

**HIZ TÜMSEKLERİNİN TAŞIT TİTREŞİM TEKNİĞİ
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak.Müh. Mehmet GÜRER
(503031012)**

Tezin enstitüye verildiği tarih : 19.12.2005
Tezin savunulduğu tarih : 01.02.2006
Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet GÜNEY
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. İrfan YAVAŞLIOL
Prof.Dr. Ali G. GÖKTAN

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başından itibaren bana yol gösteren, araştırma ve uygulama aşamalarında büyük katkılar sağlayan tez danışmanım Prof.Dr. Ahmet Güney'e teşekkürlerimi sunarım.

Bana duydukları güven ve tez çalışması süresince esirgemedikleri sonsuz desteklerinden ötürü sevgili aileme minnet borçluyum.

Şubat 2006

Mehmet GÜRER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. TRAFİK SAKİNLEŞTİRME	3
2.1 Trafik Güvenliği	3
2.1.1 Trafik Güvenliği ve Hız İlişkisi	5
2.1.2 Trafik Güvenliğini Sağlama Yöntemleri	6
2.2 Trafik Sakinleştirme	8
2.2.1 Trafik Sakinleştirme Tarihi	8
2.2.2 Trafik Sakinleştirme Tipleri	10
2.2.2.1 Trafik Yoğunluğu Kontrol Araçları	11
2.2.2.2 Hız Kesiciler	11
2.2.3 Türkiye’de Trafik Sakinleştirme	12
3. HIZ TÜMSEKLERİ	13
3.1 Hız Tümsekleri Tipleri	13
3.1.1 Kısa Tümsekler	13
3.1.2 Uzun Tümsekler	14
3.1.3 Düz Tepeli Tümsekler	15
3.2 Hız Tümseklerinin Etkileri	16
3.2.1 Hız Tümseklerinin Olumlu Etkileri	16
3.2.2 Hız Tümseklerinin Olumsuz Etkileri	19
3.3 Hız Tümsekleriyle İlgili Yasal Sınırlar ve Standartlar	22
3.3.1 Yurtdışında Geçerli Sınırlamalar	22
3.3.2 TS 6283 Standardı	24
4. TAŞIT TİTREŞİMLERİ	26
4.1 Temel Titreşim Tekniği	26
4.1.1 Tek Kütleli Taşıt Modeli	26
4.1.1.1 Sistemin homojen çözümü	27
4.1.1.2 Sistemin özel çözümü	31
4.1.2 Çok Kütleli Taşıt Modeli	32
4.2 Taşıt Titreşimlerinin Etkileri	34
4.2.1 Titreşimlerin Araç Üzerindeki Etkileri	35
4.2.2 Titreşimlerin İnsanlar Üzerindeki Etkileri	36

4.2.2.1 Titreşim Genliğinin Etkileri	36
4.2.2.2 Titreşim Frekansı Etkileri	37
4.2.2.3 Titreşim Süresi Etkileri	39
5. HIZ TÜMSEKLERİNDE TİTREŞİM İNCELEMESİ	42
5.1 Hız Tümseği Tasarım Kriterleri	42
5.2 Hız Tümseği Geometrik Parametreleri	44
5.2.1 Uzunluk	44
5.2.2 Yükseklik	45
5.2.3 Profil	46
5.2.4 Genişlik	46
5.3 Hız Tümseği Optimizasyonu	47
5.3.1 Simülasyon Çalışmaları	47
5.3.2 Saha Ölçümü Çalışmaları	52
6. DENEYSEL DONANIM VE YÖNTEM	55
6.1 Ölçüm Donanımı	55
6.1.1 Veri Edinim Cihazı	55
6.1.2 İvme Ölçer	57
6.1.3 Bağlantı Elemanları	58
6.2 Ölçüm Yazılımı	58
6.3 Ölçüm ve Analiz Yöntemi	59
6.3.1 Hazırlık Aşaması	59
6.3.2 Ölçüm Aşaması	61
6.3.2.1 Uzun Tümsek Ölçümü	62
6.3.2.2 Kısa Tümsek Ölçümü	62
6.3.2.3 Kedi Gözü Ölçümü	63
6.3.3 Analiz Aşaması	63
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
7.1 Uzun Tümsek Bulguları	67
7.2 Kısa Tümsek Bulguları	69
7.3 Kedi Gözü Bulguları	71
7.4 Karşılaştırma	72
8. SONUÇ	76
KAYNAKLAR	78
EK A - DÜŞEY İVMENİN ZAMANLA DEĞİŞİMİ	81
EK B - DÜŞEY İVME FREKANS DAĞILIMLARI	86
ÖZGEÇMİŞ	96

KISALTMALAR

ARRB	: Australian Road Research Board
BS	: British Standards
CO	: Karbon Monoksit
CPB	: Constant Percentage Band
FFT	: Fast Fourier Transfrom
HC	: Hidrokarbon
ISO	: International Organization for Standardization
ITE	: Institute of Transportation Engineers
NO_x	: Azot Oksit
TOSB	: Taşıt Araçları Yan Sanayicileri Derneği Organize Sanayi Bölgesi
TRL	: Transport Research Laboratory
TRLL	: Transportation Research and Road Laboratory
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
VDV	: Vibration Dose Value

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1: 1980-1999 döneminde Türkiye’de meydana gelen trafik kazaları...	4
Tablo 2.2: Çeşitli ülkelerde 1999 yılında meydana gelen trafik kazaları.....	4
Tablo 3.1: Yüzde 85 hız seviyelerinin tümseklerle değişimi.....	17
Tablo 3.2: Trafik yoğunluğunun hız tümsekleri ile değişimi.....	18
Tablo 3.3: Acil durum araçlarının tümseklerde gecikme süreleri.....	20
Tablo 3.4: Hız tümsekler arasındaki mesafelere ait sınırlamalar.....	23
Tablo 4.1: ISO 2631-1 (1997) standardına göre titreşimler için frekans ağırlıklandırma faktörlerinin etkin oldukları eksenler.....	37
Tablo 4.2: ISO 2631 (1997) standardına göre ağırlıklandırılmış titreşimlerin etkin değerlerine bağlı rahatsızlık sınıflandırması.....	39
Tablo 5.1: Optimum hız tümsekleri boyutları.....	50
Tablo 5.2: Farklı hızlarda otomobil ve otobüs için ideal hız tümseği boyutları	52
Tablo 5.3: Tümsek tiplerine göre ivme ve hız değerleri.....	54
Tablo 7.1: Otomobilin farklı bölümlerinde oluşan maksimum ve etkin ivme değerleri.....	67
Tablo 7.2: Otomobilin farklı bölümlerinde oluşan rezonans büyüklükleri.....	69
Tablo 7.3: Uzun tümsekten geçen otomobilin farklı bölümlerinde oluşan maksimum ve etkin ivme değerlerinin ortalaması.....	69
Tablo 7.4: Kedi gözü dizisinden otomobilin farklı bölümlerinde oluşan maksimum ve etkin ivme değerlerinin ortalaması.....	71

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1:	Araç hızlarına ve yaya yaşlarına bağlı olarak kazalardaki yaya ölümleri..... 6
Şekil 2.2:	Tipik bir woonerf yolunun tasarımı..... 9
Şekil 3.1:	Watts tarafından tasarlanan ideal uzun hız tümseği kesidi..... 14
Şekil 3.2 :	Hız tümsekleri tipleri..... 16
Şekil 4.1:	Tek kütleli titreşim modeli..... 26
Şekil 4.2:	Farklı aşırı sönümleme oranlarında kütleli titreşim yolu grafiği... 28
Şekil 4.3:	Sönümlü tek kütleli sistemin titreşim yolu eğrisi..... 30
Şekil 4.4:	Tek kütleli sistemin büyütme fonksiyonu..... 32
Şekil 4.5:	Tek tekerlek üzerinde hareket eden çok kütleli taşıt modeli..... 33
Şekil 4.6:	ISO 2631-1 (1997) standardına göre frekans ağırlıklandırma eğrileri..... 38
Şekil 4.7:	ISO 2631-1 (1997) standardına göre frekans ağırlıklandırma eğrileri..... 38
Şekil 4.8:	ISO 2631 sınır titreşim genlikleri ile BS 6841’de geçerli $15 \text{ ms}^{-1.75}$ titreşim doz değeri eğrilerinin oturma pozisyonunda düşey eksen için değişimi..... 41
Şekil 5.1:	Düz tepeli tümsek için geometrik parametreler..... 44
Şekil 5.2:	Artan tümsek uzunluğunun (L) geometri ve ivme değişimine etkisi..... 45
Şekil 5.3:	Değişik çıkış rampası geometrileri..... 46
Şekil 5.4:	Taşıt-sürücü matematik modeli..... 48
Şekil 5.5:	Çok noktalı tümsek modeli için optimizasyon sonuçları..... 50
Şekil 5.6:	Kritik hız değişimine bağlı olarak değişen tümsek formu..... 51
Şekil 5.7:	Kritik ivme değişimine bağlı olarak değişen tümsek formu..... 51
Şekil 5.8:	Maksimum düşey ivme ve ortalama hız bağlantısı..... 53
Şekil 6.1:	Ölçüm sisteminin işleyiş şeması..... 55
Şekil 6.2:	Brüel&Kjaer veri edinim cihazı..... 56
Şekil 6.3:	Brüel&Kjaer 4396 model ivme ölçeri ve boyutları..... 57
Şekil 6.4:	Bağlantı elemanları: (a) UA 0642 mıknaatısı (b) 10-32 UNF bağlantı kablosu (c) UNF/BNC adaptörü..... 58
Şekil 6.5:	Ölçüm için hazırlanan kurulum ekranı..... 60
Şekil 6.6:	Otomobilin farklı bölgelerine yerleştirilen ivme ölçerler: (a) Aks (b) Gövde (c) Koltuk..... 61
Şekil 6.7:	TOSB’de bulunan TSE 6283 standardına uygun hız tümsekleri.... 62
Şekil 6.8:	İTÜ Maslak Kampüsü’nde yer alan kısa tümsek ve boyutları..... 63
Şekil 6.9:	İTÜ Maslak kampüsünde yer alan kedi gözleri ve boyutları..... 63

Şekil 6.10:	İvme değişimi üzerinde sırayla zaman değişimi ve Fourier dönüşüm analizörlerinin uygulanışı.....	64
Şekil 7.1:	Uzun tümsekten 25 km/saat hızla geçen otomobilde düşey ivme genlikleri.....	66
Şekil 7.2:	Uzun tümsekten 25 km/saat hızla geçen otomobil aksında frekans analizi.....	66
Şekil 7.3:	Araçta oluşan maksimum ivme genliklerinin hıza bağlı değişimi...	67
Şekil 7.4:	Araçta oluşan etkin ivme genliklerinin hıza bağlı değişimi.....	68
Şekil 7.5:	Araçta oluşan maksimum ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi.....	70
Şekil 7.6:	Araçta oluşan etkin ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi.....	70
Şekil 7.7:	Araçta oluşan maksimum ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi.....	71
Şekil 7.8:	Araçta oluşan etkin ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi.....	72
Şekil 7.9:	Farklı tümsekler için aks üzerindeki maksimum ivme genliğinin değişimi.....	73
Şekil 7.10:	Farklı tümsekler için gövdedeki etkin ivme genliğinin değişimi....	74

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{a}$	: Hareket vektörü genliği
$\mathbf{a}_1$	: Başlangıç koşulu sabiti
$\mathbf{a}_{\text{mak}}$	: Araçta oluşan maksimum düşey ivme
$\mathbf{a}_n$	: Etkin ivme değeri
$\mathbf{a}_{xz}$	: Yatay ve düşey eksen toplam etkin değeri
$\mathbf{a}1$	: Kritik hızın altında sürücünün kafa bölgesindeki düşey ivme
$\mathbf{a}2$	: Kritik hızın üstünde sürücünün kafa bölgesindeki düşey ivme
$\mathbf{B}, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$	: Başlangıç koşulu sabitleri
$\mathbf{c}$	: Sönüm katsayısı
$\mathbf{c}_c$	: Kritik sönümleme katsayısı
$\mathbf{c}_g$	: Gövde sönüm katsayısı
$\mathbf{c}_k$	: Koltuk sönüm katsayısı
$\mathbf{CC}$	: Kritik ivme değeri
$\mathbf{CS}$	: Kritik hız değeri
$\mathbf{F}_0$	: Yol düzgünsüzlüğü kuvvet genliği
$\mathbf{F}_1$	: Yol düzgünsüzlüğü kuvveti
$\mathbf{F}_{\text{sönüm}}$	: Sönüm kuvveti
$\mathbf{F}_{\text{yay}}$	: Yay kuvveti
$\mathbf{F}_z$	: Tekerlek yükü
$\mathbf{F}_{z,\text{st}}$	: Statik tekerlek yükü
$\mathbf{F}_{z,\text{din}}$	: Dinamik tekerlek yükü
$\mathbf{h}$	: Yol uyarısı
$\mathbf{h}_t$	: Tümsek yüksekliği
$\mathbf{h}_0$	: Yol uyarısı genliği
$\mathbf{K}_0$	: Regresyon doğrusu sabiti
$\mathbf{K}_1$	: Regresyon doğrusu eğimi
$\mathbf{k}$	: Yay katsayısı
$\mathbf{k}_g$	: Gövde yay katsayısı
$\mathbf{k}_k$	: Koltuk yay katsayısı
$\mathbf{k}_t$	: Tekerlek yay katsayısı
$\mathbf{L}$	: Tümsek uzunluğu
$\mathbf{m}$	: Taşıt kütlesi
$\mathbf{M}_g$	: Gövde ağırlığı
$\mathbf{M}_k$	: Koltuk ağırlığı
$\mathbf{M}_t$	: Tekerlek ağırlığı
ω_d	: Sönümlenmiş sistemin doğal frekansı
ω_n	: Sönümsüz sistemin doğal frekansı
$\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$	: Tek kütleli taşıt modeli homojen denklem kökleri
σ_z	: Tekerlek yükü standart sapması
$\mathbf{T}_d, \mathbf{T}_n$	: Titreşim hareketi salınım periyodları
$\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3$	: Tümsek rampa ve düzlük uzunlukları
$\mathbf{W}_{c/d/f/i/k}$	: Frekans ağırlıklandırma faktörleri

z	: Taşıt yer değişimi
z₀	: Taşıt hareket genliği
z₁	: Tekerlek yer değişimi
z₂	: Gövde yer değişimi
z₃	: Koltuk yer değişimi
ζ	: Sönüm oranı

HIZ TÜMSEKLERİNİN TAŞIT TİTREŞİM TEKNİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

ÖZET

Hız tümseklere, trafikteki yüksek hızları ve aşırı yoğunlukları engellemek üzere yollar üzerinde oluşturulan ve genel olarak trafik sakinleştirme adı verilen fiziksel engeller arasında en sık kullanılan uygulamalardan biridir. Yollar üzerinde belirli bir uzunluk boyunca tümsek yaratmanın temel amacı bu bölgeden geçen araçların hızlarını azaltmalarını sağlamaktır. Bu tez çalışması, hız tmseklereinin otomobiller üzerinde yarattığı etkinin incelenmesi amaçlamaktadır.

Sürücüler tümseklere üzerinden düşük hızlarda geçerlerse, taşıt üzerine etkiyen düşey ivmeler düşük değerlerde kalacak ve araçta bulunanlar az rahatsızlık duyacaklardır. Hız tmseklereinin etkin işlev görebilmesi için, geçiş hızı yüksek taşıtlardaki kişilerin belirgin bir rahatsızlık hissetmeleri gerekmektedir. Çoğu hız tümseği modeli yüksek hızlarda gerekli rahatsızlık oranını yakalayabilmektedir, fakat bu durum iyi bir tümsek tasarımı için yeterli değildir. Kısa tümseklere, yüksek hızlarda uyguladıkları genliklere yakın düşey ivmeleri düşük hızlarda da sağlamaktadırlar. Bu nedenle, kısa tümseklere sürücülerin gelmeleri istenen hız sınırlarını tam olarak belirleyememektedir. Uzun tümseklere ise limit hız seviyesine kadar düşük miktarlarda ivme genliğine sebep olurken, artan hız ile birlikte araçta oluşan ivme değerlerinde ani bir artış görülmektedir. Uzun tümseklere kullanımının dünya çapında daha yaygın olmasının sebebi de budur.

Hız tmseklereinin araçlar üzerinde yarattığı etkilerin anlaşılması için genellikle ölçülen ivme genliklerinin etkin değerlerine bakılmaktadır. Araç içi titreşim ölçümleri için okunacak etkin ivme büyüklükleri konfor kriterleri açısından değerlendirme yapılmasını sağlayacaktır. Aracın aks veya gövdesinde okunacak ivme büyüklükleri ve özellikle de maksimum değerleri ise, olası bir hasarın veya doğabilecek güvenlik sorunlarının habercisidirler.

Tez çalışmasında, uzun ve kısa olmak üzere iki farklı tümsek tipi ile küçük yol butonlarının üzerinden geçen otomobillerde düşey ivme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Taşıtların koltuk, gövde ve aksından alınan sinyaller işlenerek bilgisayar ortamına aktarılmış ve zamana bağlı titreşim değişimleri kaydedilmiştir. Bu veriler sayesinde tümseği geçiş sırasında araçta oluşan maksimum ve etkin ivme değerleri grlmştir. Böylece, hangi tümsek tasarımının daha etkin sonuçlar doğuracağı incelenmiştir. Ayrıca, araçta oluşan titreşimlerin frekans analizi yapılmış ve farklı bölgelerde oluşan ivmelerin frekansları saptanmıştır.

OBSERVATION OF SPEED HUMP ORIGINATED VIBRATION ON VEHICLES

SUMMARY

Speed humps are one of the most common physical obstacles placed on roads which are generally classified as traffic calming measures and intends to reduce high traffic speeds and volumes. Main objective of placing a hump along a road is to make the vehicles passing through that way slow down. The thesis is aiming to investigate the effects of speed hump generated vibration on vehicles.

Vertical acceleration on the car will take low values if driver passes a speed hump slowly, thus passengers wouldn't be highly discomforted. In order to provide a correctly affecting speed hump design, high discomfort rates must be given to speeding drivers. Many speed reducers located on roads can supply lack of comfort in adequate amount, but this is not enough when a good hump design is desired. Speed bumps cause almost same level of accelerations on a vehicle at both high and low speed crossing situations. That is why speed bumps cannot precisely set the speed limits which the driver should decelerate to. However, speed humps giving little vibration pulses to slow going vehicles, releases its potential of raising the vertical accelerations up quickly on the car whenever drivers tends to speed. This is the reason bringing about a widespread usage of speed humps throughout the world.

Root mean squared values of vertical accelerations are commonly chosen for comprehending the impacts of vibrations brought out by humps. Evaluation of comfort condition in a vehicle can be performed by examining the root mean square of accelerations measured inside the car. The maximum or mean vertical acceleration amplitudes gauged on the axle or body of a vehicle are thought to be notifiers of a possible damage or safety problem.

In the thesis, vertical accelerations of cars were measured while passing through a speed hump, a speed bump and a series of cat's eyes. Signals taken from the accelerometers mounted on seat, body and front axle were transferred to a computer and vertical acceleration changes on time domain were recorded. Thus, the closeness of the two speed reducer models to the optimum hump design was seen at the end of the calculations. Besides, frequency analysis of the vibration on the vehicle was derived and the frequencies of vibration at different locations were obtained.

1. GİRİŞ

Dünyanın tüm gelişmiş ülkelerinde, aşırı trafik yoğunluğu ve yüksek hızla yol alan araçlardan kaynaklanan güvenlik sorunları ve maddi hasarların önüne geçebilmek için birçok önlem alınmaktadır. Bu önlemlerden, yollarda çeşitli fiziksel değişiklikler yaratmaya dayalı olanlara genel olarak trafik sakinleştirme adı verilmektedir. Trafik sakinleştirme uygulamaları sınıflandırılırken, yoğunluk veya hız azaltmaya yönelik tedbirler şeklinde iki alt grup tanımlanır. Yoğunluk azaltmaya yönelik önlemler, araçların düz bir çizgide gitmelerini engellemek üzere yol üzerinde bulunan engellerdir. Hız kesicilerin en yaygın kullanılan biçimi olan tümseklerde ise durum farklıdır. Bir hız tümseğinin etki mekanizması üzerinden geçen araca kuvvet uygulayarak işler. Bu sebeple hız tümsekleri aracın dinamik hareketine doğrudan etki etmektedir.

Hız tümsekleri kendi içinde çeşitli alt gruplara ayrılmaktadır. Bunlardan en temel olanları; kısa tümsekler, uzun tümsekler ve düz tepeli tümseklerdir. Kısa tümsek modelinin uzunluğu genellikle araç aksına göre çok küçük kalmaktadır. Bu durum ve aynı zamanda yüksekliğin sebep olduğu dik eğimli rampalar sonucunda, kısa tümsekten geçen araçlara her hız seviyesinde yüksek ivme genlikleri etki etmektedir. Kısa tümseğin uyguladığı yüksek ivmeler, hız düşürmede başarılı oluşunu beraberinde getirmemektedir. Bunun nedeni, artan hızla beraber tümseğin uyguladığı ivme miktarının fazla değişmemesidir. Yavaş giden araçları da neredeyse hız yapanlar kadar cezalandıran bu engel tipi, bu nedenlerle çoğu ülkede kullanılmamaktadır.

Kısa tümseğin sahip olduğu olumsuz özellikleri ortadan kaldıran, uzun tümsek adında bir model, 1973 yılında G.R.Watts tarafından sunulmuştur. Kısa tümsek ile kıyaslandığında, yol boyunca çok daha uzun olan bu tümsek yoğunlukla otomobilin aks mesafesi ile aynı uzunlukta olmaktadır. Uzun tümsek üzerinden normal hızlarda geçen araçlarda düşük genlikli ivmeler oluşmaktadır ve belirlenen bir limit hız aşıldığında araca uygulanan ivme değerleri hızla yükselmeye başlamaktadır. Bu sayede yavaş giden sürücüler hız tümseğinin etkisini minimum seviyede hissederken,

hızlı giden araç sürücüleri rahatsız olarak yavaşlama gereği duymaktadır. Tümsek için geçerli hız limitleri, tümseğin konulacağı yolda gelinmesi istenen hızlar temel alınarak belirlenir ve bu değer tümsek tasarımını etkiler. Uzun tümseklerin bir başka çeşidi ise, üzeri dairesel olmayıp düz bir zemin şeklinde uzanan ve adına düz tepeli tümsek denilen tiptir. Düz tepeli tümsekler en uzun tümsek grubunu oluşturmaktadır ve limit hızları diğer modellere göre daha yüksektir.

Hız tümseklerinin araçlar ve taşıt konforu üzerindeki etkisinin incelenmesi için kullanılabilecek çeşitli veriler bulunmaktadır. Bunlardan biri araçta ölçülen ivmenin maksimum genlikleridir. Sürücü ve yolcuların hissedeceği rahatsızlık miktarı ile araçtaki maksimum ivme değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu savunan çalışmalar mevcuttur. Bunun aksini savunan diğer bazı çalışmalar ise konforla ilişki kurulabilecek en uygun parametrenin tümsek geçiş süresi boyunca gelen ivmenin ağırlıklandırılmış etkin değeri olduğunu belirtmektedir.

Bu çalışmada, iki farklı hız tümseği üzerinde inceleme yapılacaktır. Bunlardan biri TS 6283 hız tümsekleri standardına uygun uzun tümsek, diğeri ise kısa tümsektir. Bunların haricinde kedi gözlerinden oluşan bir serinin de üzerinden geçilerek, etkileri incelenecektir. Yapılan ölçümlerin tümünde aks ve gövdeye birer ivme ölçer yerleştirilmiştir. Uzun tümsek için yapılacak ölçümde üçüncü bir ivme ölçer koltuk titreşimlerini ölçmek için kullanılmıştır. İvme ölçerler, veri edinim cihazına titreşimler nedeniyle ürettikleri elektrik sinyalini aktarmaktadır. Veri edinim cihazı ise gelen bu sinyalleri işleyerek dijital veriye dönüştürür ve eş zamanlı olarak bilgisayar üzerinde çalışmakta olan Pulse yazılımına aktarır. Bu yazılım aldığı verileri kaydetmekte ve aynı anda işlemektedir. Ölçümler tamamlandıktan sonra ise yazılım kullanılarak alınan veriler üzerinde detaylı incelemeler yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, uzun ve kısa tümseklerin araçlarda yarattıkları etkilerin incelenerek karakteristiklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylece iki tümsekten hangisinin optimum özelliklere daha yakın olduğu da görülebilecek ve farklılıkları üzerine yorum yapılabilir.

2. TRAFİK SAKİNLEŞTİRME

2.1 Trafik Güvenliği

Dünya çapında 20. yüzyıl boyunca hızla gelişerek büyüyen otomobil ve diğer motorlu karayolu taşıtları sanayii ile birlikte ulaşımda kazanılan hız ve kolaylığın ardından öncelikle gelişmiş ülkelerin büyük şehirleri, akabinde de gelişmekte olan ülkeler araç trafiği kavramıyla tanışmıştır. Günümüzde şehir hayatının önemli bir parçası haline gelen trafik; toplum ve çevreyi birçok yönden etkilemektedir. Bu etkilerin en önemlilerinden biri, trafikte araçlarıyla veya yaya olarak yer alan kişilerin can güvenliği sorunudur.

İngiltere’de, 1950 yılında, günde ortalama 550 kişi trafik kazalarında yaralanıyordu ve bunların içinde 14 tanesi ölümcül yaralanmalara maruz kalıyordu. Ülke çapında trafik kazalarını azaltmaya yönelik önlemlerin arttırılmasına karşın trafik boyutlarındaki hızlı büyüme nedeniyle, 1966 yılına gelindiğinde hergün 22 kişi trafik kazaları sebebiyle yaşamını yitirmekteydi. 1999 yılındaki trafik seviyesi 50 yıl öncesine göre 10 kat fazla olsa da, alınan önlemler sonucu günlük ölüm sayısı 9.5 olacak şekilde gerilemişti [1].

Türkiye’de 1980 ile 1999 yılları arasında meydana gelen trafik kazaları ilgili veriler Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Buna göre, 1980’de 36.914 olan kaza sayısı 1999’da 438.338 adede çıkmıştır ve bu süre içinde trafik kazalarının ortalama yıllık artış hızı %17 olmuştur [2]. Bu 20 yıllık zaman diliminde, kazalarda ölenlerin sayısı ilk yıllarda artan kaza sayısına paralel olarak hızlı bir artış göstermiş; kazalarda günlük ölüm sayısının 20 kişinin üzerine çıktığı 1987 yılından itibaren ise kaza sayısındaki artışın devam etmesine rağmen kazalarda ölenler dönemin başındaki sayılara doğru gerilemiştir. Yaralananların kaza sayısına oranı 1980’de %66 iken, 1989 yılına kadar sürekli artış göstermiş ve aynı yıl ulaştığı %77 oranının ardından düşüşe geçmiştir. Bu oran 1999 yılında %25 olarak görülmektedir.

Tablo 2.1: 1980-1999 döneminde Türkiye’de meydana gelen trafik kazaları [2]

Yıllar	Kaza Sayısı	Ölü Sayısı	Yaralı Sayısı	Maddi Hasar Miktarı (\$)
1980	36.914	4.199	24.608	26.975.551
1981	40.953	4.441	29.744	25.262.837
1982	46.249	4.884	35.976	24.919.543
1983	55.208	5.207	44.769	27.988.064
1984	60.840	5.731	50.521	25.765.732
1985	65.831	5.680	51.586	29.543.888
1986	92.625	7.315	71.264	51.617.404
1987	110.207	7.530	80.321	70.517.061
1988	107.651	6.846	79.174	69.394.070
1989	103.758	6.332	80.013	82.058.905
1990	115.295	6.286	87.693	111.836.782
1991	142.145	6.231	90.520	119.267.346
1992	171.741	6.214	94.824	132.776.375
1993	208.823	6.457	104.330	156.782.527
1994	233.803	5.942	104.717	124.453.944
1995	279.663	6.004	114.319	165.840.235
1996	344.641	5.428	104.599	200.525.273
1997	387.533	5.181	106.146	222.862.434
1998	440.149	4.935	114.552	355.509.589
1999	438.338	4.596	109.899	261.200.321
Toplam	3.482.367	115.433	1.579.575	2.285.097.881

1999 yılında çeşitli ülkelerde meydana gelen kazalara ait veriler Tablo 2.2’de yer almaktadır. Bu verilere göre söz konusu sene için Türkiye’de ölümlü ve yaralanmalı kaza sayısının nüfusa oranı düşük görünmektedir. Fakat, 100.000 araca düşen ölü sayısı bakımından Türkiye, adı geçen ülkeler arasında 2. sırada yer almaktadır [2].

Tablo 2.2: Çeşitli ülkelerde 1999 yılında meydana gelen trafik kazaları [2]

Ülkeler	Kaza Sayısı(Ölümlü +Yaralanmalı)	Ölü Sayısı	Yaralı Sayısı	Araç Sayısı	Nüfus Miktarı
Almanya	395.689	7.772	521.127	50.609.000	82.037.000
Çek C.	26.918	1.455	34.710	4.716.000	10.290.000
Finlandiya	6.997	431	9.052	2.402.000	5.160.000
İspanya	97.811	5.738	142.894	22.411.000	39.394.000
İsveç	15.834	580	21.964	4.607.000	8.854.000
İsviçre	23.434	583	29.527	4.470.000	7.123.000
Japonya	850.363	10.372	1.049.031	77.810.000	126.686.000
Kore	275.938	10.756	402.967	13.083.000	46.430.000
Lüksemburg	1.062	58	1.507	305.000	429.000
Macaristan	18.923	1.306	24.670	2.706.000	10.092.000
Türkiye	63.515	4.596	109.899	8.837.403	64.385.000

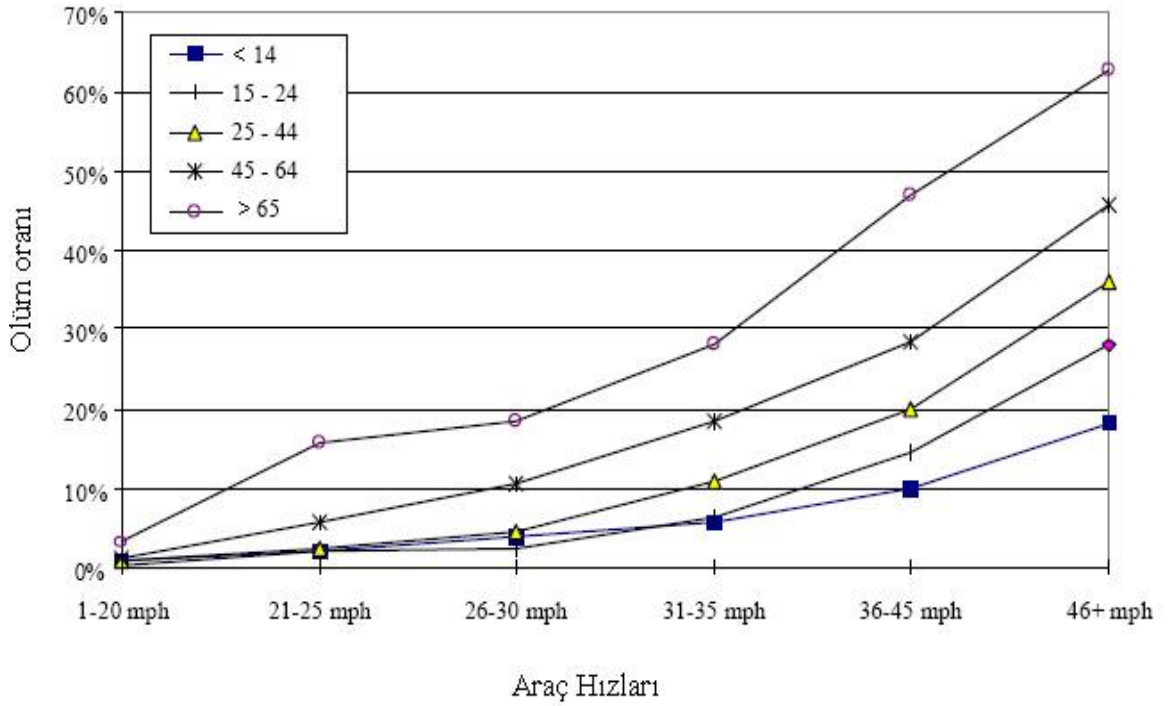
2.1.1 Trafik Güvenliği ve Hız İlişkisi

Trafik kazalarının meydana gelme olasılığı ve oluşan kazalardaki hasarın boyutlarını etkilemesi açısından taşıt hızları birinci derecede önemli rol oynamaktadır. Birçok fiziksel etken hız ile doğrudan ilişkilidir. Trafik kazalarının oluşma aşamasında en önemli etkenlerden biri fren mesafesidir. Bir aracın hızı arttıkça fren mesafesi artacak; yani sürücünün frene basmasının ardından araç daha uzun bir yol alarak durabilecektir. Bu da hızlı giden araçların kazalara daha çok yol açmasının başlıca sebebidir. Kazanın gerçekleştiği anda araçların sahip olduğu hızlar da kazanın şiddetini ve hasarın büyüklüğünü etkilemektedir. Bunun sebebi kinetik enerjinin hızın karesi ile doğru orantılı olarak artmasıdır [3].

Yaralanmalı kazaların büyük çoğunluğu 50, 70 ve 90 km/saat hız sınırlarının geçerli olduğu yollarda gerçekleşmektedir. Ciddi yaralanmalara maruz kalınan kazalar daha yüksek hız sınırlarının bulunduğu yollarda olmaktadır. Daha düşük hız sınırlarının geçerli olduğu yollarda trafik kazalarının etkileri düşük kalmakta, fakat bu yollarda da trafik kazası geçirme ihtimali yükselmektedir [3].

Trafikte yayanların dahil olduğu kazalarda hızın önemi daha da artmaktadır. Kazaların gerçekleşme hızları ve yayanların yaralanma seviyeleri arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere yapılan çalışmalar mevcuttur. Çarpışmalarda araç hızı 40 km/saat veya daha düşük olduğunda insan vücudu darbenin yarattığı enerjiyi emebilmekte ve bu hızlara kadar gerçekleşen kazalarda ölüm riski düşük kalmaktadır. Bir yayanın 30 km/saat hızda gelen bir araç tarafından çarpılması durumunda ölüm ihtimali %5 seviyesinde kalırken, araç hızı 50 km/saat olduğunda yayanın kurtulma şansı %60 olmaktadır. Eğer araç 60 km/saat veya daha yüksek bir hızla çarparsa, yayanın yaşama olasılığı %30 dan düşüktür [4]. Florida’da 1993-1996 döneminde yayanların içinde bulunduğu trafik kazalarından %74’ünde kaza yapan araçların hızları belirlenebilmiştir. 23.831 yayanın dahil olduğu bu kazalarda farklı yaş gruplarında yayanların değışen hızdaki çarpışmalara bağlı ölüm oranları Şekil 2.1’de gösterilmiştir [5].

Trafikte yol alan bir araç grubunda ortalama seyir hızından sapma eğilimi ile kaza oranı arasında ciddi bağlantılar mevcuttur [6]. Bu durum ortalama trafik hızından daha düşük veya daha yüksek gitmekte olan taşıtlar için geçerlidir. Ortalama hızın üzerinde seyreden taşıtlar daha ciddi sonuçları olan kazalar doğuracaklardır. Yapılan çalışmalar, hız değışimlerinin 3 km/saat azaltılmasının toplam kaza sayısını %10 düşüreceğini ortaya koymuştur [3].



Şekil 2.1: Araç hızlarına ve yaya yaşlarına bağlı olarak kazalardaki yaya ölümleri [5]

2.1.2 Trafik Güvenliğini Sağlama Yöntemleri

Trafik kazalarının neredeyse tamamında otomobiller veya diğer ağır vasıtalar yer almaktadır. Bunun yanında bazı kazalarda yer alan yayalar, motorsiklet veya bisiklet sürücüleri, otomobil sürücülerinden farklı olarak zarar görmeye çok daha müsait durumdadırlar ve daha büyük tehlike altındadırlar. Trafik güvenliğini sağlamak üzere herhangi bir önlem alınmamış olsa bile otomobil sürücüleri araçlarındaki çeşitli aktif ve pasif güvenlik tedbirleri sayesinde ön korumaya sahip olacaklardır. Bu durum göz önüne alınıp trafikteki en korumasız durumda bulunanlar için belirli bir güvenlik seviyesi oluşturacak önlemlere gidilmelidir. Trafik güvenliği sağlama yöntemleri ilk olarak otomobil sürücülerini hedef alarak, araçlarını daha dikkatli sürmeye yönlendirmeli ve aşırı hız yapmaktan alıkoymalıdır.

Motorlu taşıt sürücülerinin aşırı hız yapmasını engellemeye yönelik en temel uygulama hız limitleri belirlenmiş bölgelerde araç hızlarını kontrol etmek ve limit hızı geçenleri cezalandırmak olacaktır. Bu uygulamanın başarıya ulaşabilmesi için sürücüler üzerinde devamlı olarak kontrol edildikleri baskısını oluşturmak gerekmekte ve maddi ceza miktarları trafik suçu işleyen kişileri maddi açıdan zorlayacak seviyede olmalıdır. Ayrıca, hız kontrollerini yapacak sistem veya ekipler, yolda kontrol yapıldığını belli eden ipuçları vermeyecek şekilde yerleşmelidirler [5].

Bir bölgede belirli zaman boyunca yapılan hız denetimlerine son verilmesinin ardından söz konusu yolda kaydedilmiş olan ortalama trafik hızındaki azalmanın ne kadar süreyle devam ettiğini ifade eden ve genellikle gün bazında gösterilen büyüklüğe “zaman hale etkisi” adı verilmiştir [7]. Yapılan bir araştırmada, gizlenmiş ya da belirgin polis arabaları, radar ve helikopterler ile yapılan hız denetimlerinin etkileri incelenmiştir [8]. Toplam 6 gün süren hız denetimlerinin ardından yapılan incelemeler ile helikopterli denetimin 17 gün, radar ve normal polis arabalarının ise 10 gün kadar süren hale etkisine sahip oldukları tespit edilmiştir. Gizli polis arabalarınınsa herhangi bir hale etkisi olmadığı belirlenmiştir.

Uygulanan cezalar ne kadar ağır olursa olsun hız kontrol uygulamasının trafik hızlarını kalıcı biçimde düşürmesi beklenmemelidir; ama kasten hız limit ihlali yapan kişileri cezalandırmak için kullanılmalıdır [9]. Hız denetimleri, sürücülerde uygun hızlarda gitme bilinci oluşturmaya da davranışlarını etkileyen bir dış etken olarak anlaşılmalıdır [10].

Sürücülerin hız sınırlarını aşmaları her zaman kasıtlı olmayabilir. Uzun süre aynı hızda gitmeye devam eden kişilerin mevcut hızlarını olduğundan daha az hissetme eğiliminde oldukları bilinmektedir. Bu durumu önlemek için yalnızca hız limitlerini bildiren trafik levhaları yeterli olmayabilir. Sürücüyü aktif olarak uyaracak görsel cihazların uygun bölgelere yerleştirilmesi daha etkin bir yöntemdir. Kırsal bölgede yapılan bir çalışmada limiti geçen sürücülere “Çok hızlı gidiyorsunuz” uyarısını gösteren bir panel kullanılmış ve bu sayede ortalama hızda 6 km/saat kadar bir azalma sağlanmıştır. Diğer bir aktif bilgilendirme çalışmasında, ekrandan trafikteki araçların yüzde kaçının hız sınırları içinde seyrettiği gösterilmiştir. Bu geri bildirim sonucunda ortalama hız %40 oranında azalmış ve hız ihlali yapan sürücülerin sayısı %50 düşürülmüştür [7].

Sürücülerin trafikteki davranışlarını düzenleyip kurallara uymalarını ve aşırı hızlarda araç kullanmamalarını sağlamak için yol levhaları ile uyarılarda bulunmak veya denetimler yaparak ceza kesmek belirli zaman aralıklarında olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Fakat, araç hızlarının devamlı düşük olması istenen yollarda yalnızca bu tür tedbirlere başvurmak etkili olmayacaktır. Sürücülerin hızlarını kendi isteklerinden veya cezalandırılma korkusundan bağımsız olarak, mecbur kaldıkları için belirli bir seviyede tutmalarını sağlamak için yolların tasarımında ve geometrik yapılarında değişiklik öngören trafik sakinleştirme metodları uygulanmaktadır.

2.2 Trafik Sakinleştirme

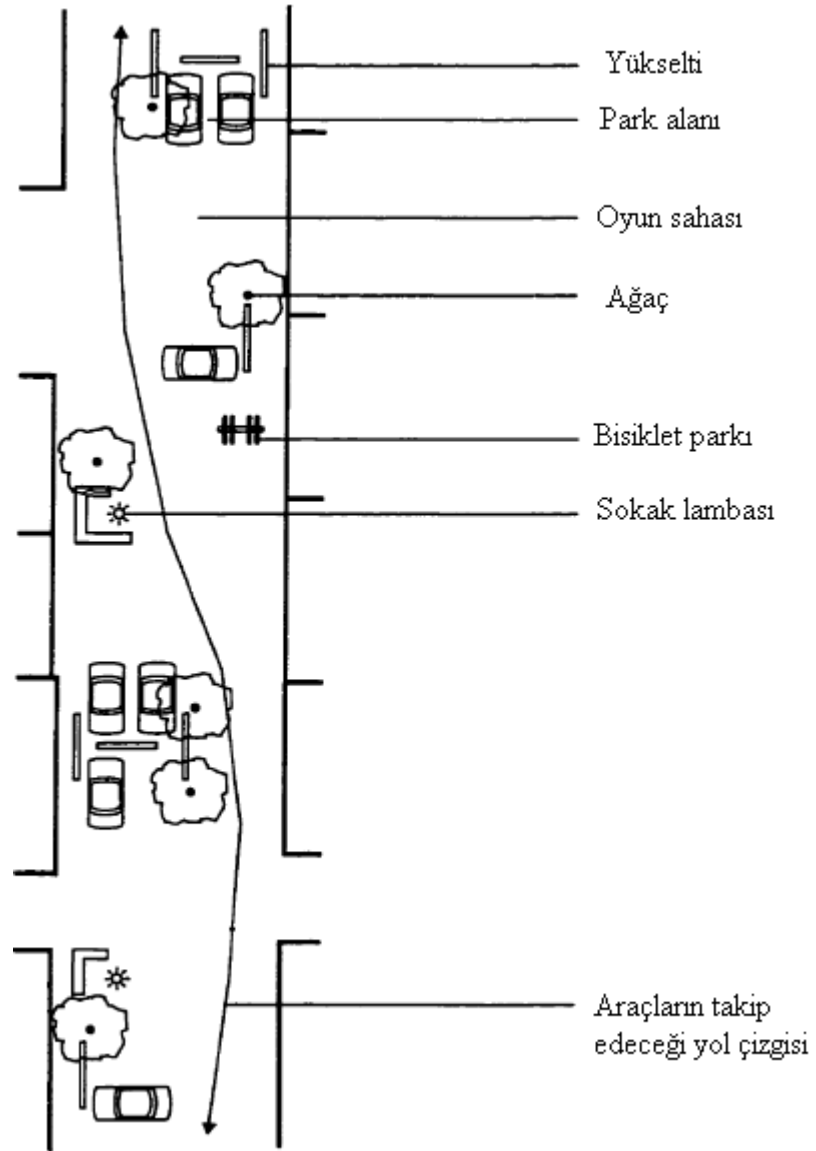
Trafik sakınleştirme; amacı, yöntemleri ve sonuçları çok tartışılan ve uzmanlar tarafından farklı şekillerde yorumlanabilen bir kavramdır. Bu nedenle trafik sakınleştirmeyi açıklayan tek bir tanım mevcut değildir. Tanımlamayı geniş boyutta düşünerek, trafik sakınleştirmenin trafikteki hız ve yoğunluğun azaltılıp farklı şekillerde yolda bulunan insanlar arasında daha iyi bir etkileşim sağlamak ve trafik güvenliğini arttırmak amacıyla uygulanan bir dizi metoda verilen isim olduğu söylenebilir [11]. ITE tarafından 1997 yılında yapılan tanımlamaya göre trafik sakınleştirme; motorlu taşıt kullanımının yarattığı olumsuz etkileri azaltan, sürücü davranışlarını değiştiren ve trafikte motorlu araç kullanmayan kişilerin durumlarını iyileştiren fiziksel tedbirlerin bileşimidir [12].

2.2.1 Trafik Sakinleştirme Tarihi

Avrupa ülkelerinde 2. dünya savaşının bitişiyle birlikte motorlu taşıtların kullanımı çok hızlı bir şekilde arttı. Ekonomik gelişme ile birlikte tüm mevcut yolları araç trafiğine uygun olacak şekilde yeniden düzenlemek için büyük çaba sarfedildi. Zamanla yollar genişledi, araç trafiğinin sıkışması gibi sorunlar aşılmıştı; fakat bu işlem sırasında yaya yolları daralmıştı. Bunun yanında, genişleyen yolların getirdiği artan trafik hızları nedeniyle daha önce göz önünde olmayan trafik güvenliği sorunu su yüzüne çıkmaya başladı [13]. Trafikte yaşanan güvenlik sorunlarını çözmeye yönelik adımların atılması için sorunun daha görülür bir hal alması ve yine trafiği sadece otomobilleri düşünerek düzenleyen anlayışın değişmesi gerekiyordu.

Trafik sakınleştirme fikri 20. yüzyılın ikinci yarısının ortalarında yaygınlaşacak olsa da, bir İngiliz lordu olan Robert Gascoyne-Cecil, 1928 yılında yayınladığı “Karayolu Taşıtları Düzenlemesi”nde, sürücüleri hızlarını düşürmek zorunda bırakmak için hız tümsekleri veya yol yüzeyine konulacak benzer aletlerin kullanımını önermiştir [14]. Aynı sene, Amerika Birleşik Devletleri’nin New Jersey eyaletinde, bir caddenin trafik ağı ile bağlantısının yasaklanması şeklindeki trafik güvenlik çalışması denemeleri yapılmış, fakat bu çabanın devamı gelmemiştir [13]. Colin Buchanan, 1963 yılında yayınladığı “Şehirlerde Trafik” adlı raporunda Lord Cecil’in düşüncelerini genişletmiştir. Raporda, trafiği düzenlemeye yönelik uygulamalara başlanması fikri sunulmuş ve caddelerin çevresel kapasitesi kavramı geliştirilmiştir [14].

Modern anlamda trafik sakinleştirme uygulamaları ilk olarak Hollanda'da kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yılların sonlarında ulaştırma yetkilileri halktan yerleşim semtlerinde trafiğin hızlandığı yönünde şikayetler almaya başladılar. Artan şikayetler üzerine ilk trafik sakinleştirme uygulaması olarak 7.6 cm yüksekliğinde bir hız tümseği, 1970 yılında Delft şehrinde dar bir sokağın sonuna yerleştirildi. Bunun ardından kısa süre içinde Rotterdam ve Utrecht gibi diğer Hollanda şehirlerinde de hız tümsekleri yerleştirilmeye başlandı [15].



Şekil 2.2: Tipik bir woonerf yolunun tasarımı [16]

Aynı yıllarda yollardaki hızdan şikayetçi durumdaki Delft halkı yeni bir çözüm üretti. Konutların bulunduğu yollarda trafiği yavaşlatmak için yolun çeşitli

bölgelerine engeller yerleştirilmişti. Şekil 2.2’de bir örneği görülen bu yollara “şehir avlusu” anlamına gelen woonerf adı verildi [16]. Yolların üzerinde yeşillendirme çalışmaları yapılmış, araçların ve bisikletlerin park edebilecekleri alanlar yaratılmış ve banklar gibi çeşitli şehir mobilyaları kullanılarak otomobillerin yol boyunca düz bir çizgide ilerlemeleri ve dolayısıyla hızlanmaları engellenmiştir. 1976 yılında woonerf tasarımı ile ilgili yönerge yayımlanmış ve Kuzey Avrupa’da düşük trafik erişimli cadde planlamasında yeni bir yol açmıştır [13].

Hollanda’nın büyük bölümü su seviyesinin altında olduğu için bu ülkede yolların düzenli olarak yeniden yapılandırılması rutin bir işlemdir ve bu işlemler sırasında da woonerf tipi dönüşümlerin uygulanması kolay olmuştur. Diğer Avrupa ülkelerinde ise yerleşim bölgelerindeki bütün yolları tümüyle yenilemek masraflı bir iş olduğundan, yolların temel yapısına dokunmadan trafiği sakinleştirecek hız tümseği, şikan, yol daraltma gibi engeller geliştirilmiştir. İngiltere’de 1970’lerin ortalarında ilk güvenli hız tümsekleri test edilmiştir [13]. Almanya ise 1977 yılında yol daraltıcıların ve tek yönlü yuvarlak kavşakların kullanımını denemeye başlamıştır [15]. Trafik sakinleştirme kavramı hızla Avrupa’ya yayılmış ve kısa süre içinde de diğer kıta ülkelerinde benzer çalışmalar gündeme gelmiştir. Günümüzde bu yöntemi en çok kullanan devletlerden biri olan ABD’de ilk olarak Berkeley şehri, 1975 yılında, geniş çaplı bir trafik sakinleştirme programını devreye sokmuştur [17].

2.2.2 Trafik Sakinleştirme Tipleri

Avustralya’nın Darwin şehrinde, 1990 yılında ARRB tarafından düzenlenen konferansta yapılan tartışmalar neticesinde trafik sakinleştirme çatısı oluşturulmuş ve yapılan tanımlama “Darwin matriksi” olarak adlandırılmıştır [18]. Bu matrikse göre trafik sakinleştirme üç temel seviyeye ayrılabilir. Birinci seviyedeki önlemler yerel yollarda araç hızlarını düşürmek ve bu bölgelerde trafik etkisini azaltmak üzerine odaklanmıştır. İkinci seviyede ise yerleşim bölgeleri yollarının dışındaki caddeler de ilgi alanına girer ve trafik kapasitesi gibi daha geniş çaplı konular ele alınır. Üçüncü seviyede trafik sakinleştirmenin büyük boyutlardaki etkileri, bir bölge veya şehrin tamamı baz alınarak incelenir [11]. Birinci seviyede yer alan uygulamalar trafik sakinleştirmenin en çok yoğunlaştığı alandır ve burada kullanılan yöntemler amaçları bakımından iki ayrı grupta toplanabilir. Bunlardan biri yerleşim bölgelerindeki yolların trafik yoğunluğunu düşürmek, diğeri de trafikteki hızları azaltmak için başvuru araçlarıdır [17].

2.2.2.1 Trafik Yoğunluğu Kontrol Araçları

Bu araçlar, arzu edilen bir bölgede trafik yoğunluğunun azaltılması için kullanılırlar. Örnek olarak, yerleşim alanında bulunan bir yolun, çok fazla aracın mevcut olduğu farklı bir güzergahın üzerinde veya alternatifi olarak yer alması durumu gösterilebilir. Yoğunluk kontrol araçları, sürücüleri bu çeşit transit geçişlerden vazgeçiren ya da bazı durumlarda geçişi tamamen engelleyen fiziksel araç ve sınırlamalardır [19].

Bu yöntemler arasında en çok tercih edilen tam veya yarı kapalı yollardır. Çıkmaz sokaklar ile yol tamamen kapatılabilirken, yolun diğer bir yolla kesiştiği yerde şeritlerden bir kısmı kısa mesafede kapanabilmektedir. Yarı kapalı yollar sayesinde yoldan dışarı çıkan taşıtlar için herhangi bir sınır olmazken, belirlenen bir yönden giriş kısıtlanmış olur. Böylece, herhangi bir yol çift yönlü trafiğe açık olduğu halde belirli bir güzergahtan gelen araçların girişi engellenmiş olur. Trafik yoğunluğunu azaltma amacıyla kullanılan diğer araçlar arasında refüjler ve tek yönlü kavşaklar sayılabilir [17].

2.2.2.2 Hız Kesiciler

Trafik sakinleştirme uygulamalarının bu tipi, araçların hızlarını düşürmeye yönelik olarak tasarlanırlar ve bazıları aynı zamanda trafik yoğunluğunu azaltma etkisi de gösterir. Bu tipteki gereçler kendi aralarında; yatay engeller, yol daraltma uygulamaları ve dikey engeller olacak şekilde üç ayrı grupta değerlendirilebilir [17].

Yatay engeller, otomobillerin düz bir doğrultuda ilerleyemeyerek yanal hareketler yapmalarını sağlayacak şekilde yola yerleştirilen barikatlardır. Otomobiller bu manevra sırasında kontrolü sağlayabilecekleri ve konforlarını bozmayacak hızlara inmek durumunda kalacaklardır. Bu uygulamalar arasında en yaygın olanlar olarak kullanılanlardan biri trafik daireleridir. Kavşaklarda yer alan yükseltilmiş yuvarlak dairelerin büyük araçların manevra yeteneğini kısımayacak şekilde tasarlanması gibi göz önüne alınması gerekli hususlar bulunsun da, özellikle ABD’de çok kullanılan yöntemlerdendir. Diğer bir yatay engel ise şikandır. Şikan, yolun iki yanındaki kaldırımlardan sırayla yola doğru çıkıntılar yaratmak suretiyle meydana getirilen suni virajlar serisidir. Araçlar böyle bir yoldan geçerken kıvrılan bir rota izleyecek ve yapacakları manevralar sırasında yavaşlayacaklardır. Yatay engellerle ilgili en büyük sorun yolun tekrar düzenlenmesinin getireceği yüksek masraflardır [17].

Yol daraltma uygulaması yolun iki kenarından çeşitli biçimlerde çıkarılan uzantılar sayesinde gerçekleştirilir. Araç hızlarının düşürülmesinin yanında yayaların karşıdan karşıya geçişlerindeki mesafe de kısaltılmış olur. Yine kaldırımdaki uzantılar ile yayaların yürüme yolu genişletilmiştir [17].

Dikey engeller ise, adından da anlaşıldığı gibi düz taşıt yolunun üzerinde yükseltilebilir oluşturularak yapılır. Otomobiller bu yükseltilebilirlerin üzerinden geçerken, sürücüler rahatsızlık duymamak için hızlarını azaltmak durumundadırlar. Bu engellere genel olarak hız tümsekleri adı verilmektedir. Ayrıca, yükseltilmiş yaya kaldırımları gibi farklı dikey engeller de mevcuttur.

2.2.3 Türkiye’de Trafik Sakinleştirme

Dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de trafik sakinleştirme uygulamaları yerel yönetimler tarafından oluşturulmalı ve işleyişleri kontrol edilmeli, uygun görülmeyenlerin yerine yeni tipler koyulmalıdır. Fakat, Türkiye’deki mevcut durum tam olarak bu şekilde işlememektedir. Uygulanan yüzeysel çözümler, yaya ve taşıtların sokak mekanında birbirinden kesin olarak ayrılması politikasında düşümlenmiştir. Yaya kaldırımları otomobiller lehine daraltılmış, kaldırımlar yükseltilmiş, ve yayaların geçişine ayrılan birçok alan park eden motorlu araçlar tarafından işgal edilmiştir [20].

Ülkemizde yıllardır etkin bir çözüm olamayan geleneksel trafik kısıtlama metotları yerine trafik sakinleştirme gibi kentsel mekan kalitesi ve trafik yönetimi politikalarını birlikte ele alan yeni yöntemler uygulanabilir. Etkin bir trafik sakinleştirme modelinin kurulmasında yerel halktan çeşitli çıkar gruplarına, belediyelerden çok sayıda kamu kuruluşuna ve merkezi yönetime kadar değişik kademeleri bir arada barındıran bir yapıya gereksinim vardır. Halk katılımının sağlanması ve uygulanacak trafik sakinleştirme şemasının başarısı için eğitim ve bilgilendirme şarttır [20].

3. HIZ TÜMSEKLERİ

Hız tümsekleri karayollarına yerleştirilen; belirli bir uzunluk, genişlik ve yükseklikte olan, çeşitli malzemelerden yapılmış bulunan yapay engellerdir. Temel amaçları yerleştirildikleri yollardaki trafik hızlarını azaltmaktır ve bunu da karayolu zemininden bir tepe oluşturacak şekilde yükselmeleri ile sağlarlar. Üzerlerinden geçen araçlara, sahip oldukları yükseklik miktarına bağlı olarak değişen genliklerde darbe uygularlar. Bu darbenin etkisinin yarattığı rahatsızlık hissini ortadan kaldırmak isteyen sürücüler hızlarını düşürmek durumunda kalırlar.

3.1 Hız Tümsekleri Tipleri

Hız tümsekleri, geometrik özellikleri dikkate alınarak çeşitli alt gruplara ayrılırlar. Her tmsektepi farklı karakteristik özelliklere sahiptir ve bunlar göz önüne alınarak uygun bölgelere yerleştirilmeleri gerekmektedir. Aksi halde, yapılan uygulamalar istenen seviyelerde hız düşürme etkisini sağlayamayacak ya da trafik hızını gereğinden fazla miktarda aşağı çekerek farklı sorunların ortaya çıkmasına sebebiyet verecektir.

3.1.1 Kısa Tümsekler

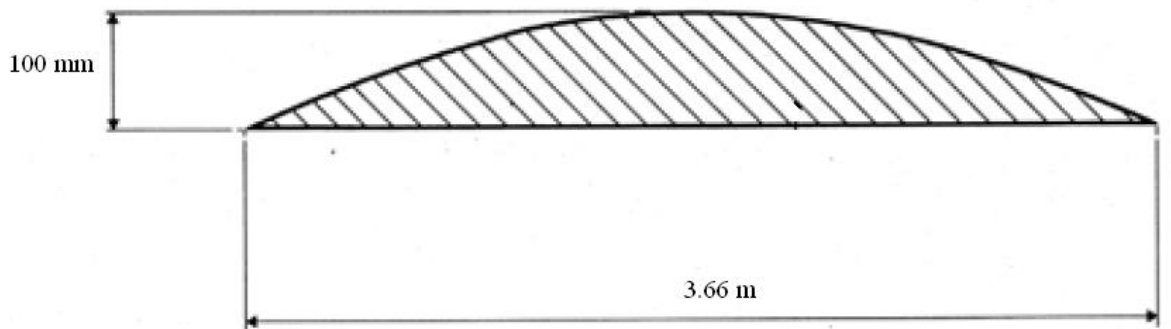
Kısa tümsekler (speed bumps), yükseklikleri 75-100 mm, uzunlukları ise trafiğin aktığı yn boyunca 300-900 mm aralığında bulunan engellerdir. Bu tmsektepi, özellikle uzunluğunun az olmasından dolayı sert darbeler yaratmakta ve bu nedenle birçok ülkede otoparklar ya da özel mülkiyet alanları dışında kullanılması yasaklanmaktadır. Otomobiller ve yolcularına zarar verme riski en yüksek olan kısa tümsekler, ülkemizde en yaygın olarak kullanılan hız kesici uygulama olmayı sürdürmektedir.

Kısa tümsekler, üzerlerinden oldukça düşük hızlarda geçildiği takdirde dahi araçta bulunanlarda belirgin rahatsızlık hissi yaratırlar. Bunun başlıca sebebi uzunluklarının otomobillerin aks mesafelerine oranla çok düşük kalmasıdır. Bu durumda tümseğin,

100 mm seviyesinde olabilen maksimum yüksekliklere, yol boyunca yer aldığı kısa aralıkta ulaşması için genellikle dairesel formda olan sert eğimli iniş ve çıkış rampalarından oluşması gerekmektedir. Ani yükseklik değişimleri de araçtaki düşey ivmelerin yükselmesine ve tümseğin yarattığı rahatsızlık etkisinin düşük hızlarda gerektiğinden fazla olmasına yol açmaktadır. Fakat, kötü tasarımı bu tümseklerden geçen araçların artan hızları ile birlikte araçta hissedilen rahatsızlık istenilen biçimde artmamaktadır. Hatta bazı kısa tümseklerin üzerinden daha hızlı geçen arabalardaki düşey ivmelerin süspansiyon sistemindeki sönümleme nedeniyle azalması muhtemeldir [16].

3.1.2 Uzun Tümsekler

Kısa tümseklerin otomobiller ve yolcular açısından yarattığı olumsuz etkileri azaltmak amacıyla yeni hız tümseklerinin tasarımı için başlatılan çalışmalar sonucunda birçok değişik model ortaya çıkmıştır. İngiltere’de TRLL tarafından yürütülen çalışmalar neticesinde, G.R.Watts 1973 yılında hız kontrolünü sağlamak için yol boyunca daha uzun olan tümsekler kullanmanın uygun olacağı sonucuna varmıştır. G.R. Watts’ın araştırmalarında elde ettiği bulgulara göre, araçları 25 km/saat hız seviyesine getirecek ideal bir tümseğin 3.66 m boyunda ve 100 mm yüksekliğinde olması gerekiyordu [3]. Bu çalışmayla beraber İngiltere’de bu tip uzun tümseklerin (speed humps) yollarda deneme amaçlı kullanımlarına başlanmış ve alınan başarılı sonuçların ardından benzer tasarımlar diğer ülkelerde de kullanılmıştır. Şekil 3.1’de Watts tasarımı uzun tümsek görülmektedir.



Şekil 3.1: Watts tarafından tasarlanan ideal uzun hız tümseği kesidi [21]

Uzun tümseklerin ilerleyen zaman içinde kullanılan farklı çeşitlerinde uzunlukları 4.2 m seviyelerine ulaşmış, buna rağmen yükseklikleri 100 mm sınırını geçmemiştir.

Uzun tümseklerin yükseklikleri, kısa olan tümseklerle aynı olsa da daha iyi karakter sergilemelerinin sebebi, aynı yüksekliğe ulaşan iniş ve çıkış rampalarının eğimlerinin az olmasıdır. Böylece, bu tümseklere belirlenen kritik hızlarda veya altında giren araçlar yumuşak bir geçiş yapma şansına sahip olacaklardır. Kritik hızların üstünde geçen araçlar ise kısa tümseklere göre daha uzun yol katedecekleri için etkiyecek olan düşey ivmeler büyüyecek ve zamana bağlı etkileri de artacaktır. Dolayısıyla, uzun tümsekler seçilmiş hız limitlerini aşmayan sürücülerini cezalandırmak yerine hızlı giden araçlarda rahatsızlık yaratmaktadır.

Uzun tümseklerden geçen araçlarda rahatsızlık oluşturma mekanizmalarından biri de aracın iki aksında farklı yönlerde hareketin gerçekleşmesini sağlamaktır. Ön tekerlekler iniş rampasına varıp ilerlerken arka tekerlekler henüz yükselme rampasındadır. Yüksek hızlarla seyreden araçlarda aracın önünün alçalırken arkasının yükselmesi konforu oldukça düşürecektir.

3.1.3 Düz Tepeli Tümsekler

Uzun tümseklerin yol boyunca daha uzun olacak şekilde yer alan, iniş ile çıkış rampaları arasında belirgin mesafede düzlük bulunan çeşidine düz tepeli tümsekler (speed table) adı verilir. Bu tümsek tiplerinin uzunlukları ortalama olarak 6-7 m civarında olmaktadır. Buna bağlı olarak da tepelerindeki düzlük uzunluğunun 3 m seviyesinde olması uygun görülmektedir. Çoğunlukla, bu tümsek tipinde de yükseklik sınırının 100 mm olduğu tasarımlar benimsenmiştir.

Tepelerindeki uzunca düzlük sayesinde bu tümseklerden geçmekte olan araçların iki tekerleğinin de aynı anda düzlük üzerinde durması sağlanır. Bu durumda uzun tümseklerde olduğundan farklı olacak şekilde ön ve arka aksların farklı rampalarda ters düşey yönlerde hareket etmesi önlenmiş ve hız düşürmeyi sağlayacak rahatsızlık mekanizmalarından biri elenmiş olur. Araçta meydana gelecek düşey ivme genliğini etkileyen bir faktör olan rampa eğimi de diğer tümsek çeşitlerine göre düşük kalmaktadır; zira maksimum tümsek yükseklikleri artmamakla beraber rampa uzunlukları daha fazladır. Sonuçta, düz tepeli tümsekler için rahatsızlık verecek limit hızlar daha yüksek olacaktır, bu nedenle kullanım alanı da uzun tümseklerden farklı olmalıdır. Şekil 3.2’de üç farklı hız tümseğinin uzunluk farklarını belirten bir grafik yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Hız tümsekleri tipleri [22]

Düz tepeli tümseklerin etkili olduğu önemli bir alan ağır vasıtalaradır. Bu tip araçların süspansiyon sistemlerinin özelliği sebebiyle uzun tümseklere yüksek hızlı girdikleri durumda lastikler yükselerek tekerlek boşluğuna doğru yol alacak ve tekerleklerin hız tümseği ile teması kesilecektir. Böylece hız tümseğinin yaratması amaçlanan düşey etki süspansiyon sistemi tarafından yutulmuş olacak, yüksek hızlarda ağır vasıtaların normal tümseklerden geçmeleri gereken rahatsızlığı veremeyecektir. Düz tepeli tümseklerde ise rampalar daha uzun ve kademeli olduğundan, bir ağır vasıtanın hızlı gelmesi durumunda süspansiyon sistemi tekerleklerle zemin temasını ancak çok kısa bir süre için kesebilecektir ve ortada bulunan düz bölüme düşecek tekerlekler artan hızla beraber daha büyük kuvvetler doğuracaktır.

3.2 Hız Tümseklerinin Etkileri

3.2.1 Hız Tümseklerinin Olumlu Etkileri

Tüm hız tümseklerinin temel amacı yerleştirildikleri bölgelerdeki araçları yavaşlatmaktır. Fakat hız tümsekleri tiplerine bağlı olarak bu hedef için belirlenen limit hızlarda değişiklikler gerçekleşir. Kısa tümsekler çok yavaş gidilmesi gereken özel bölgelerde kullanılmalıdır, gelişmiş ülkelerin çoğundaki durum da bu şekildedir. Uzun tümsekler, hız limitleri 25-30 km/saat seviyelerinde olması istenilen konut alanlarının bulunduğu bölgelere yerleştirilmektedir. Düz tepeli tümsekler ise düşük hızlarda oldukça yumuşak geçişlere imkan verdiği için kritik hız seviyesi 40 km/saat gibi şehiriçi trafik hızına daha yakın bölgelerde bulunabilir.

Hız tümseği yerleştirilen bölgelerde ortalama trafik hızındaki değişimleri gözlemlemek üzere, yollarda ölçüme dayalı çalışmalar yapılmıştır. Amerika’da bu şekilde yapılan çeşitli çalışmalardan derlenen sonuçlar Tablo 3.1’de yer almaktadır. Ölçümler, uzun ve düz tepeli tümseklerin yerleştirildiği yollarda tümseklerin montajından önce ve sonra olacak biçimde yapılmıştır ve bu sayede tümseklerin

yarattığı hız düşürme oranları gözlenmiştir. Sonuçlarda %85 hız seviyesindeki araçların bulundukları aralık belirtilmiştir. Kullanılan %85 hız seviyesi ise ölçümlerdeki en hızlı yol alan %15 aracı dışarıda tutarak belirlenmektedir. Tabloda gösterilen sonuçlar da yerleştirilen tümseklerin belirgin hız düşüşleri sağladığını ortaya koymaktadır. Bunun yanında, düz tepeli tümseklerin beklenildiği biçimde uzun tümseklere göre daha yüksek kritik hızlara sahip olduğu, yani trafik hızlarını daha az aşağı çektiği görülmektedir.

Tablo 3.1: Yüzde 85 hız seviyelerinin tümseklerle değişimi [19]

Bölge	Tümsek tipi	Tümsekten önce (km/saat)	Tümsekten sonra (km/saat)	Hız farkı (km/saat)	Hız değişimi (%)
Austin, Texas	3.66 m / uzun tümsek	58 - 64	42-50	-8 / -19	-14 / -32
	6.7 m / düz tepeli tümsek	56 - 64	45-50	-10 / -14	-17 / -24
Boulder, Colorado	3.66 m / uzun tümsek	45 -50	40	-5 / -8	-11 / -24
Charlotte, North Carolina	6.7 m / düz tepeli tümsek	50 - 64	43 - 60	0 / -14	0 / -23
Dayton, Ohio	3.66 m / uzun tümsek	51 - 55	40 - 51	0 / -14	0 / -26
Eugene, Oregon	4.27 m / uzun tümsek	51 - 55	43	-8 / -11	-16 / -21
Ft. Lauderdale, Florida	3.66 m / uzun tümsek	56	40	-16	-29
Gwinnett County, Georgia	6.7 m / düz tepeli tümsek	56 - 76	42 - 55	-10 / -23	-15 / -32
Howard County, Maryland	6.7 m / düz tepeli tümsek	56 - 69	45 - 58	0 / -23	0 / -33
Montgomery County, Maryland	3.66 m / uzun tümsek	51 - 69	40 - 55	-5 / -19	-9 / -30
	6.7 m / düz tepeli tümsek	53 - 64	47 - 55	-2 / -13	-3 / -22
San Diego, California	3.66 m / uzun tümsek	55 - 61	40 - 48	-10 / -21	-17 / -34
Sarasota, Florida	3.66 m / uzun tümsek	47 - 56	34 - 45	-8 / -14	-17 / -27
	6.7 m / düz tepeli tümsek	68	40	-27	-41
Tucson, Arizona	3.66 m / uzun tümsek	42 - 72	31 - 53	+2 / -11	+4 / -42
Boca Raton, Florida	3.66 m / uzun tümsek	55 - 63	50 - 56	-5 / -6	-9 / -10
Kirkland, Washington	3.66 m / uzun tümsek	51 - 56	39 - 43	-11 / -16	-22 / -30
	4.27 m / uzun tümsek	55 - 56	40 - 45	-11 / -14	-20 / -26
	6.7 m / düz tepeli tümsek	56	43	-13	-23
Las Vegas, Nevada	3.66 m / uzun tümsek	47 - 61	35 - 43	-10 / -26	-21 / -42

Hız tümseklerinin %85 seviyesindeki ortalama sürücülerin hızını aşağı çekmesi önemli olmakla beraber etkin bir araç olması için yüksek hızda giden araçların hızlarını da belirli ölçüde azaltması gerekmektedir. Portland’da yapılan bir çalışmada, 4.2 metrelik uzun tümseklerin yerleştirilmesinden önce, 40 km/saat hız sınırını trafikteki araçların %60’ının aştığı; tümsek uygulamasından sonra bu oranın %20’ye gerilediği görülmüştür. Uzun tümseklerin yerleştirilmesinden önce trafikteki araçların %14’ü hız sınırının 16 km/saat üzerine çıkarken, bu oran hız tümsekleri ile birlikte %1 seviyesine çekilmiştir. Aynı bölgede 6.7 m boyunda düz tepeli tümseklerle de ölçümler yapılmıştır. Bu tümseklerin yerleştirilmesi ile hız limitini 16 km/saat fark ile ihlal eden araç oranı %22 seviyesinden %3’e düşmüştür [19].

Tablo 3.2: Trafik yoğunluğunun hız tümsekleri ile değişimi [19]

Bölge	Tümsek tipi	Yoğunluk değişimi (%)
Austin, Texas	3.66 m / uzun tümsek	+20 / -36
	6.7 m / düz tepeli tümsek	+9 / -19
Bellevue, Washington	3.66 m / uzun tümsek	+14 / -27
	6.7 m / düz tepeli tümsek	-19 / -24
Boulder, Colorado	3.66 m / uzun tümsek	-13 / -28
Charlotte, North Carolina	6.7 m / düz tepeli tümsek	+5 / -26
Dayton, Ohio	3.66 m / uzun tümsek	+121 / -46
Eugene, Oregon	4.27 m / uzun tümsek	-41 / -43
Ft. Lauderdale, Florida	3.66 m / uzun tümsek	-30
Gwinnett County, Georgia	6.7 m / düz tepeli tümsek	+27 / -48
Howard County, Maryland	6.7 m / düz tepeli tümsek	-11 / -35
Montgomery County, Maryland	3.66 m / uzun tümsek	+43 / -72
	6.7 m / düz tepeli tümsek	+46 / -41
Portland, Oregon	4.27 m / uzun tümsek	+19 / -65
San Diego, California	3.66 m / uzun tümsek	+29 / -65
Sarasota, Florida	3.66 m / uzun tümsek	-10 / -62
	6.7 m / düz tepeli tümsek	-21
Tucson, Arizona	3.66 m / uzun tümsek	+26 / -55
Boca Raton, Florida	3.66 m / uzun tümsek	-10 / -42
Kirkland, Washington	3.66 m / uzun tümsek	+5 / -50
	4.27 m / uzun tümsek	+25 / -6
	6.7 m / düz tepeli tümsek	-5
Las Vegas, Nevada	3.66 m / uzun tümsek	+9 / -50

Trafik yoğunluğunda azalma sağlamak hız tümseklerinin temel kullanım amacı olmasa da uygulama yapılan bölgelerde sağlanacak düşük trafik hızları sayesinde sürücüler bu yollara girmemeyi tercih edebilir ve dolaylı olarak bu etki sağlanabilir.

Özellikle, belirli bir yere ulaşmak için kısa yol olarak kullanılan yollardaki hızları düşürmek için yerleştirilecek tümsekler; mevcut yolun başka alternatifleri de olması durumunda trafik yoğunluğunda azalma sağlayabilirler. Portland ölçümlerinde alınan sonuçlara göre trafik yoğunluğu; 4.2 m uzun tümsek yerleştirilen caddelerde %33, 6.7 m düz tepeli tümsek bulunan yollarda ise %22 oranında azalmıştır. Amerika’da bu konuda yapılan diğer ölçümlere ait sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Hız tümseklerinin ölçülebilen hız düşürme ve trafik yoğunluğunu hafifletme gibi etkilerinin gerçekleşmesi durumunda şehirlerin genel trafik düzenlerinde de iyileşmeler görülecektir. Bu da trafik kazaları ve buna bağlı her türlü zararın azalması anlamına gelecektir. Fakat, hız tümseklerinin bu gibi makro boyutta olumlu sonuçlar doğurması için uygulamaların, uygun engel seçiminden yerleştirilmesine ve genel trafik akışına etkilerinin incelenmesine kadar yetkili kurumların kontrolünde yapılması gerekmektedir.

3.2.2 Hız Tümseklerinin Olumsuz Etkileri

Hız tümseklerinin işlevini yerine getirme şekli araca belirli bir kuvvet uygulamak ve otomobil içindekilere bir miktar rahatsızlık vermek olduğu için tasarım aşamasında sınırları doğru belirlemek ve bu engellerin insan güvenliğini tehlikeye atmayacak biçimde uygulandığından emin olmak gereklidir. Aksi takdirde, yayaların ve trafikteki herkesin güvenliğini arttırmak için yapılan bu tasarımlar ters yönde sonuçlar doğurabilir.

Bütün hız tümseği tasarımları arasında yolcu ve araç güvenliği açısından en kötü karakteristiği sergileyen kısa tümseklerdir. Aks mesafesinden çok daha kısa olan boyu ve sert yapısı nedeniyle uyguladığı kuvvetler hıza çok az bağımlılık sergileyen bu tümsek tipinin hız düşürme özelliğini tam istendiği biçimde gerçekleştiremediği bir gerçektir. Sürücüler bu tip tümseklerden rahat geçmek için veya araçlarına zarar gelmesinden korktuklarında çok fazla yavaşlamakta ya da bazı sürücüler bu tasarımlarda hızlı gittiklerinde bile hissedilen rahatsızlığın artmadığını düşündüklerinden yavaşlamamaktadırlar. Oysa, şehiriçi yollarda istenilen bu her iki durumdan farklı olarak araçların ne hızlı ne de çok yavaş olacak şekilde makul hızlarda yol almalarıdır. Kısa tümseklerle ilgili ilk davanın henüz bu uygulamaların yaygınlaşmadığı bir dönemde; 1924 yılında, Mississippi eyaleti mahkemesinde görülmesi ve sonuç olarak bu tasarımın motorlu taşıtlara zarar verdiği kararının

alınması da bu tümseğin olumsuz etkilerinin ne kadar erken anlaşıldığını göstermektedir.

Uzun ve düz tepeli tümseklerde ise tasarım hataları söz konusu olmadığı sürece araçta ciddi bir hasar veya güvenlik tehdidi oluşması beklenmez. Seattle 30 yılı aşkın süredir birçok tümsek yapılan bir bölgedir ve bu zaman içinde uzun tümseklerle birçok dava açılmıştır. Bu davalardan sadece 3 tanesinde uzun tümseklerde kusur bulunmuş ve para cezası uygun görülmüştür. Bu cezalardan sonuncusu da henüz uzun tümsek tasarımının tam anlamıyla gelişmediği 1980'lerin başında, kısa tümseklerden sadece biraz daha uzun olan ve yaklaşık 6.5 cm yüksekliğinde olan bir uzun tümseğin üzerinden geçen arabanın tabanının parçalanması üzerine açılan dava sonucunda verilmiştir.

Hız tümsekleriyle ilgili önemli sorunlardan biri, sağladıkları hız düşüşünün itfaiye ve ambulans gibi acil müdahale araçlarının ulaşmaları gereken yerlere varış sürelerini arttıracak olmasıdır. Bu sebeple, bazı ülkelerde acil ekiplerin sıkça kullandığı güzergahlar üzerinde hız tümseği inşa etmek yasaklanmıştır. Kuzey Amerika'da hız tümseklerinin bu araçları ne ölçüde yavaşlattığını ölçmek için yapılan bir çalışmanın sonuçları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Acil durum araçlarının tümseklerde gecikme süreleri [17]

Bölge	Tümsek tipi	Gecikme süresi (saniye)
Austin, Texas	3.66 m / uzun tümsek	2.8 (itfaiye aracı)
		3.0 (merdivenli itfaiye aracı)
		2.3 (hasta olmayan ambulans)
		9.7 (hasta taşıyan ambulans)
Berkeley, California	3.66 m / uzun tümsek	10.7 (itfaiye aracı)
		9.2 (merdivenli itfaiye aracı)
	6.7 m / düz tepeli tümsek	3.0 (itfaiye aracı)
		13.5 (merdivenli itfaiye aracı)
Boulder, Colorado	2.5 m / uzun tümsek	4.7 (itfaiye aracı)
	3.66 m / uzun tümsek	2.8 (itfaiye aracı)
	11.3 m / düz tepeli tümsek (yükseklik 150 mm)	3.8 (itfaiye aracı)
	12.2 m / düz tepeli tümsek (yükseklik 150 mm)	3.8 (itfaiye aracı)
Sarasota, Florida	3.66 m / uzun tümsek	9.5 (ambulans)

Hız tümseklerinin şehir içindeki ana trafik güzergahlarında bulunmasının diğer bir etkisi de, gün boyunca bu yollarda toplu taşıma araçlarını kullanan şoförlerden bir süre sonra sağlık şikayetleri gelebilmesidir. Bu tür tümseklerin çok kullanıldığı yerleşim bölgelerinde hizmet yapan otobüs sürücülerinden birçoğu bel ve boyun ağrılarına maruz kalabilirler. Yapılan çalışmalarda, otobüs rotalarındaki tümsek tasarımının bu araçlara göre yapılması tavsiye edilmektedir [23,24].

Zemin titreşimlerinin binalara zarar verdiği düşünülmektedir ve hız tümsekleri nedeniyle oluşan titreşimlerinin de böyle bir etkisi olacağı yönünde iddialar bulunmaktadır. Hız tümseklerinin yakınlarındaki yapılardaki titreşimi arttırdığı bir gerçektir. Ortaya çıkan bu titreşimlerin genliği ve frekanslarını etkileyen faktörler arasında hız tümseğinin yapısı, zeminin jeolojik yapısı, tümsekten geçen araçların hızı ve ağırlıkları yer almaktadır. Özellikle, ağır vasıtaların yaratacağı titreşimlerin genliği daha fazla olacaktır. Bu durumu göz önüne alarak, ağır vasıtaların hız tümseklerinden geçişleri ile çeşitli yapılardaki titreşim etkileşimlerini inceleyen bir çalışma yapılmış ve sonucunda hız tümsekleri nedeniyle artan zemin titreşimlerinin en kötü durumda bile tehlike yaratacak boyutlara ulaşmayacağı belirtilmiştir [25].

Hız tümseklerinin sürücülerin önce araç hızlarını düşürmeye, tümseği geçtikten sonraysa tekrar hızlanmalarına yol açtığı ve bu durumun sıklıkla ani ivmelenmelere sebep olarak hem yakıt tüketimini hem de egzoz gazları emisyonunu arttırdığı ileri sürülmektedir. Yine, bu durumun gürültü seviyesini arttıracak endişesi de mevcuttur. Değişik ülkelerde bu konuyla ilgili yapılan ölçümlerde hız tümseği yerleştirilen bölgelerde NO_x seviyelerinde azalma görülmüş, HC ve CO miktarlarında ise kararlı bir artma veya azalma eğilimi gözlenmemiştir. TRL tarafından İngiltere’de yapılan bazı ölçümlerde ise hız tümseklerinin HC emisyonları ve yakıt tüketimini arttırabileceği gözlenmiştir [26]. Gürültü kirliliği konusunda hazırlanan TRRL raporunda ise, hız tümseklerinin konumlandırılmasıyla birlikte azalan trafik hızları ve yoğunluğu sebebiyle toplam gürültü seviyesinde düşüş olduğu belirtilmiştir [27]. Hız tümsekleri yerleştirilmeden önce varolan sürekli ve yüksek ses yerini arada bir yükselebilen seviyelerde sesleri içeren düşük genlikli bir arka plan sesine bırakmaktadır.

3.3 Hız Tümsekleriyle İlgili Yasal Sınırlar ve Standartlar

3.3.1 Yurtdışında Geçerli Sınırlamalar

Hız tümsekleri ile ilgili her ülkede değişiklik gösteren yasal kurallar veya standartlar yer alsa bile, bunlar çoğunlukla birbirleriyle uyum gösterirler. Uzlaşılan en önemli noktalardan birisi kısa hız tümseklerinin özel bölgeler haricinde şehir içi alanlarda kullanımının yasaklanmış olmasıdır. Bunun dışında kalan tümsek tipleri için de genellikle boy, yükseklik, uygulama bölgesi ve uyarı levhalarının yerleşimi konularında kurallar bulunmaktadır.

Trafik sakinleştirme uygulamalarının yaygın olduğu ülkelerden biri olan Amerika Birleşik Devletleri'nde, diğer uygulamaların aksine yalnızca hız tümsekleri için ulusal çapta kabul edilmiş standartlar bulunmaktadır. ITE tarafından 1993 yılında "Hız tümsekleri tasarımı ve uygulamaları için kurallar" başlıklı bir kılavuz hazırlamıştır. Bu belgede, 3.66 metrelik Watts tümseği temel tasarım olarak yer almaktadır. Buna rağmen Amerika'da diğer uzun ve düz tepeli tümsek modelleri de kullanılmaktadır [19]. ABD'de hız tümseklerinin inşası için gerekli başvuru, onay ve uygulama prosedürleri eyaletlere göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel olarak, hız tümseği uygulaması talebi alınan bölge için incelemeler yapılır ve uygun görülen tasarıma ait geçici tümsek yola yerleştirilir. Ardından geçici tümseğin etkilerini görmek için ölçümler yapılır ve istenilen sakinleştirmeyi sağladığına karar verilirse sabit tümsek kurulumu gerçekleştirilir.

Geçici olarak yerleştirilen tümsekler genellikle geri kazanılmış kauçuk tipi malzemelerden imal edilmiştir. Kalıcı tümsekler ise çoğunlukla beton veya asfalt olmaktadır. ITE kılavuzu, kalıcı tümsek malzemesi olarak kauçuk veya plastik kullanıldığı durumda zamanla tümsek tepesinin deformasyona uğrayabileceğini belirtmiştir. Deforme olan bir tümseğin de görevini tam olarak yerine getiremeyeceği açıktır. Düz tepeli tümseklerin üzerlerindeki düz bölüm veya tamamı tuğla gibi girinti etkisi yaratacak taşlarla döşenebilir. Bunun sebebi düz tepeli tümseklerin hız azaltma etkisini arttırmaktır.

Hız tümseklerinin tam olarak amaçlarını yerine getirebilmeleri için yol boyunca uygun bölgelere yerleştirilmeleri ve birbirleriyle aralarındaki mesafenin doğru seçilmesi gerekmektedir. Eğer, tümsek sürücünün karşısına aniden çıkacak bir biçimde yerleştirilirse, hızla gelen bir aracı yavaşlatma amacı kaçırılmış olur.

ABD’de tümseklerin dur levhalarından sonra 60 metre içinde yerleştirilmeleri, trafik ışıklarına ise 90 metreden uzak olmaları tavsiye edilmektedir. Aynı zamanda hız tümseklerini bulundukları alanın geceleri sokak lambalarıyla aydınlatılmış olmasına dikkat edilmelidir. Hız tümsekleri aralarında uygun mesafeler belirlenerek ard arda yerleştirildikleri takdirde daha geniş bir alanda daha etkili bir yavaşlatma sağlarlar. Burada önemli nokta tümsekler arasında bırakılacak mesafenin doğru belirlenmesidir. Eğer bu aralık çok uzun olursa araçların yeniden hızlanmalarına fırsat sağlanır, çok kısa tutulması ise hızlanma eğiliminde olacak araçları önlemeyi sağlamayacaktır. Amerika’nın çeşitli bölgelerinde geçerli olan uygun hız tümseği aralıklarına ait değerler Tablo 3.4’te gösterilmiştir. İngiltere’de ise ulaştırma departmanı, tümsekler arasındaki mesafenin 20 metreden az olmaması gerektiğini belirtmekte ve aynı zamanda 150 metreden fazla aralıkları tavsiye etmemektedir. Aynı kurum, 100 metreden uzun olan her aralığın araçların hızlanmaya başlamasına fırsat tanıyacağı bildirmektedir.

Tablo 3.4: Hız tümsekleri arasındaki mesafelere ait sınırlamalar [19]

Bölge	Tümsekler arası mesafe (m)
Fairfax, Virginia	> 150
Kuna, Idaho	> 180
Thousand Oaks, California	45 - 120
Fort Worth, Texas	90 - 480
Pennsylvania DOT	75 - 180
Atlanta, Georgia	60 - 210
Cobb County, Georgia	90 - 150
Gwinnett County, Georgia	105 - 150
San Antonio, Texas	90 - 260
Seattle, Washington	100 - 165
Austin, Texas	90 - 150
Bellevue, Washington	60 - 90
Berkeley, California	45 - 120
Boulder, Colorado	45 - 240
Howard County, Maryland	120 - 180
Montgomery County, Maryland	120 - 180
Phoenix, Arizona	< 150

Hız tümseklerinin boyutlandırılmasında sınırlar genel itibariyle belirlidir. Yükseklikler 75-100 mm arasındadır ve hız seviyesi ne kadar aşağı çekilmek isteniyorsa tümsek o ölçüde yüksek yapılmalıdır. Uzunluklar için de benzer durum geçerlidir. İngiltere’de uzun tümseklerin boylarının en az 900 mm olması sınırı getirilmiş, düz tepeli tümseklerin ise 20 metreden daha uzun olmaması tavsiye edilmiştir. Ayrıca, düz tepeli tümseklerin düzlük kısmının 2.5 metreden daha kısa olmaması, eğer yol otobüs güzergahında ise bu mesafenin 6 metre dolayında olması önerilmiştir. Bunun haricinde, hız tümseklerinin inşası sırasında önemli bir nokta da tolerans sınırlarının aşılmasıdır. Aksi takdirde tümsek boyutlarıyla birlikte geometrisinde de farklılıklar ortaya çıkar, istenilen özellikle sağlanamayabilir.

Hız tümseklerinden önce yola uyarı amacıyla konulan ve arabaların daha erken yavaşlamalarını sağlayacak olan uyarı levhaları için de standartlar mevcuttur. Genel olarak uyarı levhalarında ne tür şekil ve ifadelerin yer alacağı, formlarının ve boyutlarının ne kadar olacağı trafikten sorumlu kurumlarca belirlenir. Levhaların tümseklerden ne kadar önce konulacağı da önemlidir. Tümseğe çok yakın konulacak levhalar araçları uyarma görevini tam olarak sağlayamaz.

3.3.2 TS 6283 Standardı

Türkiye’de hız tümsekleriyle ilgili TSE tarafından hazırlanan TS 6283 kodlu bir standard geçerli durumdadır. İlk olarak 1988 yılında yayımlanan bu standard için daha sonra 1997 ve 1999 yılında güncellemeler yapılmış, en son ise 2000 yılında yenilenmiştir. TS 6283, tümseklerin tanımını yaparak kullanım alanlarını belirlemekte, yapım malzemeleri ve geometrileri hakkında sınırlar koymaktadır.

Standard, hız tümseklerinin uygulama alanını, şehiriçi 50 km/saat trafik hızının; okul, çocuk bahçesi, spor ve konut alanları gibi yayaların yoğun olduğu yerlerde can güvenliği açısından tehlike arzeden yol bölümleri olarak tanımlamıştır. Tümseklerin yapılacağı yolun kaplama malzemesi ile aynı cinsten olması koşulu getirilmiş; taşıt yolunu boydan boya katetmesi ve asfalt yollarda uygulanacaksa mastik asfalt kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca sürücülerin kolayca farkedebilmesi amacıyla tümseklerin beyaza boyanması ve yol sathı yağmur suyunu kolay drene edebilecek tedbirlerin alınması lazımdır [28].

Standartta göre, tümseğin genişliği araçların dingil mesafesine bağlı olarak 3.6-3.8 m ve otobüs hatlarının bulunduğu şehiriçi yollarda tümseğin yol sathından yüksekliği

7.5-10 cm olmalıdır. Diğer bir şart ise araçların hızlarını ayarlayabilmeleri için yola girişten itibaren 20. metrede yer almasıdır. Tümseklerin birinci derece yollara konulamayacağı ve tümsekler arasında 50-150 m mesafe bırakılarak yolun en fazla 800 metrelik bir kısmına uygulama yapılabileceği ifade edilmiştir. Bunların yanı sıra, uyarı levhalarının boyutları ve içerecekleri şekiller de standard tarafından belirlenmiştir [28].

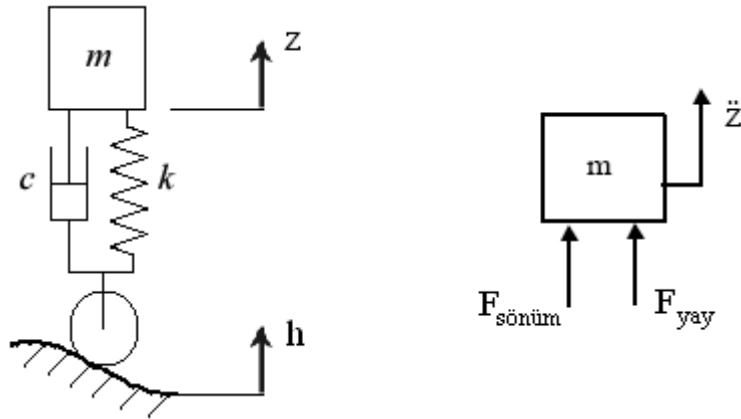
4. TAŞIT TİTREŞİMLERİ

4.1 Temel Titreşim Tekniği

Taşıtların titreşiminin incelenmesi oldukça karmaşık ve çok serbestlik dereceli bir sistemin çözümüne dayanmaktadır. Bunun yanında teorik incelemede öncelikle sistemin en temel parçasının çözümüne bakmak genel bir görüş sağlayacaktır. Araç titreşiminin doğasını anlayabilmek için de, ilk başta tek kütleli taşıt modeli incelenmelidir.

4.1.1 Tek Kütleli Taşıt Modeli

Taşıtın yoldan gelecek uyarılara karşı tepkisini incelemek için öncelikle sistemi basitleştirip tek kütleli olduğu kabulü yapılmıştır. Hareketini tek tekerlek üzerinde gerçekleştirdiği kabul edilen bu modelin tekerleğinin yol ile olan temasının hiç kesilmediği varsayılmakta ve tekerlek için geçerli yay ile sönümleme etkileri ihmal edilmektedir. Yalnızca düşey ekseninde titreşimleri incelenecek olan model Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Tek kütleli titreşim modeli

Düşey yönde salınım yapan m kütleli taşıtın sönümleme katsayısı c , yay katsayısı ise k ile gösterilmiştir. Yoldan gelen h uyarısı ile taşıt düşey ekseninde z kadar yer değiştirir. Bu durumdaki hareket denklemi;

$$m\ddot{z} = -F_{yay} - F_{sönüm} \quad (4.1)$$

şeklinde olacaktır. Dinamik yay ve sönüm kuvvetleri açık olarak yazılmasıyla birlikte sisteme ait diferansiyel denklem elde edilecektir.

$$F_{yay} = k(z - h) \quad (4.2)$$

$$F_{sönüm} = c(\dot{z} - \dot{h}) \quad (4.3)$$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = c\dot{h} + kh \quad (4.4)$$

Bu denklemde zamana bağlı h fonksiyonu sistemi salınıma zorladığından uyarı fonksiyonu olarak anılır. Taşıtlarda uyarı fonksiyonu yol pürüzlülüğüdür. Bu denklem homojen ve özel çözümlere ayrılarak incelenebilir [29].

4.1.1.1 Sistemin homojen çözümü

Homojen çözümde yoldan gelen uyarı fonksiyonunun olmadığı kabul edilir ve bu şekilde (4.4) denkleminde sağ taraf sıfıra eşit olur.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = 0 \quad (4.5)$$

Bu durumda, (4.5) denklemini için en genel çözüm

$$z = B_1 e^{s_1 t} + B_2 e^{s_2 t} \quad (4.6)$$

olacaktır. B_1 ve B_2 değerleri başlangıç koşulları için geçerli sabitlerdir. Bu çözümde, z ile bağlı tüm bileşenler bağımsız birer çözüm oluşturmaktadır. Bu nedenle tipik bir çözüm (4.7) denklemini şeklinde belirlenebilir.

$$z = B e^{st} \quad (4.7)$$

Bu şekildeki bir çözüm için harekete ait diferansiyel denklem, (4.8) biçiminde baştan yazılabilir.

$$mBs^2 e^{st} + cBse^{st} + kB e^{st} = 0 \quad (4.8)$$

$B \neq 0$ ve $e^{st} \neq 0$ olduğu için denklem (4.9) formunda olacaktır.

$$m s^2 + c s + k = 0 \quad (4.9)$$

Bu denkleme ait s_1 ve s_2 kökleri (4.10) ve (4.11) ile gösterilmiştir.

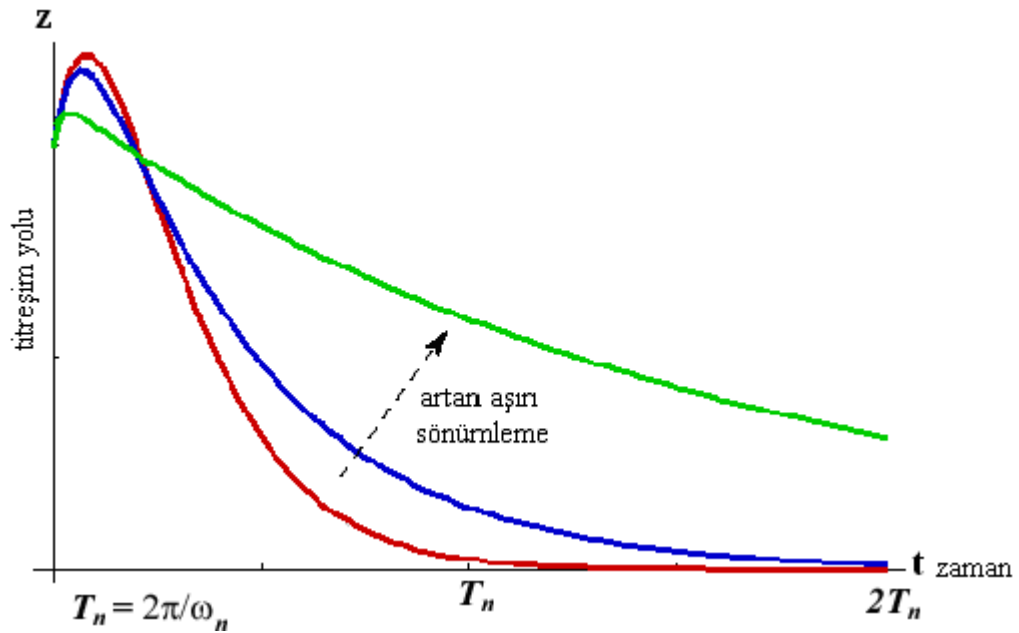
$$s_1 = \frac{-c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (4.10)$$

$$s_2 = \frac{-c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (4.11)$$

Çözüm; köklerinde yer alan ifadelerle ilgili olarak iki farklı karakter sergileyecektir. Bunlardan ilkinde, (4.12) sonucunda s_1 ile s_2 kökleri reel sayılar olacak ve kütle üssel bir fonksiyonu takip ederek herhangi bir salınım gerçekleştirmeden kararlı durumuna geri dönecektir.

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 > \frac{k}{m} \quad (4.12)$$

Kökler reel sayı olduğunda, artan sönümlenme ile birlikte kütlenin düşey yer değiştirmesindeki değişimler Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Aşırı sönümlenme olarak adlandırılan bu durumda gerçekleşen hareket periyodik değildir.



Şekil 4.2: Farklı aşırı sönümlenme oranlarında kütlenin titreşim yolu grafiği

Taşıt titreşimleri açısından anlamlı olan ise (4.13) eşitsizliğinde gösterilen, karekök içerisindeki ifadenin negatif olduğu durumdur. Bunun sonucunda denklemin kökleri (4.14) kompleks olacaktır.

$$\frac{k}{m} > \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \quad (4.13)$$

$$s_1, s_2 = \frac{-c}{2m} \pm j \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m} \right)^2} \quad (4.14)$$

Köklerin, (4.6) denkleminde yerleştirilmesiyle diferansiyel denklem çözümü (4.15) biçiminde olur. Bu ifadede yer alan ω_d sönümlenmiş sistemin doğal frekansdır ve (4.16) ile gösterilmiştir.

$$z = e^{-ct/2m} (B'_1 \cos(\omega_d t) + B'_2 \sin(\omega_d t)) \quad (4.16)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m} \right)^2} \quad (4.17)$$

Köklerin kompleks olduğu bu çözümde salınımlı bir titreşim hareketi mevcut olacaktır. Aşırı sönümleme ile bu salınımlı hareket arasındaki sınır (4.18) eşitliğidir.

$$\frac{k}{m} = \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \quad (4.18)$$

Buradaki sönümleme oranı için kritik sönümleme katsayısı ifadesi kullanılır ve c_c sembolü ile gösterilir. Sönümleme katsayısının kritik sönümleme değerine oranı ise boyutsuz bir büyüklük olacaktır ve sönüm oranı (ζ) olarak adlandırılır.

$$c_c = 2 \sqrt{km} \quad (4.19)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2 \sqrt{km}} \quad (4.20)$$

Bu bağıntıların ardından, sistemin sönümsüz özgül frekansı (ω_n) ile sönümlenmiş frekansı arasında sönüm oranına dayalı bir ilişki kurulabilir. Bu ilişkinin (4.21) bir daire denklemi veya ω_d / ω_n ile ζ değerleri pozitif alındığı takdirde; çeyrek daire

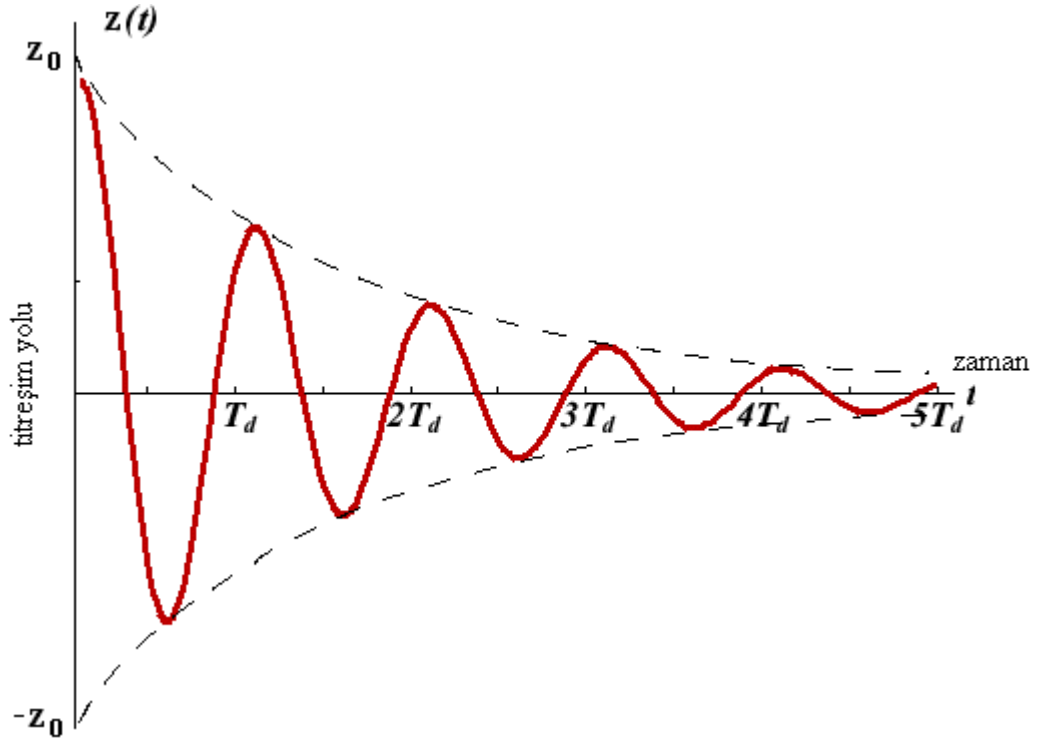
oluşturduğu görülmektedir. Bu nedenle, $\zeta < 0.2$ durumunda sönümlemenin sistemin doğal frekansı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek boyutlarda olacağı söylenebilir. Bunun üzerindeki değerlerde ise sistem özgül frekansı hızlı düşüş gösterecektir. Pratikte uygulanan sönüm oranları 0.25 dolaylarında olmaktadır.

$$\left(\frac{\omega_d}{\omega_n} \right)^2 = 1 - \zeta^2 \quad (4.21)$$

Elde edilen tüm bu ilişkiler, daha önce bulunmuş olan diferansiyel denklem çözümüne yerleştirildiğinde (4.22) denklemi elde edilir.

$$z = z_0 e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cos(\omega_d t) + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t) \right) \quad (4.22)$$

Bu çözüm için geçerli zamana bağlı titreşim hareketini gösterir grafik Şekil 4.3 ile gösterilmiştir. Aşırı sönümlü sistemden farklı olarak bu kez $\pm z_0 e^{-\zeta \omega_n t}$ eğrileri arasında sönümlenmiş bir sinüs eğrisi formundadır. Düşey yöndeki hareket periyodik salınımlar sonucunda sönümlenmiş olacaktır. Salınımın periyodu $T_d = 2\pi/\omega_d$ olacaktır.



Şekil 4.3: Sönümlü tek kütleli sistemin titreşim yolu eğrisi

Bu salınım hareketi yapan sistemde ard arda gelen iki tepenin genlikleri arasındaki ilişki (4.23) denkleminde olduğu gibidir.

$$\frac{z_1}{z_2} = 1 + 2\pi D \quad (4.23)$$

4.1.1.2 Sistemin özel çözümü

Yoldaki düzgünsüzlükler nedeniyle otomobilde oluşacak titreşimleri gerçek anlamda incelemek için modelin özel çözümüne bakmak gereklidir. Bunun için öncelikle, yoldan gelen uyarı ve araçtaki etkisi (4.24) ve (4.25) şeklinde belirlenmiştir.

$$h = h_0 e^{j\omega t} \quad (4.24)$$

$$z = z_0 e^{j\omega t} \quad (4.25)$$

Uyarı ve tepki fonksiyonları (4.4) denkleminde uygun olarak yerleştirildiklerinde çözüme ulaşılabacaktır.

$$(-\omega^2 m + j\omega c + k) z_0 = (k + j\omega c) h_0 \quad (4.26)$$

$$\frac{z_0}{h_0} = \frac{(k + j\omega c)}{(k - \omega^2 m) + j\omega c} = \frac{(k + j\omega c) \{ (k - \omega^2 m) - j\omega c \}}{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2} \quad (4.27)$$

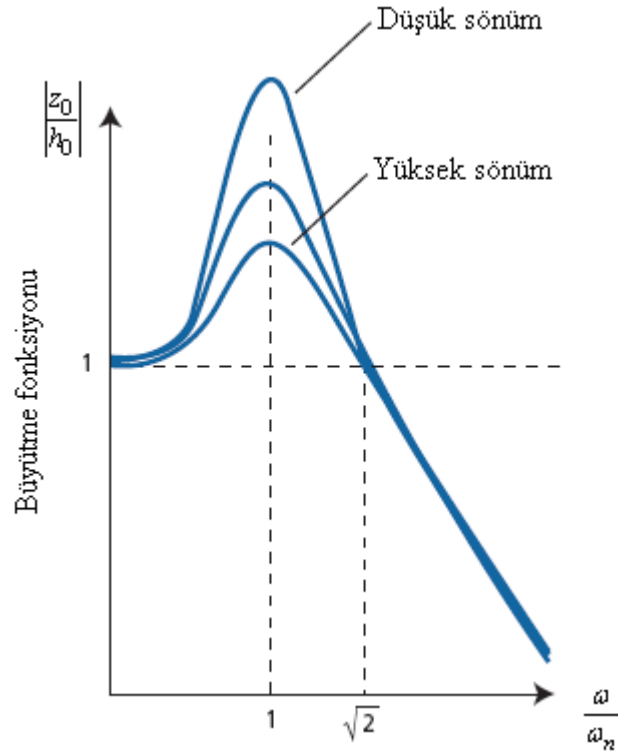
$$\frac{z_0}{h_0} = \frac{k(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2} - \frac{j\omega^3 c m}{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2} \quad (4.28)$$

$$\left| \frac{z_0}{h_0} \right| = \sqrt{\left(\operatorname{Re} \left\{ \frac{z_0}{h_0} \right\} \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left\{ \frac{z_0}{h_0} \right\} \right)^2} = \frac{\sqrt{k^2 + (\omega c)^2}}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \quad (4.29)$$

$$\left| \frac{z_0}{h_0} \right| = \frac{\sqrt{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \quad (4.30)$$

Farklı ω uyarı frekansları için değişen $|z_0/h_0|$ değerleri bulunacaktır. Herhangi bir ω değerine karşı gelen $|z_0/h_0|$ oranına büyütme faktörü adı verilir. Bu ilişkinin bütün bir

frekans aralığındaki dağılımına ise büyütme fonksiyonu denmektedir. Yoldan gelen uyarının tek kütleli sistemi hangi ölçüde etkilediğini gösteren büyütme fonksiyonu; (4.30) denkleminde de anlaşılabacağı üzere sönüm oranı ve yol uyarı frekansının sistemin doğal frekansına oranı ile değişim göstermektedir. Büyütme fonksiyonunun uyarı frekansıyla ilişkisi Şekil 4.4'te görülmektedir. Buna göre, $\omega = \omega_n$ olduğu durumda büyütme fonksiyonu en yüksek değerine ulaşmakta, artan uyarı frekansı ile z genlikleri hızla düşmektedir.

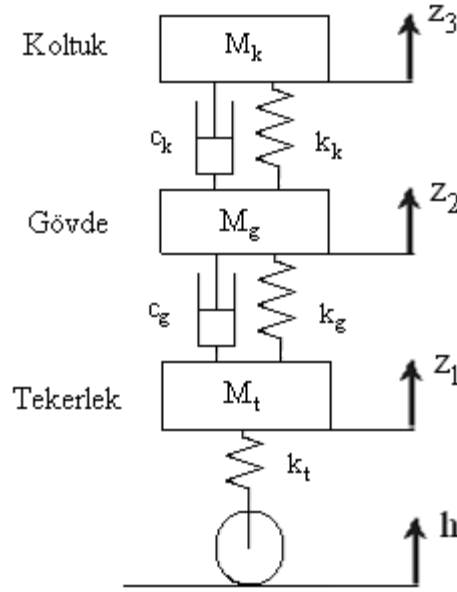


Şekil 4.4: Tek kütleli sistemin büyütme fonksiyonu

4.1.2 Çok Kütleli Taşıt Modeli

Tek kütleli taşıt modelinde yalnızca taşıt gövdesi ele alındığı ve süspansiyon değerleriyle işlem yapıldığı için aracın farklı bölümlerinin etkisi göz ardı edilmektedir. Çok serbestlik dereceli bir sistemin incelenmesiyle beraber araçtaki farklı bölgelerin yay ve sönümlleme etkileri görülebilecektir. Yine değişik bölümlerin doğal frekansları dolayısıyla farklı rezonans değerleri bulunmuş olacaktır. Çok kütleli taşıt modeli oluşturulurken birçok farklı bölge dahil edilebilir. Ortaya çıkan model gerçek sisteme yaklaştıkça daha kompleks bir çözüm gerekecektir. Genel işleyişin anlaşılması amacıyla incelenecek daha basit bir sistem Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu model daha önce incelenen tek kütleli sistemde olduğu gibi çeyrek

araç modelidir; yani aracın tek tekerlek üzerinde gittiği varsayımı yapılmış ve tüm kütleler bu tekerleğe bağlı düşünülmüştür. Tekerlek, araç gövdesi ve koltuk olmak üzere toplam üç kütleli bir sistem yaratılmış ve her bir eleman için yay ile sönümlenme katsayıları belirlenmiştir. Tekerlek için ise yalnızca yay katsayısı göz önüne alınarak hesap yapılacaktır.



Şekil 4.5: Tek tekerlek üzerinde hareket eden çok kütleli taşıt modeli

Modelde araca etkiyen yol düzgünsüzlüğünün $F_1 \sin(\omega t)$ şeklinde bir kuvvet uyguladığı varsayılmaktadır. Bu durumda, modelde yer alan her üç kütle için geçerli olan hareket denklemleri yazılmalıdır.

$$M_t \ddot{z}_1 + z_1(k_t + k_g) - k_g z_2 + c_g(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) = F_1 \sin(\omega t) \quad (4.31)$$

$$M_g \ddot{z}_2 + z_2(k_k + k_g) - k_k z_3 - k_g z_1 + \dot{z}_2(c_k + c_g) - c_k \dot{z}_3 - c_g \dot{z}_1 = 0 \quad (4.32)$$

$$M_k \ddot{z}_3 - k_k z_2 + k_k z_3 - c_k(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) = 0 \quad (4.33)$$

Bu hareket denklemleri matris formunda yazılarak çözüm denklemi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} M_t & 0 & 0 \\ 0 & M_g & 0 \\ 0 & 0 & M_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_g & -c_g & 0 \\ -c_g & c_k + c_g & -c_k \\ 0 & -c_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g + k_t & -k_g & 0 \\ -k_g & k_k + k_g & -k_k \\ 0 & -k_k & k_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Uyarı fonksiyonunun harmonik olduğu varsayımı ile birlikte F_1 ve ona bağlı olarak (4.34) denklemi tekrar düzenlenir.

$$F_1 = F_0 e^{i\omega t} \quad (4.35)$$

$$\dot{z}_1 = i\omega a_1 e^{i\omega t} \quad (4.36)$$

$$\ddot{z}_1 = -\omega^2 a_1 e^{i\omega t} \quad (4.37)$$

$$\left[-\omega^2 [M] + i\omega [c] + [k] \right] \{a\} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Bu noktadan sonra hareket matrisi $\{a\}$, ters matris alınmak suretiyle hesaplanabilir. Bulunacak sonuçlar arasında; sürücü koltuğu için frekans-düşey ivme genliği dağılımında ortalama olarak üç farklı tepe noktası görülecektir. Bunlardan ilki yaklaşık 1 Hz civarında, araç gövdesindeki titreşim hareketinden kaynaklanan bir tepe olacaktır. İkincisi ise, koltuğun üzerinde bulunan sürücünün özgül frekans bölgesine denk gelmesinden dolayı 4 Hz dolaylarındadır. Taşıt tekerleğinin sekmesinden ortaya çıkan rezonans da 12 Hz yakınlarında bir tepe daha oluşmasını sağlayacaktır.

4.2 Taşıt Titreşimlerinin Etkileri

Taşıtlarda yoldaki düzgünsüzlükler veya aracın kendi bölgelerinden kaynaklanan titreşimler nedeniyle çeşitli etkiler ortaya çıkar. Titreşim doğrudan araç üzerinde bazı sorunlara yol açabileceği gibi sürücü ve araçta bulunan yolcular açısından da belirli sonuçlar doğuracaktır. Bu sebeple, araç titreşimlerinin ortaya çıkardığı problemleri araç ve insanlar açısından ayrı şekilde incelemek gereklidir.

4.2.1 Titreşimlerin Araç Üzerindeki Etkileri

Araç üzerinde titreşimlere sebep olan çok değişik kaynaklar mevcut olabilir. İnceleme konusu yol ile taşıt etkileşimi üzerine olduğu için, bu noktada özellikle yoldaki düzgünsüzlükler nedeniyle ortaya çıkan titreşimler ele alınacaktır. Otomobillerde yoldaki herhangi bir bozukluk öncelikle lastiklere bir kuvvet uygulamakta ve ardından tekerlek hareketi ile aracın süspansiyonuna titreşim iletilmiş olur. Yoldan gelen kuvvet en büyük oranda akslara etki etmektedir. Sönümleme sistemi tarafından genliği düşürülen titreşimler ise gövdeye iletilmektedir.

Araç hareketi süresince tekerlekler üzerine devamlı kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvete statik tekerlek yükü denilir. Fakat yoldan gelen etkiler ile oluşan titreşimler statik tekerlek yükünde dalgalanmalar meydana getirir. Bu kuvvet salınımlarına dinamik tekerlek yükü adı verilir. Dinamik tekerlek yükü sonucu tekerleğin bağlı olduğu tüm komponentlerde de belirli düzeylerde kuvvet değişimleri yaşanacaktır. Bu durum, araç parçalarında yorulma etkisi yaparak ömürlerinin azalmasına sebebiyet verebilir. Ayrıca yolda hız tümsekleri gibi yüksek genlikli titreşim yaratma olasılığı bulunan engeller, aks üzerinde doğrudan yüksek gerilmeler oluşturabilir ve ciddi hasarlara yol açabilir.

Tekerlek yükünün (F_z) statik ve dinamik bileşenlerinden oluştuğu ve bu salınının ortalama değerinin ($\bar{F}_z$) statik tekerlek yüküne eşit olduğu bilindiğinden, salınının standart sapmasının (σ_F) da dinamik tekerlek yükünün efektif değeriyle aynı olması beklenir. Bu durumda, yoldan gelen kuvvetlerin araç üzerinde yaratacakları zararlar tekerlek yükünün standart sapması incelenerek anlaşılabilir [29].

$$F_z(t) = F_{z,st} + F_{z,din}(t) \quad (4.39)$$

$$\sigma_F^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [F_z(t) - \bar{F}_z]^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T [F_{z,st} + F_{z,din}(t) - \bar{F}_z]^2 dt \quad (4.40)$$

$$\bar{F}_z = F_{z,st} \quad (4.41)$$

$$\sigma_F = F_{z,din} \quad (4.42)$$

Tekerlek yükü salınımları aynı zamanda araç emniyeti açısından kritik öneme sahip olabilmektedir. Dinamik tekerlek yükünün statik tekerlek yüküyle aynı genlikte fakat negatif yönde olması durumunda toplam tekerlek yükü sıfıra eşit olacaktır. Bu durumda da tekerlek çevresel ve yatay kuvvetler taşıyamayacaktır. Aynı anda bütün tekerleklerde böyle bir durum olursa taşıt kontrolü tamamıyla ortadan kalkacaktır. Bütün tekerleklerde görülme bile tekerlek yükündeki ciddi azalmalar taşıtın dinamik özelliklerini önemli şekilde etkiler. Bu da seyir emniyetinin azalması demektir. Bu nedenle, tekerlek yükündeki salınımların veya başka bir açıdan standart sapmanın küçük değerlerde kalması seyir emniyeti açısından çok önemlidir. Yine de, standart sapma büyüklüğüne bakmak her zaman çok anlamlı olmayabilir. Seyir emniyeti kriteri ise standart sapmanın statik tekerlek yüküne olan oranıdır ve dinamik tekerlek yükündeki değişimlere bağlı olarak taşıt emniyetinde oluşabilecek tehlikeli durumları tespit etmek açısından daha iyi bir göstergedir [29].

4.2.2 Titreşimlerin İnsanlar Üzerindeki Etkileri

Yoldan kaynaklanan titreşimlerin büyüklüğü araçta bulunan kişilerin hissedeceği rahatsızlık miktarını doğrudan arttıracaktır. Fakat, bu rahatsızlığın nasıl ölçüleceği konusu oldukça hassastır. Titreşime bağlı olarak azalan konforun yarattığı etkiyi dar bir çerçevede ele almanın zorluğu, insanın titreşime maruz kalırken birçok parametrenin işin içinde olmasıdır. Farklı karayolu taşıtlarındaki titreşim tiplerinin yaratacağı etkiler birbiriyle aynı olmayacağı gibi, bir otomobilin ön koltuğunda oturan sürücü ile arkadaki yolcunun hissettiği titreşim seviyeleri aynı olmayacaktır. Ayrıca, insanın vücut yapısına ve yaşına göre titreşime olan duyarlılığı da değişecektir. Bunlara rağmen titreşimin insanlar üzerindeki etkisini incelemek için belli başlı kriterler oluşturulmuştur.

4.2.2.1 Titreşim Genliğinin Etkileri

İnsanların 1-100 Hz arasındaki düşey titreşimleri hissedebilmeleri için geçerli eşik değeri etkin değer (root mean square) olarak yaklaşık 0.01 m/s^2 seviyelerindedir. Duyulabilir bir titreşimin genliği için alt sınır 0.1 m/s^2 iken, 1 m/s^2 büyüklüğünde bir düşey ivme değeri genellikle rahatsız edici kabul edilmektedir. Genliği 10 m/s^2 dolaylarına ulaşan titreşimlerin ise tehlikeli boyutlarda olduğu bilinmektedir. Titreşim genliğinin iki katına çıkarılması, insanlarda oluşan titreşim hissini yaklaşık olarak ikiye katlamaktadır. Bu nedenle mevcut bir titreşim büyüklüğünün yarıya

indirilmesi konfor açısından gerçekten çok iyi bir iyileşme sağlayacaktır. Bazı durumlarda, insanların titreşim genliğindeki %10 oranındaki değişiklikleri dahi algıladığı bilinmektedir [30].

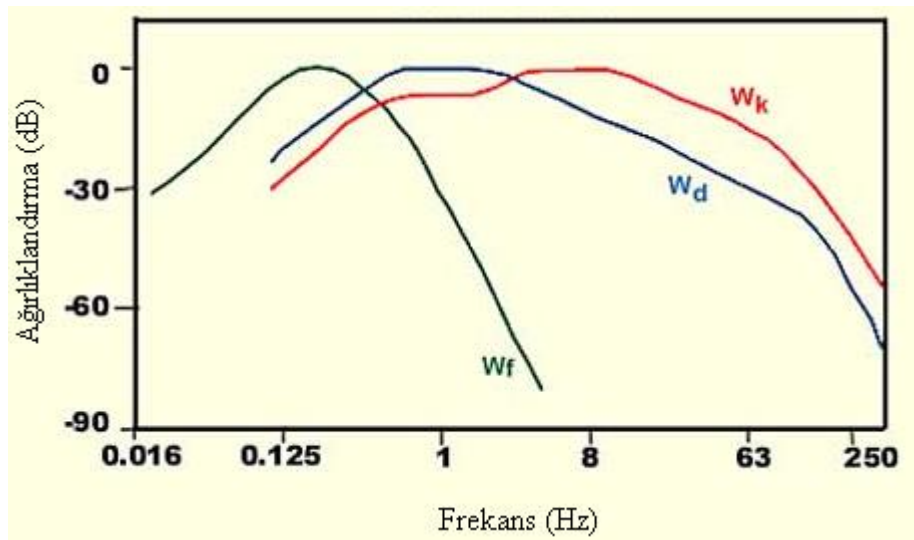
4.2.2.2 Titreşim Frekansı Etkileri

Aynı genliğe ve farklı frekanslara sahip titreşim değerlerinin vücutta yaratacağı tesirin büyüklüğündeki değişimi ölçebilmek amacıyla frekans ağırlıklandırmaları oluşturulmuştur. İnsan vücudunda en fazla etkiyi yaratacak frekanslara en büyük ağırlıklar verilmiş, azalan etkilerine orantılı olarak diğer frekansların ağırlıkları azaltılmıştır. 1974 yılında yayımlanan ISO 2631 standardında oturan ya da ayakta duran kişiler için düşey ve yatay olmak üzere iki eksen üzerinde frekans ağırlıklandırmaları tanımlanmıştır. Aynı standart 1997 yılında yenilenmiş ve bu kez 6 farklı ağırlıklandırma tanımı yapılmıştır. Bunun sebebi insan vücudunun farklı bölümlerinden aldığı titreşimlere karşı duyarlılığının da aynı olmamasıdır. Dolayısıyla her ağırlıklandırma tanımı insan bedenine değişik eksenlerden gelen titreşimlere göre yapılmıştır. ISO 2631-1 standardında geçerli olan ağırlıklandırmalar ve oturma durumunda hangi eksenlerde etki yaptıkları Tablo 4.1’de belirtilmiştir.

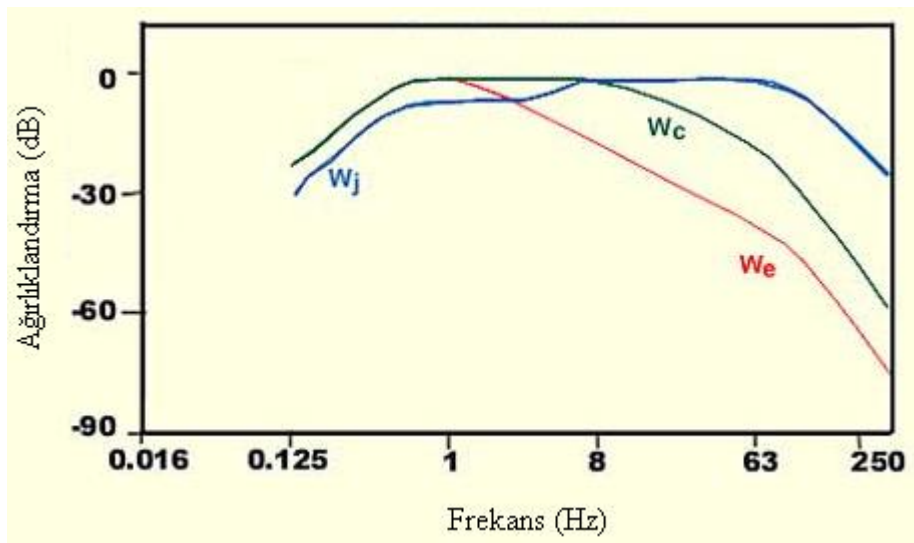
Tablo 4.1: ISO 2631-1 (1997) standardına göre titreşimler için frekans ağırlıklandırma faktörlerinin etkin oldukları eksenler [31]

Frekans Ağırlıklandırma Faktörü	Sağlık	Konfor	Algı	Taşıt Tutması
W_k	z eksen, koltuk yüzeyi	z eksen, koltuk yüzeyi x-y-z eksenleri, ayak	z eksen, koltuk yüzeyi	-
W_d	x-y eksenleri, koltuk yüzeyi	x-y eksenleri, koltuk yüzeyi y-z eksenleri, koltuk arkılığı	x-y eksenleri, koltuk yüzeyi	-
W_f	-	-	-	düşey eksen
W_c	x eksen, koltuk arkılığı	x eksen, koltuk arkılığı	x eksen, koltuk arkılığı	-
W_e	-	r_x - r_y - r_z eksenleri, koltuk yüzeyi	r_x - r_y - r_z eksenleri, koltuk yüzeyi	-
W_j	-	sırtüstü yatar konum (kafa)	sırtüstü yatar konum	-

Koltuk oturma bölgesinden sürücü veya yolcuya gelen düşey titreşimlerin ağırlıklandırılması için W_k faktörünün kullanılması gereklidir. Bu faktör aynı zamanda ayak bölgesine x, y ve z eksenlerinden gelecek titreşimler için de duyarlılıkları tanımlayacaktır. Bunlara uygun olacak şekilde W_k faktörü 4-13 Hz bölgesinde en yüksek duyarlılığa sahiptir. Yine koltuk oturma bölgesinden x ve y eksenlerinden gelecek titreşimler için bu kez 0.5-2 Hz aralığında büyütme oranı en fazla olan W_d faktörü ile ağırlıklandırma yapılır. Koltuk sırt dayama bölgesinden aracın ilerlediği yön olan x ekseninde etkiyecek titreşimlerde W_c katsayısı dikkate alınır. Tüm faktörlere ait ağırlıklandırma eğrileri Şekil 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.6: ISO 2631-1 (1997) standardına göre frekans ağırlıklandırma eğrileri [31]



Şekil 4.7: ISO 2631-1 (1997) standardına göre frekans ağırlıklandırma eğrileri [31]

Frekans ağırlıklandırılmış titreşim değerleri hesaplanırken, o frekans için geçerli uygun faktörün sahip olduğu katsayı ile gerçek titreşim değeri çarpılır. Ölçülen bir titreşim için ağırlıklandırma yapıldıktan sonra belirli frekans aralığındaki etkin değeri bulunabilir. Bir otomobilin sürücü koltuğunda bu şekilde yapılan bir çalışmada toplam 12 eksende titreşim ölçümü yapılmış ve ağırlıklandırmaları yapılan her eksenindeki ölçüm için etkin ivme genlikleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak, insan açısından en rahatsız edici titreşimlerin değerlerinin gelmesi beklenen alan olarak koltuk oturma yüzeyindeki düşey eksen tespit edilmiştir. Daha sonra ayak bölgesine düşey yönden ve sırt bölgesine koltuk sırtlığından gelen titreşimler etkili olmaktadır [30].

4.2.2.3 Titreşim Süresi Etkileri

Titreşimden kaynaklanan rahatsızlık, titreşime maruz kalınan süreyle birlikte artmaktadır. Kısa zaman aralıklarında insanlar üzerinde çok rahatsız edici olmayan, ya da sağlık açısından sorunlar yaratması muhtemel görünmeyen küçük genlikli titreşimlere uzun süreler boyunca maruz kalındığı takdirde sıkıntılar ortaya çıkabilmektedir. Özellikle, taşıt titreşimleri uzun süre etkili oldukları için zaman fonksiyonunun da dahil edildiği bir inceleme genel rahatsızlık seviyesini daha iyi bir biçimde ortaya koyacaktır. Belirli bir süre boyunca etkin olan titreşimlerin etkin değerlerinin bulunması bu açıdan önemlidir. Etkin değer; ivme değerlerinin karelerinin toplamının süre üzerindeki ortalamalarının karekökü alınarak bulunur.

$$a_n = \left(\frac{1}{T} \sum_{i=0}^T a_i^2 \right)^{1/2} \quad (4.43)$$

Uzun süreli titreşimlere maruz kalan kişilerin hissettiği rahatsızlığı belirleyebilmek için, ağırlıklandırılmış ivmenin etkin değerleri incelenmektedir. ISO 2631 standardında da bu şekilde bulunan etkin değerlerin büyüklüklerine göre hissedilen rahatsızlık seviyesi kategorize edilmiştir. Tablo 4.2’de yer alan bu sınıflandırmaya göre 0.315 m/s^2 ve altında etkin titreşim değerleri rahatsızlık vermeyecek şekilde tanımlanırken, etkin değeri 2 m/s^2 üzerinde olan titreşimler aşırı derecede rahatsız edici olmaktadır. Titreşimlerin rahatsız edici olarak sayılmaları için ulaşılması gereken etkin değer alt sınırı ise 0.8 m/s^2 olarak belirlenmiştir.

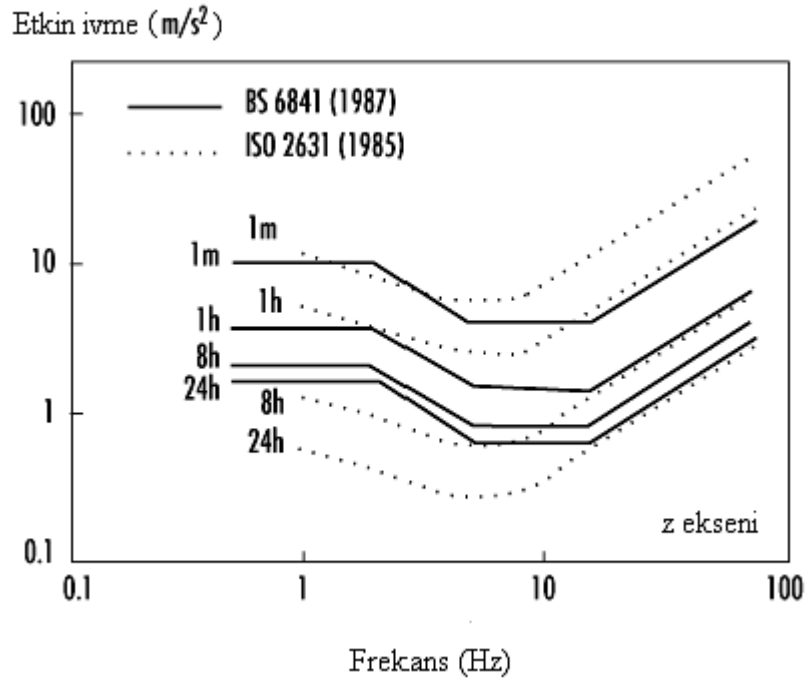
Tablo 4.2: ISO 2631 (1997) standardına göre ağırlıklandırılmış titreşimlerin etkin değerlerine bağlı rahatsızlık sınıflandırması [31]

	$a_n \text{ (m/s}^2\text{)}$	
Aşırı derecede rahatsız edici	3,15	Çok rahatsız edici
	2,5	
	2	
Rahatsız edici	1,6	Az rahatsız edici
	1,25	
	1	
	0,8	Rahatsız edici değil
Çok az rahatsız edici	0,63	
	0,5	
	0,4	
	0,315	
	0,25	

Titreşimlerin insan üzerindeki etkilerini incelerken kullanılan diğer bir yöntem ise sağlık açısından tehlike oluşturabilecek boyutlarının belirlenmesidir. Bunun yapılması için kullanılan yöntemde de titreşim etkili olduğu süreyle beraber değerlendirilir, fakat etkin değerler yerine ivmenin zaman üzerindeki toplam büyüklüğü ele alınır. Uluslararası standartlarda (ISO 2631) belirli süreler için farklı frekanslarda maruz kalınabilecek titreşim genlikleri belirlenmiştir ve bu genliklerin, yapılan deneyler sonucu insanda acı sınırı oluşturabilecek ivme değerlerinin yaklaşık yarısı olacak şekilde seçildiği belirtilmiştir. İngiliz standartlarında (BS 6481) ise sağlık sınırlarını çizebilmek için titreşim doz değeri (VDV) adı verilen bir ifade kullanılmaktadır. Titreşim doz değeri, bütün zaman aralığında etkiyen toplam titreşimin bir saniye süreyle etkimiş olması durumunda aynı rahatsızlığı uyandırması için gerekli ivme genliğini ifade etmektedir ve en kısa süreli darbeden gün boyu süren titreşimlere kadar uzanan geniş bir aralıktaki şiddetler üzerinde sonuç verebilmek amacıyla (4.44) denkleminde görüldüğü gibi zamana dördüncü güç ile bağlıdır.

$$\text{Titreşim doz değeri} = \left[\int_{t=0}^{t=T} a^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (4.44)$$

Titreşimden görülecek zararı kesin olarak belirlemek tamamen mümkün olmasa da, standartlarda çeşitli sınırlardan bahsedilmiştir. İngiliz standardında, $15 \text{ ms}^{-1.75}$ değerinde titreşim doz değerine eşdeğer olacak zaman üzerindeki toplam titreşimlerin ciddi biçimde rahatsızlık vereceği belirtilmiştir. Uluslararası standartta ise, 8.5 ile $17 \text{ ms}^{-1.75}$ arasındaki titreşim doz değerine denk gelecek titreşime maruz kalan kişilerin sağlık sorunları yaşamamaları için tedbir almaları gerektiği, $17 \text{ ms}^{-1.75}$ üzerinde ise muhtemelen sağlık bozucu etkiler görüleceği bildirilmiştir. Şekil 4.8’de, BS 6841 İngiliz standardında $15 \text{ ms}^{-1.75}$ doz değeri için geçerli, düşey eksenden gelen titreşim etkisi eğrileri ve aynı diyagram üzerinde ISO 2631 standardına ait sınır titreşim genliklerinin değişimi gösterilmiştir. Düşey ivmeler için her iki standardın da özellikle 4-8 Hz bölgesinde daha düşük sınır genlikler belirlemiş olması dikkat çekicidir. Bunun sebebi, bu frekans aralığında insan bedeninin titreşim hareketine daha duyarlı olmasıdır.



Şekil 4.8: ISO 2631 sınır titreşim genlikleri ile BS 6841’de geçerli $15 \text{ ms}^{-1.75}$ titreşim doz değeri eğrilerinin oturma pozisyonunda düşey eksen için değişimi [31]

5. HIZ TMSEKLERİNDE TİTREŞİM İNCELEMESİ

5.1 Hız Tümseği Tasarım Kriterleri

Hız tümseklere, taşıtları yavaşlatmak amacıyla yollara yerleştirilen engellerdir. Bu sebeple, öncelikli tasarım kriteri hızdır. İlk başta, bir hız tümseğinin araçları hangi hız seviyesine indirmesinin istendiği belirlenmelidir. Seçilen bu hız o tümsek tipi için kritik ya da limit hız olarak adlandırılır. Araçların tümsek üzerinden geçerken yavaşlamalarını sağlayan etken ise engel tarafından otomobile uygulanan düşey yöndeki ivmedir. Bundan dolayı, hız tümseği tasarımındaki iki önemli kriter limit hız ve araçtaki düşey ivmedir.

İlk uzun tümsek tasarımını gerçekleştiren Watts, ideal hız kontrol tümseğinin iki önemli karakteristik özelliğe sahip olması gerektiğini belirtmiştir. Buna göre; seçilen limit hızda veya daha düşük hızlarda tümsek üzerinden geçen taşıtlarda herhangi bir hasar olmamalı, aracın kontrolü kaybolmamalı ve sürücüyle yolcular rahatsızlık hissi duymamalıdır. Limit hızı aşan sürücüler ise bulundukları hızın büyüklüğüne bağlı olacak biçimde rahatsızlık duymalı; bununla birlikte araç yine de zarar görmemeli ve kontrol kaybı yaşanmamalıdır [21]. Watts, kendi tasarımı olan 3.7 m uzunluğunda ve 100 mm yüksekliğindeki ilk tümseğin bu kriterleri sağladığını düşünmekteydi. Bu nedenle Watts, daha sonra literatürde kendi adını alan tümsek modelinden geçen taşıtlara yerleştirdiği ivme ölçerler ile araçta görülen en büyük düşey ivme değerlerini gözlemlemiştir. Ölçüm sonuçlarına göre 32 km/saat hızla yol alan bir otomobil için Watts tümseğinin yarattığı en büyük ivme 9.3 m/s^2 olmaktadır [32]. Watts, bu tümsekten geçen sürücülerin maksimum ivme genliğini 7 ile 9 m/s^2 aralığında tutmaya çalıştığını ortaya çıkarmıştır [21]. Uzun tümsek tasarımının gündeme gelişinden kısa bir süre sonra İngiltere'nin birçok bölgesinde Watts tarafından önerilmiş olan tümsekler yerleştirilmiş ve ardından bu tümsekler üzerinde ölçümler yapılmıştır. Buradan alınan neticeler, sürücülerin bu tümseklere geçerken hızlarını 30 km/saat altına çektiğini göstermiştir [27].

Tümsek üzerinden geçen otomobilde oluşan en büyük ivme değeri ile hissedilen rahatsızlık miktarı arasında örtüşen bir doğrusal ilişki olduğu yönünde çalışma sonuçları ortaya konmuştur. Stephens, hız tümseğindeki en yüksek orta bölgenin, hız kontrolünü sağlamak için limit değerler sunacağını ve 6.8 m/s^2 seviyesindeki düşey ivmelerin normal bir sürücüyü yavaşlatacağını belirtmiştir [22]. Düşey ivmenin maksimum değerinin konfor ile ne kadar ilişkili olduğu konusunda ise başka çalışmalar yapılmıştır. Späng, farklı titreşim göstergeleri ile yolcu konforu arasındaki bağlantıyı incelemiş; maksimum düşey ivme ile konfor değerleri arasında %38 gibi zayıf bir korelasyon değeri olduğu sonucuna varmıştır. En iyi korelasyon ise ağırlıklandırılmış ivmenin etkin değeri ile sağlanan %92 seviyesi olmuştur [33]. Hem insan duyarlılığına göre ağırlıklandırılmış olması, hem de titreşimin toplam etki süresini dikkate alacak şekilde etkin değer ile irdeleme yapılması bu sonucu getirmiştir. ISO 2631 standartında Tablo 4.2’de görülen etkin değer ile konfor sınıflandırmasının özellikle kısa süreli titreşimlerde kullanılması tavsiye edilmiştir.

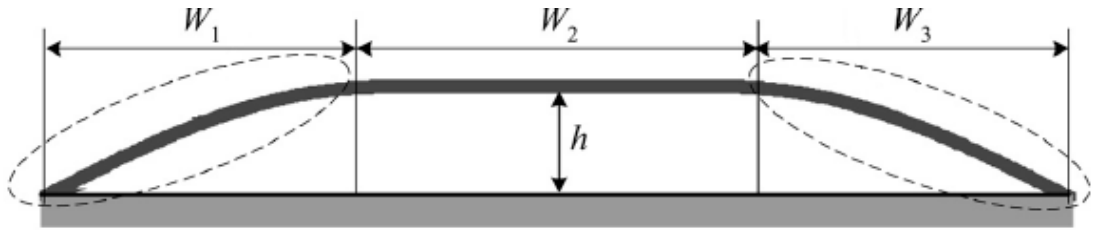
Kuzey Amerika’da hız tümseklerinin geometrik standartlarını belirlemek üzere yapılan bir çalışmada otomobiller değişik hız tümseklerinden farklı hızlarda geçmişler ve sürücü koltuklarında ölçülen düşey ve yatay ivmeler kaydedilmiştir. Ardından, maksimum ivme değerleri ile iki eksen de ölçülen ivmelerin (5.1) denklemi ile hesaplanan toplam etkin değerleri karşılaştırılmıştır. Hem maksimum, hem de etkin ivme büyüklüklerinin farklı tümsek ve hızlarda ölçülen değerlerinin ortalaması alınmış ve standart sapmaları bulunmuştur. Maksimum ivme değerleri için standart sapma 1.078 m/s^2 olurken, etkin ivme için 0.294 m/s^2 olmuştur. Buna bağlı olarak, çalışmada titreşim kriteri olarak ortalama büyüklüğü 1.66 m/s^2 olan etkin değer kullanılmıştır [23].

$$a_{xz} = \left(\frac{1}{2} [a_n(x)]^2 + \frac{1}{2} [a_n(z)]^2 \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

Titreşim irdelemesinde maksimum ivme değerleri ile konfor değişimi arasında doğrudan bağlantı kurulamasa da, bu büyüklüğün göz önünde bulundurulması gerekir. Zira, hız tümseğinin araçta yaratabileceği bir hasarın yüksek hızlarda ortaya çıkacak genliği büyük ani bir şok etkisiyle olması muhtemeldir. Ayrıca, kısa hız tümseklerinden geçiş süreleri az olduğu için maksimum ivme değerinin etkin değeri fazlasıyla etkileyeceği açıktır.

5.2 Hız Tümseği Geometrik Parametreleri

Hız tümseklerinin uygun birer trafik sakinleştirme çözümü olarak ortaya çıkmasını etkileyen birçok faktör vardır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, kullanılan yapı malzemesi, tümseklerin yerleştirildiği bölge, tümsekler arası mesafe, uygun işaretlendirme gibi birçok unsur hız tümseklerinin amacına ulaşmasını etkiler. Fakat, bunların haricinde en belirleyici faktör hız tümseğinin kendi geometrik yapısıdır. Tümseğin sergileyeceği karakteri, Şekil 5.1’de görüldüğü gibi geometrik parametrelerini oluşturan uzunluğu, yüksekliği, profili ve eni belirleyecektir.



Şekil 5.1: Düz tepeli tümsek için geometrik parametreler

5.2.1 Uzunluk

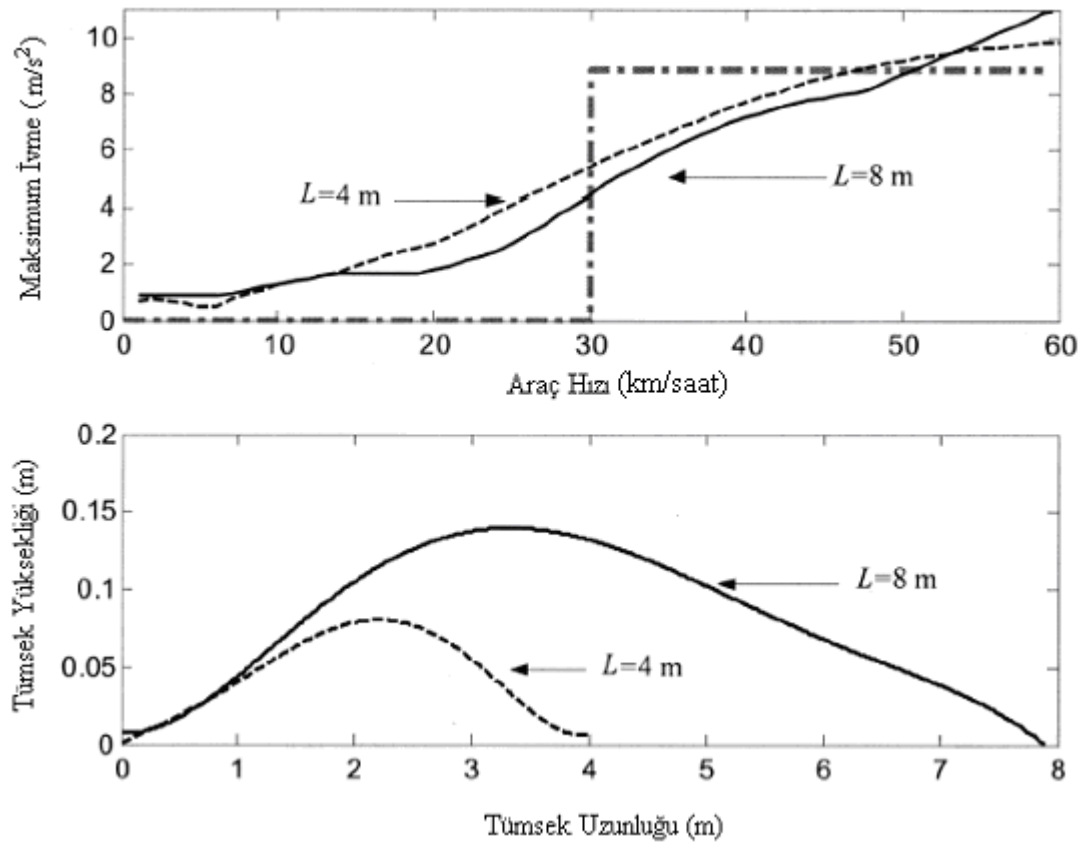
Uzunluk, tümsek karakteristiğini belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Uzun tümseklerin kullanılmaya başlanmasıyla beraber tümsek uzunluklarının en azından ortalama bir binek otomobilin aks mesafesi kadar olması gerekliliği kabul görmüştür. Çok kısa olan tümseklerde taşıtta oluşan düşey ivmenin artan hızla olan bağımlılığı azalmakta, dolayısıyla istenilen karakteri sergileyememektedir. Tümseğin boyunun çok uzun olması durumunda ise ön ve arka aksın aynı anda farklı yönlerde hareketi engellenecek ve hissedilen rahatsızlık miktarı azalacaktır.

Tümseğin tipine göre uzunluk incelemesi de değişecektir. Dairesel formdaki tümseklerde, iniş ve çıkış rampasının uzunluğu toplam tümsek uzunluğunu oluşturmaktadır. Genellikle, iki rampa birbirine simetrik olacak şekilde aynı boyutlarda yapılsa da daha detaylı tasarımlarda farklı uzunlukta rampalar tasarlanabilir. Düz tepeli tümseklerde ise rampalarla birlikte tepedeki düzlüğün uzunluğu da bir etken olacaktır. Daha uzun düzlüğe sahip tümseklerin yavaşlatma etkisinin azalması beklenir. Çok uzun düzlüklere sahip tümsekler genellikle şehiriçi ulaşımında sıkça yer alan otobüslerin konfor açısından çok kötü etkilenmemesi istenen güzergahlar üzerinde yer alırlar.

5.2.2 Yükseklik

Hız tümseklerinin yüksekliği yaratacakları düşey ivmeyi doğrudan etkileyen diğer bir faktördür. Çok alçak kalan tümsekler gerekli uyarıyı sağlayamayacaklardır. Gereğinden yüksek tümsekler ise otomobile zarar verecek boyutlarda ivmelere yol açabilir ya da kısa tümsekler söz konusu ise aracın altına sürterek hasar oluşturabilirler. Bu nedenle standartlarda da en hassas olarak belirlenen ölçü yüksekliktir. Tümsek yükseklikleri çoğunlukla 100 mm altında kalmaktadır.

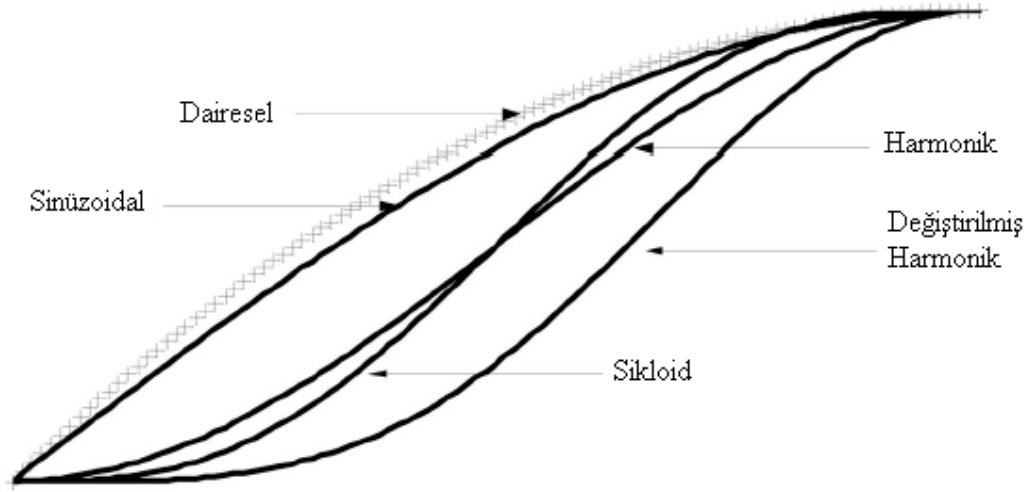
Tümseğin yüksekliğinin yaratacağı etki uzunluğundan bağımsız değildir ve bu durumun tam tersi de geçerlidir. Uzunluk ve yükseklik boyutlarının aynı şekilde değişmesi genel anlamda birbirlerine ters etki yaratırlar. Bir tümseğin aynı zamanda hem uzunluğu hem de yüksekliği uygun oranlarda arttırılırsa sonuçta benzer karakteristiğe sahip tümsek ortaya çıkacaktır. Şekil 5.2’de araç hızına bağlı olarak değişen maksimum ivme karakteristiği yakın kalacak biçimde uzunluğu arttırılan tümseğin yüksekliğinin de artması gerektiği görülmektedir [34].



Şekil 5.2: Artan tümsek uzunluğunun (L) geometri ve ivme değişimine etkisi [34]

5.2.3 Profil

Hız tümseğinin profilini çıkış ve iniş rampalarının eğimleri ve geometrik formu belirler. Genel olarak kullanılabilen rampa şekilleri arasında dairesel, sinüzoidal, harmonik ve sikloid formlar sayılabilir. Şekil 5.3’de çeşitli rampa geometrileri gösterilmektedir. Bu parametrelerin değişiminin tümsek karakteristiği üzerinde nasıl bir etki yapacağı, tümsek uzunluk veya yükseklik değişimlerinin sonuçları kadar belirgin değildir. Bunun yanında, düşük hızla tümseğe giren araçların daha az rahatsızlık duymaları için dairesel çıkışlar yerine sinüzoidal ya da harmonik tipin tercih edilmesi faydalı olabilir. İleriki bölümde bahsedilecek tümsek optimizasyonu konusunda yapılmış çalışmaların sonuçları arasında profil etkileri de yer almaktadır.



Şekil 5.3: Değişik çıkış rampası geometrileri [34]

5.2.4 Genişlik

Hız tümsekleri genellikle yolu boydan boya katedecek şekilde yapılırlar. Fakat, yolun kısıtlı bölümlerini kapsayan, ya da yol üzerinde parçalı bir şekilde yer alan tümsek tasarımları da mevcuttur. Genişlik değişiminin, tümseğin hıza bağlı ivme karakteristiğinde açık bir değişime sebep olması beklenmez. Yolu tamamen kaplayacak genişlikteki tümseklerin sağlayacağı fayda, sürücülerin en azından araçlarının bir çift tekerleğini tümsekten geçirmemek amacıyla yol kenarına doğru manevra yapmalarının önüne geçilecek olmasıdır. Genişliği yoldan az olan tümsekler ise yağmur veya kar sularının drene edilmesini engellememe avantajına sahiptir.

5.3 Hız Tümseği Optimizasyonu

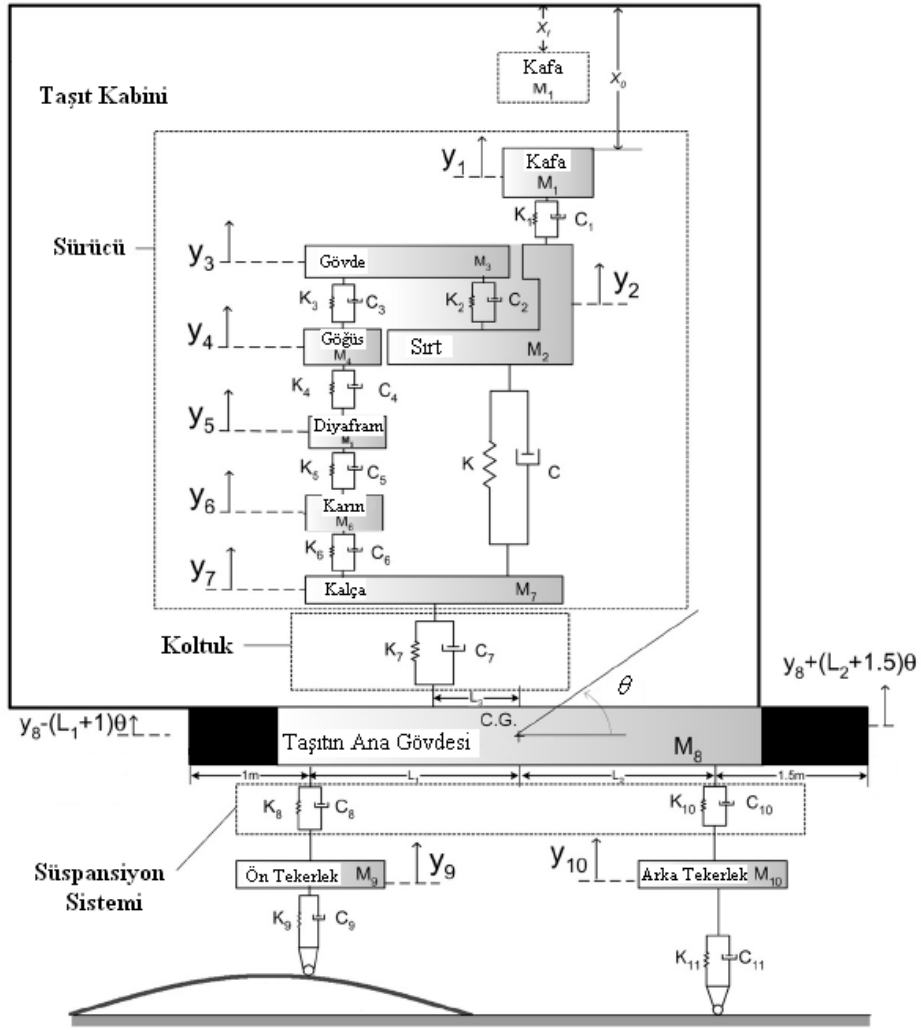
Hız tümseklerinin optimize edilmesi ve parametre değişimlerinin etkilerini incelemek için yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan literatür incelemesi ile bu çalışmaların izledikleri yöntem veya inceledikleri etkiler farklı olsa da, optimizasyon hedefi söz konusu olduğunda çoğunun ortak bir noktada bulunduğu gözlenmiştir. Bu hedef, Watts tarafından uzun tümseklerin sağlanması gerektiği belirtilen iki temel kriteri içermektedir. Yani, limit hızlar aşılmadığı sürece rahat ve emniyetli sürüş sağlanırken hız limitini geçer geçmez ani düşey ivme artışları yaşanmalıdır. Optimizasyon konusundaki çalışmalar simülasyon ve saha testlerine dayanan çalışmalar olarak ikiye ayrılabilir.

5.3.1 Simülasyon Çalışmaları

Hız tümseklerinin taşıtlar üzerindeki etkilerini belirlemek üzere ilk olarak 1981 yılında Kassem ve Al-Nassar tarafından bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Araç ve yolcu için birer matematik modelin oluşturulduğu çalışma sayesinde birçok farklı hızda aracın değişik bölgelerinde oluşan ivmeleri görmek ve buna göre yorum yapmak mümkün olmuştur. Fwa ve Liaw tarafından 1992 yılında hazırlanan çalışmada ise oluşturulan araç modeli ile 7.25 m/s^2 maksimum ivme sınırını aşmaması istenen değişik hız tümseği geometrileri karşılaştırılmıştır. Taşıt için oluşturulan matematik modelin kalibrasyonu ise Watts tipi tümsekten geçen araçtan alınan veriler kullanılarak yapılmıştır. Ortaya koyulan tümsek tipleri ise $6-9 \text{ m/s}^2$ arasındaki ivmelere denk gelecek hızlarda yapılan testlerle kontrol edilmiştir [16].

Hız tümseklerinin optimum geometrik tasarımı üzerine Khorshid ve Alfares tarafından yapılan çalışma [34] izlenen yöntem ve sonuçları açısından oldukça dikkat çekicidir ve daha detaylı bir biçimde açıklanacaktır. Çalışmada bir otomobil ve sürücüsünü kapsayan model hazırlanmış ve bu model kullanılarak değişik hız tümseği çeşitleri için optimum geometrik biçimin saptanması amaçlanmıştır. Matematik model, sürücü için 7 ve otomobil için 5 olmak üzere toplam 12 serbestlik dereceli olarak tasarlanmıştır. Şekil 5.4'te görülen sürücü-taşıt modeline ait hareket denklemi (5.2) şeklinde olmaktadır.

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = [F] \{U\} \quad (5.2)$$



Şekil 5.4: Taşıt-sürücü matematik modeli [34]

Matematik modelin yaratılmasının ardından optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Öncelikle hız ve konfor limitleri olan iki ana kriter belirlenmiştir. Hız limiti, sürücünün konfor azalması hissetmeden geçebileceği sınır değeri; konfor limiti ise araç hız sınırlarını geçtiği takdirde sürücünün algılaması gereken sınır ivme değerini ifade etmektedir. Çözüm olarak bulunması amaçlanan, üç farklı hız tümseği modeli için yükseklik, uzunluk ve rampa profilleridir. Bu üç farklı tümsek; Watts tipi uzun tümsek, düz tepeli tümsek ve çok noktalı profil olarak seçilmiştir. Çok noktalı profilde, diğer tümseklerden farklı olarak herhangi bir geometrik sınırlama konulmamıştır; çözümde belirtilen sayıda nokta kullanılarak en uygun geometrik form bulunacaktır. Çalışmada, sürücünün rahatsızlık seviyesini belirlemek için kafa bölgesinden elde edilecek maksimum genlik incelenecektir. Daha sağlıklı sonuç verebilecek olan etkin değer yerine maksimum genliğin kullanılmış olmasının sebebi

ise çözüm sistemini biraz basitleştirmektedir. Zira sürücünün kafa bölgesindeki ivme büyüklüğü modelden alınan düşey yöndeki hareketin diferansiyel çözümü ile doğrudan elde edilebilmektedir. Son olarak çözüm aşamasına geçmeden önce hedef fonksiyonu belirlenmiştir. Sürücünün gitmesi istenen hız ve hesaplamalar sırasında mevcut durumda gittiği hız farkının karesi alınmaktadır. İki farklı ivme değeri olarak alınan a_1 ve a_2 sırasıyla kritik hızın altında ve üstündeki hızlarda sürücü kafa bölgesinde oluşan ivmeyi temsil eder. Her iki ivme değerinin hesaba katılmasıyla mutlak büyüklükler incelenmiş olmaktadır. Hedef fonksiyonu hesaplanmasında (5.3) denkleminde görüldüğü biçimde, paydada aracın hesaplamalar sırasında ulaştığı maksimum hız yer almaktadır. Bunun sebebi, değişik birçok optimum tasarım seçeneği arasında karşılaştırma yapma imkanının sağlanmak istenmesidir.

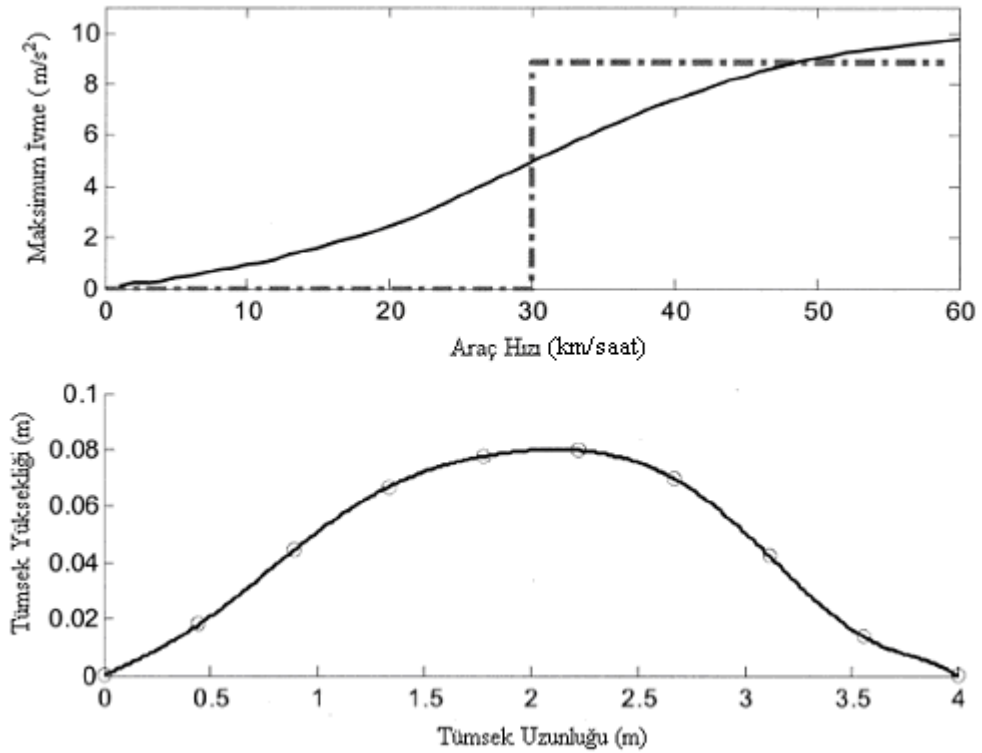
$$Hedef\ Fonksiyonu = \frac{\left(a_{1_{hedef}} - a_{1_{mevcut}} \right)^2 + \left(a_{2_{hedef}} - a_{2_{mevcut}} \right)^2}{maksimum(V)} \quad (5.3)$$

Optimizasyon problemi matematiksel olarak tanımlandıktan sonra MATLAB içinde ikinci dereceden lineer sıralı programlama kullanılarak çözüme gidilmiştir. Hız tümsekleri için yapılan çözümde kritik ivme ve hız sınırları olduğu gibi aynı zamanda toplam tümsek uzunluğu sınırı da belirlenmiştir. Kritik hız 30 km/saat, kritik ivme değeri ise 0.9 g olarak seçilmiştir. Optimum tasarımların hepsinde uzunluk 4 metre olacaktır. Ayrıca, tümsek yüksekliğinin en az 3 cm, en fazla 30 cm olabileceği şeklinde bir sınır mevcuttur. Programa, tümseğin çıkış rampası (W_1), iniş rampası (W_2, W_3), varsa tepe düzlüğü (W_2) ve yüksekliği (h_t) için başlangıç değerleri girilir ve bu şekilde hesaplamaya geçilir. Watts tipi ve düz tepeli tümsekler için bulunan optimum form sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında, uzun tümsekler için optimum çözümde iniş ve çıkış rampalarının uzunluğunun yaklaşık aynı olduğu görülmektedir. Düz tepeli tümsek için ise iniş ve çıkış rampalarının uzunlukları birbirine yakın olurken, düzlük bölüm çok kısadır. Bu nedenle optimizasyon çözümünün düşük hızlarda yüksek ivme yaratmak için düz tepeli tümsek kullanmanın uygun olmadığı sonucu ortaya koyduğu söylenebilir. Her iki tümsek tipi için de iniş rampalarının profili sikloid formunda olurken, çıkış rampaları için farklı profiller seçilmiştir. Düzlük bölümü için az da olsa uzunluk ayrılan düz tepeli tümseğin rampa uzunlukları kısaldığı için, uzun tümsekten daha kısa olması mantıklı bir sonuçtur.

Tablo 5.1: Optimum hız tümsekleri boyutları [34]

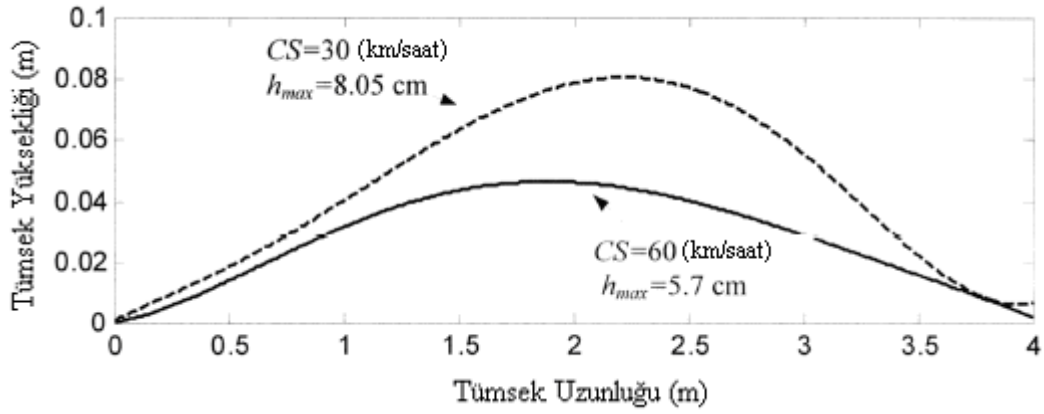
Tümsek Tipi	Rampa Profili		h_t (cm)	W1 (m)	W2 (m)	W3 (m)
	Çıkış	İniş				
Watts (Uzun tümsek)	Sinüzodial	Sikloid	7,3	1,98	1,96	-
Düz tepeli tümsek	Harmonik	Sikloid	6,85	1,76	0,36	1,88

Bu iki tümsek tipi haricinde, geometri sınırlaması olmayan çok noktalı bir tasarım incelenmiştir. Bu eğriyi oluşturma yöntemi n derecesindeki bir $p(x)$ polinomuna uygun katsayıların bulunması şeklinde olmaktadır. Önemli olan nokta polinom derecesinin uygun seçilmesidir. Optimum formu yakalamanın yanısıra pratikte uygulanabilirliği olan bir geometrinin bulunması gerekmektedir. En iyi çözümün belirlenmesi için 2 ile 10 nokta arasındaki tüm dereceler için olasılıklar hesaplanmıştır. Pratik formların dışına çıkmaları sebebiyle 10 üzerinde noktası bulunan eğriler çözüm dışı bırakılmıştır. Şekil 5.5’de görülen sonuç, oluşan tümsek geometrisinin tek tepeli ve pratik kullanıma uygun olduğunu göstermektedir.



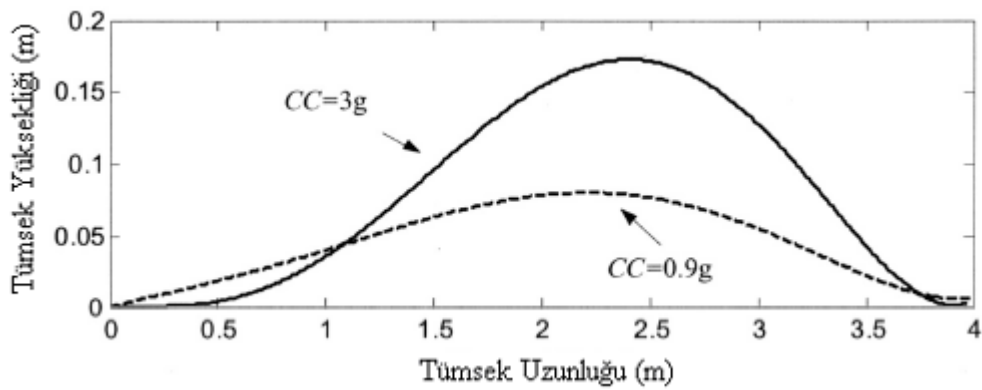
Şekil 5.5: Çok noktalı tümsek modeli için optimizasyon sonuçları [34]

Simülasyon çalışmasında alınan tüm sonuçların ardından, değişen kritik ivme ve kritik hız durumları için tümsek yapısının değişimi gözlenmiştir. Bu farklılıkları incelemek amacıyla 5. dereceden polinom eğrisi olan bir tümseğin optimizasyon çözümüne gidilmiştir. İlk başta, kritik ivme 0.9 g olarak sabit bırakılmış, kritik hızın 30 ve 60 km/saat olması durumları için sonuçlar alınmıştır. Kritik hızın 30 km/saat olduğu durum için maksimum yüksekliği 8.05 cm, çıkış rampası yaklaşık 2.25 cm ve iniş rampası da 1.75 cm olan bir tümsek tipiyle karşılaşılmaktadır. Kritik hız iki katına çıkarıldığında ise tümseğin tepe noktasının yüksekliği 5.7 cm seviyesine kadar inmektedir. Hız limiti arttırıldığında tümseğin yüksekliğinin azalması beklenen bir durumdur. Tümsek geometrisinin değişimi Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Kritik hız değişimine bağlı olarak değişen tümsek formu [34]

Diğer bir karşılaştırma içinse, kritik hız 30 km/saat seviyesinde sabit tutularak, kritik ivme 0.9 g ve 3 g olacak şekilde problem çözümü yapılmıştır. Bu durumda, sürücüye uygulanması istenen ivme düzeyi ile birlikte tümsek yüksekliğinin de arttığı görülmüştür. Şekil 5.7’de kritik ivme değişimine uygun formlar yer almaktadır.



Şekil 5.7: Kritik ivme değişimine bağlı olarak değişen tümsek formu [34]

5.3.2 Saha Ölçümü Çalışmaları

Saha ölçümlerine dayanan çalışmalar genellikle iki farklı amaçtan birini taşımaktadır. Bunlardan biri çeşitli bölgelere yerleştirilen hız tümseklerinin yakınına koyulan hız ölçüm cihazları ile uzun süre yapılan ölçümler sonucunda tümseklerin hız düşürme etkisinin incelenmesidir. İkinci tür çalışma ise, araçlara yerleştirilen ivme ölçerler ile tümseklerden geçerken taşıt üzerinde oluşan titreşim etkilerini incelemek ve bunu farklı hızlar için yaparak hız tümseğinin karakteristik özelliklerini belirlemeyi hedeflemektedir. Bazı çalışmalar ise aynı zamanda her iki yöntemi kullanarak daha detaylı sonuçlara ulaşmaya çalışmaktadır.

Weber ve Braaksma tarafından yapılan çalışmada [23], iki farklı araçla 75 ve 100 mm yüksekliğindeki tümseklerden geçerken sürücü koltuğunda oluşan düşey ve yatay ivmeler ölçülmüştür. Daha geniş bir aralığı kapsaması açısından test araçlarından biri küçük sınıf, diğeri ise büyük bir sedan otomobil olarak seçilmiştir. Bunların yanı sıra otobüsler ile de bazı testler yapılmıştır. Bunun sebebi otobüsler açısından daha uzun tümseklerin kullanılması gerekliliğidir ve şehiriçinde otobüs güzergahları üzerinde bu tür tümseklerin kullanımının daha uygun olacağı belirtilmiştir. Saha testlerinde, 25 ve 29 km/saat hızla gidilirken Watts tipi uzun tümseklerin, 40 ve 44 km/saat hızda ise düz tepeli tümseklerin üzerinden geçerken ölçüm yapılmıştır. İvme karşılaştırma kriteri olarak etkin değerler kullanılmış ve bulunan ivme değerleri arasında regresyon analizi yapılarak değişik kritik hızlar için optimum tümsek boyu ve yüksekliği belirlenmiştir. Bulunan sonuçlarda yalnızca tümsek geometrisi ile ilgili farklılıklar araştırılmamıştır. Tablo 5.2’de çalışma sonucunda elde edilen ideal tümsek boyutları yer almaktadır.

Tablo 5.2: Farklı hızlarda otomobil ve otobüs için ideal hız tümseği boyutları [23]

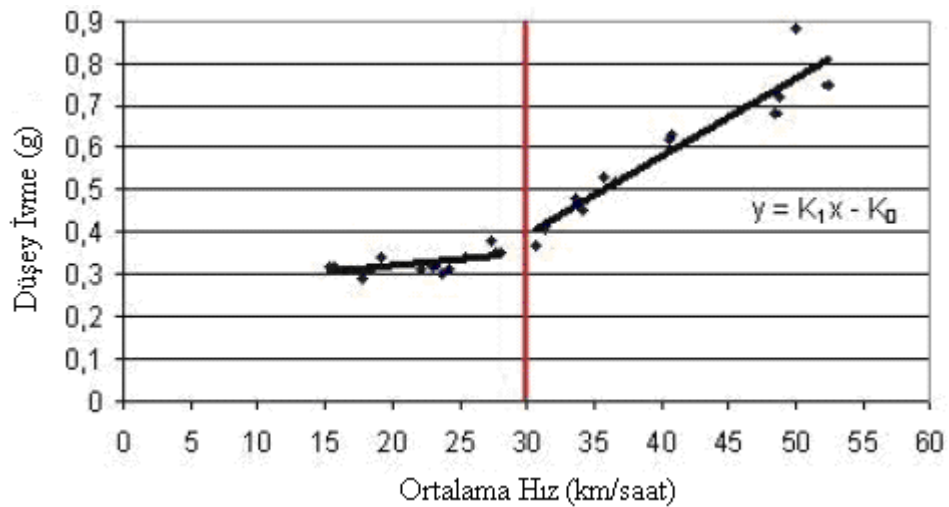
Araç Tipi	Tümsek geçiş hızı (km/saat)	Tümsek uzunluğu (m)	Tümsek yüksekliği (mm)
Otomobil	25	5,2	100
Otomobil	35	7,9	100
Otomobil	45	9,1	75
Otobüs	25	7,9	100
Otobüs	35	5,7	75

Bjanarson tarafından yapılan çalışmada [3] 4 adet uzun, 14 adet düz tepeli tümsek olmak üzere toplam 18 farklı tümseğin bulunduğu alanlara yerleştirilen radarlar ile araçların geçiş hızları ölçülmüş ve tümseklerin yavaşlatma etkileri gözlenmiştir. Aynı zamanda, test araçlarına yerleştirilen ivme ölçerler ile tümsekten geçerken iç kabin zemininde oluşan titreşimler kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler bir arada ele alınarak hız tümseğinin karakteri ve parametrelerinin değişimi ile birlikte yarattığı etkinin farklılaşması incelenmiştir.

Çalışmada düz tepeli tümsekler kendi aralarında boylarına ve çıkış rampalarının açısına göre alt sınıflara ayrılmışlardır. Uzunluğu 10 metrenin altında olan düz tepeli tümsekler kısa sınıfına alınırken, diğerleri uzun tabir edilmiştir. Çıkış rampasının yükselme açısı 4.5° ve üzerinde olanlara sert düz tepeli tümsekler denirken, diğerleri yumuşak olarak nitelendirilmiştir.

İvme ölçerler ile yapılan ölçüm sonuçlarından bir örnek Şekil 5.8’de görülmektedir. Bu grafikte, farklı hızlarda tümsekten geçen araçtaki maksimum ivme değerleri görülmektedir. Tümsekler için limit hız olarak belirlenen 30 km/saat üzerinde ve altında, düşey maksimum ivmeler ile ortalama hızlar arasında lineer regresyon eğrileri çizilmiştir. Bu doğrulardan, 30 km/saat hızın üzerinde yer alanın denklemi (5.4) biçiminde olduğu kabul edilirse, K_1 bu doğrunun eğimini belirtmektedir. Dolayısıyla, K_1 değeri düşey ivmenin hızla olan bağlantısını göstermektedir ve bu nedenle çalışma içerisinde tümsek karakterini belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

$$y = K_1 x - K_0 \quad (5.4)$$



Şekil 5.8: Maksimum düşey ivme ve ortalama hız bağlantısı [3]

Çalışmada, 18 farklı tümsek ile yapılan ölçüm sonunda sınıflandırılmış olan farklı tümsek tipleri için 25 ve 40 km/saat hızla geçerken oluşan maksimum düşey ivmeler, ortalama geçiş hızları, tümseğe yaklaşma hızları ve K_1 değerleri belirlenmiştir. Tümseklere göre bu değerlerin dağılımı Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3: Tümsek tiplerine göre ivme ve hız değerleri [3]

Tümsek Tipi	a_{mak} (v=25 km/saat) (m/s ²)	a_{mak} (v=40 km/saat) (m/s ²)	Geçiş Hızı (km/saat)	Yaklaşma Hızı (km/saat)	K_1
Dairesel uzun tümsek	3,5	6,9	18,53	32,6	0,0236
Düz tepeli tümsek (sert ve kısa)	3	5,2	22,73	38,72	0,0165
Düz tepeli tümsek (sert ve uzun)	3,2	4,7	20,48	33,06	0,0092
Düz tepeli tümsek (yumuşak ve kısa)	2,9	4,3	22,09	32,91	0,0092
Düz tepeli tümsek (yumuşak ve uzun)	2,3	4	26,27	40,62	0,0109

İvme ölçümünün yapıldığı her iki hız için de dairesel uzun tümseklerin en yüksek düşey ivme değerlerine sebep olduğu görülmektedir. Düz tepeli tümsekler arasında ise en düşük ivmeye sebep olan uzun ve düşük eğimli olanlardır. Bu tümseklerin 40 km/saat hızda sağladığı 0.4 g büyüklüğündeki ivmeler neredeyse uzun tümseklerle 25 km/saat ile yapılan ölçümlerde açığa çıkan değere yakındır. Sert ve kısa düz tepeli tümsekler ise uzun tümseğe en yakın karakteristiği sergilemiştir.

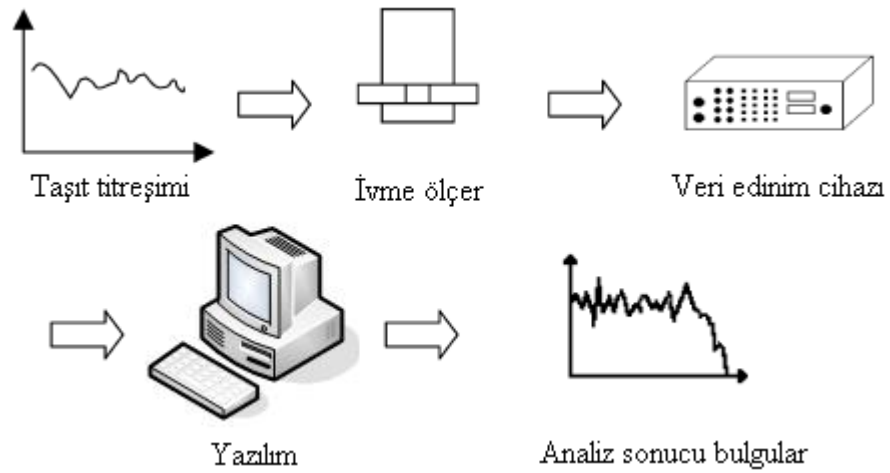
Geçiş hızlarına bakıldığında ise tümsekler tarafından sağlanan ivmelerle ters bir ilişkinin mevcut olduğu açıktır. Sürücüyü düşük hızlarda rahatsız edebilecek genlikte ivmelere yol açan uzun tümseklerden ortalama geçiş hızı 18.53 km/saat olurken, bu hızlar düz tepeli tümseklerin boyu uzadıkça ve rampaların sertliği azaldıkça artmaktadır. Uzun ve yumuşak düz tepeli tümseklerden ortalama geçiş hızı 26.27 km/saat seviyesine ulaşmıştır. Diğer önemli bir büyüklük olan yaklaşma hızları incelendiğinde ise sert-uzun ve yumuşak-kısa düz tepeli tümseklerin de, uzun tümseğe yakın bir yaklaşma hızı sergilediği görülmektedir. Sert ve kısa tümsek ise yüksek ivme genliklerine sebep olmasına rağmen geçiş ve yaklaşma hızlarını gerektiği kadar düşürememiş görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri, çalışmada da belirtildiği gibi ortam şartlarının tamamen aynı olmamasıdır.

6. DENEYSEL DONANIM VE YÖNTEM

Bu çalışmada, hız tümseklerinin araçlarda yarattığı etkileri gözlemlemek ve alınan veriler ışığında hız tümseklerinin karakteristik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla iki farklı hız tümseği ve bir kedi gözü yol butonu serisi üzerinden değişik hızlarda geçmek suretiyle ölçüm yapılmıştır. Elde edilen veriler analiz edilerek uygun sonuçlara ulaşılmıştır.

6.1 Ölçüm Donanımı

Araçtaki düşey ivmenin ölçümü için gerekli donanım temel olarak; veri edinim cihazı ve ivme ölçerlerdir. Bunun yanında, ara bağlantı elemanı olarak görev yapan parçalar bulunmaktadır. Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, araçta oluşan ivme öncelikle ivme ölçer tarafından algılanacak, veri edinim birimine gelen sinyaller işlenip bilgisayara yollanacaktır. En son, bilgisayar analizi ile bulgular elde edilecektir.



Şekil 6.1: Ölçüm sisteminin işleyiş şeması

6.1.1 Veri Edinim Cihazı

Veri edinim cihazları, sensör ve transdüser bağlantılarından alınan elektrik sinyallerini toplayan ve büyüklüklerini ölçerek elde ettiği verileri işlenmek üzere bilgisayar ortamına aktaran donanımlardır. Bu cihazlar istenilen özelliklerde sinyal üretme

özelliğine de sahip olabilmektedirler. Bilgisayarda herhangi bir titreşim değişimini inceleyebilmek için dijital sinyaller gereklidir. Oysa, ivme ölçerler ile elektrik sinyali iletilmektedir. Bu noktada, veri edinim cihazlarının görevi analog bir sinyali dijital hale getirerek, bilgisayar ortamında kullanılabilirliğini sağlamaktır.

Veri işlemek için kullanılabilecek sistemler arasında ayrı bir uçbirim olarak yer alan cihazlar olduğu gibi, doğrudan bilgisayar anakartı üzerindeki uygun yuvalara konumlandırılacak kartlar da mevcuttur. Bilgisayara bağlanacak kartlar, ucuz ve pratik çözümler yaratmakla beraber sundukları kapasite ve işlem hızları açısından bağımsız cihazlara göre daha zayıf kalmaktadırlar. Ayrıca, bu kartlarla yapılacak işlemler tamamen bilgisayarın işlemcisine bağlı olacağı için kapasite sınırları daha düşük olacaktır. Ayrık uçbirimler ise daha yüksek örnekleme oranları ve çözünürlükleri sunarlar. Bunun yanında, bağımsız işlemcilere sahip oldukları için çok kanallı uygulamalarda sorunsuz bir şekilde çalışırlar. Örnekleme oranı analog sinyalin ne kadar hızlı bir biçimde dijital hale dönüştürüldüğünü, çözünürlük ise cihazın sinyal değişikliklerine olan hassasiyetini göstermekte olup her iki büyüklük de bu gereçlerin işlem kapasitesini belirtmektedir.



Şekil 6.2: Brüel&Kjaer veri edinim cihazı [35]

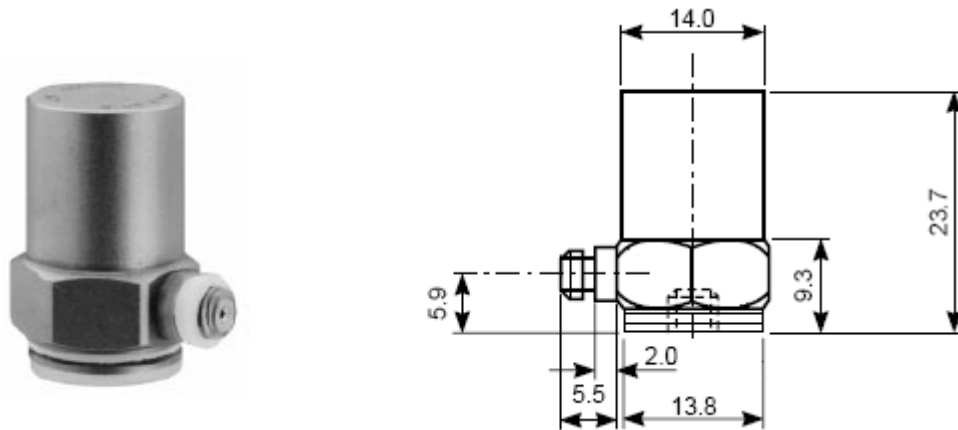
Ölçümler yapılırken Brüel&Kjaer firmasına ait 3560 B-020 model taşınabilir veri edinme uçbirimi kullanılmıştır. Hız tümseklerinin özelliklerini görmek için yapılan ölçümler yol üzerinde hareket eden otomobil üzerinde yapıldığından taşınabilir bir cihazın kullanımı kolaylık sağlamaktadır. Şekil 6.2’de görülen bu cihazın yüksekliği 182 mm, genişliği 64 mm ve derinliği 270 mm olup, batarya haricindeki ağırlığı ise

2.5 kilogramdır. Toplam 5 adet giriş kanalı ve takometre girişi için ayrıca bir giriş kanalı bulunmaktadır. Ayrıca, sinüs dalgası üreten bir çıkış kanalına sahiptir. Ölçüm frekans aralığı 0-25.6 kHz olan cihaz 24 bit çözünürlük ile ölçüm yapmaktadır.

6.1.2 İvme Ölçer

İvme ölçerler, statik veya dinamik ivme kuvvetlerini ölçen elektromekanik cihazlardır. Bu çalışmada mevcut olan yükler yolda yer alan hız tümsekleri nedeniyle oluşacak dinamik kuvvetlerdir ve ivme ölçer bu durumun etkisini görebilmek için kullanılmıştır. İvme ölçerler değişik biçimlerde çalışabilirler. Bunlardan yaygın olan biri, piezoelektrik etkisidir. Bu etkiyi oluşturan, mikroskopik boyutlarda olan ve ivme ölçerin hareketi ile birlikte üzerinde oluşan stresle elektrik üreten kristallerdir. Ortaya çıkan elektrik geriliminin büyüklüğüne bağlı olarak ivme ölçerin yerleşik bulunduğu bölgenin ivmelenme miktarı ölçülmüş olur.

Ölçümlerde kullanılan ivme ölçerler, Brüel&Kjaer üretimi olan 4396 modelidir. Ağırlığı 18.2 gr olan bu modele ait boyutlar Şekil 6.3’de görülmektedir. İvme ölçerde piezoelektrik özellik taşıyan kurşun zirkonya titan (PZ 23) kullanılmıştır ve bağlantı tabanı, gövdeyle arasına yerleşik olan yüksek kaliteli seramik diskler sayesinde izole edilmiş durumdadır. Taban ve gövde titanyumdan imal edilmiş olduklarından korozyona dayanıklıdır. İvmeye bağlı voltaj artışının ölçüsü olan duyarlılık değeri bu model için %2 hata payı ile birlikte 10 mV/ms^{-2} olarak bildirilmiştir. Sıcaklık 100°C altında olduğu takdirde $\pm 750 \text{ m/s}^2$ aralığında ölçüm yapabilmektedir ve en fazla 14 kHz frekans sınırına çıkabilmektedir. Frekans aralığının üst limiti olarak ölçüm bölgesine monte edilmiş ivme ölçerin rezonans frekansı olan 28 kHz değerinin yarısı alınmıştır.



Şekil 6.3: Brüel&Kjaer 4396 model ivme ölçeri ve boyutları [36]

6.1.3 Bağlantı Elemanları

Veri edinim cihazı ve ivme ölçerin birbirleriyle ve ölçüm yapılacak yüzeylerle olan bağlantısını sağlayan elemanlar bulunmaktadır. İvme ölçerin titreşim değişimi gözlenmek istenen bölge ile bağlantısı 24.5 mm çapındaki UA 0642 mıknatısı ile sağlanmıştır. Veri edinimi cihazı ile ivme ölçer arasındaki bağlantıyı sağlamak için 5 metre uzunluğunda teflon ile yalıtılmış ve bu sayede çevre titreşimlerinden etkilenmeyen 10-32 UNF kabloları kullanılmıştır. Bu kablonun veri edinim cihazı ile bağlantısını sağlayan eleman ise JP0145 UNF/BNC dönüştürücü adaptörüdür. Bu elemanlar Şekil 6.4’te toplu olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Bağlantı elemanları: (a) UA 0642 mıknatısı (b) 10-32 UNF bağlantı kablosu (c) UNF/BNC adaptörü [36]

6.2 Ölçüm Yazılımı

Veri edinim cihazı tarafından bilgisayara aktarılan dijital sinyallerin anlam kazanması ve üzerinde incelemeler yapılması için bir yazılım kullanmak gerekmektedir. Bu çalışmada, Brüel&Kjaer Pulse yazılımının 9. versiyonu kullanılmıştır. Bu yazılım sahip olduğu güçlü analiz yeteneklerinin yanı sıra veri edinim cihazıyla uyumlu çalışması nedeniyle avantajlıdır.

Programın temeli olarak kabul edilebilecek 7700 bölümü ile hızlı Fourier dönüşüm (FFT), sabit yüzdeli bant (CPB) ve genel analizler gerçekleştirilebilir. Alınan veriyle, aynı anda birden fazla analizi eşzamanlı olarak yapabilen bu program, bilgisayar işlemcisini kullanarak birçok kanaldan alınan verilerle gerçek zamanlı sinyal analizini mümkün kılmaktadır. Gerçek zamanlı analiz yapabilmesinin yanında, veri kaydetme özelliği sayesinde bir kez yapılan ölçümlerin kaydedilerek üzerinde istenilen her analizin yapılması olanağı mevcuttur. Zamana bağlı ivme değişimi de veri olarak depolanabilmekte ve ölçümden sonra, kayıtlı verilerle frekans analizleri yapılabilmektedir.

6.3 Ölçüm ve Analiz Yöntemi

Çalışmada izlenen yöntem temel olarak üç aşamaya indirgenebilir. Bunlar; ölçüm kurulumunun yapıldığı hazırlık aşaması, hız tümseklerinin bulunduğu bölgelerde otomobil ile yapılan ölçüm aşaması ve elde edilen veriler ışığında analizlerin gerçekleştirildiği analiz aşamasıdır. Bu aşamalar sırayla birbirlerini takip etmekte ve her adımda gerçekleştirilen işlemler bir sonraki bölümde alınan sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. Oluşabilecek ölçüm hatalarının en alt seviyeye çekilebilmesi için kontrollü ilerleyen bir ölçüm sistemi oluşturulmuştur.

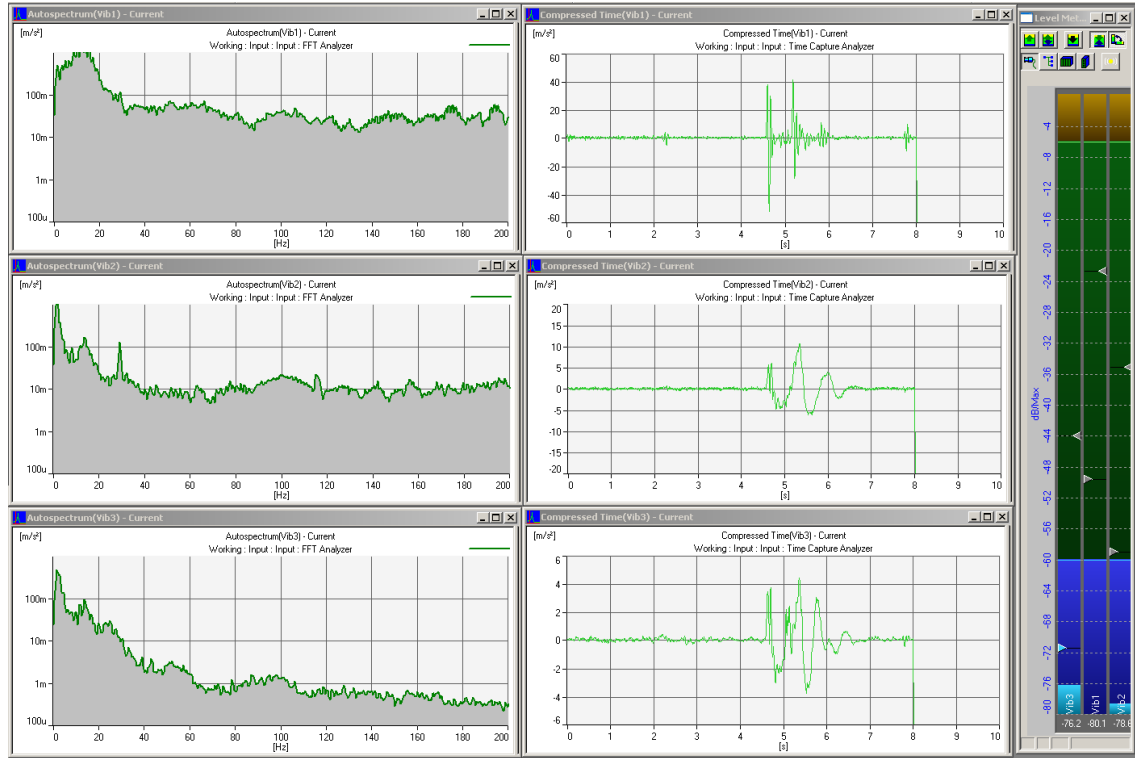
6.3.1 Hazırlık Aşaması

Hız tümseklerinden geçen otomobillerle yapılacak ivme ölçümlerinin temeli bu aşamada kurulmaktadır. Yapılacak hazırlıklar kendi arasında iki gruba ayrılabilir. Bunlardan ilki, kullanılan yazılım üzerinde ölçümlere uygun bir kurulumun hazırlanmasıdır. İkinci aşamada ise deney donanımının ölçüm yapılacak taşıt üzerinde uygun biçimde montajı gerçekleştirilmektedir.

Çalışmanın amacına ulaşmak için otomobillerde hız tümseğinin üzerinden geçerken oluşan ivmelerin ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, veri edinme biriminden bilgisayardaki yazılıma aktarılan sinyallerden titreşimin zaman içinde değişimini çıkartacak bir kurulum hazırlanmıştır. Bunun için bir zaman kaydedici analizör tanımlanmış ve ivme ölçerlerden gelecek sinyaller bu analizöre atanmıştır. Ayrıca bir hızlı Fourier dönüşüm analizörü tanımlanmıştır. Bu analizör, ölçüm sonuçlarını irdelemek amacıyla kullanılmayacak olsa da kurulumu yerleştirilmiştir. Çünkü, ölçümlerin gerçekleştirilmesi esnasında ivme ölçerlerden gelen verilerin sağlıklı olup olmadığını anlamak için Fourier analizörü sonuçlarını izlemek gerekmektedir. Böylece, gelen sinyallerde bozukluk olup olmadığı kolaylıkla tespit edilebilmekte ve eğer varsa sorun giderilmektedir. Fourier analizörü 200 Hz aralığında bir tarama yapacak, vereceği sonuç 400 diziden oluşacak şekilde tasarlanmıştır.

Pulse programında kaydedilen kurulum için özel olarak bir ekran hazırlanır. Bu ekranda, tanımlanmış olan analizörlerin her sinyal için verecekleri sonuç grafikleri yerleştirilmiştir. Böylece, ölçüm sırasında verilerin gelişi kontrol edilebilecek ve yanlış durumlar tespit edilebilecektir. Yine bu ekrana her ivme ölçerden gelen sinyallerin anlık değişimini yansıtan seviye göstergesi yerleştirilmiştir. Bu gösterge sayesinde henüz ölçüme başlanmamış olsa bile sinyallerin iletiminde bir sorun olup

olmadığı anlaşılabilecek ya da sinyallerin seviyelerinin tutarlılığı kontrol edilebilecektir. Şekil 6.5'te ölçüm için hazırlanan ekran görülmektedir.



Şekil 6.5: Ölçüm için hazırlanan kurulum ekranı

Bundan sonraki aşamada, ölçüm donanımının otomobil üzerinde ne şekilde monte edileceği tasarlanacaktır. Veri edinim cihazı ve bilgisayar taşınabilir olduğundan donanım yerleşimi konusunda belirlenmesi gereken en önemli husus ivme ölçerlerin hangi noktalara ve ne şekilde yerleştirileceğidir. Yapılan ölçümlerde üç farklı bölgenin titreşiminin ölçülmesinin araç içindeki titreşim farklılıklarını görmek ve tümsekler arası karşılaştırma yapmak bakımından faydalı olacağına karar verilmiştir. Bunlar sırasıyla aks, gövde ve koltuk bölgeleri olarak seçilmiştir. Akstan gelen veriler kaydedildiği takdirde tekerleğin yaptığı sönümleme dışında yoldan gelen uyarının büyüklüğü izlenebilecektir. Gövdede yapılan ölçüm ile akstan sonra titreşimin süspansiyon sistemince sönümlenmiş hali görülecektir. Araç açısından kritik olan titreşim boyutlarına bakmak ve gövde özgül frekanslarıyla bir karşılaştırma yapmak için elde edilen bu veriler kullanılacaktır. Koltukta ölçülecek ivme büyüklükleri ise koltuk tarafından da sönümlenmiş ve taşıt sürücüsüne gelen titreşimi aktaracaktır. Bu büyüklüğe bakılarak doğrudan konfor hakkında yorum yapmak mümkün olacaktır.

Titreşim ölçümlerinde Volkswagen Passat Variant ve Fiat Palio model otomobiller kullanılmıştır. Passat ile yapılan ölçümlerde üç ivmeölçer kullanılmıştır. Palio ölçümlerinde ise koltuk üzerindeki ivmeler ölçülmemiştir. İvmeölçerlerin araç üzerindeki yerleşimi Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Koltuk üzerindeki titreşim büyüklüğünü ölçmek için 210x26x3 mm boyutlarında bir metal plaka kullanılmıştır. İvmeölçer bu plakanın ortasına yerleştirildikten sonra, sürücünün bacakları ile koltuk arasına konumlandırılmıştır.



Şekil 6.6: Otomobilin farklı bölgelerine yerleştirilen ivmeölçerler: (a) Aks (b) Gövde (c) Koltuk

6.3.2 Ölçüm Aşaması

Ölçüm sırasında kullanılacak yazılımdaki gerekli kurulum yapıldıktan ve donanımının yerleşimi gerçekleştirildikten sonra ölçümlere geçilmiştir. Farklı hız tümseklerinin özellikleri karşılaştırılmak istendiğinden, ölçüm yapılacak bölgeler buna göre seçilmiştir. Üzerinde ölçüm yapılan tümseklerden biri TSE standartlarına uygun olarak seçilmiştir. Diğer tümsek ise daha kısa ve alçaktır. Bu iki tümseğin haricinde, yolda enine dizilmiş kedi gözlerinin etkisi incelenmiştir.

Ölçümler, her tümseğin özelliğine ve tahmin edilen kritik hızına bağlı olarak farklı hızlar için tekrarlanmıştır. Tümsekler üzerinden belirlenen sabit hızlarda geçilmiş ve bu sırada ivme ölçerlerden gelen veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Her hız için ölçüm yapılırken, kullanılan yazılımda hazırlanmış olan kurulum ekranı sayesinde ölçüm sonuçları eşzamanlı olarak değerlendirilmiştir. Uygun olmayan sonuçlar elde edildiği takdirde, o hız için ölçümler tekrarlanmıştır.

6.3.2.1 Uzun Tümsek Ölçümü

Uzun tümseklerle yapılan ölçümler TOSB’de gerçekleştirilmiştir. Bu bölgenin içindeki yollarda yer alan hız tümsekleri TS 6283 standardına göre hazırlanmış olduğu için çalışmanın burada yapılması tercih edilmiştir. Standartlara uygun tümseklerin uzunlukları 3.6-3.8 metre arasında, yükseklikleri ise 7.5-10 cm aralığında olmaktadır. Buradaki hız ölçümlerinde kullanılan araç Passat olmuştur. Hız tümsekleri üzerinde 10 ile 40 km/saat hızları arasında toplam altı farklı hız değerinde ölçüm sonuçları toplanmıştır. Son olarak 40 km/saat ile yapılan ölçümde hissedilen rahatsızlığın yüksek olması sebebi ile daha yüksek hızlara çıkılmamıştır. Şekil 6.7’de ölçüm bölgesi görülmektedir.



Şekil 6.7: TOSB’de bulunan TSE 6283 standardına uygun hız tümsekleri

6.3.2.2 Kısa Tümsek Ölçümü

Kısa tümsek ölçümü için İTÜ Maslak Kampüsü’nde bulunan, Şekil 6.8’de görülen, Evelux markalı plastik tümsekler tercih edilmiştir. Bu tümseğin yüksekliği 42 mm ve uzunluğu 300 mm olup, genişliği 333 mm olan parçalardan 11 tanesinin yanyana dizilmesi sonucu yol genişliği boyunca 3.6 m uzanacak şekilde yerleştirilmiştir. Tümsek yüksekliğinin oldukça düşük kalması sebebiyle buradaki ölçümlerde daha yüksek hızlara çıkılabilmektedir. Fiat Palio ile yapılan ölçümler 20 km/saat ile 60

km/saat arasında toplam beş farklı hız için, tümseğe her iki yönden giriş için ölçüm sonuçları alınmıştır.



Şekil 6.8: İTÜ Maslak Kampüsü'nde yer alan kısa tümsek ve boyutları

6.3.2.3 Kedi Gözü Ölçümü

Geleneksel hız tümseklerinin yanı sıra daha çok uyarı niteliği taşıyan küçük yol butonlarının yarattığı etkinin incelenmesi için İTÜ Maslak Kampüsü'nde bulunan kedi gözleri üzerinden geçen taşıtta ölçüm yapılmıştır. Evelux marka bu butonların yüksekliği 28 mm, uzunluğu 120 mm ve genişliği 220 mm'dir. Ölçüm yapılan bölgede, kedi gözlerinden iki sıralı olacak şekilde toplam 17 adet yerleştirilmiştir. Bu engel üzerindeki ölçümler Palio ile yapılmış ve 20 km/saat ile 60 km/saat arasında beş hız için veriler kaydedilmiştir. Şekil 6.9'da kedi gözü serisi ve boyutları yer almaktadır.



Şekil 6.9: İTÜ Maslak kampüsünde yer alan kedi gözleri ve boyutları

6.3.3 Analiz Aşaması

Analiz aşamasına gelindiğinde, farklı hız tümseklerinden geçen taşıtlarla yapılan ivme ölçümlerine ait zamana bağlı değişim bilgileri kaydedilmiş durumdadır. Elde edilen ivme-zaman eğrileri tüm ölçüm aralığı için geçerlidir ve veri toplama işleminde yaşanabilecek gecikmelerin sonucu etkilememesi istendiğinden ölçümler

tümseğe gelmeden bir süre önce başlatılmaktadır. Bu nedenle, yazılım kullanılarak yalnızca tümsekten geçilen zaman aralığı seçilerek bu bölgede işlem yapılır. Zaman kaydedici analizörünün bir alt fonksiyonu olan genişletilmiş zaman kullanılarak ölçülen aralık içinde hız tümseği geçiş bölümü ayrılabilir. Hız tümseğine ait olan kısmın seçiminde ise başlangıç noktası olarak kuvveti ilk alan aks bölgesindeki ani ivme artışının az öncesi alınmakta; bitiş noktası olaraksa titreşimi en son normal seviyeye dönen sinyalin bulunduğu zaman işaretlenmektedir.

Zaman aralığı yalnızca hız tümseği bölgesi için daraltıldıktan sonra istenilen bilgilere ulaşılır. Hız tümseğini geçerken oluşan maksimum ivme genlikleri ve bu süre içindeki etkin değer okunabilmektedir. Seçilen aralık için frekans analizi yapılmak istenirse, genişletilmiş zaman fonksiyonunun altında yer alan Fourier dönüşümünü uygulamak gerekmektedir. Bu durumda, hız tümseği geçiş süresinde oluşan ivmelerin frekans dağılımlarına ulaşılır. Şekil 6.10'da, tüm zaman aralığı için geçerli ivme değişiminin önce zaman genişletme fonksiyonu belirli bir aralığa indirgenmesi ve ardından FFT analiziyle frekans değişiminin çizilmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.10: İvme değişimi üzerinde sırayla zaman genişletme ve Fourier dönüşümü analizörlerinin uygulanışı

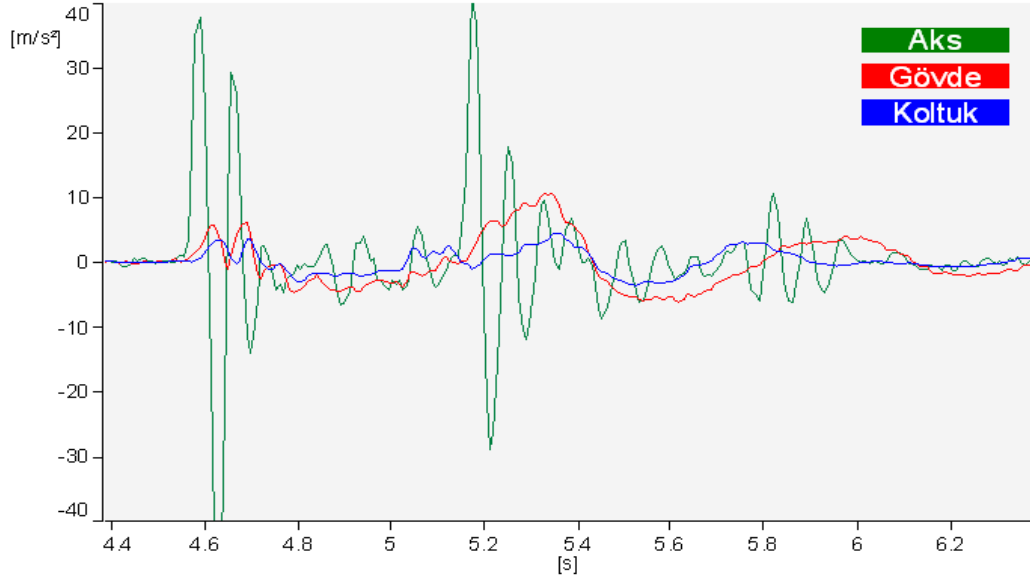
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ölçüm ve analizlerin tamamlanmasının ardından kullanılan iki test aracının tümseklerdeki tepkilerini gösteren bulgular elde edilmiştir. Bu bulgular incelenerek; hız tümsekleri nedeniyle araçta oluşan ivmelerin ciddi boyutlarda olup olmayacağı, yolcu konforunun ne şekilde değişeceği ve özellikleri bakımından tümseklerin optimum tasarıma ne kadar yakın olduğu anlaşılabacaktır.

Öncelikle, taşıta yerleştirilen ivme ölçerlerden gelen sinyallerin zaman ekseninde değişimi incelenmiştir. Bu değerler aracın süspansiyon ve koltuk sönümlerinden dolayı, akstan koltuğa doğru giderek azalacaktır. İvme genliklerinin değişimi karşılaştırmalı incelendiğinde ise aracın farklı bölgelerindeki titreşimlerin seyri ve genliklerin birbirleriyle ne şekilde orantılı olduğu gözlenecektir. Şekil 7.1’de uzun tümsekten 25 km/saat sabit hız ile geçen otomobil için aks, gövde ve koltukta oluşan ivme değişimleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi en başta aksta görülen ivme artışı sırayla gövde ile koltuk sinyallerinde de belirmiş ve 2 saniyenin altında bir süre sonunda tüm bölgelerde normal titreşim seviyesine dönmüştür. En büyük genliklere ulaşan sinyal doğal olarak akstan gelmektedir. Bu ölçümde koltuktaki ivmenin gövdeye oranla daha hızlı sönümlendiği görülür. Diğer hız tümsekleri ve hızlar için ölçülen zamana bağlı düşey ivme değişimleri Ek-A’da gösterilmiştir.

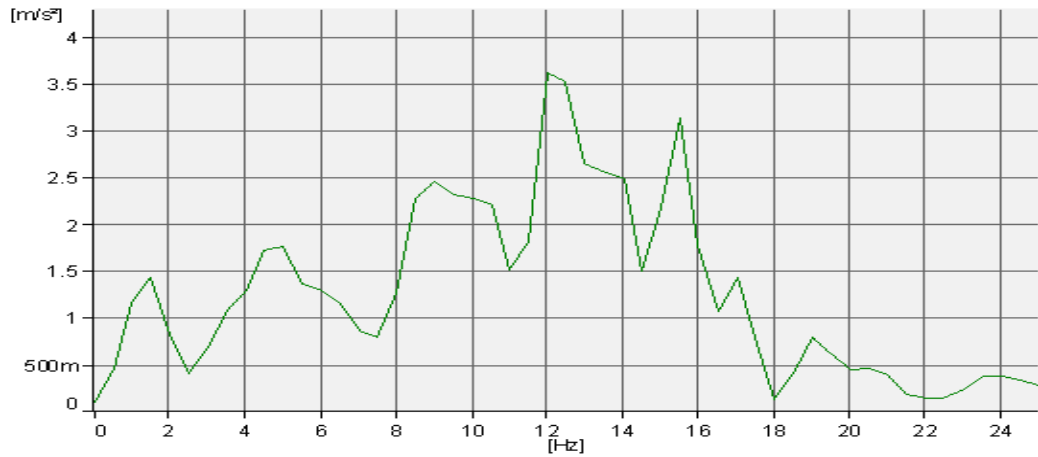
Düşey ivme genliklerinin zaman bağlı olarak değişimini incelemek suretiyle elde edilebilecek verilerden biri de ivmenin maksimum olduğu noktalardır. Farklı hızlar için, gelen sinyallerin en büyük değerleri incelenebilir. Aynı zamanda hız tümseğinden geçiş süresi boyunca etkili olan düşey ivme için etkin değer hesaplanabilir. Etkin değer de hıza bağlı olarak değişimine bakıldığında titreşim konforu açısından daha bilgilendirici sonuçlara ulaşılacaktır. Etkin değerler, genişletilmiş zaman analizörü kullanılarak seçilen zaman aralığı için Pulse programı tarafından hesaplanmaktadır. Bununla birlikte yazılımın etkin değer hesaplarken her zaman tam olarak istenilen aralıkları baz almaması sebebiyle, Pulse yazılımından

sinyal çıktılarını MS Excel programına aktarma fonksiyonu kullanılmış ve burada etkin değer için hassas olarak belirlenen aralıklarda hesaplamalar yapılmıştır. Tümsekler için okunan maksimum genlikler ve hesaplanan etkin değerler alt bölümlerde gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Uzun tümsekten 25 km/saat hızla geçen otomobilde düşey ivme genlikleri

Hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak hız tümseği üzerinden geçen taşıttaki titreşimlerin frekans dağılımı izlenebilir. Bu sayede rezonans titreşimlerinin aracın hangi bölgesinde hangi frekans değerleri arasında toplandığı gözlenir ve bu duruma yol açan sebepler değerlendirilir. Alt bölümlerde, aracın değişik kısımlarından gelen sinyallerin frekans analizinde belirlenen rezonans bölgeleri hakkında bilgi verilmiştir. Şekil 7.2’de benzeri görülen frekans eğrileri ise Ek-B’de yer almaktadır.



Şekil 7.2: Uzun tümsekten 25 km/saat hızla geçen otomobil aksında frekans analizi

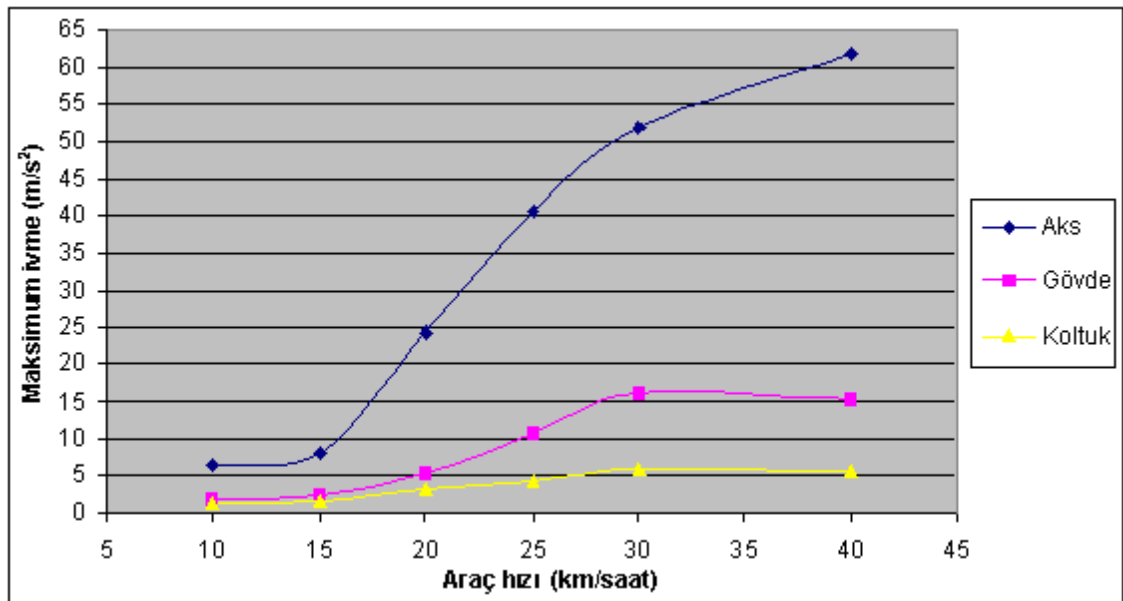
7.1 Uzun Tümsek Bulguları

Uzun tümsekler üzerinde toplam 6 farklı hızda ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerden uygun görülmeyenleri tekrarlanmış ve en iyi görülen cevapları değerlendirilmiştir. Ölçüm yapılan her hız değeri için aks, gövde ve koltuklarda görülen maksimum düşey ivme genlikleri ve hesaplanan etkin değerler Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1: Otomobilin farklı bölümlerinde oluşan maksimum ve etkin ivme değerleri

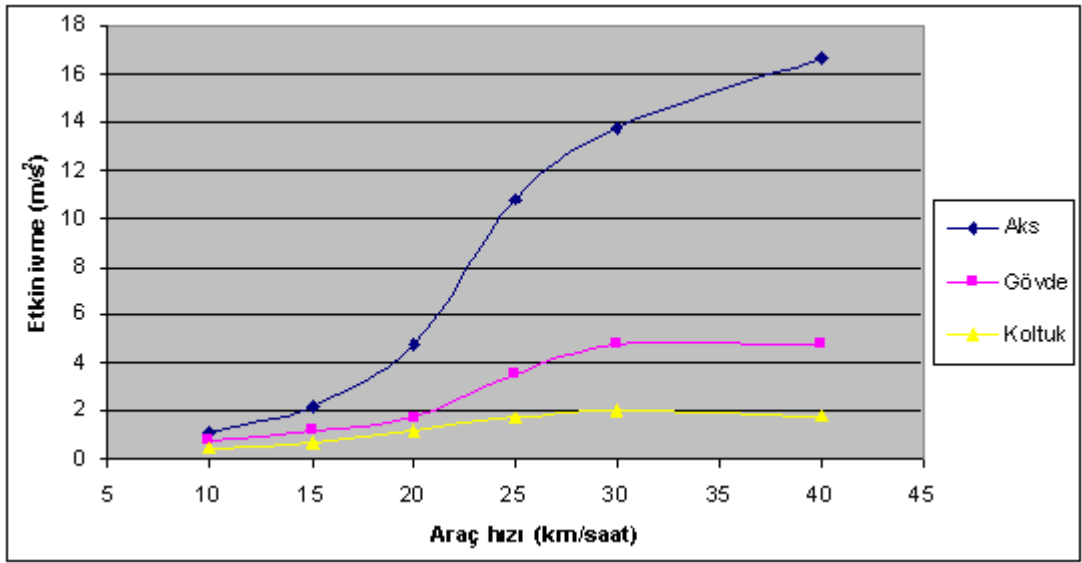
Araç Hızı (km/saat)	Aks		Gövde		Koltuk	
	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)
10	6.4	1.077	1.76	0.745	1.31	0.501
15	8.13	2.228	2.39	1.199	1.56	0.716
20	24.4	4.759	5.22	1.746	3.14	1.18
25	40.7	10.774	10.6	3.537	4.38	1.684
30	52	13.799	16.1	4.753	5.8	2.008
40	61.8	16.692	15.2	4.777	5.57	1.768

İvme ölçer yerleştirilmiş her üç noktayı kapsayacak şekilde, artan araç hızlarına bağlı olarak tümsekten geçen taşıtta oluşan en büyük genliklerin değişimi Şekil 7.3’deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.3: Araçta oluşan maksimum ivme genliklerinin hıza bağlı değişimi

Otomobilin aks, gövde ve koltuğu için hesaplanmış olan etkin ivme değerlerinin hıza bağlı değişimi Şekil 7.4'te görülmektedir. Bu grafik ile Şekil 7.3'te yer alan maksimum ivme genliklerinin hıza bağlı değişimi karşılaştırıldığında aralarındaki benzerlik dikkat çekmektedir. Maksimum ve etkin ivme değerlerinin artış eğilimlerinin birbirine çok yakın oluşu, tümsekten geçerken etkiyen maksimum ivmenin yükselen hızlarla birlikte artışının tümseğin genel olarak sahip olduğu ivme arttırma karakteristiğinden bağımsız olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, ölçümü yapılan uzun tümsek modeli için, maksimum ivme genlikleri ile etkin ivme değerleri arasında çok güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.4: Araçta oluşan etkin ivme genliklerinin hıza bağlı değişimi

Araçta oluşan ivmenin frekans analizi yapıldığında aracın ölçüm yapılan noktalarında farklı hızlar için bulunan maksimum rezonans genlikleri ve bunların görüldüğü frekanslar Tablo 7.2'de verilmiştir. Buna göre, otomobilin aksında oluşan rezonans genlikleri hızla beraber uyumlu bir artış göstermektedir. Bu alandaki rezonans değerleri 12 Hz dolaylarında gerçekleşmektedir ki, tekerlek özgün frekansının da bu bölgelerde olduğu düşünüldüğünde bulunan sonuç normaldir. Gövdede alınan sonuçlara göreyse, ivmenin tepe noktaları gövde özgül frekansının bulunması muhtemel olan 1-1.5 Hz aralığında yer almaktadır. Koltuk üzerinde yapılan ölçümlerde ise rezonans değerlerinin 1.5-2.75 Hz arasında hızlara göre değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Her ne kadar rezonans frekansları görece geniş bir alanda toplanmış olsa da, bunların aracın diğer bölgeleri yerine bu aralıkta bulunması beklenen koltuk özgül frekansları ile çakışmış olduğu düşünülmüştür.

Tablo 7.2: Otomobilin farklı bölümlerinde oluşan rezonans büyüklükleri

Araç Hızı (km/saat)	Aks		Gövde		Koltuk	
	Frekans (Hz)	a_{mak} (m/s ²)	Frekans (Hz)	a_{mak} (m/s ²)	Frekans (Hz)	a_{mak} (m/s ²)
10	7	0.308	1.25	0.451	1.75	0.262
15	13	0.453	0.75	0.517	2.75	0.364
20	12	1.35	1	1.7	2	0.755
25	12	3.6	1.5	4.29	1.5	1.47
30	12	3.32	1.5	5.24	2	1.62
40	12	6.5	1.5	4.18	1.5	1.7

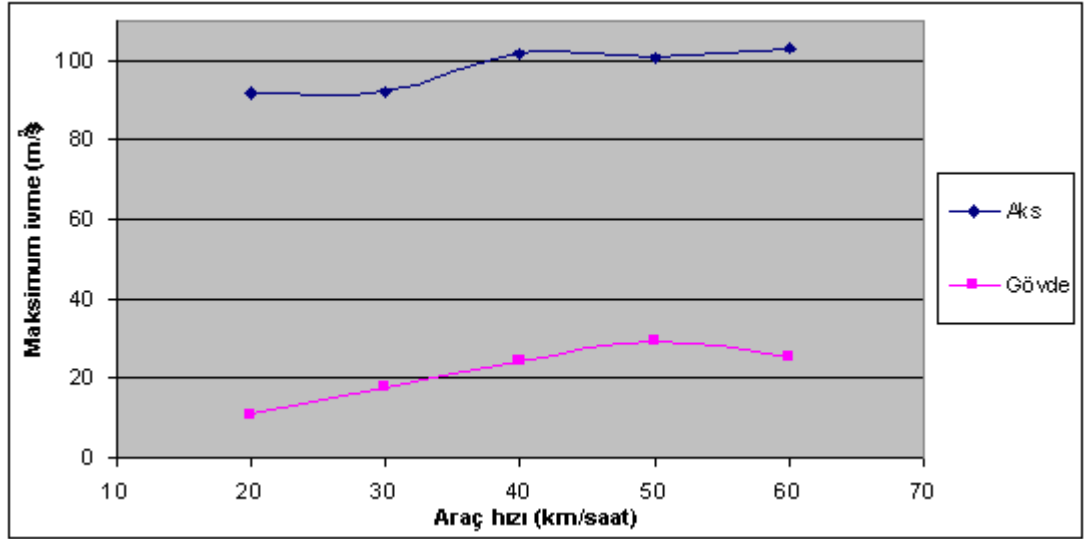
7.2 Kısa Tümsek Bulguları

Kısa tümsek ile yapılan ölçümler 5 farklı hız için ve tümseğe her iki yönden gelirken tekrarlanmış, aks ve gövdeye yerleştirilen ivme ölçerlerin her birinden toplam on sinyal alınmıştır. Tümsek üzerinden farklı yönlerden gelerek iki kez geçildiği için, her hızda ikiye adet maksimum ve etkin ivme büyüklükleri bulunmuş ve sonra bunların ortalaması alınmıştır. Bu ortalama değerler göre oluşturulan çizelge Tablo 7.3'te görülmektedir.

Tablo 7.3: Uzun tümsekten geçen otomobilin farklı bölümlerinde oluşan maksimum ve etkin ivme değerlerinin ortalaması

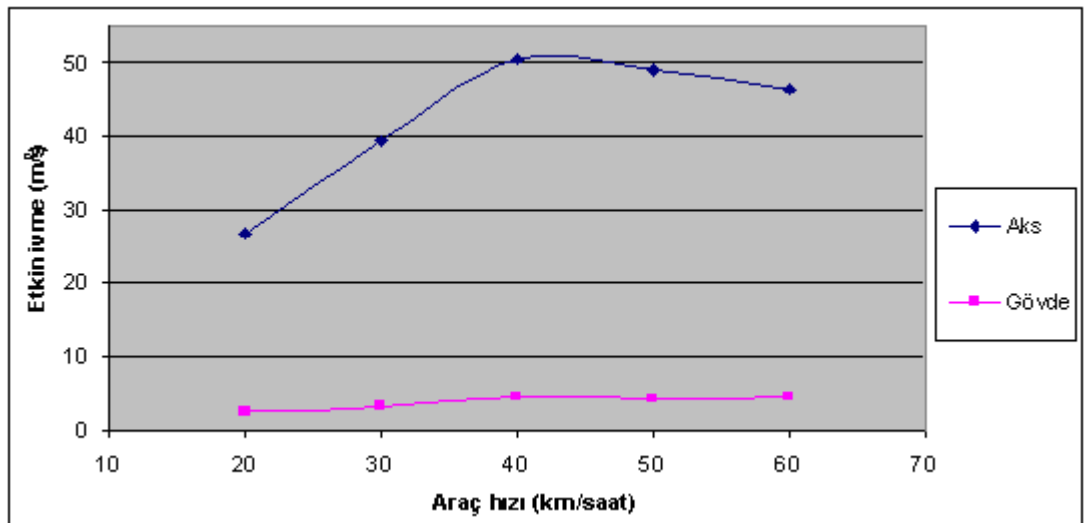
Araç Hızı (km/saat)	Aks		Gövde	
	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)
20	91.7	26.8	10.95	2.585
30	92.25	39.5	17.45	3.325
40	102	50.35	24.55	4.54
50	100.75	49.05	29.3	4.325
60	103.4	46.45	25.4	4.445

Bulunan maksimum ivme genlikleri ortalamasının farklı hızlar için aldığı değerler Şekil 7.5'te gösterilmiştir.



Şekil 7.5: Araçta oluşan maksimum ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi

Kısa tümsekten geçilirken oluşan etkin ivme değerlerinin hıza bağlı değişimi Şekil 7.6'da görülmektedir. Uzun tümsekteki durumun aksine, bu kez maksimum ivme ile etkin ivme değerlerinin hıza bağlı değişimleri arasında belirgin bir uyum bulunmamaktadır. Aks bölgesinde yapılan ölçümlerde maksimum ivme genlikleri artan hızlarla birlikte büyük oranda değişim göstermezken, etkin değerler önce doğrusal bir şekilde hızla yükselmiş ve daha sonra yavaşça düşüşe geçmiştir. Akstaki maksimum ivme değerlerinin en yüksek iki hız ölçümünde az da olsa artış göstermesine rağmen etkin ivme değerlerinde düşüş gözlenmesi kısa tümseğin farklı yapısından kaynaklanıyor olabilir. Gövde ölçümlerinde ise etkin ivme artan hızla daha az değişim gösterirken, maksimum ivme değerleri artmaktadır.



Şekil 7.6: Araçta oluşan etkin ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi

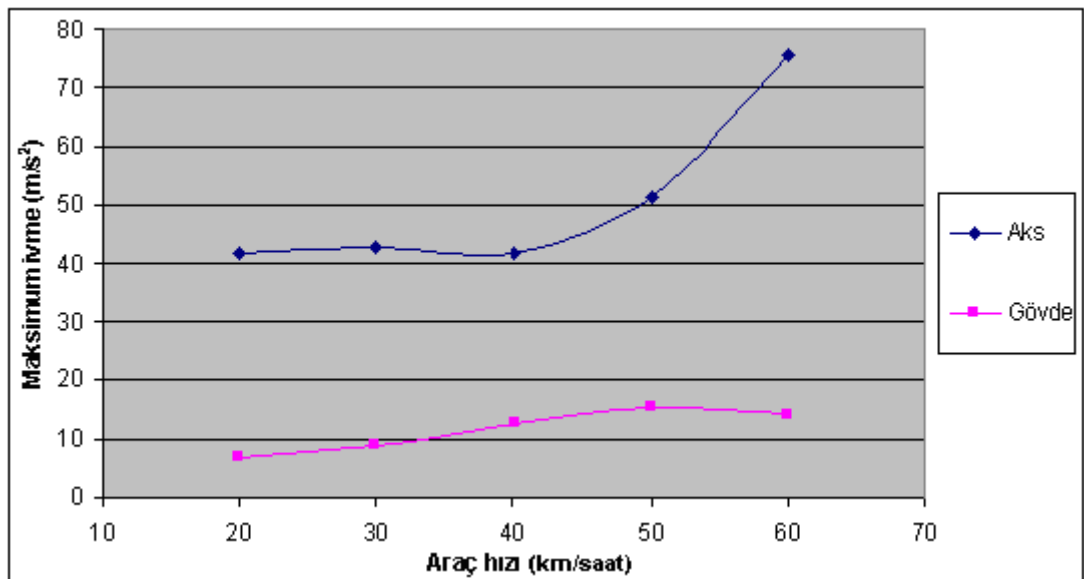
7.3 Kedi Gözü Bulguları

Kedi gözü dizisinin üzerinden geçilirken uygulanan prosedür, kısa tümsek ölçümleri ile aynıdır. Toplam 5 farklı hız için, tümseğe her iki yönden gelerek yapılan ölçüm sonuçları kaydedilmiş ve ardından her hız için tek bir değer ortaya koymak için ortalamaları alınmıştır. Bunun sonucunda elde edilen maksimum ve etkin ivme genlikleri Tablo 7.4'te görülmektedir.

Tablo 7.4: Kedi gözü dizisinden otomobilin farklı bölümlerinde oluşan maksimum ve etkin ivme değerlerinin ortalaması

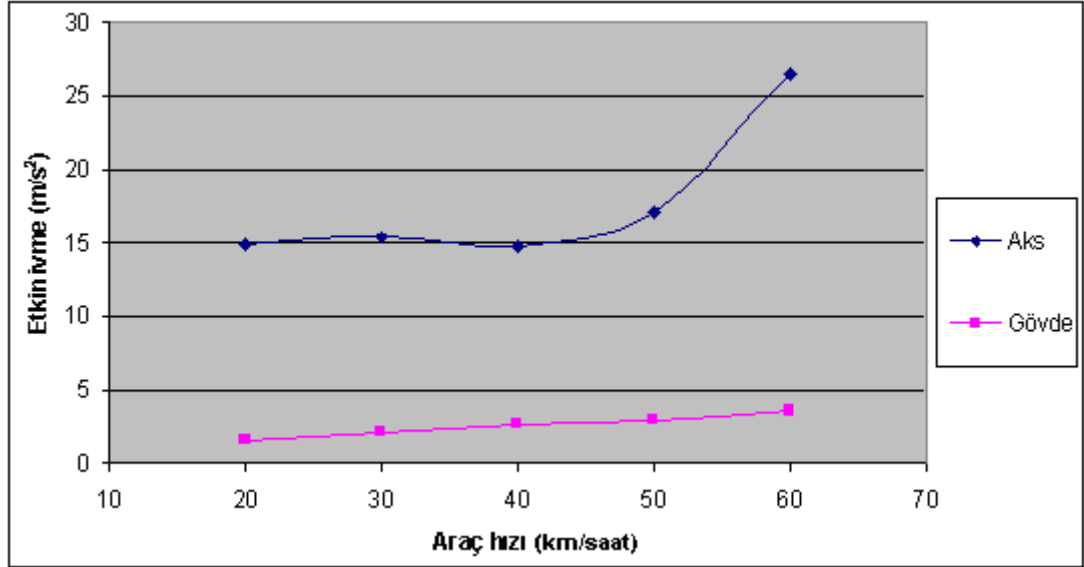
Araç Hızı (km/saat)	Aks		Gövde	
	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)	a_{mak} (m/s ²)	a_n (m/s ²)
20	41,75	14,89	7,02	1,56
30	42,95	15,35	8,905	2,035
40	41,65	14,8	12,45	2,58
50	51,25	17,1	15,35	2,84
60	75,85	26,45	14,25	3,46

Kedi gözü serisinden geçen aracın aks ve gövdesinde oluşan maksimum ivme genliğinin araç hızıyla değişimi Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7: Araçta oluşan maksimum ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi

Aracın yol butonlarının üzerinden geçtiği süre için hesaplanan etkin ivme değerlerinin taşıt hızıyla birlikte ne şekilde değiştiği Şekil 7.8 ile ifade edilmiştir.

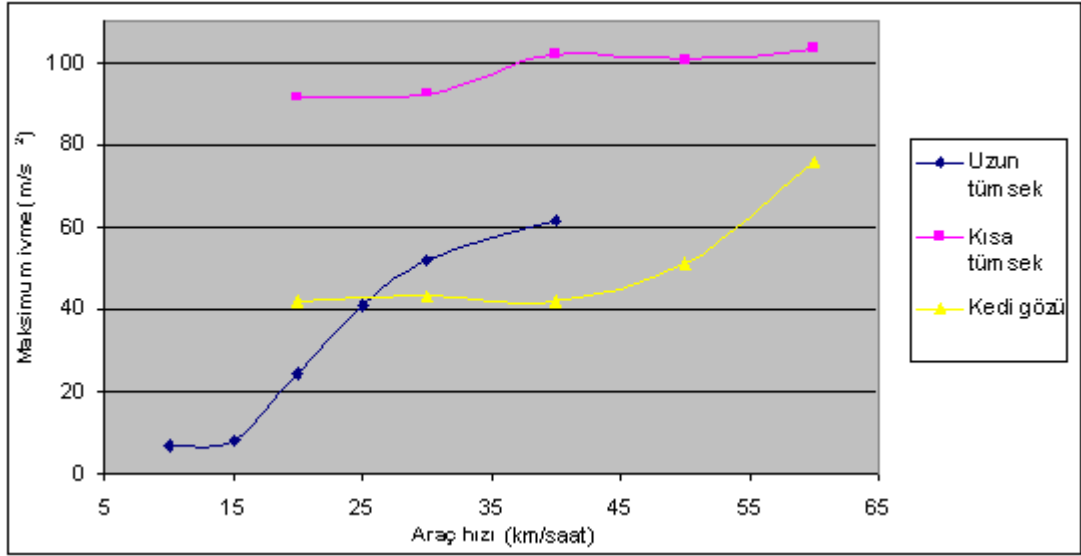


Şekil 7.8: Araçta oluşan etkin ivme genlikleri ortalamasının hıza bağlı değişimi

Kedi gözlerinin üzerinden geçen araçtaki maksimum ve etkin ivmelerin taşıt hızına bağlı değişimleri karşılaştırıldığında, aralarında tıpkı uzun tümseklerde olduğu şekilde bir paralellik olduğu gözlenmektedir. Bundan dolayı, kedi gözlerinden oluşan bir serinin karakteristiğinin belirlenirken maksimum veya etkin genliklerin incelenmesi benzer sonuçlar vermelidir.

7.4 Karşılaştırma

Son olarak üç farklı hız kesici engelden elde edilen bulgular karşılıklı olarak değerlendirilerek yorum yapılacaktır. Bu yorumlar aks ve gövde üzerinden ölçülen büyüklükler kullanılarak yapılacaktır. Aks üzerindeki düşey titreşimlerin maksimum genlikleri karşılaştırılacaktır. Bunun sebebi, aks üzerinde ölçülen ivme büyüklüğünün tekerlek sönümü hariç doğrudan yol uyarısını ifade ediyor olmasıdır. Böylece, tümsekten kaynaklanan düşey ivmenin varabileceği nokta görülerek araca zarar gelme ihtimali hesaplanacaktır. Ayrıca çok yüksek genlikli ivmeler taşıt güvenliği açısından kritik durumlar oluşturabilir. Aks üzerindeki en yüksek ivme düzeyinin değişimi farklı tümseklerin araç üzerindeki etkisini anlamaya yardımcı olacaktır. Uzun tümsek, kısa tümsek ve kedi gözlerinden geçen araçların akslarında oluşan maksimum genliklerin hıza bağlı değişimleri Şekil 7.9’da gösterilmiştir.

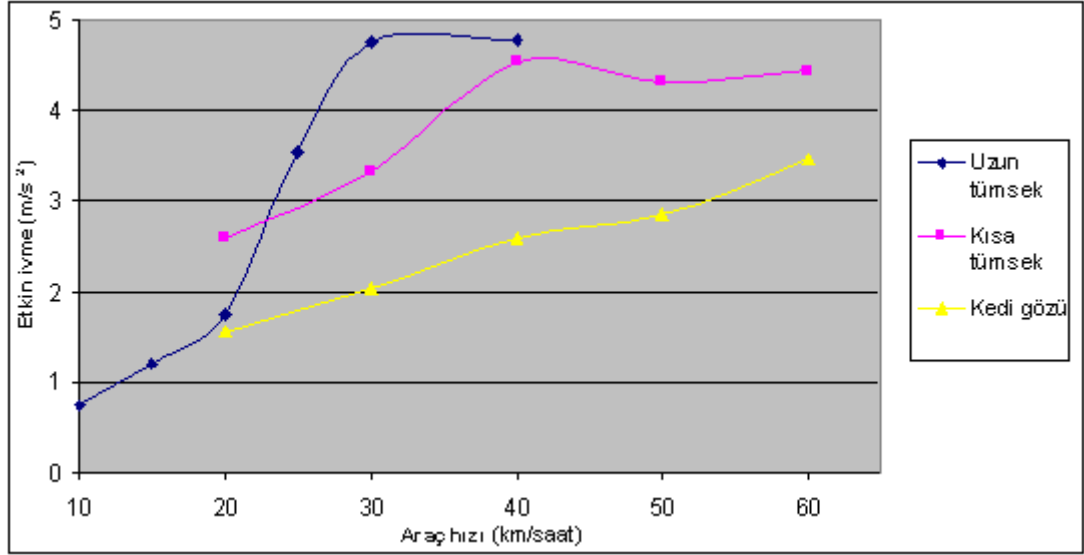


Şekil 7.9: Farklı tümsekler için aks üzerindeki maksimum ivme genliğinin değişimi

Maksimum ivme seviyeleri en yüksekte bulunan hız engelleyici, Şekil 7.9'da görüldüğü gibi, kısa tümsekler olmuştur. Hızı 40 km/saat seviyesinin üstünde olan bir araç kısa hız tümseğinden geçtiği takdirde 102 m/s^2 değerinde bir düşey ivmeye maruz kalmaktadır. Buna karşılık, uzun tümsekten düşük hızlarda geçen aracın aksında çok küçük genlikli ivmeler oluşmakta, 15 km/saat hız sınırı geçildiği takdirde ise maksimum genlikler artmaktadır. Buna rağmen 40 km/saat ile gelen bir aracın uzun tümsekten geçişi ile aksta en fazla 61.8 m/s^2 seviyesinde bir düşey ivme görülecektir. Kedi gözü serisi ise yaklaşık 45 km/saat hız sınırına kadar 40 m/s^2 dolaylarında seyreden maksimum ivme genliğine sahip gözükmemektedir. Bu hızın üzerinde ise kedi gözlerinin etkisi artmakta, fakat ölçüm yapılan en yüksek hızda bile kısa tümseğin yaratabileceği maksimum etkinin %80'inden daha azını sağlayabilmektedir. Bunların sonucunda, tüm ölçüm yapılan tümsekler arasında araca düşük hızlarda dahi zarar verme ihtimali en yüksek olan kısa tümsekler olarak gözükmemektedir. Akstaki maksimum ivme karşılaştırmasında uzun tümsek açısından çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise 15 km/saat hızın limit hız olarak görülmesidir. Yine de, tek bir gösterge ile limit hıza karar vermek doğru bir tercih olmayacaktır.

Gövdede oluşan titreşimlerin karşılaştırılmasında ise baz olarak etkin ivme değeri alınacaktır. Etkin ivme değerlerinin değişimi incelenerek optimum tümsek tasarımına ne kadar yaklaşıldığı incelenecektir. Optimum tasarım karşılaştırma kriteri olarak genellikle koltuk titreşimleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi, koltukta oluşan düşey ivmelerin konfor değişimini daha iyi yansıtmasıdır. Eğer yapılmak istenen konfor

seviyesi hakkında net bir yorumda bulunmaksa, yalnız gövde titreşimleri incelenerek gerçekçi sonuçlara varılamaz. Fakat, gövdenin etkin ivme değerlerinin değişiminin koltuktaki ile birbirine çok yakın olması nedeniyle gövdeden alınan sonuçlar arasında karşılaştırma yaparak, optimum tasarım kriterlerine ulaşma üzerinde görüş ortaya koymak mümkün olacaktır. Şekil 7.10'da farklı hız engelleyicilerin üzerinden geçen araçların gövdelerinde oluşan ivmenin etkin değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.10: Farklı tümsekler için gövdedeki etkin ivme genliğinin değişimi

Otomobillerin gövdelerinde oluşan etkin değerler incelendiğinde, uzun tümseğin optimum tasarıma en çok yaklaşmış engel olduğunu görülmektedir. Uzun tümseğin düşük hızlarda sebep olduğu düşey ivmelerin seviyesinin gayet alçak olması nedeniyle bu hızlarda seyreden sürücüler rahatsızlık duymayacaklardır. Fakat, uzun tümseğin uyguladığı ivmeler belirli bir noktadan sonra hızla artmaktadır. Kritik hız olarak adlandırılan bu nokta, gövdede ölçülen etkin değerlere bakıldığında, uzun tümsek için 20 km/saat seviyesindeymiş gibi gözükmemektedir. Başka bir deyişle bu uzun tümsek tasarımı trafik hızını 20 km/saat düzeyine indirmek için tasarlanmış gözükmemektedir.

Kısa tümsekler için, yapılan ölçümlerin gösterdiği eğilim dahilinde herhangi bir limit hızdan bahsetmek mümkün değildir. Dahası kısa tümsek 20 km/saat hızla giden taşıta uzun tümsekten daha büyük ivme uygulamaktadır. Artan hızla beraber kısa tümseğin uyguladığı ivme genliği de yükselmekte, buna rağmen halen uzun tümseğin uyguladığı etkiden daha zayıf kalmaktadır. Bunun sebebi olarak kısa tümseğin daha

büyük bir hız limit değerine sahip olabilme ihtimali düşünülse bile, 60 km/saat hıza kadar böyle bir eğilim göstermemesi sebebiyle bu ihtimal çok kuvvetli olmayacaktır. Başka bir deyişle, kısa tümsek düşük hızla giden sürücüye gereğinden fazla, yüksek hızla giden sürücüye ise yetersiz düzeyde uyarı vererek görevini yerine getirememektedir. Ayrıca bunu yaparken araca daha çok zarar verebilecek olma olasılığının ne kadar yüksek olduğu Şekil 7.9'da yapılan karşılaştırma ile gösterilmiştir.

Kedi gözü ise etkin ivme değişiminin incelenmesi sonucu, hız tümseği ile aynı amaçla yapılmamış olduğunu ispatlamıştır. Düşük araç hızlarında uzun tümsek gibi düşük genlikli ivmeler sağlayan kedi gözleri, artan hızla beraber doğrusal bir ivme artışı segilemiş ve bu artışın eğimi düşük seviyede kaldığından yüksek araç hızlarında da tümseklerden daha az ivme uygulamaya devam etmiştir. Bu özelliği ile kedi gözü, araçları belirli bir hız limitine çekmeyi hedeflemek yerine hıza doğrusal bir fonksiyonla bağlı olacak biçimde aracı uyarıcı bir engel olduğunu göstermektedir.

8. SONUÇ

Hız tümsekleri tüm trafik sakinleştirme uygulamaları arasında araç hızlarını düşürme konusunda en etkili çözümdür ve bu nedenle çok yaygın biçimde kullanılmaktadır. Hız tümseklerinin diğer trafik sakinleştirme metodlarından farklı olarak otomobile doğrudan fiziksel müdahalede bulunuyor olması ise beraberinde çeşitli sorunları getirmektedir. Doğru tümsek tasarımları trafik hızlarının düşürülmesinde etkin rol oynarken, otomobiller açısından ise herhangi bir sorunun ortaya çıkmasına sebep olmamaktadır. Bunun yanında, uygun şekilde boyutlandırılmamış veya yanlış seçilmiş bir hız tümseğinin taşıtlara zarar verme ihtimali yüksek olacak ve araçtaki yolcular açısından güvenlik riski doğacaktır.

Farklı hız tümseği tasarımları arasında başarılı sonuçlar veren uzun tümsek ve düz tepeli tümsekler, özellikle yurtdışında, kötü karakter sergileyen kısa tümseklere tercih edilmektedir. Uzun tümsekler eğimli rampaları ve aks mesafelerine yakın uzunlukları ile düşük hızlarda seyreden araçlarda büyük genlikli ivmeler yaratmazken, belirlenen limit hızları geçen araçlar için hızlarının büyüklüğüne bağlı olarak artan ivme genlikleriyle karşılaşma durumu geçerli olacaktır. Düz tepeli tümseklerin ise daha yüksek hız limitlerinin belirlenmesi istenen veya otobüs gibi uzun vasıtaların bulunduğu bölgelerde kullanılması uygundur.

Bu çalışmada, kısa tümsek, TSE standartlarına uygun olarak tasarlanmış uzun tümsek ve farklı bir yol engeli olan kedi gözü serilerinin üzerinden geçen araçta oluşan ivme genliklerinin değişimi ölçülmüştür. Otomobilin aks, gövde ve koltuğu üzerine yerleştirilen ivme ölçerlerden alınan veriler sayesinde tümseklerin farklı etkileri gözlemlenmiş ve karşılaştırma yapma olanağı elde edilmiştir.

Frekans analizlerine bakıldığında, özellikle uzun tümseklerde yapılan ölçümlerde sinyal alınan bölgenin doğal frekanslarının olduğu noktalarda en büyük rezonans genliklerinin oluştuğu görülmüştür. Bu durum hız tümsekleri nedeniyle oluşan ayrı bir titreşim frekansının aracın herhangi bir bölümündeki doğal frekans ile çakışarak,

araç tasarımı sırasında beklenmeyen frekanslarda yüksek genlikler oluşturmadığını göstermesi açısından olumlu bir sonuç sayılmalıdır.

Araçların aks bölgesinde ölçülen ivme değerlerine göre kısa tümsek aracın bu bölgesinde her hız değeri için en yüksek genliklere sebep olmaktadır. Bu nedenle araç açısından tehlike oluşturma eğilimi en fazla olan tümsek çeşidi kısa olanlardır.

Otomobil gövdesine yerleştirilen ivme ölçerlerden gelen verilere göre bu kısımda oluşan ivme genlikleri incelenmiş ve farklı tümseklerin yarattığı etkiler karşılaştırılmıştır. Alınan sonuçlara göre, düşük hızlarda yarattığı ivme genliğinin küçük oluşu ve artan hızlarla birlikte sağladığı, sürücüyü rahatsız ederek uyaracak boyutlardaki ivme genlikleri ile TSE standardına uygun uzun tümsek ideal bir hız kesici görüntüsü çizmiştir.

Gerek hız azaltma etkisini sağlaması açısından, gerekse yavaş hızlarda giden sürücüyü cezalandırmaması bakımından TSE standardına uygun tasarlanacak hız tümseklerinin kısa tümseklere tercih edilmesi ülke karayollarında daha verimli sonuçlar alınmasını sağlayacaktır. Zira, Türkiye'deki yollarda bulunan birçok kısa tümsek bu çalışmadaki örneğinden daha yüksek olmaktadır ve dolayısıyla bunlar, çok daha yüksek ivme genlikleri oluşturarak araç için tehlikeli durumlara yol açabilmektedirler. Kedi gözleri ise araç hızlarını belirli bir seviyeye düşürmek hedefine ulaşamayacak olsa da, genel bir uyarı sağlamak için kullanılabilir.

TSE standardında verilen boyutsal ve geometrik sınırların çok dar bir alanda tanımlanmış olması nedeniyle, bu standarda uyularak yapılacak uzun tümseklerin hepsinin hız limitleri birbirine yakın olacaktır. Oysa hız limitlerinin biraz daha yüksek tutulduğu yollarda da hız tümseği kullanılması gerekebilir. Böyle bir durumun önüne geçilmesi için standartta belirlenen toleranslar genişletilebilir. Bu değişimin getireceği başka bir avantaj ise düz tepeli tümsek tasarımının da önünün açılması olacaktır.

Bu çalışmadan alınan sonuçların bir adım daha ileriye taşınabilmesi için şehiriçinde sıkça yer alan hız tümseklerinin etkisine en az binek araçlar kadar maruz kalan otobüsler üzerinde de çeşitli ölçümler yapılabilir. Hız tümsekleri ve araç sayılarının arttırılması ile yapılacak ölçümlerden alınacak veriler sayesinde, tümsek karakteristik özellikleri daha hassas belirlenebilecek ve araçlar üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılacaktır.

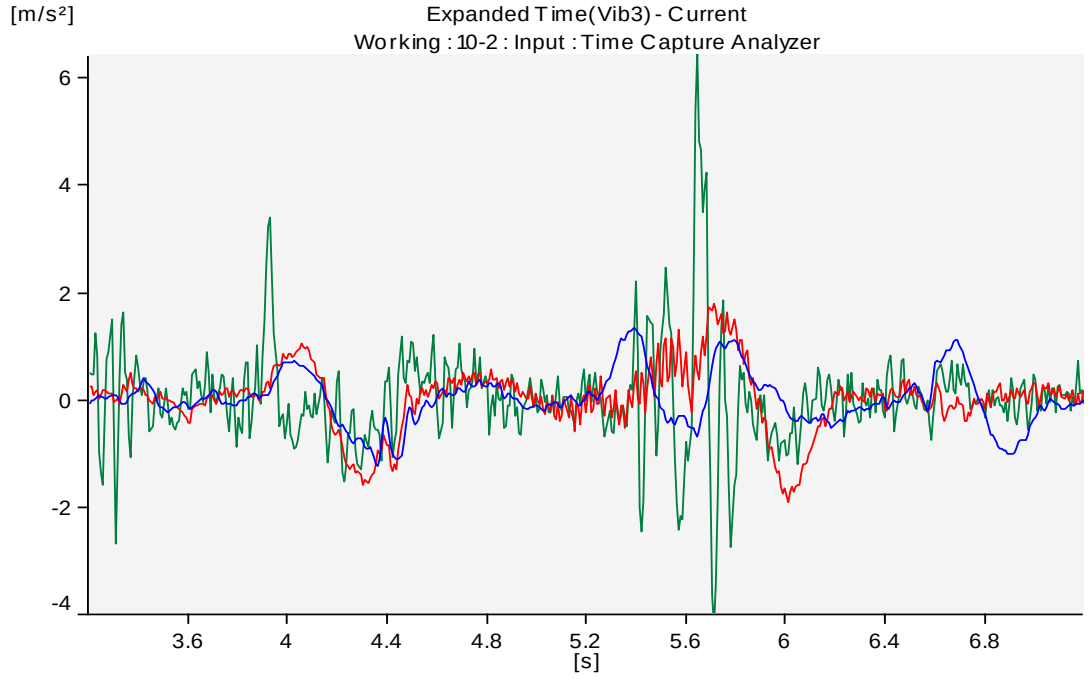
KAYNAKLAR

- [1] **Barker, J. and Baguley, C.**, 2001. Road safety good practice guide, *TRL report*, Transport Research Laboratory Limited, Crowthorne.
- [2] **Akkaya, Ş. ve Altıntaş, H.**, 2001. Türkiye’de karayolu trafik kazaları istatistik analizi, 5. *Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu*, Adana, 19-22 Eylül.
- [3] **Bjarnason, S.**, 2004. Round top and flat top humps – The influence of design of the effects, Lund Institute of Technology Department of Technology and Society, Lund, Sweden.
- [4] **Pasanen, E.**, 1992. Driving speeds and pedestrian safety: a mathematical model, *Technical Report No. Rept-77*, Helsinki University of Technology, Laboratory of Traffic and Transportation Engineering, Espoo, Finland.
- [5] **Leaf, W.A. and Preusser, D.F.**, 1999. Literature review on vehicle travel speeds and pedestrian injuries, *Final Report July 1997 - June 1998*, U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration, Washington.
- [6] **Pisarski, A.E.**, 1986. Deep-six 55, *Reason Foundation*, Vol. 17, No. 6, 32-35.
- [7] **Martens, M., Comte, S. and Kaptein, N.**, 1997. The effects of road design on speed behaviour: a literature review, *Master Report 2.3.1*, Finland.
- [8] **Nilsson, E. and Sjorgen, L.O.**, 1981. Relationship between enforcement, traffic speed and traffic accidents, *Proceedings of the International Symposium on the Effects of Speed Limits on Traffic Accidents and Fuel Consumption*, OECD, Ireland.
- [9] **Bjornskau, T. and Elvik, R.**, 1992. Can road traffic law enforcement permanently reduce the number of accidents?, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 24, No. 5, 507-520.
- [10] **Rothengatter, J.A.**, 1982. The effects of police surveillance and law enforcement on driver behaviour, *Current Psychological Review*, Vol. 2, 349-358.
- [11] **Brindle, R.**, 1996. Living with traffic: Twenty-seven contributions to the art and practice of traffic calming 1979-1992, *ARRB Transport Research Speacial report 53*, Vermont South.
- [12] **Lockwood, I.A.**, 1997. ITE traffic calming definition, *ITE Journal*, July 1997, 22-24.
- [13] **Muhlrads, N.**, 2001. A short history of physical speed reduction measures in european urban areas, National Research Institute for Transportation and Safety, Arcueil, France.

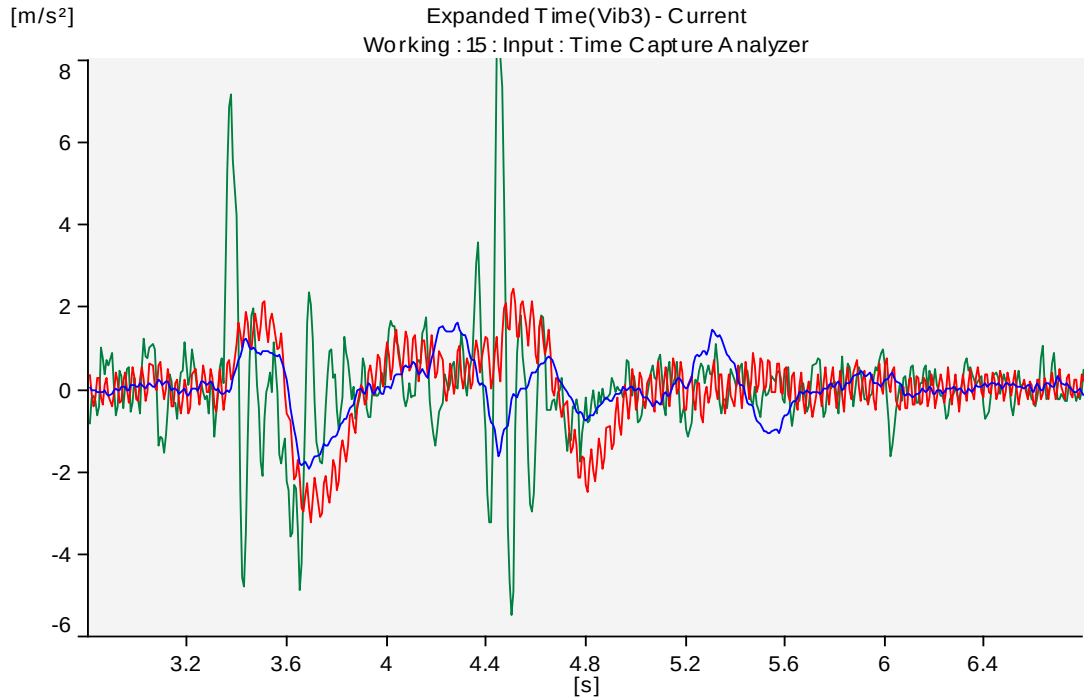
- [14] **Hass-Klau, C.**, 1990. The theory and practice of traffic calming: Can Britain learn from the German experience?, Rees Jeffreys Road Fund, *Transport and Society Discussion Paper 10*, January 1990, UK.
- [15] **Schlabach, K.**, 1997. Traffic calming in Europe, *ITE Journal*, July 1997, Vol. 67, 38-40.
- [16] **Weber, P.A.**, 1998. Towards a Canadian standard for the geometric design of speed humps, *Master of Engineering Thesis*, Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering, Ottawa, Ontario, Canada.
- [17] **Ewing, R.**, 1999. Traffic calming state of practice, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington.
- [18] **Richardson, E.**, 1998. Traffic calming the city centre: The Fremantle experience, *ITE Annual Meeting Compendium*, Washington.
- [19] **Smith, D., Hallmark, S., Knapp, K. and Thomas, G.**, 2002. Temporary speed hump impact evaluation, *CTRE Project 00-73 Final Report*, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Iowa.
- [20] **Velibeyoğlu, K.**, 2000. Kentsel ulaşım sorunlarına bütüncül bir yaklaşım: Bir trafik yönetim metodu olarak trafik sakinleştirme, *Trafik 2000 Sempozyumu*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- [21] **Watts, G.R.**, 1973. Road humps for the control of vehicle speed, *Laboratory Report 597*, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- [22] **Stephens, B.W.**, 1986. Road humps for the control of vehicular speeds and traffic flow, *Public Roads*, Vol.50, No.3, 82-90.
- [23] **Weber, P.A. and Braaksma, J.P.**, 2000. Towards a north American geometric design standard for speed humps, *ITE Journal*, January 2000, 30-34.
- [24] **Steen, M. and Hageback, C.**, 2000. Buses and bumps: Presentation of the results from the research project concerning public transport and traffic calming measures, Publication 2000:26E, The Swedish National Road Administration, Borlänge, Sweden.
- [25] **Watts, G.R. and Krylov, V.V.**, 2000. Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions, *Applied Acoustics*, Vol.59, 221-236.
- [26] **Boulter, P.G., Hickman, A.J., Latham, S., Layfield, R., Davison, P. and Whiteman, P.**, 2001. The impacts of traffic calming measures on vehicle exhaust emissions, *TRL Report 482*, Transport Research Laboratory, Crowthorne.
- [27] **Baguley, C.**, 1981. Speed control humps – further public road trials, *TRRL Laboratory Report 1017*, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- [28] **TS 6283**, 2000. Yol sathı hız kontrol elemanları – tümsekler (kasisler), *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- [29] **Güney, A.** “Taşıtlarda titreşim ve gürültü” ders notları, *İTÜ Makina Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı*, İstanbul.

- [30] **Fahy, F. and Walker, J.**, 1998. Fundamentals of noise and vibration, E&FN Spon, London.
- [31] **Macmillan, R.**, 1998. Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Assessment and control of whole-body vibration lecture notes, http://www.safetyline.wa.gov.au/institute/level2/course19/lecture61/l61_02.asp.
- [32] **Granlunda, J. and Lindström, F.**, 2003. Design of a shock-free hump, *Tenth International Congress on Sound and Vibration*, Stockholm, Sweden, 7-10 July.
- [33] **Späng, K.**, 1997. Assessment of whole-body vibration containing single event shocks, *Noise Control Engineering Journal*, Vol.45-1, 19-25.
- [34] **Khorshid, E. and Alfares, M.**, 2004. A numerical study on the optimal geometric design of speed control humps, *Engineering Optimization*, Vol.36, No.1, 77-100.
- [35] **Brüel&Kjaer**, 2004. System data IDA hardware configurations for PULSE X, BU 0228-19.
- [36] **Brüel&Kjaer**, 2000. Product data piezoelectric deltashear accelerometers uni-gain, deltatron and special types, BP 0196-21.

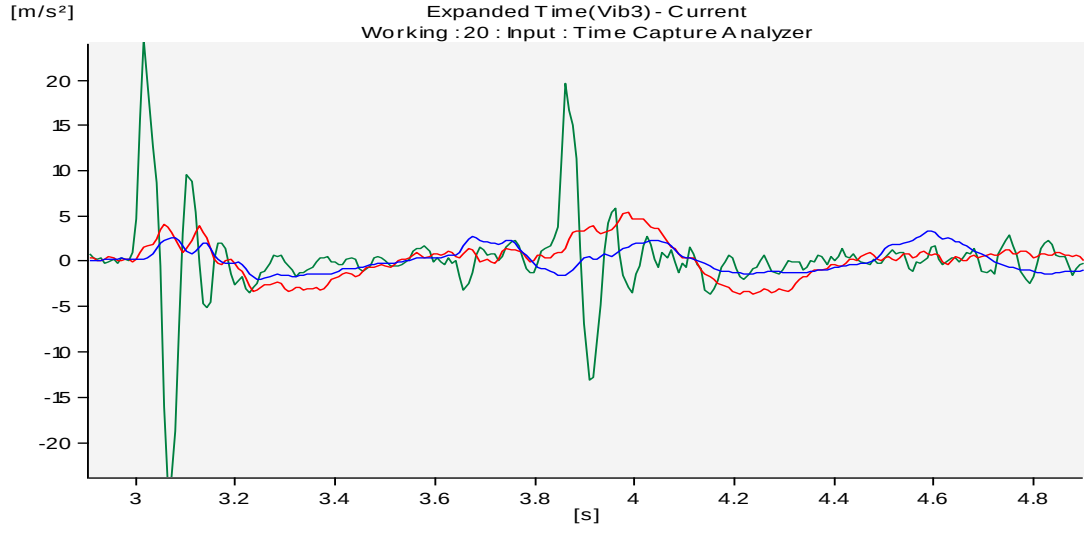
EK A – DÜŞEY İVMENİN ZAMANLA DEĞİŞİMİ



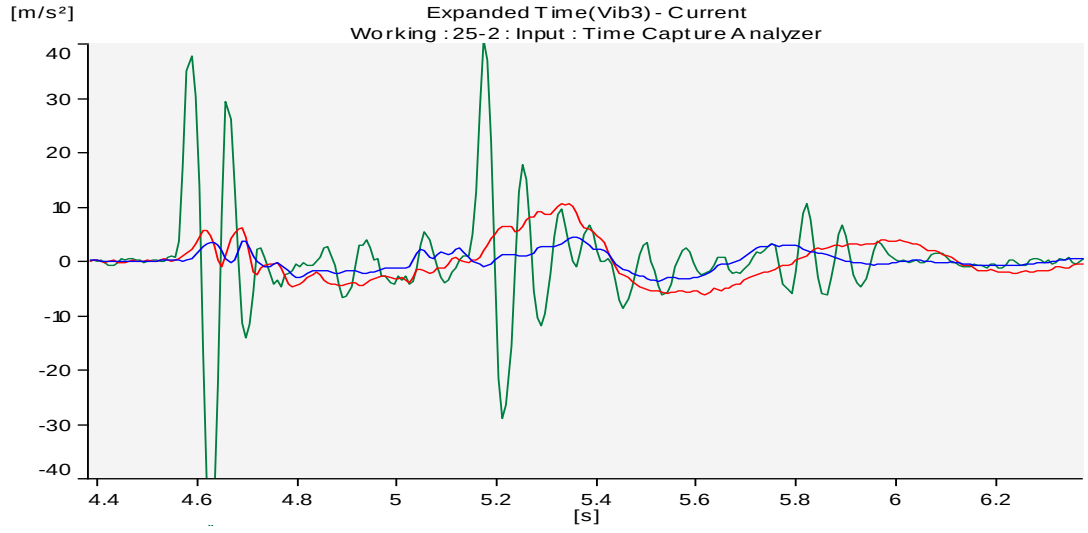
Şekil A.1: 10 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



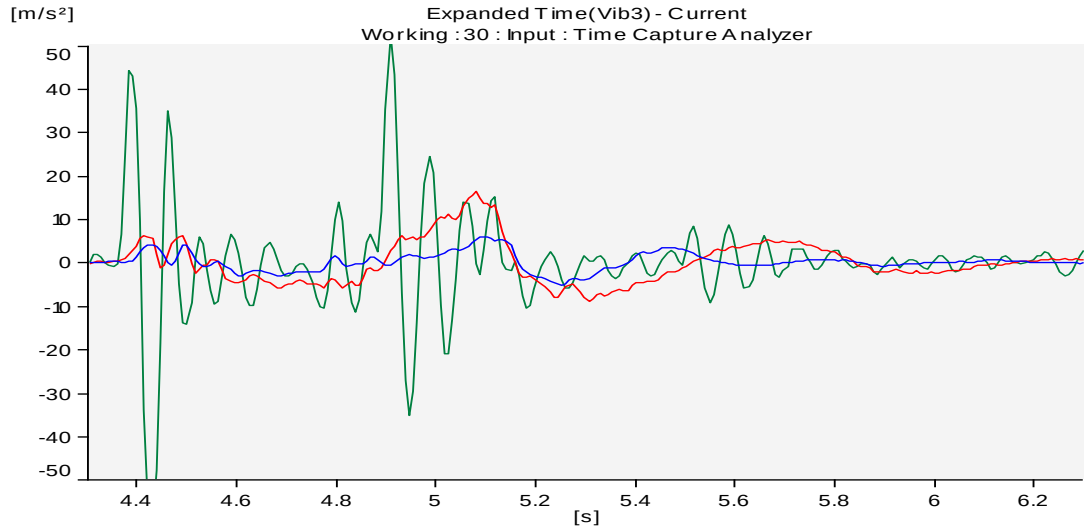
Şekil A.2: 15 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



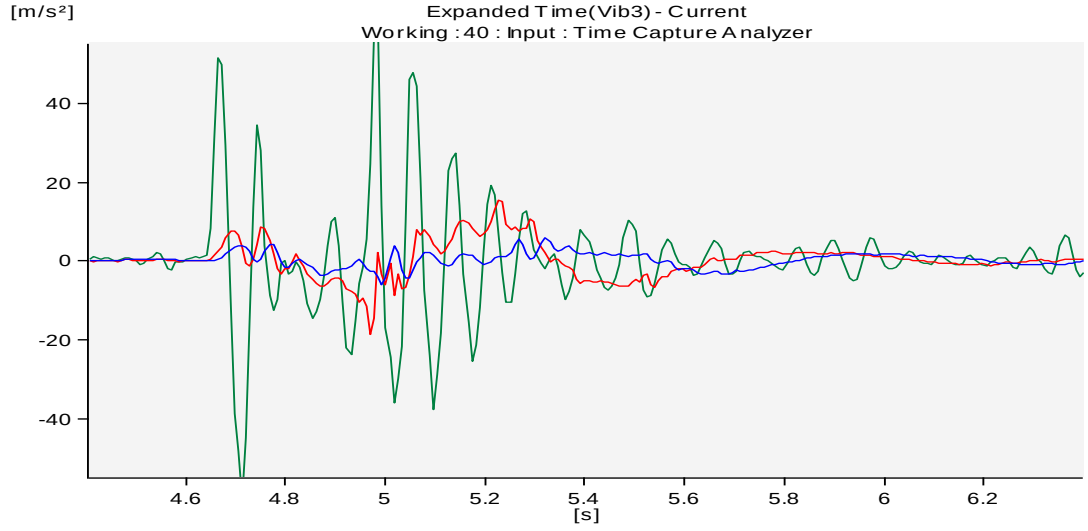
Şekil A.3: 20 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



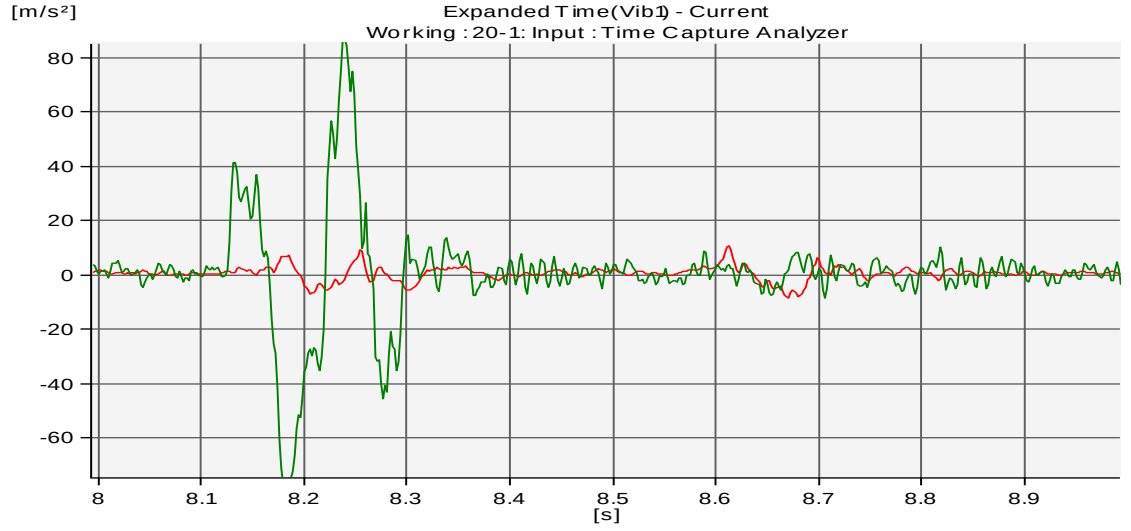
Şekil A.4: 25 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



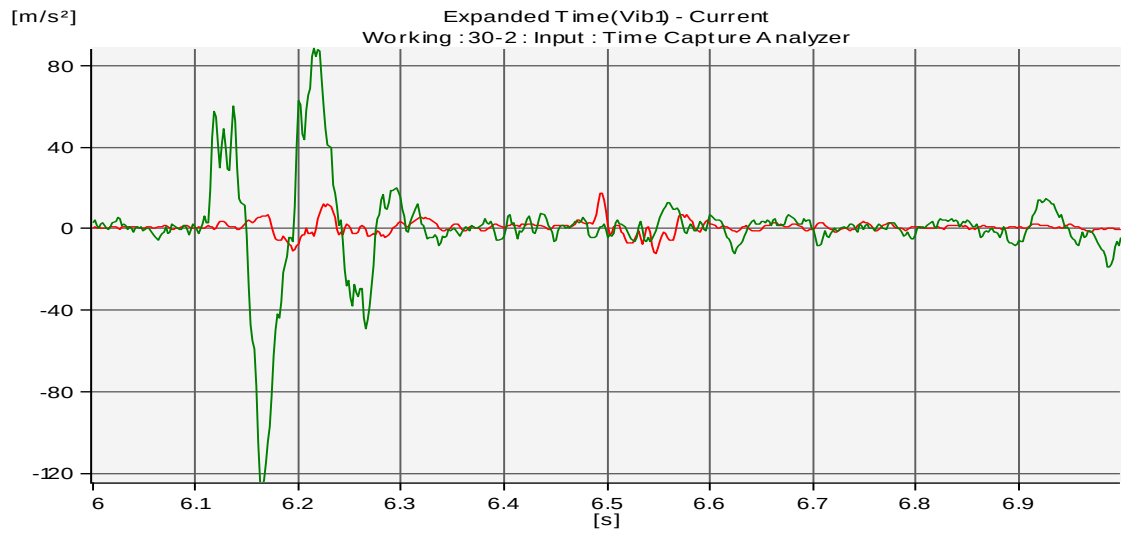
Şekil A.5: 30 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



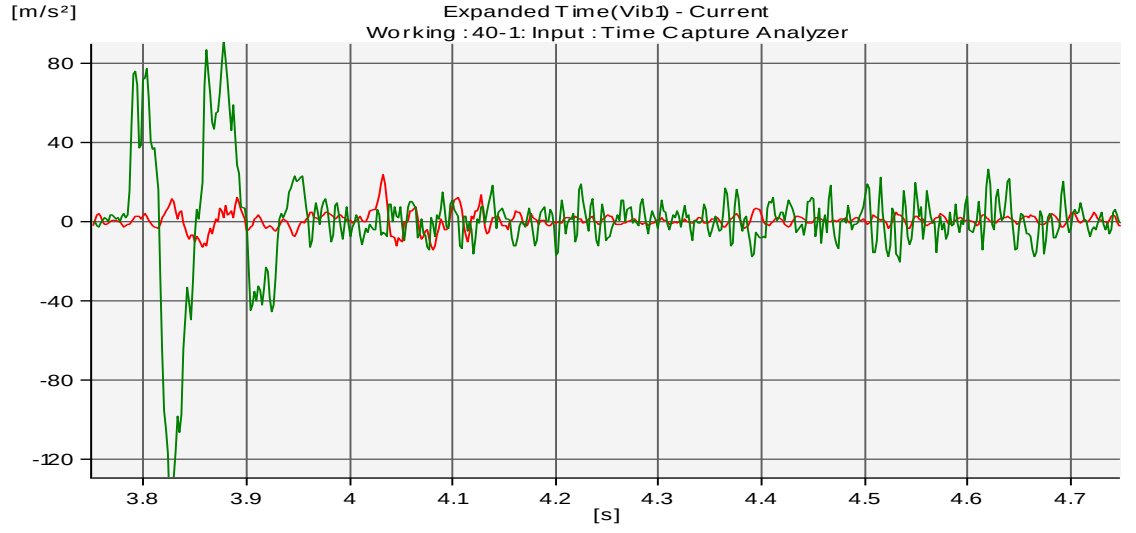
Şekil A.6: 40 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



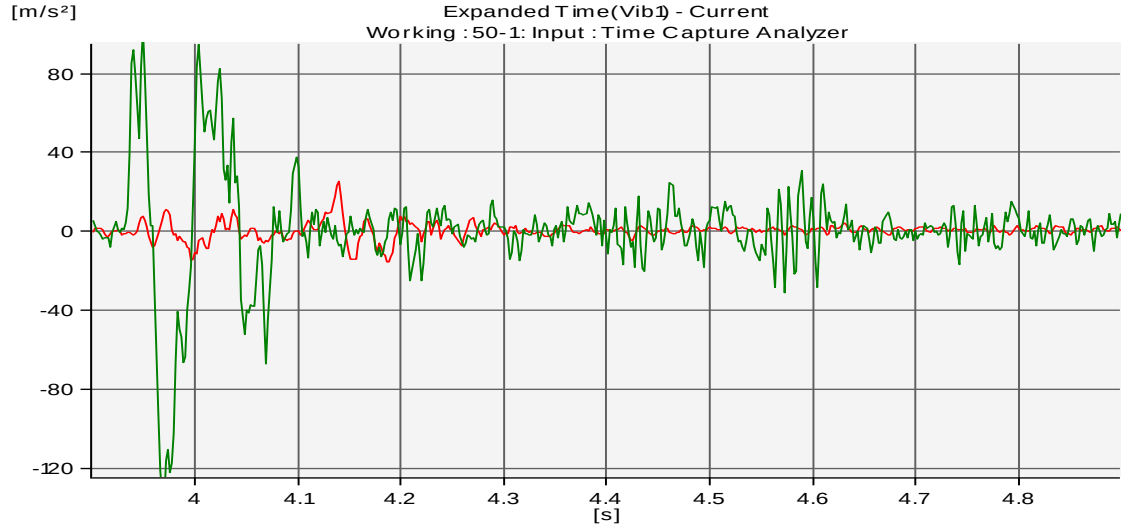
Şekil A.7: 20 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



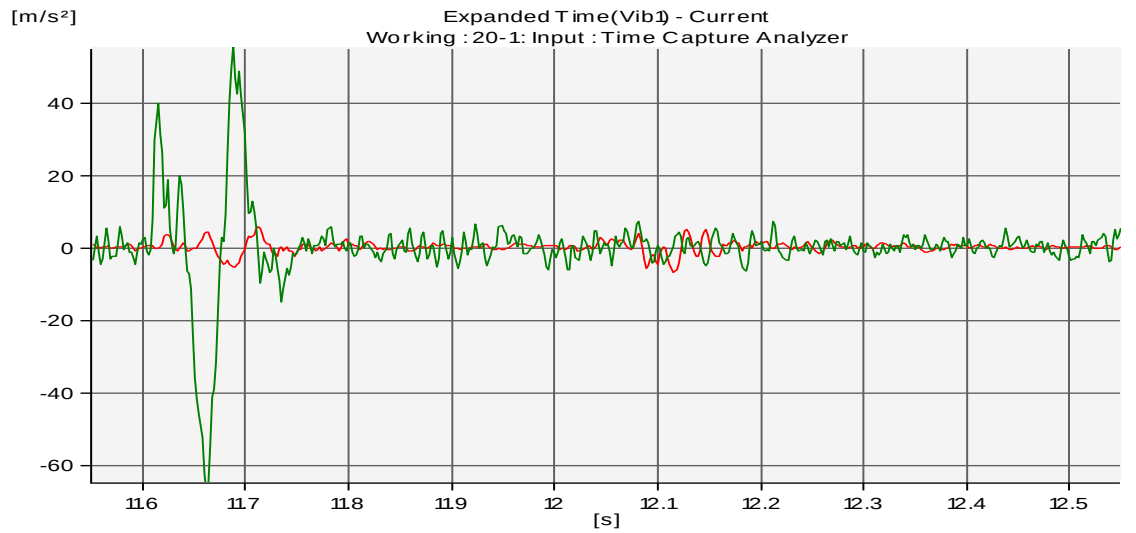
Şekil A.8: 30 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



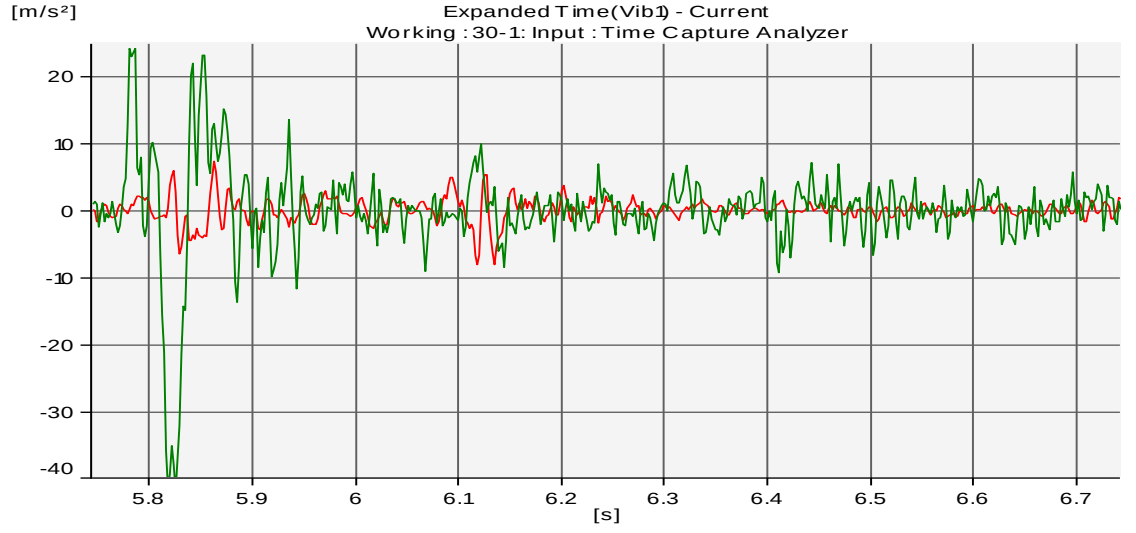
Şekil A.9: 40 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



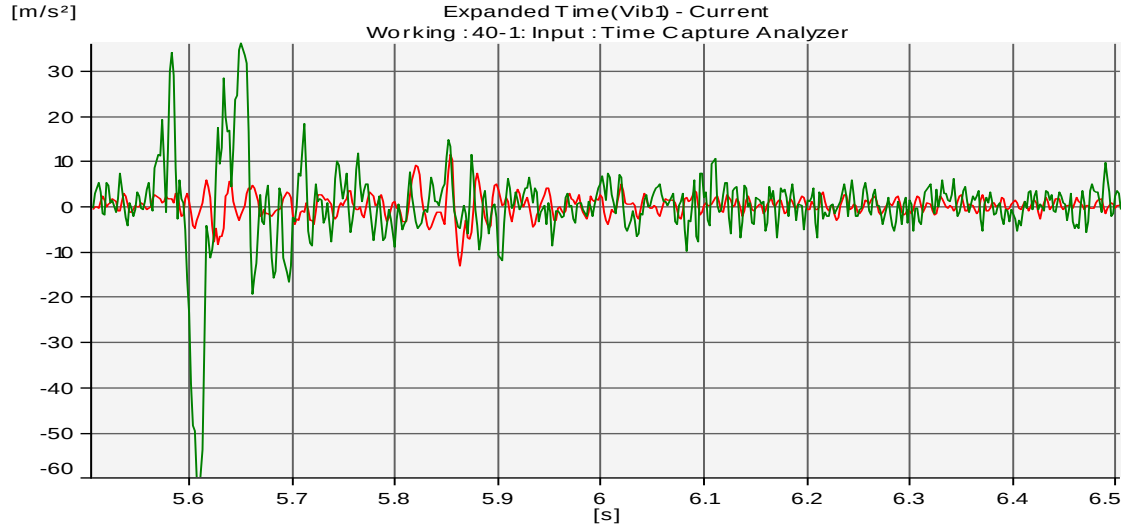
Şekil A.10: 50 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



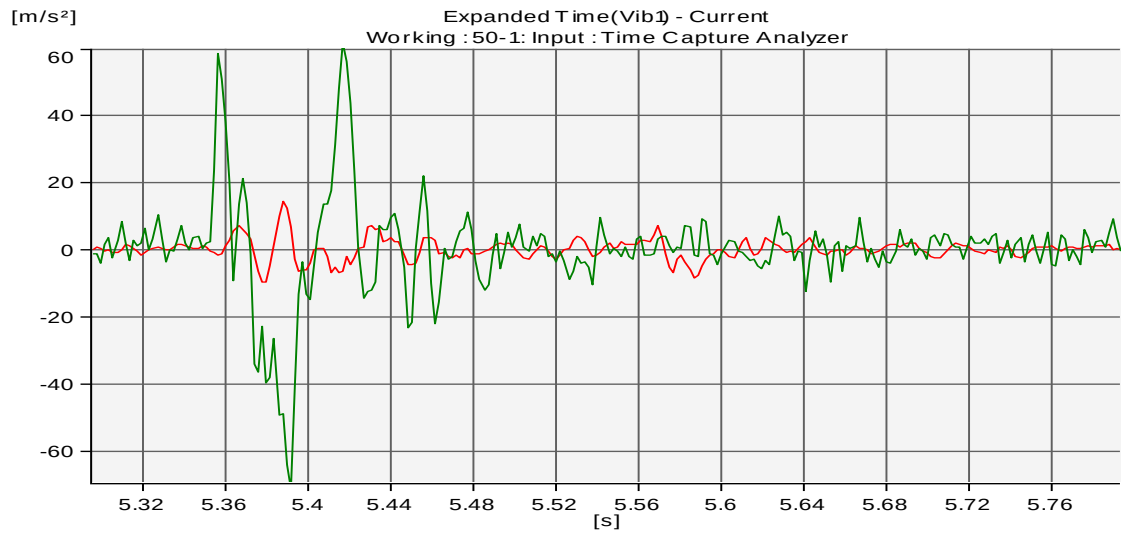
Şekil A.11: 20 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken oluşan ivme-zaman değişimi



Şekil A.12: 30 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken oluşan ivme-zaman değişimi

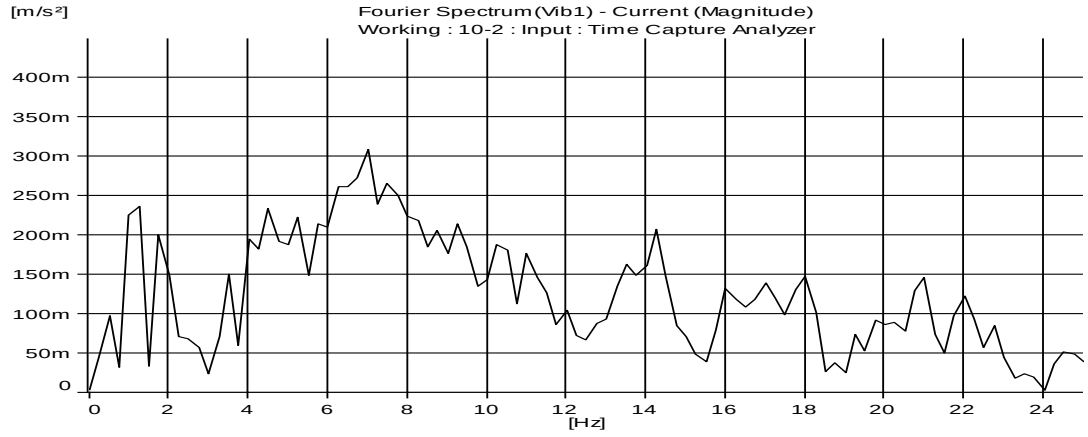


Şekil A.13: 40 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken oluşan ivme-zaman değişimi

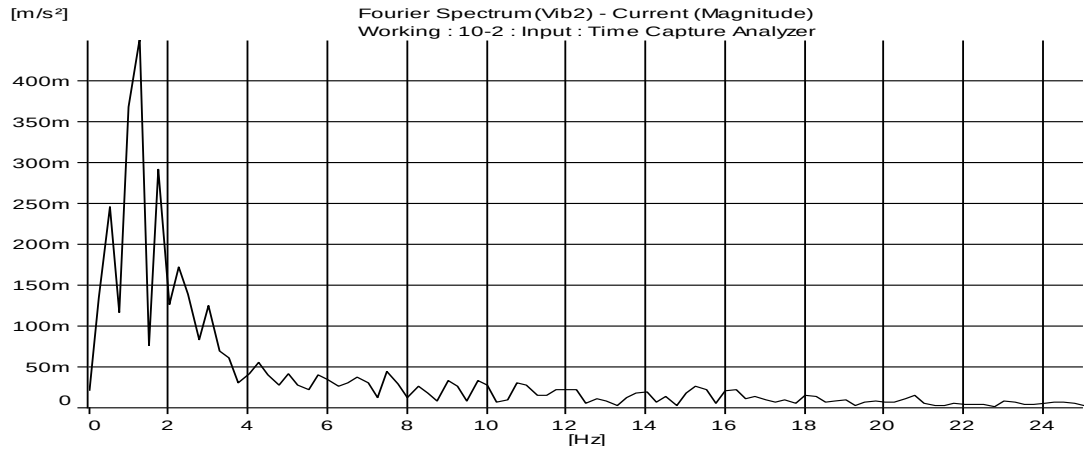


Şekil A.14: 50 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken oluşan ivme-zaman değişimi

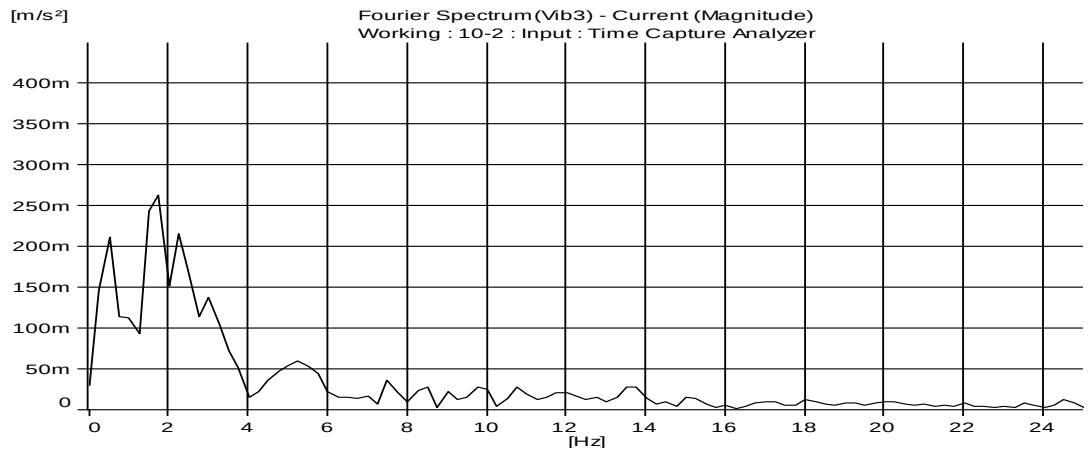
EK B – DÜŞEY İVME FREKANS DAĞILIMLARI



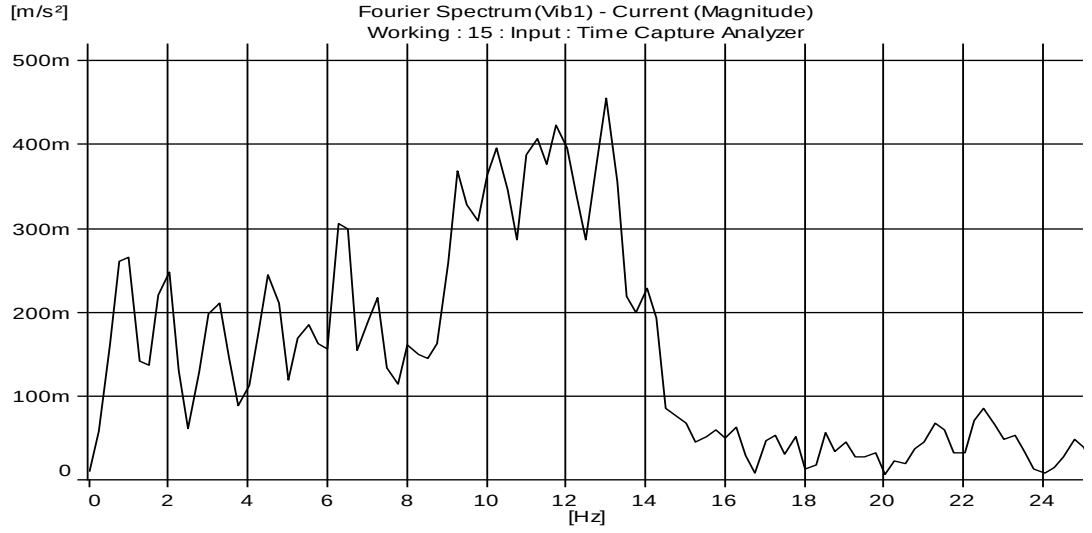
Şekil B.1: 10 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



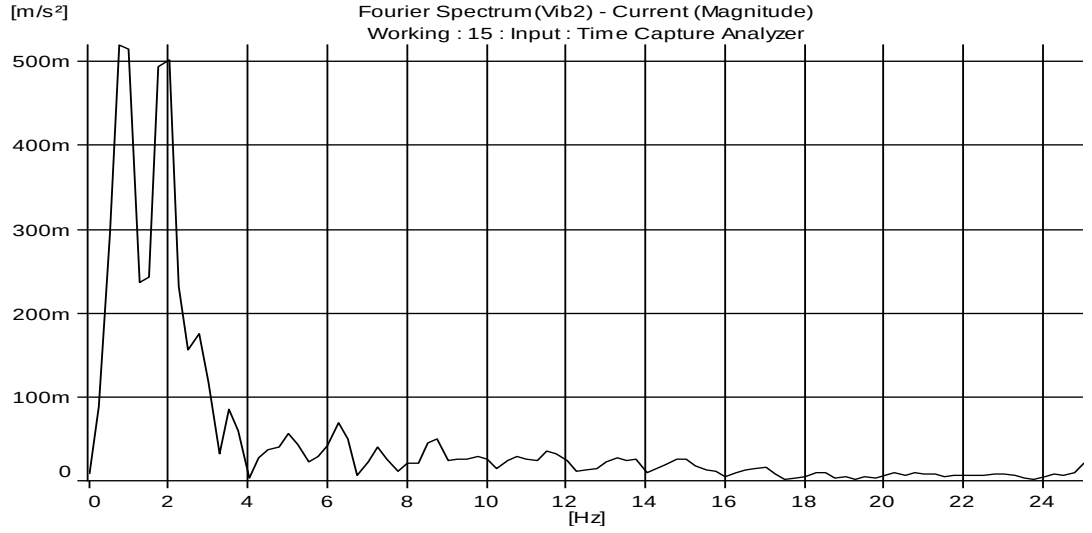
Şekil B.2: 10 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



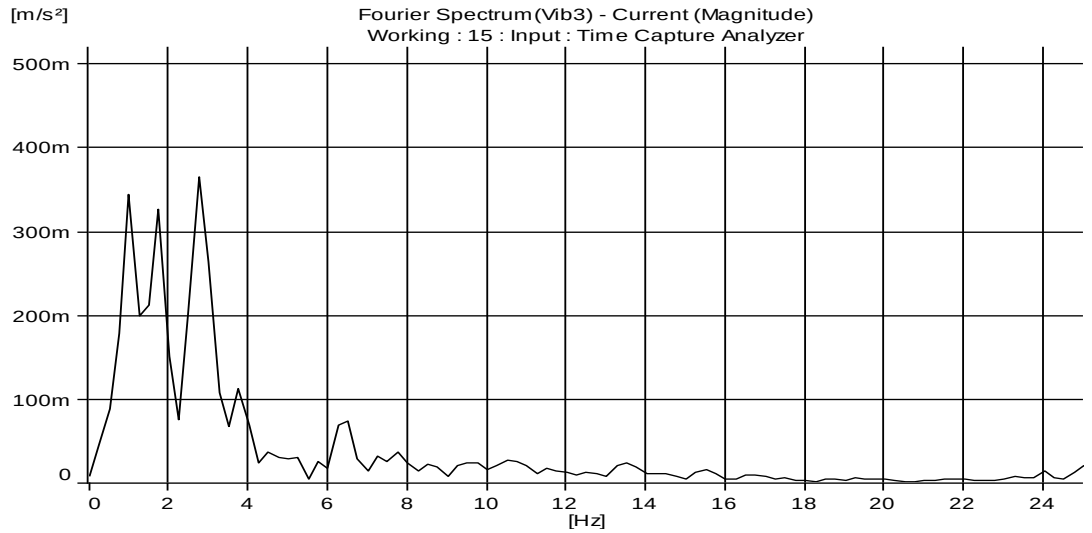
Şekil B.3: 10 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken koltukta ivme-frekans dağılımı



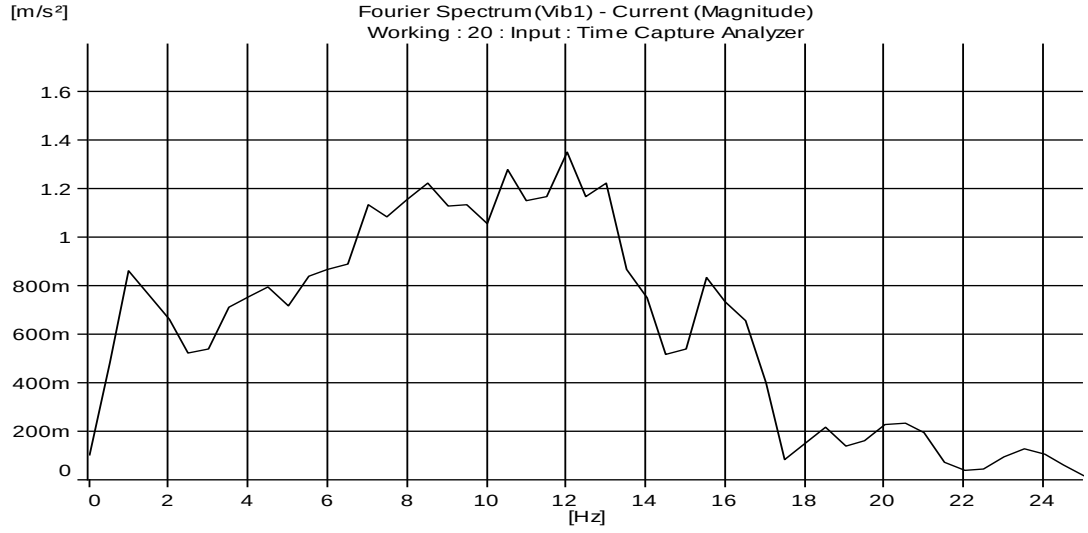
Şekil B.4: 15 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



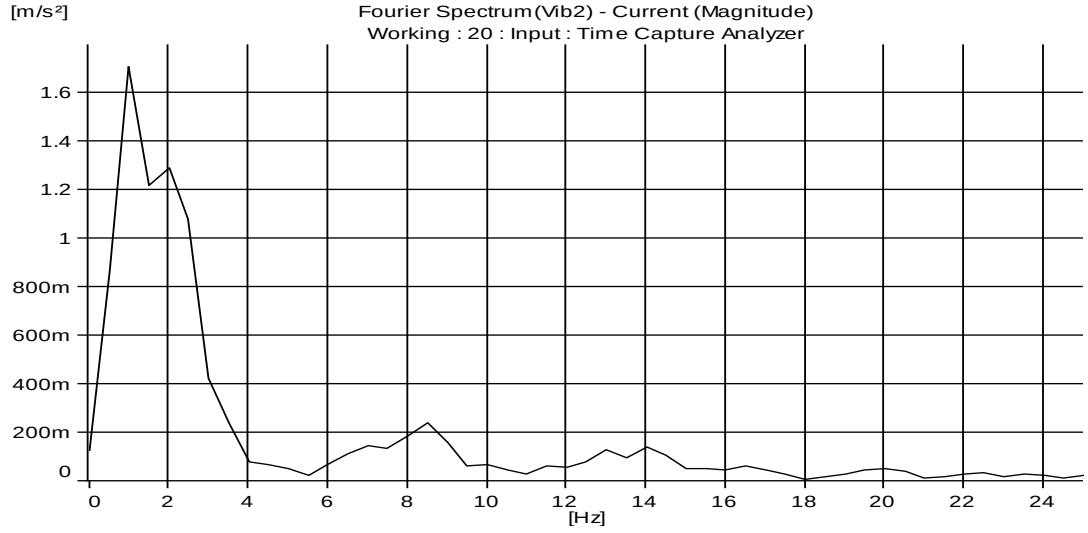
Şekil B.5: 15 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



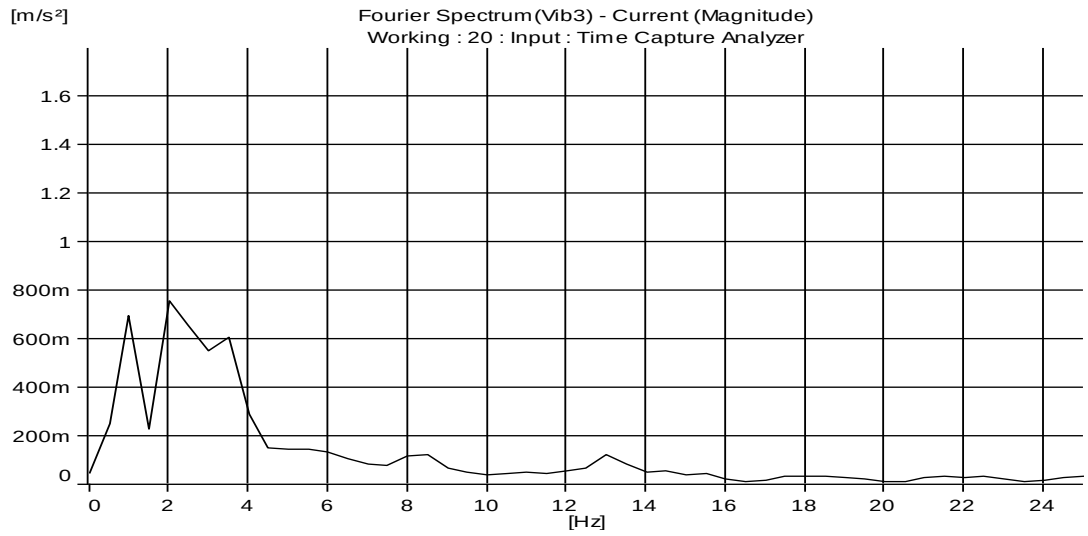
Şekil B.6: 15 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken koltukta ivme-frekans dağılımı



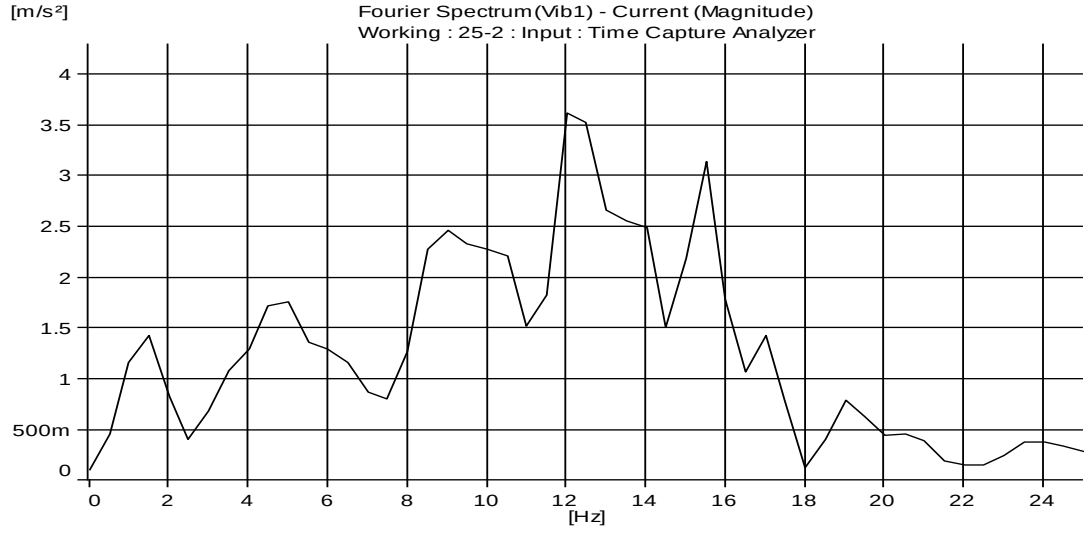
Şekil B.7: 20 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



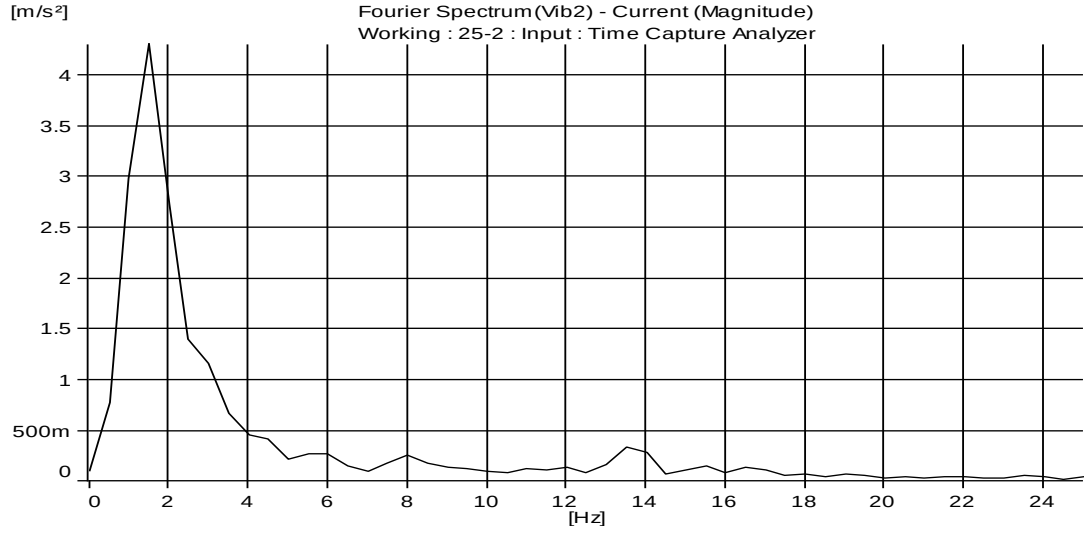
Şekil B.8: 20 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



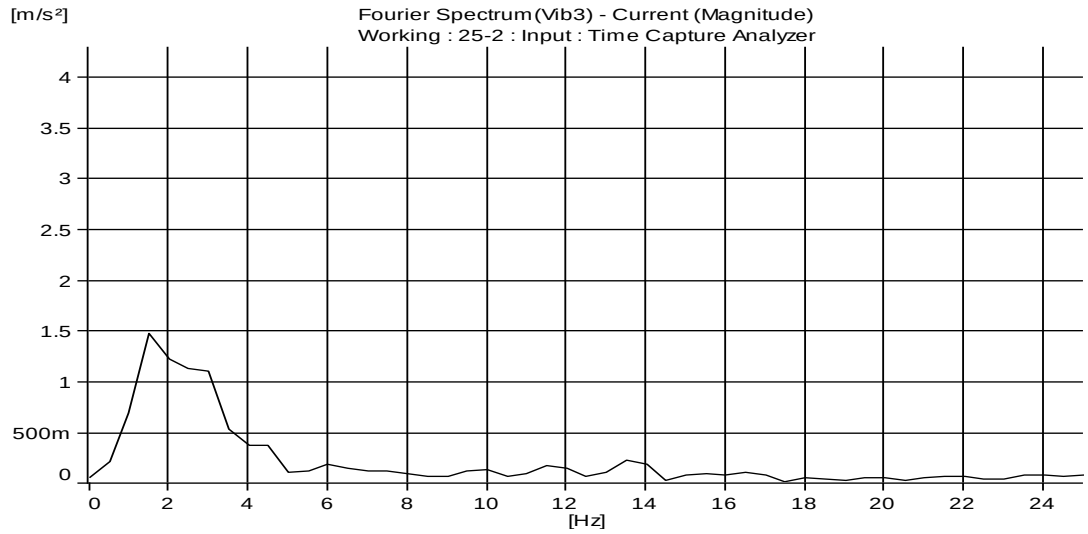
Şekil B.9: 20 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken koltukta ivme-frekans dağılımı



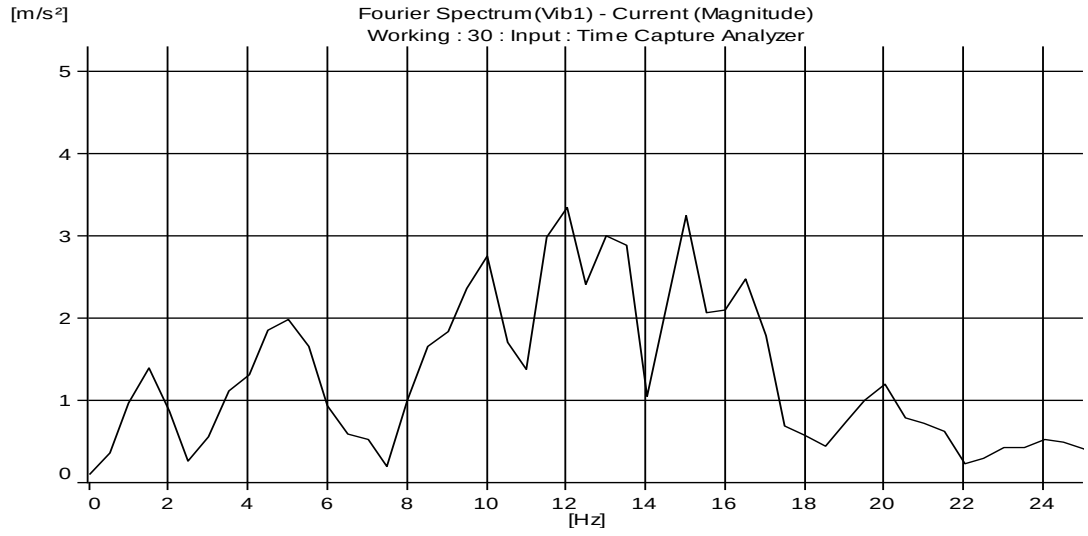
Şekil B.10: 25 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



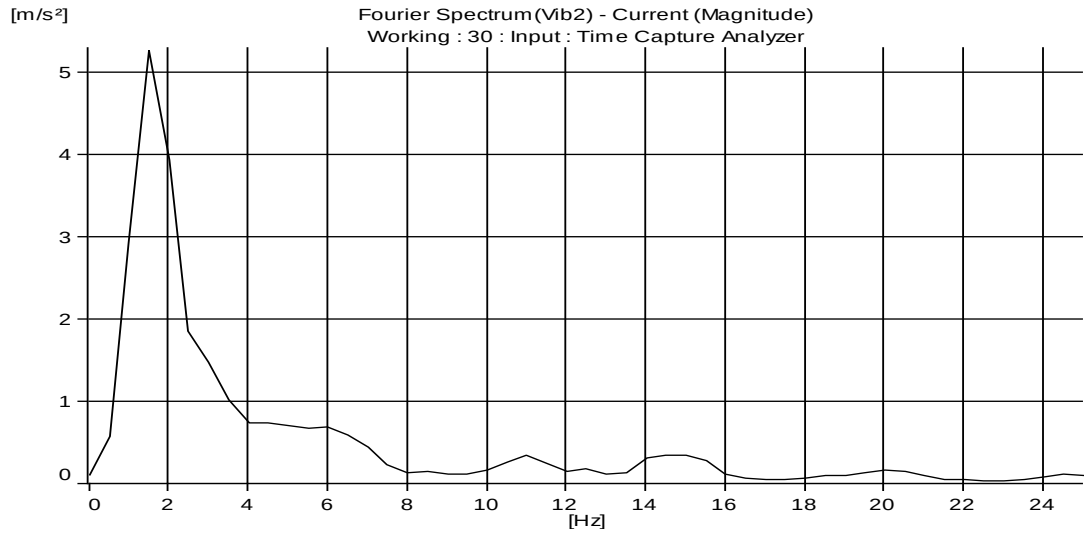
Şekil B.11: 25 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



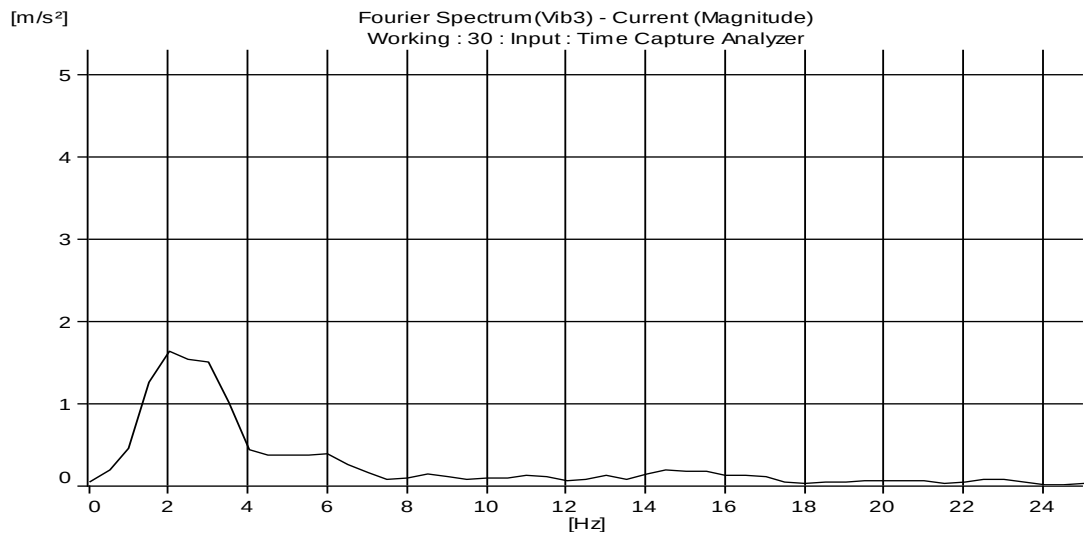
Şekil B.12: 25 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken koltukta ivme-frekans dağılımı



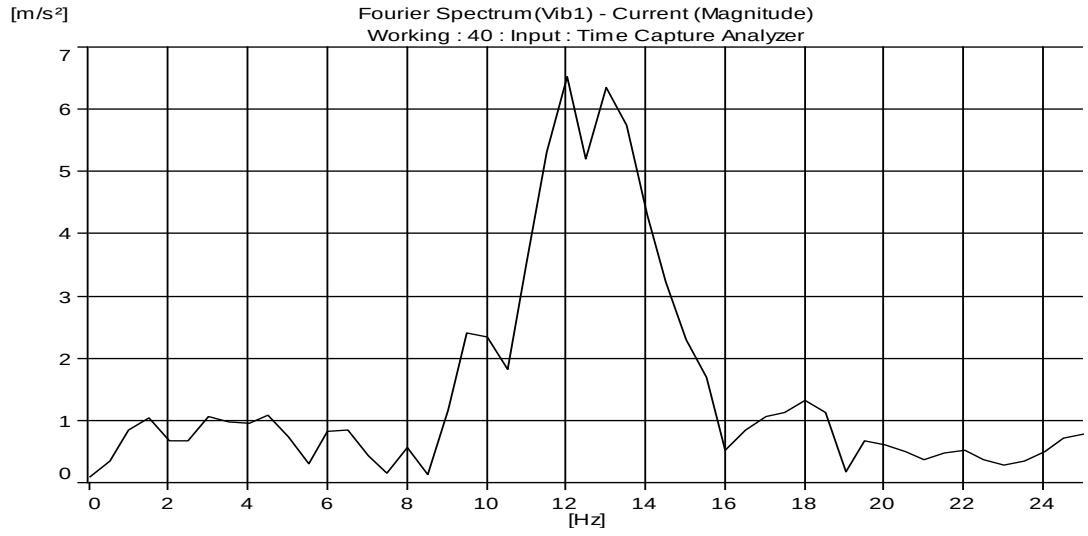
Şekil B.13: 30 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



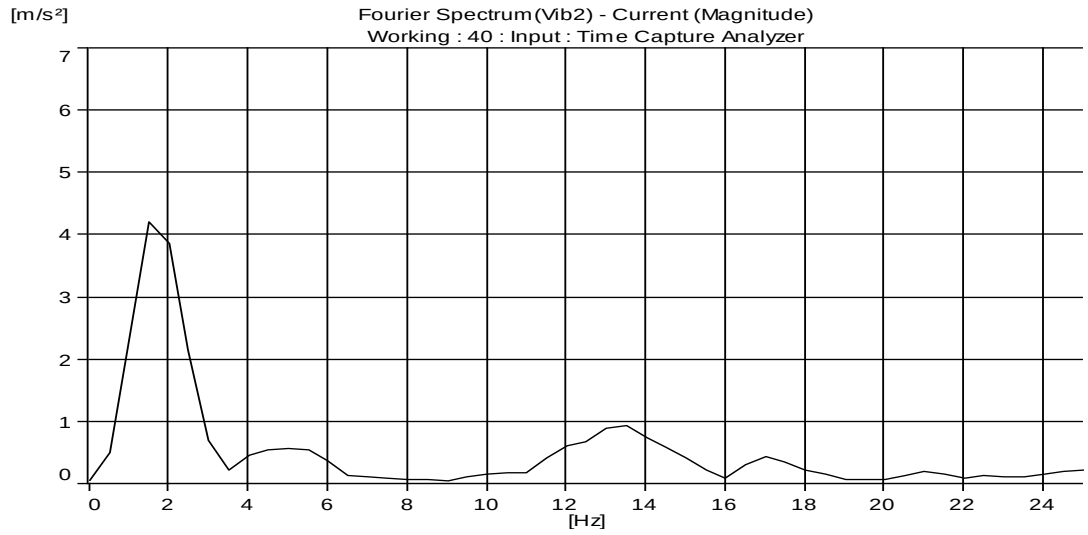
Şekil B.14: 30 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken gövde ivme-frekans dağılımı



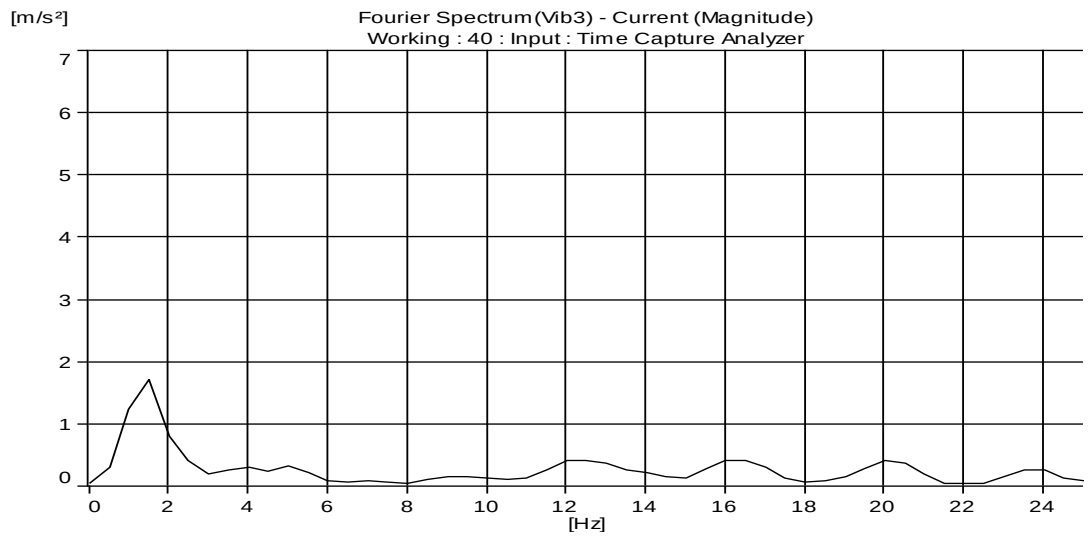
Şekil B.15: 30 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken koltuk ivme-frekans dağılımı



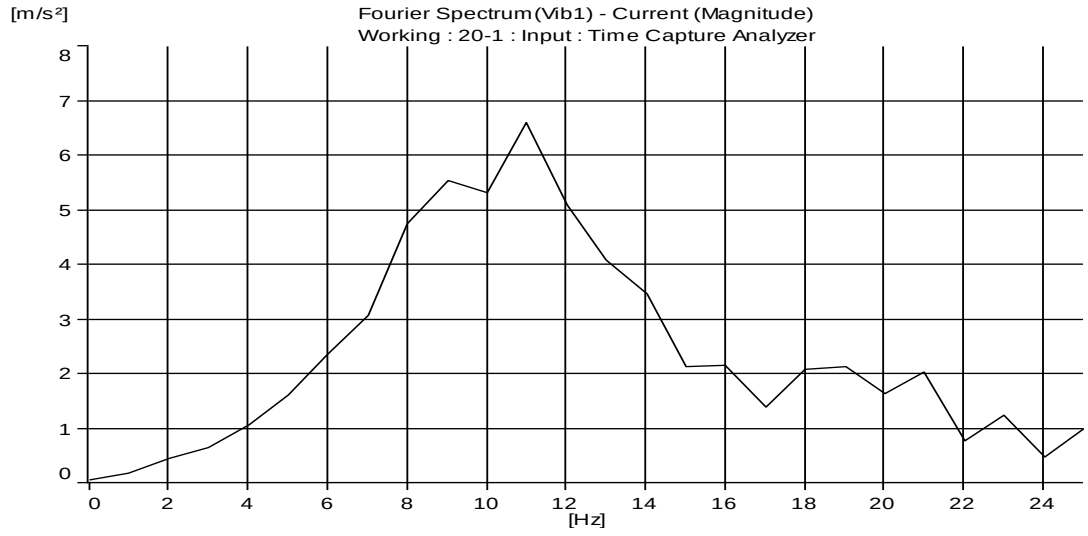
Şekil B.16: 40 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



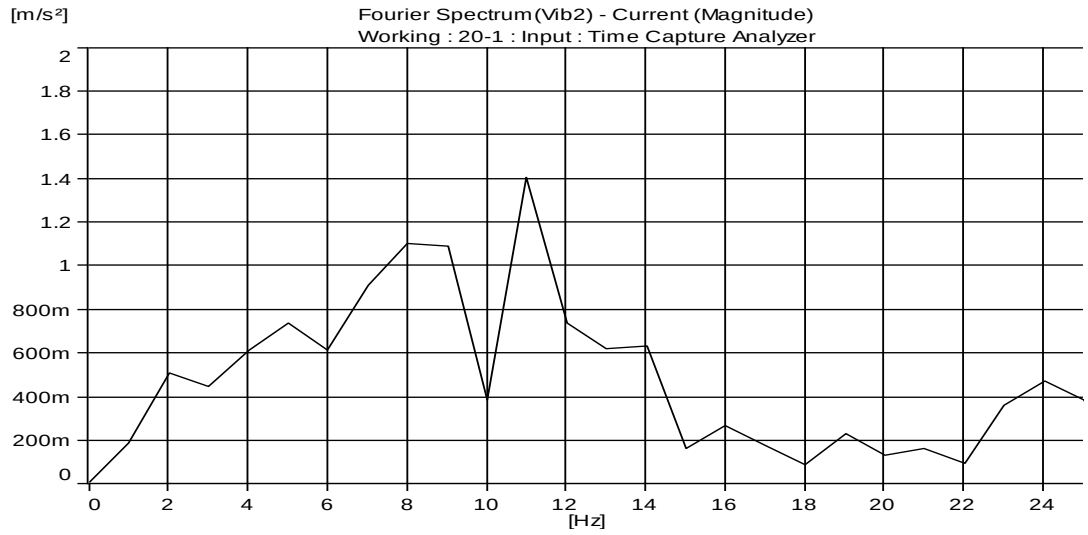
Şekil B.17: 40 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken gövde ivme-frekans dağılımı



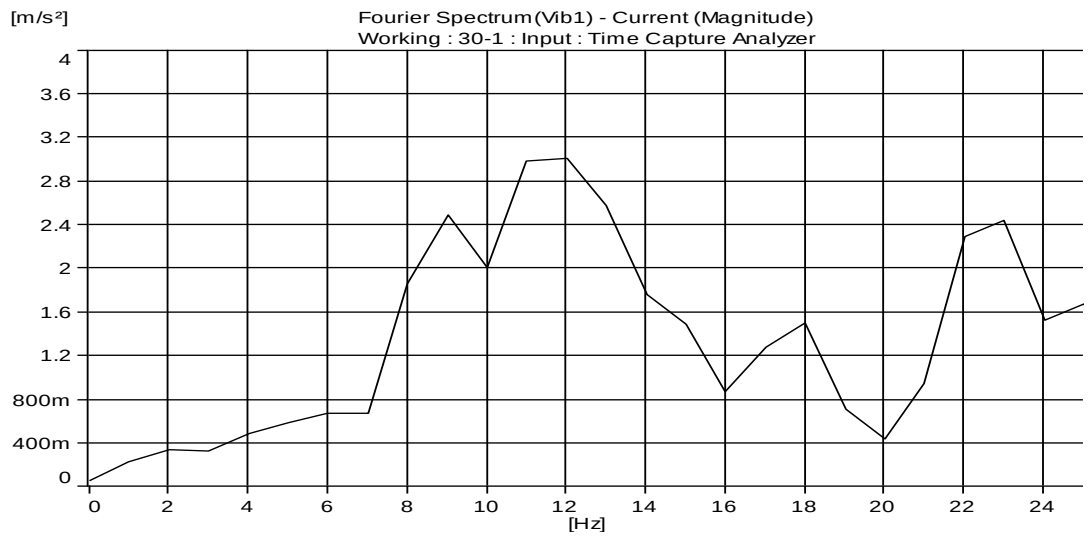
Şekil B.18: 40 km/saat hızla uzun tümsekten geçerken koltuk ivme-frekans dağılımı



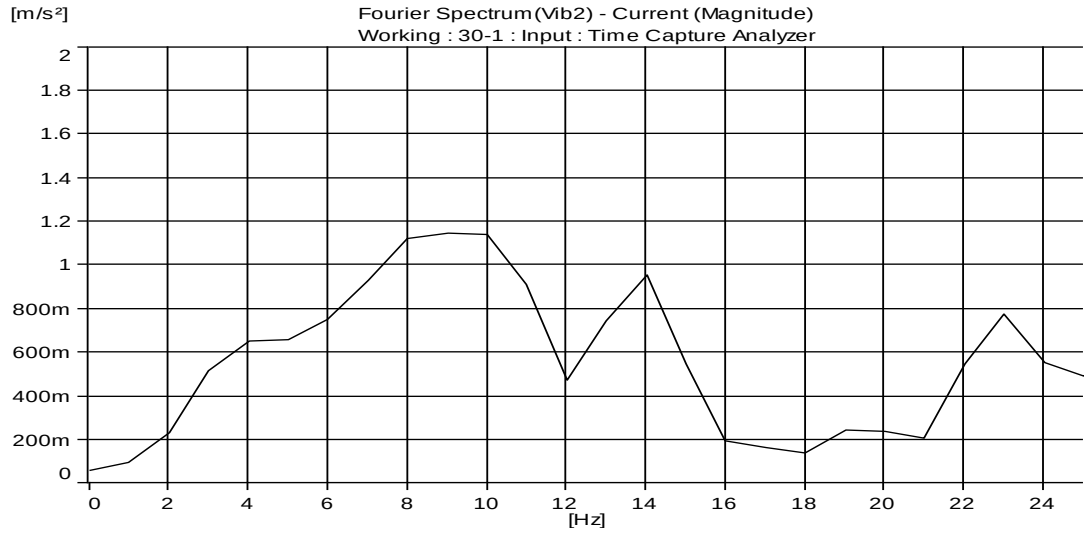
Şekil B.19: 20 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



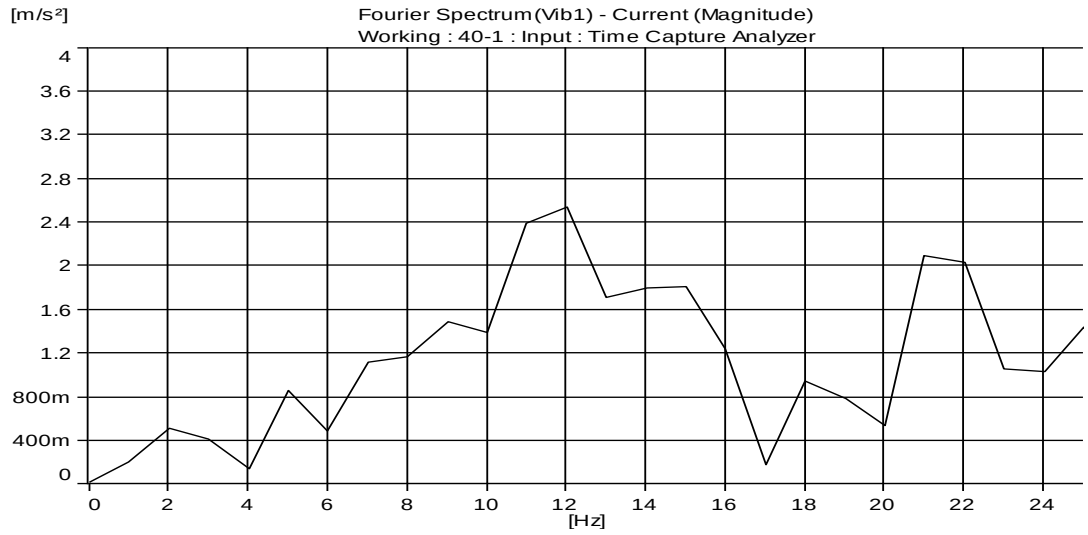
Şekil B.20: 20 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



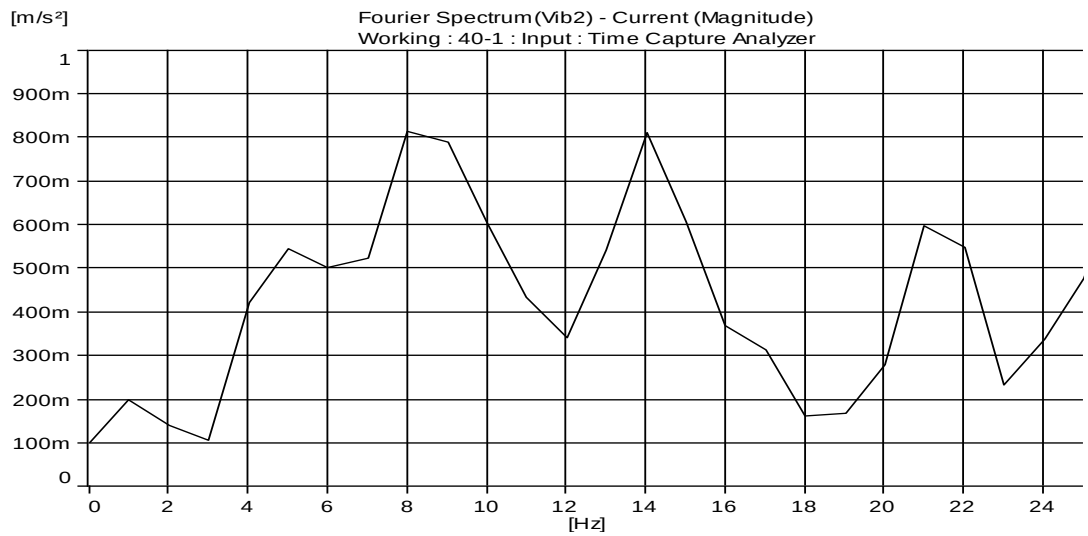
Şekil B.21: 30 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



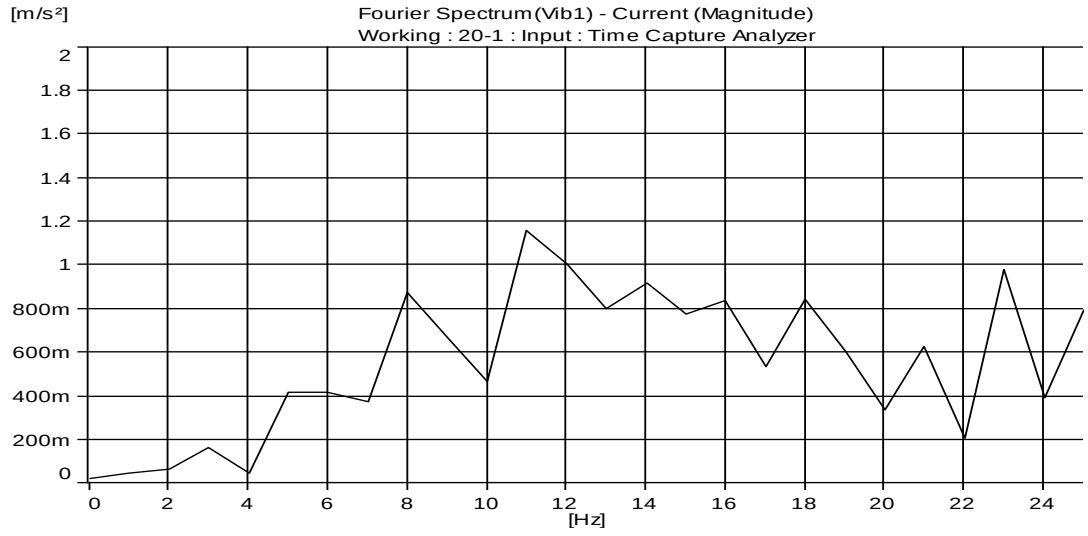
Şekil B.22: 30 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



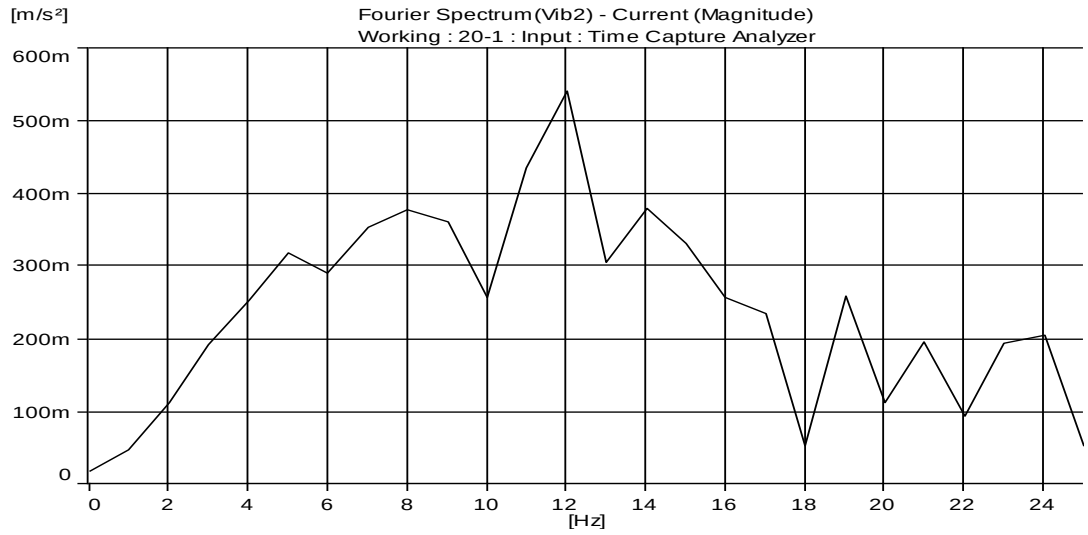
Şekil B.23: 40 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



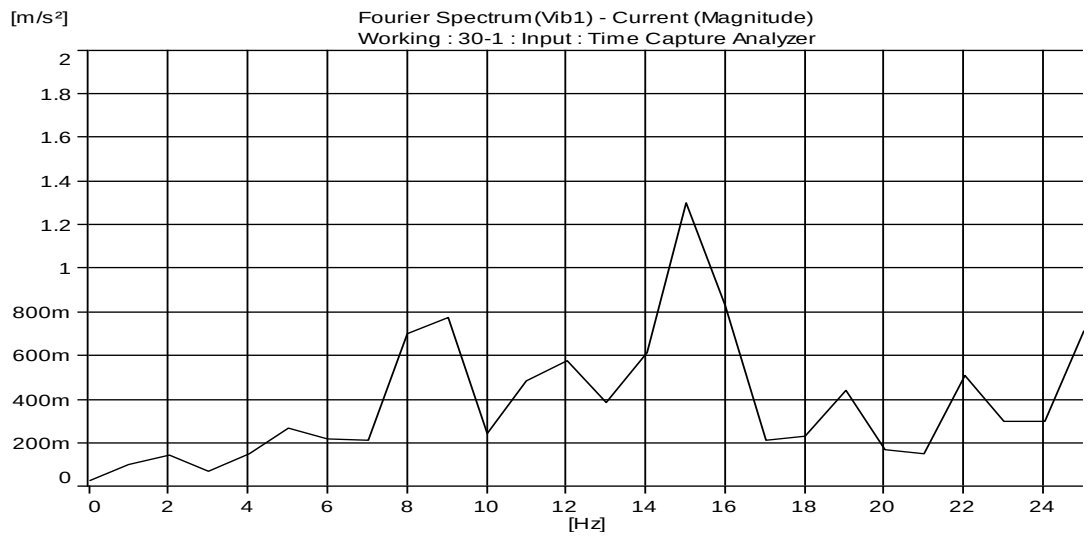
Şekil B.24: 40 km/saat hızla kısa tümsekten geçerken gövdede ivme-frekans dağılımı



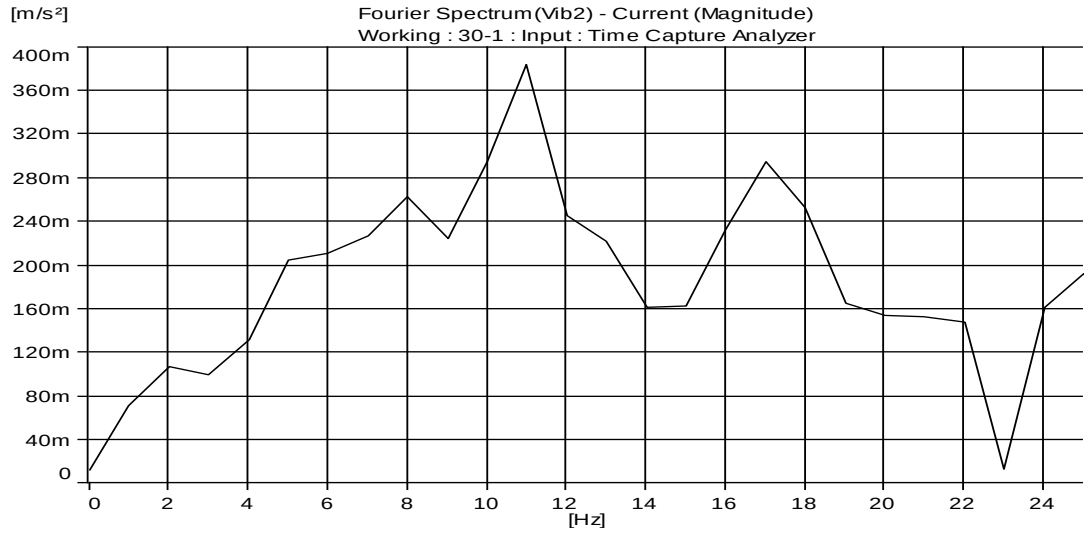
Şekil B.25: 20 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



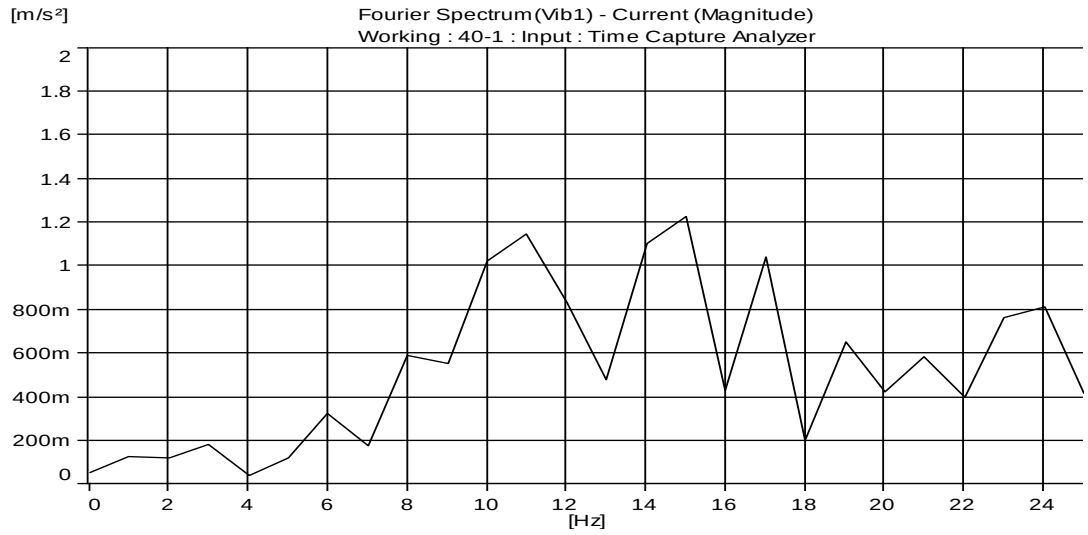
Şekil B.26: 20 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken gövde ivme-frekans dağılımı



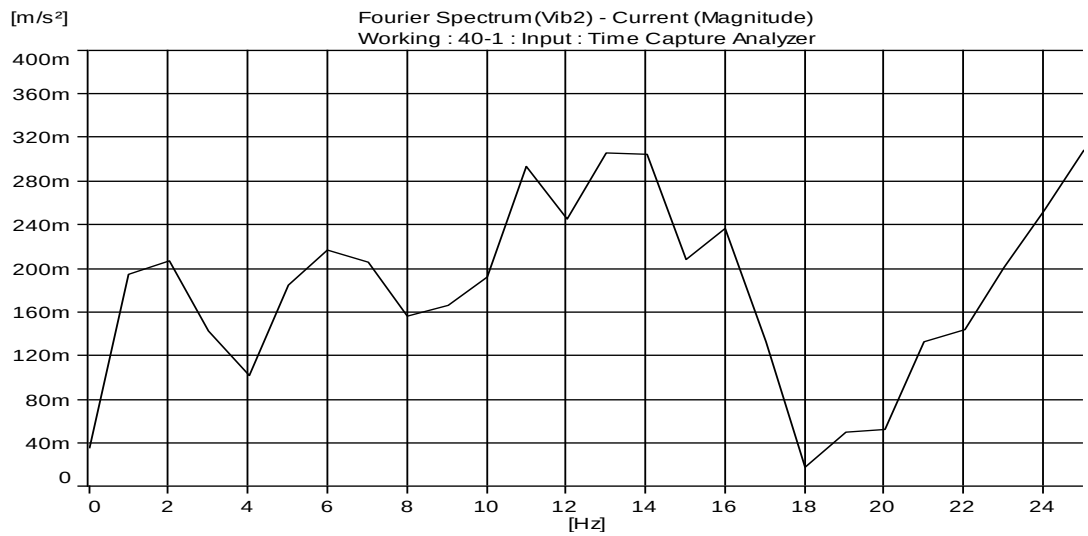
Şekil B.27: 30 km/saat hızla kedi gözlerinden geçerken aksta ivme-frekans dağılımı



Şekil B.28: 30 km/saat hızla kedi gözlerinden geçenken gövde ivme-frekans dağılımı



Şekil B.29: 40 km/saat hızla kedi gözlerinden geçenken aksta ivme-frekans dağılımı



Şekil B.30: 40 km/saat hızla kedi gözlerinden geçenken gövde ivme-frekans dağılımı

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Gürer, 22 Eylül 1981 tarihinde Bursa’da doğmuştur. İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden 2003 yılında mezun olmuştur. Aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans çalışmasına başlamıştır.