığı kabul edilmiştir (Örneğin sürücünün önündeki ve arkasındaki aracın konumuna göre gerçekleştirdiği eylemler). Hunt ve Lyons (1994) oluşturdukları bu modelde görsel şablonları kullanarak sürücünün etrafındaki taşıt ve yol durumuna göre yol etkileri oluşturmaya çalışmış ve buna bağlı olarak da şerit değişiklikleri incelenmiştir.

Oluşturulan bu model büyük sayıda veri ve buna karşılık gelen karar ve cevaplar ile kalibre edilmiştir.

### 2.3.3 Zorlamalı Şerit Değişirme Modeli

Eğer hedef şeritteki mevcut aralık değeri kabul edilebilir değilse o zaman şerit değiştirmek isteyen araç, hedef şeritte ve kendisinin arkasında yer alan aracı kabul edilebilir aralık bulana kadar yavaşlamaya zorlamaktadır. Bu işlem zorlamalı birleşme olarak bilinmektedir. Şekil 2.6'daki akış şeması zorlamalı birleşme modelinin önerilen yapısını özetlemektedir.

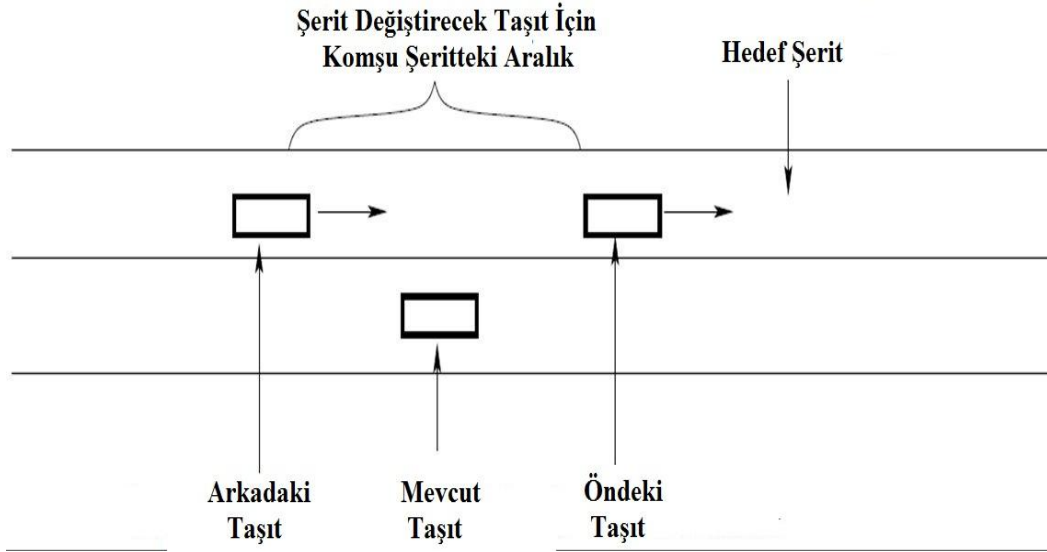


Şekil 2.6 Zorlamalı birleşme modelinin yapısına ait akış şeması (<http://nptel.iitm.ac.in/courses>).

Daha önceden değinildiği gibi ovaler işlemin yanıl kısımlarına karşılık gelmekte ve kararları içermektedir. Dikdörtgenler ise direk olarak gözlenebilen olaylara karşılık gelmektedir. Bir zaman diliminin her ayrık noktasında, bir sürücünün;

a-) Hedef şeritte trafik koşullarını birleşme amacıyla değerlendirdiği ve hedef şeritte önünde bulunan aracın arkasında bulunan aracın konumunu gözlemlediği,

b-) Şerit değiştirmek isteyen sürücünün hedef şeritte arkasında bulunan sürücü ile şerit değiştirmeyi tamamlamak için iletişime geçtiği varsayılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Şerit değiştirmede komşu aralıkların tanımlanması (<http://nptel.iitm.ac.in/courses>).

Eğer bir sürücü hedef şeritte arkasında bulunan araçlarla olan iletişimini tamamlamış ve şerit değiştirmek için gerekli hakkı kendisinde bulmuşsa karar işlemi sona ermekte ve sürücü kademeli olarak hedef şeride hareket etmektedir. Bu olay (Z) ile gösterilebilmektedir. Burada (Z), zorlamalı birleşmenin başlangıcını göstermekte ve bir saniye ya da birkaç saniye içerisinde sona ermektedir. Eğer şerit değiştirme hakkı tam olarak oluşmadıysa, şerit değiştirmek isteyen araç değerlendirme/iletişim işlemine gelecek bir zaman boyunca devam etmektedir (Z durumunda kalmaktadır). Birleşme işlemi sürücünün komşu şeritle olan birleşme niyetini ve yine sürücünün kendisinde bu hakkı görüp görmediği kararlarını da içermektedir. Şerit değiştirme ile ilgili oluşturulan modellerin çoğunda komşu şerit aralığı, hedef şeritte önde bulunan araçla şerit değiştirmek isteyen araç arasındaki aralık olarak tanımlanmaktadır. Bu modellerde şerit değiştirme hakkı ise, şerit değiştirmek isteyen mevcut aracın hedef şeritte onun arkasında bulunan araçla iletişim kurduktan sonra arkadaki aracın bu birleşmeye izin vermesi olarak tanımlanabilmektedir.

### 2.3.4 Birleşik Modeller

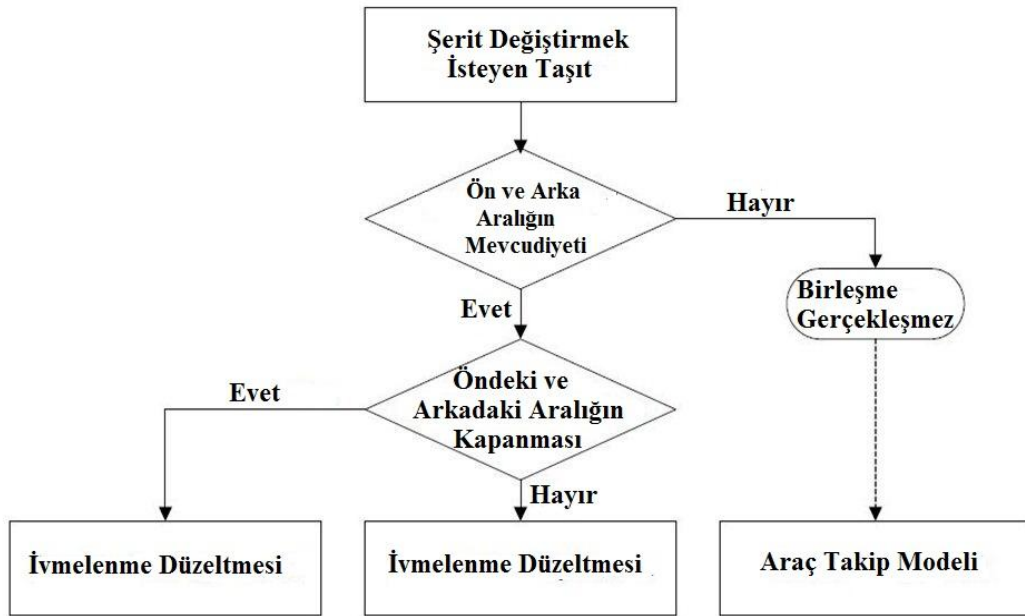
Çoklu model elemanlarını bir sistem çerçevesinde bir araya getirmek, sürücü davranışlarının planlanması ve bunların bazı derecelerde ele alınması için çeşitli modeller geliştirilmiştir.

Hidas (2002) sıkışık trafik koşulları altında şerit değiştirme modelinin bileşenleriyle bir birleşme modeli geliştirmiştir. Bu modelde, “eğer bir araç normal aralık kabulü ile birleşmiyorsa, hedef şeritteki akım koşullarını değerlendirir ve ivmelenecek öne doğru bir hareket ile şerit değiştirir” sonucunu elde etmiştir. Bu kararlar sürücünün şerit değiştirme planlarını oluşturmaktadır. Hidas (2005) sürücü taşıt etkileşimlerini kullanarak bu modeli genişletmiştir. Genişletilmiş bu model, birleşme senaryolarında yani şerit değiştirme durumlarında bireysel amaçlara sahip olmakta ve diğerleriyle işbirliği yaparak sınırlayıcı amaçları çözmektedir.

Şerit değiştirme manevraları, serbest, zorlanmış, öndeki ve onu takip eden araçlar arasındaki aralığa bağlı olarak işbirliği tabanlı olarak üç gruba ayrılmaktadır. Bunlardan serbest şerit değiştirmelerde tüm işlem sırasında, öndeki ve arkadaki araçla olan aralıkta fark edilebilecek bir değişiklik yoktur. Buda gözlenen ve onu takip eden araçlar arasında herhangi bir etkileşim olmadığını göstermektedir. Zorlanmış şerit değiştirme durumunda, mevcut aracın önündeki veya mevcut aracı takip eden araç arasındaki aralığın birleşmeden önce ya sabit olduğu ya da azaldığı görülmektedir. İşbirliğiyle yapılan şerit değiştirmelerde şerit değiştirirken öndeki araç ile şerit değiştiren araç arasındaki aralığın giriş noktasından önce arttığı ve daha sonra azaldığı gözlemlenmektedir. Buda arkada bulunan ve şerit değiştirmek isteyen aracın bu işlemi gerçekleştirebilmesi için yavaşladığını göstermektedir. Bununla birlikte, bu modelde her taşıt bir şerit değiştirme manevrasına sahiptir. Buda diğer taşıtların şerit değiştirme planları hakkında yeterli bilgiye sahip olmak ve taşıtların diğer taşıtlarla işbirliği koordinasyon ve sorunları çözme amacıyla iletişim kurma olanağı sağlamaktadır. Modeli geliştirmek amacıyla video verileri kullanılmıştır fakat kalibrasyon yönteminin detayları mevcut değildir. Sürücülerin özellikle işbirliği

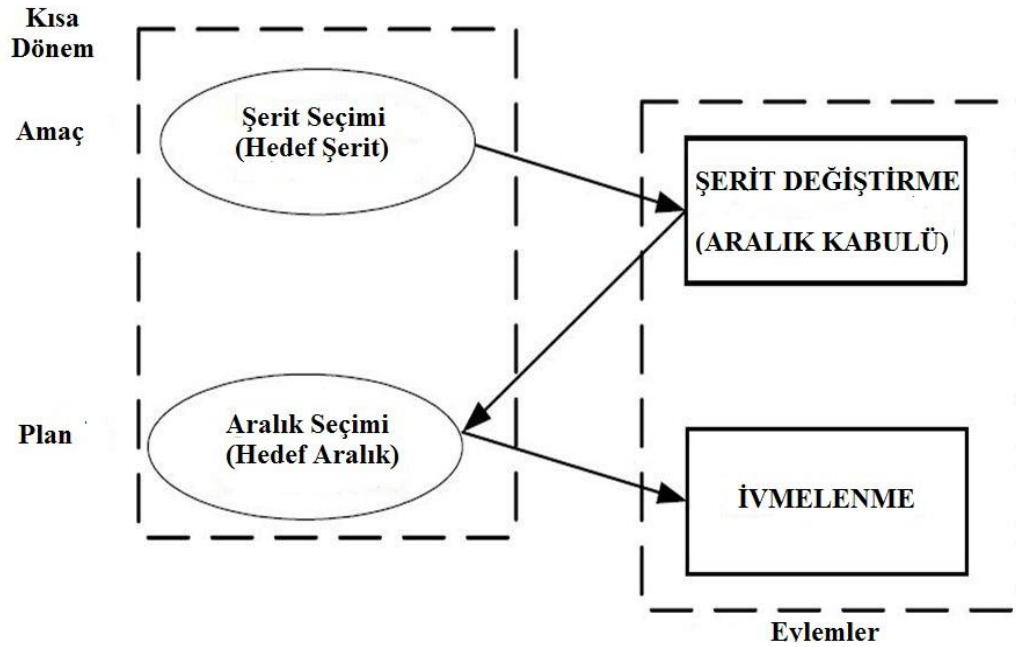
ve/veya zorlamalı şerit değiştirme planlarını modellemek amacıyla çeşitli diğer modeller geliştirilmiştir.

Wang, J., Liu, R. ve Montgomery, F. (2005) hedef şeritte arkada yer alan sürücünün şerit değiştirme durumuna nezaket gösterme olasılığına dayalı bir birleşme-sürüş planı oluşturmuştur. Model yapısı Şekil 2.8’te gösterilmektedir. Arkadaki sürücünün nezaket gösterme olasılığı ve parametreleri video gözlemleri ile kalibre edilmiş olup binomial dağılımlarla çizdirilmiştir. Birleşmeyi gerçekleştiren taşıt seçtiği hedef aralığa göre hız ve konumunu düzenlemek amacıyla ivmelenmekte veya ters ivmelenmektedir. Bu birleşme, eğer hedef aralık kabul edilebilir durumda ise gerçekleşmektedir. Model ayrıca zorunlu birleşme olasılığını ihmal etmekte, eğer bu birleşmeyi gerçekleştiren taşıt şerit değiştirme işleminin sonuna kadar kabul edilebilir bir aralık bulamazsa, incelenen taşıt hesaba katılmamakta ve bir birleşme hatası olarak güncellenmektedir ya da kaydedilmektedir. Modelin zayıf yönlerinin başında model kapsamında sürücüler arasındaki homojen olmama durumunun açıkça düşünülmesi gelmektedir.



Şekil 2.8 Şerit değiştiren araçla onun önünde ve arkasında yer alan araçlar arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Wang vd., 2005).

Toledo (2002) bir sürücü için kısa dönem amaç ve kısa dönem plan kavramlarına dayanan bir yapı sunmuştur. Bu yapıda sürücü davranışları, kısa dönem amaç, kısa dönem plan ve sürücülerin eylemleri olmak üzere 3 ana elemandan oluşmaktadır. Kısa dönem amaç sürücünün hedef şeridi olarak tanımlanmaktadır. Bu amaç kapsamında sürücü kısa dönem plan kurmakta ve buda hedef şeritteki hedef aralık olarak tanımlanmaktadır. Bu aralık sürücünün amacına ulaşmak amacıyla arzuladığı aralık olmaktadır. İvmelenmeler ve şerit değiştirmeler, sürücünün kısa dönem planı gerçekleştirmek amacıyla kullandığı eylemler olmaktadır. Modelin kavramsal yapısı Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

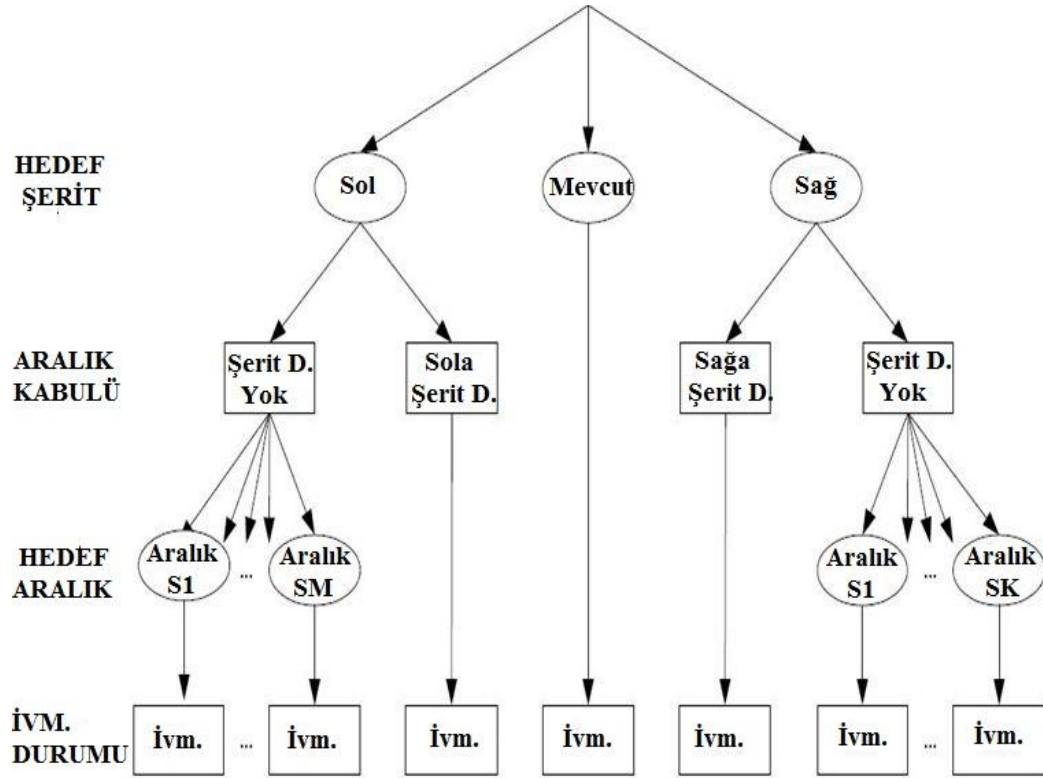


Şekil 2.9 Sürücü davranışının kavramsal yapısı (Toledo 2002).

Komşu aralıklar sürücü tarafından reddedilirse, sürücü hedef şerit trafiğinde hedef bir aralık seçerek kısa dönem plan yapmaktadır. Hedef aralık seçimindeki alternatifler, mevcut aracın çevresindeki mevcut aralıklara göre ayarlanmakta ve kullanılmaktadır. Bir aralık belki karar aşamasında seçilebilir olmayabilmekte fakat ileri ki bir süreçte kabul edilebilir olabilmektedir.

Bununla birlikte, kısa dönem amaç ve kısa dönem plan (gözlenemeyen durumlar) gibi durumların olası bütün kombinasyonlarının hesapsal zorluğundan dolayı, bir

kısmi kısa dönem plan varsayımında bulunmaktadır. Sürücünün kısa dönem planının bir adımını gerçekleştirdiği, durumu yeniden değerlendirdiği ve sonraki hareketine karar verdiği varsayılmıştır. Toledo (2002) tarafından önerilen birleşik şerit değiştirme ve ivmelenme modellerinin yapısı Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Sürücü davranış modelinin yapısı (Toledo 2002).

Model şerit değiştirme ve ivmelenme davranışlarının her ikisini de ele almaktadır. Sürücü mevcut ve komşu şeritler üzerindeki en iyi şeritleri seçer ve eğer bir şerit değiştirme gerekirse, şerit değiştirmek için kabul edilebilir bir aralık aramaktadır. Şerit değiştirmek isteyen ve hemen şerit değiştiremeyen sürücüler istedikleri şerit değiştirme işlemini gerçekleştirmek için bir kısa dönem plan gerçekleştirmektedirler. Kısa dönem planlar hedef şeritteki trafik akımı içerisindeki değişik aralıklar olarak tanımlanmaktadır. Sürücüler, ivmelenme davranışlarını hedef aralığı kullanabilecek duruma göre adapte etmeye yani ayarlamaya çalışmaktadırlar. Böylece kısmi kısa-dönem planın amacı sürüşün gerçekleştiği çevre ile ilişkili değişkenleri ele almaktır. Örneğin şerit seçimi yalnız, mevcut ve komşu şeritleri içermekte ve komşu şeritlerden öte diğer şeritler etkilenmemektedir. Benzer şekilde hedef aralık

seçiminin oluşturulması, yalnız komşu ve mevcut şeritteki ileri ve geri aralıkları içermektedir. Böylece model, hedef aralığa ulaşmak için gerekli mesafe boyunca yapılan ardışık manevraları içermekte ve farklı şeritlerde hizmet düzeyinde önemli farklılıklar mevcut ise hata vermektedir.

Rao (2006), şerit değişim kararlarını modellemek amacıyla dinamik programlama bazlı teorik bir yapıyı formüleştirmiştir. Burada beklenen gelecek koşullar açıkça gösterilmiştir. Dinamik programın çözümü, belirlenmiş sürücüler için en uygun karar formunu almakta ve bu sürücülerin en uygun kullanım bazlı kararları ve onların mevcut bilgilerinin bir fonksiyonu olmaktadır. Bir model olarak uygulanmasındaki hesapsal karmaşıklık modelin hesaplanmasına engel olmaktadır.

#### **2.4 Şerit Değişirme Davranışına Ait Hesap Yöntemleri**

Yapılan birçok araştırmada vurgulandığı üzere şerit değiştirme hareketi akım içerisinde geniş boşluklar oluşturmakta ve bu durumda kapasitede düşüşe neden olmaktadır. Laval ve Dagonzo (2006) yaptıkları çalışmada bu düşüşü belirleyebilmek amacıyla bir model tanımlamışlardır. Tanımlanan bu modelde şerit değiştiren araçları detaylı şekilde incelemişlerdir. Araçların şerit değiştirme hareketleri parçalara ayrılmış ve bu parçalardan araçların gerçek mekanik özellikleri incelenmiştir.

Otoyol şerit değiştirme modellerine ilişkin bilimsel araştırmalar son 10 yılda ciddi şekilde artmıştır. Şerit değiştirmenin incelenmesine yönelik yapılan araştırmalar birçok nitel varsayımı içermektedir. (Brackstone, M., McDonald, M. ve Wu, J. 1998; Chang ve Kao, 1991; Chowdhury, D., Wolf, D.E. ve Schreckenberg, M. 1997; Wei vd., 2000; Greenberg, J.M., Klar, A. ve Rasche, M. 2003). Belirtilenlerin aksine şerit değiştirmenin trafik akımı üzerindeki etkisini incelemek ve nicel anlayışları belirlemek oldukça zor olmaktadır. Laval ve Dagonzo (2006) yaptıkları çalışmada bu boşluğu doldurmayı amaçlamışlardır. Şerit değiştirme hareketini inceleyecekleri otoyol kesimini, otoyol birleşme ve ayırım noktalarından uzak yerlerde seçmişlerdir. Burada gözlenmesi gereken ana durum araçların şerit değiştirirken ivmelenerek hızlarını arttırmaları olmaktadır. Laval ve Dagonzo (2006) yaptıkları çalışma



kapsamında şerit değiştiren taşıtın şişe boynu şeklinde kendi istikameti doğrultusunda hızını arttırarak hareket ettiğini ve bu durumunda diğer şeritlerdeki araçların hareketlerini engellediğini gözlemlemişlerdir. Bu sebepten dolayı otoyol akımları, birbirleriyle etkileşen ve şerit değişimleriyle birbirlerine bağlanan akımlar şeklinde modellenmiştir. Önerilen model basit trafik akım modelleri için gerekli 3 parametre ile birlikte bir parametreye daha ihtiyaç duymakta ve birçok karmaşık olayı yeniden kalibre etmeksizin açıklayabilmektedir.

Var olan trafik akım modelleri, şerit değiştirme olayına uygun şekilde vurgu yapmamaktadır. Genişletilmiş Kinematik Dalga (KW) teorisi (Lighthill ve Whitham, 1955; Richards, 1956) ve şerit değiştirme ile ilgili Kinematik Dalga Teorisi şerit değiştirmenin modellenmesinde yetersiz olmaktadır.(Munjal ve Pipes, 1971; Munjal, P.K., Hsu, Y. ve Lawrence, R.L. 1971; Michalopoulos, P.G., Beskos, D.E. ve Yamauchi, Y. 1984; Dagonzo, 1997; Dagonzo, C.F., Lin, W.ve Del Castillo, J. 1997; Dagonzo, 2002a, 2002b). Çünkü bu teorilerde taşıtların şerit değiştirme hareketleri bir akışkan gibi düşünülmüş, taşıtların aniden ivmelendiği varsayılmış ve takip eden taşıtların bundan etkilenmeleri ise yeterli şekilde incelenmemiştir. Bazı mikroskobik benzetim modelleri gerçekçi ivmelenmeleri düşünmüş fakat onları şerit değiştirme hareketlerini modellemek amacıyla başarılı şekilde kullanamamıştır. Bu modeller ile ilişkili çalışmalardan Buisson ve Wagner (2004), şerit değiştirme amacıyla önerilen modellerin karmaşıklığının, model şartname ve hesap yöntemlerinin zorluğunun giderek arttığını göstermiştir. Bu problemlerin üstesinden gelmek amacıyla, Laval ve Dagonzo (2003) tarafından bir hibrid yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım mikroskobik ve makroskobik modellerin en iyi özelliklerini birleştirmektedir. KW modelinin trafik akımı içerisindeki olumsuz yönü ise mikroskobik modellerdeki (yavaş taşıtlar) doğruluğudur. Yavaş taşıtlar bir tekil KW akımında şişe boynu şeklinde hareket ediyormuş gibi kabul edilmektedir.

Laval ve Dagonzo (2006) yaptıkları çalışmada bu hatayı gidermeye çalışmışlar ve bu doğrultuda her bir şeridi ayrı ayrı şerit değiştirme hareketleriyle trafiği tamamen kapatan KW akımı şeklinde modellemişlerdir. KW problemleri için Incremental-Transfer (IT) yönteminde (Dagonzo vd., 1997), şerit değiştirme talebine ilişkin

modele bir parametre daha eklenmiş fakat bu parametre komşu şeritler arasındaki akım transferlerini kontrol etmek amacıyla kullanılamamıştır.

#### 2.4.1 Çok şeritli kinematik dalga (KW) modeli

Sürekli ve çok şeritli genişletilmiş KW modeli 2 şeritli bir yol için ilk olarak Munjal ve Pipes (1971) tarafından önerilmiştir. Şerit sayısı  $n > 2$  için genişletilmiş denklem tek bir şerit için aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\frac{ak_{\ell}}{a_t} + \frac{aq_{\ell}}{a_x} = \Phi_{\ell'}, \quad \ell = 1, \dots, n \quad (3)$$

Burada  $k_{\ell}(t, x)$  ve  $q_{\ell}(t, x)$ ;  $l$  üzerindeki zaman-konum noktası olan  $(t, x)$ 'deki yoğunluk ve hacmi vermektedir. Homojen olmayan terim  $\Phi_{\ell}$ ; şerit  $l$  üzerindeki net şerit değiştirme oranını taşıt/zaman-mesafe cinsinden vermektedir. Michalopoulos vd. (1984) yaptıkları çalışmada  $\Phi_{\ell}$ 'yi  $k_{\ell}$ 'nin doğrusal bir fonksiyonu olarak önermişlerdir. Önerilen bu fikir, efektif sayısal yöntemler henüz geliştirilemediği için başarılı şekilde uygulanamamıştır (Dagonzo, 1993, 2005b; Lebacque, 1996; Dagonzo vd., 1997).

##### 2.4.1.1 Süreklilik Formülasyonu

$k(t, x) = [k_{\ell}(t, x), \dots, k_n(t, x)]$  vektörü tanımlanırsa ve bir yönlü şerit değiştirme oranı  $\ell$ 'den  $\ell'$  ( $\ell = \ell'$ ) ve  $\Phi_{\ell\ell'}$   $k(t, x)$ 'in bir fonksiyonu olarak varsayılsa bir yönle ilişkili net şerit değiştirme oranı Denklem 4'teki gibi olmaktadır.

$$\Phi_{\ell} = \sum_{\ell'=\ell} \Phi_{\ell'\ell} - \Phi_{\ell\ell'} \quad (4)$$

Önerilen model  $\Phi_{\ell}$ 'nin yerine  $\Phi_{\ell\ell'}$ 'ünü belirtmekte ve buda doğrusallık gerektirmemektedir.  $\Phi_{\ell\ell'}$ , sürücülerin şerit değiştirme istekleri arasındaki rekabeti ve hedef şeritteki mevcut boşluk kapasitesini göstermektedir.

Bu iki faktör arasındaki dengelemeyi yapmak amacıyla ilk olarak (k,t,x)'e ait 3 adet fonksiyon tanımlanırsa:

- i)  $\ell'$ 'den  $\ell''$  ne bir şerit değiştirme oranı (örneğin bir şerit değiştirme talebi taşıt/zaman-mesafe cinsinden)  $L_{\ell\ell'}$ ,  $\ell = \ell'$ ,
- ii)  $\ell$  üzerinde arzu edilen akımlar  $T_{\ell}$ , (taşıt/zaman) cinsinden,
- iii) Şerit  $\ell$  üzerindeki mevcut kapasite  $\mu_{\ell}$ , (taşıt/zaman) şeklindedir.

$$L_{\ell\ell'} = L_{\ell\ell'}(k, t, x) \quad (5a)$$

$$T_{\ell} = T_{\ell}(k, t, x) \quad (5b)$$

$$\mu_{\ell} = \mu_{\ell}(k, t, x) \quad (5c)$$

Bir rekabet mekanizması  $f$  daha sonra gerçek bir yönlü şerit değiştirme oranı  $\Phi_{\ell\ell'}$ 'ünü belirlemek ve  $q_{\ell}$  akımı boyunca devam etmektedir.

$$(\Phi_{\ell-1,\ell}, q_{\ell}, \Phi_{\ell+1,\ell}) = f(L_{\ell-1,\ell}, T_{\ell}, L_{\ell+1,\ell}, \mu_{\ell}). \quad (6)$$

Talep fonksiyonları, L ve T'nin kinematik dalga (KW) teorisinin bir talep fonksiyonu olan seçim modelleriyle çözümlenerek elde edilmiştir. Kapasite fonksiyonu  $\mu_{\ell}$ , KW teorisinin fonksiyonunu sağlamaktadır.(Dagonzo, 1993,1994; Lebacque, 1996).

#### 2.4.1.2 Ayrık Zaman Formülasyonu

Burada her bir şeridin temel diyagramı (FD) üçgen şeklindedir. Serbest akım hızı-u, dalga hızı-w ve tıkanıklık yoğunluğu-k 3 ya da 4 model parametresiyle hesaplanmaktadır. Bütün şeritler  $\Delta x$  uzunluğunda kısmi küçük hücrelere ve zaman olarakta  $\Delta t$  süre adımlarına ayrılmıştır. Bu durum Şekil 4.11'de görülmektedir. Sayısal stabilite için aşağıdaki bağıntı varsayılmıştır.

$$\Delta x = u \cdot \Delta t \quad (7)$$

$i$  ve  $j$  indisleri  $(t_j, x_i)$ 'deki hesaplanan değişkenlerin değerlerini göstermek amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin  $k_{i\ell}^j, k_i(t_j, x_i)$ 'nin ayrık yaklaşımını göstermekte ve hesaplarda kullanılacak denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{k_{i\ell}^{j+1} - k_{i\ell}^j}{\Delta t} + \frac{q_{i\ell}^j - q_{i-1,\ell}^j}{\Delta x} = \sum_{\ell'=1}^l \Phi_{i-1,\ell'\ell}^j - \Phi_{i\ell\ell'}^j, \quad \forall \ell. \quad (8)$$

Denklem 8, zaman boyunca adımlamak için uygun olmaktadır. Çünkü zaman indeksi ile ilgili yalnız bir terim mevcut olmakta ve her bir iterasyon  $L_{i\ell\ell'}^j, T_{i\ell}^j$  ve  $\mu_{i\ell}^j$  parametreleri her bir hücre  $(i, \ell)$  için Denklem 4 ile hesaplanabilmektedir. Mevcut yoğunluklar  $k^j$  parametreleri olarak kullanılarak, şerit değiştirme oranları ve akımlar  $q_{i\ell}^j, q_{i-1,\ell}^j, \Phi_{i-1,\ell'\ell}^j$  ve  $\Phi_{i\ell\ell'}^j$  IT prensibini kullanarak hesaplanabilmekte ve daha sonra  $k_{i\ell}^{j+1}$  Denklem 8 ile değerlendirilebilmektedir.

#### 2.4.1.3 L, T ve M için Hesap Yöntemi

Laval ve Dagonzo (2006) yaptıkları çalışmada ilk olarak IT yöntemine ait  $L_{i\ell\ell'}^j, T_{i\ell}^j$  ve  $\mu_{i\ell}^j$  parametrelerini tanımlamış daha sonra üçgen temel diyagram vasıtasıyla  $\Delta t$  süresi içerisinde hareket eden araçların sayısı elde etmişlerdir.

$$S_{i\ell}^j = \Delta t \min\{uk_{i\ell}^j | Q\} \quad (9)$$

*L için hesap yöntemi:*  $\Delta t$  süresince arzu edilen şerit değiştirme sayısı Denklem 10'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$L_{i\ell\ell'}^j \Delta t \Delta x = \pi_{i\ell\ell'}^j \Delta t S_{i\ell}^j, \quad \forall \ell, \forall \ell' \neq \ell, \quad (10)$$

burada:

$\pi_{i\ell\ell'}^j$  : Seçim yapanların birim zamanda şerit  $\ell$ 'den  $\ell'$ 'üne olan şerit değiştirme isteğinin sürtünme katsayısı,



$\mu$  için hesap yöntemi: Bir üçgen Temel Diyagram (FD) için giriş fonksiyonu tarafından verilen mevcut kapasite Denklem 13 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\mu_{i\ell}^j \Delta t = \Delta t \min\{w(k - k_{i\ell}^j), Q\} \quad \forall \ell. \quad (13)$$

#### 2.4.1.4 IT Prensibi

Dagonzo vd. (1997) tarafından  $L_{i\ell\ell'}^j, T_{i\ell}^j$  ve  $\mu_{i\ell}^j$  dönüşüm değerleri, IT prensibi yardımıyla her hücredeki şerit değiştirme oranları ve o şeritlerdeki akımı belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. IT yöntemi, akımın diferansiyellerini ilk gelen ilk kazanır bazlı olarak arzulan hedef hücre  $(i, \ell)$ 'ye bölüştürmektedir (Alt indisler  $i$  ve  $j$  açıklayıcılık için düşürülmektedir). Toplam talep  $T_\ell + \sum_{\ell \neq \ell'} \Delta x L_{\ell'\ell}$ 'nin mevcut kapasite  $\mu_\ell$ 'den az olması durumu için bütün taleplerin gerçekleştirildiğini ve akımın hedef hücreye ilerleme yeteneğinde olduğunu göstermektedir. Aksi takdirde IT yöntemi, mevcut kapasiteyi farklı başlangıç şeritlerine ve onların taleplerine göre eşit olarak dağıtmaktadır. IT sonuçları Denklem 14 yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$\gamma_\ell = \min\left\{1, \frac{\mu_\ell}{T_\ell + \sum_{\ell \neq \ell'} \Delta x L_{\ell'\ell}}\right\}, \quad (14)$$

Burada:  $\gamma_\ell$ , talebin sürtünme katsayısını göstermektedir. Hedef şerit  $\ell$ 'ye ait dönüşümlerde aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$\Phi_{\ell'\ell} = \gamma_\ell L_{\ell'\ell} \quad \forall \ell' = \ell, \quad (15a)$$

$$q_\ell = \gamma_\ell T_\ell. \quad (15b)$$

Benzer bağıntı Lebacque ve Lesort (1999) tarafından kavşak modellemek için önerilmiştir. Denklem 15'teki miktarlar fiziksel olarak  $\Delta t, \Delta x \rightarrow 0$  limiti alınarak anlaşılabilir. Denklem 14 ve 15 birleştirilerek Denklem 16 elde edilebilmektedir.

$$\Phi_{\ell'\ell} = \frac{\mu_\ell}{T_\ell + \sum_{\ell \neq \ell'} \Delta x L_{\ell'\ell}} L_{\ell'\ell}. \quad (16)$$

### 2.4.2 Ayrık şerit seçim parçacıkları

Zorlamalı Hareket (CM) modelinde, parçacıklar maksimum ivme ile hareket etmektedir. Fakat kendi gücü ve öndeki trafiğin hızı ile zorlanmaktadır. (Laval ve Dagonzo, 2003). Yöntemin bir ayırt edici özelliği bu parçacıkların devam eden boşluklarda yüksek çözünürlükle işlenmesi olmaktadır.

İşlemi nicelendirmek amacıyla  $(i, \ell)$ 'den  $(i+1, \ell')$ 'üne  $t_j$  zamanında gerçekleştirilen kümülâtif şerit değiştirme sayısını basitçe değerlendirebiliriz.  $\eta_{i\ell\ell'}^j = \sum_{j' < j} \Phi_{i\ell\ell'}^{j'} \Delta t \Delta x$  ve daha sonra "taban" fonksiyonunu  $[\eta_{i\ell\ell'}^j]$  tamsayıya çevirmek için genelleştirebiliriz. Laval ve Dagonzo (2006) yaptıkları çalışmada insanların seçimleri için bir rastgelelik derecesi eklemişler, poisson değişkenlerinin ortalaması ile  $\eta_{i\ell\ell'}^j - \eta_{i\ell\ell'}^{j-1}$  çıktılarını almışlar ve parçacıkları genelleştirmişlerdir. Fakat bu durum makroskobik sonuçları değiştirmemiştir.

### 2.5 Şerit Değiştirmeden Dolayı Oluşan Gecikmenin Belirlenmesi

Eğer sürücülerin aralık politikalarının zamanla değişmediğini kabul edersek o zaman bireysel bekleme ve periyot değerleri aşağıda verilen olasılık formülü ile hesaplanabilmektedir.

$$P(n) = p^n(1 - p) \quad n = 1, 2, 3$$

$$P = p(t < T) = \int_0^T f(t) dt$$

$$E(n) = \frac{p}{1-p} = \frac{\int_0^T f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \quad (17)$$

burada:

$P(n)$  : Bir sürücünün n aralığı için her biri t saniyeden küçük bekleme olasılığı,

$f(t)$  : Aralıkların dağılımı,

$E(n)$  : Sürücünün beklemek zorunda olduğu beklenen aralıkların sayısı  
olmaktadır.

Engel uzunluğu ve şerit değiştirme için ortalama gecikme süresi aşağıda verilen  
formül ile hesaplanabilmektedir.

$$BL = \frac{T \cdot V_S}{N} \quad (18)$$

$$Ort. gecikme = \frac{BL}{2 \cdot V_r} \quad (19)$$

burada:

$T$  : Reddedilen aralıkların toplam süresi,

$BL$  : Blok uzunluğu,

$V_S$  : Akım hızı,

$V_r$  : Göreceli hız olmaktadır.



## BÖLÜM ÜÇ

### GÖZLEM YAPILAN DEFORMASYON NOKTALARININ TANITILMASI VERİLERİN TOPLANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 3.1 Çok Şeritli ve Deformasyonlu Yollarda Taşıtların Hareketlerinin Video Kamera Yardımıyla Analizi

##### 3.1.1 Gözlem Yeri ve Zamanının Seçimi

Deformasyonlu çok şeritli yollardaki şerit seçim davranışlarının incelenmesi ve şerit değişiminin yol yüzeyinde bulunan deformasyonların etkisiyle gerçekleştiğini modellemeyi amaçlayan çalışmanın yapılabilmesi için öncelikle analizlerde kullanabilecek nitelikte verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Söz konusu verilerin toplanabilmesi için gözlem yapılacak noktalar belirlenmiş ve bu noktaların çalışmanın amacına uygun özellikler taşımasına dikkat edilmiştir. Trafik akımının sürekli ve düzenli olması koşulunun sağlanması, dolayısıyla trafik sayım sonuçlarının kullanılabilir ve sağlıklı olabilmesi için trafik gözlemlerinin ana arterler üzerinde yer alan çok şeritli ve kesintisiz akımın olduğu yollar üzerinde yapılmasına karar verilmiştir.

Trafik sayımları, özel nedenler dışında normal hava şartları altında ve iş günlerinde yapılmıştır. Kötü hava koşulları, trafik akımında olumsuz etkiler meydana getirdiğinden, gözlemler için havanın açık olduğu günler seçilmiştir. Çalışmada kullanılacak verilerin sağlıklı olabilmesi için gözlem yapıldığı sırada yol üzerinde aşırı trafik tıkanıklığının olmadığı ve doymuş bir akım olduğu durumun seçilmesine karar verilmiştir.

##### 3.1.2 Gözlem Yöntemi

Gözlemlerin zaman ve süresi belirlendikten sonra gözlemlerin hangi yöntemler kullanılarak yapılacağına karar verilmiştir. Gözlemler Dokuz Eylül Üniversitesi

Tınaztepe Kampusu içerisinde yer alan 3 farklı deformasyon noktasından yapılmıştır. Bu noktaların seçilmesinde etkili olan faktörler şu şekilde sıralanabilir:

1. Deformasyonlu noktalar trafik akımının yoğun olduğu önemli arterler üzerinde yer almaktadır.
2. Her 3 deformasyon noktasından da araçların deformasyon etkisiyle şerit değiştirdiği ya da yavaşladığı durum gözlenebilmektedir.
3. Her 3 deformasyon noktasından da video kamerayla çekim yapma olanağı bulunmaktadır.
4. Gözlem yapılan 3 deformasyon noktasının da çift şeritli olması ve yol kenarında parklanmanın gözlenmemesidir.

Gözlemler, deformasyon noktalarının yakınında ve deformasyon noktalarını karşıdan görecektir şekilde yüksek bir noktadan ve video kamera kullanılarak yapılmıştır. Video ile kaydedilen veriler bilgisayarlara aktarılmış ve toplanan veriler bilgisayar programları yardımı ile değerlendirilmiştir.

### ***3.1.3 Gözlem Yapılan Deformasyon Noktalarının Tanıtılması***

Çalışmada kullanılacak olan verilerin toplanabilmesi için üç adet deformasyon noktasından çekim yapılmıştır. Araçların şerit üzerindeki davranışlarını detaylı şekilde görebilmek amacıyla kameralar deformasyonlu yolları karşıdan görebilecek yüksek noktalara yerleştirilmiştir. Çekimler sırasında birbiriyle eş zamanlı olarak çalışan 3 adet kamera kullanılmıştır.

#### ***3.1.3.1 Deformasyon Noktası 1 (DN-1)***

Deformasyon noktası 1 (DN-1), Tınaztepe kampüsü içerisinde Fen Edebiyat Fakültesinden kampüs çıkış yolu üzerinde bulunan 2 şeritli bir yoldur. Yol, kampüs içerisinde ana güzergâh üzerinde yer almakta ve gün içerisinde kampüste ulaşımı sağlayan belediye ve üniversite otobüslerinin yanı sıra kampüste devam eden inşaatlara nakliye amacı ile bu yolu kullanan ağır araçların etkisiyle sürekli deforme

olmaktadır. Deformasyon noktasının ve mevcut yolun geometrik özellikleri Tablo 3.1’de detaylı şekilde verilmiştir.

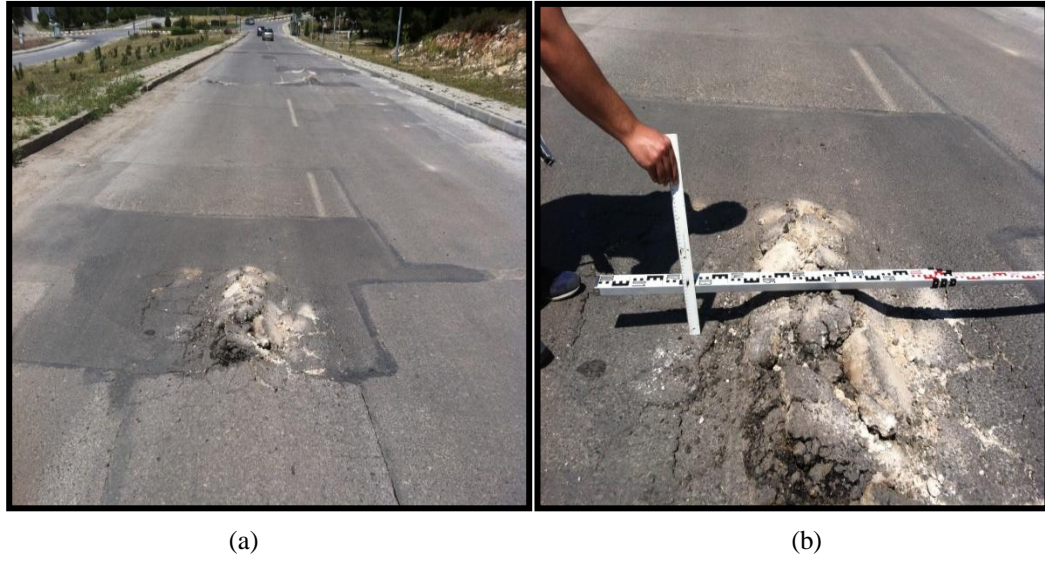
Tablo 3.1 DN-1’in geometrik özellikleri.

Deformasyon Noktası 1			Yol Genişliği (m)	Deformasyonun Yol Üzerindeki Konumu (m)	Deformasyon Türü
Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Yükseklik (cm)			
1	1,65	16	9.6	(5,2-6,2)	Kabarma

Tablo 3.1’den de görüldüğü üzere DN-1’de, yol yüzey bozukluğu çökme şeklinde değil kabarma şeklinde oluşmuştur. Buda DN-1’in DN-2 ve DN-3’ten farklı bir bozulma özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. DN-1’in kampüs içerisindeki genel konumu ve gözlem yapılan nokta Şekil 3.1’de, genel görüntüsü ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 DN-1’in Tinaztepe kampüs üzerindeki konumuna ait uydu görüntüsü.



Şekil 3.2 DN-1'in Tınaztepe kampüs üzerindeki genel görüntüsü.

### 3.1.3.2 Deformasyon Noktası 2 (DN-2)

DN-2 Tınaztepe kampüsü içerisinde çıkış yolu üzerinde bulunan 2 şeritli bir yoldur. Yol, kampüs içerisinde ana güzergâh üzerinde yer almakta ve gün içerisinde kampüste ulaşımı sağlayan belediye ve üniversite otobüslerinin yanı sıra kampüste devam eden inşatlara nakliye amacı ile bu yolu kullanan ağır araçların etkisine en çok maruz kalan, akımın en yoğun olduğu yoldur. Yol, altyapısının yetersiz olması sebebiyle oluşan her yüzey bozukluğundan sonra sürekli olarak onarılmakta fakat üzerine gelen ağır yükler nedeniyle sürekli deforme olmaya devam etmektedir. Deformasyon noktasının ve mevcut yolun geometrik özellikleri Tablo 3.2'de detaylı şekilde verilmiştir.

Tablo 3.2 DN-2'nin geometrik özellikleri.

Deformasyon Noktası 2			Yol Genişliği (m)	Deformasyonun Yol Üzerindeki Konumu (m)	Deformasyon Türü
Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Derinlik (cm)			
2	1.5	6.7	9.6	(1-3)	Soğuk derz çatlağı, çökme ve timsah sırtı çatlak

DN-2'nin genel konumu ve gözlem yapılan nokta Şekil 3.3'de genel görüntüsü ise Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.3 DN-2'nin Tınaztepe kampüs üzerindeki konumuna ait uydu görüntüsü.



(a)

(b)

Şekil 3.4 DN-2'nin Tınaztepe kampüs üzerindeki genel görüntüsü.

### 3.1.3.3 Deformasyon Noktası 3 (DN-3)

DN-3, Tınaztepe kampüsü içerisinde giriş yolu üzerinde bulunan 2 şeritli bir yoldur. Yol, kampüs içerisinde ana güzergâh üzerinde yer almakta ve gün içerisinde kampüste ulaşımı sağlayan belediye ve üniversite otobüslerinin yanı sıra kampüste devam eden inşaatlara nakliye amacı ile bu yolu kullanan ağır araçların etkisine aşırı şekilde maruz kalmaktadır. DN-3'ün DN-1 ve DN-2'den farklı özelliği, yolun kendiliğinden bozulması değil yolu kullanan araçların hızlarını azaltmalarını sağlamak amacıyla yerleştirilen hız kesici kasislerden sağ şeritte akımın daha hızlı akmasına imkan vermesi amacıyla bir kısmının DEÜ Fen ve Yapı İleri Daire Şefliği tarafından sökülmüş olmasıdır. Gözlemler göstermiştir ki yolun hız kesici kasisin olmadığı kısımlarında araçların davranışı, kasis olmayan kısma benzemektedir ve kasisin olduğu yolun geri kalan kısımlarında araçların davranışlarının deformasyon etkisiyle yavaşlayan veya şerit değiştiren araçların davranışına benzediğidir. Hız kesici kasisin ve mevcut yolun geometrik özellikleri Tablo 3.3'de detaylı şekilde verilmiştir.

Tablo 3.3 DN-3'ün geometrik özellikleri.

Deformasyon Noktası 2			Yol Genişliği (m)	Yol Üzerindeki Konumu (m)	Deformasyon Türü
Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Yükseklik (cm)			
0.3	(0.6) – (5)	3.5	9.6	(1.9-2.5)/ (1.9-6.9)	Beton yama ve sağ şeritte hızlı geçişe imkan veren parçalı hız kesme tümseği

Deformasyon noktasının genel konumu Şekil 3.5'de genel görüntüsü ise Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5 DN-3'ün Tınaztepe kampüs üzerindeki konumuna ait uydu görüntüsü.



(a)

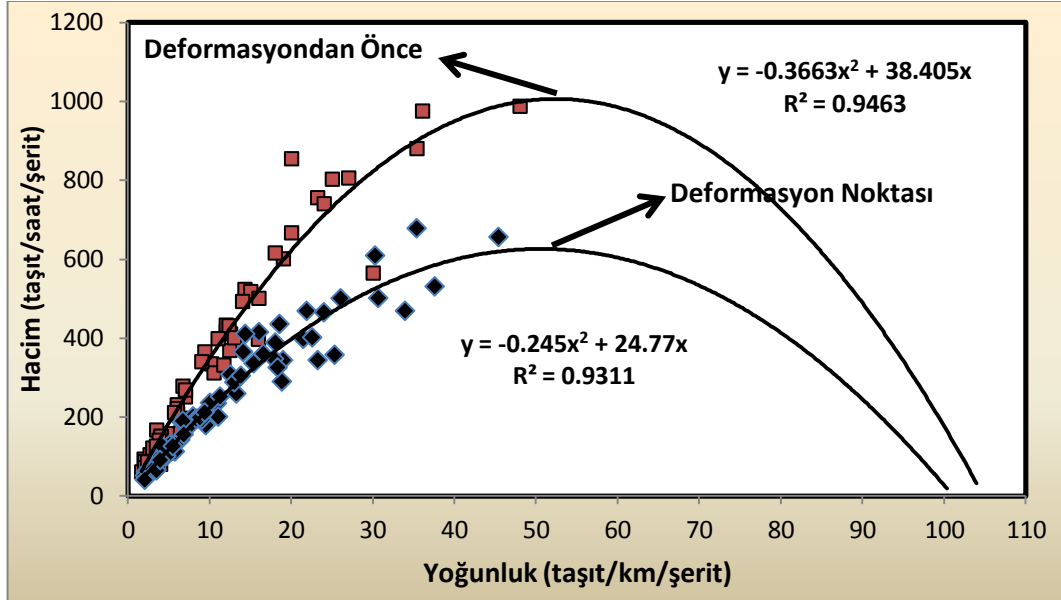
(b)

Şekil 3.6 DN-3'ün Tınaztepe kampüs üzerindeki genel görüntüsü.

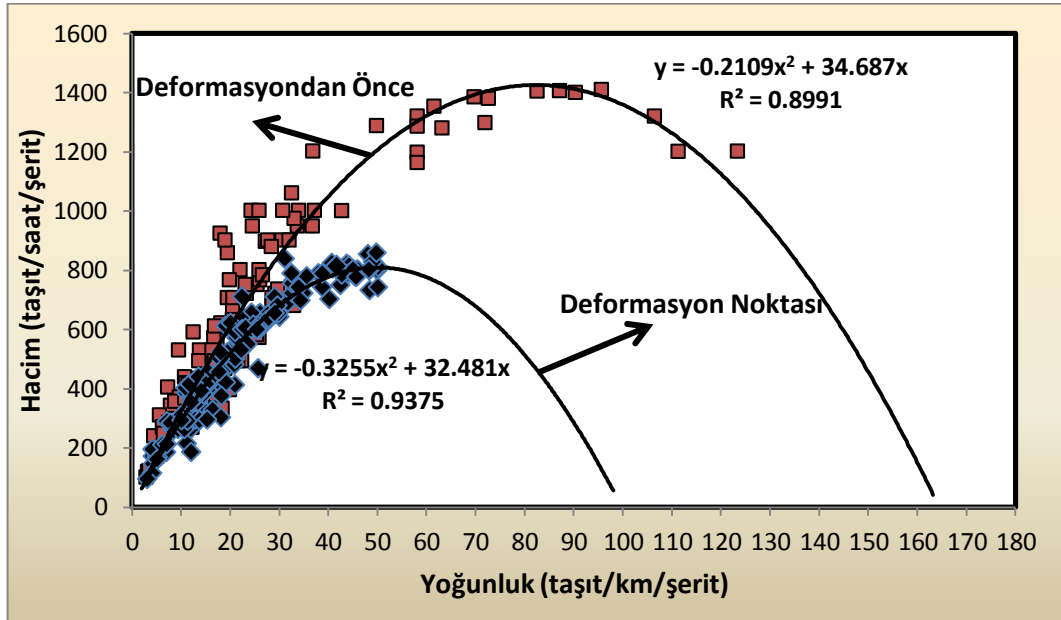
### 3.1.4 Verilerin Analizi

Çalışma kapsamında 3 farklı Deformasyon Noktasından doygun akım koşulunda toplanan 15'er dakikalık zaman cinsinden aralık değerleri 4 ile çarpılarak saatlik hacim değerlerine dönüştürülmüştür. Her bir deformasyon noktası ve her bir şerit

için deformasyondan önceki ve deformasyonun olduğu kesim için veriler toplanmış ve analiz edilmiştir. Her bir deformasyon noktası ve bu deformasyon noktasının bulunduğu yola ait sağ ve sol şeritlerde kapasitede meydana gelen değişimler Şekil 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 ve 3.12’de gösterilmiştir.

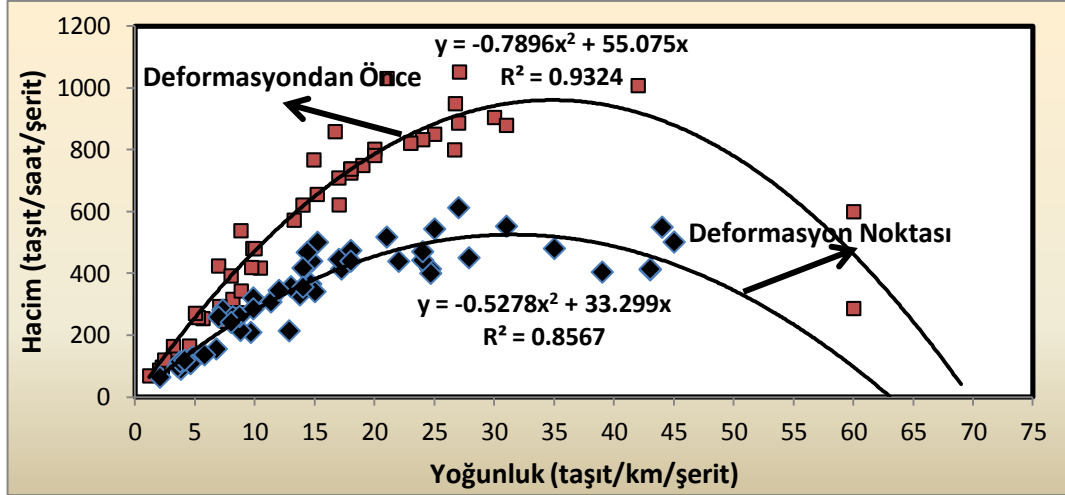


Şekil 3.7 DN-1 ve öncesinde sağ şeride ait hacim-yoğunluk grafiği.

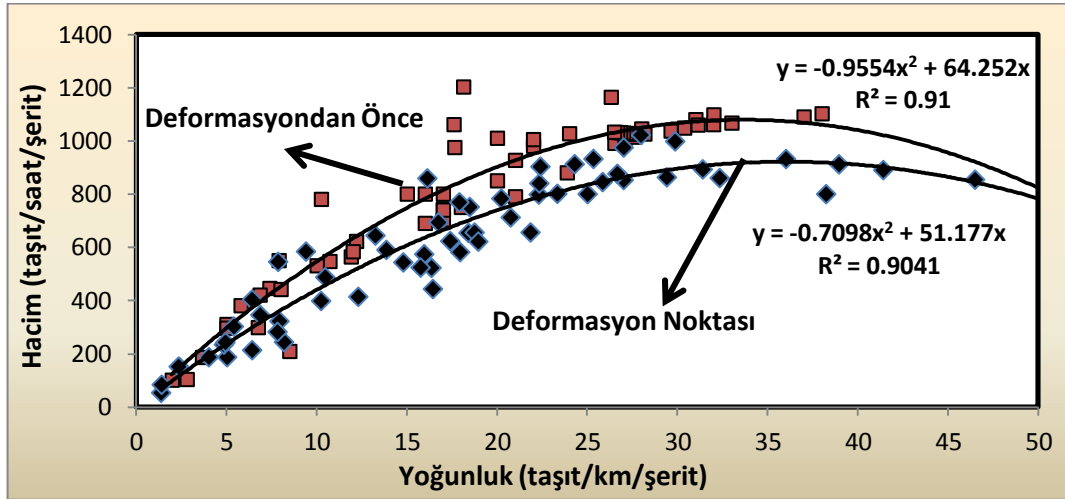


Şekil 3.8 DN-1 ve öncesinde sol şeride ait hacim-yoğunluk grafiği.

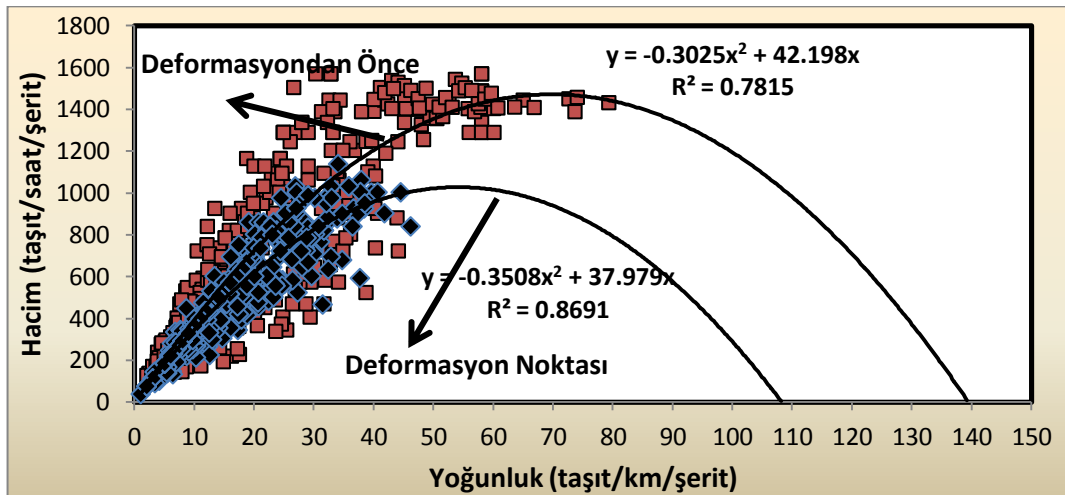




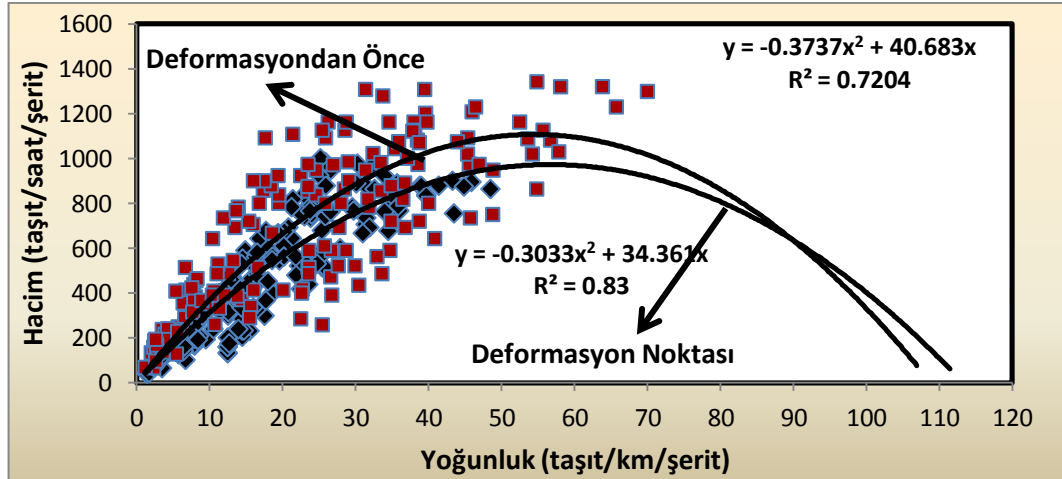
Şekil 3.9 DN-2 ve öncesinde sağ şeride ait hacim-yoğunluk grafiği.



Şekil 3.10 DN-2 ve öncesindeki sol şeride ait hacim-yoğunluk grafiği.



Şekil 3.11 DN-3 ve öncesinde sağ şeride ait hacim-yoğunluk grafiği.



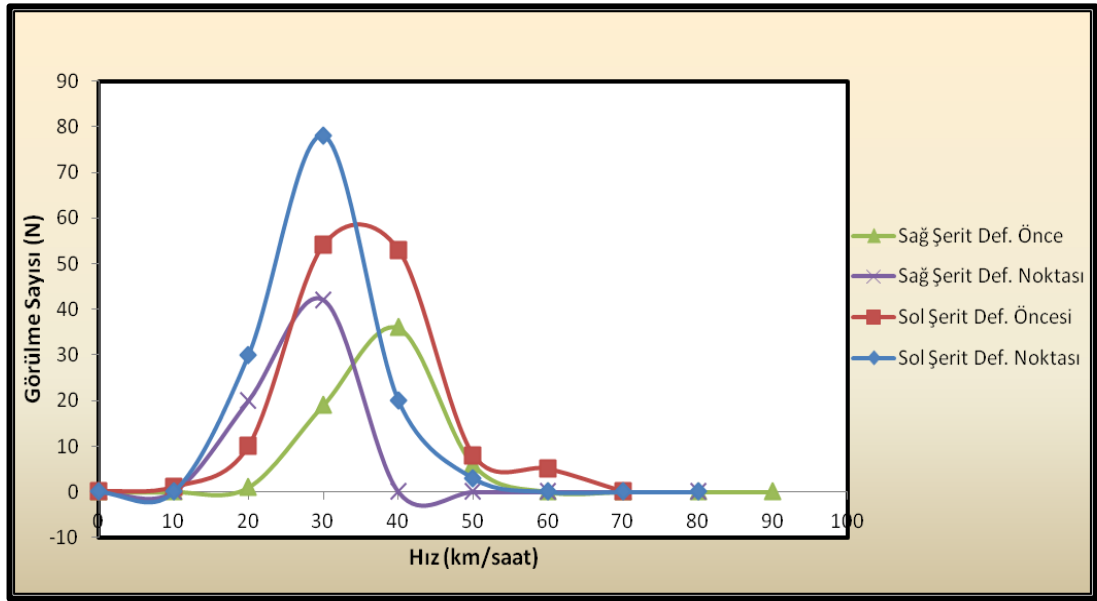
Şekil 3.12 DN-3 ve öncesindeki sol şeride ait hacim-yoğunluk grafiği.

Deformasyon etkisi ile DN-1 sağ şeritte 380 araç/saat, DN-1 sol şeritte 616 araç/saat'lik bir kapasite kaybı görülmektedir. Sol Şeritte kapasite kaybının sağ şeritten daha fazla olması deformasyonun sağ şerit üzerinde yer alması ve araçların deformasyondan kaçmak amacıyla şerit değiştirmelerinden kaynaklanmaktadır. DN-2 sağ şeritte 435 araç/saat ve DN-2 sol şeritte 158 araç/saatlik kapasite kaybı görülmektedir. Buradan deformasyonun olduğu şeritte kapasite kaybının daha büyük olduğu elde edilen analiz sonuçlarıyla da belirgin şekilde desteklenmektedir. DN-3 sağ şeritte 444 araç/saat, DN-3 sol şeritte 134 araç/saat'lik kapasite kaybı görülmektedir. DN-3'te gözlem yapılan noktaların tanıtılması kısmında da değinildiği gibi iki şerit üzerinde yapay bir hız kesici kasis mevcuttur fakat sağ şeritte araçların hızlarını koruyabilmeleri amacıyla belirli açıklar bırakılmış araçların sol şeride göre daha hızlı hareket etmelerine imkân sağlanmıştır. Bu sebepten sonuçlar araçların sağ şeridi daha yoğun kullandığını göstermiş fakat yine de kapasite de sol şeride göre daha büyük bir kayıp olduğu görülmüştür. 3 deformasyon noktası incelendiğinde en büyük kapasite kaybının en büyük deformasyonun olduğu DN-1 sol şeritte görülmektedir. İncelenen bu 3 noktaya ait hız ve yoğunluk verileri Tablo 3.4'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde araçların hızlarına ait standart sapma değerlerinin deformasyon noktalarında genel olarak azaldığı görülmektedir. Buda araçların deformasyon noktalarında daha kararlı hareket ettiklerini göstermektedir.

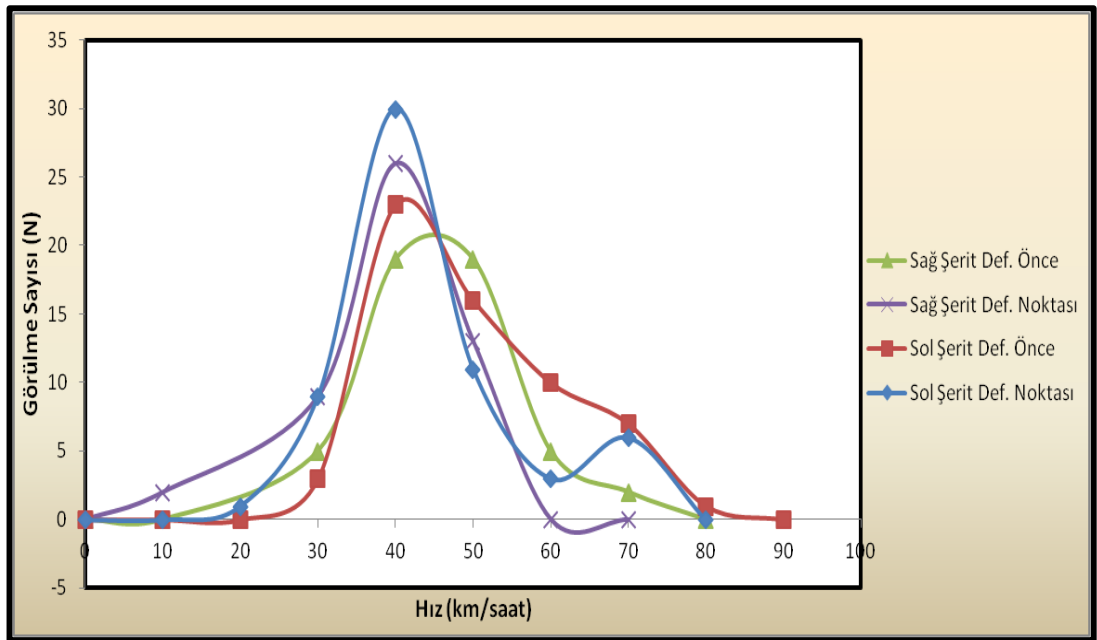
Tablo 3.4 İncelenen 3 deformasyon noktasına ait hız ve yoğunluk verilerine ait istatistiksel bilgiler.

HIZ	DEFORMASYON NOKTA NO	Şerit	Konum	Def. Bul. Şerit	Ort.	Standart Sapma	Örnek Varyans	Basıklık	Çarpıklık	Veri Sayısı	En Büyük	En Küçük	Güvenirlilik Düzeyi (%95,0)	
														Def. Önce
HIZ	1	Sağ	Def. Önce		29.64	6.28	39.47	-0.03	-0.11	62.00	47.85	18.81	1.60	
			Def. Nok.		21.72	3.76	14.17	-0.21	-0.22	62.00	29.56	13.82	0.96	
		Sol	Def. Önce	x	30.66	8.98	80.64	0.87	0.53	131.00	56.55	9.76	1.55	
			Def. Nok.	x	25.09	6.16	37.98	0.78	0.73	131.00	47.85	14.85	1.07	
		2	Sağ	Def. Önce	x	40.92	8.83	77.92	0.15	0.16	50.00	61.04	20.00	2.51
				Def. Nok.	x	24.52	6.28	39.45	-0.37	-0.08	50.00	38.61	11.16	1.79
	Sol	Def. Önce		44.82	10.88	118.29	0.27	0.81	60.00	76.21	24.58	2.81		
		Def. Nok.		38.87	11.31	127.83	0.60	0.92	60.00	69.57	18.38	2.92		
	3	Sağ	Def. Önce	x	35.45	12.19	148.48	-0.56	0.39	371.00	69.12	12.96	1.24	
			Def. Nok.	x	31.74	5.88	34.63	-0.12	-0.12	371.00	51.84	14.81	0.60	
		Sol	Def. Önce	x	35.12	15.73	247.48	-0.58	0.46	181.00	78.41	10.22	2.31	
			Def. Nok.	x	27.90	6.96	48.50	-0.81	-0.32	181.00	39.88	10.67	1.02	
YOĞUNLUK		1	Sağ	Def. Önce		11.41	9.95	99.10	2.47	1.58	62.00	48.00	1.64	2.53
				Def. Nok.		13.34	9.91	98.25	1.02	1.17	62.00	45.35	2.00	2.52
	Sol		Def. Önce	x	25.80	23.02	529.83	4.85	2.16	131.00	123.25	2.76	1.07	
			Def. Nok.	x	23.59	13.44	180.60	-0.84	0.49	131.00	50.04	3.00	2.32	
	2		Sağ	Def. Önce	x	16.19	12.93	167.18	3.67	1.66	50.00	60.00	1.20	3.67
				Def. Nok.	x	17.03	11.65	135.82	0.26	1.01	50.00	45.00	2.05	3.31
	Sol	Def. Önce		19.52	9.50	90.20	-1.04	-0.15	60.00	38.00	1.97	2.45		
		Def. Nok.		17.97	10.77	115.98	-0.22	0.48	60.00	46.48	1.35	2.78		
	3	Sağ	Def. Önce	x	24.50	16.89	285.44	-0.10	0.84	371.00	79.27	2.03	1.72	
			Def. Nok.	x	16.54	9.48	89.86	-0.37	0.63	371.00	46.13	1.00	0.97	
		Sol	Def. Önce	x	22.02	16.47	271.27	-0.38	0.64	181.00	69.94	1.12	2.42	
			Def. Nok.	x	17.53	10.62	112.88	-0.07	0.69	181.00	48.43	1.30	1.56	

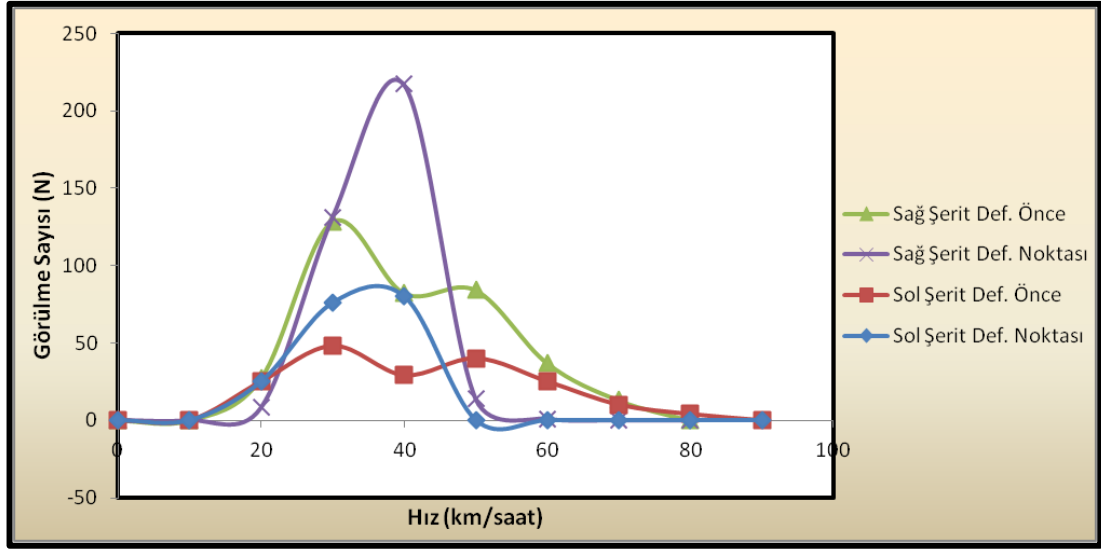
Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15’de 3 farklı deformasyon noktasından geçen araçların hızlarının dağılımı verilmektedir. Şekiller incelendiğinde araçların sağ ve sol şerit deformasyon noktalarındaki hızlarının genel olarak aynı hız değeri civarında pik yaptığı görülmektedir. Buda herhangi bir şeritte mevcut olan yol bozukluğunun sadece bulunduğu şeritteki akımı değil diğer şeritlerdeki akımları da etkilediğini açıkça göstermektedir.



Şekil 3.13 DN-1’deki araçların hız dağılımı.



Şekil 3.14 DN-2’deki araçların hız dağılımı.



Şekil 3.15 DN-3'deki araçların hız dağılımı.

İncelenen 3 farklı deformasyon noktasından şerit değiştirme analizinde kullanılan verilere ait özet bilgiler Tablo 3.5'de verilmiştir. Tablo 3.6'da ise şerit değiştiren araçların deformasyondan önce şerit değiştirmek amacıyla karar verdikleri deformasyondan önceki süre ve mesafeye ilişkin istatistiksel analiz sonuçları verilmiştir. Tablo 3.7'de ise deformasyondan kaçmak amacıyla şerit değiştiren araçların hızlarına ait istatistiksel sonuçlar verilmiştir.

Tablo 3.5 İncelenen 3 farklı deformasyon noktasından şerit değiştirme analizinde kullanılan verilere ait özet bilgiler.

Def. Nok No	Şerit	Def. Bul. Şerit	Araç Sayısı	Araç Türü				Şerit Değiştirmeyi Engelleyen Araç Sayısı
				Otomobil	Minibüs	Otobüs	Kamyon	
1	Sağ		Şerit Değiştiren	32	3	1	0	11
			Şerit Değiştirmeyen	3	2	0	0	1
	Sol	x	Şerit Değiştiren	76	9	1	3	6
			Şerit Değiştirmeyen	39	4	1	0	13
2	Sağ	x	Şerit Değiştiren	17	0	0	1	1
			Şerit Değiştirmeyen	22	1	1	0	6
	Sol		Şerit Değiştiren	2	0	0	0	0
			Şerit Değiştirmeyen	21	0	0	0	9
3	Sağ	x	Şerit Değiştiren	1	0	0	0	1
			Şerit Değiştirmeyen	364	7	8	1	129
	Sol	x	Şerit Değiştiren	12	0	0	0	12
			Şerit Değiştirmeyen	109	0	0	1	110

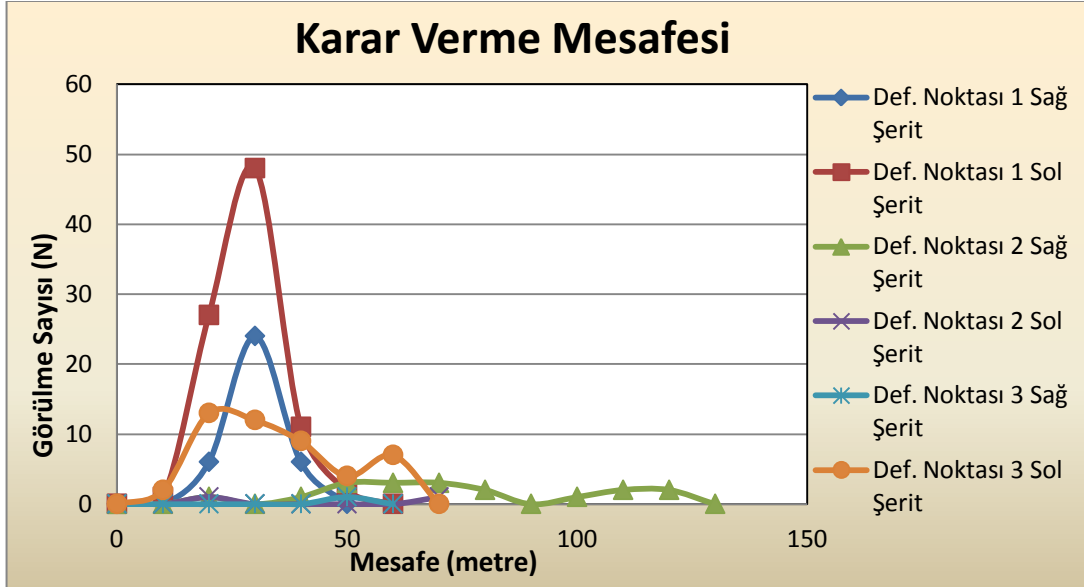
Tablo 3.6 Şerit değiştiren araçların karar verme mesafesi ve karar verme sürelerine ait istatistiksel bilgiler.

KARAR MESAFESİ	DEFORMASYON	Şerit	Def. Bul. Şerit	Ort.	Standart Sapma	Örnek Varyans	Basıklık	Çarpıklık	Veri Sayısı	En Büyük	En Küçük	Güvenirlik Düzeyi (%95,0)
	NOKTA NO											
KARAR MESAFESİ	1	Sağ		25.4	5.6	31.2	0.4	0.2	36.0	38.6	13.8	1.9
		Sol	X	23.2	7.0	48.9	1.2	0.7	89.0	47.1	4.7	1.5
	2	Sağ	X	67.9	29.0	838.7	-0.4	0.3	18.0	119.2	12.1	14.4
		Sol		38.4	38.9	1513.5	-	-	2.0	65.9	10.9	349.5
	3	Sağ	X	47.6	-	-	-	-	1.0	47.6	47.6	-
		Sol	X	29.6	14.0	196.5	-1.0	0.5	47.0	55.8	9.7	4.1
KARAR VERME SÜRESİ	1	Sağ		2.8	0.9	0.8	0.0	0.1	36.0	4.7	0.9	0.3
		Sol	X	2.3	0.8	0.7	3.9	1.5	89.0	5.4	0.5	0.2
	2	Sağ	X	7.2	3.8	14.3	0.4	0.9	18.0	15.2	1.1	1.9
		Sol		4.6	4.6	21.0	-	-	2.0	7.9	1.4	41.2
	3	Sağ	X	5.8	-	-	-	-	1.0	5.8	5.8	-
		Sol	X	4.3	1.9	3.7	2.1	0.6	47.0	11.1	0.9	0.6

Tablo 3.7 Şerit değiştiren araçların şerit değiştirme esnasındaki hızlarına ait istatistiksel bilgiler.

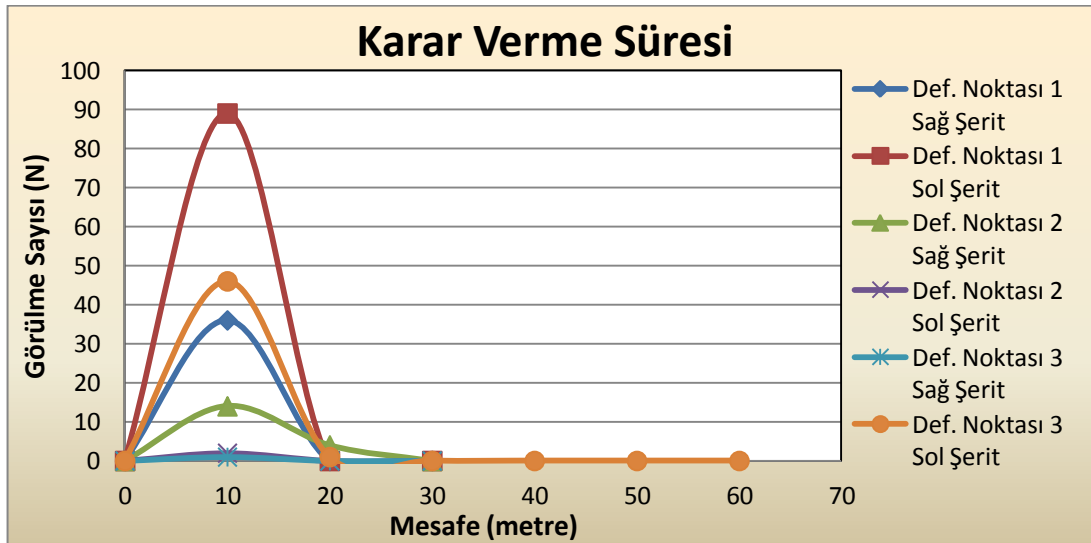
HIZ	DEFORMASYON NOKTA NO	Şerit	Def. Bul. Şerit	Ort.	Standart Sapma	Örnek Varyans	Basıklık	Çarpıklık	Veri Sayısı	En Büyük	En Küçük	Güvenirlilik Düzeyi (%95,0)
	1	Sağ		38.32	12.95	167.58	1.53	1.29	41.00	76.53	20.60	4.09
		Sol	X	39.02	10.10	102.02	0.37	0.64	133.00	69.12	17.57	1.73
	2	Sağ	X	27.85	6.76	45.73	0.93	0.56	42.00	48.68	15.44	2.11
		Sol		18.45	3.94	15.55	1.58	0.51	23.00	28.80	9.69	1.71
	3	Sağ	X	30.77	6.47	41.82	1.86	0.66	380.00	60.99	14.81	0.65
		Sol	X	31.11	6.92	47.90	0.55	0.72	208.00	54.57	17.28	0.95

Şekil 3.16’da araçların deformasyondan kaçmak amacıyla şerit değiştirdikleri mesafelere ait histogram verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere karar verme mesafeleri her bir nokta için farklılık göstermektedir. Bu karar mesafelerinin 10-50 metre arasında en yoğun, 130 metre’de ise maksimum olduğu görülmektedir.



Şekil 3.16 Şerit değiştiren araçlara ait karar verme mesafelerinin gösterimi.

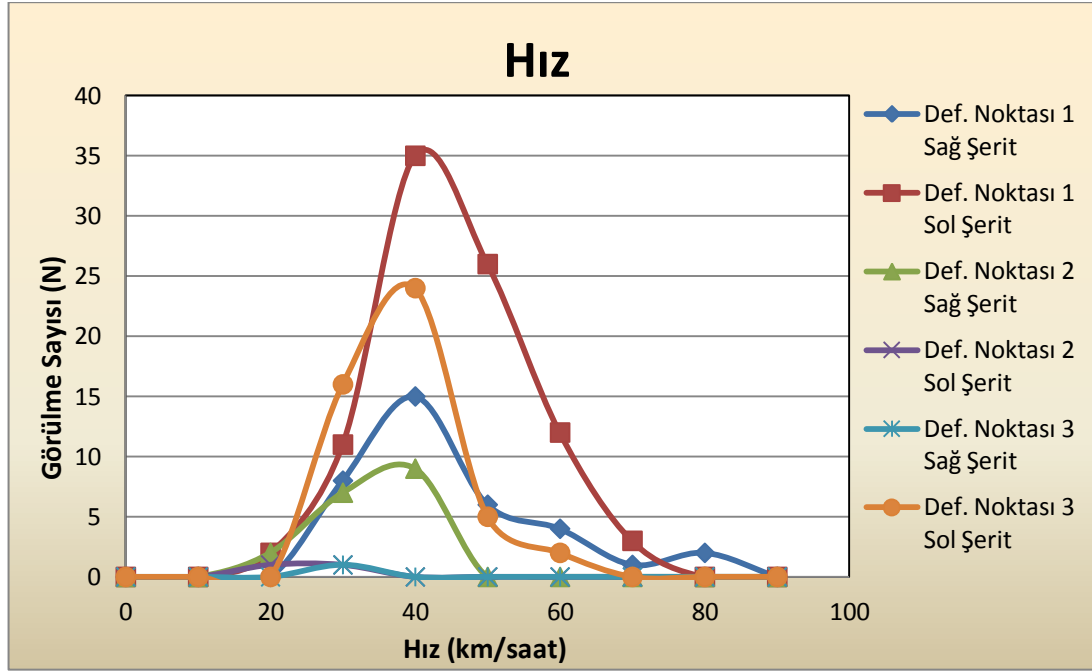
Şekil 3.17’de ise şerit değiştiren araçların karar verme süreleri görülmektedir. Şekilden sürücülerin karar verme sürelerinin en çok 0-20 sn arasında olduğu, en fazla ise 10 sn olduğu görülmektedir.



Şekil 3.17 Şerit değiştiren araçlara ait karar verme mesafelerinin gösterimi.



Şekil 3.18’de şerit değiştiren araçların hızlarının dağılımları gösterilmiştir. Şekilden araçların şerit değiştirme anında 20-70 km/saat arasında, en fazla ise 41 km/saat hıza sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca şekilden her bir deformasyon noktasından önce araçların hepsinin hemen hemen aynı hız değerine sahip oldukları kanısına varılabilmektedir.



Şekil 3.18 Şerit değiştiren araçların hızlarının görülme sıklığının grafik üzerinde gösterimi

### 3.2 Çok Şeritli ve Deformasyonlu Yollarda Taşıtların Hareketlerinin GPS Cihazı Yardımıyla İncelenmesi

Küresel Konumlandırma Sistemleri (GPS), trafik mühendisleri ve araştırmacıları tarafından trafik verisi toplanmasında gün geçtikçe önem kazanan alternatif bir araç olmaktadır (Wolshon and Hatipkarasulu, 2000). Trafik analizlerinde kullanılmak üzere gereksinim duyulan bazı trafik karakteristikleri (taşıt hız profili, taşıt ivmelenme ve ters ivmelenme değerleri vb.) doğrudan ölçülememektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte bu verileri toplamak ve elde etmek gün geçtikçe daha da kolaylaşmaktadır. Bu cihazlar yardımıyla elde edilen veriler incelenen akım özelliklerini daha doğru ve detaylı şekilde yansıtmaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte taşıtların trafik akımı içerisindeki hareketleri hakkında detaylı veri elde etmek ve elde edilen bu verileri birçok gelişmiş bilgisayar yazılım programı ile değerlendirmek mümkün olmaktadır. Günümüzde bir trafik akımı içerisinde hareket eden bir taşıta ait hız, ivmelenme/ters ivmelenme, konum vb. birçok trafik karakteristiği Küresel Konumlandırma Sistemleri olarak adlandırılan GPS cihazları yardımıyla kolayca elde edilebilmektedir.

Jiang ve Li (2002), inşaat ve bakım çalışmaları sebebiyle kısmi olarak kapalı olan yollardaki trafik akımının özelliklerini belirleyebilmek amacıyla çeşitli araştırmalar yapmışlardır. Yapılan araştırmalar kapsamında bu yollardaki mevcut trafik akımı içerisinde hareket eden taşıtlara ait detaylı bilgi edinebilmek amacıyla GPS cihazı takılı gözlem aracının mevcut akım boyunca hareketini gözlemlemişlerdir. Gözlem aracı vasıtasıyla, akımın yol çalışması olan kesite gelmeden önceki, yol çalışması olan bölgedeki ve yol çalışmasından sonraki kesimdeki ortalama hızlarını elde etmiş ve araçların hızlarına ait standart sapma değerlerini hesaplamışlardır. Standart sapma değerleri incelendiğinde araçların yol çalışması olmayan kesimde daha kararlı hareket ettiğini ve araçların hızlarında pek fazla değişiklik olmadığını gözlemlemişlerdir. Yine elde edilen sonuçlardan araçların yol çalışmasının olduğu bölgeye yaklaşırken özellikle bir şeridin kapalı olduğu durum için önceden ters ivmelenerek yavaşladığı ama noktasal bazdaki çalışmalarda ise aniden yavaşladığını görmüşlerdir. Jiang ve Li (2002) çalışmasında yol çalışmaları nedeniyle araçların hızlarını çok düşürmesinden kaynaklı olarak oluşan gecikmeyi 7 farklı gözlem bölgesi içinde hesaplamış ve elde edilen sonuçlara göre oluşan gecikmenin mevcut yolun saatlik hacmiyle çarpıldığında çok büyük değerlere ulaştığını belirtmişlerdir.

Xuan ve Coifman (2006) ise araçların bir yol boyunca taşıt, yol bozukluğu ya da yol çalışması nedeniyle şerit değiştirmelerini incelemek amacıyla mevcut GPS cihazlarından biraz farklı bir özelliğe sahip olan Diferansiyel Küresel Konumlandırma Sistemi (DGPS) cihazı kullanmışlardır. Çalışma kapsamında ilk olarak yol güzergâhını göstermesi amacıyla bir referans mesafe–zaman (trajectory) grafiği oluşturulmuştur. 24 km’lik belirli bir yol güzergâhı boyunca her gün aynı saatte ve aynı güzergâhta hareket eden bir gözlem aracına ait 24 turluk konum-zaman

verileri toplanmış ve bu verilere göre aracın mesafe-zaman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen konum-zaman grafikleri, ilk başta oluşturulan referans konum-zaman grafiğiyle kıyaslanarak aracın yaptığı manevra değerlerinin belirlenen eşik değeri aştığında, aracın nerelerde şerit değiştirdiği, şerit değiştirmenin zorunlu şerit değiştirme (ZŞD) mi yoksa keyfi şerit değiştirme (KŞD) mi olduğu konum bazlı olarak incelenmeye çalışılmıştır.

Trafik verilerinin toplanmasında GPS yöntemi, seyahat süresi ve gecikme çalışmaları gerektiren gezici-arac ve hareket-taşıt tekniği olarak adlandırılan yöntemlerden farklı olmaktadır. Gezici-arac tekniğinde kullanılan test aracı belirlenen kesitte bir gözlemci tarafından kullanılmaktadır. Dolayısıyla test aracının bu akım içerisinde gezici olarak hareket ettiği kabul edilmektedir (Garber and Hoel, 1999). Bu teknik kapsamında test aracı kendisini geçen araçları test kesiti boyunca gözlemleyerek onların seyahat sürelerini elde etmektedir. Hareket-taşıt tekniğinde ise, gözlemci test kesiti boyunca aracın hareket ve seyahat süresini, karşı şeritten geçen ve test aracının solladığı araç sayısını kaydetmektedir. Hareket-taşıt tekniği, yalnız çok şeritli yollarda uygulanabilmekte ve hız değişim bilgisine gerek olmaksızın ortalama seyahat süresinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Deformasyonlu bölgelerde bir şerit genellikle deformasyon etkisi nedeniyle kullanılmadığı ve geriye her bir yönde genellikle tek bir şerit kaldığı için gezici arac ve hareket-taşıt yöntemi deformasyonlu bölgelerde uygulanabilir değildir.

### ***3.2.1 Tez Kapsamında Kullanılan Teçhizat ve Bilgisayar Programlarının Tanıtılması***

#### *3.2.1.1 Janus V2 kamera ve GPS sistemi*

Tez kapsamında deformasyon bölgelerini kullanan gönüllü sürücülere ait trafik davranışlarının kaydedilmesi ve GPS verilerinin toplanabilmesi amacıyla Janus V2 arac içi kameralar kullanılmıştır. Janus V2, aracın DVR (dijital video kaydı) sistemini GPS ile birleştirmektedir. Bu sistem video ve CD kalitesinde ses kaydetmenin yanı sıra arac hareket halindeyken aracın içinde ve dışında olanları da

kaydetme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca bu cihaz hızı mil/s veya km/s olarak izleme olanağı da sağlamaktadır. Cihazın görünüşü ve sağladığı görüntü olanakları Şekil 3.19'da verilmiştir.



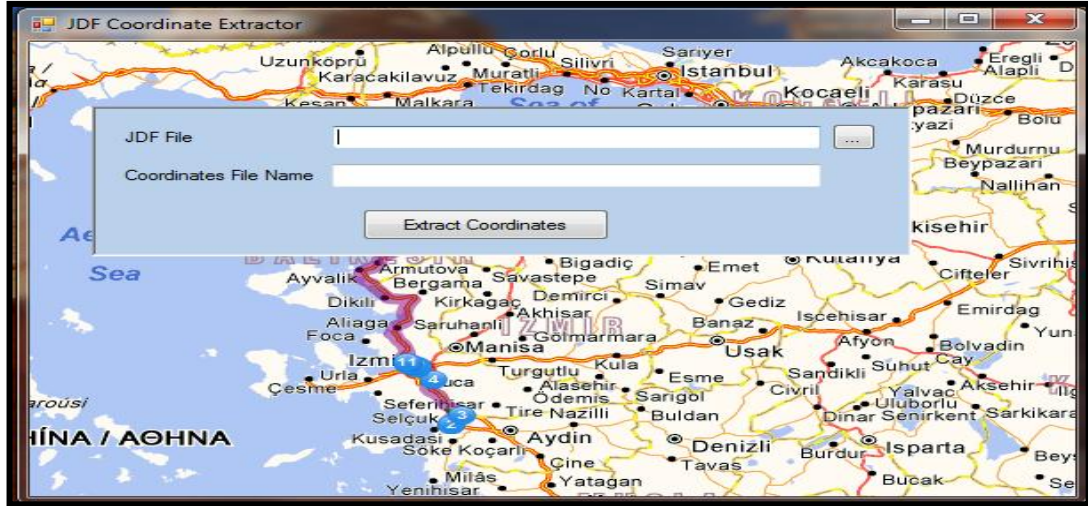
Şekil 3.19 Janus V2 araç içi kamera ve GPS cihazı.

Cihaz GPS özelliği yardımıyla, aracın hareket güzergâhını birer saniye aralıklarla enlem ve boylam olarak koordinatlarıyla birlikte kaydetmekte ve bunun yanı sıra her bir saniye için aracın hız değerlerini vermektedir. İstenildiği takdirde cihazın bünyesinde bulundurduğu kamera sistemi vasıtasıyla da araçların deformasyonlu bölgelerde yanal yöndeki şerit kullanımı ve şerit değiştirme verileri de kolayca elde edilebilmektedir. Çalışma kapsamında cihaz yardımıyla toplanan veriler cihazın kendi yazılımı tarafından Şekil 3.20'de verilen program vasıtasıyla analiz edilmektedir.



Şekil 3.20 Janus V2 bilgisayar programının genel görüntüsü.

Bu programdan cihazın kaydetmiş olduğu araç içi ve dışı video görüntüleriyle birlikte aracın harita üzerindeki konumu, hızı ve aracın deformasyon vb. yol yüzey özelliklerinden kaynaklı oluşan sarsıntı miktarını gösteren grafikler elde edilebilmektedir. Çalışmada denek sürücülere takılan kamera görüntüleri incelenmiş ve işlenebilir veriler haline getirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan Janus kameralar .JDF formatında veri kaydetmektedir. Kamera görüntüleri, Janus programı kullanılarak bilgisayardan izlenebilmektedir. Ancak çekimlere ait ham hız ve koordinat verilerine Janus programı ile ulaşmak mümkün olmamaktadır. Bu sebeple Janus dosyalarından (.JDF), analiz amacı ile noktalar arası hız, süre ve mesafe verilerini elde etmek için Dokuz Eylül Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünden yardım alınarak, .JDF verilerini .txt uzantılı verilere dönüştüren bir program yazılmıştır. Bu program sayesinde ham verilerden gönüllü sürücülere ait koordinat ve hız verileri elde edilmiştir. Bilgisayar Mühendisliği Bölümü tarafından hazırlanan ve verilerin elde edilmesinde kullanılan yazılım Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Dokuz Eylül Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümüyle birlikte hazırlanan .jdf dönüştürücü yazılım.

Yazılım yardımı ile .JDF formatından .TXT formatına getirilen veriler, Microsoft EXCEL<sup>®</sup> programına aktarılmıştır. Buradan enlem, boylam ve hız verilerini kullanarak Microsoft EXCEL<sup>®</sup>'de yazılmış matematiksel formüller yardımıyla hız ve koordinatlara bağlı noktalar arası mesafe, süre ve ivme değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.22'de EXCEL<sup>®</sup> dosyasına aktarılan verilerin görüntüsüne ait bir örnek görülmektedir.

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	31,5	10,36	183,00	0,00	38,37234	27,194388	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

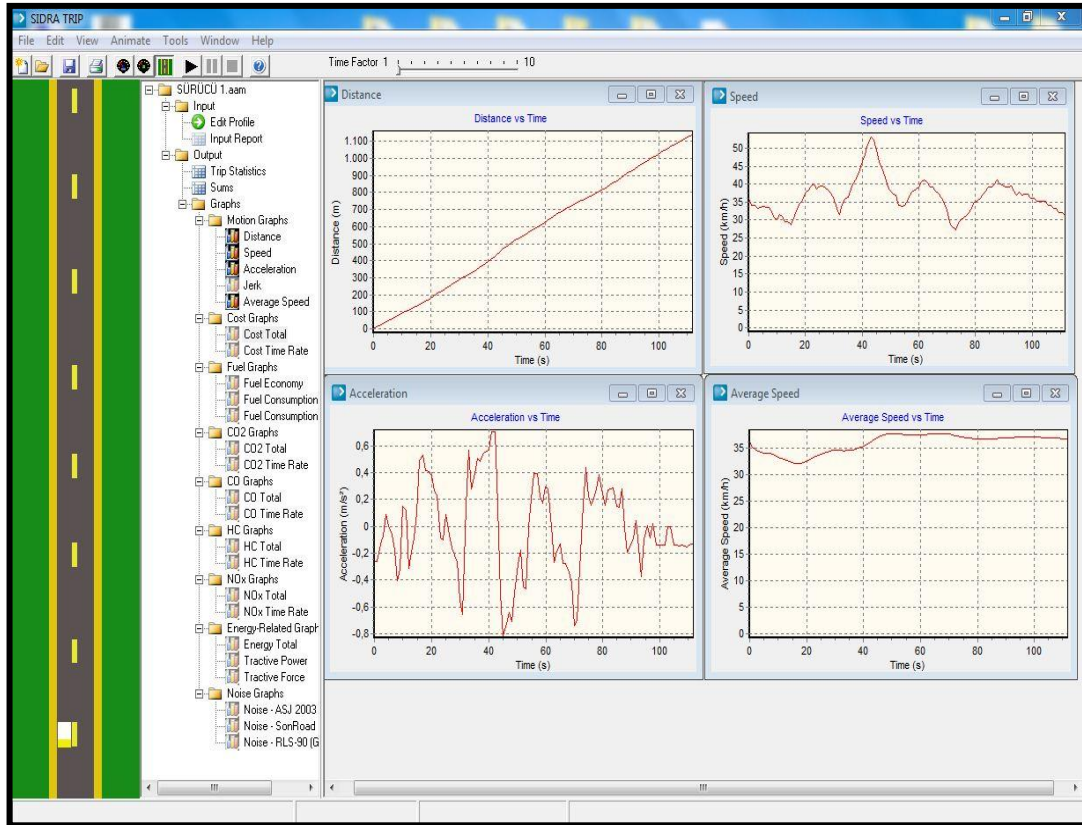
Şekil 3.22 Janus V2 cihazından elde edilen verilerin analizlerde kullanılması amacıyla oluşturulan örnek EXCEL<sup>®</sup> dosyası.

### 3.2.1.2 Sıdra trip 1.1

Çalışma kapsamında sürücü davranışlarının test edilmesi amacıyla SIDRA TRIP© 1,1 benzetim programı kullanılmıştır. Bu program diğer yazılımların sunamadığı birçok önemli özelliği bünyesinde barındırmaktadır:

- Zaman değerlerini, araç maliyetlerini ve ücretli maliyetleri içeren araç işletim ve kullanıcı maliyetlerini belirler.
- Kapsamlı seyahat hizmet seviyesi ve performans istatistiklerini üretir.
- Yakıt tüketimi ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC) ve nitrojen oksitlerin (NO<sub>x</sub>) emisyonlarını tahmin eder.
- 3 alternatif model kullanarak gürültü seviyelerini (dBA) tahmin edebilir.
- Hafif araç ve ağır araç hızlanma ve yavaşlama karakteristiklerini analiz eder.
- Araç yakıt tüketimini ve emisyon test etmede kullanılan standart sürüş döngülerini analiz eder.
- Dinamik grafikleri kullanarak araç hareketlerini canlandırabilir.
- Binek arabası, hafif araç ve ağır araç hareketlerini simüle etmek için araç ve sürücü karakteristiklerini tanımlayan parametreleri kullanarak kendi araç ve sürücü tiplerinizi yaratmanıza olanak tanır.
- Yerel koşullarınız için, işletim ve kullanıcı maliyet modellerinin parametrelerini kalibre edebilir.

Şekil 3.23'de programın genel bir görüntüsü verilmiştir. Tez kapsamında Janus V2 cihazı ile elde edilen veriler Sidra Trip 1.1 benzetim programı yardımı ile mesafe-zaman, hız-Zaman, ivmelenme-Zaman değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 3.23 Sidra Trip© 1.1 benzetim programının genel görüntüsü.

### 3.2.2 Araçların Konum ve Hız Verilerinin Janus V2 GPS Cihazı Yardımı ile Ölçülmesi

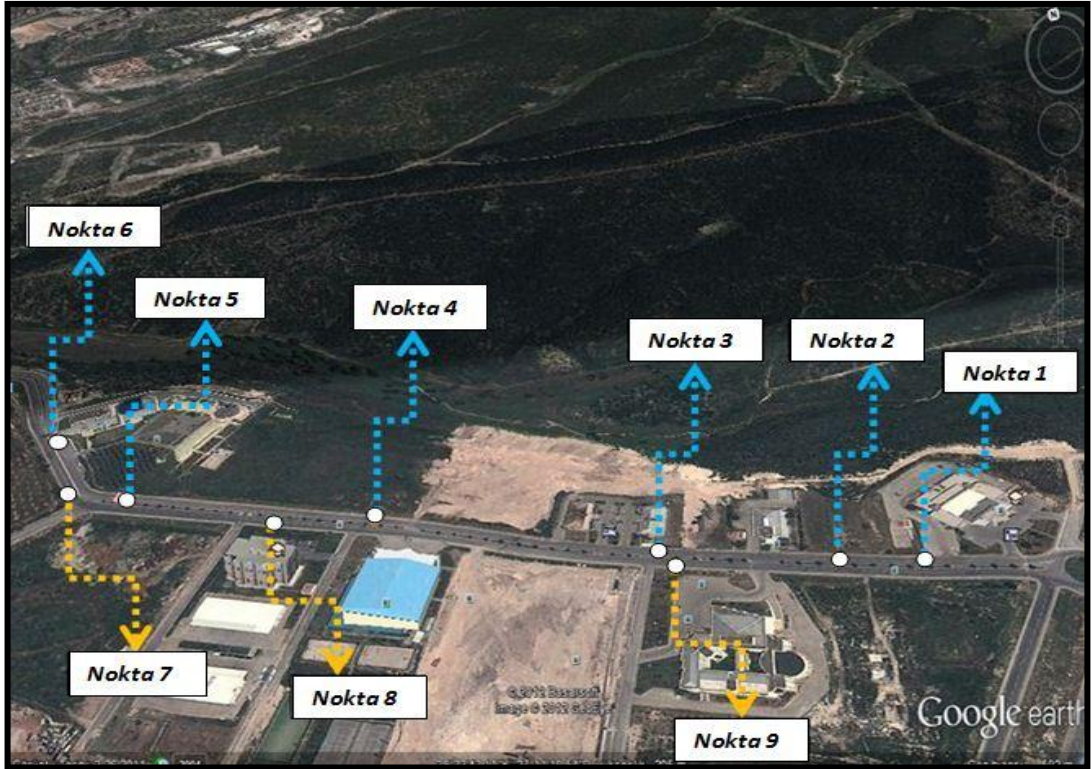
Tez Çalışması kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Kampüsü içerisinde ana arterler üzerinde yer alan 9 farklı deformasyon noktası belirlenmiş ve belirlenmiş olan bu noktalar Şekil 3.24’de gösterilmiştir. Ayrıca belirlenen deformasyon noktalarına ait yol yüzey deformasyonlarının özellikleri de Tablo 3.8’de verilmiştir. Belirlenmiş olan deformasyon noktalarından geçen araçlardan 5 farklı araca Janus V2 GPS cihazı takılmıştır. Araçlara yerleştirilen bu cihazlar sayesinde araçların deformasyonlu yollardaki hız profili, ivmelenme/ters ivmelenme ve deformasyonlu yüzeyden kaynaklı oluşan gecikme değerlerine ait veriler elde edilmiştir.



Tablo 3.8 Yol yüzey bozulmalarının özellikleri.

Deformasyon Noktası	Deformasyon Noktası			Yol Genişliği (m)	Deformasyonun Yanal Yöndeki konumu (m)	Deformasyonun Türü
	Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Derinlik(D)/Yükseklik (cm)			
1	2	1.8	6.5 (D)	9.6	3.6-5.6	Çökme ve timsah sırtı çatlak
2	2	1.5	6.7 (D)	9.6	1-3	Soğuk derz çatlağı, çökme ve timsah sırtı çatlak
3	0.3	9	3.5 (Y)	9.6	0.3-9.3	Beton yama ve hız kesme tümseği
4	1	9	5 (Y)	9.6	0.3-9.3	Hız kesici kasisler (tümsekler)
5	0.3	9	3.5 (Y)	9.6	0.3-9.3	Beton yama ve hız kesme tümseği
6	3	2,3	4.3 (D)	9.6	0.5-3,5	Beton yamada oluşan derz çatlakları
7	0.3	(0.6)-(5)	3.5 (Y)	9.6	(1.9-2.5) – (1.9-6.9)	Beton yama ve sağ şeritte hızlı geçişe imkan veren parçalı hız kesme tümseği
8	1	9	5 (Y)	9.6	0.3-9.3	Hız kesici kasisler (tümsekler)
9	3	4	5 (D)	9.6	0.5-3.5	Çökme ve timsah sırtı çatlak

Çalışma kapsamında veriler Şubat-Haziran ayları arasında farklı zamanlarda toplanmış olup 5 farklı gözlem aracının her birinin yaklaşık 2 km'lik uzunlukta 18 tur hareketini içermektedir. Araçlara yerleştirilen Janus V2 cihazı yardımıyla araçların her bir saniye için hız ve konum verileri elde edilmiştir. Araçların belirlenen deformasyonlu bölgelerden geçişleri sırasında Janus V2 cihazının GPS, kamera ve sarsıntıyı algılama özelliği sayesinde deformasyon noktalarının yerleri tam olarak belirlenmiş ve yapılan ölçümlerden GPS cihazının araçların hız ve konum verilerini yaklaşık olarak 1 sn gecikmeli olarak verdiği tespit edilmiştir. GPS cihazından verilerin elde edilmesindeki bu doğruluk oranının analizlerde kullanılmasında yeterli olduğu kabul edilmiş ve analizler bu doğrultuda yapılmıştır.



Şekil 3.24 Deformasyon noktalarının arazi üzerindeki konumları.

### 3.2.3 Araçların Konum ve Hız Verilerinin Hesaplanması

GPS yardımıyla elde edilen verilere ait özet değerler Tablo 3.9’da 9 farklı deformasyon noktası ve 5 farklı sürücü için verilmiştir. Tablo 3.9’da deformasyon noktalarına ait maksimum, minimum ve ortalama hız değerlerinin yanı sıra deformasyon noktasındaki hızların standart sapma değerleri de verilmiştir. Deformasyonlu bölgelerdeki ortalama hız  $\bar{V}$ , taşıtların deformasyon noktalarından geçişleri sırasındaki mevcut hızlarının aritmetik ortalaması hesaplanarak elde edilebilmektedir.

$$\bar{V} = \frac{\sum V_i}{N} \quad (20)$$

burada,

$\bar{V}$  : Deformasyon noktalarındaki ortalama hız (km/saat),

$V_i$  : Deformasyon noktasındaki i. hız değeri (km/saat),

$N$  : Hız değerlerinin toplam sayısıdır.

Diğer yandan bir deformasyon noktasında taşıtların ortalama yolculuk hızı, mesafe ve zaman değerleriyle de hesaplanabilmektedir ki bu değer deformasyonlu bölgenin uzunluğunun yolculuk süresine bölünmesiyle elde edilebilmektedir. McShane ve Roess (1990) seyahat süresini bir aracın bir karayolu kesitinin başlangıcından sonuna kadar ulaşıncaya kadar (Durma ve hareket süreleri dâhil) geçen süre olarak tanımlanmaktadır. McShane ve Roess (1990) tarafından tanımlanan seyahat süresine ait GPS verileriyle bir aracın deformasyonlu bir noktadaki ortalama hızı, aşağıda verilen denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$U = \frac{D}{T} = \frac{D_1 - D_0}{t_1 - t_0} \quad (21)$$

burada:

U :Deformasyon noktasındaki ortalama seyahat hızı;

D :Deformasyon noktasının uzunluğu;

T :Yolculuk (seyahat) süresi;

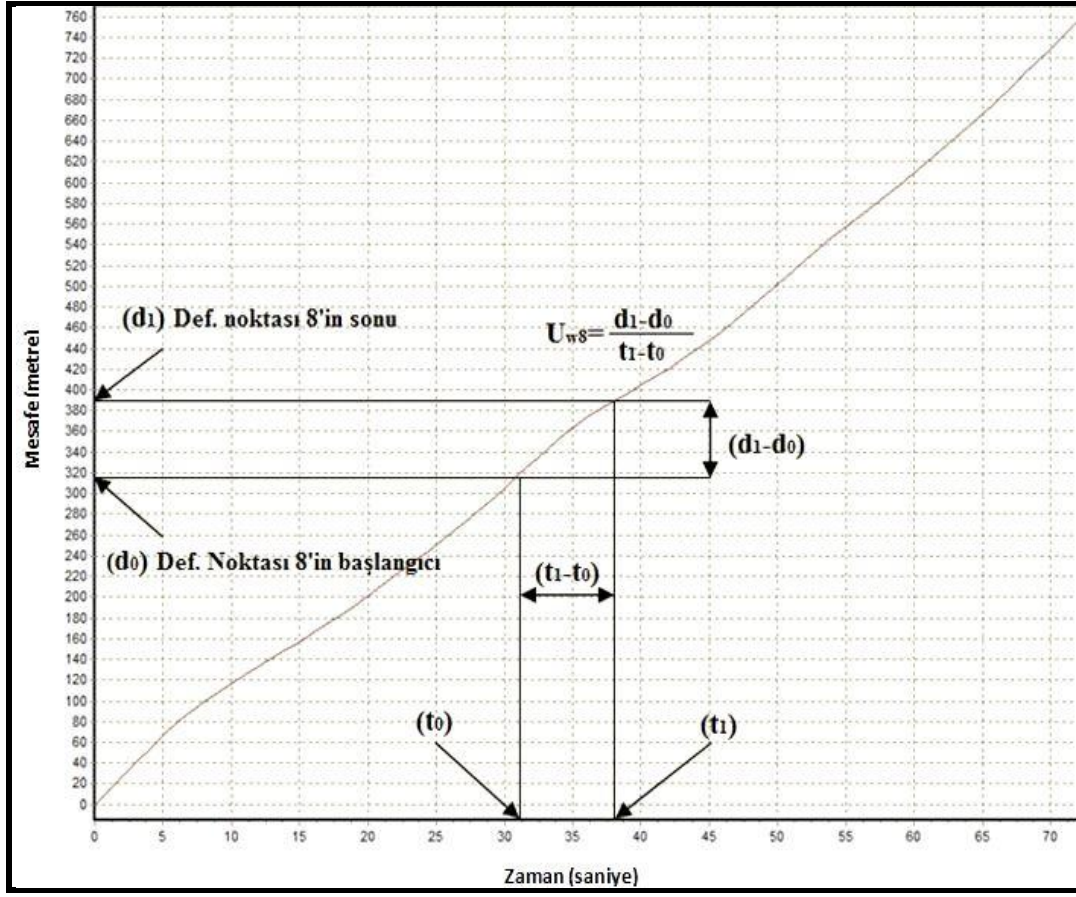
d<sub>1</sub> :Deformasyon noktasının sonunun konumu;

d<sub>0</sub> :Deformasyon noktasının başlangıç konumu;

t<sub>1</sub> :Deformasyon noktasının sonundaki süre; ve

t<sub>0</sub> :Deformasyon noktasının başındaki süre olmaktadır.

Genel olarak denklem 1 ve 2 birbirine eşdeğer değildir. Bununla birlikte bu tez çalışması kapsamında GPS cihazı vasıtasıyla elde edilen veriler için bu 2 denklem birbirine eşit olmaktadır. Çünkü kaydedilen veriler 1'er saniye aralıklarla kaydedilmiş olup verilerin toplanma yönteminde herhangi bir farklılık bulunmamaktadır.



Şekil 3.25 Sürücü 5 deformasyon noktası 7'ye ait ortalama yolculuk hızının bağıntı 2 yardımıyla hesaplanmasının şekil üzerinde gösterimi

Şekilden de görüldüğü üzere Janus V2 cihazının GPS özelliği ile elde edilen araçların ortalama yolculuk hızları bağıntı 2 yardımıyla da hesaplanabilmektedir. Deformasyon noktasındaki ortalama hız değeri, deformasyon noktasının hemen öncesi ve sonrasındaki iki nokta arasındaki mesafe farkının bu iki nokta arasında geçen yolculuk süresine oranı ile elde edilmektedir.

Tablo 3.9. Deformasyon noktalarından geçen 5 farklı sürücünün ortalama hız değerleri ve bu ortalama hızlara ait standart sapma değerleri.

<i>Sürücü 1</i>					<i>Sürücü 2</i>				<i>Sürücü 3</i>				<i>Sürücü 4</i>				<i>Sürücü 5</i>			
Deformasyon	Aracın Def. Bölge Hızı (Km/h)				Aracın Def. Bölge Hızı (Km/h)				Aracın Def. Bölge Hızı (Km/h)				Aracın Def. Bölge Hızı (Km/h)				Aracın Def. Bölge Hızı (Km/h)			
Nokta No	Maks.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Maks.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Maks.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Maks.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Maks.	Min.	Ort.	Std. Sapma
1	48,41	22,94	32,41	7,51	47,04	20,87	33,96	7,71	38,51	35,79	36,85	1,08	36,85	32,28	34,20	1,68	31,98	26,88	29,74	1,84
2	47,26	16,70	28,82	9,51	49,36	17,28	31,21	11,67	36,23	29,18	32,93	2,79	44,55	42,39	43,62	1,55	28,81	22,88	25,47	2,44
3	51,31	15,46	33,36	11,06	54,51	15,36	35,58	9,60	51,15	43,52	47,11	2,79	48,63	44,33	46,46	1,60	34,45	31,77	32,90	1,09
4	48,78	23,48	33,74	6,97	50,37	22,45	35,69	7,77	37,57	34,88	36,00	1,09	46,65	42,75	44,88	1,40	45,16	39,77	42,04	1,95
5	39,66	20,21	29,39	6,22	44,51	16,88	34,38	7,37	36,04	34,96	35,62	0,41	36,75	31,50	33,92	1,96	31,08	26,65	29,07	1,66
6	50,76	20,71	37,01	8,40	51,85	26,14	40,40	6,86	46,02	42,08	44,13	1,47	46,78	42,44	44,49	1,67	42,85	38,77	40,42	1,56
7	57,22	20,51	43,68	8,80	47,74	23,74	37,85	6,32	42,77	39,98	41,29	1,09	39,73	35,57	37,90	1,52	31,05	23,86	29,00	2,70
8	59,75	17,46	47,86	10,04	59,70	32,14	46,52	7,41	53,97	49,35	51,36	1,76	49,73	44,91	47,30	1,76	28,85	26,00	27,84	1,05
9	67,75	16,94	51,67	11,38	61,88	38,45	49,92	5,84	52,88	48,77	51,14	1,49	38,77	27,45	33,15	4,37	41,49	27,37	33,93	4,83

### 3.2.4 Deformasyonlu Bölgelerden Geçen Araçların İvmelenme ve Ters İvmelenmesi

Jiang (1999) çalışmasında, araçların deformasyon bölgesine yaklaşımları sırasında ters ivmelenmelerinden dolayı meydana gelen trafik gecikmelerini, deformasyon bölgesi boyunca araçların azalmış düşük hız değerlerini ve deformasyon bölgesinden sonra serbest akım koşullarındaki hız değerlerine ulaşıncaya kadar geçen süreyi incelemiştir. Bu çalışma kapsamında Jiang (1999) çalışmasından farklı olarak 9 farklı deformasyon bölgesi ve 5 farklı sürücü profiline göre araçların deformasyonlu noktalardaki ivmelenme ve ters ivmelenme değerleri hesaplanmış ve bu ivmelenme hareketlerinden dolayı meydana gelecek gecikmeler hesaplanmaya çalışılmıştır. Deformasyonlu noktalara giriş ve çıkıştaki gecikmeleri hesaplayabilmek amacıyla giriş ve çıkıştaki ivmelenme ve ters ivmelenme değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. GPS yardımıyla elde edilen hız verilerinden, taşıtların ivmelenme ve ters ivmelenme değerleri kolayca ve doğru şekilde hesaplanabilmektedir.

Eğer bir taşıt  $t_d$  zamanında  $v_d$  hızıyla ters ivmelenmeye başlamışsa ve  $t_b$  zamanında  $v_b$  hızıyla deformasyonlu bölgeye ulaşmışsa, o taşıtın ivmelenme oranı Denklem 22 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$rd = \frac{v_b - v_d}{t_b - t_d} \quad (22)$$

Benzer şekilde bir taşıt deformasyon bölgesinin sonuna  $t_1$  süresinde ve  $v_1$  hızıyla ulaşmışsa ve serbest akım hızı  $v_a$ 'ya ulaşmak için ivmelenmiş ve  $t_a$  süresinde buna ulaşmışsa o zaman ivmelenme oranı aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilmektedir.

$$ra = \frac{v_a - v_1}{t_a - t_1} \quad (23)$$

Denklem 22 ve Denklem 23 kullanılarak farklı deformasyon noktaları için ivmelenme ve ters ivmelenme oranlarının ortalama değerleri hesaplanmıştır. Deformasyon noktalarından önce ve sonra araçların normal akım koşullarına ait hız

değerleri GPS cihazı vasıtasıyla birer saniye aralıklarla elde edilmiş, bu hız değerlerine bağlı olarak ivmelenme/ters ivmelenme ve gecikme değerleri hesaplanmış ve sonuçlar 5 farklı sürücü tipi için Tablo 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 ve 3.14’de verilmiştir.

Tablo 3.9’de gösterilmiş olan deformasyon noktalarından geçen 5 farklı sürücünün hızlarına ait standart sapma değerlerinin deformasyondan önceki kısma göre önemsenecek derecede büyük olduğu görülmektedir. Bu da araçların deformasyon olmayan bölgelerde daha istikrarlı hızlarla hareketlerine devam ettiklerini göstermektedir. 9 farklı deformasyon noktası incelendiğinde, bu noktaların hızlarının standart sapmaları arasında Sürücü 1 için en büyük değer 9. noktada (11,38), Sürücü 2 için en büyük değer 2. Noktada (11,67), Sürücü 3 için en büyük değer 2 ve 3 noktasında (2,79), Sürücü 4 için en büyük değer 9. noktada (4,37) ve Sürücü 5 için en büyük değer 9. noktada (4,83) olduğu görülmektedir. Sonuçlar irdelendiğinde 3 sürücünün 9. deformasyon noktasındaki hızlarına ait standart sapma değerlerinin en büyük olduğu görülmektedir. Bu da deformasyonlu noktalar içerisinde en fazla hız değişiminin 9. noktada olduğunu göstermektedir. Buradaki en önemli faktör sürücü karakteristikleri olmaktadır. Sürücülerin algı, agresiflik gibi kişisel özellikleri deformasyonlu noktalardan geçişlerde sürücülerin davranışlarını etkileyen en önemli etmenlerden birisidir. 5 farklı sürücü tipi için bu veriler incelendiğinde her bir sürücü için hız değerleri ve bunlara ait standart sapma değerlerinin farklı değerler aldığı görülmektedir.

Verilen bu istatistiksel bilgiler yalnız bireysel hız verileriyle elde edilebilmekte ve her bir sürücünün deformasyon olan bir yolda trafik akımı içinde nasıl bir davranış sergilediği konusunda fikir vermektedir.

Sürücülerin trafik akımı içindeki hareketlerinin hesaplanmasında kullanılan iki denklemden Denklem 20 ve denklem 21 ortalama seyahat hızını elde etmek için kullanılabilir olsa da eğer detaylı bir hız çalışması gerekli ise Denklem 20’yi kullanmak bireysel hız verisini, yolculuk hızını ve diğer istatistiksel değerleri hesaplamak için kullanmak daha avantajlı olacaktır. Çünkü Denklem 20 hız

karakteristikleri üzerinde örneğin hız kararlılığı ya da standart sapmadaki dalgalanma, dağılım, maksimum ve minimum değerlerin elde edilmesinde daha doğru sonuçlar vermektedir.

### 3.2.5 Gecikme Değerlerinin Hesaplanması

Bir kaplama yüzeyinde deformasyon olması durumunda o yolu kullanan taşıtların hareketleri yol yüzey bozukluğu veya bozuklukları nedeniyle kısıtlanmaktadır. Mevcut taşıt hareketlerinin kısıtlanması ise en çok taşıtların hızlarını azaltması şeklinde olmaktadır. Bir akım içerisinde araçların hızlarını azaltması sonucu görülebilecek en önemli sonuçlar kapasitenin düşmesi, yoğunluğun artması ve gecikmelerin meydana gelmesidir. Bunların meydana gelmesinde en önemli etmen deformasyonlu bölgelerde deformasyonun büyüklüğüne göre deformasyonun olduğu şeridin kullanılmaması ve dolayısıyla şerit sayısında azalma olmasıdır.

Deformasyon noktalarındaki gecikmeyi hesaplamak için yol üzerinde herhangi iki nokta seçilmeli, bunlardan bir tanesi aracın deformasyonlu noktaya yaklaşırken ters ivmelenmeye başladığı ve diğeri de aracın deformasyonlu noktadan çıktıktan sonra normal akım koşullarına ulaşmaya kadar ki durum olmaktadır. Yani aracın deformasyonlu noktaya girmeden ve deformasyonlu noktadan çıktıktan sonra normal akım koşullarında hareket ettiği durum için 2 nokta seçilmelidir. Çünkü araçların deformasyon etkisiyle hızlarını azaltacakları ve bununda bir gecikmeye neden olacağı beklenmektedir. Aracın deformasyon olmayan kesitteki hızı (ortalama seyahat hızı  $u_{fw}$ , bu iki nokta arasındaki GPS mesafe ve zaman değerleri sırasıyla  $d_{fw1}$ ,  $t_{fw1}$ ,  $d_{fw2}$  ve  $t_{fw2}$  o zaman deformasyon bölgesi için gecikme değeri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$T_{gecikme} = (t_{fw2} - t_{fw1}) \frac{d_{fw2} - d_{fw1}}{u_{fw}} \quad (24)$$



Bu denklemde,  $(t_{fw2} - t_{fw1})$  gerçek yolculuk süresi,  $(d_{fw2} - d_{fw1})$  iki nokta arasındaki mesafe ve  $\frac{d_{fw2} - d_{fw1}}{u_{fw}}$  değeri de deformasyon olmadığı varsayıldığında bu iki nokta arasında beklenen yolculuk süresidir.

Elde edilen gecikme değerleri saatlik trafik akım oranına karşılık gelen değerle çarpıldığında deformasyon bölgesindeki taşıtların tümü için toplam gecikme hesaplanabilmektedir.

Belirlenmiş olan 9 deformasyon noktasından kaynaklı oluşan gecikmelere ait değerler Tablo 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 ve 3.30'de verilmiştir. Yol bozukluğundan kaynaklı oluşan gecikme değerleri, her bir deformasyon noktasının ortalama hızı alınarak elde edilen ve nokta no 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 için deformasyonlu bölge olan 1040 metrelik yol üzerindeki seyahat süresi ile deformasyondan önceki ve sonraki sürücü hızlarının ortalaması alınarak hesaplanan seyahat sürelerinin arasındaki farklar alınarak elde edilmiştir.

Tablo 3.10 Sürücü 1'in 9 deformasyon noktasından önce ve sonraki hareketine ait istatistiksel veriler.

<b>Sürücü 1</b>								
<b>Deformasyon</b>	<b>Taşıt</b>	<b>Aracın Normal Yol Hızı (Km/Saat)</b>				<b>İvmelenme</b>	<b>Ters İvmelenme</b>	<b>Gecikme</b>
<b>Nokta No</b>	<b>Konum</b>	<b>Maks.</b>	<b>Min.</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Std. Sapma</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(Saniye)</b>
<b>1</b>	<b>Önce</b>	43,64	26,88	34,03	5,15	-	0,622	6,21
	<b>Sonra</b>	45,00	25,65	30,78	6,26	0,138	-	
<b>2</b>	<b>Önce</b>	46,38	23,60	30,08	6,95	-	0,161	20,62
	<b>Sonra</b>	52,71	24,74	36,10	7,70	0,992	-	
<b>3</b>	<b>Önce</b>	54,41	23,36	38,35	8,19	-	0,896	2,93
	<b>Sonra</b>	61,62	30,46	41,80	8,27	1,705	-	
<b>4</b>	<b>Önce</b>	58,15	30,41	41,90	7,13	-	1,655	1,68
	<b>Sonra</b>	53,59	26,54	38,22	7,01	0,568	-	
<b>5</b>	<b>Önce</b>	52,68	24,02	36,78	7,83	-	1,506	18,10
	<b>Sonra</b>	46,45	23,32	33,64	5,69	0,829	-	
<b>6</b>	<b>Önce</b>	53,21	21,76	39,20	7,82	-	0,298	8,14
	<b>Sonra</b>	48,17	25,48	34,48	6,45	-	2,415	
<b>7</b>	<b>Önce</b>	63,63	30,45	51,58	6,45	-	1,364	13,50
	<b>Sonra</b>	55,86	33,43	46,64	5,87	0,652	-	
<b>8</b>	<b>Önce</b>	57,46	27,09	48,08	7,86	-	0,136	6,00
	<b>Sonra</b>	63,51	26,23	47,30	8,01	0,387	-	
<b>9</b>	<b>Önce</b>	66,15	20,43	52,90	9,63	0,256	-	0,23
	<b>Sonra</b>	74,59	26,42	52,10	10,09	-	0,312	

Tablo 3.11 Sürücü 2'nin 9 deformasyon noktasından önce ve sonraki hareketine ait istatistiksel veriler.

<b>Sürücü 2</b>								
<b>Deformasyon</b>	<b>Taşıt</b>	<b>Aracın Normal Yol Hızı (Km/Saat)</b>				<b>İvmelenme</b>	<b>Ters İvmelenme</b>	<b>Gecikme</b>
<b>Nokta No</b>	<b>Konum</b>	<b>Maks.</b>	<b>Min.</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Std. Sapma</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(Saniye)</b>
<b>1</b>	<b>Önce</b>	48,94	29,55	37,54	4,83	-	0,763	13,49
	<b>Sonra</b>	51,15	24,31	34,85	7,27	0,659	-	
<b>2</b>	<b>Önce</b>	51,20	27,54	34,93	7,02	-	1,411	23,19
	<b>Sonra</b>	55,45	27,81	40,04	7,77	1,277	-	
<b>3</b>	<b>Önce</b>	57,60	30,54	42,08	7,45	-	1,263	8,48
	<b>Sonra</b>	58,15	28,45	43,60	7,56	1,305	-	
<b>4</b>	<b>Önce</b>	59,65	30,24	43,84	7,32	-	0,851	8,15
	<b>Sonra</b>	59,53	31,54	44,24	7,89	1,573	-	
<b>5</b>	<b>Önce</b>	55,05	31,02	44,62	6,51	-	2,364	12,14
	<b>Sonra</b>	52,14	30,56	40,46	5,35	1,179	-	
<b>6</b>	<b>Önce</b>	56,53	29,57	43,08	6,65	-	0,992	4,08
	<b>Sonra</b>	50,62	30,08	39,85	5,05	0,247	-	
<b>7</b>	<b>Önce</b>	53,76	38,23	45,02	4,01	-	1,090	24,83
	<b>Sonra</b>	56,65	32,29	43,82	4,87	0,974	-	
<b>8</b>	<b>Önce</b>	61,53	41,03	50,08	3,98	-	1,316	6,40
	<b>Sonra</b>	59,46	34,65	43,92	3,68	0,138	-	
<b>9</b>	<b>Önce</b>	58,86	37,30	49,40	4,99	0,312	-	0,93
	<b>Sonra</b>	70,61	42,71	56,07	5,54	1,258	-	

Tablo 3.12 Sürücü 3'ün 9 deformasyon noktasından önce ve sonraki hareketine ait istatistiksel veriler.

<b>Sürücü 3</b>								
<b>Deformasyon</b>	<b>Taşıt</b>	<b>Aracın Normal Yol Hızı (Km/Saat)</b>				<b>İvmelenme</b>	<b>Ters İvmelenme</b>	<b>Gecikme</b>
<b>Nokta No</b>	<b>Konum</b>	<b>Maks.</b>	<b>Min.</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Std. Sapma</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(Saniye)</b>
<b>1</b>	<b>Önce</b>	40,25	35,22	37,78	2,51	-	0,242	2,80
	<b>Sonra</b>	41,22	36,15	38,75	2,62	-	0,926	
<b>2</b>	<b>Önce</b>	35,11	31,16	33,13	1,97	-	1,412	14,91
	<b>Sonra</b>	42,16	33,95	37,35	4,03	1,710	-	
<b>3</b>	<b>Önce</b>	45,96	40,25	43,30	2,85	0,239	-	19,32
	<b>Sonra</b>	51,47	42,35	48,09	4,52	0,963	-	
<b>4</b>	<b>Önce</b>	55,37	40,12	50,41	6,45	-	1,124	5,22
	<b>Sonra</b>	49,25	33,25	39,05	6,71	1,621	-	
<b>5</b>	<b>Önce</b>	47,02	41,12	45,24	2,91	-	1,769	6,32
	<b>Sonra</b>	42,99	34,35	38,34	4,21	0,498	-	
<b>6</b>	<b>Önce</b>	46,15	38,02	42,36	0,92	0,574	-	13,96
	<b>Sonra</b>	45,85	33,25	38,01	5,47	-	0,648	
<b>7</b>	<b>Önce</b>	51,61	41,97	48,39	3,96	-	0,917	19,16
	<b>Sonra</b>	48,05	38,93	43,67	3,76	0,521	-	
<b>8</b>	<b>Önce</b>	52,42	44,23	49,21	3,01	0,576	-	1,39
	<b>Sonra</b>	52,28	43,21	50,51	3,34	0,021	-	
<b>9</b>	<b>Önce</b>	55,36	47,74	52,22	2,83	0,269	-	1,71
	<b>Sonra</b>	62,38	50,28	56,32	4,78	0,750	-	

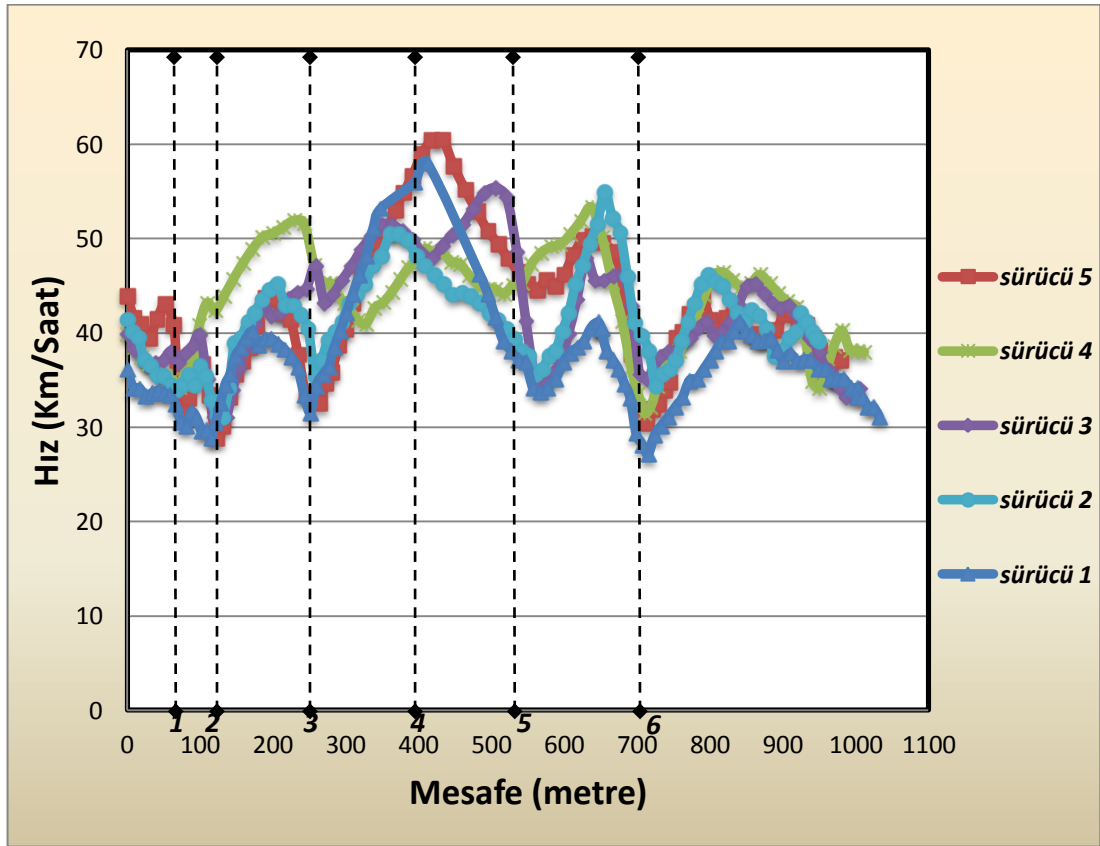
Tablo 3.13 Sürücü 4'ün 9 deformasyon noktasından önce ve sonraki hareketine ait istatistiksel veriler.

<b>Sürücü 4</b>								
Deformasyon	Taşıt	Araçın Normal Yol Hızı (Km/Saat)				İvmelenme	Ters İvmelenme	Gecikme
Nokta No	Konum	Maks.	Min.	Ortalama	Std. Sapma	(km/saat/saniye)	(km/saat/saniye)	(Saniye)
1	Önce	39,27	36,40	37,03	1,09	-	0,438	11,03
	Sonra	39,66	35,83	36,52	1,91	2,355	-	
2	Önce	44,56	39,15	42,03	2,56	1,080	-	12,62
	Sonra	51,25	42,15	47,23	4,56	1,319	-	
3	Önce	52,89	48,15	51,37	2,26	-	1,070	17,87
	Sonra	49,65	39,64	44,72	4,95	0,212	-	
4	Önce	49,40	43,25	45,93	3,01	-	0,134	15,03
	Sonra	54,65	46,98	50,02	4,12	0,437	-	
5	Önce	51,45	33,45	41,39	7,65	-	3,068	11,95
	Sonra	45,16	30,25	38,82	6,56	1,569	-	
6	Önce	47,98	43,78	45,75	2,25	-	0,301	14,29
	Sonra	46,46	36,78	39,03	4,61	-	0,578	
7	Önce	48,29	38,29	41,54	4,08	-	0,580	4,03
	Sonra	43,02	36,46	39,27	2,98	0,410	-	
8	Önce	50,67	41,32	46,18	3,89	0,160	-	15,59
	Sonra	47,29	40,76	43,62	2,92	-	0,540	
9	Önce	41,75	37,35	39,05	1,89	-	2,002	18,18
	Sonra	45,39	32,39	37,49	7,28	0,860	-	

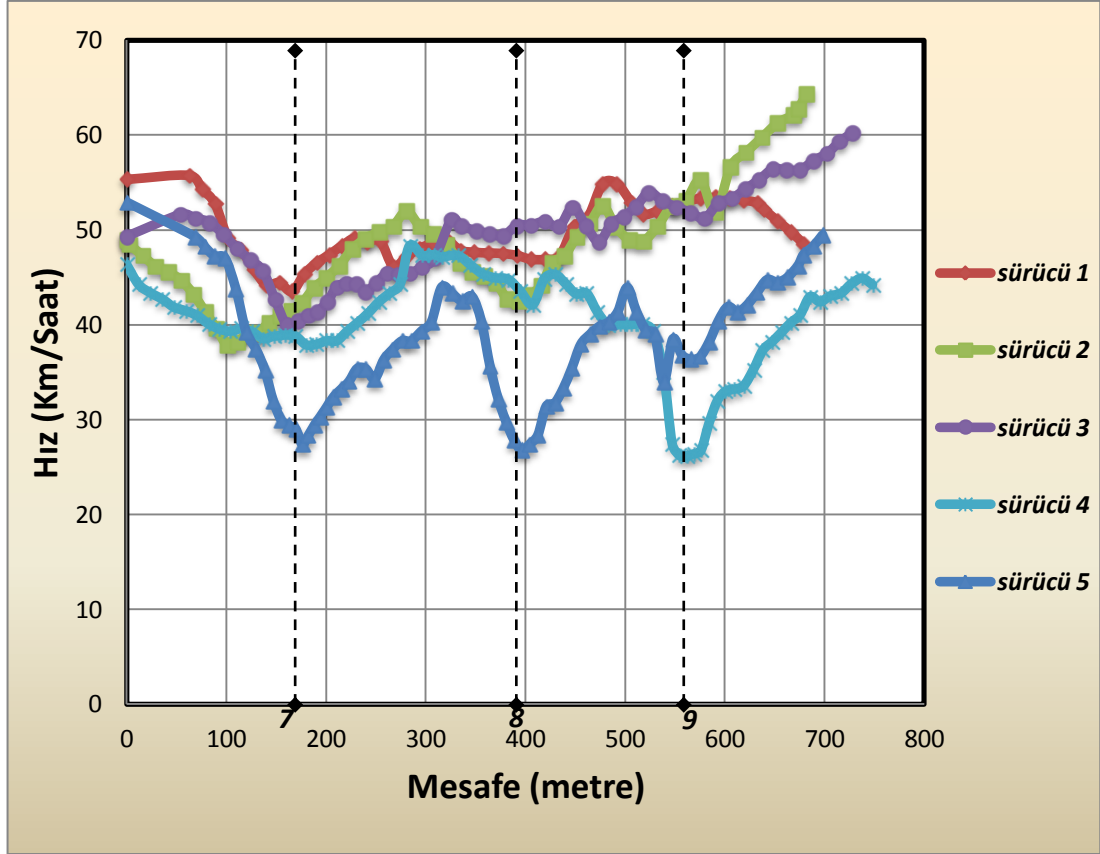
Tablo 3.14 Sürücü 5'in 9 deformasyon noktasından önce ve sonraki hareketine ait istatistiksel veriler.

<b>Sürücü 5</b>								
<b>Deformasyon</b>	<b>Taşıt</b>	<b>Aracın Normal Yol Hızı (Km/Saat)</b>				<b>İvmelenme</b>	<b>Ters İvmelenme</b>	<b>Gecikme</b>
<b>Nokta No</b>	<b>Konum</b>	<b>Maks.</b>	<b>Min.</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Std. Sapma</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(km/saat/saniye)</b>	<b>(Saniye)</b>
<b>1</b>	<b>Önce</b>	44,95	36,45	41,07	4,23	-	1,233	32,77
	<b>Sonra</b>	36,70	32,56	34,08	2,65	1,828	-	
<b>2</b>	<b>Önce</b>	37,89	32,45	35,08	3,01	-	2,316	58,88
	<b>Sonra</b>	45,36	29,65	36,98	6,15	1,841	-	
<b>3</b>	<b>Önce</b>	44,98	36,56	41,23	4,06	-	1,990	20,68
	<b>Sonra</b>	61,25	32,36	46,92	7,75	1,677	-	
<b>4</b>	<b>Önce</b>	58,45	45,12	51,51	5,89	-	1,773	4,05
	<b>Sonra</b>	51,98	43,69	47,14	4,15	0,717	-	
<b>5</b>	<b>Önce</b>	49,57	35,45	45,41	6,01	-	3,808	35,67
	<b>Sonra</b>	42,65	29,56	37,56	5,77	1,089	-	
<b>6</b>	<b>Önce</b>	43,15	38,45	41,17	2,72	-	0,334	0,49
	<b>Sonra</b>	43,99	35,55	39,35	4,21	-	0,231	
<b>7</b>	<b>Önce</b>	55,79	34,52	42,02	6,72	--	1,969	40,41
	<b>Sonra</b>	40,33	25,83	34,19	5,39	0,967	-	
<b>8</b>	<b>Önce</b>	49,17	28,93	38,82	7,38	-	1,878	45,81
	<b>Sonra</b>	41,95	25,39	32,36	5,46	1,445	-	
<b>9</b>	<b>Önce</b>	45,81	34,94	40,75	4,11	-	0,191	21,68
	<b>Sonra</b>	55,30	34,21	42,42	6,49	0,681	-	

Çalışma kapsamında incelenen ve bu deformasyonlu yolu kullanan 5 farklı sürücüye ait hız-mesafe grafikleri deformasyon noktası 1,2,3,4,5 ve 6 için Şekil 4.26'de, deformasyon noktası 7,8 ve 9 için ise Şekil 3.27'de verilmiştir. Deformasyon noktaları 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 kampüs çıkış yönünde aynı yol üzerinde, deformasyon noktaları 7,8 ve 9 ise kampüs giriş yönünde aynı yol üzerinde yer almaktadırlar. Bu sebepten ötürü grafikler nokta no 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 için ve nokta no 7,8 ve 9 için farklı grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Beş farklı sürücü için deformasyon noktası no 1,2,3,4,5 ve 6'daki hızlarını gösteren hız-mesafe grafiği (Kampüs çıkış yönü).



Şekil 3.27 Beş farklı sürücü için deformasyon nokta no 7,8 ve 9'daki hızları gösteren Hız-Mesafe grafiği (Kampus giriş yönü).

Şekil 3.26 ve 3.27'den de görüldüğü üzere deformasyon noktalarında hemen hemen tüm sürücülerin hızları düşmektedir. Yine deformasyonlar arası mesafede araçların zirve hızları aynı konum üzerinde olmakta fakat farklı değerler almaktadır. Buradaki en önemli etmen daha önce de değinildiği gibi sürücü özellikleridir. Şekil 3.26 incelendiğinde kampus çıkış yönünde 5 no'lu sürücünün diğerlerine göre daha yüksek hızlarla hareket ettiği görülmekte ve dolayısıyla en agresif sürücü olduğu söylenebilmektedir. Yine Şekil 4.26 incelendiğinde ise düşük seyahat hızından ötürü 1 no'lu sürücünün en sakin sürücü olduğu söylenebilmektedir. Şekil 3.27'de kampus giriş yönünde 1,2 ve 3 no'lu sürücülerin diğer iki sürücüye göre daha yüksek hızlarla hareket ettiği görülmekte ve dolayısıyla en agresif sürücü oldukları söylenebilmektedir. Yine şekil 3.27 incelendiğinde ise düşük seyahat hızından ötürü 5 no'lu sürücünün en sakin sürücü olduğu söylenebilmektedir.



### 3.2.6 Veri Toplama Yöntemlerinin Kıyaslanması

Verilen hız-mesafe grafiklerinden GPS verisinin bir yol kesitindeki herhangi 2 nokta arasında bu kesitin başı ve sonu arasında aracın mevcut hızını ve gerçek yolculuk süresi hakkında bilgi edinmede kullanılacak en doğru ölçüm cihazı olduğu görülmektedir.

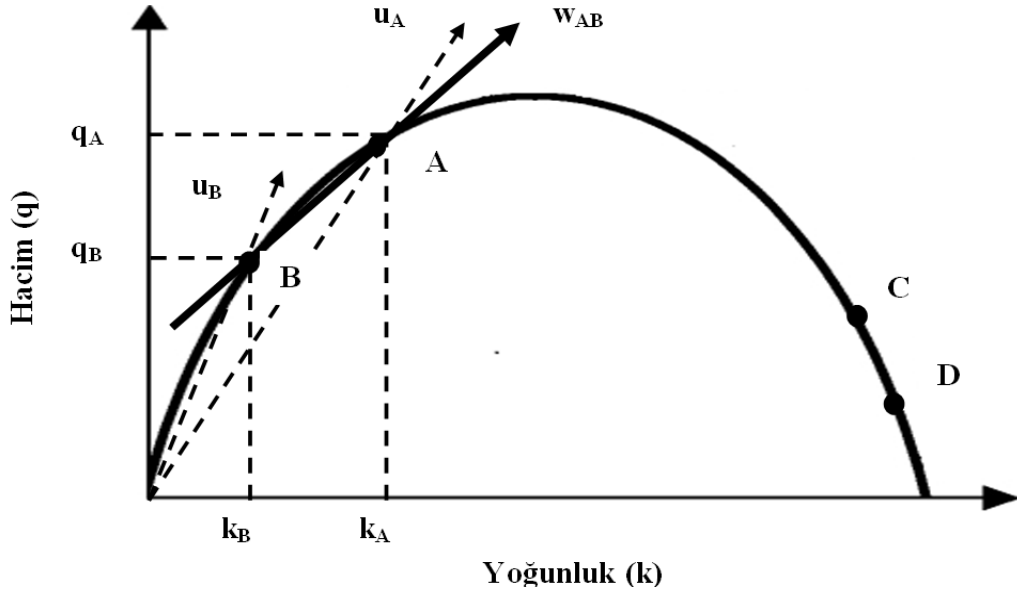
Önceki bölümlerde tartışıldığı üzere GPS cihazı deformasyonlu bölgelerde verilerin toplanması kapsamında yararlı bir araç olmaktadır. GPS cihazları taşıt hız profili, taşıt ivmelenme, ters ivmelenme ve gecikme gibi trafik akımının dinamik özelliklerinin kaydedilmesinde kullanılmaktadır. Video kamera yardımıyla yapılan basit trafik sayımlarıyla araçların yolun herhangi iki kesiti arasındaki ortalama hızları hesaplanabilmekte fakat ivmelenme, ters ivmelenme ve gecikme değerleri ise basit sayım yöntemlerinde detaylı olarak incelenememektedir. Video kamera yardımıyla elde edilen sonuçlar GPS cihazından elde edilen sonuçlar kadar doğru sonuçlar vermemektedir. Diğer taraftan GPS cihazının trafik sayımlarında dezavantajları da mevcuttur. Bunlardan ilki GPS cihazının deformasyon bölgelerindeki trafik hacmini kaydedememesidir. İkincisi ise, GPS'in dinamik özelliği çeşitli trafik ölçümleri için gerekmekte fakat cihazın bu özelliğinin de ciddi eksiklikleri mevcut olmaktadır. Örneğin herhangi bir sabit noktanın konum ve hız verilerinin elde edilmesinde GPS cihazının uydu bağlantısı önem teşkil etmektedir. Bazı cihazlardan elde edilen sonuçlar ancak bazı düzeltme katsayılarıyla çarpılarak anlamlı sonuçlara dönüşebilmektedir. Ayrıca deformasyonlu bölgelerin trafik akım karakteristiklerinin belirlenmesinde GPS cihazı kullanılıyor ise gerekli örnek boyutu ve yapılacak işlemler önceden istatistiksel prensiplere dayandırılarak belirlenmelidir. Her iki trafik sayım ve GPS cihazları hem avantaj hem de dezavantajlara sahiptir. Veri toplama yönteminin seçimi hangi tür bilgiye gereksinim olduğuna bağlıdır. Deformasyonlu bölgelerin trafik karakteristiklerinin kapsamlı bir şekilde belirlenmesinde GPS cihazları ve trafik sayımlarının her ikisinin de bir birleşimi olarak kullanılmasının daha doğru sonuçlara yol göstereceği düşünülmekte ve bu doğrultuda veri toplanması önerilmektedir.

**BÖLÜM DÖRT**  
**ÇOK ŞERİTLİ YOL YÜZEYLERİNDE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN**  
**TRAFİK AKIMINDA ŞOK DALGASI ve ŞİŞEBOYNU OLUŞUMU**  
**AÇISINDAN İNCELENMESİ**

**4.1 Trafik Akımının Şok Dalgası Oluşması Durumundaki Davranışı**

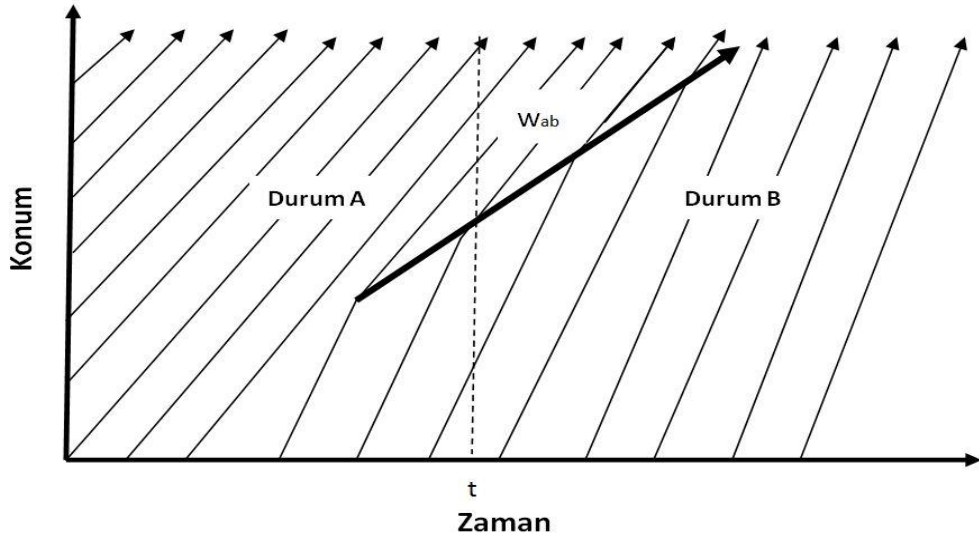
Bilindiği üzere Hacim-Hız-Yoğunluk ilişkisi zaman içerisinde araçların konumlarında meydana gelen değişikliklere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar nedeni ile değişik akım durumları görülmekte ve bu akımlar arasında belirli sınır koşulları oluşmaktadır. Bir akımdan diğer bir akıma geçiş sırasında oluşan bu sınır koşulu şok dalgası olarak tanımlanmaktadır (May, 1990). Oluşan şok dalgası etkisi bazı durumlarda küçük bazı durumlarda da büyük olabilmektedir. Özellikle şok dalgası etkisinin büyük olduğu durumlarda akım değerlerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir (May, 1990).

Şekil 4.1'de görülen hacim-yoğunluk ilişkisine sahip kesintisiz bir yol kesiti düşünüldüğünde, belirli bir zaman aralığı boyunca düzenli bir serbest akım değeri A noktasıyla gösterilen durumdaki gibi olmaktadır.



Şekil 4.1 Şok dalgasının Hacim-Yoğunluk grafiği üzerindeki gösterimi (May, 1990).

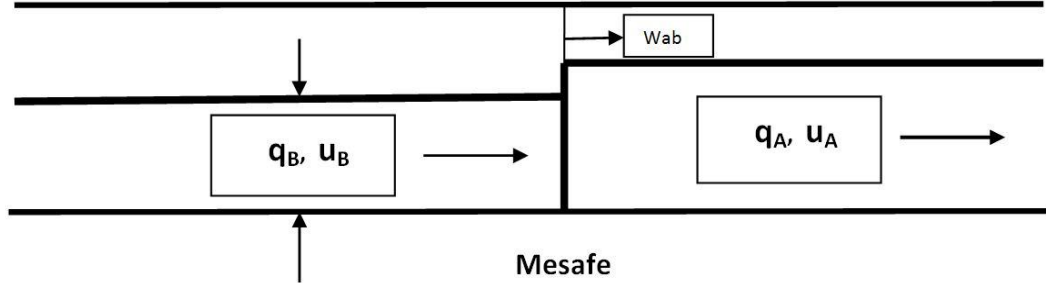
Akım durumu A'ya ait Hacim, Yoğunluk ve Hız notasyonları sırasıyla  $q_a$ ,  $k_a$  ve  $u_a$  ile gösterilmektedir. Daha sonra daha düşük bir akım değerine sahip düzenli bir serbest akım koşulu görülmekte ve Şekil 4.1'de B noktasıyla gösterilmektedir. Akım değeri B'ye ait hız değeri ( $u_b$ ) daha büyük bir hız değeri olacak ve böylece B akımındaki araçlar zaman içerisinde A noktasındaki akım değerine sahip araçları yakalayacaktır. Bu durum Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekilde akım değeri A'dan akım değeri B'ye geçiş kalın bir çizgi ile gösterilmiştir. Bu çizgi akımlar arasındaki farklılıktan kaynaklı olarak oluşan şok dalgasının hızını diğer bir deyişle araçların yüksek hızlı B durumundan düşük hızlı A durumuna katılmalarını göstermektedir (May, 1990).



Şekil 4.2 Şok dalgasının Konum-Zaman grafiği üzerindeki gösterimi (May, 1990).

Şekil 4.3,  $t$  süresinde iki farklı akım değerine sahip bir yol kesitini göstermektedir. Burada sağa doğru hareket eden 3 farklı hız değeri gösterilmektedir.  $u_B$ : akım durumu B'deki araçların hızını,  $u_A$ : akım durumu A için akımın şok dalgası öncesindeki hızını ve  $w_{ab}$  ise bu iki akım durumu arasındaki şok dalgasının hızını göstermektedir. Şekilde şok dalgasının yönü oldukça açık olmaktadır fakat bu durum bazen karmaşıklık gösterebilmekte ve şok dalgasının yönü belirgin şekilde görülmeyebilmektedir. Bu durumda trafik mühendisleri şok dalgasının yönünün genellikle ileriye doğru olduğunu kabul etmektedir. Şok dalgasının yönünün negatif

olması durumunda şok dalgasının akım yönüne ters yönde hareket ettiği analizlerden de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3 Şok dalgası oluşumunun şekil üzerindeki gösterimi (May, 1990).

Şok dalgası oluşması durumunda, akım B'ye ait araçların sayısı ( $N_B$ ) akım A'ya geçen araçların sayısı ( $N_A$ )'ya eşit olmaktadır. Bu iki akım durumu arasındaki geçişlerde herhangi bir araç yok olmamakta veya ilave bir araç eklenmemektedir. Burada ( $N_B$ ) ve ( $N_A$ ) aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir.

$$N_B = q_B t = (u_B - \omega_{AB}) k_B t \quad (25)$$

$$N_A = q_A t = (u_A - \omega_{AB}) k_A t \quad (26)$$

$N_B = N_A$  kabulüyle şok dalgasının hızı ( $\omega_{AB}$ ) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

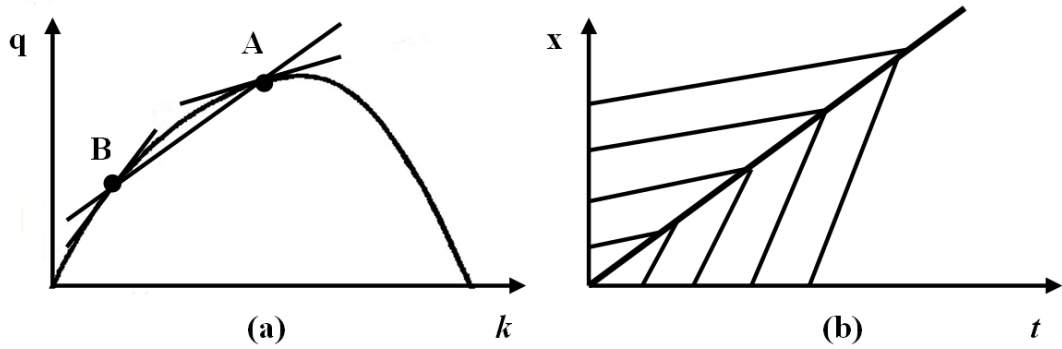
$$(u_B - \omega_{AB}) * k_B * t = (u_A - \omega_{AB}) * k_A * t \quad (27)$$

$$\omega_{AB} = \frac{(q_A - q_B)}{(k_A - k_B)} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad (28)$$

Böylece iki durum arasındaki şok dalgasının hızı, A ve B'deki hacimler arasındaki farkın yoğunluklar arasındaki farka oranıyla hesaplanmaktadır. Şok dalgasının hızı ayrıca Şekil 4.1'de A ile B'yi birleştiren doğrunun eğimi ile de hesaplanabilmektedir. Burada  $q_A > q_B$  ve  $k_A > k_B$  olduğu için pozitif şok dalgası hızı görülecektir. Buda şok dalgasının yönünün trafik akımı doğrultusunda olduğunu göstermektedir.

Hacim-Yoğunluk eğrileri trafik analizlerinin en önemli unsurlarından birisini oluşturmaktadır. Şekil 4.4 bir trafik akımında hareket eden araçların şok dalgası oluşumundaki etkisini belirlemede kullanılmaktadır.

Şekil 4.4.a'da hacim-yoğunluk eğrisi, 4.4.b'de ise bir konum-zaman diyagramı verilmiştir. Hacim-Yoğunluk eğrisi üzerinde A noktası kapasiteye yakın olan hacim ve serbest akım hızından düşük hız değerlerini göstermektedir. B noktası ise düşük yoğunluktan dolayı bir miktar daha yüksek hız değerini göstermektedir. A ve B noktadaki teğetler, bu iki durumdaki araçların hızlarını göstermektedir.



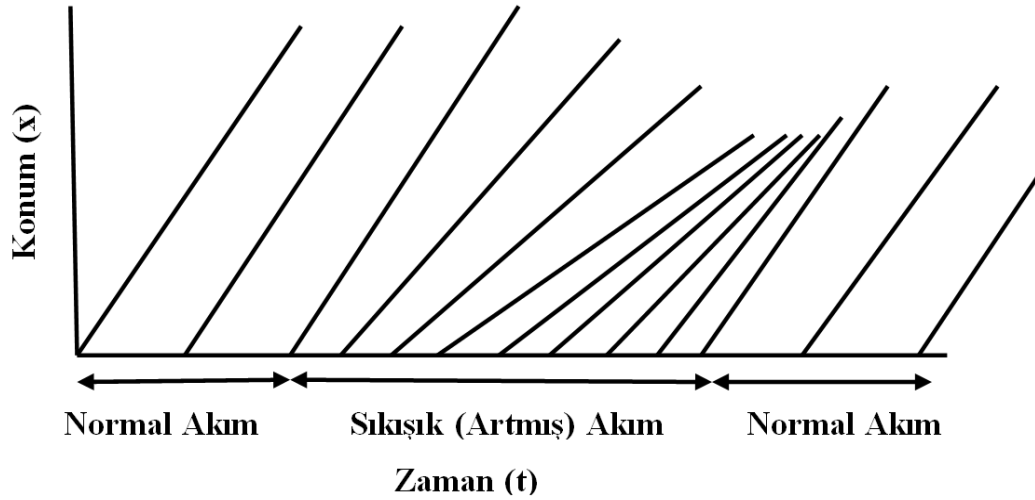
Şekil 4.4 Hacim-Yoğunluk ( $q-k$ ) eğrileri ve Konum-Zaman ( $x-t$ ) diyagramları kullanılarak şok dalgası analizlerinin yapılması (Conway, 1963).

Şekil 4.4.a'da gösterilen A ve B noktalarının birleştirilmesiyle oluşan doğru şok dalgasının yönünü göstermektedir. Şok dalgasının hızı genellikle yoldaki akım hızına göre negatif yani daha küçük bir değer almaktadır ve yönü de genellikle akımın yönüne göre ters olmaktadır. Şekil 4.4.b'de verilen konum-zaman grafiği, taşıtların konum-zaman eğrilerini değil sabit bir akımın ve sabit bir hızın doğrularını temsil etmektedir. Taşıtlar şok dalgasından önceki ve sonraki kısımlarda şok dalgasının hızından daha büyük bir hız değerine sahip olmaktadır. Çünkü akımın hızı yarıçap vektörüyle gösterilmektedir. Hâlbuki şok dalgası hızları ise teğetlerle gösterilmektedir. Böylece şok dalgası hızlarının tahmini olduğu fakat yararlı bir analiz aracı olduğu düşünülmektedir.

Trafik akımında en çok görülen durumlardan birisi de akımın bir anda artması sonucu yoğunluğun buna bağlı olarak yolun belirli bir kısmında artmasıdır. Bu

durum özellikle bir yol üzerinde sabit bir düzeyde hareket eden akımın, bir anda ve kısa süre ardışık gelen yoğun akım sebebiyle oluşmaktadır

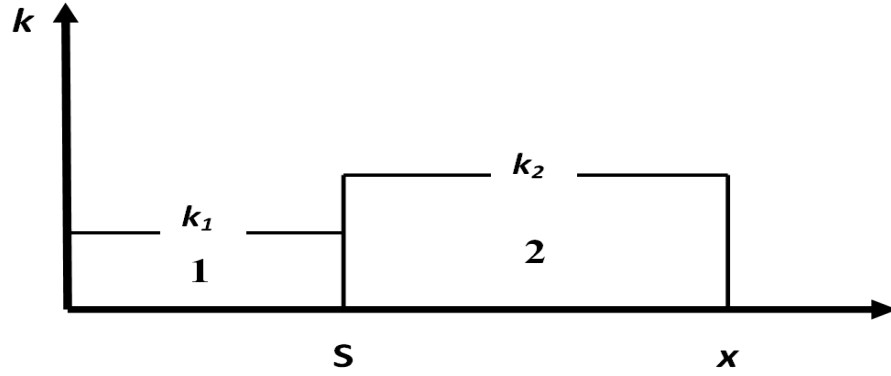
Şekil 4.5'te bu durum ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Bu yoğun akımın önündeki araçların hızı, belirli bir mesafe arkasındaki araçların hızlarıyla gösterilebilmektedir.



Şekil 4.5 Akımın artması durumunda oluşan dalga formları (Conway, 1963).

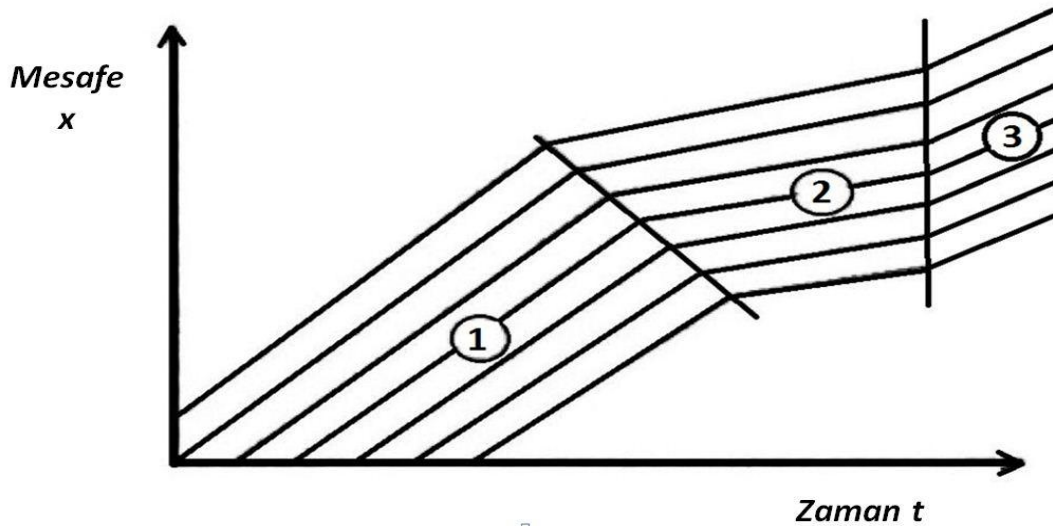
Lighthill ve Whitham (1955) mikroskobik akımın temelini bir kanal boyunca hareket eden bir akışkan olarak tanımlamışlardır. Lighthill ve Whitham (1955) yaptıkları çalışmada trafiği, kabul edilebilir kalabalık bir yol boyunca hareket eden ve bireysel taşıtlar arasında uygun aralıkların olmadığı bir yol olarak tanımlamışlardır. Bu durumda trafiğin sürekli hareket ettiği ve onun fiziksel karakteristiğinin bir akışkanın görüntü karakteristiğine karşılık geldiği kabul edilmiştir.

Bugüne kadar trafik analizleri ile yapılan çalışmaların en önemlilerinden birisini, akımın düzenli bir durumdan bir diğer duruma geçişi sırasındaki belirsizlik oluşturmaktadır. Trafik koşullarının  $k_1$  yoğunluğundan  $k_2$  yoğunluğuna (Şekil 4.6) ötelenerek değiştiği düşünülürse, öteleme S noktasında yer almaktadır.



Şekil 4.6 Bir yoğunluktan diğer yoğunluğa geçişteki ötelemenin şekilsel gösterimi (Gazis, 2002).

Bu öteleme genel olarak yol boyunca devam etmekte ve nasıl gerçekleştiği gözlem verileri yardımıyla araştırılmaktadır. Araçların deformasyon noktasından geçişlerine ait Trajectory (Konum-zaman) grafiği Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

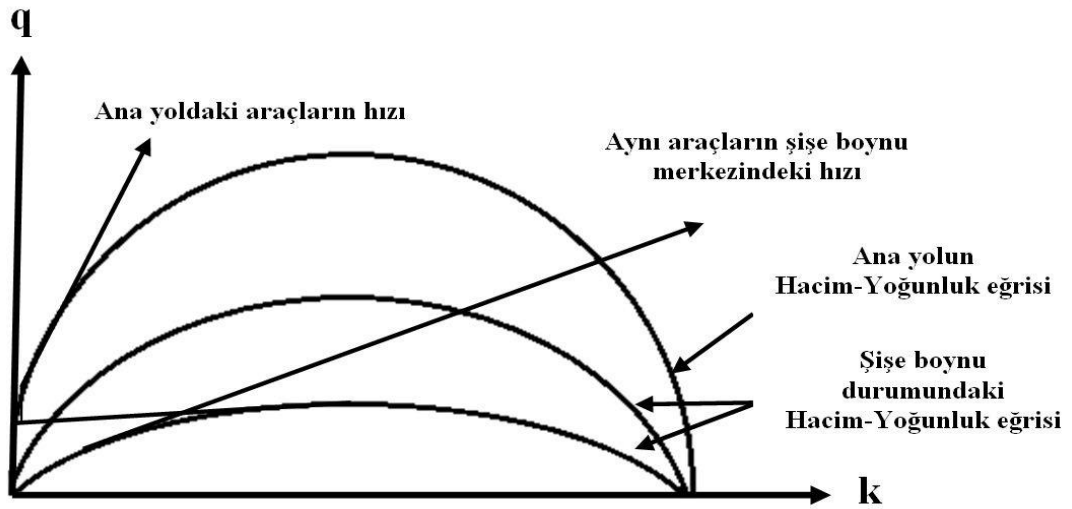


Şekil 4.7 Araçların deformasyon noktasından geçişlerine ait Trajectory (Konum-zaman) grafiği.

Mesafe-Zaman (trajectory) grafiğinden taşıtların yer değiştirmeleri, eğim  $u_1$ 'den eğim  $u_2$ 'ye oradan da eğim  $u_3$ 'e olan değişimle gösterilebilmektedir. Bu konum-zaman grafiğinden de şok dalgasının hızı, 1 bölgesinden 2 bölgesine geçerken oluşan çizginin eğimi ile ilişkili olmaktadır. Bu değer pozitif ise şok dalgası istasyon gözlemcisine göre ileriye doğru yayılarak hareket etmekte negatif ise şok dalgası geriye doğru dağılmaktadır.

## 4.2 Trafik Akımının Şişe Boynu Oluşması Durumundaki Davranışı

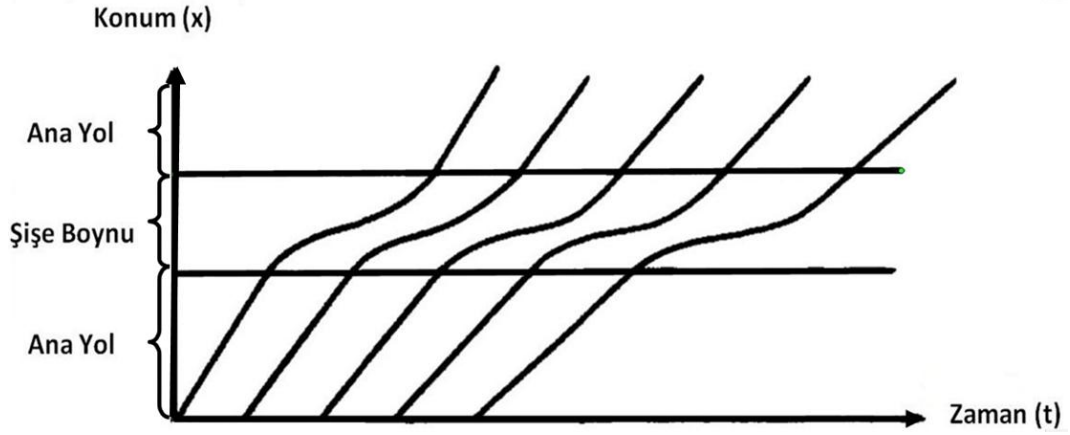
Bir trafik akımının, şişe boynu oluşması durumundaki davranışı hakkındaki çalışmalar, trafik analizlerinin önemli uygulamalarından birisi olmaktadır. Yol üzerinde şişe boynu oluşması, kapasitenin akımın öncesi ve sonrasındaki değerlerine göre daha düşük olduğu durumdur. Şekil 4.8 tıkanıklık durumundaki hacim-yoğunluk eğrisi üzerindeki değişik noktaları göstermektedir. Şekilde sol kısımda yer alan yatay çizgi akımın hızının aniden düşerek nasıl tıkanıklık oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.8 Hacim-Yoğunluk eğrisinin bir şişe boynu oluşması durumundaki değişimi (Conway, 1963).

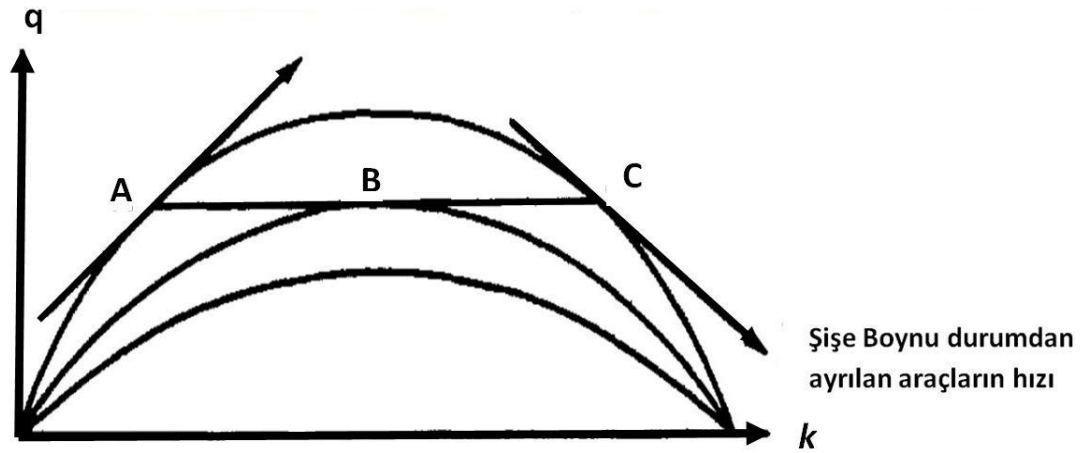
Şekil 4.9 ise akımda şok dalgalarının şişe boynu oluşması durumunda nasıl hareket ettiğini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere şişe boynuna yaklaşan akım, şişe boynu olan kesimden geçebileceğinden fazla bir değere sahipse bir yığılma görülmekte ve şişe boynundan sonraki kesimde bir yayılma görülmektedir.





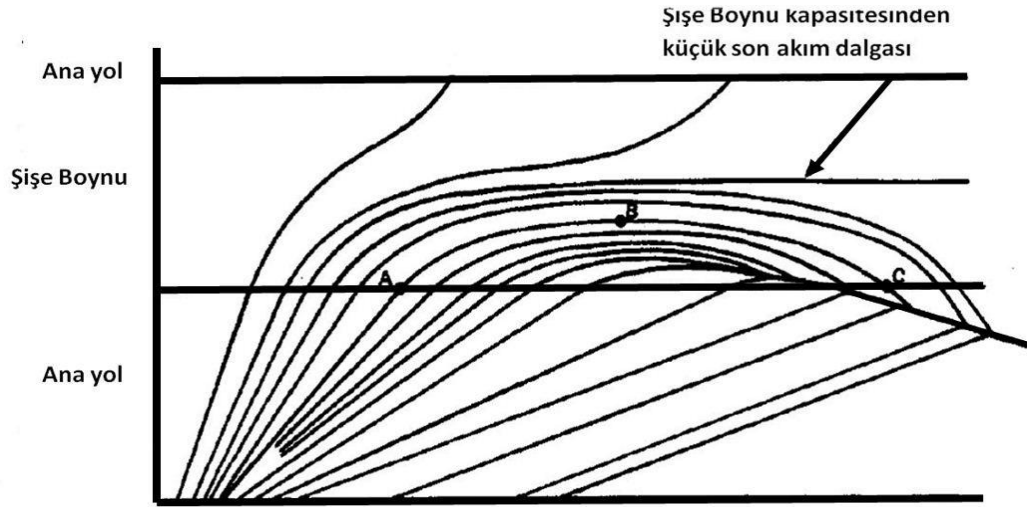
Şekil 4.9 Akımın şişe boynu olan kesimden önceki ve sonraki hareketlerinin şekilsel gösterimi (Conway, 1963).

Şekil 4.10'de yukarıda belirtilen durumlar açıkça gösterilmektedir. Şekilden şişe boynundan önceki akımda düşük hacim değerleri olduğu görülmekte ve böylece şişe boynu olan kesme yüksek hızlı araçlar geldiğinde mevcut hacim-yoğunluk ( $q-k$ ) eğrisinden daha az kapasiteye (maksimum akım) sahip akıma sıçrama olacaktır.



Şekil 4.10 Şekil 4.11'de görülen şişe boynu durumunda oluşan şok dalgasının hacim-yoğunluk eğrisi üzerindeki yansıması (Conway, 1963).

Şekil 4.11 hızdaki azalmadan kaynaklı olarak oluşmakta ve gelen akımın yoğunluğu artıka akımın hızları daha düşük olmaktadır. Sonuç olarak mevcut akım koşulları hacim-yoğunluk eğrisinin herhangi bir değerinden hızın şişe boynu olan durumdaki değerine ulaşırsa bu durum Şekil 4.12'deki yatay çizgi ile gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Yetersiz kapasiteye sahip olan şişe boynuna gelen akımın oluşturduğu şok dalgasının şekil üzerinde gösterimi (Conway, 1963).

Şekil 4.12’de akımın şişe boynu olan bölgeye girişi A noktası ile gösterilmektedir. Daha sonra hız değeri şişe boynu olan kesimde 0 değerini almakta ve B noktası ile gösterilmektedir. Daha sonra yoğunluğunun artması q-k eğrisinde bir negatif şok dalgası oluşmasını temsil etmekte ve oluşan şok dalgası, hızın negatif olmasından dolayı trafik akımına ters yönde olmaktadır. Araçlar şişe boynu olan kesimden ayrılırken mevcut akımın hızı C noktasında gösterilmektedir. Oluşan şok dalgası geriye doğru etkilemekte ve gelen akımla karşılaşmaktadır. Bu iki akım dalgasının kesişmesi ile oluşan şekil şok dalgasını temsil etmekte ve Şekil 4.12’de sağda yer alan kalın çizgi ile gösterilmektedir. Uzun süre gelen akımın kalıcı şişe boynu durumunun kapasite değerini aşması durumunda şok dalgasının hareketi ileriye doğru, gelen akımdan daha düşük bir akım değerine sahip olarak hareketine devam edecektir.

### 4.3 Deformasyon Etkisiyle Oluşan Şişeboynu Durumdaki Hızların Modellenmesi

Şişeboynu olarak adlandırılan yol kesimleri, yol kapasite değerlerinin değiştiği kesimlerdir. Şişeboynu oluşması durumunda yolun kapasitesi, şişeboynu kesitinden sonraki kesimde önceki kesime göre daha düşük olmaktadır. Düşük olan bu akım

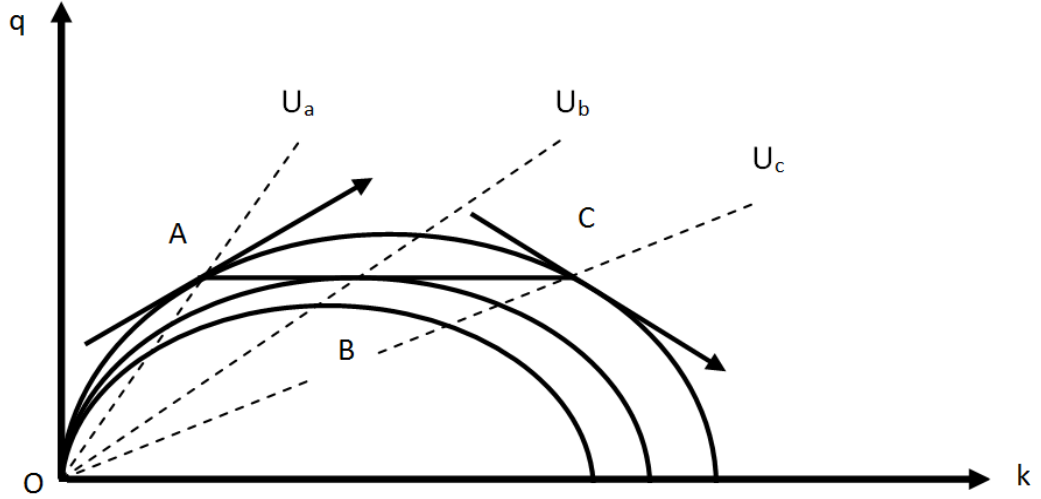
aşağı kısımların kapasitesi, şişboynu kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Şişboyunları genel olarak aşağıda belirtilen sebeplerden ortaya çıkmaktadır:

1. Herhangi bir yol üzerinde meydana gelen kazalar sebebiyle bir veya birkaç şeridin hizmet vermemesi,
2. Yolun bakım, onarım vb. sebeplerle daraltılması,
3. Yolun geometrisinde meydana gelen enkesit değişimleri,
4. Yol üzerinde mevcut olan deformasyonların etkisiyle, araçların şeridin belirli bir kısmını kullanamaması,
5. Doygun bir akımda, deformasyon etkisiyle o şeritteki araçların hızlarında meydana gelen düşüş.

Gelen akımın hacmi yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı oluşan şişboynunun kapasitesini aştığında, şişboynu kesimden akım yukarı yönde ilerleyen bir tıkanma oluşmaktadır. Bu durum gelen akımın hacminin şişboynunun hacminden daha büyük olması ile mümkün olmaktadır. Yukarıda belirtilen maddelerden ilk iki madde geçici bir durumu, son üç madde ise gerekli çalışma yapılmadığı durumda kalıcı bir durumu ifade etmektedir. Çalışma kapsamında yukarıda belirtilen son iki duruma ait şişboynu oluşumu incelenmiştir. Şekil 4.13'te şişboynu ve şişboynundan akım yukarı ve akım aşağı yönde iki kesim için Hacim-Yoğunluk eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerde A ve C noktaları sırasıyla şişboynu öncesi kesimi ve oluşan kuyruğu, B noktası ise şişboynunun merkez kesimini göstermektedir. Gelen akımın hacminin şişboynundan geçebilecek hacim değerinden büyük olması durumunda geriye doğru bir kuyruk oluşumu görülmekte ve araçlar bu kesitte durmak zorunda kalmaktadır. Bu izleyen akım dalgaları da akım yukarı yansımaktadır.

Mevcut akımda taşıtlar, şişboynu olan kesime O-A vektörünün eğimine eşit olan bir ( $u_a$ ) hızı ile yaklaşmaktadırlar. Taşıtlar şişboynu kesimine girdikleri anda hızları, O-B vektörünün eğimi ile verilen bir hıza ( $u_b$ )'ye düşmektedir. Akım dalgaları akım yukarı yansıdığı anda yansıma hızı, eğrinin C noktasındaki teğetin eğimine eşit olmaktadır. Yani akım dalgaları bu hız ile akım yukarı hareket etmektedir. Yansıyan

bu dalgalardan etkilenen taşıtların hızları, O-C vektörünün eğimine eşit bir hız değerine ( $u_c$ )'ye düşmektedir.



Şekil 4.13 Şişeboynu ve şişeboynundan akım yukarı ve akım aşağı yöndeki iki kesim için Hacim-Yoğunluk eğrileri.

#### 4.3.1 Şişeboynu Kesimler için Matematik Modeller

Yolların kapasitesinin hesaplanması, teori'de kolay anlaşılabilir olsa da kapasitenin hesaplanmasında farklı yöntemlerin kullanılıyor olması yanlış anlaşılmalara neden olabilmektedir. Temel olarak kapasitenin hesaplanmasında en genel olarak Denklem 29 kullanılmaktadır.

$$q = uk \Rightarrow u = \frac{q}{k} \text{ ve } k = \frac{q}{u} \quad (29)$$

Burada,  $q$ : hacim,  $u$ : hız ve  $k$ : yoğunluğu göstermektedir. Hacim-Yoğunluk eğrisinde yoğunluk=kontrol parametresi, hacim=amaç fonksiyonu olmaktadır. Kapasite teorisine göre Hacim-Yoğunluk eğrisinin geçerli olabilmesi için konkav bir eğrinin görülmesi gerekmektedir. Bu yüzden Denklem 30'da verilen denkleme ait katsayıların belirtilen konkav durum şartı için gerekli işaretlere sahip olması, dolayısıyla 2. Dereceden polinom denklemin Denklem 30'da verilen şekilde yazılması gerekmektedir.

$$q = -\beta_0 + \beta_1 k - \beta_2 k^2 \quad (30)$$

Burada,  $\beta_0$  bir sabit değer,  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  katsayı değerleridir.  $\beta_0$ , yolun yoğunluğunu,  $\beta_1 k$ ,  $\beta_2 k^2$ 'nin yolun hacmini tanımladığı durum için yolun hızını tanımlamaktadır. Eğer hız ve yoğunluk denklemi  $u = \beta_1 - \beta_2 k$  Denklem 29'da yerine konulursa, elde edilen 2. Dereceden polinom denklem yol kapasitesinin hesaplanmasında kullanılabilir.

$$q = \beta_1 k - \beta_2 k^2 \quad (31)$$

Denklem 29'un Denklem 30'a eşit olduğu kabul edilirse, sabit değer olan  $\beta_0 = 0$  olmaktadır. Bu durumda maksimum yoğunluğa ulaşıldığında, hacim değerinin 0, yani tıkanıklık olduğu durumla açıklanabilmektedir.

$$\beta_2 = \frac{\beta_1}{k_j} \Rightarrow u = \beta_1 - \frac{\beta_1}{k_j} k \quad (32)$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} = \beta_1 - 2 \left( \frac{\beta_1}{k_j} \right) k \quad (33)$$

$$\Rightarrow \text{Kritik yoğunluk, } k_c : \quad k_c = \frac{\beta_1}{2 \left( \frac{\beta_1}{k_j} \right)} \quad (34)$$

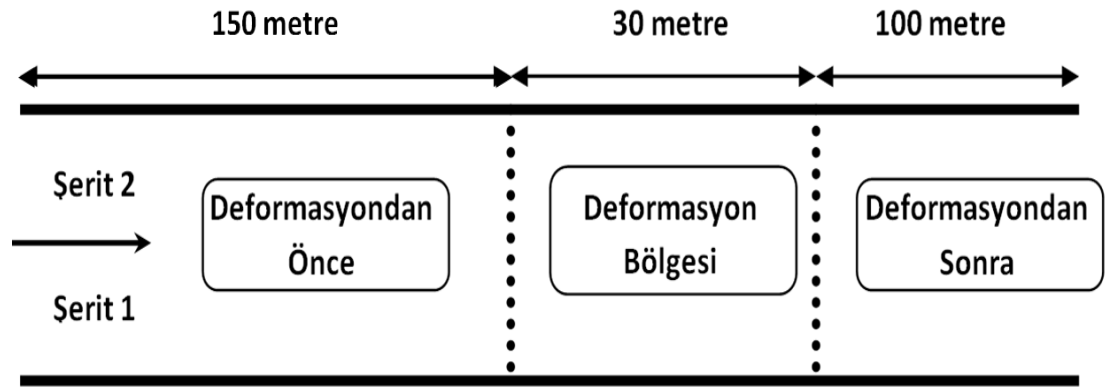
$$\Rightarrow \text{Hız, } u: \quad u = \beta_1 - \frac{\beta_1}{k_j} \left( \frac{\beta_1}{2 \left( \frac{\beta_1}{k_j} \right)} \right) \quad (35)$$

$$\Rightarrow \text{Kapasite, } q: \quad q = \beta_1 k - \frac{\beta_1}{k_j} \left( \frac{\beta_1}{2 \left( \frac{\beta_1}{k_j} \right)} \right)^2 \quad (36)$$

Elde edilen hız, yoğunluk ve hacim bağıntıları kullanılarak deformasyonlu yollardaki hız, hacim ve kritik yoğunluk değerleri hesaplanabilmektedir. Bağıntılar

kullanılarak her bir şerit için hesaplanan bu 3 değerin literatürde de belirtildiği gibi farklı olması beklenmektedir.

Çalışma kapsamında deformasyonlu yollarda oluşacak şişboynu kesimde araçların şişboynundan önceki, şişboynunun merkezindeki ve geriye doğru yansıyan akımın hızı (kuyruk hızı) belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla farklı deformasyon karakteristiklerine sahip 2 şeritli 3 farklı deformasyon bölgesi incelenmiştir. İncelenen deformasyon bölgeleri 3 farklı kesime ayrılmıştır. (Şekil 4.14)



Şekil 4.14 Şişboynu ve şişboynundan akım yukarı ve akım aşağı yöndeki iki kesim için Hacim-Yoğunluk eğrileri.

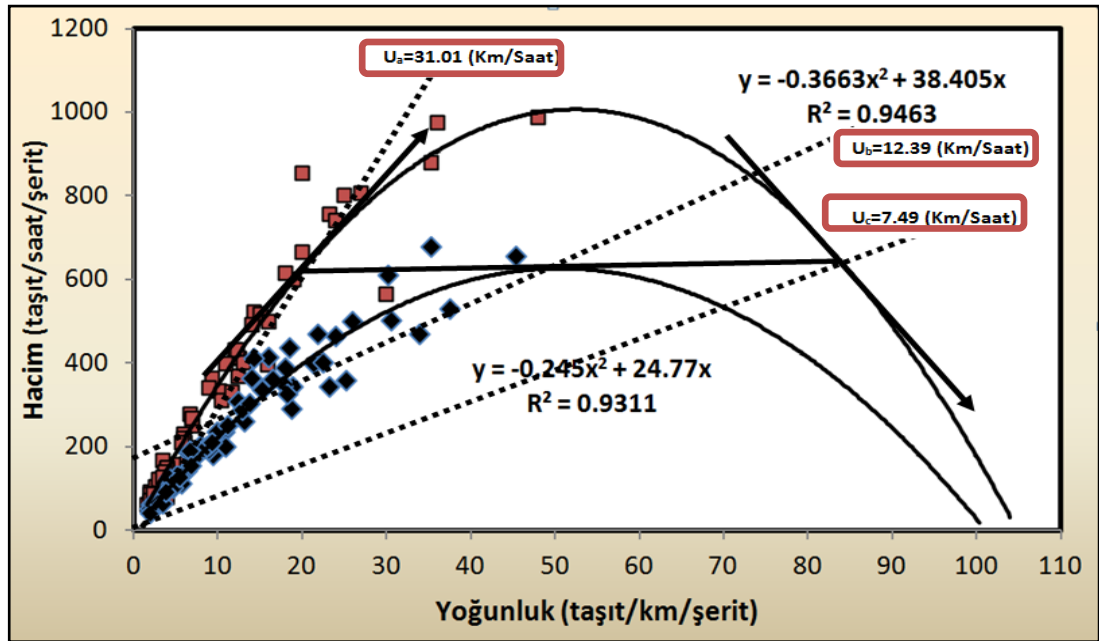
Çalışma kapsamında deformasyon bölgesinden önceki ve deformasyon bölgesine ait hız ve hacim verileri toplanmıştır. Yol kapasitelerinin ve şişboynu daralmaları sonucu oluşan akım özellikleri aşağıda belirtilen adımlar yürütülerek elde edilmiştir.

- Adım 1 Taşıtların hızları ve bunlara ait istatistiksel verilerin elde edilmesi
- Adım 2 Hız/Hacim bağıntılarından yoğunlukların elde edilmesi
- Adım 3 Hız/yoğunluk doğrusal denkleminden Hacim/Yoğunluk denklemlerinin elde edilmesi
- Adım 4 Hacim/Yoğunluk model katsayılarının Hacim/Yoğunluk bağıntıları kullanılarak belirlenmesi
- Adım 5 Model denklemlerinin elde edilmesi
- Adım 6 Kritik yoğunlukların hesaplanması

Adım 7 Yol kapasitelerinin belirlenmesi

Adım 8 Şişeboynundan önceki ( $u_a$ ), şişeboynu durumdaki ( $u_b$ ), ve şişeboynunun arkasındaki kuyruğun ( $u_c$ ), hızlarının elde edilmesi.

Yukarıda belirtilen hız değerlerinin hesaplanmasına örnek olarak deformasyon bölgesi 1'e ait Hacim-Yoğunluk eğrisi incelenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Şişeboynu durumunun DN-1 ve öncesinde sağ şeride ait hacim-yoğunluk grafiği üzerinde gösterimi

Üç deformasyon bölgesindeki her bir şerit için araçların deformasyon bölgesinden önceki hızları ( $u_a$ ), deformasyon bölgesinin merkezindeki hızı ( $u_b$ ) ve deformasyon etkisiyle geriye doğru yansıyan akımın hızı ( $u_c$ )'ye ait Hacim-Yoğunluk eğrileri de çizilmiş ve elde edilen model denklemleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Hızların hesaplanması için önerilen model denklemleri kullanılarak hesaplanabilecek kapasite değerlerine ait model denklemleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1 İncelenen üç farklı DB için şişeyoynu oluşumdan önceki, şişeyoynu merkezindeki ve oluşan kuyruktaki araçlara ait hızların hesaplanması için önerilen model denklemleri.

Def. Nokta No	Şerit	$k_a$ (taşıt/km)	$k_c$ (taşıt/km)	$u_{a,c}$ (km/saat)	$u_b$ (km/saat)
1	Sağ	20	85	$-0,3663k_{a,c} + 38,405$	$-0,245k_b + 24,77$
	Sol	28	136	$-0,2109k_{a,c} + 34,687$	$-0,3255k_b + 32,481$
2	Sağ	58	11	$-0,7896k_{a,c} + 55,075$	$-0,5278k_b + 33,299$
	Sol	46	21	$-0,9554k_{a,c} + 64,252$	$-0,7098k_b + 51,177$
3	Sağ	32	108	$-0,3025k_{a,c} + 42,198$	$-0,3508k_b + 37,979$
	Sol	73	36	$-0,3737k_{a,c} + 40,683$	$-0,3033k_b + 34,361$

Tablo 4.2 Hızların hesaplanması için önerilen model denklemleri kullanılarak hesaplanabilecek kapasite değerlerine ait model denklemleri.

Def. Nokta No	Şerit	$q_{a,c}$ (taşıt/saat)	$q_b$ (taşıt/saat)
1	Sağ	$\frac{38,405u_{a,c} - u_{a,c}^2}{0,3663}$	$\frac{24,77u_b - u_b^2}{0,245}$
	Sol	$\frac{34,687u_{a,c} - u_{a,c}^2}{0,2109}$	$\frac{32,481u_b - u_b^2}{0,3255}$
2	Sağ	$\frac{55,075u_{a,c} - u_{a,c}^2}{0,7896}$	$\frac{33,299u_b - u_b^2}{0,5278}$
	Sol	$\frac{64,252u_{a,c} - u_{a,c}^2}{0,9554}$	$\frac{51,177u_b - uu_b^2}{0,7098}$
3	Sağ	$\frac{42,198u_{a,c} - u_{a,c}^2}{0,3025}$	$\frac{37,979u_b - u_b^2}{0,3508}$
	Sol	$\frac{40,683u_{a,c} - u_{a,c}^2}{0,3737}$	$\frac{34,361u_b - u_b^2}{0,3033}$

Önerilen model denklemleri ve elde edilen yoğunluk ( $k$ ) değerleri kullanılarak her bir deformasyon bölgesi ve şerit için araçların  $u_a$ ,  $u_b$  ve  $u_c$  hızları hesaplanmıştır. Elde edilen hız değerleri ise Tablo 4.3'te verilmiştir.



Tablo 4.3 Şişeboynu oluşumundan önceki, şişeboynu merkezindeki ve oluşan kuyruktaki araçların hızları.

Def. Nokta No	Şerit	Konum	Def. Bul. Şerit	$u_a$ km/saat	$u_b$ km/saat	$u_c$ km/saat
1	Sağ	D.Önce		31.01	12.39	7.49
		D. Nok.				
	Sol	D.Önce	X	28.74	18.45	5.94
		D. Nok.				
2	Sağ	D.Önce	X	46.07	16.65	9
		D. Nok.				
	Sol	D.Önce		44.41	25.59	19.9
		D. Nok.				
3	Sağ	D.Önce	X	32.68	18.99	9.51
		D. Nok.				
	Sol	D.Önce	X	27.42	12.11	17.18
		D. Nok.				

Tablo 4.3 incelendiğinde DB-1 sağ şeritteki araçların geliş hızlarının, sol şeritteki araçların geliş hızlarından daha büyük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Burada etkili olan faktörlerin başında deformasyonun sol şeritte yer alması sonucu bu şeritte hareket eden aracın, öndeki araçların deformasyon etkisiyle hızlarını azaltmaları sonucu aynı davranışı göstermesidir. DB-2 incelendiğinde ise her ne kadar deformasyon sağ şeritte olsa da, araçların geliş hızlarını pek fazla etkilemediği görülmektedir. Burada ana sebep olarak deformasyonun yarattığı etkinin küçük olduğu gösterilebilmektedir. DB-3 sağ şeritte araçların hızlı geçişine imkan veren parçalı hız kesme tümseğinin bulunması sebebiyle, bu şeritteki araçların deformasyondan önceki hızlarının daha büyük bir değer aldığı görülmektedir.

Tablo 4.3'te verilen  $u_c$  hızları incelendiğinde, deformasyon bulunan şeritlerde şişeboynu etkisiyle oluşacak kuyruğun hızının, deformasyon bulunmayan şeritteki kuyruk hızından daha düşük bir değere sahip olduğu görülmüştür. DB-3 sağ şeritte bulunan deformasyonun hızlı geçişe imkan vermesi sebebiyle, gelen araçların hemen hemen tümü bu şeridi kullanmakta ve dolayısıyla bu şeritte beklenenin tersi bir durum gözlenmektedir.

Çalışma kapsamında 3 farklı deformasyon bölgesi için de elde edilen Hacim-Yoğunluk grafikleri kullanılarak her bir şerit için deformasyondan önce ve deformasyon olan kesimdeki kapasite değerleri hesaplanmış ve kapasite kaybı her bir şerit için % cinsinden elde edilmiştir. Ayrıca her bir şerit için kritik yoğunluk ( $k_{crt}$ ) değerleri hesaplanarak optimum hız ( $u_0$ ) değerleri de elde edilmiştir. DB-1 sağ şerit için yapılan hesaplama, örnek olarak aşağıda verilmiştir.

**Deformasyondan Önce:**

$$q_A = -0,3663k^2 + 38,405k$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} = 2(-0,3663) + 38,405 = 0$$

$$k_{crt} = 52 \text{ taşıt/km}$$

$$q_A = -0,3663(52)^2 + 38,405(52)$$

$$q_A = 1006 \text{ taşıt/saat}$$

$$u_0 \approx 19 \text{ km/saat}$$

**Deformasyon Bölgesi:**

$$q_B = -0,245k^2 + 24,77k$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} = 2(-0,245) + 24,77 = 0$$

$$k_{crt} = 51 \text{ taşıt/km}$$

$$q_B = -0,245(51)^2 + 24,77(51)$$

$$q_A = 626 \text{ taşıt/saat}$$

$$u_0 \approx 12 \text{ km/saat}$$

Elde edilen optimum hızlar, hesaplanan kapasite değerlerinden türetilmiştir. Her bir şerit için hesaplanan kapasite değerleri mevcut yol kesimine hız, hacim ve

yoğunluk arasındaki ilişkiye göre farklılık göstermektedir. Hesaplanan değerlere ait özet bilgiler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 İncelenen üç farklı deformasyon bölgesinde deformasyon etkisiyle meydana gelen kapasite kayıplarının hesaplanması.

Def. Nokta No	Şerit	Def. Bul. Şerit	Kapasite (Q) (taşıt/saat)	Opt. Hız ( $u_0$ ) (km/saat)	Kritik Y. ( $k_{crt}$ ) (taşıt/km)	$Q_{kayıp}$ %
1	Sağ	-	1006	19,3	52	37,8
			626	12,3	51	
	Sol	Kabarma	1426	17,4	82	43,2
			810	16,2	50	
2	Sağ	Soğuk derz çatlağı, çökme ve timsah sırtı çatlak	960	27,4	35	45,3
			525	16,4	32	
	Sol	-	1080	31,8	34	14,5
			923	25,6	36	
3	Sağ	Hızlı geçişe imkân veren parçalı hız kesme tümseği	1472	21	70	30,2
			1028	18,7	55	
	Sol	Hız kesme tümseği	1107	20,1	55	12,1
			973	17	57	

Tablo 4.4 incelendiğinde, deformasyon hangi şeritte olursa olsun deformasyon etkisiyle oluşan kapasite kaybının tüm şeritlerde mevcut olduğu görülmektedir. Yapılan analizlerden % cinsinden en büyük kapasite kaybının DB-2 sağ şeritte olduğu görülmektedir. DB-1 sol şeritte görülen % cinsinden kapasite kaybının hemen hemen DB-2 sağ şeritteki eşit olduğu görülmektedir.

DB-3'te oluşan kapasite kayıpları incelendiğinde en büyük kapasite kaybının DB-3 sağ şeritte olduğu görülmektedir. Her ne kadar buradaki deformasyon araçların hızlı geçişine imkan veriyor olsa da gelen araçların büyük çoğunluğunun tümseğin araç mekanik aksanına zarar vermesinden kaçınmak için bu şeridi tercih etmeleri sebebiyle kuyruk oluşmaktadır. Oluşan kuyruk sebebiyle araçların hızlarında meydana gelen azalmaya bağlı olarak kapasite de büyük bir azalma görülmektedir.

## **BÖLÜM BEŞ**

### **DEFORMASYONLARIN ŞERİT KULLANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

#### **5.1 Yol Yüzey Bozuklukları**

Bozulma, bir yol kaplamasının ilk yapıldığı duruma göre hizmet süresi boyunca gösterdiği her türlü değişimdir. Üst yapı bozulmaları, yol trafiğe açıldıktan sonra tabii zemin üzerinde ek sıkışma ya da hareket şeklinde görülen zayıflık veya üstyapı tabakalarında trafik yüklerinin etkisi ile meydana gelen ek sıkışmanın sonucudur. Bu duruma bazen çatlaklarda eşlik etmekte, şekil değiştirme ve çatlaklar trafik akımı için tehlike oluşturmaktadır. Bozulmalar, yol yüzeyindeki konumu ve büyüklüğüne göre bir yolun servis yeteneğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Kaplamalarda meydana gelen bozulmalarla ilgili çeşitli sınıflandırmalar vardır. Bu sınıflandırmalardan Brown, R., Kandhal, P. ve Zhang, J. (2001) bozulmaları genel olarak 3 bölümde incelemiştir.

1. Kalıcı deformasyon
  - Tekerlek izi oluşumu
  - Ondülasyon ve çökmeler
  - Kabarmalar
  - Yığılmalar
2. Çatlaklar
  - Yorulma çatlakları
  - Düşük sıcaklık çatlakları
3. Suyu bağı bozulmalar

### 5.1.1 Kalıcı deformasyon

#### 5.1.1.1 Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izi oluşumu ya da oluklanma, asfalt kaplamaların yoğun olarak tekerlek geçen kısımlarında ve genellikle ağır araç etkisindeki sağ şeritte oluşan kalıcı deformasyonlardır. Tekerlek izi, kaplamaya etkileyen trafik yüklerinden dolayı bir veya birden fazla üstyapı tabakasının yanal hareketi veya şekil değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu tip deformasyonlar özellikle arızalı araziye sahip, trafik yoğunluğunun fazla olduğu sıcak ülkelerde sıkça rastlanan bir sorundur.



Şekil 5.1 Tekerlek izi oluşumu (İzmir çevreyolu Buca girişi).

#### 5.1.1.2 Ondülasyon ve Çökmeler

Kıvrımlanma olarak adlandırılan ondülasyon ve çökme, kaplamalar üzerinde dalgalanmalar halinde görülen bir plastik hareket şeklidir. Çökme ise, yerel bir plastik hareket biçimi olup kaplama yüzeyinin ötelenmesini de içermektedir. Bu tip bozulmalar aşırı miktarda asfalt, ince agrega, uygun olmayan gradasyon ve yuvarlak ya da düzgün dokuya sahip olmayan, dayanım açısından zayıf asfalt kaplama karışımlarında görülmektedir.



Şekil 5.2 Ondülasyon ve çökme oluşumu (İzmir çevreyolu Buca girişi).

#### 5.1.1.3 Kabarmalar

Kabarma, tabii zemin veya üstyapının bir kısmının çeşitli faktörler etkisi ile şişmesi ve bunun sonucunda yukarı yönde hareket ederek kaplamanın yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı durum, donma-çözünme etkisiyle hacim artışı gösteren bazı zeminlerde su içeriğinden de kaynaklanabilmektedir.



Şekil 5.3 Kabarma oluşumu (DEU Tınaztepe kampüs içi yol).

#### 5.1.1.4 Yiğilmalar

Yiğilma çatlakları yol yüzeyinde tekerlerin etkidiği doğrultuda ve yarım ay şeklinde oluşan çatlaklardır.

#### 5.1.2 Çatlaklar

##### 5.1.2.1 Yorulma Çatlakları

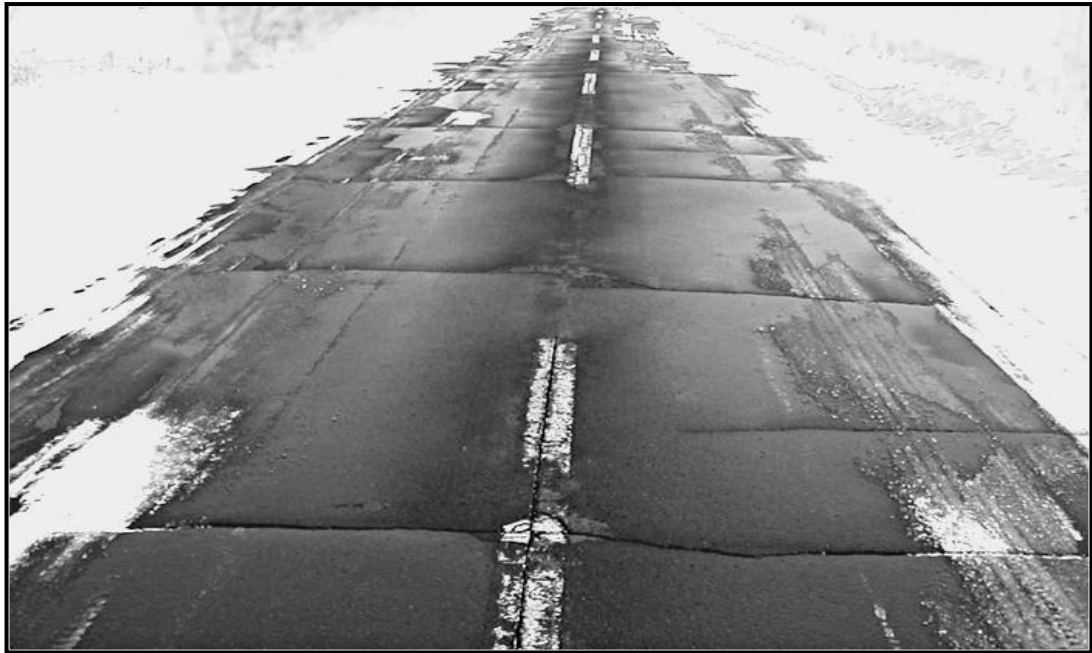
Timsah sırtı veya kümes teli olarak adlandırılan yorulma çatlakları, değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın belirli bir kısmında ya da daha geniş alanlarda oluşmaktadır. Bu tür bozulmaların en önemli sebebi, kaplama altında yapısal olarak yetersiz bozuk bir granüler temel ya da zayıf bir tabii bulunmasıdır. Oturma veya yorulma mukavemetinin aşılması sonucunda oluşan bu çatlaklar, öncelikle kılcal çatlaklar biçiminde yol eksenini boyunca düzensiz bir şekilde oluşmakta, trafiğin etkisi ile enine çatlaklarla birleşerek giderek büyümekte ve timsah sırtı görünümünü almaktadır.



Şekil 5.4 Yorulma çatlağı (DEÜ Kampüs içi yolu).

### 5.1.2.2 Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, soğuk havalarda bitümlü tabakaların büzülmesi ile oluşmaktadır. Dolayısıyla bu tip çatlakların diğer çatlaklara kıyasla oluşum mekanizması trafik etkilerinden kaynaklanmayıp, iklim ve çevre faktörlerine bağlıdır. Düşük sıcaklık altında oluşan çekme gerilmeleri, bitümlü kaplamanın çekme mukavemetini aştığında bu tip çatlaklar oluşmaktadır. Özellikle yaşlanmış bitümlü kaplamalar, bu tip çatlakların oluşmasına yatkındır. Çatlakların genel özelliği enine yönde ve yukarıdan aşağı doğru olmasıdır (Zeng, 1995).



Şekil 5.5 Düşük sıcaklık çatlakları (<http://www.pwri.go.jp/eng/webmag/wm022/seika.html>).

### 5.1.3 Suya Bağlı Bozulmalar

Agrega ve bitümlü bağlayıcıdan oluşan esnek yol üst yapılarında karşılaşılan sorunların arasında suya bağlı bozulmalar önemli bir yer tutmaktadır. Bu tip bozulmalar, kaplama tabakasının altında veya su içeriğinin daha fazla olduğu aşınma ve binder tabakalarının arasında başlamakta ve yol yüzeyinde derin çukurlar, yorulma çatlakları ve agrega danelerinin yol yüzeyinden ayrılması şeklinde görülmektedir (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7).





Şekil 5.6 Suya bağlı bozulma etkisi ile yol yüzeyinde çukur oluşumu (Alanya-Dim barajı yolu).



Şekil 5.7 Suya bağlı bozulma etkisi ile agrega danelerinin yol yüzeyinden ayrılması (Sivas-Erzincan yolu)

## 5.2 Çok Şeritli ve Deformasyonlu Yollarda Araçların Şerit Üzerindeki Yanal Konumlarının İncelenmesi

Yol yüzey karakteristiklerinin trafik akımı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yolların inşasından sonra yüzey karakteristiklerinin genel olarak şerit boyunca uniform şekilde dağıldığı kabulü yapılmaktadır. Fakat bir yol trafiğe

açıldıktan belirli bir süre sonra yol yüzeyinde farklı türde bozulmalar meydana gelmeye başlamaktadır. Bu bozulmalar özellikle araçların daha fazla kullandıkları yol kesimlerinde görülmektedir. Bunun başlıca nedeni, yolun bu kesimini kullanan araç sayısına bağlı olarak etkiyen dingil yüklerinin artışıdır. Yol yapımında kullanılan bitümlü malzemenin özelliklerine, trafik hacmine, çevre koşullarına ve tabii zemin taşıma gücüne bağlı olarak yol yüzeyindeki deformasyon oluşumları değişiklik göstermektedir. Yol yüzeyinde zaman içinde aşınmalara bağlı olarak meydana gelen sürtünme direncindeki azalma ve/veya oluşan deformasyonlar, o yolun bakım onarım sıklığı ve maliyeti açısından büyük önem teşkil etmektedir.

İdeal olarak bir şerit üzerinde araçların yanal yöndeki dağılımlarının etkisinin yol boyunca eşit şekilde olacağı ve kaplama yüzeyinin her bir parçasının eşit sürede aşınacağı varsayılmaktadır. Fakat gerçekte araçların yol üzerindeki dağılımları uniform değildir. İngiltere, Almanya ve Belçika'da yapılan çalışmalarda, düz kesitli yollar için taşıtların şerit üzerindeki yanal konumlarına ait frekans dağılımlarının normal dağılıma uyduğu belirtilmektedir (Günay ve Woddward, 2006).

Yol tasarımında şerit genişlikleri, tasarım hızı, çevre etkisi ve hizmet düzeyi gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Highway Capacity Manual (HCM) 2010'da şerit genişliklerinin normal koşullarda 3-6 m arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca HCM'de yukarıda belirtilen yol karakteristiklerine bağlı olarak verilen yol genişliklerinin bu değerlerin altında ve üstünde değerler alabileceği de belirtilmiştir.

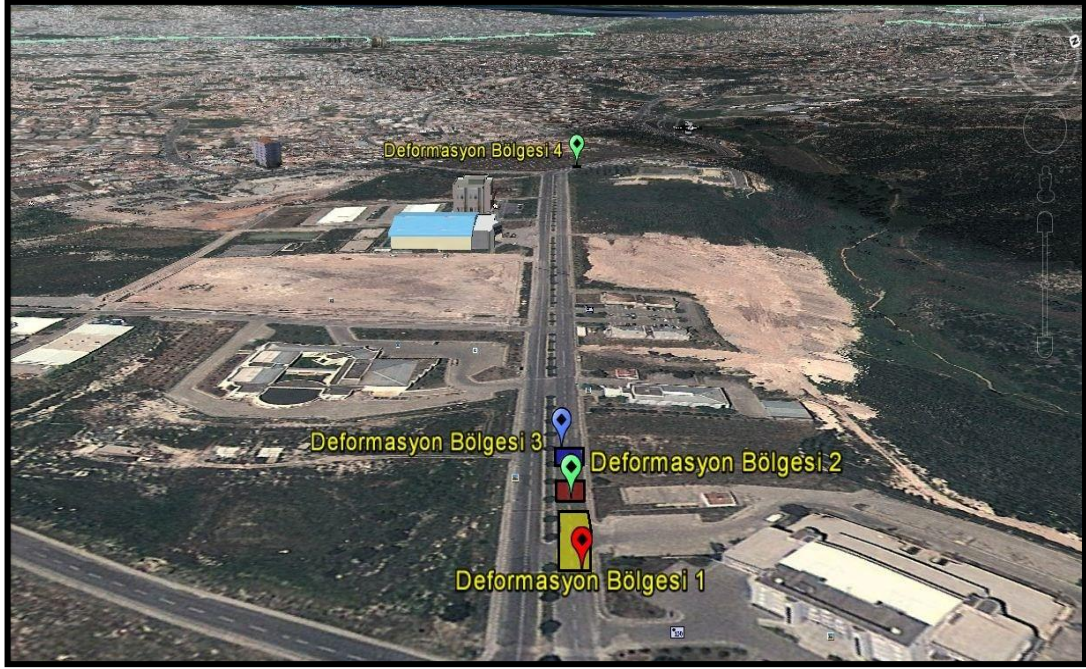
Mevcut bir yolda taşıt genişlikleri ise şartnamelerde belirtilen şerit genişliklerinden daha düşük değerler almakta ve bu da araçların bir şerit üzerinde yanal yönde belirli bir hareket serbestliğine sahip olduklarını göstermektedir. Bu serbestlik, tasarım hızının artmasıyla birlikte daha da artmakta şerit genişliğinin azalması durumunda azalmaktadır.

### 5.3 Verilerin Toplanması ve Analizi

Çalışma kapsamında araçların yol üzerinde yanal yöndeki konumlarına ait veriler toplanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, Dokuz Eylül Üniversitesi ana kampüsü olan Tınaztepe kampüsünden 2012 Mart ve Nisan aylarında farklı akım durumları için 30 dakikalık gözlemler halinde, hava koşullarının iyi olduğu 4 farklı günde video çekimleri yapılmıştır. Verilerin Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Yerleşkesindeki yollardan elde edilmesinin amacı, yerleşke içerisindeki ana arterlerdeki yollarda mevcut trafiğin yoğun olması, yerleşke içi ulaşımı sağlayan otobüs vb. ağır araçlar ve kampüsün çeşitli noktalarında devam eden inşaat çalışmalarından dolayı ağır araç etkisinin yol kaplama yüzeyinde belirgin olması ve kısa sürede daha fazla veri toplayabilmektir.

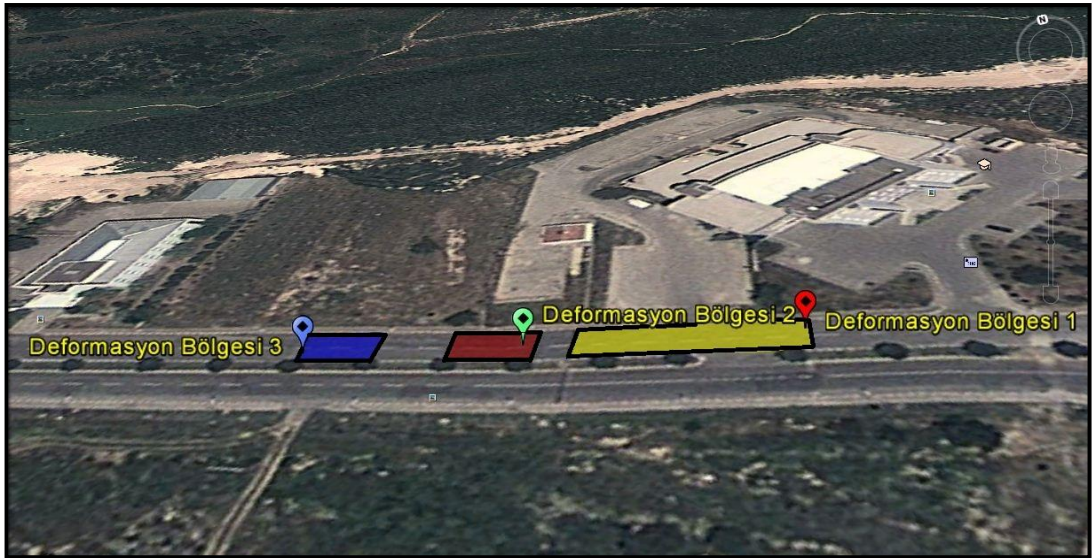
Verilerin toplandığı mevcut ana arterin en önemli özelliklerinden birisi de yol kenarında herhangi bir parklanmanın olmaması ve akımın sinyal, kavşak vb. etkilerden dolayı kesintiye uğramamasıdır. Video çekimi yapılan alanlarda trafik akımı dijital HD kamera vasıtasıyla kaydedilmiş, şerit genişlikleri ve yol üzerindeki deformasyon noktalarına ait uzunluklar trafiğin az olduğu saatlerde çelik şerit metre yardımıyla ölçülmüştür. Çekim esnasında kullanılan dijital kameralar, yolu karşıdan görecekle ve sürücülerin fark etmeyeceği yerlere yerleştirilmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi amacıyla yerleşke içerisinde ana arter üzerinde yer alan 4 farklı deformasyon bölgesi seçilmiş ve veriler bu bölgelerden elde edilmiştir. Kullanılan bu 4 farklı deformasyon bölgesinden, deformasyon bölgesi 1, 2, 3 (DB-1, DB-2, DB-3) ağır araç etkisiyle oluşmuştur. Deformasyon bölgesi 4 (DB-4) ise araçların mevcut yol kesitinden geçerken hızlarını azaltmaları amacıyla yola yerleştirilen hız kesicinin belirli süre sonra bir kısmının aşınması şeklinde oluşmuş, oluşan bu yapay deformasyonda da yol üzerinde deformasyon bulunması durumundakine benzer taşıt hareketleri gözlenmiştir. Belirlenen bu deformasyon bölgelerinin kampüs üzerindeki konumları Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Seçilen deformasyon bölgelerinin kampüs içerisinde ana arterler üzerindeki konumu.

Seçilen deformasyon bölgeleri kendi içerisinde alt deformasyon noktalarına ayrılmış ve veriler bu deformasyon noktalarını kapsayan deformasyon bölgeleri için elde edilmiştir. Deformasyon noktalarından, şerit üzerinde aynı konumda fakat farklı yerlerde yer alanlar aynı deformasyon bölgesinde gösterilmiştir. DB-1, DB-2 ve DB-3 Şekil 5.9’da, DB-4 ise Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Deformasyon bölgesi 1, 2 ve 3.’e ait uydu görüntüsü.



Şekil 5.10 Deformasyon bölgesi 4'e ait uydu görüntüsü.

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterilen deformasyon bölgeleri içerisinde yer alan deformasyon noktalarına ait özellikler ve bu deformasyon noktalarının yol üzerinde hangi metreler arasında yer aldığını gösteren konum değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Deformasyon bölgeleri ve bunların kapsadığı deformasyon noktalarının özellikleri.

Def. Bölgesi	Def. Noktası	Deformasyon Noktası			Yol Genişliği (m)	Yol Üzerindeki Konumu (m)	Deformasyon Türü
		Genişlik (m)	Uzunluk (m)	Derinlik (cm)			
1	a	2	1.8	6.5	9.6	(3.6-5.6)	Çökme ve timsah sırtı çatlak
	b	1.6	2	6.5	9.6	(3.9-5.5)	Çökme ve Timsah sırtı çatlak
2	a	1.45	2	6	9.6	(1-2.45)	Çökme ve Timsah sırtı çatlak
	b	2	1.5	6.7	9.6	(1-3)	Soğuk derz çatlağı, çökme ve timsah sırtı çatlak
	c	0.97	2.57	3.5	9.6	(0.9-1.87)	Sökülme ve Ayırışma
3	a	3	3.1	9	9.6	(0-3)	İleri düzeyde timsah sırtı çatlak ve sökülme
4	a	0.3	(0.6) – (5)	3.5	9.6	(1.9-2.5) (1.9-6.9)	Beton yama ve sağ şeritte hızlı geçişe imkan veren parçalı hız kesme tümseği

Yukarıda özellikleri verilmiş olan deformasyon bölgelerine ait deformasyon noktalarının yol üzerindeki konumları, yanal yönde şerit kullanımı üzerindeki en önemli parametre olmaktadır. Bu deformasyon bölgelerinden geçen her bir aracın yol üzerindeki konumu MB-Ruler bilgisayar programı yardımıyla ekran ölçeklendirmesi yapılarak belirlenmiştir (Şekil 5.11). Ölçüm yapılırken program yardımıyla ekran 20 cm'lik mesafelere ayrılmış ve her bir aracın ölçüklere ayrılan bu yol üzerindeki konumları elde edilmiştir.



Şekil 5.11 MB-Ruler programı yardımıyla ekran ölçekleme tekniğinin uygulanması.

Çalışma kapsamında toplam 697 araç başarılı bir şekilde gözlenebilmiş, 170 araç ise öndeki aracın örtmesi sonucu ilgi bölgesindeki araçların teker konumlarının belirlenememesi nedeni ile değerlendirmeye alınmamıştır. Ekran ölçekleme tekniği kullanılarak belirlenen her bir aracın yol üzerindeki yanal konumu ve araç türlerine bağlı olarak deformasyonlu bölgelerden geçen araçlara ait ortalama dingil uzunlukları, analizler de kullanılan yola ait şerit genişliği, toplam incelenen ve incelenemeyen araç sayısı ve ortalama dingil uzunlukları Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan veriler.

Deformasyon Bölgesi	Şerit	Şerit Genişliği (cm)	Araçların Ortalama Dingil Uzunluğu (cm)	Gözlenen Araç Sayısı ve Cinsi				Gözlenemeyen Araç Sayısı
				<i>Otomobil</i>	<i>Minibüs</i>	<i>Otobüs</i>	<i>Kamyon</i>	
1	Sağ	460	177,51	71	7	1	0	17
	Sol	500	178,55	93	5	0	0	18
2	Sağ	460	181,36	65	4	2	0	4
	Sol	500	177,30	104	8	0	0	9
3	Sağ	460	174,63	48	4	1	0	5
	Sol	500	173,96	79	4	0	1	18
4	Sağ	460	161,18	145	5	4	0	86
	Sol	500	167,60	44	1	1	0	13



## 5.4 Bulgular

Tez çalışması kapsamında her bir deformasyon bölgesi için taşıtların yanal yöndeki konumları elde edilmiş ve çizelgelere kaydedilmiştir. Belirlenen deformasyon bölgelerinden geçen araçların yanal yöndeki şerit kullanımına ait veriler, her bir deformasyon bölgesi için incelenerek araçların sağ ve sol tekerlerinin yanal yöndeki şerit kullanımına ait frekans dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen frekans dağılımları kullanılarak, deformasyonlu bölgeden geçen veya deformasyon olmayan yol kesimine doğru yanal olarak hareket eden taşıtların şerit kullanımına ait istatistiksel analizler yapılmış ve elde edilen frekans dağılımlarının normal dağılıma uyup uymadığı belirlenmeye çalışılmıştır.

Normal dağılıma uygunluğun irdelenmesindeki amaç, yol üzerinde sürüş özelliklerini etkileyecek herhangi olumsuz bir etken olmadığı durumda, araçların bir şerit üzerinde yanal yöndeki konumlarının normal dağılıma uymasıdır. Bu durumdan hareketle, deformasyon bölgelerinde deformasyonun büyüklüğüne göre araçların yanal yöndeki konumlarının %5 aşılma olasılığına göre kıkare ( $\chi^2$ ) testi yapılarak normal dağılıma uygunluğu belirlenmeye çalışılmıştır.

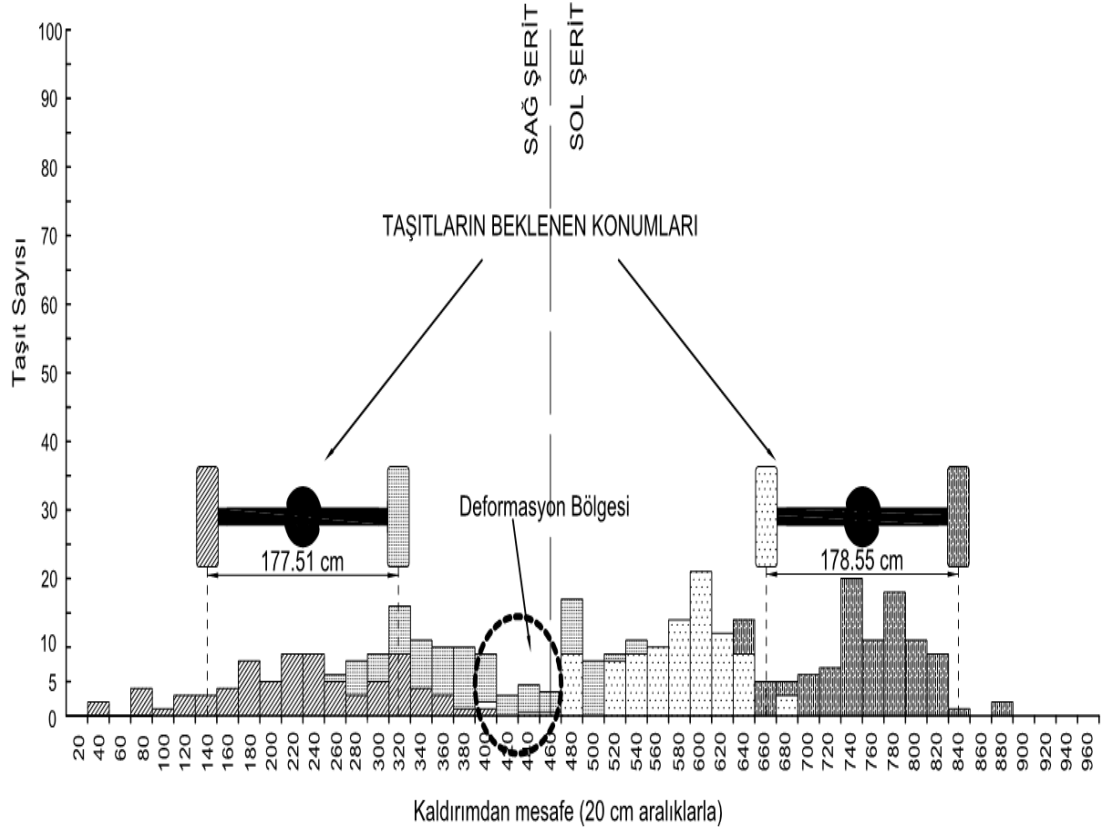
Çalışma kapsamında incelenen dört deformasyon bölgesine ait araçların yanal yöndeki konumlarına ait frekans dağılımları, %5 aşılma olasılığına göre kıkare ( $\chi^2$ ) testi yapılarak elde edilmiştir. Tüm deformasyon bölgeleri için elde edilen kıkare ( $\chi^2$ ) uygunluk testine ait sonuçlar Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Deformasyon bölgelerinden geçen araçların teker konumlarına göre elde edilen frekans dağılımlarının %5 aşılma olasılığına göre normal dağılıma uygunluk sonuçları.

Deformasyon Bölgesi	Şerit	Teker Konumu	D.F.*	Kikare ( $x^2$ ) (Hesaplanan)	Kikare ( $x^2$ ) (Tablodan)	Normal Dağılıma Uygunluk
1	Sağ	Sağ	29	21,92	42,56	Evet
		Sol	29	22,46	42,56	Evet
	Sol	Sağ	30	39,87	43,77	Evet
		Sol	30	28,16	43,77	Evet
2	Sağ	Sağ	29	32,47	42,56	Evet
		Sol	29	20,77	42,56	Evet
	Sol	Sağ	30	46,14	43,77	Hayır
		Sol	30	84,23	43,77	Hayır
3	Sağ	Sağ	29	46,19	42,56	Hayır
		Sol	29	37,58	42,56	Evet
	Sol	Sağ	30	34,33	43,77	Evet
		Sol	30	28,54	43,77	Evet
4	Sağ	Sağ	29	229,44	42,56	Hayır
		Sol	29	353,11	42,56	Hayır
	Sol	Sağ	30	37,48	43,77	Evet
		sol	30	50,63	43,77	Hayır

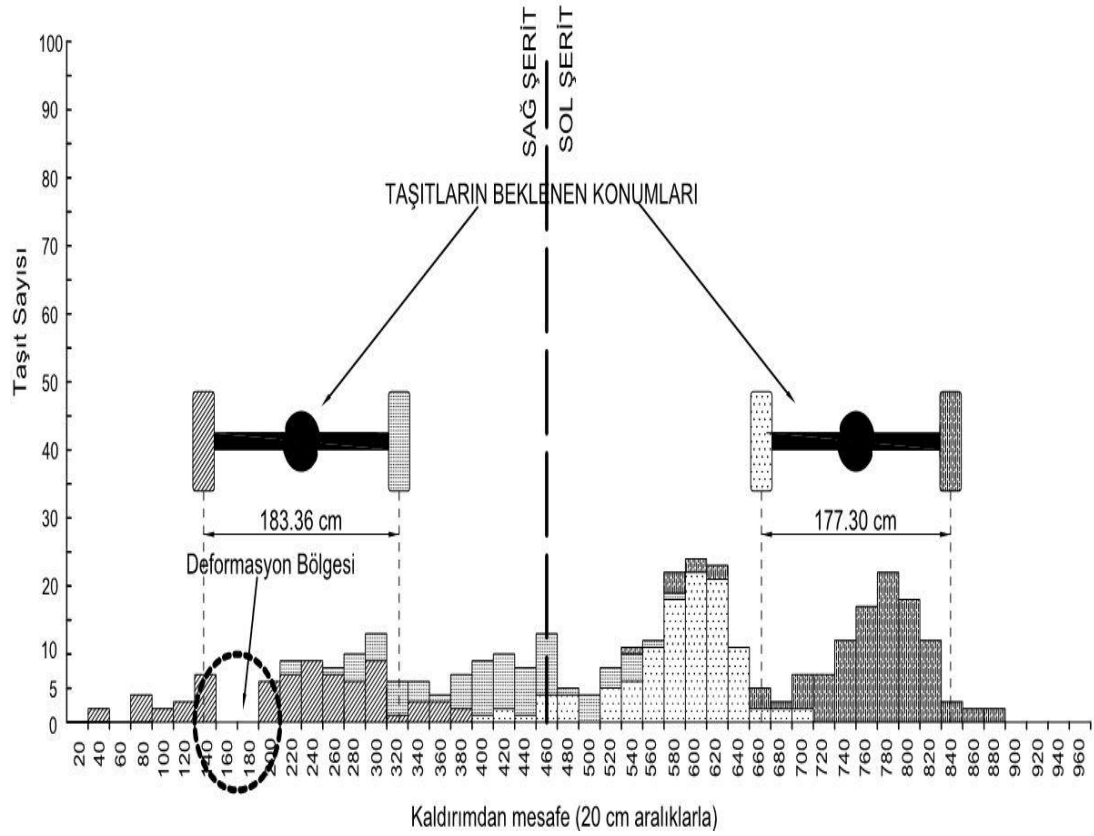
\*DF= Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)

Tablo 5.3’de de görüldü üzere, DB-2 sol şerit sol teker, DB-3 sağ şerit sağ teker, DB-4 sağ şerit sağ sol teker, sol şerit sol teker konumlarının frekans dağılımlarının %5 aşılma olasılığına göre kikare ( $x^2$ ) testi sonucu normal dağılıma uygun olmadığı görülmektedir. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da gösterilmiş olan deformasyon bölgelerinin sağ-sol şerit ve sağ-sol teker için konumlarına ait frekans dağılımları Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 üzerinde gösterilmiştir.



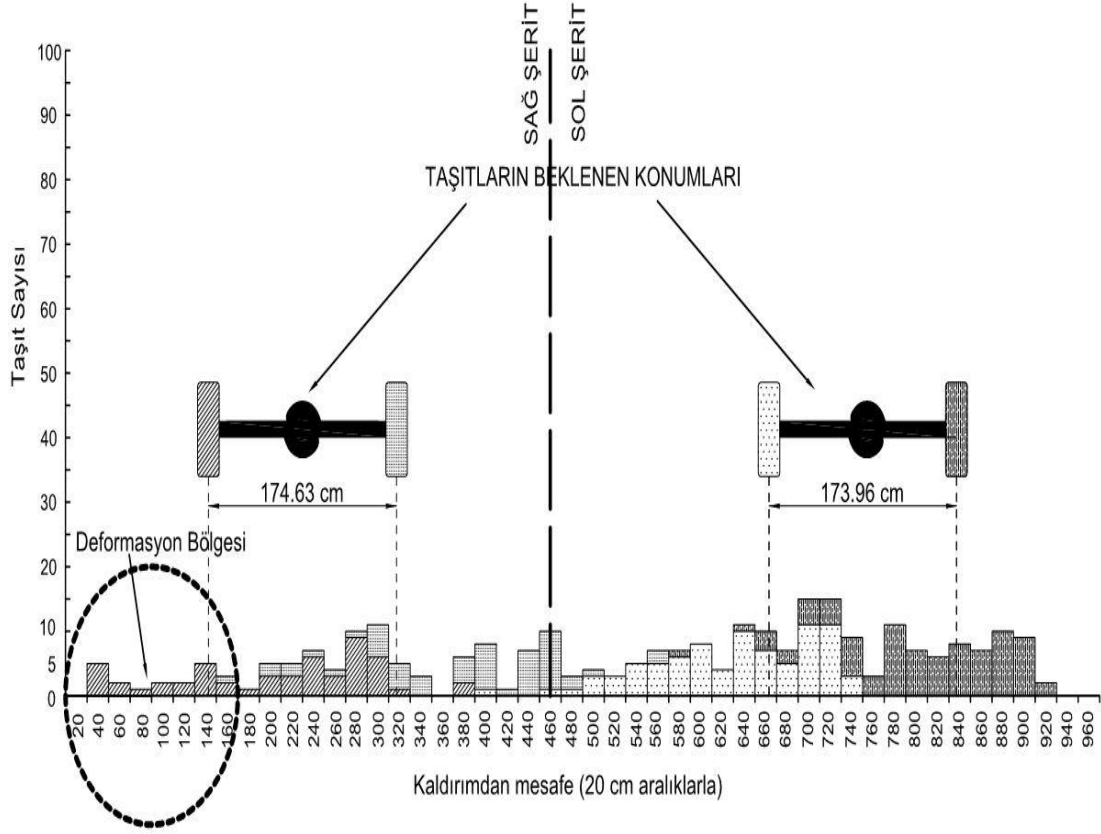
Şekil 5.12 DB- 1’den geçen taşıtların yanal yöndeki konumlarına ait frekans dağılımları.

Şekil 5.12’den deformasyon etkisinin yolun 410-470 cm aralığında olduğu görülmekte ve araçların ya deformasyon bölgesini ortalayarak üstünden ya da sağından veya solundan geçtiği görülmektedir. Şekil 5.12’den araçların her iki şerit için sağ ve sol teker frekans dağılımlarının normal dağılıma uygun olduğu hesaplanmıştır. Buradan DB-1’e ait deformasyon özelliklerinin araçların yanal yönde şerit kullanımı üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadığı sonucuna varılabilmektedir. Burada sonuç üzerinde en önemli etmen, deformasyon bölgesinin büyüklüğü ve derinliğidir. Yapılan ölçümlerden DB-1 için en derin kısmın 6,5 cm olduğu belirlenmiş fakat tüm deformasyon yüzeyi boyunca bu derinliğin devam etmediği görülmüş, deformasyon bölgesinin kenar kısımlarına doğru ölçülen bu derinlik değerinin daha düşük bir değer aldığı ve dolayısıyla bununda araçların bu noktadan geçişini engellemediği saptanmıştır.



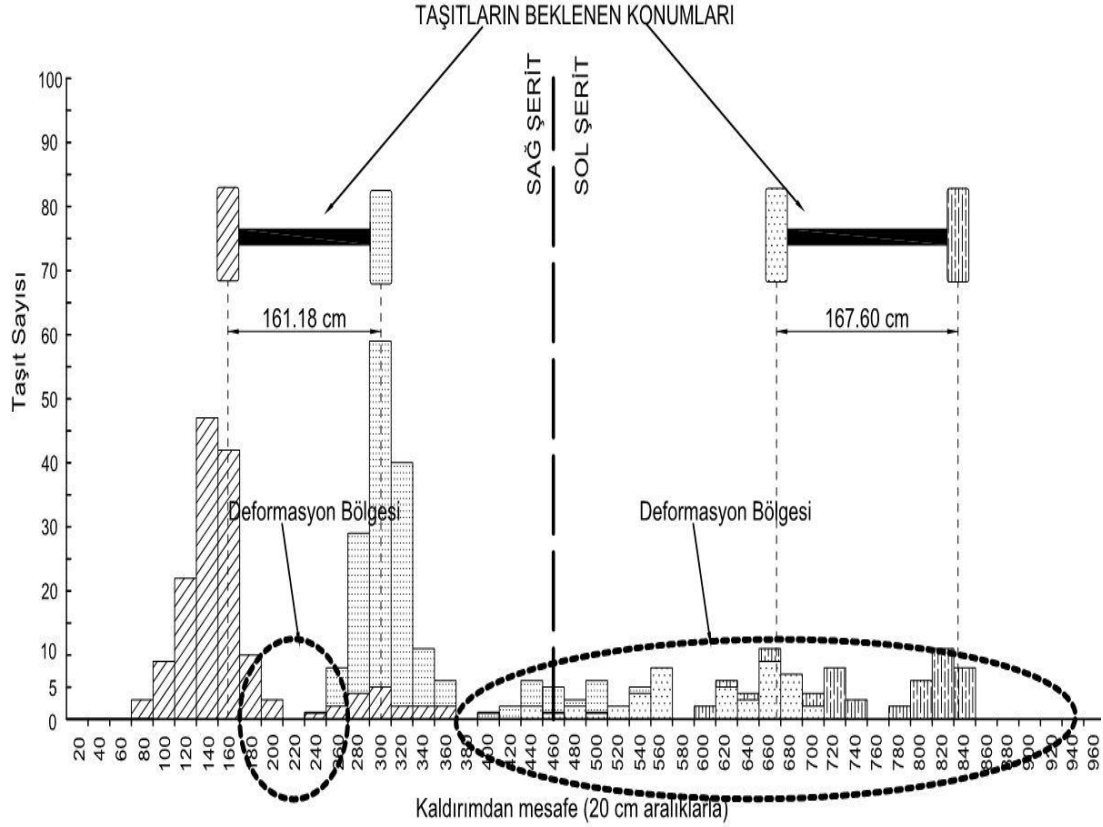
Şekil 5.13 DB-2'den geçen taşıtların yanal yöndeki konumlarına ait frekans dağılımları.

Şekil 5.13 incelendiğinde sağ şeridin 160-180 cm aralığından hiçbir aracın geçmediği saptanmıştır. Daha önceden de belirtildiği üzere burada en önemli etmen deformasyonun derinliği ve mevcut derinliğin ne kadar alan kapladığı olmaktadır. Şekil 5.12'ye ait deformasyon bölgesi 2 için derinlik 6,7 cm olarak ölçülmüş fakat mevcut derinliğin yanal yönde 60 cm boyunca devam ettiği görülmüştür. Yanal yönde deformasyon etkisinin incelenmesinde sadece deformasyon noktasının kapladığı alanın değil deformasyon bölgesindeki mevcut derinliğin kapladığı alanında dikkate alınmasının gerekliliği bir kez daha görülmüştür. DB-2 için sağ şeridi kullanan araçların sağ teker ve sol tekerlerinin gözlenen frekans dağılımlarının her iki teker için de normal dağılıma uyduğu görülmektedir. Fakat sol şeridi kullanan araçların sağ ve sol teker frekans dağılımlarının normal dağılıma uymadığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak sağ şeritteki deformasyondan kaynaklı olarak deformasyon bölgesinin kenarından geçen araçların sol şeritteki araçları ötelemesi gösterilebilir.



Şekil 5.14 DB-3'den geçen taşıtların yanal yöndeki konumlarına ait frekans dağılımları

Şekil 5.14'te deformasyon bölgesinin sağ şeridin 0-170 cm aralığında olduğu fakat yanal yönde şerit kullanımı üzerinde çok ciddi bir etki yapmadığı saptanmıştır. Her ne kadar deformasyon bölgesinin derinliği 9 cm olarak ölçülmüş olsa da mevcut derinliğe ait genişlik yaklaşık olarak 30 cm olarak belirlenmiştir. Deformasyon bölgesinin diğer kısımlarına ait deformasyon derinliğinin az olmasına rağmen az da olsa araçların sağ tekeri tarafından kullanıldığı saptanmıştır. DB-3'te deformasyon üzerinden geçen araçların sayıca az olduğu belirlenmiş, çekimler tekrardan incelendiğinde burayı kullanan araçların daha çok, deformasyon etkisinden az etkilenecek olan ağır araçlar olduğu görülmüştür. Sağ şeridin 0-170 cm'lik kesiminde oluşan bu düzensiz sağ teker frekans dağılımından dolayı normal dağılıma uygunluk görülememiştir. Sağ şeridi kullanan araçların gözlenen sol teker frekans dağılımının ise normal dağılıma uygun olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.15 DB- 4'ten geçen taşıtların yanal yöndeki konumlarına ait frekans dağılımları.

Şekil 5.15'ten, DB-4'te yer alan deformasyonun konumunun ve yanal yöndeki genişliğinin çok büyük önem taşıdığı görülmektedir. DB-4'te deformasyon iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki yolun 190-250 cm aralığında yer alan 1. kısım diğeri ise yolun 400-900 cm aralığında yer alan 2. kısım. Şekil 5.15'ten de görüldüğü üzere sol şerit boyunca deformasyonun sürekli olmasından dolayı araçlar sağ şeridi daha çok tercih etmişlerdir. Sağ şeridi tercih eden araçlarında deformasyon bölgesinin üzerinden geçtikleri ve yanal yöndeki şerit kullanımlarını bu şekilde gerçekleştirdikleri görülmektedir. Burada her ne kadar deformasyonun yüksekliği 3,5 cm gibi küçük bir değer olsa da sol şeridin tamamında sağ şeridin belirli bir kısmında böyle bir etkinin görülmesi sürücülerin daha konforlu ve aracın mekanik aksamına daha az zarar verecek olan seçeneği tercih etmelerine neden olmaktadır. Yol yüzeyinde bulunan bu yapay deformasyon, sürücülerin sağ şeridi daha fazla kullanmalarına, sağ şeridi kullanan sürücülerin de deformasyon bölgesinin üzerinden geçerek hareketlerine devam etmelerine neden olduğu görülmüştür. Bu tür yanal yöndeki şerit kullanımı sonucu, sağ şeritten geçen araçların sağ ve sol teker frekans

dağılımlarının normal dağılıma uymadığı yapılan ki kare ( $\chi^2$ ) uygunluk testinden de açıkça görülmektedir. Ayrıca sol şeritten geçen araçların sağ tekerlerinin frekans dağılımının normal dağılıma uyduğu gözlenmekte fakat sol teker frekans dağılımının ise yolun 910-960 cm aralığından hiçbir araç geçmediğinden dolayı normal dağılıma uymadığı görülmektedir.

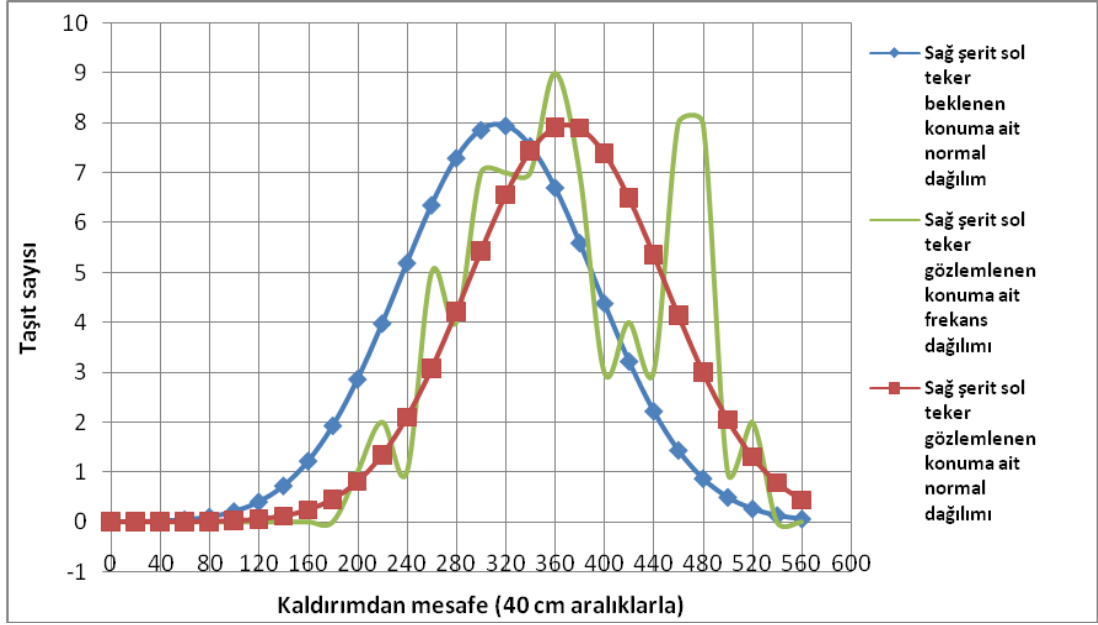
Yapılan bu çalışma kapsamında araçların deformasyon etkisine göre yanal yönde şerit kullanımlarına ait frekans dağılımları belirlenmiş ve bu dağılımların normal dağılıma uyup uymadığı hesaplanarak sonuçlar Tablo 5.3'de verilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca yoldan geçen taşıtların dingil uzunlukları da ölçülmüş ve daha sonra bu dingil uzunluklarının ortalaması alınarak her bir deformasyon bölgesi ve bu deformasyon bölgelerinde yer alan sağ ve sol şeritler için araçların ortalama dingil uzunlukları elde edilmiştir. Elde edilen bu dingil uzunlukları araçların şeritleri tam olarak ortalayarak hareketlerine devam edecekleri kabulü ile şeritlerin orta kısımlarına yerleştirilmiş ve araçların beklenen konumları elde edilmiştir. Araçların beklenen konumlarının, gözlenen konumlarına ait frekans dağılımlarına göre normal dağılıma uygunluğu incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4 Deformasyon bölgelerinden geçen araçların teker konumlarına göre elde edilen frekans dağılımlarının araçların beklenen konumlarının %5 aşılma olasılığına göre normal dağılıma uygunluk sonuçları.

Def. Bölgesi	Şerit	Tekerlek	D.F.	Taşıtların beklenen konumlarının merkezde olduğu kabulü durumu		
				Kikare ( $\chi^2$ ) (Hesaplanan)	Kikare ( $\chi^2$ ) (tablodan)	Normal Dağılıma Uygunluk
1	Sağ	Sağ	29	135,40	42,56	Hayır
		Sol	29	114,55	42,56	Hayır
	Sol	Sağ	30	47667,75	43,77	Hayır
		Sol	30	14293,89	43,77	Hayır
2	Sağ	Sağ	29	112,75	42,56	Hayır
		Sol	29	99,03	42,56	Hayır
	Sol	Sağ	30	17496,98	43,77	Hayır
		Sol	30	27342,88	43,77	Hayır
3	Sağ	Sağ	29	67,27	42,56	Hayır
		Sol	29	69,65	42,56	Hayır
	Sol	Sağ	30	207,91	43,77	Hayır
		Sol	30	174,47	43,77	Hayır
4	Sağ	Sağ	29	506,16	42,56	Hayır
		Sol	29	834,77	42,56	Hayır
	Sol	Sağ	30	320,44	43,77	Hayır
		Sol	30	752,71	43,77	Hayır

Tablo 5.4'ten taşıtların beklenen konumlarının, gözlenen konumlarına ait frekans dağılımlarına göre normal dağılıma uygunluk testi sonucunda sağ ve sol teker konumlarının hiçbirinin normal dağılıma uymadığı görülmüştür. Buradan araçların şerit üzerinde uniform dağılımlarını etkileyen faktörlerden birisi olan deformasyon etkisinin araçların şeritleri ortalayarak gitmesini ne derecede etkilediği açıkça görülmektedir. Ayrıca bu etkinin DB-1 sol şerit (sağ ve sol teker), DB-2 sol şerit (sağ ve sol teker) konumları üzerinde ne kadar büyük bir etkiye sahip olduğu ve taşıtların bu etki sonucu beklenen konumlarından büyük miktarda saptığı da açıkça görülmüştür.





Şekil 5.16 DB-1 sağ şerit sol teker için beklenen konum ile gözlenen konum arasındaki frekans dağılımı ilişkisi.

Şekil 5.16’da Tablo 5.4’te verilen normal dağılıma uygunluk sonuçlarından örnek olarak DB-1 sağ şerit sol teker için beklenen konum ile gözlenen konum arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere taşıtların geçmesi beklenen konumlarına ait normal dağılım ile gözlenen duruma ait normal dağılım arasında büyük farklılıklar mevcuttur. Şekilden gözlenen duruma ait normal dağılımın sola çarpık olduğu belirgin şekilde görülmekte, araçların frekans dağılımına ait pik noktanın yaklaşık 300 cm civarında olması beklenirken mevcut çarpıklık nedeniyle yaklaşık olarak 380 cm civarında olduğu görülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda araçların mevcut yanal yöndeki dağılımları ile beklenen konumları arasındaki farktan kaynaklanan sapmayı diğer bir deyişle öteleme miktarını, belirlenen eğrilerin bir fonksiyonu olarak matematiksel bir formülasyonla önermek için çok daha fazla sayıda gözlem yapmanın gerekli olduğu görülmüştür. Taşıtların hızı, deformasyonun boyutu ve aracın buna bağlı olarak yanal yöndeki hareketi arasında bu çalışma kapsamında yeterli seviyede bilgi edinilememiştir. Buradaki en önemli etmen, araçların hızlarıyla yanal yöndeki hareketleri arasındaki ilişkinin kurulamamasıdır. Bu analiz kapsamında elde edilen en önemli sonuç deformasyonlu bölgelerde araçların yanal yöndeki beklenen konumları

ile mevcut konumları arasında farklılıkların olmasıdır. Oluşan bu sapma miktarındaki en önemli etmenin yol kesitinin çeşitli noktalarında mevcut olan deformasyon olduğu görülmektedir. Yapılan analizlerde araçların deformasyonlu bölgelerde yanal yöndeki hareketlerini etkileyen etmenlerin başında deformasyonun boyutu, sürücünün o bölgeyi tanınması, araç cinsi, araçların hızı ve sürücü karakteristiklerinin etkili olduğu görülmüştür.

Mevcut çalışmanın yol bozukluklarının gözlenebileceği gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerde farklı bölgelerde uygulanması sonucu yol yüzey bozukluğu ve bunun trafik akımıyla ilişkisinin matematiksel olarak belirlenmesinin mümkün olacağı düşünülmektedir.

## BÖLÜM ALTI

### SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Yapılan çalışmada, yol yüzey deformasyonları bulunan çok şeritli bir yolda araçların şerit üzerinde enine ve boyuna yöndeki hareketleri incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla doygun bir akımda çeşitli sebeplerle yol yüzeyinde oluşmuş deformasyonların etkisine bağlı olarak araçların hem akım içerisindeki hareketleri hem de şerit kullanımları belirlenmeye çalışılmıştır. Yanal yöndeki şerit kullanımını belirleyebilmek amacıyla mevcut yoldan geçen taşıtların dingil uzunlukları ölçülmüş ve daha sonra bu dingil uzunluklarının ortalaması alınarak her bir deformasyon bölgesi ve bu deformasyon bölgelerinde yer alan sağ ve sol şeritler için araçların ortalama dingil uzunlukları elde edilmiştir. Elde edilen bu dingil uzunlukları araçların şeritleri tam olarak ortalayarak hareketlerine devam edecekleri kabulü ile şeritlerin orta kısımlarına yerleştirilmiş ve araçların beklenen konumları elde edilmiştir. Bu amaçla araçların deformasyon etkisine göre yanal yönde şerit kullanımlarına ait frekans dağılımları belirlenmiş ve bu dağılımların normal dağılıma uyup uymadığı ki kare ( $x^2$ ) uygunluk testiyle kontrol edilmiştir. Sonuçlar deformasyonun türünün, derinlik veya yüksekliğinin araçların yanal yöndeki şerit kullanımı üzerindeki en önemli parametreler olduğunu ve deformasyonun kapladığı yüzey alanının da araçların kullanacakları şerit genişliklerini azalttığını göstermektedir.

İncelenen deformasyon noktalarından video kamera ve GPS cihazı yardımı ile toplanan hız ve konum verilerinden araçların deformasyon noktalarına gelmeden, deformasyon etkisine maruz kalmamak için ya hızlarını azalttıkları ya da şerit değiştirdikleri görülmüştür. Bu amaçla araçların deformasyon noktasına gelmeden önceki, deformasyon noktası ve sonrasındaki hız verileri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar araçların hızlarındaki düşüş üzerindeki en önemli parametrelerin sürücü karakteristikleri ve deformasyonun büyüklüğü olduğunu göstermiştir. Araçların deformasyon etkisine maruz kalmamak için şerit değiştirmesi incelendiğinde her 3 deformasyon noktasında da araçların ortalama 10 sn, 35-40 metre önce ve 40-45 km/saat hız ile şerit değiştirdikleri gözlemlenmiştir.

Analizlerden araçların şerit değiştirmesi üzerindeki en önemli unsurların sürücü karakteristikleri (agresif, mevcut yolu tanınması vb. ), şerit değiştireceği hedef şeritteki araçların konumu ve deformasyon büyüklüğü olduğu görülmüştür. Yine elde edilen hız verilerine ait standart sapma değerleri incelendiğinde araçların deformasyon olmayan kesimlerde kararlı bir hareket gerçekleştirdiği deformasyon olan kesimlerde ise daha büyük standart sapma değerlerine sahip oldukları yani stabil olmayan hızlarla hareket ettikleri görülmüştür.

Çalışma kapsamında ayrıca incelenen deformasyon noktalarında şok dalgası veya şişe boynu durumlarının oluşup oluşmadığı da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan deformasyon noktalarının şerit üzerindeki hareketi tümüyle bloke etmediği, araçların hızlarını azaltarak ya da şerit değiştirerek bu noktaların etkisine maruz kalmadan hareketlerine devam ettiği görülmüştür. Araçların deformasyon noktalarından geçişlerinde tümüyle durmadığı için ve deformasyon noktalarında yavaşlayan araçları gören arkadaki araçların önceden şerit değiştirdikleri için bu noktalarda geriye doğru bir şok dalgası etkisi yapılan analizler sonucunda görülememiştir. Ancak video kamera çekimlerinden araçların belirli bir hız değerinden daha düşük bir hız değeriyle bu noktalardan geçmesi durumunda geriye doğru kısa süreli bir şok dalgası olduğu görülmüştür. Bu amaçla bu şok dalgasının oluşmasına sebep olan kritik hız değerinin hesaplanması için yeni bir model önerilmiştir.

Sonuç olarak deformasyonların, araçların şerit üzerindeki hareketlerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi olduğu yapılan çalışmadan açıkça görülmüştür. Yol yüzey bozukluklarının özellikle gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde sürekli ve çok fazla olmasından kaynaklı olarak bu ülkelerde çok sayıda trafik kazası meydana gelmektedir. Araçların deformasyon etkisinden kurtulmak amacıyla aniden şerit değiştirmesi ya da hızını düşürmesi bu ülkelerde meydana gelen kazaların önemli bir yüzdesini oluşturmaktadır.

Çalışma çok şeritli yollarda deformasyon etkisini belirleyebilmek amacıyla toplanabilen sınırlı sayıda veri yardımıyla yapılabilmemiştir. İleri ki çalışmalarda özellikle gelişmemiş ülkelerden toplanacak veriler ışığında araçların deformasyonlu

bir yolda şerit üzerinde yanal yöndeki konumlarını hem matematiksel bir model ile ilişkilendirmek hem de mevcut şerit değiştirme modellerini gerçek gözlem verileriyle kalibre etmenin mümkün olacağı düşünölmektedir.

**KAYNAKLAR**

- Adebisi, O. ve Sama, G. N. (1989). Influence of stopped delay on driver gap acceptance behaviour. *ASCE Journal of Transportation Engineers*, 115, 305–315.
- Ahmed, K.I. (1999). *Modeling drivers' acceleration and lane-changing behavior*, Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology.
- Brackstone, M., McDonald, M. ve Wu, J. (1998). *Lane changing on the motorway : factors affecting its occurrence, and their implications*. London: 1998 9th International Conference on Road Transport Information and Control.
- Brilon, W. (Ed.). (1988). *Intersections Without Traffic Signals I*, New York, NY: Springer.
- Brilon, W. (Ed.). (1991). *Intersections Without Traffic Signals II*, New York, NY: Springer.
- Brown, R., Kandhal, P., ve Zhang, J. (2001). *Performance Testing for Hot Mix Asphalt*. Auburn, AL: NCAT Report No. 2001-05A. National Center for Asphalt Technology.
- Buisson, C. ve Wagner, P. (2004). *Calibration and validation of simulation models*. Washington: 2004 TRB annual meeting Workshop 148: Traffic simulation models.
- Cassidy, M.J., Madanat, S.M., Wang, M., ve Yang, F. (1995). Unsignalized intersection capacity and level of service: Revisiting critical gap. *Transportation Research Record*, 1484, 16-23.

- Chang, G.L. ve Kao, Y.M. (1991). An empirical investigation of macroscopic lane-changing characteristics on uncongested multilane freeways. *Transportation Research A*, 25 (6), 375-389.
- Chowdhury, D., Wolf, D.E. ve Schreckenberg, M. (1997). Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: effects of lane-changing rules. *Physica A* 235 (3-4), 417-439.
- Conway, R. W.(1963). Some tactical problems in digital simulation. *Manage. Sci.*, 10(1), 47-61.
- Daganzo C.F. (1981). Estimation of gap acceptance parameters within and across the population from direct roadside observation, *Transportation Research*, 15(B), 1-15.
- Daganzo, C.F. (1993). *The cell-transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory*. Berkeley, CA: Technical Report UCB-ITS-RR-93-7, Institute of Transportation Studies, University of California, USA.
- Daganzo, C.F. (1994). The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B*, 28 (4), 269-287.
- Daganzo, C.F. (1997). A continuum theory of traffic dynamics for freeways with special lanes. *Transportation Research Part B*, 31 (2), 83-102.
- Daganzo, C.F. (2002a). A behavioral theory of multi-lane traffic flow part I: long homogeneous freeway sections. *Transportation Research Part B*, 36 (2), 131-158.

- Daganzo, C.F. (2002b). A behavioral theory of multi-lane traffic flow part II, merges and the onset of congestion. *Transportation Research Part B* 36 (2), 159–169.
- Daganzo, C.F. (2005b). A variational theory of kinematic waves: solution methods. *Transportation Research Part B* 39 (10), 934–950.
- Daganzo, C.F., Lin, W. ve Del Castillo, J. (1997). A simple physical principle for the simulation of freeways with special lanes and priority vehicles. *Transportation Research Part B*, 31 (2), 105–125.
- Drew, D. R., LaMotte, L. R., Buhr, J. H. ve Wattleworth, J. A. (1967). Gap acceptance in the freeway merging process. *Highway Research Record*, 208,1–36.
- Günay, B. ve Woddward, D. (2006). Lateral Position of traffic negotiating horizontal bends. *Proceeding of the institution of civil engineers, Transport* 160, TR(1), 1-11.
- Garber N.J. ve Hoel, L.A. (1999). *Traffic and highway engineering*.(2th ed.). Michigan: PWS Publishing.
- Gazis, D.C. (2002). *Traffic theory*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Gipps, P.G. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research*, 20 (B), 403-414.
- Greenberg, J.M., Klar, A. ve Rasclé, M. (2003). Congestion on multilane highways. *SIAM J. Appl. Math*, 63 (3), 813–818.



- Halati, A., Lieu, H. ve Walker, S. (1997). *CORSIM –Corridor traffic simulation mode*. Chicago: 1997 Proceedings of the Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21<sup>st</sup> Century Conference.
- Hamed, M. M., Ease, S. M. ve Batayneh, R. R. (1997). Disaggregate gap-acceptance model for unsignalized T-intersections. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 123, 36–42.
- Herman, R. ve Weiss, G. H. (1961). Comments on the highway crossing problem, *Operations Research*, 9, 838–840.
- Hidas, P (2005). Modeling Vehicle Interactions in Microscopic Simulation of Merging and Weaving, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13, 37-62.
- Hidas, P. (2002). Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10, 351-371.
- Hunt, J.G. ve Lyons, G.D. (1994). Modeling dual carriageway lane changing using neural networks, *Transportation Research-C*, 2 (4), 231-245.
- Jiang Y. (1999). *Traffic characteristics and estimation of traffic delays and user cost at indiana freeway work zones*. Indiana: Final Report FHWA/INDOT/SPR-2121. Indiana Department of transportation, USA.
- Jiang, Y. ve Li, S. (2002). Measuring and Analyzing Vehicle Position and Speed Data at Work Zones Using Global Positioning Systems. *Institute of Transportation Engineers, Its Journal*, 72 (3), 48-53.
- Laval, J.A. ve Daganzo, C.F. (2006). Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B*, 40, 251-264.

- Laval, J.A. ve Daganzo, C.F.(2003). *A hybrid model of traffic flow: impacts of roadway geometry on capacity*. Washington: 2003 TRB annual meeting
- Lebacque, J.P. (1996). *The godunov scheme and what it means for first order traffic flow models*. New York: 1996, 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
- Lebacque, J.P. ve Lesort, J.B. (1999). *Macroscopic traffic flow models: a question of order*. New York, NY 1999: 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
- Lighthill, M.J. ve Whitham, G.B., (1955). On kinematic waves. I Flow movement in long rivers. II A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society*, 229 (A), 281–345.
- Madanat, S. M., Cassidy, M. J. ve Wang, M. H. (1993). A probabilistic model of queuing delay at stop controlled intersection approaches. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 120, 21–36.
- Mahmassani, H. ve Sheffi, Y. (1981). Using gap sequences to estimate gap acceptance function. *Transportation Research Part B*, 15, 143–148.
- Mathew, T.V. (2 April 2012). Traffic theory and theory.(5 Kasım 2012), <http://nptel.iitm.ac.in/courses>.
- May, A.D. (1990). *Traffic flow fundamentals*. New Jersey: Printince Hall, Englewood Cliffs.
- McShane, W.R. ve Roess, R.P. (1990). *Traffic Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs.

- Michalopoulos, P.G., Beskos, D.E. ve Yamauchi, Y. (1984). Multilane traffic dynamics: some macroscopic considerations. *Transportation Research Part B*, 18 (4–5), 377–395.
- Miller, A. J. (1972). *Nine estimators of gap-acceptance parameters*, in: G. F. Newell (Ed.). New York: Proceedings of the 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow.
- Munjal, P.K. ve Pipes, L.A. (1971). Propagation of on-ramp density perturbations on unidirectional two- and three-lane freeways. *Transportation Research Part B*, 5 (4), 241–255.
- Munjal, P.K., Hsu, Y. ve Lawrence, R.L. (1971). Analysis and validation of lane-drop effects on multi-lane freeways. *Transportation Research Part B*, 5 (4), 257–266.
- PTV (2004). VISSIM 4.00 User Manual, Karlsruhe, Germany.
- Public Works Research Institute (2008). Realization of a Recycling-Oriented Society. (20 Aralık 2012), <http://www.pwri.go.jp/eng/webmag/wm022/seika.html>
- Quadstone (2004) Paramics V5.0, Technical Notes, Version No. 1.0, October, 2004.
- Ramanujam, V. (2007). *Lane Changing Models for Arterial Traffic* Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology.
- Rao, A. (2006). *Modeling Anticipatory Driving Behavior*, Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology.
- Richards, P.I. (1956). Shockwaves on the highway. *Operations Research* 4, 42–51.

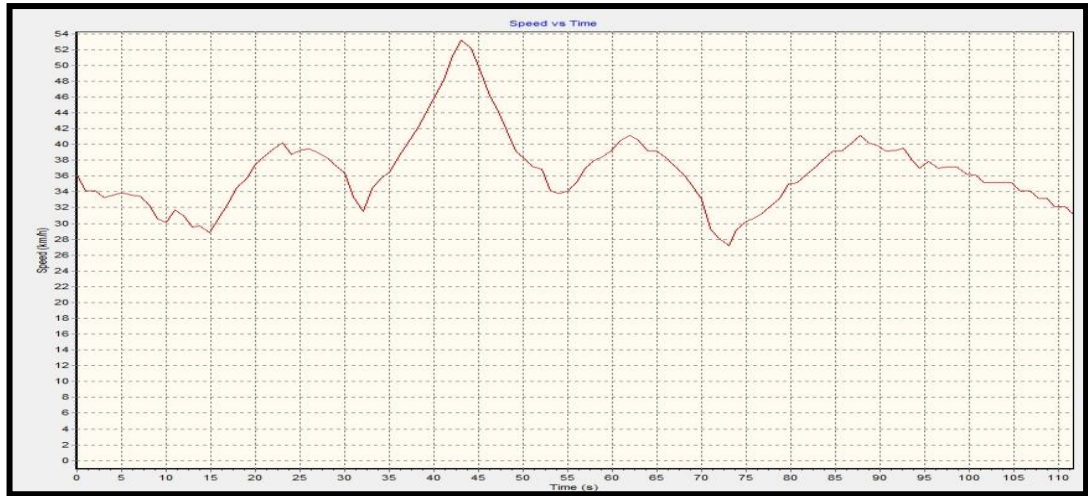
- Saad, F., Delhomme, P. ve Van-Elslande, P. (1990). *Drivers' speed regulation when negotiating intersections*, New York: Proceedings of the 11th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation.
- Sparmann, U. (1978). Spurwechselforgänge auf Zweispurigen Babrichtungsfahrbahnen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft, 263*. 0-106.
- Toledo, T. (2002). *Integrated Driving Behavior Modeling*, Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology.
- Toledo, T., Koutsopoulos, H. ve Ben-Akiva, M. (2003). Modeling Integrated Lane-changing Behavior. *Transportation Research Record, 1857*, 30-38.
- Transportation Research Board (TRB) (1997). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C: National Research Council.
- Transportation Research Board (TRB) (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C, National Research Council.
- TSS-Transport Simulation Systems (2004). AIMSUN 5.0 Microsimulator User's Manual 5.0.5.
- Wang, J., Liu, R. ve Montgomery, F. (2005). A simulation laboratory for motorway merging behavior. *Transportation and Traffic Theory: Flows, Dynamics and Human Interaction, 5(3)*, 127-140.
- Wei, C.H., Meyer, E., Lee, J. ve Feng, C. (2000). Characterizing and modeling observed lane-changing behavior: lanevehicle- based microscopic simulation on urban street network. *Transportation Research Record, 1710*, 104–113.

- Wolshon, B. ve Hatipkarasulu, Y. (2000). Results of car following analyses using global positioning system. *Journal of transportation engineering*. 126(4), 324-331.
- Xuan, Y. ve Coifman, B. (2006). *Lane change maneuver detection from probe vehicle dgps data*. Toronto, Ont. 2006: Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC '06. IEEE.
- Yang, Q.ve Koutsopoulos, H.N. (1996). A Microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research*, 4 (C), 113-129.
- Zeng, H. (1995). *On the low temperature cracking of asphalt pavements*, Stockholm, Dissertation, Division of Highway, KTH.

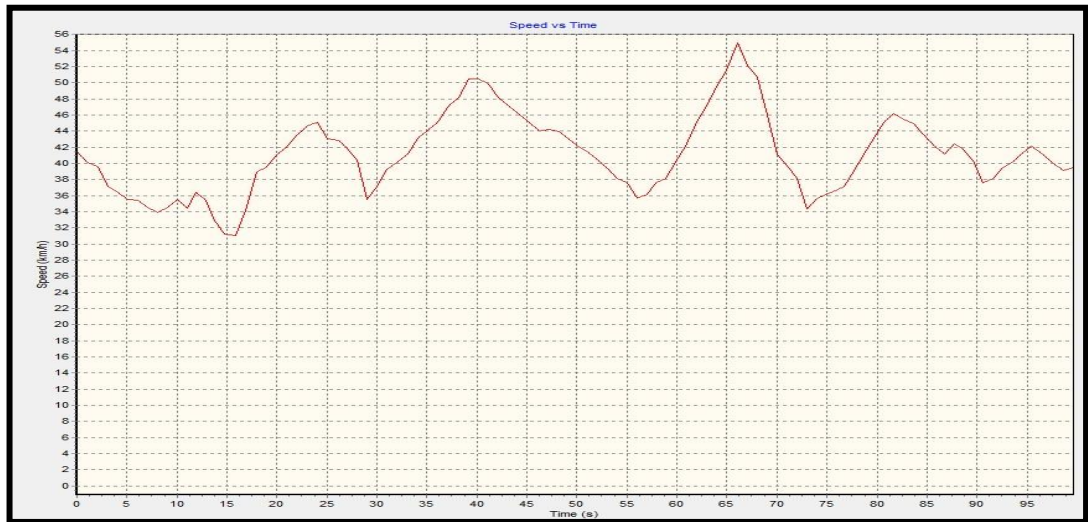
## **EKLER**

**HER BİR SÜRÜCÜ İÇİN ARAÇLARIN 9 FARKLI  
DEFORMASYON NOKTALARINDAN  
GEÇİŞLERİNE AİT GRAFİKLER**

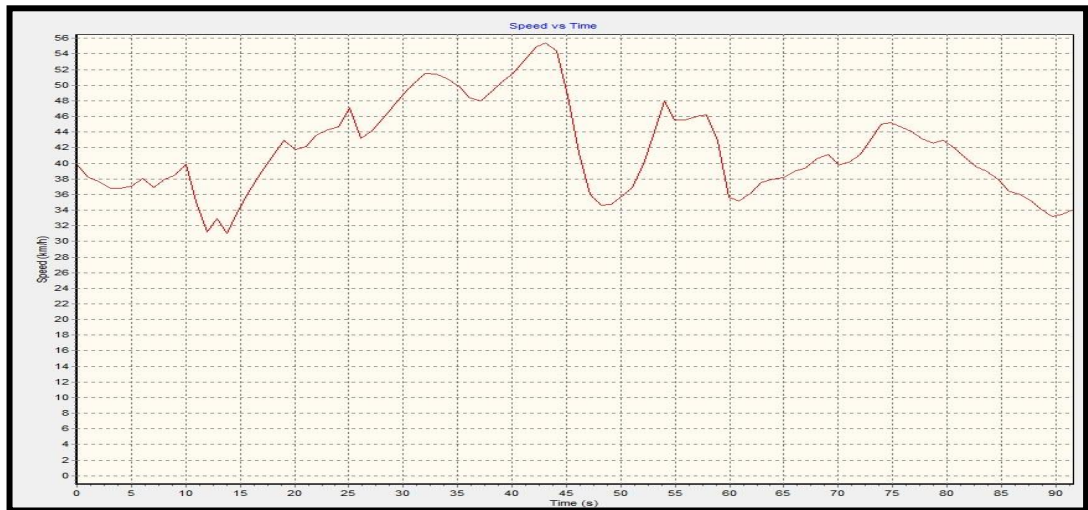
EK 1 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 no'lu Deformasyon Noktalarından Geçen 5 Farklı Sürücü Profiline Ait Hız-Zaman Grafikleri



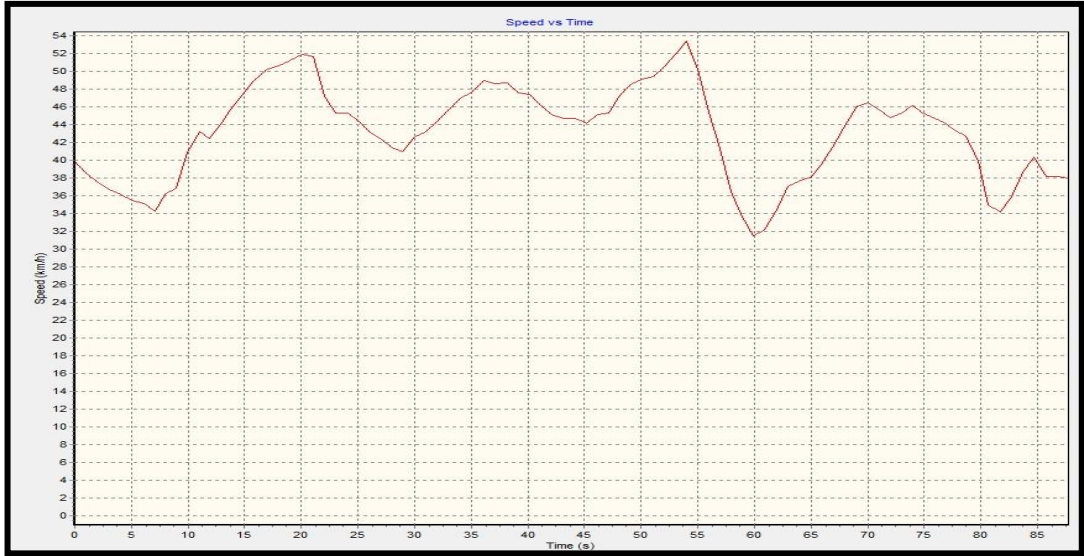
**SÜRÜCÜ 1**



**SÜRÜCÜ 2**



**SÜRÜCÜ 3**



SÜRÜCÜ 4



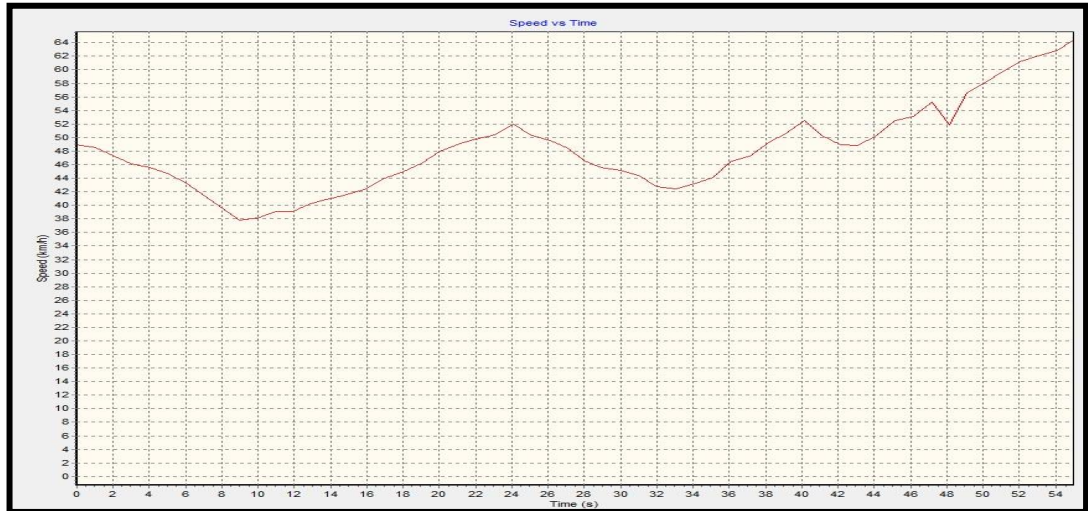
SÜRÜCÜ 5



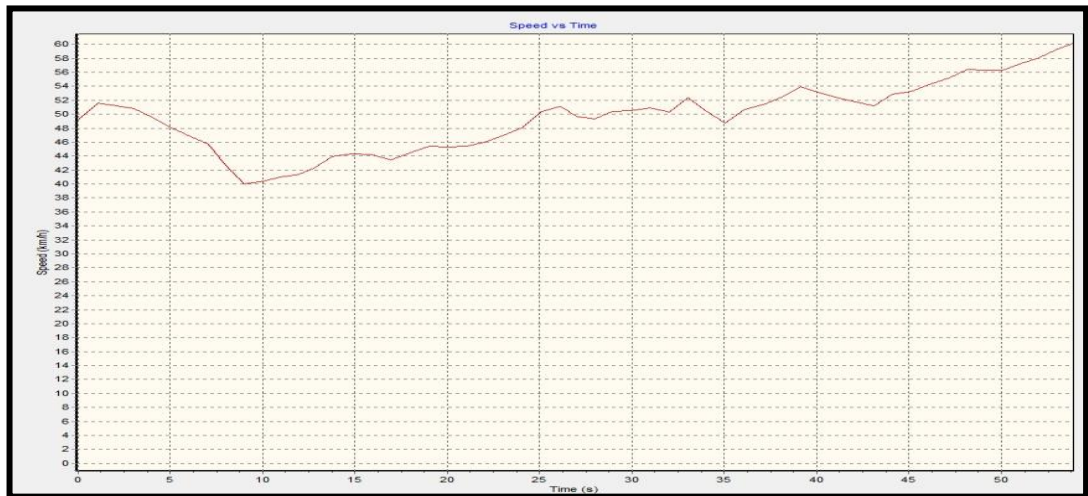
EK 2 7,8 ve 9 no'lu Deformasyon Noktalarından Geçen 5 Farklı Sürücü Profiline Ait Hız-Zaman Grafikleri



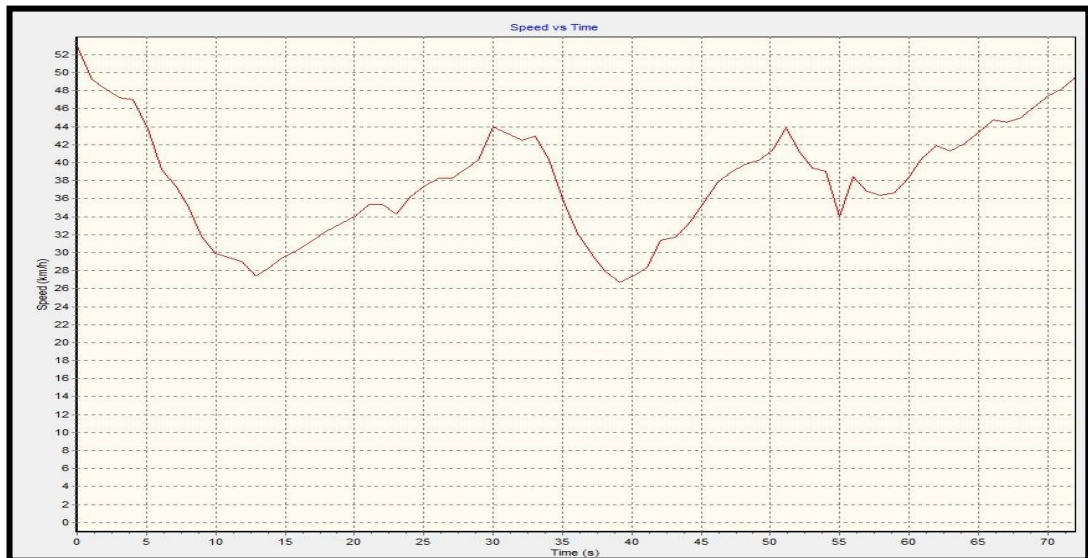
**SÜRÜCÜ 1**



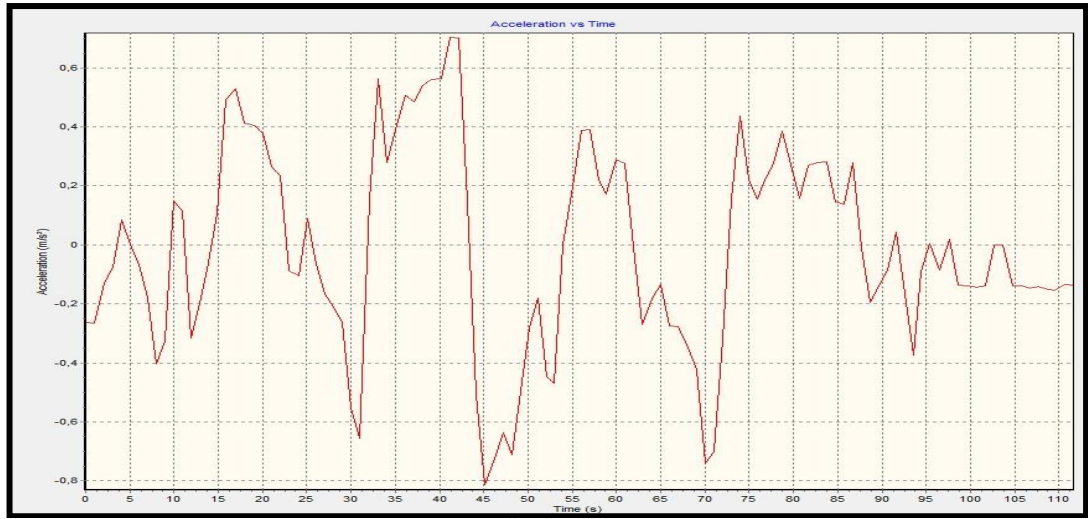
**SÜRÜCÜ 2**



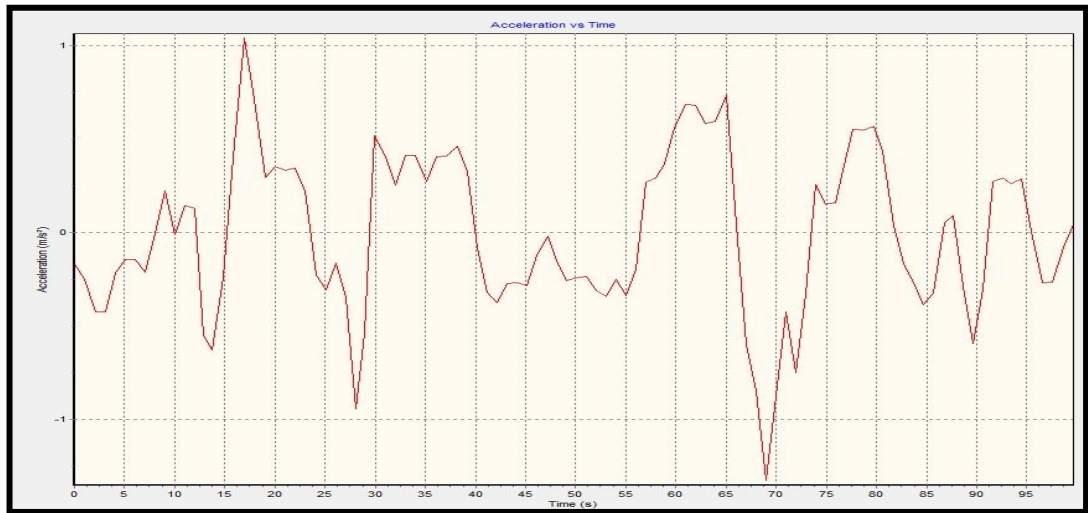
**SÜRÜCÜ 3**

**SÜRÜCÜ 4****SÜRÜCÜ 5**

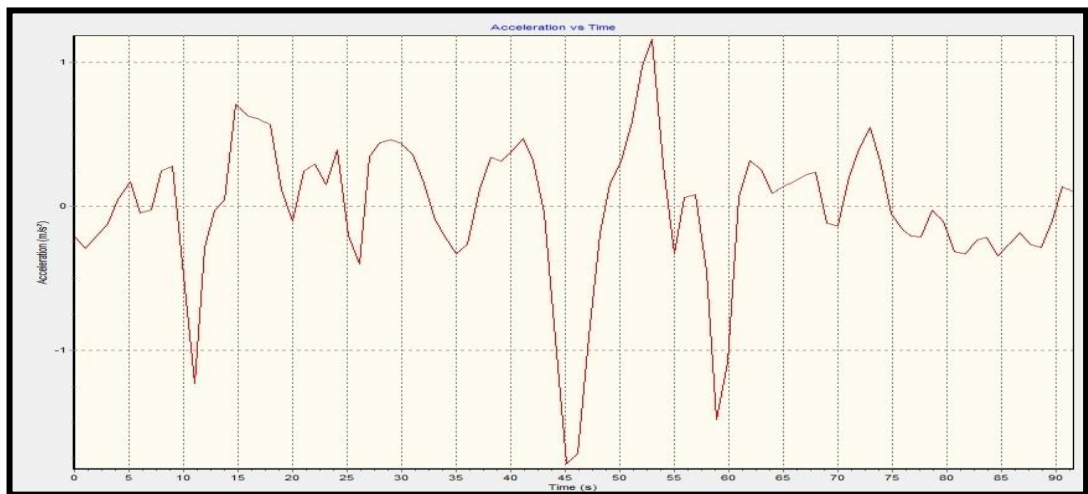
EK 3 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 no'lu Deformasyon Noktalarından Geçen 5 Farklı Sürücü Profiline Ait İvmelenme-Zaman Grafikleri



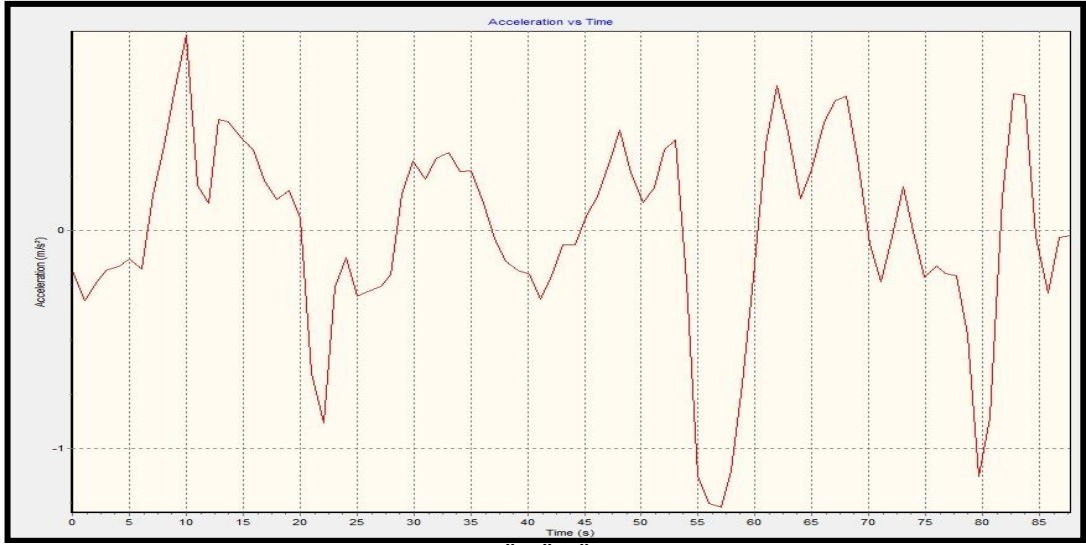
**SÜRÜCÜ 1**



**SÜRÜCÜ 2**



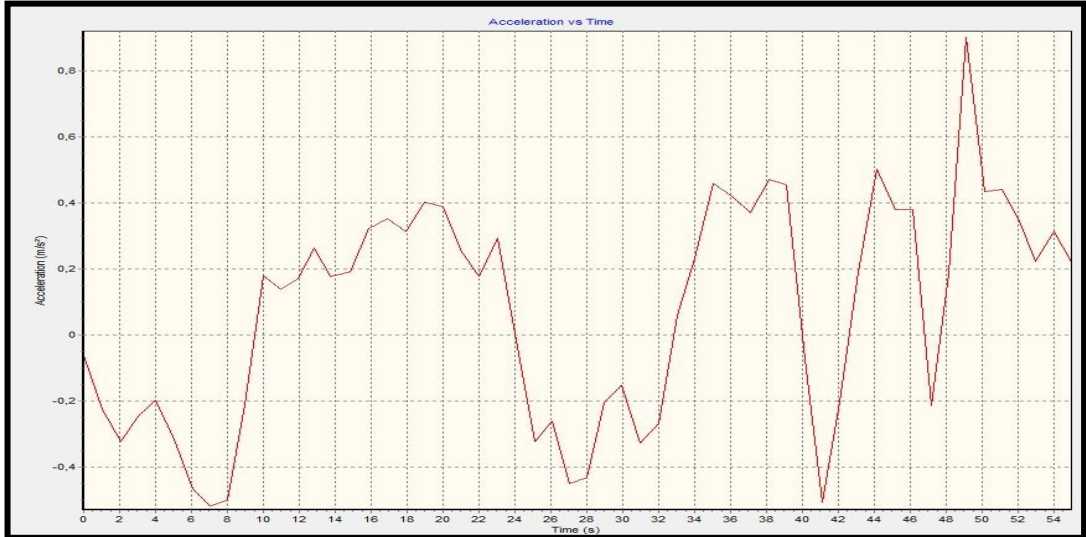
**SÜRÜCÜ 3**

*SÜRÜCÜ 4**SÜRÜCÜ 5*

EK 4 7,8 ve 9 no'lu Deformasyon Noktalarından Geçen 5 Farklı Sürücü Profiline Ait İvmelenme-Zaman Grafikleri



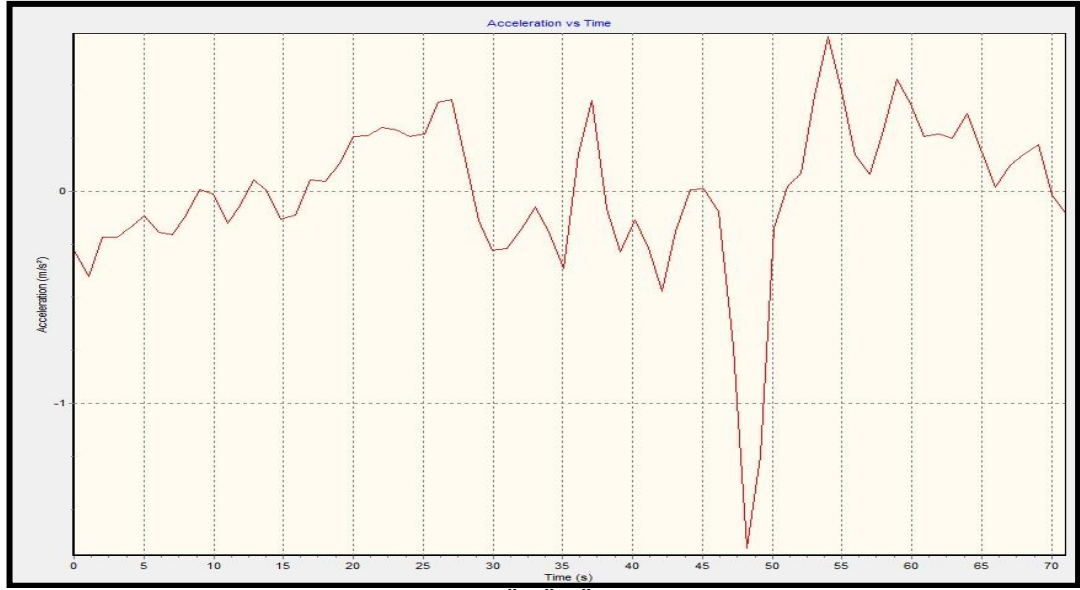
**SÜRÜCÜ 1**



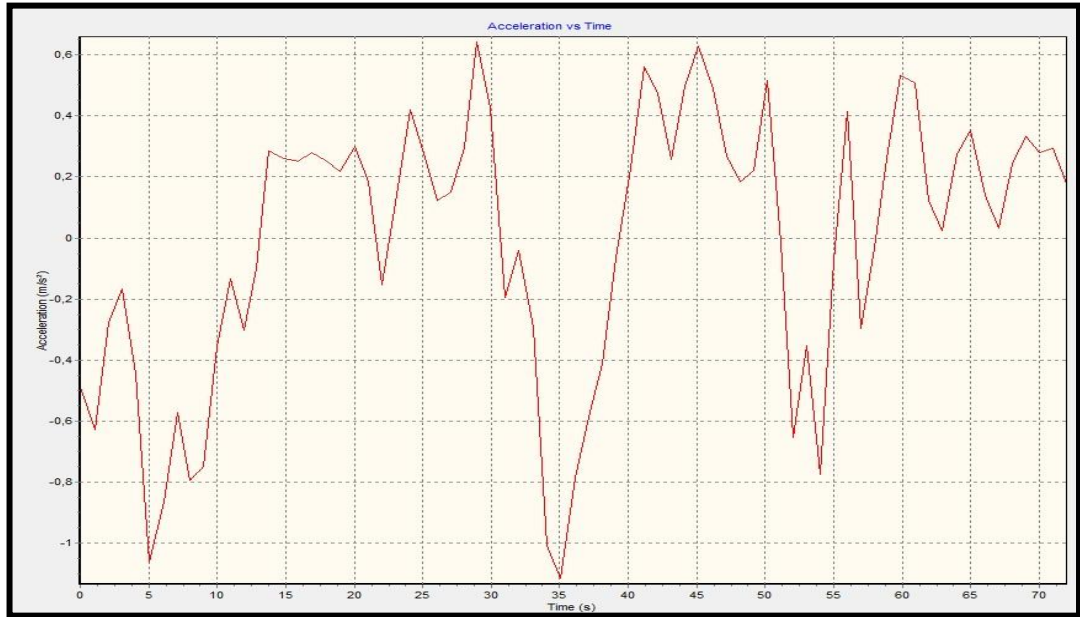
**SÜRÜCÜ 2**



**SÜRÜCÜ 3**



SÜRÜCÜ 4

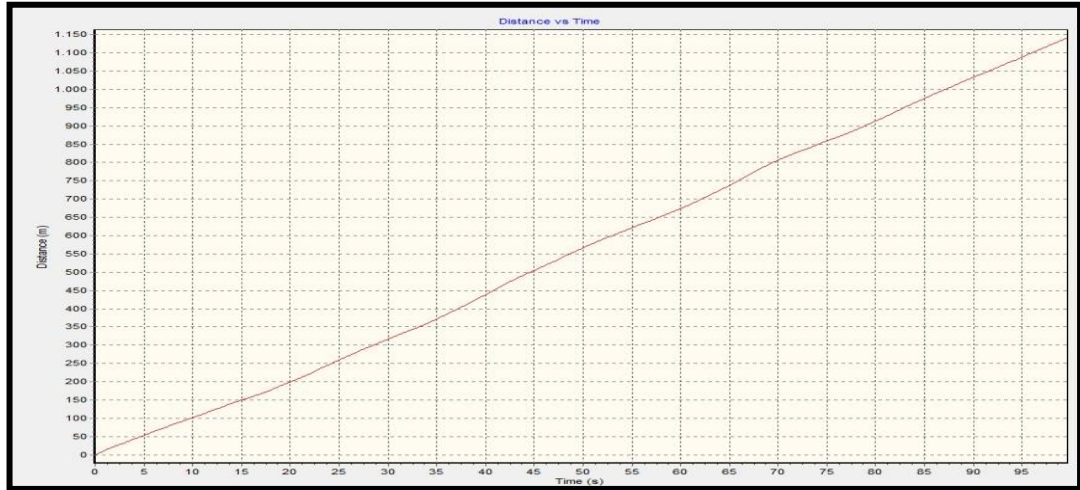


SÜRÜCÜ 5

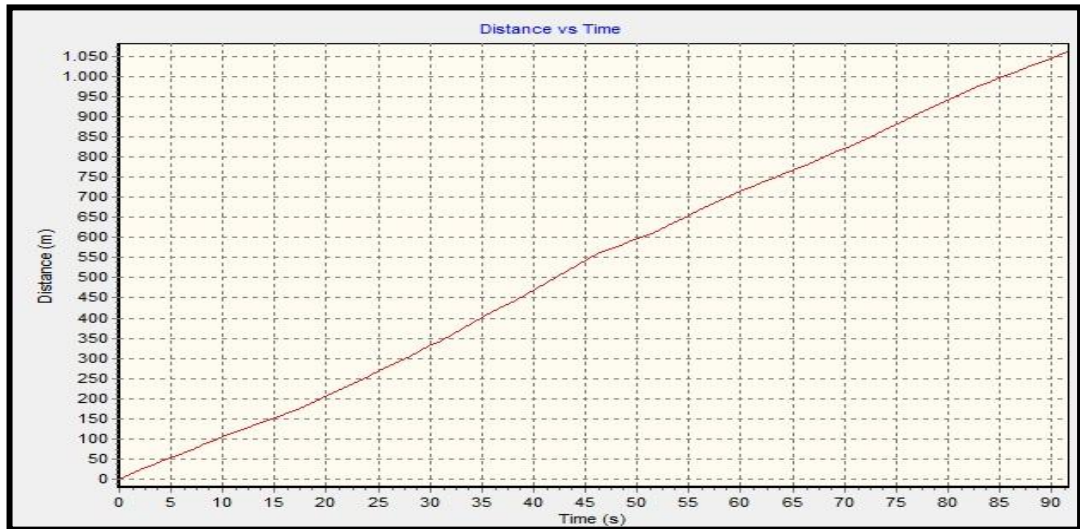
EK 5 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 no'lu Deformasyon Noktalarından Geçen 5 Farklı Sürücü Profiline Ait Ortalama Mesafe-Zaman Grafikleri



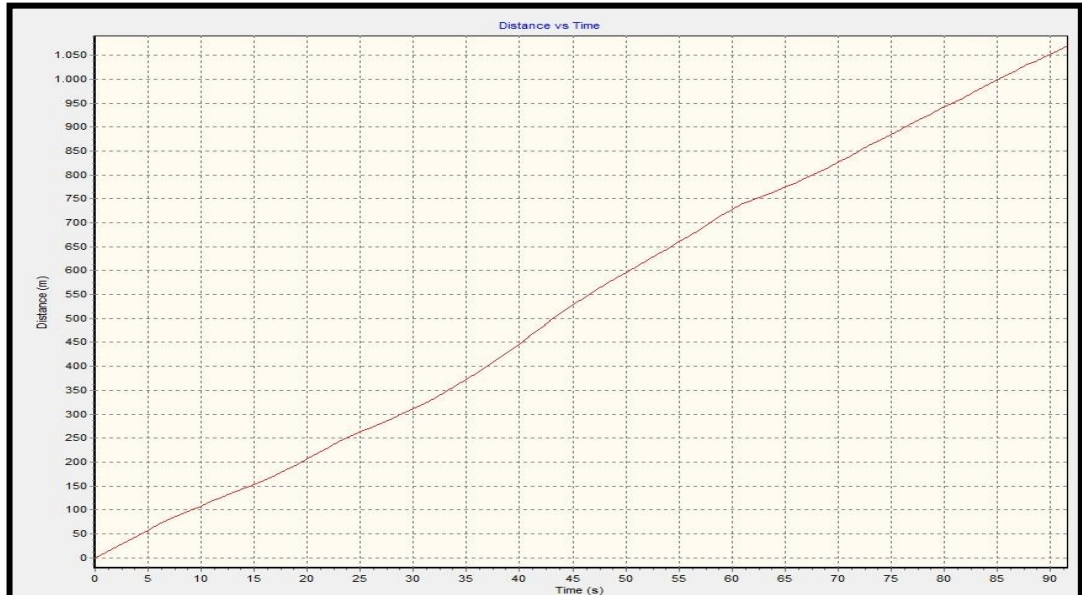
**SÜRÜCÜ 1**



**SÜRÜCÜ 2**

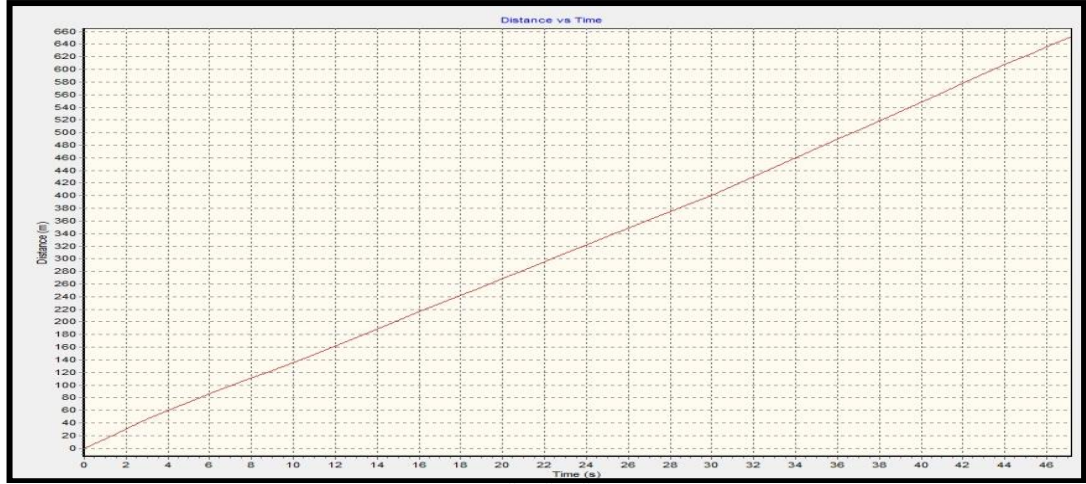


**SÜRÜCÜ 3**

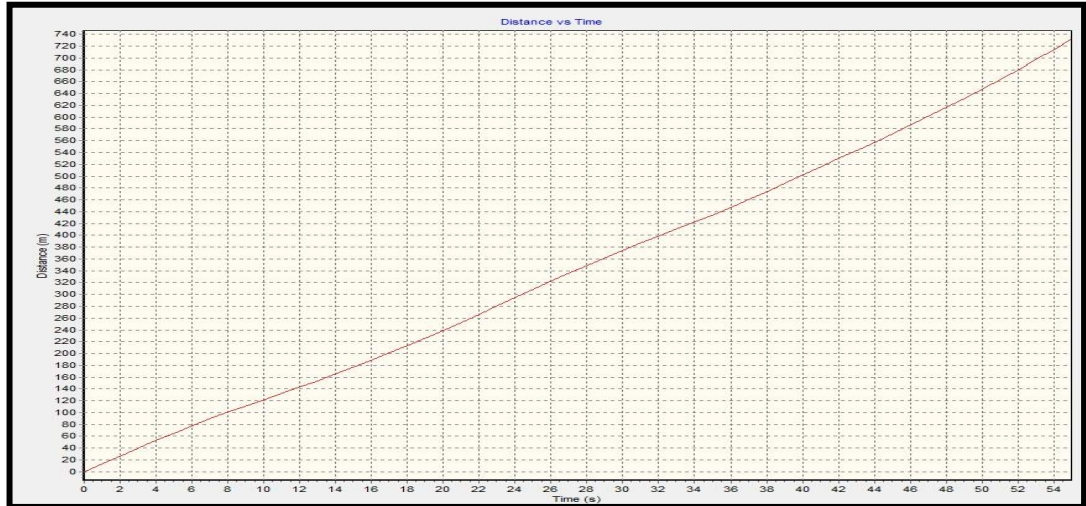
*SÜRÜCÜ 4**SÜRÜCÜ 5*



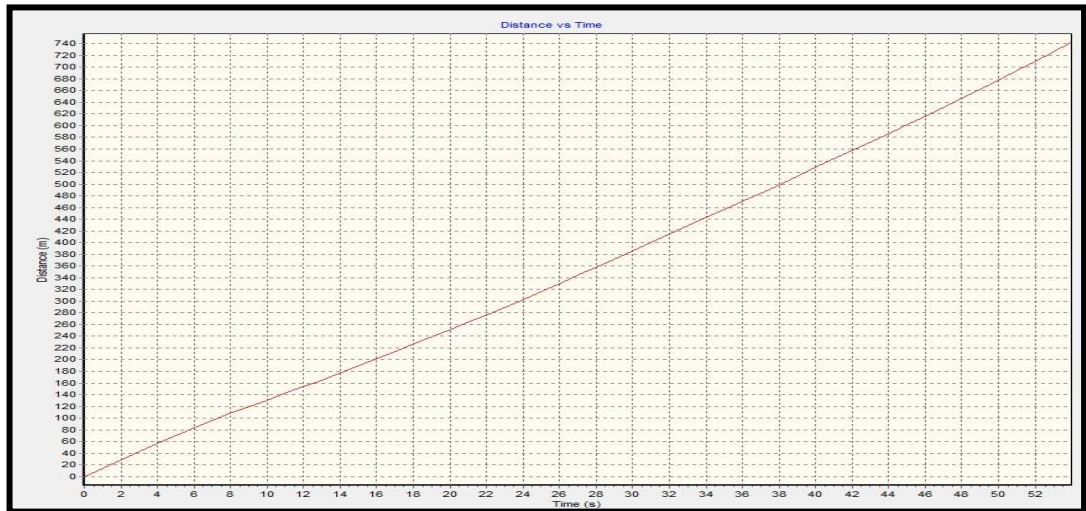
EK 6 7, 8 ve 9 no'lu Deformasyon Noktalarından Geçen 5 Farklı Sürücü Profiline Ait Ortalama Mesafe-Zaman Grafikleri



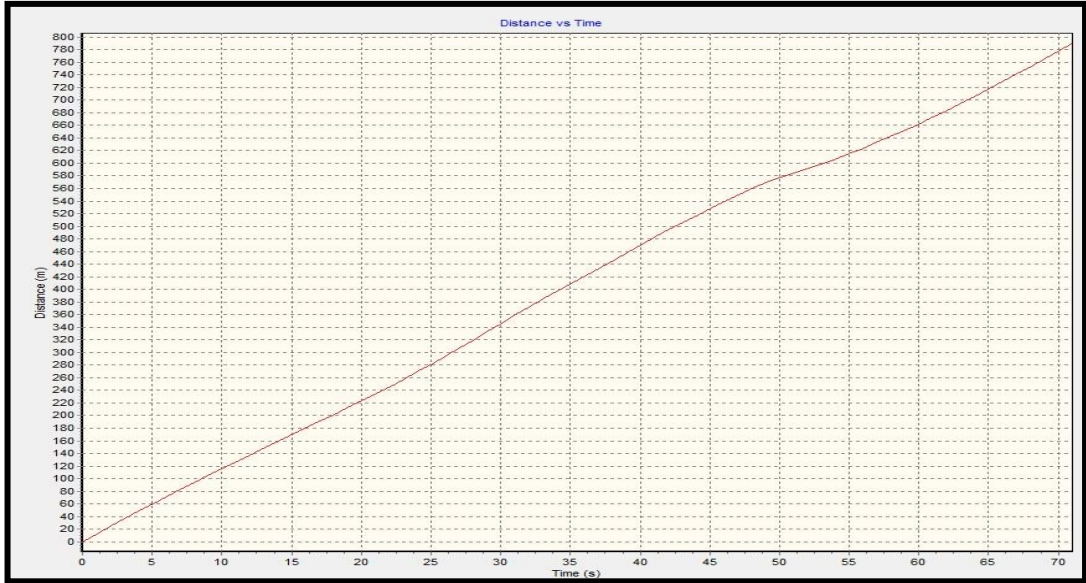
**SÜRÜCÜ 1**



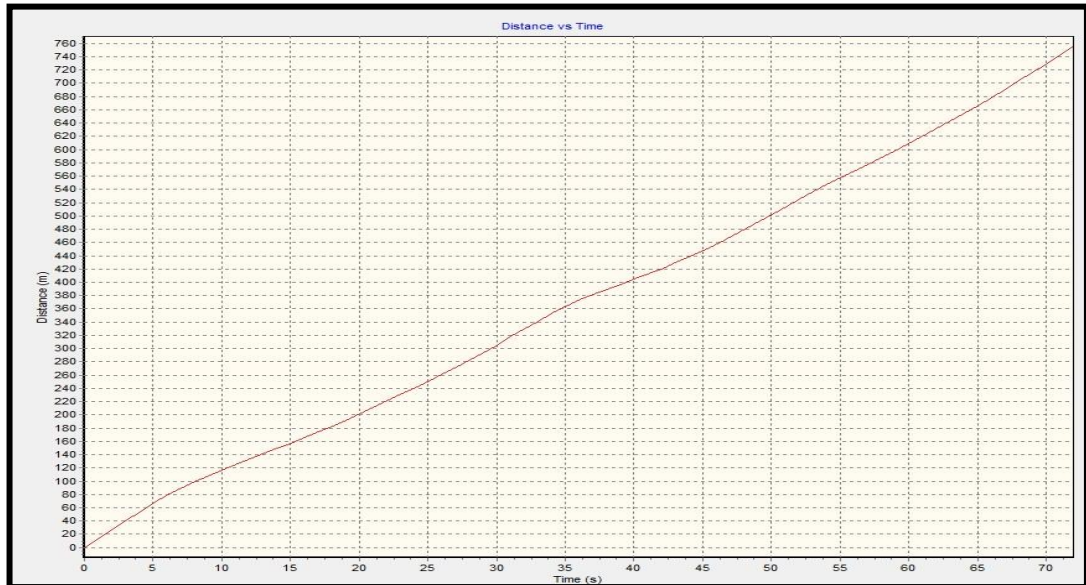
**SÜRÜCÜ 2**



**SÜRÜCÜ 3**



SÜRÜCÜ 4



SÜRÜCÜ 5