

75504

YOLUN BOYUNA PROFİLİNİN PÜRÜZLÜLÜĞÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh.Engin ARISOY

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Ekim1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Kasım 1998

Tez Danışmanı

: Doç.Dr. Ahmet Güney

Diğer Jüri Üyeleri

: Prof.Dr. Ali Güvenç Göktaş

Prof.Dr. Murat Ereke

27.11.98

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

KASIM 1998

ÖNSÖZ

Yol pürüzlülüğü, başta seyir emniyeti olmak üzere yolun ömrü, seyir konforu ve enerji tüketimi üzerine etkili olan bir kriter olmaktadır. Yapılan bu çalışmanın yol pürüzlülüğünün belirlenmesi için ülkemizde yapılacak olan çalışmalarda bir kaynak niteliği taşıyacağı inancını taşımaktayım.

Tezin hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı değerli hocam Sn. Ahmet Güney'e, yazım konusundaki yardımlarından dolayı sevgili arkadaşlarım Aykut Arıkan ve Ayşe Özdem'e, bilgisayar programının düzenlenmesindeki yardımlarından dolayı sevgili arkadaşım Köksal Uslubaş'a teşekkür ederim.

İstanbul, 08.06.98

Engin Arısoy



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	ii
SEMBOL LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xix
 BÖLÜM 1 ARAŞTIRMANIN BAŞLANGICI, HEDEF BELİRLEMESİ VE YAPISI.....	 1
 BÖLÜM 2 ÖLÇÜM YOLLARININ SEÇİMİ VE TARİFİ	 3
2.1.Ölçüm yollarının seçimi için kriterler ve sınır şartları.....	3
2.1.1.Uzun yollar.....	3
2.1.2 .Karşılaştırma yolları.....	6
2.2.Ölçüm yollarının tarifi ve dokümantasyon	8

2.2.1.Uzun yollar	8
2.2.2. Karşılaştırma yolları.....	11
BÖLÜM 3 YOLUN BOYUNA PROFİLİNİN PÜRÜZLÜLÜĞÜ	13
3.1. Bilginin seviyesi	13
3.1.1. Boyuna profildeki pürüzlülük üzerine literatür genel bakışı	13
3.1.2. Boyuna profildeki pürüzlerin nedeni ve etkisi	13
3.1.3.Boyuna profildeki pürüzlülüğün ölçüm ve ifade yöntemleri	23
3.1.4.Boyuna profildeki pürüzlülüğün belirlenmesi için değerlendirme yöntemleri	34
3.2.Pürüzlülük ölçüm aletlerinin tarifi.....	39
3.2.1.HSRM.....	39
3.2.2.LRST	45
3.2.3.Planograf	50
3.2.4.DB-2 iz	53
3.2.5.FMPA ve BAST'ın profil eğim ölçüm aletleri	58
3.2.6.Açı ölçer ISETH.....	62
3.2.7.BI.....	66
3.2.8.Bayern'in pürüz etki aleti.....	71
3.2.9. APL	74
3.3.Uzun yol ölçümleri.....	78
3.3.1.Deney yapılışı.....	78
3.3.2.Değerlendirme.....	78
3.3.3.Sonuçlar	85
3.4.Karşılaştırma ölçümleri.....	105
3.4.1.Deney yapılışı.....	105
3.4.2.Durum büyüklüklerinin karşılaştırılmaları için değerlendirme	105
3.4.3.Sonuçlar	110

BÖLÜM 4 YOLUN BOYUNA PROFİLİNİN PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ELDE EDİLMESİ	114
4.1 Boyuna profilde yol pürüzlülüğünün elde edilmesi için gerekli ifadelerin oluşturulması.....	114
4.2 Yolun boyuna profilinin pürüzlülüğünün bilgisayar programı yardımıyla elde edilmesi	117
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	119
KAYNAKLAR.....	120
EKLER.....	122
ÖZGEÇMİŞ.....	153

SEMBOL LİSTESİ

b	1	Regresyon katsayısı
B	1/m	Çözünürlük frekansı
F _z	N	Tekerlek yükü
h	mm	Pürüz yüksekliği
l	m	Uzaklık
L	m	Dalga boyu
LEI	1	Longitudinal-Eveness-Index
N	1	Sayı değişkeni
p	1	Sürülebilirlik indeksi
P	mm	Profil derinliği
q	grd	Enine eğilme
r	1	Korelasyon katsayısı
s	m	İz genişliği
s	mm ²	Standart sapma
S _y	mm ²	Bir karşılaştırma doğrusu çevresinde iz doğrultusundaki olukların profilinin dağılımı
SV	1	Slope-Variance (boyuna profil eğim varyantı)
t	s	Zaman
t	mm	Su derinliği
T	s	Salınım süresi

T	mm	Çukur derinliği
v, V	m/s, km/h	Hız
VK	%	Varyasyon katsayısı
w	1	Dalgalık
W	$^{\circ}/_{00}$	Açı değeri
x	m	Boyuna doğrultudaki yol
y	m	Enine doğrultudaki yol
α	grd	Boyuna profil eğim açısı
ε	1	Değerlendirme fonksiyonu
χ	grd	Yalpa açısı
ν	1/s	Öz açısal frekansı
ω	1/s	Zamana bağlı açısal frekans
Ω	1/m	Yola bağlı açısal frekans
Ω_0	1/m	Referans yola bağlı açısal frekans $\Omega_0 = 1 \text{ 1/m}$
φ	grd	Baş vurma açısı
$\phi_h(\Omega)$	cm^3	Pürüz genliklerinin yola bağlı açısal frekansa bağlı spektral yoğunluğu
$\phi_h(\Omega_0)$	cm^3	Pürüzlülük ölçüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Ölçüm yollarının örnek ışık resimleri.....	12
Şekil 3.1 Yol boyuna profilindeki pürüzlerin sebepleri.....	14
Şekil 3.2 Düzgün olan ve pürüzlü olan yol üzerindeki seyir sırasında tekerlek yükleri ve yol zorlanmaları.....	16
Şekil 3.3 Sinüs eğrisi şeklindeki pürüzlülük fonksiyonu.....	20
Şekil 3.4 Pürüzlerin etki frekansları ve dalga boyları için öz frekanslara ve seyir hızlarına göre ortaya çıkan bölgeler.....	22
Şekil 3.5 Moving-average metodunun şematik gösterimi (3 m ortalama boy için örnek)	28
Şekil 3.6 Ω yola bağlı açısal frekansa ve L dalga boyuna bağlı olarak pürüzlerin spektral yoğunluğu	29
Şekil 3.7 Yol pürüzlerinin spektral yoğunluğunun yaklaşık gösterimi.....	30
Şekil 3.8 Açı değeri ölçüm şeması.....	32
Şekil 3.9 HSRM	40

Şekil 3.10 HSRM’de bulunan ve temassız olarak ölçüm yapan mesafe kaydedicisinin prensip olarak çalışma şekli.....	41
Şekil 3.11 Yol pürüzlülüğünün değerlendirilmesi için HSRM’nin ölçümlerinden elde edilen pürüz yüksekliğinin varyantı ve ortalama boylar (moving average’ler) arasındaki ilişki	44
Şekil 3.12 LRST	47
Şekil 3.13 LRST’de ölçüm değeri işlenmesinin şeması	48
Şekil 3.14 LRST’nin ölçümlerine göre pürüzlülük değerlendirmesinin tekrarlanabilirliği.....	49
Şekil 3.15 Taşıt gövdesi ivmesi ölçümlerinden elde edilen comfort-value değerlerinin sıklık dağılımı	50
Şekil 3.16 Planograf.....	51
Şekil 3.17 DB-2 iz ölçüm aleti.....	54
Şekil 3.18 DB-2 iz ölçüm aletiyle pürüzlülük ölçümü.....	57
Şekil 3.19 BAsT ve FMPA’nın profil eğim ölçüm aleti	60
Şekil 3.20 Açı ölçer ISETH’in yapısı.....	64
Şekil 3.21 BI.....	67

Şekil 3.22 BI'nin ölçüm değeri elde etme, değerlendirme ve kaydetme aletlerinin blok diyagramı.....	68
Şekil 3.23 Farklı seyir hızı bölgeleri için pürüzlülük indeksi ve sürülebilirlik arasındaki ilişki.....	71
Şekil 3.24 Bayern'in pürüz etki aleti	73
Şekil 3.25 APL	76
Şekil 3.26 Almanya'da APL ile 25.2 km uzunluğundaki ölçüm yolu üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen düzgünlük değerlendirmesinin sıklık dağılımları.....	78
Şekil 3.27 Spektral yoğunluğun frekans ortalaması alınmasının şematik olarak gösterilmesi.....	83
Şekil 3.28 Düzeltilmiş ve düzeltilmemiş pürüz spektrumu arasındaki karşılaştırma	83
Şekil 3.29 VW test arazisindeki karşılaştırma yolları da dahil olmak üzere, Almanya'daki bütün ölçüm yolları için $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük büyüklüğü ve w dalgalılığı arasındaki ilişki	85
Şekil 3.30-1 $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsünün veri kolektifi için izafi sıklık dağılımı ve izafi toplam sıklık (Örnek: Almanya'da yapılan ölçümlerde test edilen 298 ölçüm yolu)	87
Şekil 3.30-2 $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsünün veri kolektifi için izafi sıklık dağılımı ve izafi toplam sıklık (Örnek: Almanya'da yapılan ölçümlerde test edilen 298 ölçüm yolu)	88

Şekil 3.31 w dalgalılığının veri kolektifi için izafi sıklık dağılımı ve eşitleme doğrusu ile birlikte izafi toplam sıklık.....	89
Şekil 3.32 Almanya’da yapılan ölçümlerde farklı yol kaplamaları üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri.....	90
Şekil 3.33 Almanya’da yapılan ölçümlerde farklı yol sınıfları üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri.....	93
Şekil 3.34 Yapılan çeşitli subjektif değerlendirmeler sonucunda elde edilen spektrumların tanım değerleri.....	96
Şekil 3.35 Yapılan çeşitli subjektif değerlendirmeler sonucunda elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülüğü ve w dalgalılığı arasındaki ilişki.....	97
Şekil 3.36 Çeşitli yol kaplaması cinsleri üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişki.....	99
Şekil 3.37 Çeşitli yol sınıfları üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişki.....	100
Şekil 3.38 Çeşitli yol sınıfları ve yol kaplaması cinsleri üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişki	102
Şekil 3.39 Farklı $\phi_h(\Omega_0)$ -w kombinasyonlarından aynı konfor değerlendirmelerinin elde edilmesi	104
Şekil 3.40 Sıklık analizinin diyagram şeklindeki gösterimi (örnek: İdeal normal dağılımın şematik çizimi)	107

Şekil 4.1 $\phi_h(\Omega)$ spektral yoğunluğun kısmi efektif değerlere ayrılması.....	115
---	-----



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Almanya'nın sınıflandırılmış yol ağındaki her bir yol sınıfının boyu, üzerine uygulanan yıllık seyir güçleri ve bunlardan çıkarılan tanım değerleri.....	4
Tablo 2.2 Kaplama şekillerine göre Alman yol ağının ayrılması	5
Tablo 2.3 Kaplama şekillerine ve yol sınıflarına göre ölçüm yolunun ayrılması	6
Tablo 2.4 Almanya'da yapılmış olan uzun yol ölçümlerinde, yolların ayrılması sonucunda belirlenen (olan) değerler ve hedeflenen (olması gereken) değerler arasındaki karşılaştırma	9
Tablo 3.1 Yolun boyuna profilindeki pürüzlülüğün belirlenmesi için günümüzde kullanılan ölçüm sistemleri ve bu sistemlerin önemli özellikleri.....	25
Tablo 3.2 Günümüzde Orta Avrupa'da kullanılan pürüzlülük değerlendirme yöntemleri ve bu yöntemlerin önemli özellikleri.....	35
Tablo 3.3 L dalga boyuna bağlı olarak HSRM'nin ölçüm hataları.....	42
Tablo 3.4 DB-2 iz ölçüm aletinin açı ölçüm hassasiyeti	55
Tablo 3.5 Farklı kaplama cinsleri için pürüzlülük ve dalgalılık sınırlar değerleri	91

Tablo 3.6 Almanya’da yapılan ölçümlerde farklı yol sınıfları için pürüzlülük değeri ve dalgalık sınır değerleri	93
Tablo 3.7 Yapılan çeşitli subjektif değerlendirmeler sonucunda elde edilen pürüzlülük ölçüsü ve dalgalılığın sınır değerleri	98
Tablo 3.8 Çeşitli subjektif değerlendirmelerde elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsü ve w dalgalılığı arasındaki ilişki	103
Tablo 3.9 Karşılaştırma ölçümlerinde tekrarlanabilirlik incelemeleri için her bir ölçüm aleti tarafından tekrarlanan ölçüm sayısı ve elde edilen ölçüm değerlerinin sayısı; durum büyüklüğü başına ifadeler $\hat{=}$ tekrarlanabilirlik akışı	111
Tablo 3.10 Yapılan ölçümlerde elde edilen durum büyüklükleri. Skaladaki dağılım	112
Tablo 3.11 Tekrarlanan ölçümlerden elde edilen varyasyon katsayısı	113

ÖZET

YOLUN BOYUNA PROFİLİNİN PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Yolun planlanmış olan profilinden sapmalar olarak nitelendirilebilecek olan yol pürüzlülüğü, seyir emniyeti, yolun ömrü, seyir konforu ve enerji tüketimi konularında önemli bir kriter teşkil etmektedir.

Pürüzlülüğün belirlenmesi için esas alınacak olan yol koruma sisteminde, yol pürüzlerini rutin olarak kaydedebilecek ve değerlendirebilecek uygun yol pürüzlülüğü ölçüm sistemlerinin kullanılması gerekli olmaktadır. Bu ölçüm sistemleri ile yapılan ölçümlerin sonuçlarının karşılaştırılabilir olması için benzer esaslara dayanan ve çevrilebilen sonuçlar üreten pürüzlülük kaydetme ve değerlendirme metotlarının kullanılması gerekmektedir.

Pürüzlülük, yol yüzey profilinde boyuna ve enine doğrultuda olma üzere iki farklı şekilde incelenmektedir. Yapılan bu çalışmada boyuna profildeki pürüzlülüğün incelenmesinde kullanılan ölçüm aletlerinin yapısı, ölçüm ve değerlendirme yöntemi incelenmektedir ve bu metotlar belirli kriterlere göre karşılaştırılmaktadır.

Teorik araştırmalar, yalnızca aşağıdaki aletlerin boyuna profildeki düzgünlüğü ölçmeye uygun olduğunu göstermektedir:

- Analyseur Dynamique de Profil en Long (APL),
- Automatic Road Analyzer (ARAN) ve
- High-Speed Road Monitor (HSRM).

APL, kullanım maliyetinin düşük olması nedeniyle özellikle basit uygulamalarda kullanılmaktadır. Diğer yandan ARAN ve HSRM, her iki (boyuna ve enine) profildeki düzgünlük değerlerinin ve diğer yol verilerinin kaydedildiği uygulamalarda kullanılmaktadır. HSRM tarafından elde edilen düzgünlük kayıt işleminin üstünlüğüne karşın, masraf avantajlarından dolayı ARAN tercih edilmektedir. Ancak yapılacak olan spektral yoğunluk hesapları için belirli ölçüde cevap kalitesi talep edildiğinden ölçüm aletlerinin tedarik edilmesi öncesinde APL ve ARAN cevap fonksiyonları üzerine ayrıntılı araştırma yapılması gerekmektedir.

Bütün bu üç alet, boyuna yol profilinde ölçüm yapmaktadır ve yol pürüzlülüğünü ifade eden ϕ_h profil yüksekliğinin spektral yoğunluğunu tespit etmek için uygun olmaktadır.

Spektral yoğunluk, boyuna profildeki pürüzlülüğü karakterize edebilecek tek karşılaştırma büyüklüğü olmaktadır.

Etki frekansı ve etki genliği arasındaki ilişkinin ifadesi için ithal edilmiş olan spektral yoğunluk değeri yardımıyla tekil izler üzerinde daha önceden elde edilmiş olan değerler, sonradan elde edilen değerlerle karşılaştırılabilmektedir. Bunun yanında bu değer yardımıyla farklı yol sınıflarının, farklı yapı şekillerinin ve özel yolların pürüzlülük değerleri karşılaştırılabilmektedir.

Boyuna profildeki düzgünlüğün belirlenmesinde spektral yoğunluk değerlerinin karşılaştırılabilmesi için bir karşılaştırma skalası, Spectral Evenness Index (SEI), oluşturulmuştur.

SEI kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin karşılaştırılarak düzgünlüğün değerlendirilmesi ve bir değerlendirme temelini oluşturulması da mümkün olmaktadır.

Yukarıda belirtilen pürüzlülüğün belirlenmesi için kullanılan üç pürüzlülük ölçüm aleti dışında kullanılan İngiliz yapımı Bump Integrator'un (BI), Alman yapımı Bavyera'nın pürüz etki aletinin (BU), Almanya'nın Yol Yapısı için Milli Enstitünün (BAST) profil eğim ölçüm aletinin ve İsviçre'nin Zürih Yollar Kurumu ve Yeraltı Maden İşletmesi'nin (ISETH) açılı ölçeri tarafından kapsanan dalga boyu bölgesi spektral yoğunluğun kaydedilmesi için yeterli olmamaktadır ve pürüzlülük ölçümü için yetersiz olmaktadır. Bu aletlerin dalga boyu bölgelerinin kısa olması nedeniyle yolda bulunabilecek herhangi bir periyodiklik ölçüm sonucunu yanıltabilmektedir. Bu nedenle bu aletler kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarının ϕ_h spektral yoğunluğa çevrilmesi mümkün olmamaktadır.

İleride belirtilecek olan şartların sağlanması ile burada tarif edilen metotlar kullanılarak spektral yoğunluğun kayıt değerlerine çevrilmesi mümkün olmaktadır. Genel olarak konuyla ilgili olan araştırma projelerinin istatistiksel sonuçların birbirlerine çevrilmesini kolaylaştırdığı düşünüldüğü halde bu çevrilme yeterli derecede olmamaktadır. Bu, iki farklı ölçüm metodu arasındaki korelasyonların büyük oranda incelenen yollara ve kullanılan ölçüm aletlerine bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı yapılan korelasyon ölçümlerinde çoğu kez büyük ortalama varyasyonlar meydana gelmektedir.

Düzgünlük kayıt değeri olarak $\phi_h(\Omega)$ ve düzgünlük değerlerinin karşılaştırma büyüklüğü olarak SEI'nin üretilmesi boyuna pürüzlülüğün karakterize edilmesini ve otomotivde ve yol yapımı alanında yapılacak olan araştırma projeleri için bir standart sağlamaktadır.

Yol pürüz akışının düzgünlüğüne ve pürüzlerin spektral yoğunluğuna (veya etki spektrumuna) göre aletlerin istatistiksel kayıt değerleri arasındaki matematiksel korelasyonlar, pürüzlülük ölçüm aletlerinin cevap -veya daha kesin olarak, genlik-fonksiyonları baz alınarak hesaplanmaktadır. Bu şekilde yol düzgünlüğünün karakterize edilmesi için düzgünlük kayıt değerlerinin uygunluğuna göre ve farklı aletler kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonlara göre bilgiler elde edilmesi sağlanmaktadır.

Uygulanan ölçüm metotlarında kullanılan istatistiksel karakteristik değerler ve bu değerleri baz alan durum göstergeleri, yol pürüz karakteristiğinin kayıt edilmesine uygun olmamaktadır.

Yol pürüz karakteristiğinin belirlenmesi, ölçüm metodundan bağımsız olan ve yalnızca yol yüzeyinin geometrik profilinden hesaplanabilen ϕ_h pürüz yüksekliğinin spektral yoğunluğu ile olmaktadır. Bu değer, genliğin ve dalga boyunun her ikisine göre veri içermektedir ve bu nedenle düzgünlük karakteristiklerinin kayıt edilmesinde ve araçta, sürücüde ve yolda oluşan titreşimler üzerine bilgilerin elde edilmesine uygun olmaktadır.

ϕ_h pürüz yüksekliğinin spektral yoğunluğu, Ω yolun açısal frekansının ($= 2\pi /$ dalga boyu) fonksiyonu olmaktadır. Bu değer yaklaşık olarak

$$\phi_h(\Omega) = \phi_h(\Omega_0) (\Omega / \Omega_0)^{-w}$$

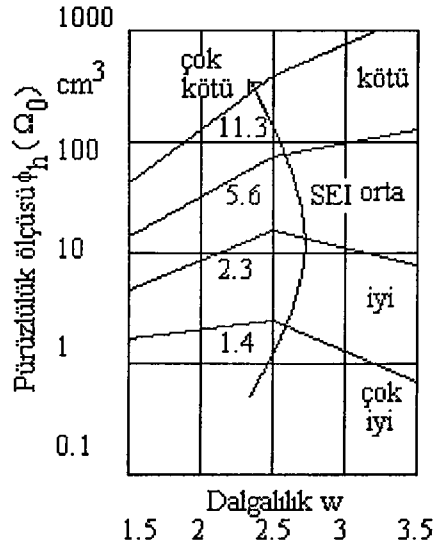
denklemi ile ifade edilmektedir. Burada $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsü, w dalgalılık ve $\Omega_0 = 1$ 1/m referans yol açısal frekansı olmaktadır. Sürücü konforu, sürücü güvenliği, yük seviyesi ve trafik hacmi üzerine yapılmış olan teorik araştırmalardan spektral karakteristiğin iki tanım büyüklüğü olan $\phi_h(\Omega_0)$ ve w arasında korelasyonlar elde edilmektedir. Bu korelasyonlar genel pürüzlülük ifadesi için bir değerlendirme skalasını, spektral düzgünlük indeksini (SEI) oluşturmaktadır. SEI şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$SEI = \sqrt{\phi_h(\Omega_0)} \quad \text{burada } w \leq 2.5 \text{ olmaktadır ve}$$

$$SEI = 4 \sqrt{\phi_h(\Omega_0)} / 32 \quad \text{burada } w \geq 2.5 \text{ olmaktadır;}$$

burada $\phi_h(\Omega_0)$ cm^3 olarak verilmektedir.

ISO Taslak No. 8608'de (1984) bulunan bir düzgünlük sınıflandırma taslağı kullanılarak spektral karakteristik değerleri, SEI ve düzgünlük sınıflandırması arasında Şekil 1'de gösterilen korelasyonlar oluşmaktadır.



Şekil 1 Spektral karakteristikler arasındaki korelasyon, ISO Taslak No.8608'e (1984) uygun olarak SEI ve sınıflandırma taslağı

SUMMARY

THE UNEVENNESS IN THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE ROAD

The evenness of carriageway surfaces plays an important role in road safety management. In consequence, it is also crucial executive factor of road maintenance.

Therefore, the road maintenance system envisaged for the future will require suitable systems of measuring carriageway unevenness to which the task of routinely recording and evaluating evenness at various executive levels might be entrusted.

For the results of such measurements to be comparable, it is essential that methods of recording and evaluating unevenness are available which employ uniform executive bases and produce interchangeable results.

This requires the provision of appropriate planning aids for selecting suitable measuring and recording methods and the creation of a representative evaluation background for determining generally applicable evenness indicators on the basis of objective and measurable criteria from the fields of automotive engineering and road construction.

The concerning research project was concerned with procuring longitudinal conditional values in respect of carriageway surface profile and with comparing important methods of measuring and recording longitudinal and transverse unevenness.

The following instruments were pre-selected as potentially suitable for future routine measuring:

- the profile integrator of the BAST and the FMFA;
- the protractor of the ISETH;
- the bump integrator of the TRRL;
- the Bavarian unevenness meter of the BAST;
- the APL of the DWW;
- the HSRM of the TRRL.

Following pre-selection, the instrument response functions were tested. The response functions of the first four of the instruments listed above were tested mathematically using the geometric or vibration data specified in the literature, and those of the APL were tested by measuring.

In the case of the HSRM, the response function specified in the literature was employed.

The mathematical correlation between the statistical recording values of the individual instruments in respect of the evenness and spectral density (or efficiency spectrum) of carriageway unevenness were calculated on the basis of the response -or to be more precise, amplification- functions of the measuring systems mentioned above.

This enabled information to be obtained in respect of the suitability of the individual evenness recording values for characterising carriageway evenness and of the correlation between the measuring results obtained using the various instruments.

The statistical characteristic values and the condition indicators based on these values employed by the measuring methods examined are unsuitable for recording road evenness characteristics.

However, this does not apply to the spectral density of unevenness height ϕ_h which is independent of measuring method and can only be calculated from the geometric profile of the carriageway surface.

This value contains data in respect of both amplitude and wave length, and is therefore ideally suited for recording evenness characteristics and producing meaningful information on the effects of vibration on vehicle, driver and road.

In respect of both response and conception (measuring longitudinal road profiles), of all the instruments tested, only the APL the ARAN and the HSRM are capable of “measuring” the spectral density.

They are suitable for applications in which both evenness and other road data are to be recorded.

The APL is recommended for purely longitudinal measuring. The cost advantages of the APL render the use of this instrument particularly suitable at the lower executive levels.

The ARAN and the HSRM are suitable for applications in which measurements are to be conducted in respect of both evenness and other road data. Despite the eminent suitability for recording evenness demonstrated by the HSRM, on cost grounds, preference is accorded to the ARAN.

However, as exact knowledge of response quality is required for spectral density calculations, exhaustive research should be conducted into the APL and the ARAN response functions prior to making any procurement commitment.

All three instruments measure longitudinal road profiles and are suitable for determining the spectral density of profile height ϕ_h . At the present time, this is the only value of evaluation able to characterise longitudinal evenness.

The wave length range covered by the profile inclinometers, protractors and the bump integrators tested is insufficient for spectral density recording, and therefore, it is not possible to convert the measurement results obtained using these instruments to spectral densities.

Similarly, it is not possible to convert those measurement results obtained using the APL, the ARAN and the HSRM which contain either the usual statistical characteristic values or the resulting recording values. The reason for this is that any periodicity's that might have been present in the carriageway would falsify the measurement results.

However, where the accurate response data is available, the spectral density can be calculated from the profile curves obtained using the APL, ARAN and the HSRM.

Assuming that the requirements specified in this project are not disregarded, it is possible to convert the spectral density to the recording values using the methods described in this paper. Generally speaking, although this research and many other such projects were meant to facilitate the conversion of one statistical evaluation value to another, this proves impracticable.

The reason for this is that the correlation between two different measuring methods are largely dependent upon the respective roads as well as on the measuring instruments. In most instances, this produces large mean variations in the correlation measurements.

The spectral density of unevenness height ϕ_h is a function of the angular frequency of path Ω ($= 2 \pi / \text{wave length}$). An approximate description of this value is rendered by the equation

$$\phi_h(\Omega) = \phi_h(\Omega_0) (\Omega / \Omega_0)^{-w}$$

where $\phi_h(\Omega_0)$ is the “unevenness measurement”, w the “waviness” $\Omega_0 = 1$ 1/m the reference angular frequency of path.

The theoretical studies into the driver comfort, driver safety, freight levels and traffic volumes revealed correlation between the two spectral characteristic values $\phi_h(\Omega_0)$ and w . This produced a single evaluation scale for general unevenness, the Spectral Evenness Index (SEI).

The SEI is defined as follows:

$$SEI = \sqrt{\phi_h(\Omega_0)} \quad \text{where } w \leq 2.5$$

$$SEI = 4 \sqrt{\phi_h(\Omega_0)} / 32 \quad \text{where } w \geq 2.5$$

with $\phi_h(\Omega_0)$ given in cm^3 .

Using an evenness classification proposal contained in ISO Draft Proposal No. 8608 (1984) produces the correlation shown in fig. 1 between the spectral characteristic values, the SEI and the evenness classification.

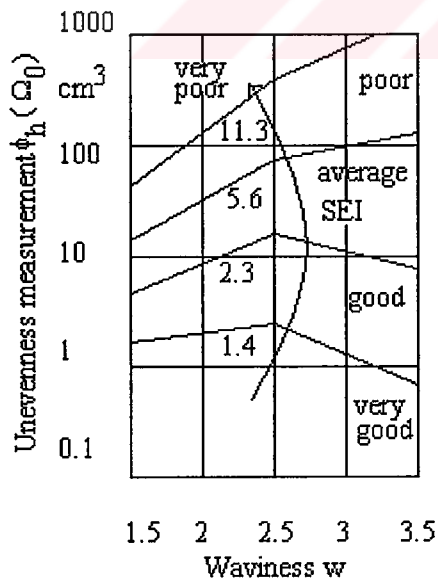


Fig.1 Correlation between spectral characteristics, SEI and classification proposal in accordance with ISO Draft Proposal No. 8608 (1984)

The introduction of the spectral density as the evenness recording value and the creation of SEI as the evenness evaluation value facilitate expert and meaningful characterisation of general longitudinal unevenness.

The result of this project form the executive basis for the procurement and employment of measuring systems for recording longitudinal evenness.



BÖLÜM 1 ARAŞTIRMANIN BAŞLANGICI, HEDEF BELİRLEMESİ VE YAPISI

Yol yüzeyinin boyuna profilindeki pürüzler, üzerinde seyreden taşıtta salınımlara neden olmaktadır.

Bu nedenle taşıt sahipleri ve taşıt üreticileri yolların mümkün oldukça düzgün olmasını talep etmektedirler. Ancak yol yapımcıları tarafından, maliyetin getirdiği sınırlamalar nedeniyle yol yüzeyi istenilen ölçüde düzgün üretilmemektedir. Yol yüzeyinde oluşacak olan belirli miktardaki pürüzlülüğe izin verilmek zorunda kalınmaktadır ve yalnızca izin verilemeyecek büyüklükteki pürüzlerden kaçınabilmektedir. Yol yüzeyindeki bu şekildeki hatalı yerlerin lokalize edilmesi şart koşulmaktadır. Bu nedenle eskiden beri yol yapımcıları tarafından kullanılan ölçüm yöntemleri yol yapımında, yapılmış bir yolun kabulünde ve yol üzerinde yapılacak olan onarım çalışmaları üzerine alınacak olan kararlarda, olan ve olması gereken (bunun anlam planlanan) yüzey arasındaki yola bağlı yükseklik farkının elde edilmesine yönelik olmuştur.

Önceleri yol yapımına ve basit ölçüm tekniğine yönelik sınır değerlerin altındaki pürüz akışı tamamen dikkate alınmamıştır. Bu şekilde yapılan incelemenin taşıt titreşimlerinin hesaplanıp irdelenmesi açısından yetersiz olduğu fark edildiği zaman yalnızca tekil değerlerin elde edilmesine değil, bütün pürüz akışının ölçülmesine ve ifade edilmesine çalışılmıştır. Bu ise tekil tanım değerleri yardımıyla olmuştur [1].

Taşıtların tarafında ise salınımların incelenmesi harmonik dalgalı yollar ve müstakil tekil engeller ile başlamıştır. 1950'nin başlarında pürüzlerin elektriksel gürültü olayına benzer şekilde istatistiksel metotlarla tarif edilebilecek olan, birbiri üzerine binmiş sonsuz sayıdaki sinüs formundaki salınımlar şeklinde yaklaşık olarak ifade edilebileceği gösterilmiştir [2].

Yol yüzeyinin düzgünlük durumu trafik güvenliği açısından ve bu nedenle yolları koruma çalışmaları konusunda önemli bir kriter olmaktadır.

Yol koruma sistematğinde, düzgünlük durumunun incelenmesi ve yol pürüzlülüğünün belirlenmesi konularında farklı esaslara dayanan sistemler kullanılmaktadır. Ölçümlerden elde edilecek sonuçların karşılaştırılabilir olması için pürüzleri ifade etmek ve değerlendirmek için kullanılacak olan yöntemlerin benzer esaslara dayanması gerekmektedir.

Yol düzgünlüğünün değerlendirmesi için yol koruma sistematğinin kullanılmasında - özellikle en ekonomik genel planlamanın yapılabilmesi için- verilen sınır şartların en iyi şekilde değerlendirilebilmesi için aşağıda belirtilen koşullar sağlanmak zorundadır [1]:

1. Yol koruma önlemlerinin öncelik sırasının oluşturulması için yol boyuna profilindeki pürüzlerin ölçüm sonuçlarının objektif ölçeklere göre değerlendirilebileceği temsili bir değerlendirme zemini oluşturulmak zorundadır.
2. Personel ve aletlerin zaman ve masraf açısından en uygun şekilde kullanılabilmesi için yolun düzgünlüğünün belirlenmesinde ilgili inceleme düzlemi üzerinde amaca uygun ölçüm ve değerlendirme tekniği kullanılmak zorundadır.
3. Pürüzlülük ölçümlerinde genel olarak kullanılacak durum göstergeleri verilmemişse, farklı göstergelerin birbirlerine çevrilebileceği ve elde olan ve daha sonradan elde edilecek olan pürüzlülük ölçüm değerlerinin aynı esaslara göre değerlendirilebileceği yöntemler bulunmak zorundadır.

BÖLÜM 2 ÖLÇÜM YOLLARININ SEÇİMİ VE TARİFİ

Yol pürüzlülüğünün elde edilmesi için yapılan ölçümler, uzun yollar ve karşılaştırma yolları üzerinde yapılan ölçümler olmak üzere olmak üzere iki bölümde ele alınmaktadır [1].

Uzun yollar üzerinde yapılacak olan yol pürüzlülüğü araştırmalarında kullanılmak üzere yapılacak olan yol planlaması için trafik, yol yapısı ve taşıt tekniğine uygun bakış açıları önemli olmaktadır.

Karşılaştırma ölçümlerinde ise birçok pürüzlülük ölçüm aleti ile yapılacak olan ölçümlerde eş değerli ölçüm sonuçlarının elde edilebilmesi için aynı yollar üzerinde, eş değerli şartlar altında ölçüm yapılması gerekmektedir.

2.1.Ölçüm yollarının seçimi için kriterler ve sınır şartları

2.1.1.Uzun yollar

Konuyla ilgili olarak Almanya’da yapılmış olan uzun yol ölçümlerinde aşağıdaki iki kriter esas teşkil etmiştir [1]:

- Ölçüm yapılan yolların toplam uzunluğu olarak 1000 km yaklaşılmaya çalışılarak Almanya için yol ve yüzey durumunun temsili olarak belirlenmesi,
- 1979 ve 1982’de Almanya’da ölçüm yapılan yolların dikkate alınması.

Yapılan bu ölçümlerde Alman yol yapısında mümkün oldukça çok sayıda özelliklerin -örneğin bölgelere özgü yapı teknikleri ve bölge şekillerine göre malzemeler veya bölge yapısının etkileri gibi- belirlenmesi için yapılan incelemelerde Almanya, doğu-batı yönünde Kassel’in kuzeyi ve güneyi sınır çizgisi olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır.

Toplam yolun eşit büyüklükteki üç bölüme ayrılması ile bu bölgelerde her biri yaklaşık 350 km olan kısmi yollar ortaya çıkmıştır.

Trafik tekniği açısından etki edilecek faktörler aşağıdaki özelliklere göre dikkate alınmaktadır:

- Sınıflandırılmış yol ağındaki otoban, milli, bölgesel ve çevresel yolların boyları,
- Bütün ağır taşıtların ilgili yol sınıfı üzerine uyguladıkları seyir güçleri

ve özellikle

- Aks yükü 5t'den büyük olan otobüs veya kamyonların seyir güçleri.

Tablo 2.1 Almanya'nın sınıflandırılmış yol ağındaki her bir yol sınıfının boyu, üzerine uygulanan yıllık seyir güçleri ve bunlardan çıkarılan tanım değerleri

	Otoban	Milli Yol	Bölgesel yol	Çevresel yol	
1	7.538	32.557	65.537	56.658	Sınıflandırılmış ağı km uzunluğu (1981)
2	4.37	18.89	38.07	36.67	Sınıflandırılmış ağı uzunluğunun %'si
3	30.300	83.700	64.400	34.300	Bütün kamyonların 10e6 km seyir performansları
4	30.57	31.86	24.51	13.03	Bütün kamyonların seyir performanslarının %'si
5	10.65	2.57	0.98	0.51	Bütün kamyonların 10e6 km/km seyir performansları/uzunluk
6	72.4	17.5	6.6	3.5	Bütün kamyonların seyir performanslarının %'si/boy
7	6.700	4.300	2.620	1.290	Aks yükü $\geq 5t$ 'da 10e6 km seyir performansları
8	43.5	31.1	17.0	12.0	Aks yükü $\geq 5t$ 'da seyir performanslarının %'si
9	0.338	0.147	0.035	0.019	Aks yükü $\geq 5t$ 'da 10e6 km/km seyir performansları/uzunluk
10	81.1	13.5	3.5	1.8	Aks yükü $\geq 5t$ 'da seyir performanslarının %'si/uzunluk
11	750	130	120		km ölçüm yolu uzunluğu

Yol şekillerinin yol sınıflarına göre bu şekilde yapılmış olan sınıflandırması, yolların kaplama cinsine göre de ayrılması ile genişletilmiştir. Kaplama şekilleri olarak, diğer kaplama şekillerinin yerleşim yerleri dışındaki oranı önemsenmeyecek büyüklükte olduğu için yalnızca bitümlü, beton ve kaldırım taşı kaplamaları dikkate alınmıştır. Tablo 2.2 yol sınıflarına göre yol kaplamalarına ait yol boyları üzerine genel bir bakış teşkil etmektedir. Tablo 2.3 burada dikkate alınan kaplama şekilleri ve yol sınıflarına göre bir bölgenin ayrılmasını göstermektedir.

Yapılan bu çalışmada yukarıda belirtilen noktalar yanında özellikle aşağıda verilen sınır şartlara dikkat edilmiştir:

- Seçilmiş kısımların iptal olması durumunda (örneğin yapı nedenleri), onların yerini alabilecek rezerve yolların planlanması,
- Yerleşim bölgelerinden yapılacak olan geçişlerden kaçınılması (oluşan trafik yapısının yol zorlaması üzerine etkilerinin anlaşılmasının zorluğu nedeniyle),
- İstatistiksel değerlendirme metotlarının kullanılabilmesi için, her kısmi yolun pürüz yapısının belirlenmesi (alt bölüm 3.1.3 ve 3.3.2 ile karşılaştırınız),
- (Masrafların yükselmemesi için ve hava şartlarında meydana gelebilecek olan değişikliklerden kaçınılabilmesi için) mümkün olabildiğince yüksek bir ortalama ölçüm hızına ulaşılabilmesi için sınırlandırılmış bir ölçüm süresinin korunması.

Tablo 2.2 Kaplama şekillerine göre Alman yol ağının ayrılması

Otoban	Milli yol	Bölgesel yol	Çevresel yol	Yol sınıfı
				Kaplama şekli
5500	31706	62584	62966	Bitümlü kaplama
2038	181	201	430	Beton kaplama
0	343	700	479	Kaldırım taşı kaplaması
0	328	2161	2784	Diğerleri
7538	32557	65637	66658	$\Sigma = 172390$ km

Tablo 2.3 Kaplama şekillerine ve yol sınıflarına göre ölçüm yolunun ayrılması (örnek olarak toplam yolun 1/3'ü için)

Otoban		Milli yol		Bölgesel, çevresel yol		Yol sınıfı
						Kaplama şekli
180		59		38		Bitümlü kaplama
72	73	98.3	97.4	95.0	94.9	
70		1		1		Beton kaplama
28	27	1.7	0.6	2.5	0.5	
0		0		1		Kaldırım taşı kaplaması
0	0	0	1.0	2.5	1.0	
250 km		60 km		40 km		$\Sigma = 350$ km

180	----- km olarak ölçüm yolu
72 73	----- Otobanlar üzerinde bitümlü kaplamaların % olarak oranı
1	Otoban uzunluğuna ölçüm yolu uzunluğunun oranı

2.1.2 .Karşılaştırma yolları

Pürüzlülük ölçüm aletlerinin karşılaştırılabilmesi için yapılacak olan yol seçiminde, ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilir olması için aşağıdaki kriterlere göre bütün sistemler için aynı şartların sağlanması gerekmektedir [1]:

- Yol ve yol durumu,
- Hava şartları,
- Boyuna profildeki pürüzlülüğün belirlenmesinde ölçüm izinin konumu ve enine profildeki pürüzlülüğün belirlenmesinde ölçüm kesitinin konumu.

Bu şartlar, organizasyonla ilgili nedenlerden dolayı yol seçiminin sınırlı bir bölge içinde yapılmasını ve ölçümlerin sınırlı bir süre içinde yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Ölçüm aletlerinin karşılaştırılabilmeleri için bu aletlerin kullanım sınırlarının ve performanslarının kontrol edilmesi ile ilgili olan şartlar dikkate alınmalıdır. Bunlar başlıca aşağıdaki kriterler olmaktadır:

1. Düzgünlük durumunun kapsamlı bir spektrumunun belirlenmesi

Aletlerin her birinin özelliklerinin araştırılabilmesi için yol yapısı, yüzey kaplamasının cinsi, yol yüzeyinin korunma ve aşınma durumu yanında kabalık ve yansıtma kabiliyetinin incelenmesi zorunlu olmaktadır.

2. Boyuna profildeki pürüzlerin kısa ve uzun dalgalı kısımlarının çok olarak bulunduğu yolların tercih edilmesi

Dalga boyu, $L = v / f$ denklemi üzerinden v seyir hızına ve f etki frekansına bağlı olmaktadır. Yolların üzerinde bulunan dalga boyu spektrumlarının sınır durumlarının dikkate alınması gerekmektedir. Bilindiği kadarıyla taşıttaki pürüz etkili salınım hareketlerinde taşıt davranışı için $0,3 \text{ m} \leq L \leq 100 \text{ m}$ 'lik dalga boyu bölgesi önemli olmaktadır (alt bölüm 3.1.2 ile karşılaştırınız). Pürüz etkili taşıt salınımları için 180 km/h 'ya kadar seyir hızlarında 0.5 Hz 'in üzerindeki frekanslar ve tekerlek temas yüzeyi boyundan büyük dalga boyları önemli olarak görülmektedir.

3. Enine profilin karakteristik pürüz formlarının dikkate alınması

Genelde bitümlü asfalt kaplamalar üzerinde plastik deformasyon olarak oluşan iz doğrultusundaki oluklar ve beton kaplamalar üzerinde örnek olarak tabaka kırılmaları sonucu oluşan iz köşeleri, yol enine profilindeki ana hasarları oluşturmaktadırlar ve bu nedenle karşılaştırma ölçümlerinde dikkate alınmak zorundadırlar. Yapılan bu çalışmada yalnızca boyuna profildeki pürüzlülük incelendiği için bu madde konumuz dışında kalmaktadır.

4. Hasarların lokalize edilmesi

Uzun ölçüm yolları üzerinde güvenli onarım çalışmalarının yapılabilmesi için diğer yol kısımlarıyla karşılaştırılınca göze çarpan yerlerin, pürüzlülük ifadesinde kullanılan durum değerleri yardımıyla lokalize edilmesi gerekmektedir.

5. Tekrarlanılabilirlik

Uzun süreli incelemelerde kullanılmak üzere doğru başlangıç değerlerinin elde edilebilmesi için benzer dış şartlar altında aynı yol üzerinde bir ölçüm aletinin birbirini takip eden ölçümleri karşılaştırılabilir sonuçlar vermek zorundadır.

6. Trafik engellerinden kaçınma

Bütün ölçüm aletleriyle aynı şartlar altında, aynı yollar üzerinde ölçüm yapılması gerektiği için karşılaştırma ölçümleri sırasında, ölçüm yapılan yol üzerindeki trafik akışı engellere yol açabilmektedir. Ölçüm yapan grubun tehlikeye girmemesi için ölçümler trafik güvenlik önlemleri altında veya trafiğe kapalı yollarda yapılmalıdır.

7. Değerlendirme

Ölçüm sonuçları uygun masraf ve sürede elde edilebilmek zorundadır. Ölçüm sonuçları bakım ve onarım çalışmaları üzerine alınacak olan kararlarda kullanılabilir olmak zorundadır.

2.2. Ölçüm yollarının tarifi ve dokümantasyon

2.2.1. Uzun yollar

Yol akışı

Konuyla ilgili olarak Almanya’da yapılan ölçümler sırasında uygulanan prosedürler incelenmiştir.

Ön araştırmalar sırasında belirlenen ölçüm bölümleri tablo formunda bir araya getirilmiştir. Bölümler, ölçüm yolu planının sırasına göre düzenlenmiştir. İfadeler, sınıflandırılmış Alman yol ağındaki numaralandırmayı, “A kasabasından B kasabasına” şeklinde olmak üzere ölçüm yönünün işaretlenmesini, ölçüm bölümünün kilometrelere ayrılmış şekildeki ifadesini, IfF numarasını ve değerlendirme tekniğine göre verilen seri numarasını içermektedir [1].

Seçilen ölçüm bölümleri, Tablo 2.4'te gösterildiği gibi bütün yolun alt bölüm 2.1.1'deki kriterlere göre ayrılmasını göstermektedir. Burada yapılan ön araştırma sonunda elde edilen değerler, önceden hedeflenen bölünmeye göre olması gereken değerlerle karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2.4 Almanya'da yapılmış olan uzun yol ölçümlerinde, yolların ayrılması sonucunda belirlenen (olan) değerler ve hedeflenen (olması gereken) değerler arasındaki karşılaştırma

	Otoban		Milli yol			Bölgesel ve çevresel yollar			Σ	km olarak bütün ifadeler	
	Beton	Bitümlü	Beton	Kaldırım taşı	Bitümlü	Beton	Kaldırım taşı	Bitümlü			
Olması Gereken Değer	70.0	180.0	1.0	0.0	59.0	1.0	1.0	38.0	350.0		Bölüm başına
	250.0		60.0			40.0				Σ	
	210.0	540.0	3.0	0.0	177.0	3.0	3.0	114.0	1050.0		Toplam
	750.0		180.0			120.0				Σ	
Olan Değer	133.0	131.6	1.0	0.0	72.3	11.3	5.6	32.8	329.9		Kuzey
	264.8		73.3			54.3				Σ	
	70.0	243.5	4.3	0.0	54.7	0.0	0.0	48.2	420.7		Orta
	313.5		59.0			48.2				Σ	
	82.0	161.3	1.0	0.0	55.7	0.0	0.0	49.4	359.4		Güney
	243.0		56.7			49.4				Σ	
	295.0	536.6	5.3	0.0	192.7	11.0	5.5	135.9	1173.0		Σ
	821.6		199.0			152.4				Σ	

Dokümantasyon

Sonradan yapılacak olan herhangi bir değerlendirmede kullanılmak üzere önemli yol verilerinin dokümantasyonu bir anket şeklinde yapılmaktadır. Ankette yer alan sorular, aşağıda belirtilen maddelerle ilgili olmaktadır [1]:

- Genel işaretler (örneğin identifikasyon numarası, ölçüm tarihi),
- Ölçüm yerinin konumu (örneğin yol sınıfı, yol numaralandırması, ölçüm yeri ile ilgili ifadeler),
- Ölçüm şartları (örneğin hava şartları, ölçüm izinin konumu),
- Subjektif değerlendirme (örneğin yol yüzeyi için ölçülmemiş olan bütün ifadeler, yapılan ön çalışmalar sonrasında insana ait değerlendirme kabiliyetine uygun olduğu görüldüğü için değer 1'den (çok iyi)...değer 6 (çok kötü)'ye kadar ifade edilmesi uygun görülen düzgünlüğün subjektif olarak değerlendirilmesi)
- Trafik (örneğin trafik yapısı, trafik işaretleri) ve
- Yapı şekli (örneğin kaplama şekli, köprüler).

Bu anketle yol verilerinin karşılaştırılması yanında ölçüm sonuçları üzerine anlık etkilerin de (örneğin hava şartları gibi) anlaşılması sağlanmaktadır. Tekil engellerin pürüz akışının istatistiksel metotlarla ifade edilebilen düzgün düzensizliğini engellediği ve böylece söz konusu kısmi yol ilgili herhangi bir değerlendirmeye katılamadığı halde, ankette sorulmuş olan sorular yardımıyla ilgili kısmi ölçüm yollarının yüzey yapısının subjektif kontrolünün yapılabilmesi sağlanmaktadır (alt bölüm 3.1.3 ve 3.3.2 ile karşılaştırınız).

Ölçüm yapılan yolların göz önünde canlandırılabilmesi için her ölçüm bölümü için yolun ve yüzey yapısının ışıklı resimleri de dokümantasyonda bulunmaktadır.

Çekilen ışık resimlerinin karşılaştırılabilir olması için bütün ışık resimleri aynı kamera objektifi (fokus uzaklığı 50 mm) ile ve yol üzerinde bulunan belirli bir konumdan çekilmek zorundadır. Uzak çekimlerde ve yol üzerinde yapılan çekimlerde objektif merkezinden yol kenarına kadar olan mesafe yaklaşık 0.5 m, resim düzleminden yol yüzeyine kadar olan mesafe yaklaşık 1.4 m olmaktadır. Uzak çekimlerde ufuk çizgisi genel olarak resim kesitinin aşağıdan itibaren %75'inde, karşılaştırma ölçeği kamera konumundan yaklaşık 4 m uzaklıkta bulunmaktadır. Bölüm 68'in çekimlerini gösteren resim 2.1 örnek olarak verilmektedir.

2.2.2. Karşılaştırma yolları

Konuyla ilgili olarak Almanya'da yapılmış olan ölçümler incelenmiştir.

Karşılaştırma yollarının seçiminde alt bölüm 2.1.2'de belirtilen şartların önemli bir kısmı Wolfsburg'un yaklaşık 15 km kuzeyinde, Ehra-Lessien'de bulunan Volkswagen AG-Wolfsburg'un test arazisinde sağlanmıştır [1].

Burada birçok yapı, doku, renk ve pürüz tipleri için örnekler bir arada bulunmaktadır. Karşılaştırma ölçümleri için farklı özellikler içeren bir çok bölüme sahip, toplam uzunluğu yaklaşık olarak 28 km olan 6 ölçüm yolu seçilmiştir.

Yol numaralandırması 501 sayısı ile başlamaktadır ve yol durumunun karakteristik özelliklerinin her değişmesinde yol numarası artmaktadır.

Değerlendirmede ilgili bütün yollar, kolaylık amacıyla yalnız bir yol numarası ile verilmektedir; örneğin IfF numarası 501 olan yola 501'den 510'a kadar olan kısmi bölümler, IfF numarası 511'e 511'den 517'ye kadar olan kısmi bölümler dahil olmaktadır.



Şekil 2.1 Ölçüm yollarının örnek ıfık resimleri

- a) Yol akıfı
- b) Yüzey yapısı

BÖLÜM 3 YOLUN BOYUNA PROFİLİNİN PÜRÜZLÜLÜĞÜ

3.1. Bilginin seviyesi

Yol boyuna profilindeki pürüzlülüğün ölçülmesi, ifade edilmesi ve değerlendirilmesi konuları çerçevesinde yapılan çalışmalar sonrasında önemli yayımlar ortaya çıkmıştır. Bu yayımlarda boyuna profildeki pürüzlülüğün rutin araştırmaya uygun olan ve objektif kriterlere bağlı olan durum büyüklüklerini bulmak amacıyla ölçüm büyüklükleri ve önemli pürüzlülük ölçüm yöntemleri ve buradan elde edilen durum göstergeleri açıklanmıştır [1].

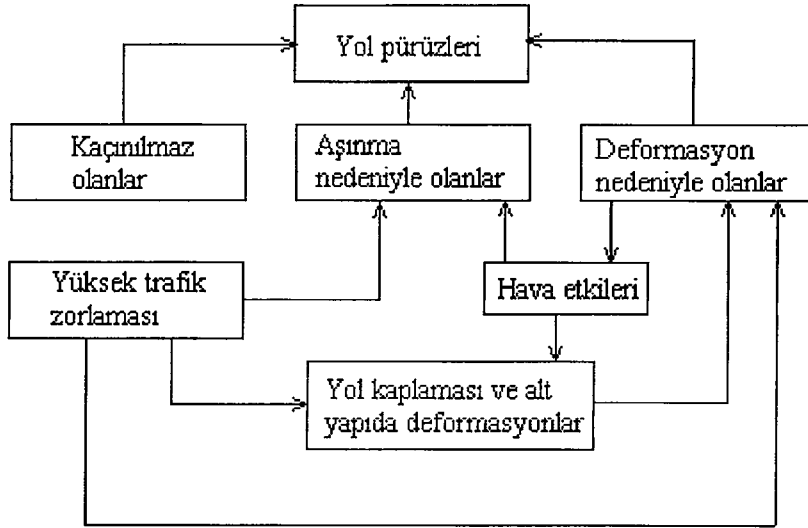
3.1.1. Boyuna profildeki pürüzlülük üzerine literatür genel bakışı

Pürüzlülüklerin ölçülmesi ve ifadesi için yöntemlerin geniş çaplı olarak incelenmesi 1969'a kadar Braun ve Schwaderer, 1973'e kadar olan ile Balmer, 1981'e kadar Wambold ve Augustin tarafından yapılmıştır [1].

İlgili bu çalışmalar esas alınarak ölçüm sistemleri, Huschek tarafından "Handbuch des Strassenbaus" -yol yapısı el kitabı- ve "Kriterienkatalog zur Beurteilung von Ebenheitsmessverfahren" -düzgünlük ölçüm yöntemlerinin değerlendirilmesi için kriter kataloğu- yayımlarında anlatılmıştır.

3.1.2. Boyuna profildeki pürüzlerin nedeni ve etkisi

Yol pürüzlerinin oluşması yolların yapısına ve yol kaplamasının ve alt yapının farklı deformasyon davranışlarına bağlı olmaktadır.



Şekil 3.1 Yol boyuna profilindeki pürüzlerin sebepleri

Şekil 3.1'e göre pürüzler, sebepleri çoğunlukla belirli bir şekilde birbirinden ayrılamayan üç şekilde ortaya çıkarlar [1]:

Kaçınılmaz pürüzler -bunlara örnek olarak imal tekniği ile fiziksel olarak ulaşılabilecek en ideal düzgün yol yüzeyinden olan sapmalar yanında yolların üzerinden geçmelerine izin verilen raylardaki ve köprülerdeki geçiş yerleri gösterilebilir- yol yapı tekniği bakımından zarar teşkil etmemektedirler. Ancak bunlar seyir halindeki bir taşıt için hissedilebilir bir pürüz teşkil etmekte, üzerinden geçen taşıtta salınım hareketlerine neden olmakta ve böylece, örneğin deformasyonun neden olduğu zararlara neden olmaktadır (üçüncü sebep).

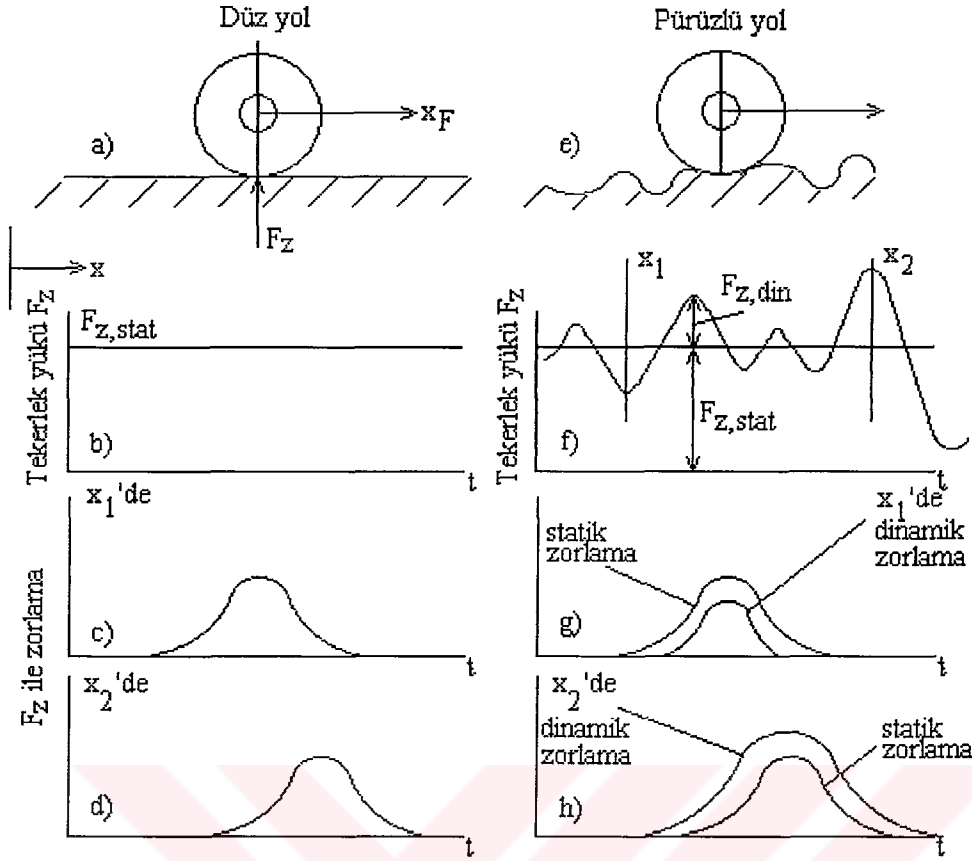
Taşıt lastiğinin yola teması sonucu, temas eden çiftin durumuna göre büyük sayıda mekanik etkiler oluşacağından yol yüzeyinde aşınmalar meydana gelmektedir. Aşınma, çivili lastiklerin yasaklanmasından sonra büyük bir önem taşımamaktadır (ikinci sebep).

Yol hasarlarının büyük bir kısmı yolun deformasyonu nedeniyle oluşmaktadır. Yol zorlanması bilindiği kadarıyla lineer olarak değil, tekerlek yükünün yaklaşık olarak 4. kuvvetiyle arttığı için bu tip hasarlara bir kamyon veya ağır taşıt trafiği nedeniyle ortaya çıkacak olan zorlamalar neden olmaktadır. Statik tekerlek yükü yanında, taşıtların pürüz etkili salınım hareketleri sonucu oluşan dinamik tekerlek yükleri (tekerlek yükü

değişimleri) büyük ölçüde önemli olmaktadır. Taşıtların seyir emniyeti, büyük ölçüde dinamik tekerlek yüküne bağlı olmaktadır. Dinamik yük genlikleri arttıkça tekerlek ile yolun teması zayıflamakta ve dolayısıyla tekerleklerin fren, tahrik ve yanal kuvvetleri taşıma yeteneği azalmaktadır.

Araştırmalar, dinamik yük genliklerinin statik yüke oranının %50'yi geçmesi halinde seyir emniyetinin tehlikeye girdiğini, üzerlerinde bu orana erişilen yollarda onarım yapılması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır [5]. Dinamik yük genliklerinin statik yük mertebelerine çıkması ise zemin ile tekerlek temasının yok olması, yani tekerleğin sıçraması anlamına gelmektedir.

Şekil 3.2 şematik bir anlatımla düzgün ve pürüzlü yollar üzerindeki seyir sırasındaki yol zorlanması ve statik ve dinamik tekerlek yükü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yol, etkisi tekerlek yükünün büyüklüğü ve ortaya çıkmasının sıklığı ile artan değişken zorlamalar ortaya çıkarmaktadır. Böylece -basitleştirilmiş olarak- yüksek statik tekerlek yükleri, yolun enine profilindeki pürüzlerin –örneğin iz doğrultusundaki olukların- oluşmasına neden olmaktadır ve dinamik tekerlek yükleri, yolun boyuna profilindeki pürüzlerin oluşmasına -örneğin üst yapıdaki seyir yönünün enine doğru ilerleyen dalga şeklindeki deformasyonlara- neden olmaktadır [1]. Yolun pürüzlülüğünün artması, üzerinde su birikmesine yol açarak yıpranmayı hızlandırmakta ve ayrıca üzerinde seyreden taşıtların tekerleklerinin yuvarlanma sırasında çıkardıkları gürültüyü arttırarak gürültü emisyonunu yükseltmektedirler. Tekerleklerin yuvarlanma dirençleri yolun yapısına da bağlı olduğundan, düzgün olmayan yollar üzerinde yuvarlanma direnci katsayısı artmakta, bu ise yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Pürüzlü yolun neden olduğu taşıt titreşimlerinin artması, taşıt parçalarının da ömrünü kısaltmaktadır. Bu titreşim etkisi ile düşey yöndeki taşıt gövdesi ivmeleri de artacağından yolcu konforu, bunun yanında yükün taşınma şartları kötüleşmektedir [5].



Şekil 3.2 Düzgün olan (a'dan d'ye) ve pürüzlü olan (e'den h'ye) yol üzerindeki seyir sırasında tekerlek yükleri ve yol zorlanmaları

Bunun dışında frenleme, ivmelenme ve viraj dönme sırasında taşıt tarafından oluşturulan yatay kuvvetler de hasarlara neden olmaktadır. Bu hasarlar viraj dönme sırasında yatay ve dikey yüklerin birlikte etkimeleri sonucu iz doğrultusundaki olukların oluşması (özellikle tekerleklerdeki yük kayması sonucu daha yüksek derecede zorlanan virajın dış tarafındaki izde) şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Frenleme sırasında ise bu hasarlar, frenlemede yol üzerine nakledilen itme kuvvetlerinin taşıttaki salınım etkisi ile -özellikle bazı kamyon arka aks konstrüksiyonlarında oluşan fren sıçraması sonucu- ve buna bağlı olarak tekerlek yükü değişimleri nedeniyle oluşan dikey kuvvetlerin birlikte etkimesiyle meydana gelen seyir yönünün enine doğrultusunda ilerleyen pürüz dalgaları şeklinde görülmektedir [1].

Aşınma ve büyük ölçüde plastik deformasyonlar, viskoelastik bağlantı maddesi bitümen nedeniyle çoğunlukla bitümlü yol kaplamalarında ortaya çıkmaktadır. Buna karşın,

bağlantı maddesi çimento olan beton kaplamalarda çoğunlukla hasarlar, hava şartları etkisiyle daha kuvvetli şekilde oluşan yükseltiler, düşüklükler veya tabaka kırılmaları şeklinde görülmektedir.

Tarif edilen yol pürüzleri, düzgünlüğün değerlendirilmesi sırasında daima merkezde bulunması gereken seyir halindeki taşıtta çok sayıda etkilere, her şeyden önce

- salınım uyarısına,
- seyir rotasının etkilenmesine,
- artan yuvarlanma direnci sonucu yakıt tüketiminin artmasına ve
- ses ve sarsıntı emisyonunun artmasına

neden olmaktadır [1,5].

Salınım uyarısı dışındaki diğer bütün etkiler, taşıtın yalnızca salınım uyarısı yoluyla yol üzerine doğrudan tepkisi bağlantılı olduğu için fazla önem taşımamaktadır (ancak hiçbir şekilde de ihmal edilememektedir).

Pürüzlerin genel ifadesinde bir referans düzlemine, bir izdeki pürüzlerin ifadesinde ise bir referans çizgisine gerek duymaktadır. Salınımların incelenmesi için bu çizgi yatay veya düz olmak zorunda değildir, ancak salınım tekniği için önemli olan en uzun pürüz dalga boyundan daha uzun olmak zorundadır. Bu şekilde referans çizgisine göre sapmalar pürüzlülüğü ifade etmektedirler. Pürüz akışının tam olarak ifadesi pürüz yüksekliğinin değer çiftleri ve ilgili ölçüm yeri ile mümkün olmaktadır. Ancak bu şekildeki bir ifade yeterince açık olmamaktadır. Bu nedenle veri azaltma yöntemi kullanılmaktadır.

Bu düşünce altında günümüzde oluşturulan yol yüzey modeli, pürüzlerin üç kısım,

- düzgün olmayan kısım,

- periyodik pürüz ve

- göze çarpan tekil engeller

ile ifade edilmesinden yola çıkmaktadır [2].

$h(x)$ pürüz fonksiyonunun düzgün olmayan kısmında x yoluna bağlı $h_L(x)$ genlikli bütün L dalga boyları aynı anda bulunmaktadır. Bu değişken genliklerden ΔL dalga boyu bölgeleri için $\phi_h(L) = \frac{1}{\Delta L} \sigma_h^2(L)$ denklemiyle ifade edilen spektral yoğunluk, bütün ölçüm yolunun düzgün olmayan pürüzlerin ortalama değeri olarak $\sigma_h(L)$ pürüz yüksekliğinin karesel kısmı efektif değeri şeklinde elde edilmektedir.

Bu basitleştirilmiş ifade, spektral yoğunluğun önemli özellikleri ve kullanımı için şu noktalara işaret etmektedir [2]:

- Spektral yoğunluk, x yol boyu üzerinde alınan bir ortalama değerdir; bu şekilde yalnızca aynı oranda düzensiz (stasyonier) olan yüzey şartlarında geçerli olmaktadır [7]. Ender rastlanan durumlar için -örneğin kanal kapakları- özel ifade yöntemleri kullanılmak zorundadır.

- Ortalama değerin anlamlı olması için x ölçüm yolunun değerlendirilecek en uzun L dalga boyundan daha uzun olması gerekmektedir.

- Spektral yoğunluk kullanılan aralığa (burada ΔL) bağlı bir büyüklük olmaktadır.

Diğer önemli özellikler:

- Spektral yoğunluk, her bir $\hat{h}$ genliği arasındaki faz açısı ifadesini içermemektedir. Bu nedenle spektral yoğunluktan başlangıçtaki pürüz akışı tekrar elde edilememektedir. Bunun dışında sonsuz sayıda pürüz akışı aynı spektral yoğunluk değerine götürebilmektedir.

- Spektral yoğunluk ile düzgünlük durumunu ifade eden diğer bütün -tekil- göstergeler veri azaltma yöntemi ile elde edilmektedir. Bu ifadenin tersi mümkün olmamaktadır.

Ve spektral yoğunluğun taşıt tekniği açısından en önemli özelliği:

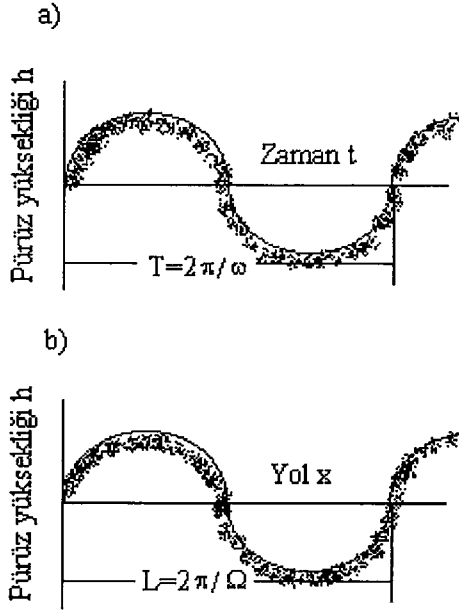
- Spektral yoğunluk, yol pürüzlerinden taşıt salınım büyüklüklerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

Pürüz etkili salınım hareketleri, -örneğin yayların ve sönüm elemanlarının durumları gibi- taşıt parametreleri yanında önemli ölçüde pürüzlerin $\hat{h}$ genliğine, pürüzlerin L dalga boyuna ve v taşıt hızına bağlı olmaktadır.

Yol pürüzleri, ideal halde engellerin harmonik sırası (dalga yolu) olarak düşünülürse, L dalga boyu ve Ω yola bağlı açısal frekansın fonksiyonu olarak

$$L = 2 \pi / \Omega \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 3.3'te yola bağlı bu fonksiyon ve benzer şekildeki, $T = 2\pi / w$ salınım süresine sahip olan zamana bağlı fonksiyon gösterilmektedir. Pürüzlerin harmonik değil de düzensiz olmasının bu basit inceleme şekline bir etkisi olmamaktadır.



Şekil 3.3 Sinüs eğrisi şeklindeki pürüzlülük fonksiyonu

a) Zamana bağlı

b) Yola bağlı

v seyir hızı ile yola ve zamana bağlı pürüz fonksiyonları arasında bağıntı oluşmaktadır. Sabit v için x yolu ve t zamanı arasında

$$x = v t \quad (3.2)$$

denklemini oluşmaktadır. Bunun yanında

$$\Omega x = \omega t \quad (3.3)$$

olduğu için

$$\omega = v \Omega = 2 \pi v / L \quad (3.4)$$

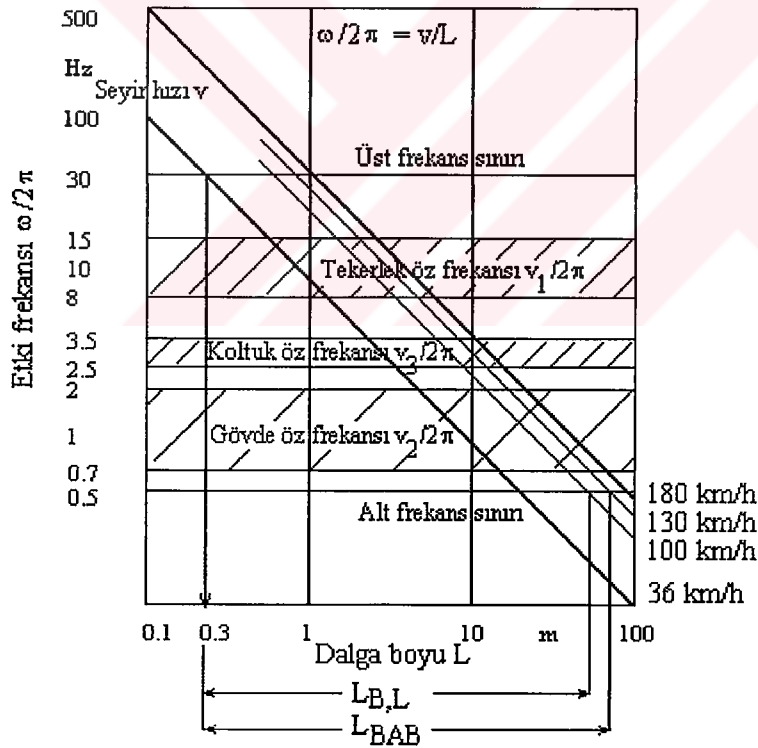
bağıntısı ortaya çıkmaktadır. Bunun anlamı, sabit bir L dalga boyu için, salınım hareketlerine neden olan ω zamana bağlı açısal frekans artan v seyir hızıyla artmaktadır. Salınım uyarılarının ifadesi için, v seyir hızının L dalga boyuna oranı olarak ifade edilen ω zamana bağlı açısal frekans kullanılmaktadır.

Ancak deneyimlere göre her etki frekansı taşıt salınımları için aynı ölçüde önemli olmamaktadır. İlgili etki frekansındaki rezonans yerleri olarak etkilerin hissedilebilir olarak artmasına neden olan, içinde taşıt salınım etkileri için önemli olan bütün taşıt öz frekanslarının bulunduğu küçük bir rezonans bölgesi anlam taşımaktadır. Şekil 3.4 ω , v ve L arasındaki bağıntıyı taşıt yapısı, koltuk ve tekerlek öz frekansı bölgelerinin belirtildiği çift logaritmik diyagramda göstermektedir. Bu öz frekans bölgeleri 0.7 ve 15 Hz arasında bulunmaktadır. Taşıt titreşimleri açısından önemli olan frekans bölgesinin dikkate alınmasıyla, alt frekans sınırı olarak 0.5 Hz, üst frekans sınırı olarak 30 Hz ve seyir hızı olarak da 36...180 km/h ($\hat{=}$ 10...50 m/s) seçilirse, denklem (3.4)'e göre $L = 10 / 30...50 / 0.5 = 0.3...100$ m'lik dalga boyu, salınım incelemeleri için önemli olmaktadır [1,4,5].

Almanya'da konuyla ilgili olarak ölçümler yapılmaya başlandığı zamanki milli otobanlar (BAB) üzerinde geçerli olan 130 km/h'lik v_{BAB} yönetmelik hızı için 72 m'ye kadar L_{BAB} dalga boyu bölgesi, milli ve bölgesel yollar üzerinde max izin verilen $v_{B,L} = 100$ km/h seyir hızı için 55 m'ye kadar olan $L_{B,L}$ dalga boyu bölgesi önemli olmaktadır [1]. Düşük hızda seyir durumunda -örneğin 10 m/s $\hat{=}$ 36 km/h- dalga boyu için alt sınır, $L = 0.3$ m ile tekerlek temas alanı uzunluğu bölgesinde bulunmaktadır.

Pürüz etkileri, taşıt tekniğinde normal olarak z''_2 dikey yöndeki taşıt gövdesi ivmesi ve $F_{z,dyn}$ dinamik tekerlek yükü ile değerlendirilmektedir.

Taşıt gövdesi ivmesi, $\omega / 2\pi = 1 \dots 8$ Hz etki frekansı bölgesinde, insan bedeninin birçok bölümünün bu bölgede bulunan öz frekansı nedeniyle ivmelenmeye karşı insanın özel bir hassasiyet göstermesine neden olduğu için taşıt sürücüsünün durum güvenliği ve yolcuların seyir konforu için önemli olmaktadır. Bunun yanında kısa süreli olarak veya sık tekrar eden yüksek ivmelenme, yük malzemesinin zarar görmesi veya yük malzemesinin kendi hareketleri sonucu seyir davranışını ve böylece seyir güvenliğini etkilemesi açısından önem taşımaktadır. Özellikle 8'den 15 Hz'e kadar olan etki frekansı bölgesindeki dinamik tekerlek yükleri, taşıt parçalarının zorlanması, yol zorlanması ve özellikle seyir güvenliği için önemli olmaktadır. Seyir güvenliğinin azalması, düz seyir ve özellikle viraj seyri sırasında taşıt güvenliğinin önemli bir şekilde azalmasına neden olan tekerlek yükü azalması (lastik ve yol arasındaki kuvvet naklinin azalması) ile açıklanmaktadır.



Şekil 3.4 Pürüzlerin etki frekansları ve dalga boyları için öz frekanslara ve seyir hızlarına göre ortaya çıkan bölgeler

3.1.3.Boyuna profildeki pürüzlülüğün ölçüm ve ifade yöntemleri

Yolun boyuna profilindeki pürüzlülük ölçümleri için tercihen üç ölçüm yöntemi kullanılmaktadır [1]:

- Yükseklik profilinin tespiti,
- Yükseklik profilinden elde edilen büyüklüklerin ölçülmesi (eğim, kavis),
- Salınım yapabilen bir sistemin pürüzlerin üzerinden geçerken reaksiyonunun kaydedilmesi.

Bu ölçüm yöntemleriyle bağlantılı olarak pürüz akışının ifade büyüklüklerinin ve yol düzgünlüğünün durum büyüklüklerinin elde edildiği birçok yöntem bulunmaktadır. Tablo 3.1 bu yöntemleri bir arada göstermektedir. Tablo, ölçüm büyüklüğünü, ölçüm yöntemini ve buradan elde edilecek düzgünlüğün durum büyüklüklerini göstermektedir. Alet örnekleri ve kullanım alanları da tabloda belirtilmektedir.

İlerideki açıklamalar, bu tabloda belirtilen ve günümüzde kullanılan yöntemlerle ilgili olmaktadır. Her bir alet sistemi için ayrıntılı açıklamalar bölüm 3.2'deki ölçüm aletlerinin tariflerinde bulunmaktadır.

Yükseklik profilinin elde edilmesi

Yolların pürüzlülüğünün belirlenmesi için kullanılacak olan sistemlerin en basit şekli basit, stasyonere veya elle işletilen aletler olmaktadır. Ölçüm sırasında, sonlu uzunluktaki anlık ve tesadüfi referans çizgisine göre yol yüzeyinin yükseklik sapmalarının sürekli bir profili veya referans çizgisine göre olan sapmalar, elle veya düşey doğrultuda sürmeli kamalar yardımıyla elde edilmektedir (alet örneği: Planograf, 4 m seyyar cetvel).

Mekanik olarak benzer, ama “gerçek” yüzey profilinin tam olarak belirlenmesi için öngörülen aletlerde uzaydaki tesadüfi referans tabanının konumu, bütün ölçüm yolu için sürekli bir referans seviyesi oluşacak şekilde seviyeleme işlemi ile belirlenmektedir. Normalde pürüz profili, hesaplama sonucu ölçüm bölümlerinin yüksekliklerine göre yan yana getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Pürüz profili, -aşağıda daha yakından anlatılan- pürüz spektrumlarının veya diğer göstergelerin hesaplanmasında da kullanılmaktadır (alet örneği: Köhler-Fuess aletleri, Braunschweig’in planografi).

“Gerçek” yüzey profili, genel olarak bir kaplama katının yüzeyinin boyuna kesiti olarak tanımlanmaktadır.

Bu şekilde “gerçek” yüzey profili, profil içine boyuna kesit olarak yerleştirilen sonlu uzunluktaki bir doğruya göre profilin bütün sapmalarının incelendiği, boyuna profildeki yol pürüzlülüğü için gösterim şeklini ifade etmektedir. Bu doğru, taşıtların pürüz etkili salınım davranışı için önemli bütün dalga boylarının genliklerinin ölçümler sonucu elde edilebileceği uzunlukta ölçüm bölümü üzerinde uzanmaktadır.

Yol profilinin nispeten daha kolay ölçülebilen türevinin (eğiminin) belirlenmesi prensbine dayalı yöntemler (profil eğim ölçerler) yardımıyla açılarının ortalama değerleri ve standart sapmaları gibi istatistiki değerler elde edilmektedir. Bunlar yardımıyla yolun gerçek profilinin hesaplanması sırasında, kullanılan donanımların transfer fonksiyonlarının düzgün olmaması nedeniyle hatalı sonuçlar elde edilmektedir [5].

Tablo 3.1 Yolun boyuna profilindeki pürüzlülüğün belirlenmesi için günümüzde kullanılan ölçüm sistemleri ve bu sistemlerin önemli özellikleri

Ölçüm Büyük­lüğü	Yol yüzeyi ve sabit bir referans temeli arasındaki mesafe ölçümü					Yol yüzeyinin boyuna profil eğimi	Yol yüzeyi ve bir referans temeli arasındaki mesafe ölçümü		Pürüz etkili salınım davranışı	
Ölçüm değeri taşıyıcısı	1 (2 paralel) sürülen temas tekerlekleri	Alta sürme çitası	1 (2 paralel) sürülen temas tekerlekleri	2 optik sensör + 1 ivme kaydedicisi, paralel	ardarda 4 optik sensör	Mafsallı yerleştirilmiş 2 paralel temas tekerlek salınacağı	2 ardarda ve 2 paralel sürülen temas tekerlekleri	Ardarda sürülen 3 temas tekerleği	1 sürülen ölçüm tekerleği	1 mafsallı ölçüm tekerleği
Ölçüm büyüklüğünün referans temeli	Stasyonlar, 4-5m uzunluğunda, tesadüfi, seviyeleme ile hesaplama sonucu ölçüm yolu uzunluğunda	4m uzunluğunda, tesadüfi, stasyonlar, mekanik	4-5m uzunluğunda, tesadüfi, birlikte sürülen, mekanik	mutlak, hesaplamayla		tesadüfi, mekanik, birlikte sürülen	2 kere 1m uzunluğunda, tesadüfi, anlık, birlikte sürülen	tesadüfi, mekanik, birlikte sürülen	mutlak, mekanik, birlikte sürülen	
Hedef büyüklüğü	Yol pürüzlerinin yükseklik profili					Boyuna profil pürüzlerinin eğimi	Yol pürüzlerinin açısı		Salınım yolları	Yol pürüzlerinin yükseklik profili
Düzgünlük durumunun ifade büyüklüğü	Pürüz genliklerinin yola bağlı açısal frekansa bağlı spektral yoğunluğu	Pürüz yükseklikleri aşılma sıklığı	Pürüz yüksekliklerinin karesel ort. değeri (=efektif değer)		$\phi h(\Omega)$	Eğim değişkeni	Açı değerlerinin standart sapması		Toplanan salınım yolları	$\phi h(\Omega)$ Eğim değişkeni
Ölçüm sisteminin ilerlemesi	elle kumandalı		elle hareket ettirilen	kendi ilerleyen	çekici taşıt tarafından çekilen	çekici taşıt tarafından çekilen	elle hareket ettirilen	çekici taşıt tarafından çekilen	çekici taşıt tarafından çekilen	
Ana kullanım alanı	Hassas ölçümler	Kabul ölçümleri	Hasar kontrolü		Her çeşit ölçüm	Her çeşit ölçüm	Kabul ölçümleri, hasar kontrolü		Hasar kontrolü	
Alet örnekleri	Profilograf	4m seyyar cetvel	Planograf	LRST	HSRM	Profil eğim ölçüm aletleri	Goniograf	Açı ölçer	BI	APL

Belirtilen bu yöntemlerdeki prensip olarak zamana bağlı ölçüm ve değerlendirme şekilleri nedeniyle genelde bu sistemlerle yalnızca kısa yollar incelenmektedir. Buna karşın daha çok sayıdaki veya daha uzun yolların ölçülmesinde, büyük veri miktarlarının daha hızlı elde edilebildiği, kendi kendine ilerleyebilen veya bir taşıt tarafından çekilen aletler kullanılmaktadır. Daha sonra bu veriler, düzgünlüğün durum büyüklüklerine göre istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmektedir.

Kendi kendine ilerleyen veya bir taşıt tarafından çekilen ölçüm sistemlerinin referans seviyesi, hesapsal olarak veya mekanik olarak belirlenmektedir.

Ölçüm sırasında mekanik ölçüm değeri kaydedicisinin dinamik davranışının etkisinden - bu şekilde genelde ölçüm sonuçlarında önceden görülemeyen hatalar oluşmaktadır- korunmak için, Avrupa’da kullanılan iki aletin, İngiltere’nin HSRM’si ve İsveç’in LRST’sinin içine optik elektronik sensörlü, temassız mesafe ölçüm sistemleri yerleştirilmiştir.

HSRM, pürüz etkili taşıt salınımları için önemli olan 0.3...100 m’lik dalga boyu bölgesinde “gerçek” pürüz profilini müstakil değer sırası olarak elde etmektedir [1,5]. Almanya’da ölçümlerin yapıldığı tarihlerde geliştirilmiş olan software ile ölçülen pürüz akışının değerlendirilmesi, seçilebilir ortalama boyda kayan ortalama değer ($\hat{=}$ moving average) yardımıyla pürüz genliklerinin standart sapmaları ile veya pürüz spektrumları ile olmaktadır. Pürüz spektrumları, pürüz genliklerinin ve dalga boylarının bilgilerini içerdği için, taşıt ve yol pürüzleri arasındaki etkileşimin incelenmesinde kullanılmaktadır. Alt bölüm 3.1.2’ye göre yalnızca genlikler ve dalga boyları, taşıt salınımlarının belirlenmesi ve böylece örnek olarak seyir güvenliğinin değerlendirilmesi için kullanılabilmektedir.

Kayan ortalama boydaki standart sapmaların elde edilme yöntemi, -seçilebilir ortalama boylarda (3,10,30,50 veya 80 m) ölçüm noktası mesafesine göre oluşan- ölçüm değerlerinin bir miktarı üzerine bir “pencere” koymaktadır. Şekil 3.5 bunu örnek olarak 3 m’lik bir pencere için göstermektedir. “Pencereden” elde edilen ölçüm verilerinden bir h_K ortalama değeri hesaplanmaktadır [1]:

$$\bar{h}\left(i + \frac{m-1}{2}\right) = \frac{1}{m} \sum_{j=i}^{i+m-1} h_j = \bar{h}_K \quad (3.5)$$

$$i = 1 \dots N - m + 1$$

N: Bir değerlendirme bölümünün ölçüm değeri sayısı (Şekil 3.5’teki örnekte: 109 m / 0.107 m = 1024).

m: Ortalama boy başına ölçüm değeri sayısı (Şekil 3.5'teki örnekte:
 $3 \text{ m} / 0.107 \text{ m} = 28$: + 1 -ekrandaki ilk değer için-)

Veri miktarını “moving-average” kullanarak elde etmek için $(m - 1) / 2$ adet ölçüm değeri, ölçüm yolunun başında ve sonunda simetrik olarak yansıtılmaktadır ve penceredeki h_K ortalama değerden, hesaplanan h_K ortalama değeri çıkartılmaktadır:

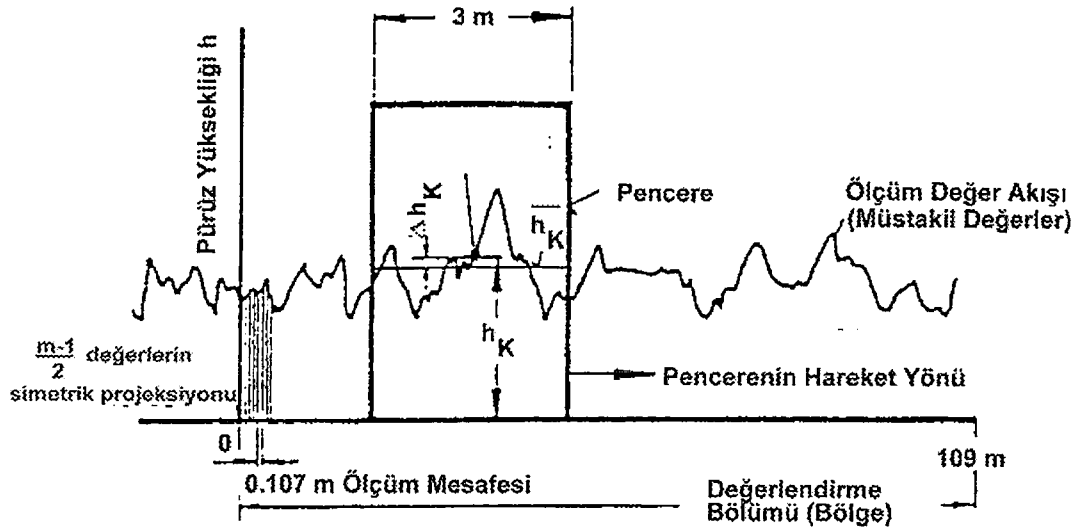
$$\Delta h_K(m) = h_K - \bar{h}_K \quad (3.6)$$

$$\text{burada } k = (i + \frac{m-1}{2}) \dots (N - \frac{m-1}{2})$$

$(N - m + 1)$ adet ölçüm verilerinin bütün Δh_K fark değerlerinden her değerlendirme bölümü için (3.7) denklemi yardımıyla s standart sapması elde edilmektedir ve boyuna profildeki düzgünlüğün ifadesi için durum büyüklüğü olarak kullanılmaktadır.

$$s(m, N-m+1) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N-m+1} (\Delta h_K(m) - \Delta \bar{h}(m))^2}{(N - m + 1)}} \quad (3.7)$$

$$\text{burada } \Delta \bar{h}(m) = \frac{1}{(N - m + 1)} \sum_{k=1}^{N-m+1} \Delta h_K \quad (3.8)$$

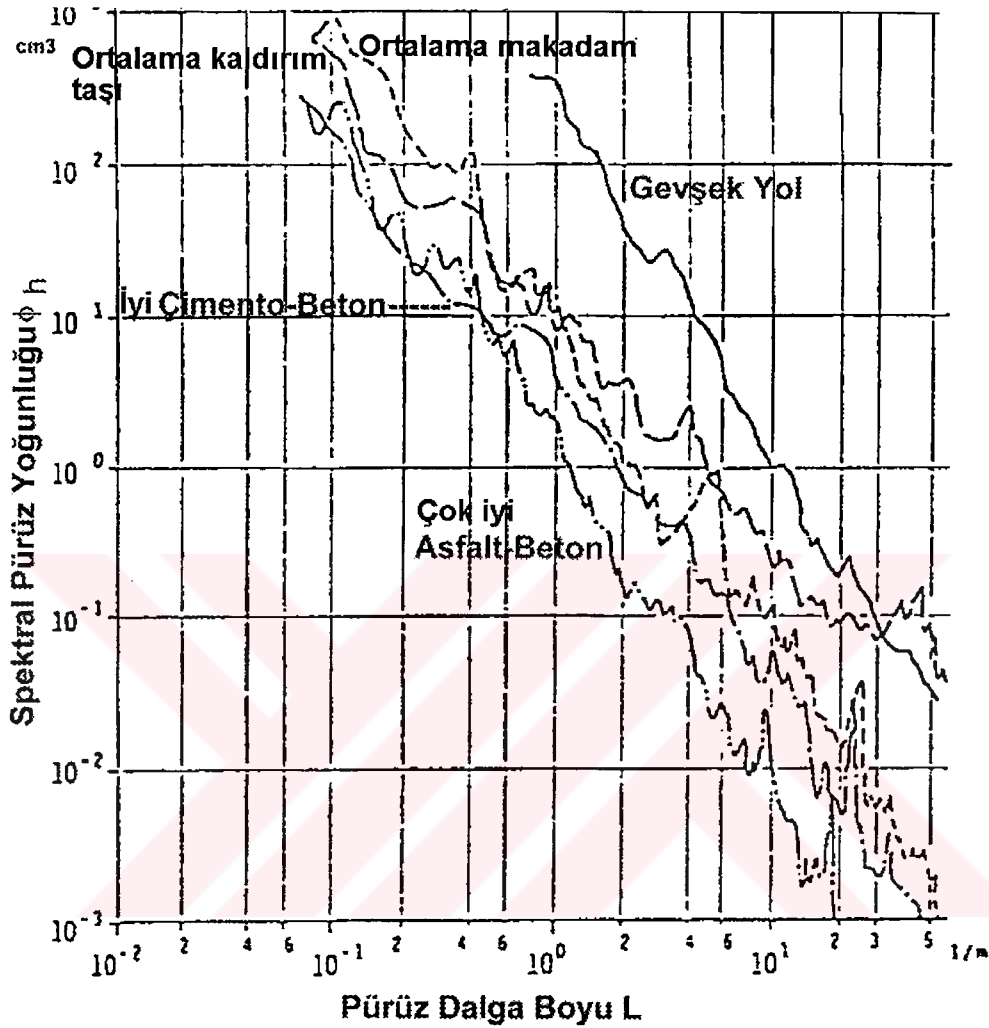


Şekil 3.5 Moving-average metodunun şematik gösterimi (3 m ortalama boy için örnek)

Ayrıca HSRM'nin ölçüm değerlerinden uygun matematiksel formülasyon yardımıyla $\Phi_h(\Omega)$ pürüz genliklerinin yola bağlı açısal frekansına bağlı spektral yoğunluğu hesaplanmaktadır. Spektral yoğunluk ile pürüz akışı, sabit bir yola bağlı açısal frekans bandına ($\approx$ dalga boylarının küçük bir aralığı) ait genliklerin karesel efektif değerleri frekans bandının enine yerleşecek şekilde ifade edilmektedir. Sonra bu müstakil değerler frekans üzerinde gösterilmektedirler ve $\Phi_h(\Omega)$ pürüz spektrumu olarak tanımlanmaktadır. Burada incelenen ölçüm yolunun pürüz yapısının düzgün düzensiz olması ve göze çarpan tekil engelleri içermemesi, böylece pürüz genliklerinin dağılım yoğunluğunun Gauss normal dağılımına uyması şart koşulmaktadır. Hesaplama yöntemi olarak periyodik fonksiyonların ve sınır değerlerin aşılması ile (bunun anlamı, ölçüm süresi ve ölçüm yolu uzunluğu $\rightarrow \infty$) periyodik olmayan akışların (bunlara örnek olarak pürüz akışları verilebilmektedir) ifade edilebileceği Fourier serisi kullanılmaktadır [1].

Bu hesaplar sonucunda, genelde çift logaritmik diyagramda gösterilen spektral genliklerin frekansa bağlı akışları elde edilmektedir. Şekil 3.6'da örnek olarak $\Phi_h(\Omega)$ pürüz spektrumları gösterilmektedir. Spektral yoğunluğun büyüklüğü artan Ω yola

bağlı açısal frekansı (veya azalan L dalga boyu) ile azalmaktadır, yani uzun dalga boyları büyük, kısa dalga boyları küçük spektral yoğunluk ile ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.6 Ω yola bağlı açısal frekansa ve L dalga boyuna bağlı olarak pürüzlerin spektral yoğunluğu

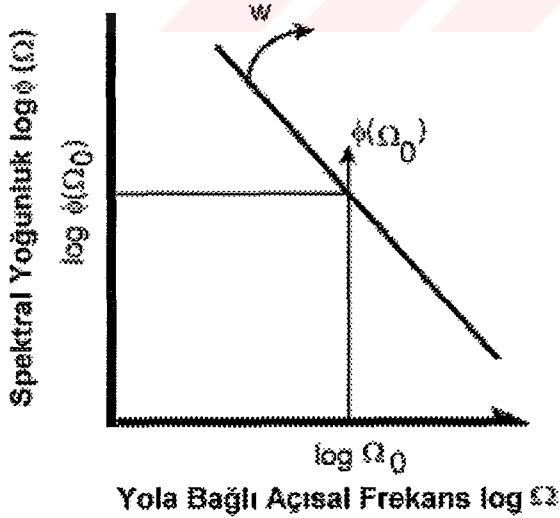
Salınım incelemeleri için dalga boyu yerine $\Omega = 2\pi / L$ olmak üzere yolun açısal frekansını kullanmak daha pratik olmaktadır [2]. Böylece yol açısal frekansına bağlı olan $\Phi_h(\Omega)$ pürüzlerin yol açısal frekansına bağlı spektral yoğunluğu, çift logaritmik diyagramda frekans üzerine yerleştirilen doğrular yardımıyla iyi bir yaklaşımla gösterilmektedir. Pürüzlülük, yalnızca taşıt tekniği için önemli olan 0.3...100 m dalga

boyu bölgesinde incelenirse ve bunun yanında pürüz akışındaki periyodluklar ihmal edilirse, çift logaritmik diyagramdaki spektrumlara

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) (\Omega/\Omega_0)^{-w} \quad (3.9)$$

şeklindeki denklemlerle ampirik olarak ifade edilen doğrularla yaklaşılabilmektedir, Şekil 3.7 [1,2,5]. Bu ifadenin boyutu, pürüz yüksekliğinin karesi / 1/dalga boyu = (uzunluk)³ olmaktadır. Bu ifadenin tanım değerleri, $\Omega_0 = 1$ 1/m referans yola bağlı açılal frekansındaki $\Phi_h(\Omega_0)$ “pürüzlülük ölçüsü” ve w “dalgalılığı” olmaktadır. $\Phi_h(\Omega_0)$ bir yolun ne kadar düzgün olduğunu ifade etmektedir, w bir yolun uzun veya kısa dalgaların hangisini ağırlıklı olarak içerdığını göstermektedir.

Temassız olarak ölçüm yapan ikinci alet olan İsveç’in LRST’si, ölçüm değerlerinden ölçülen h pürüz yüksekliklerinin efektif değerleri (normal dağılım kabulüyle, bu değer karesel ortalama değere uygun olmaktadır) ile, seçilen kısmi ölçüm yolları için durum büyüklüğü olarak ifade edilen bir yükseklik profili elde etmektedir, (3.10) [1].



Şekil 3.7 Yol pürüzlerinin spektral yoğunluğunun yaklaşık gösterimi

$$\tilde{h} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^2} \quad (3.10)$$

Burada $i = 1 \dots N$ Ölçüm bölümü başına ölçüm değeri sayısı

Yükseklik profilinden elde edilen büyüklüklerin ölçülmesi

Pürüz akışında boyuna profildeki iki komşu nokta arasındaki yükseklik farkı, eğim değişiminin elde edilmesi için kullanılmaktadır. Burada eğim, yola göre pürüz genliklerinin birinci türevine eşit olmaktadır ($\bar{\alpha} \triangleq h' = dh/dx$). Bu yöntem, Amerika'da ASSHO yol testi çerçevesinde geliştirilmiş olan özel bir pürüzlülük değerlendirme yönteminin esasını oluşturmaktadır [1].

Eğim değerleri, daha önce belirlenmiş olan yükseklik profilinden, yol mesafelerine göre yan yana bulunan iki ölçüm noktasının yükseklik farkından hesaplanmaktadır -bu yöntem APL ve HSRM'nin ölçüm değerlerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır-, veya eğim değerleri direkt olarak temas tekerleği salıncağının α eğim açısını kaydeden ölçüm sistemi yardımıyla elde edilmektedir (alet örneği: boyuna profil eğim ölçeri). Bir ölçüm bölümünün müstakil noktalarda ölçülen eğim değerleri için standart sapmanın karesi ($\triangleq$ fark) hesaplanmaktadır. Bu slope-variance ($\triangleq$ SV), boyuna profildeki pürüzlülük ifadesi için durum büyüklüğü olarak kullanılmaktadır:

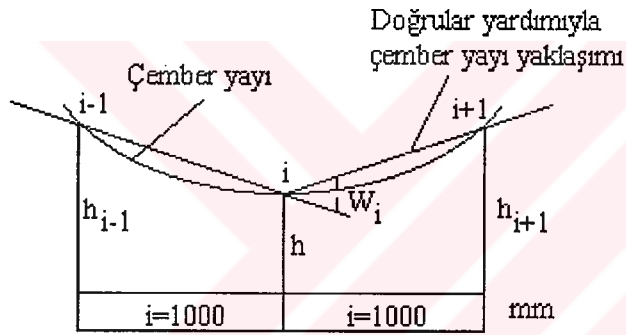
$$SV = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta h}{\Delta x} \right)_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta h}{\Delta x} \right)_i \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

burada iki komşu nokta arasındaki yükseklik farkı Δh , mesafe Δx olmaktadır; $\Delta h/\Delta x = \bar{\alpha}$ ($\bar{\alpha}$: Küçük α açılarında eğimi yaklaşık olarak ifade eden çember yayındaki açı).

Açı ölçüm metodunda bir yolun boyuna profili, bir referans dikkate alınmak zorunda olmadan açı ölçümleri yardımıyla kavislerine yaklaşılabilen, yan yana sıralanmış çember yayları şeklinde gösterilmektedir. Böylece ölçülen açı değerleri, yola göre pürüz genliklerinin ikinci türevine eşit olmaktadır ($W \hat{=} h'' = d^2h/dx^2$). Şekil 3.8, yöntemin her iki kullanım şeklini göstermektedir. Mafsallı olarak birbiriyle bağlı olan iki kiriş arasındaki W_i açı değeri ölçülmektedir veya bu açının oluşturulduğu Şekil 3.8'de gösterilen üç yerde yol yüzeyi ve bir referans tabanı arasındaki mesafeler ölçülmektedir ve bu değerlerden W_i açı değeri elde edilmektedir.

i yerinde W açı değeri:

$$W_i = (h_{i-1} - 2h_i + h_{i+1})/l \text{ (‰)} \quad (3.12)$$



Şekil 3.8 Açı değeri ölçüm şeması

Elde edilen açı değerlerinden her ölçüm bölümü için düzgünlük ifadesinin durum büyüklükleri olarak s_w standart sapması hesaplanmaktadır. Bir kısmi ölçüm yolu üzerindeki standart sapmanın denklemi aşağıda verilmektedir:

$$s_w = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N (W_i)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N W_i \right)^2 \right]} \quad (3.13)$$

N: Bir ölçüm bölümündeki W_i açı ölçüm değeri sayısı

Pürüz etkilerinin ölçülmesi

Bir çok alette, salınım kabiliyeti olan bir ölçüm sisteminin hareket büyüklükleri, ölçüm büyüklükleri olarak kullanılmaktadır. Bu hareket büyüklükleri, bir taşıyıcı çerçeveye (BI sistemleri) veya birlikte ilerleyen ağır sarkaca (APL) göre bir ölçüm tekerleğinin dikey yöndeki hareketleri veya bir taşıtın dikey yöndeki taşıt gövdesi ivmesi olmaktadır.

Salınım mesafesi ölçümünde ilk olarak belirtilen tekerleğin dikey yöndeki hareketlerinin incelendiği yöntem pürüzlülük ifadesi için kullanılmaktadır. Taşıt gövdesi ivmelerinin belirlenmesi için kullanılan sistemler, genelde yalnızca seyir konforunun değerlendirilmesi için uygun olmaktadır ve bu şekilde yalnızca belirli koşullar altında pürüzlülük ifadesi için kullanılabilir.

Pürüz etkili dikey yöndeki hareketlerin bir değerlendirmesi, ölçüm tekerleğinin bütün dikey yöndeki hareketlerinin toplanmasıyla yapılmaktadır. Bu toplamalar, istenilen uzunluktaki ölçüm bölümleri için kaydedilmektedir ve bir kilometrelik yol mesafesi için olan değere çevrilerek durum büyüklüğü olarak verilmektedir (BI sistemleri). Veya değerlendirme, ölçülen pürüz genliklerinin spektral yoğunluk akışlarına ve profil eğim değerlerine göre yapılmaktadır (APL sistemleri).

Tarif edilen pürüzlülük ölçüm yöntemlerinin yaklaşık olarak bütün şekillerinde, sonuçlarda düzgün düzensiz olan yüzey akışında göze çarpan tekil engeller fark edilememektedir. Örneğin yol kaplamasında yapılacak olan kısmi tamirlerde, tekil yol bölümleri ele alınamamaktadır. Tekil engellerin belirlenmesi günümüzde yalnız bir takım sistemlerde -kısmen istatistiksel ve elle hareket ettirilen aletlerde ve salınım mesafesi ölçüm aletlerinde-, aşımaları halinde sonuçlarda özel bir işaret oluşması ile tekil engellerin lokalize edilmesini sağlayan sınır değerleri verilebildiği için mümkün olmaktadır.

3.1.4. Boyuna profildeki pürüzlülüğün belirlenmesi için değerlendirme yöntemleri

İleride yapılacak olan açıklama, günümüzdeki değerlendirme yöntemleri üzerine bir bakış teşkil etmektedir. Diğer bilgiler ilgili değerlendirme zemininin belirtildiği bölüm 3.2’de “ölçüm aletlerinin tarifinde” bulunmaktadır.

Günümüzde Orta Avrupa’da kullanılan önemli yöntemler, Tablo 3.2’te bir takım önemli özellikleriyle gösterilmektedir [1].

Yol pürüzlülüğünün değerlendirilmesi yaklaşık olarak yalnızca üç kritere, düzgünlüğe, seyir konforuna ve “sürülebilirliğe” göre yapılmaktadır [1]. Diğer kriterler -pürüzlerin, örneğin dinamik tekerlek yüklerine neden olmaları gibi, taşıt üzerindeki etkileri-, şimdiye kadar yalnızca taşıt tekniğinde spektral yoğunluğun tanım değerleri olarak kullanılmışlardır.

Değerlendirme ölçüsü olarak düzgünlük, özellikle sabit ve elle işletilen ölçüm aletlerinde yüzey durumunun yapı tekniğine uygun ifadelerinde kullanılmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak yeni ve yenileştirilmiş yolların onaylanması için belirlenmiş olan referans tabanına göre yol yüzeyinin sapmasına ne ölçüde izin verileceğine dair bilgilerin bulunduğu talimatnameler kullanılmaktadır. Taşıt tekniğine göre bilgiler bu talimatnamelerde bulunmamaktadır.

Değerlendirme ölçüsü olarak seyir konforu, deney yapılan kişilerin subjektif değerlendirmelerine ve/veya seyir halindeki taşıtın dikey yöndeki taşıt gövdesi ivmelerine göre kullanılmaktadır. Salınım konforu değerlendirilmesi için genel bilgiler ISO 2631’de ve VDI 2057’de bulunmaktadır [1]. Bu bilgilerden yola çıkarak sınır şartların -örneğin izin verilen seyir hızları gibi- dikkate alınmasıyla, düzgünlük ifadesinin ilgili durum büyüklüğü yardımıyla yol durumunun değerlendirilmesi için referans olarak kullanıldığı değerlendirme skalaları geliştirilmiştir.

Kriter olarak “sürülebilirlik”, p sürülebilirlik değeri ile ifade edilmektedir (Preset Serviceability Index, PSI). Bu değer, AASHO yol testinin araştırmaları çerçevesinde yapılan ölçümlerde elde edilen geometrik yüzey durumu ile seyir konforunun subjektif değerlendirmesi arasındaki bağıntılardan elde edilmiştir. Sürülebilirlik taşıt davranışından, seyir hızından ve pürüzlerin dalga boyundan bağımsız olmaktadır. Diğer yöntemlere karşı sürülebilirlik değerlendirmesinde yol yüzey olarak, yani boyuna ve enine profilde ifade edilmektedir.

Tablo 3.2 Günümüzde Orta Avrupa’da kullanılan pürüzlülük değerlendirme yöntemleri ve bu yöntemlerin önemli özellikleri

Pürüzlerin ifade (durum) büyüklükleri	Değerlendirme			Geçerlilik bölgesi	Kullanılan ölçüm aleti
	Temel	Skalalama	Özellikler, Sınırlamalar, Talimatlar		
Pürüzlerin aşılma sıklığı		Yok	Kabul ve sınır değerleri için, bitümlü ve beton yol kapl. yapımı için teknik talimatlar	Almanya	Planograf, 4m seyyar cetvel
Değişken ortalama boylarda pürüz yüksekliklerinin standart sapmaları	İlerleyen taşıtta denek kişilerin konfor izlenimleri ve gövde ivmesi ölçümleri	Sözle: çok kötü, kötü, kabul edilebilir, iyi	Kullanılan ortalama boya bağlı, sınır değerleri hızla bağlı	İngiltere	HSRM
Pürüz yüksekliklerinin karesel ortalama değerinden (= efektif değer) elde edilen konfor değeri		Sayısal: 1: çok iyi ... 9: çok kötü		İsviçre	Saab RST, LRST
Pürüzlülük ölçüsü $F_h(\Sigma\sigma)$ ve dalgalılık w	İlerleyen taşıtta denek kişilerin konfor izlenimleri	Sayısal: A: çok iyi ... H: çok kötü	Değerlendirme w=2 dalgalılığı için geçerlidir	Genel olarak geçerli	
Boyuna eğim değişkeninden elde edilen p sürülebilirlik değeri, iz doğr. oluk derinliği, yama yerleri, yırtılma kats.	İlerleyen taşıtta denek kişilerin konfor izlenimleri	Sayısal: 5: ideal düzgün ... 0: çok kötü	Esnek ve katı kaplamalar için farklı, yol için yüzey olarak geçerli (PSI'den elde edildi)	Almanya	Profil eğim ölçüm aleti
Boyuna eğim değişkeninden elde edilen boyuna düzgünlük indeksi	İlerleyen taşıtta denek kişilerin konfor izlenimleri	Sayısal: 5: ideal düzgün ... 0: çok kötü	(PSI'den elde edildi)	Hollanda	APL
Açı değerlerinin sw standart sapması	Bilinmiyor	Sözle: çok iyi, kusursuz, sakıncasız, sakıncalı	Kabul ve sınır değerleri için İsveç Normu SN 640 521a geçerlidir, sınır değerleri hızla bağlı	İsviçre	Açı ölçer 4m seyyar cetvel
1km ölçüm yolu başına toplanılan salınım yolları	HSRM verileriyle korelasyon ve konfor izlenimleri	Sözle: çok kötü, kötü, kabul edilebilir, iyi	Sınır değerleri hızla bağlı	İngiltere	BI

Sürülebilirlik esaslarının araştırılması belirtildiği gibi Amerika'da AASHO yol testi çerçevesinde yapılmıştır. Bu esasların ilgili ölçümlerde kullanılması için ölçümlerin yapılacağı ülkenin yol koşullarının dikkate alınması gerekmektedir. Sürülebilirlik, ölçülen değerlerden esnek ve katı kaplamalar için amprik olarak elde edilen iki farklı bağlantı fonksiyonu yardımıyla lineer olmayan bağlamda hesaplanmaktadır [1]. Eğim varyantının belirlenmesi için ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen durum büyüklükleri ve iz doğrultusundaki oluk derinliği yanında, yama yerlerinin ve yol yırtıklarının elle ve gözle belirlenmesi için ölçüm yolu üzerinde elde edilen büyüklükler değerlendirmede dikkate alınmaktadır. Katı kaplamalar için

$$p = 5.40 - 1.80 \log(1 + \bar{SV}) - 0.09 \sqrt{C + P} - f(x) \quad (3.14a)$$

ve esnek kaplamalar için

$$p = 5.0 - 1.91 \log(1 + \bar{SV}) - 0.01 \sqrt{C + P} - 1.38 \bar{RT}^2 \quad (3.14b)$$

denklemleri kullanılmaktadır.

Burada

SV: Her iki yuvarlanma izinden elde edilen eğim varyantının ortalama değeri

C: Yırtık boy katsayısı

P: Yama yeri katsayısı

RT: Her iki yuvarlanma izindeki iz doğrultusundaki oluk derinliğinin ortalama değeri

$f(x): x^3 + ax^2 + p^2x - p^2a = 0$ denkleminin karekökü,
burada $a = 0.42735043$.

Sürülebilirlik değerine göre yolların kullanımdan kaldırılması veya yenilenmesi ile ilgili olarak bir değerlendirme deneyimlere göre yapılmaktadır.

Benzer bir değerlendirme yöntemi Hollanda'da kullanılmaktadır. Durum büyüklüğü eğim varyantı olmaktadır. Eğim varyantı, ölçüm yolunun diğer tanım büyüklükleri dikkate alınmadan boyuna düzgünlük indeksi (Longitudinal Evenness Index, kısaca LEI) yardımıyla logaritmik bir bağıntı üzerinden değerlendirilmektedir:

$$LEI = 5.0 - 1.8 \log (1 + SV) \quad (3.15)$$

3.1.5 Boyuna profildeki düzgünlük durumunun belirlenmesi için uygun yöntemlerin seçimi

Pürüzlülüğün etkileri, ölçüm ve ifade yöntemleri ve bunların yardımıyla boyuna profildeki pürüzlülük durumunun değerlendirilmesi konularında tekniğin seviyesi üzerine verilen bilgilere göre, pürüzlü yol üzerinde seyreden taşıtın davranışından elde edilen objektif ve kontrol edilebilir kriterler yardımıyla düzgünlüğün değerlendirilmesi gerekmektedir.

Taşıtın bu davranışı özellikle pürüz etkili taşıt salınımlarıyla ilgili olduğu için taşıt salınım davranışını üzerine yapılacak olan araştırmalarda kullanılabilecek ifade yöntemlerinin bulunması gerekmektedir. Bu yöntemlerin bulunması için pürüzlerin genliklerinden ve özellikle pürüzlerin dalga boylarından ve üzerlerinden geçen taşıtların hızlarından bulunan etki frekanslarının elde edilmesi için, boyuna profildeki pürüzlülüğün ifade büyüklükleri yardımıyla, genliklerin ve dalga boylarının belirlenmesi gerekmektedir.

Bunun için, örneğin yalnızca pürüz genliklerinin ortalama değeri ile ifade etmeyecek, ilgilenilen dalga boyu bölgesinde “gerçek” yüzey profilinin belirlenmesi ile ölçüm yollarının pürüz profilinin elde edilmesini sağlayacak pürüzlülük ölçüm sistemlerinin bulunması gerekmektedir. Bu nedenle boyuna profildeki düzgünlük durumunun ifade büyüklüğü olarak uzun ölçüm yollarından elde edilecek çok sayıdaki ölçüm veri miktarı için zorunlu olarak istatistiksel değerlendirme metotlarının kullanımı ile pürüz genliklerinin yola bağlı açısız frekansa bağlı spektral yoğunluğu kullanılmaktadır [1,2,5].

Düzgünlük ifadesinin günümüzde kullanılan diğer büyüklükleri -eğimin ve açı değerlerinin pürüz genliklerinden elde edilen büyüklükleri gibi-, “gerçek” yüzey profili ile (aynı şekilde, gerçek yüzey profilinin spektral yoğunluğu ile yol pürüzlerinin spektral yoğunluğu) matematiksel olarak bağlantılı olmaktadır. Standart sapmalar ve standart sapmaların kareleri (varyantları) gibi ölçümlerden elde edilen bu şekildeki durum büyüklükleri için sonuç ifadeleri, günümüzde alet işleticilerinin kullandığı şekilde, taşıt davranışına uygun objektif değerlendirme kriterleriyle düzgünlüğün değerlendirilmesi için kullanılamamaktadır. Bunun yanında, ölçüm sistemlerinin verileri kaydetme özellikleri yeterli olarak anlaşılamamaktadır. Böylece, örneğin profil eğim ölçüm sistemlerinin ve pürüz etki aletlerinin ölçüm sonuçlarıyla HSRM’nin ölçüm sonuçları arasında çevirmeyi engelleyecek, gerçekte olan ve hesaplanan ölçüm büyüklükleri arasında önceden görülemeyecek hatalar oluşmaktadır [1].

Bu şekilde, Almanya’daki ilgili ölçümler yapıldığı zamandaki bilgi seviyesiyle, boyuna profil düzgünlüğünün rutin araştırmalarında ölçüm sistemlerinin kullanımı için kesin bilgiler verilememektedir. Farklı sistemlerin ölçüm sonuçları arasında uygun çevirme yöntemi geliştirilirse bu ifadeler daha çok faydalı olmaktadır. Böylece rutin araştırmalar için kullanılan bütün ölçüm aletleri, belirledikleri durum göstergelerinden ve düzgünlük durumunun buradan elde edilen durum büyüklüğünden bağımsız olarak incelenebilmektedirler.

3.2.Pürüzlülük ölçüm aletlerinin tarifi

Aletler için ilerideki açıklamalar:

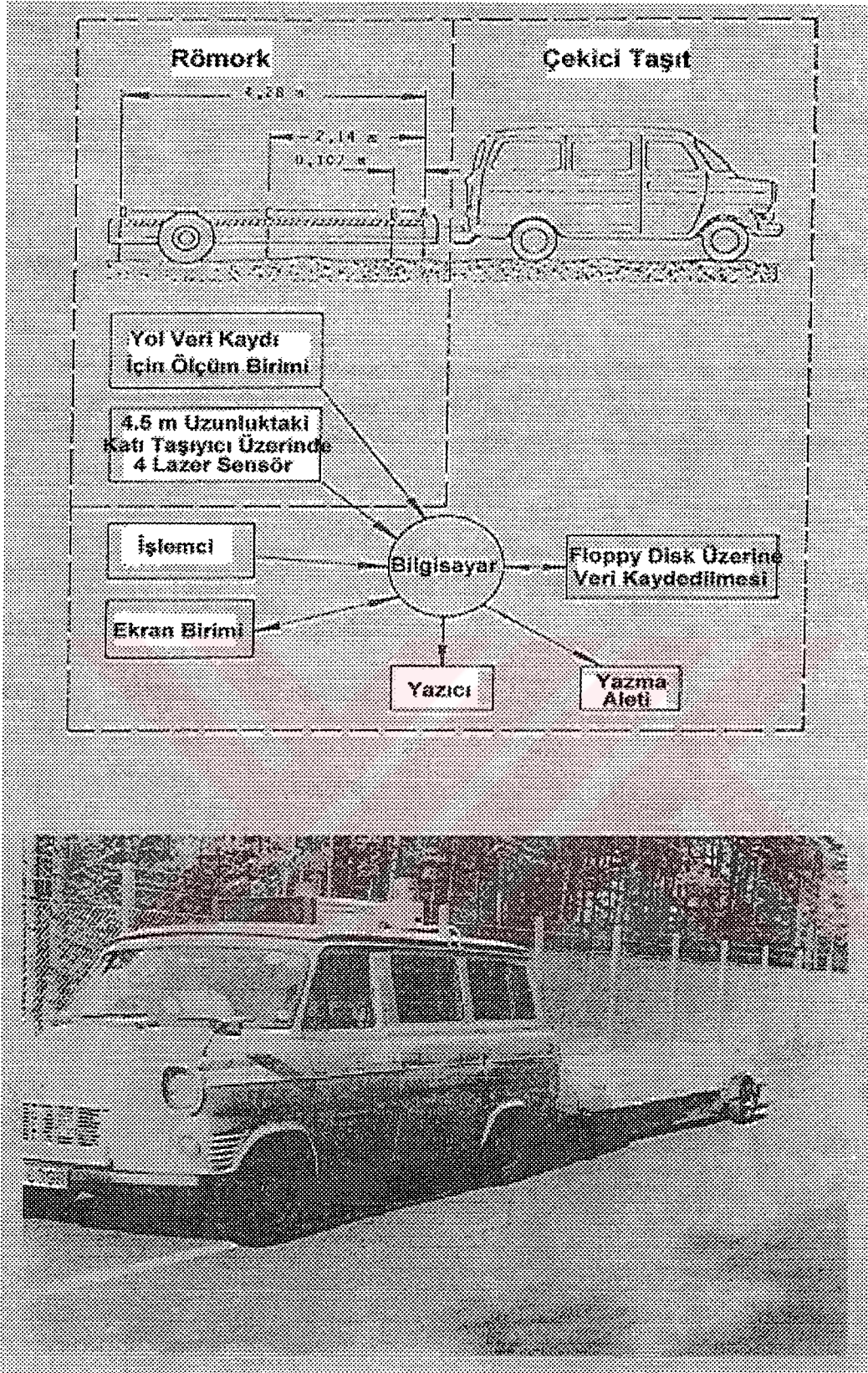
- Alet yapısı,
- Ölçüm yöntemi,
- Değerlendirme ve tekrarlanabilirlik,
- Değerlendirme esasları

olarak bölümlere ayrılmaktadır [1].

3.2.1.HSRM

Alet yapısı

HSRM, tek akslı-iki izli ölçüm römorku ve ölçüm büyüklüklerinin değerlendirilmesi için veri işleme aletlerinden oluşmaktadır, Şekil 3.9. Yaklaşık 5.5 m boyundaki römorkta 4 adet lazer optikli sensör ard arda katı ve poliüretan köpük ile izole edilmiş ve sönümlenmiş taşıyıcıya yerleştirilmiştir. Bu sensörler, yol yüzeyine olan mesafeyi temassız olarak ölçmektedir. Bunlar, römorkun boyuna ekseninde bulunmaktadır. Ölçüm yönü yol yüzeyine diktir.



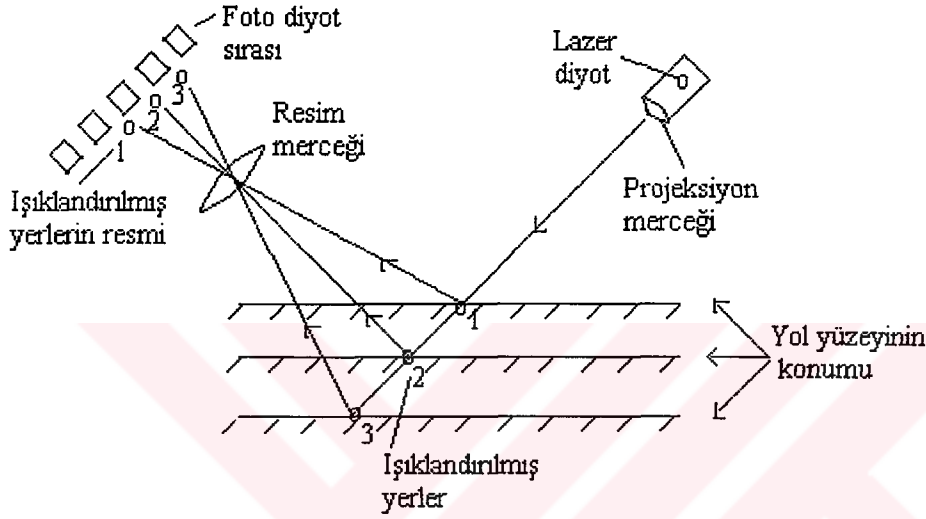
Şekil 3.9 HSRM

a) Şematik Yapı

b) Toplu Bakış

Ölçüm yöntemi

Ataletsiz olarak ölçüm yapan dört sensör, Şekil 3.10’da gösterilen prensibe göre optik olarak çalışmaktadır. Yol yüzeyi ile bir sensör birimi arasındaki mesafenin değişmesi, cisim açısının ve yanan diodun değişimine neden olmaktadır ve bu ise yol yüzeyi ve sensör arasındaki mesafenin belirlenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 3.10 HSRM’de bulunan ve temassız olarak ölçüm yapan mesafe kaydedicisinin prensip olarak çalışma şekli.

Her saniye yaklaşık 3300 ölçüm değeri kaydedilebilmektedir. Değerlendirme sırasında ölçüm değerlerinin yaklaşık %20’sinin drop-out’lar olarak yok olmasına izin verilmektedir. Drop-out’lar uygun olmayan ölçüm hızı, yol yüzeyinin yansıtmasının engellenmesi veya ıslak yol nedeniyle lazer ışınının farklı şekilde yansıtılması sonucu oluşmaktadır.

Pürüzlülük profilinin belirlenmesi, bir simetrik ve bir asimetrik sistem yardımıyla, her seferinde 4 sensörden 3’ünün ölçüm değerlerinin değerlendirilmesi ile olmaktadır. Simetrik sistem A, C, D sensörlerinin her seferinde 0.107 m’lik adım uzunluğunda elde edilen üç ölçüm değerinin ortalamasını kullanmaktadır. Asimetrik sistem aynı şekilde A, B, C sensörlerinin ölçüm değerlerini kullanmaktadır. Bu iki sistem tarafından $L > 10$ m (simetrik sistem) ve $0.3 \text{ m} < L < 20 \text{ m}$ (asimetrik sistem) olmak üzere her iki

dalga boyu bölgesinde elde edilen pürüzlülük değerlerinden, veri işleme aletinde genlik ve faz olarak pürüzlülük profili oluşturulmaktadır. Bu pürüzlülük profili, 0.107 m'lik adım mesafesinde müstakil değer sırası olarak kaydedilmektedir.

Ölçülen profilin gerçek pürüzlülük profiline göre sapması, veri toplama yönteminden dolayı ölçülen profilin üzerine binen çukur ve tepe nedeniyle oluşmaktadır. Ancak en az 3000 m'lik çapa sahip olan bu çukur ve tepe, taşıt tekniği incelemeleri açısından önemli olmamaktadır. Ölçüm römorkunun yalpa ve baş vurma hareketleri, ölçüme cos kısımları ile katılmaktadırlar ve bu nedenle ihmal edilebilmektedirler.

HSRM için farklı dalga boyları ve dalga boyları bölgeleri için max hatalar Tablo 3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3 L dalga boyuna bağlı olarak HSRM'nin ölçüm hataları

L dalga boyu	Max mutlak hata
≤ 5 m	≤ 2 mm
≤ 10 m	≤ 2.5 mm
≤ 25 m	≤ 6 mm

Yol mesafesi ölçümü -ve böylece ölçüm adım uzunluğu ve 0.107 m'deki ölçüm değerlerinin toplam sayısı ve değerlendirme bölümü uzunluğu arasındaki uyum-, römorkun tekerleklerinin birindeki kaydedici vasıtasıyla yapılmaktadır.

Yola bağlı olarak verilerin işlenmesi sonucu farklı hızlarla ve seyir boyunca değişen hızlarla ölçüm yapmak mümkün olmaktadır. Sınır şartlara göre -ölçüm bölümünün aşılmasına ve çok sayıda drop-out'a neden olabilecek pürüz yüksekliği, yansıtma kabiliyeti veya yol yüzeyi dokusu gibi- 70 km/h'lık veya daha büyük bir ölçüm hızı seçilebilmektedir.

Ölçüm izi römorkun boyuna ekseninde bulunmaktadır. Ölçüm seyri sırasında römorkun yönü çekici taşıt tarafından ölçüm izine göre düzeltilmektedir. Sensörlerin yerleştirilme şekli nedeniyle dönemeç çapı küçük olan kavisli yollarda yalnızca belirli

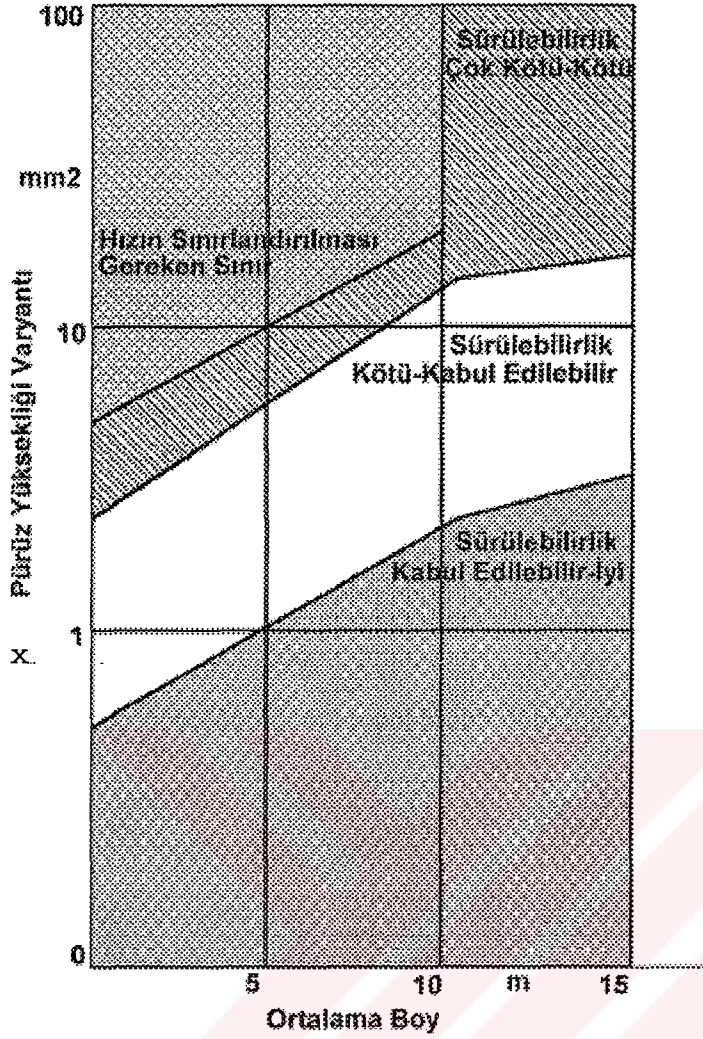
şartlar altında ölçüm yapılabilir; sınır çap, sensörlerin aynı ölçüm izine dokunmamaya başladığı zaman ortaya çıkmaktadır. Genelde sağ dış yol çizgisinin sağ yuvarlanma izinde ölçüm yapılmaktadır.

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik

Ölçüm verilerinin işlenmesi, çekici taşıttaki dijital hesaplama aletleri tarafından yapılmaktadır. Ölçüm yolundaki başlangıç ve bitiş noktaları gibi belirli yerler, “markalayıcılar” yardımıyla ölçüm sonuçları üzerinde işaretlenebilmektedirler. Bu yerler, pürüzlülük akışında kısa süreli ve yüksek sıçrayışlar olarak gözükmektedirler. Bu şekilde işaretlenen yerler çizim üzerinde kolaylıkla tekrar bulunabilmektedirler ve değerlendirmede hesap tekniğine uygun olarak basit bir şekilde elimine edilebilmektedirler.

Aynı şekilde, klavye üzerinden istenilen veri işleme adımları verilebilmektedirler. Ölçüm sırasında ara sonuçlar veya işlenmemiş veriler bir ekranda incelenebilmekte, printerden çıkartılabilmekte ve bir yüzü yaklaşık 27 km uzunluğundaki yol üzerinde yapılacak olan ölçümlerden elde edilecek verileri saklamak için yeterli olan floppy-disk üzerine kaydedilebilmektedirler. Bu şekilde elde edilen “gerçek” pürüzlülük profilinin yükseklikleri yardımıyla pürüzlülüğün bütün önemli durum büyüklükleri ve ifade şekilleri belirlenmektedir. Alt kısım 3.1.3’te tarif edilen yönteme göre değişken ortalama boylarda $\phi_h(\Omega)$ yola bağlı açısız frekansa, SV boyuna eğim varyantına veya pürüz yüksekliklerinin standart sapmasına bağlı pürüz genliklerinin spektral yoğunluk akışı ifade edilmektedir. Düzgünlük ifadesi için durum büyüklükleri, genelde 100 m uzunluğunda olmak üzere istenilen uzunluktaki değerlendirme bölümleri için belirlenebilmektedirler. Pürüzlülük ölçümünün tekrarlanabilirliği için işletmeciler tarafından sayısal değerler verilmemiştir. Ölçümler eğitilmiş servis personeli tarafından yapılırsa -bu şekilde ölçümlerin tekrarlanması sırasında iz tutmadaki zorluklar nedeniyle oluşabilecek büyük hatalar önlenilebilecektir-, işletmeci ifadelerine göre birbirini takip eden ölçümlerin sonuçlarında %10’dan az sapmalar meydana gelecektir.

Yol mesafesi ölçümlerinin tekrarlanabilirliği için veriler bulunmamaktadır.



Şekil 3.11 Yol pürüzlülüğünün değerlendirilmesi için HSRM'nin ölçümlerinden elde edilen pürüz yüksekliğinin varyantı ve ortalama boylar (moving average'ler) arasındaki ilişki

Değerlendirme esasları

Şekil 3.11'de pürüz yüksekliklerinin ölçümlerinden elde edilen standart sapmaların İngiltere'de kullanılan yöntemle değerlendirilmesi gösterilmektedir. Değerlendirme bölgesi, sürülebilirliğe göre (sürülebilirlik burada PSI anlamında kullanılmamaktadır) çok kötüden kötüye, kötüden kabul edilebilire ve kabul edilebilirden iyiye olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Düzensizliğin çok kötü olması nedeniyle diyagramda ek olarak seyir hızının sınırlandırılması gereken bölge gösterilmektedir.

Bu ilişkiler, dikey yöndeki taşıt gövdesi ivmesi ölçümlerinde, deney yapılan kişilerin subjektif değerlendirmeleri yardımıyla seyir konforunun ölçülen pürüzlülük tanım değerleriyle ilişkili olarak belirlendiği geniş çaplı araştırmalar sonucunda geliştirilmiştir.

3.2.2.LRST

Alet yapısı

LRST, yol boyuna ve enine profilindeki yol pürüzlülüğünü temassız olarak ölçmektedir. Ölçüm veri kaydedicileri, 11 adet lazer optik mesafe sensöründen ve dikey yöndeki taşıt gövdesi ivmesinin belirlenmesi için bir alıcıdan oluşmaktadır. Bütün kaydediciler taşıtın ön tamponunun arkasına yerleştirilmiş şekilde bulunmaktadır. Şekil 3.12, ölçüm taşıtının yapısını şematik olarak göstermektedir.

Dışta bulunan ölçüm kafalarının her ikisi de dışarıya doğru 45°'lik açıya kadar çevrilebilmektedir. Bunlar, enine profildeki araştırmalar için ölçüm bölgesini enine doğrultuda taşıttan dışarıya doğru 3.1 m'ye kadar genişletmektedirler ve yollar üzerinde enine profilin pürüz yüksekliklerinin belirlenmesinde kullanılacak olan referans çizgisinin uzatılmasını sağlamaktadırlar. Enine doğrultuda yapılacak olan ölçümler için bütün sensörler kullanılırken, boyuna profildeki ölçümler için yalnızca iki ölçüm kafası ve taşıtın ön kısmının ortasına yerleştirilmiş olan dikey ivme kaydedicisi kullanılmaktadır.

Ölçüm yöntemi

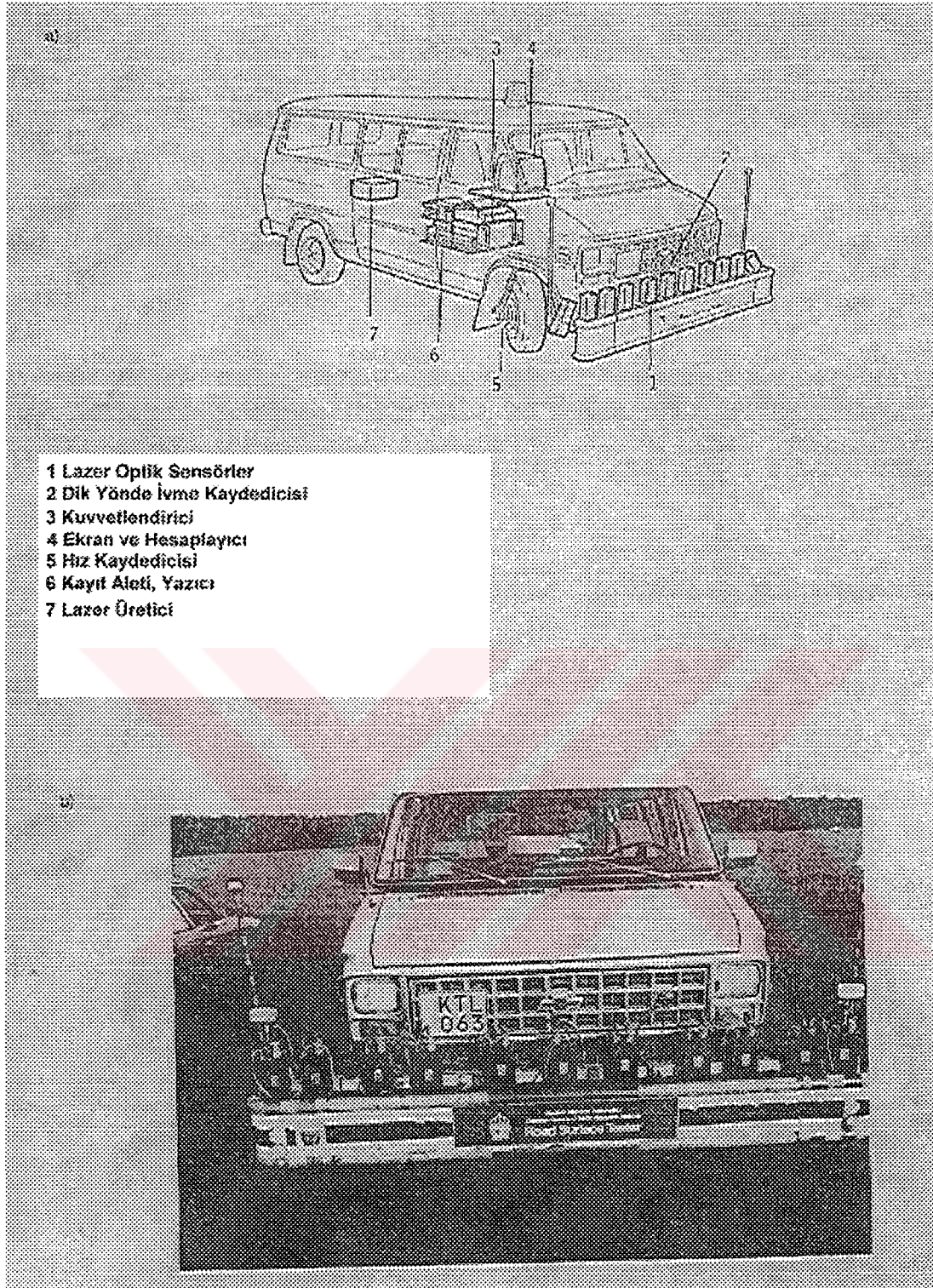
Boyuna profil ölçümleri için kullanılan her iki ölçüm kafası, ölçüm taşıtının hem sağ, hem de sol yuvarlanma izinde, yol yüzeyine olan mesafeyi ölçmektedir. Lazer sensörlerin ölçüm prensibi büyük ölçüde HSRM'nin sensörlerinin ölçüm prensibine benzer olduğu için, bu noktada ayrıntılı tariften kaçınılabilmektedir.

Birlikte taşınan hesaplayıcı birimde her iki yuvarlanma izinin ölçüm değerlerinden bir ortalama değer oluşturulmaktadır. Bu değere taşıtın ön kısmının dikey yöndeki taşıt

gövdesi ivmesinden iki katlı entegrasyonu ile elde edilen anlık taşıt gövdesi yolu toplanmaktadır, Şekil 3.13. Bu toplam, ölçüm seyri sırasında ölçüm değerlerinden sürekli olarak oluşturulmaktadır. Hesaplanan değerler veri taşıyıcılarına kaydedilmektedir. Ek olarak, değerlendirmede dikkate almak için yol durumunun çeşitli özellikleri -örneğin göze çarpan tekil engeller gibi- manuel olarak kaydedilebilmektedir.

Yol mesafesi ölçümü, tahrik edilmeyen ön tekerleklerin birinde bulunan impuls verici yardımıyla yapılmaktadır. Ölçüm hassasiyeti $\% \pm 00.2$ 'de bulunmaktadır. Ölçüm hızı 90 km/h'ye kadar değer alabilmektedir, ancak yapılan zamana bağlı entegrasyon nedeniyle, HSRM'ye karşı, hız sabit tutulmak zorundadır.

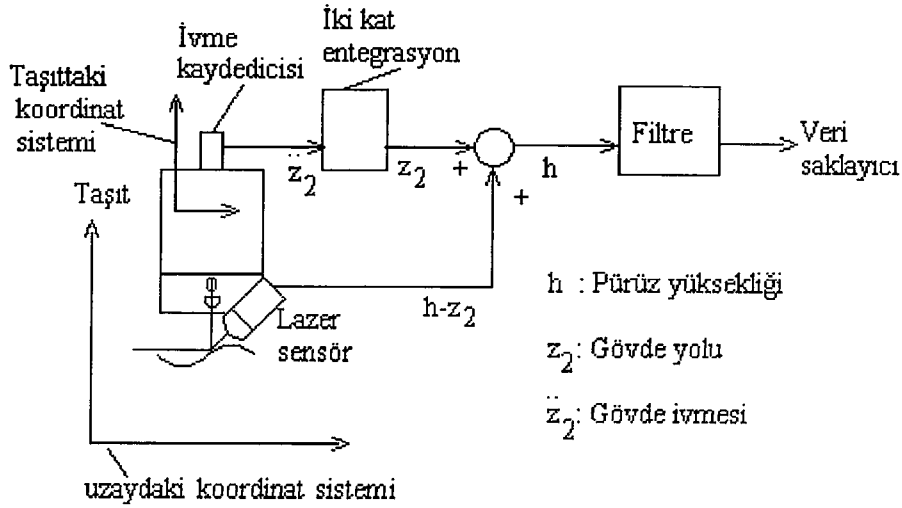
Ölçüm izinin konumu, her iki yuvarlanma izinde yapılan ölçüm nedeniyle kesin olarak verilememektedir. Ölçüm izi hesapsal olarak boyuna ekseninde, her iki ölçüm kafasının arasında bulunmaktadır. Ölçüm izinin konumu yolun enine göre sürücü tarafından, sağ dış sensörün sağ dış yol çizgisini takip edeceği ve her iki yuvarlanma izinin pürüzlülük profilinin yol çizgisi üzerinde oluşturulacağı şekilde yerleştirilmektedir.



Şekil 3.12 LRST

a) Şematik yapı

b) Önden bakış



Şekil 3.13 LRST’de ölçüm değeri işlenmesinin şeması

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik

20 m’den uzun olmak üzere istenildiği şekilde seçilebilen bir değerlendirme bölümü için pürüz yüksekliklerinin karesel ortalama değeri ($\hat{=}$ efektif değer) elde edilmektedir ve düzgünlük ifadesinin durum göstergesi olarak kullanılmaktadır. Düzgünlük comfort-value ile değerlendirilmektedir.

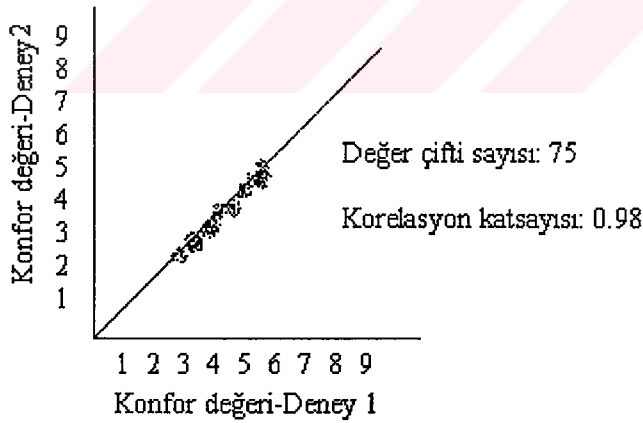
Sonuç ifadesi, yol hakkındaki genel bilgileri ve ölçüm bölümü başına comfort-value değerlerini içermektedir. Buna ek olarak pürüz yüksekliklerinin efektif değerleri ve verilen sınır değerlerin aşıldığı bölümler de ifade edilebilmektedir.

Birbirlerini takip eden ikili ölçüm akışlarının tekrarlanabilirliği, 75 değer çiftinin elde edildiği bir ölçüm yardımıyla Şekil 3.14’te görülmektedir. Burada ölçümler arasında 0.98’lik bir korelasyon katsayısı elde edilmektedir.

Değerlendirme esasları

İsviçre’de boyuna profildeki pürüzlülüğün değerlendirildiği değerlendirme skalası, ilk olarak LRST’nin önceki modeli olan, mekanik olarak ölçen Saab RST için geliştirilmiş ve veri elde edilmesi konusunda yapılan ek araştırmalar sonucunda LRST için kullanılmak üzere değiştirilmiştir.

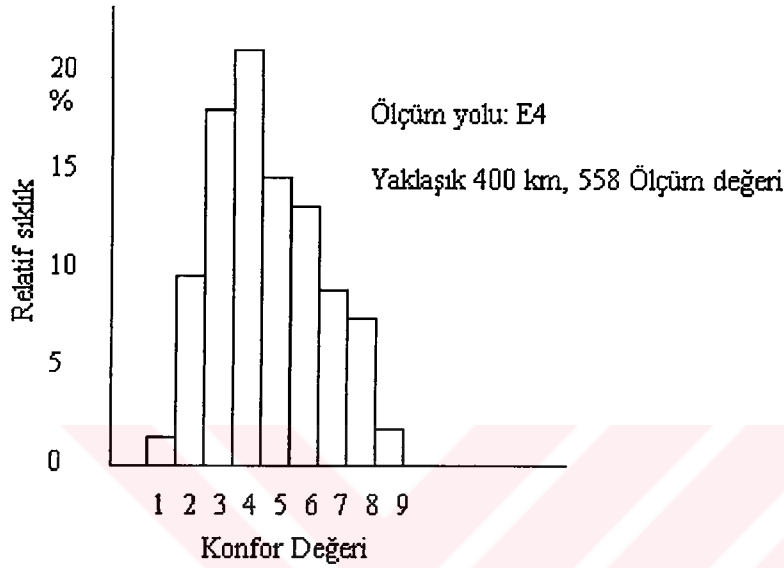
Değerlendirme için yapılan bir sıra deneyde, İsveç yolları üzerinde seyir konforu testleri, sonuçları 9 dereceli değerlendirme skalasına yerleştirilen dikey yöndeki taşıt gövdesi ivmesinin ölçümü ile aynı anda yapılmıştır. Burada comfort-value = 1 değeri çok iyi bir yolu ve konforu, comfort-value = 9 değeri çok kötü bir yolu ve konforu tarif etmektedir. Bu comfort-value değerlendirmesinin, aynı yollar üzerinde yapılan pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen pürüz yüksekliklerinin efektif değerlerine yerleştirilmesi sonucu yeni ölçülecek yolların değerlendirilmesi için bir referans olmaktadır.



Şekil 3.14 LRST’nin ölçümlerine göre pürüzlülük değerlendirmesinin tekrarlanabilirliği.

Değerlendirme esasları

Şekil 3.15, 400 km uzunluğundaki ölçüm yolunda, taşıt gövdesi ivmesi ölçümlerinin dokuz dereceli değerlendirme skalasında gösterilen sonuçları için oluşan sıklık dağılımını göstermektedir.

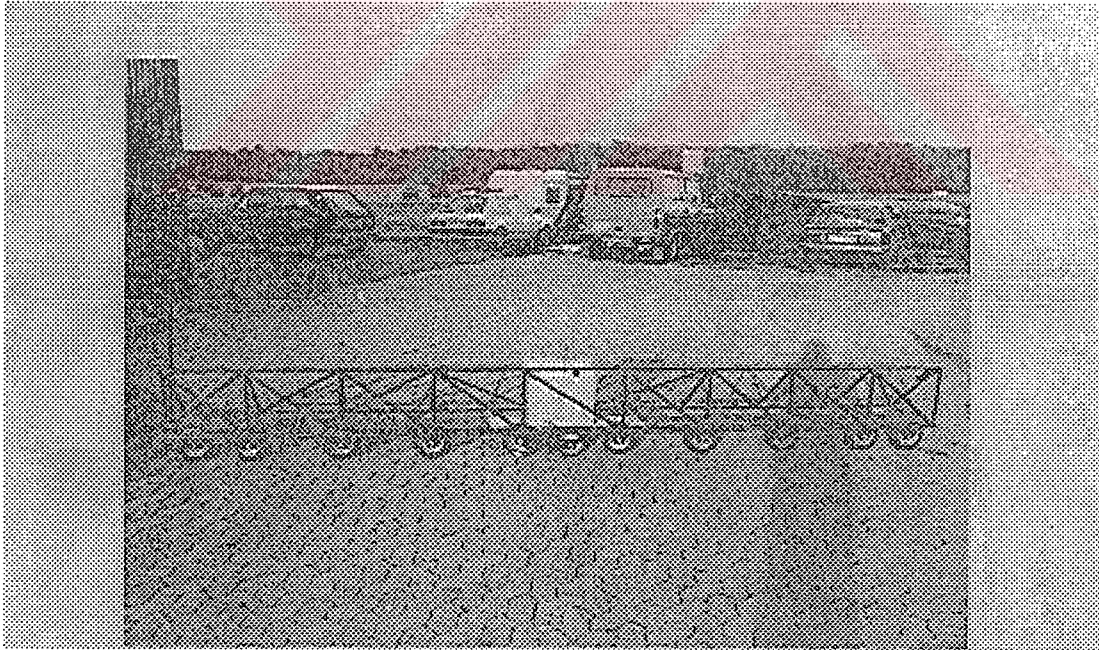
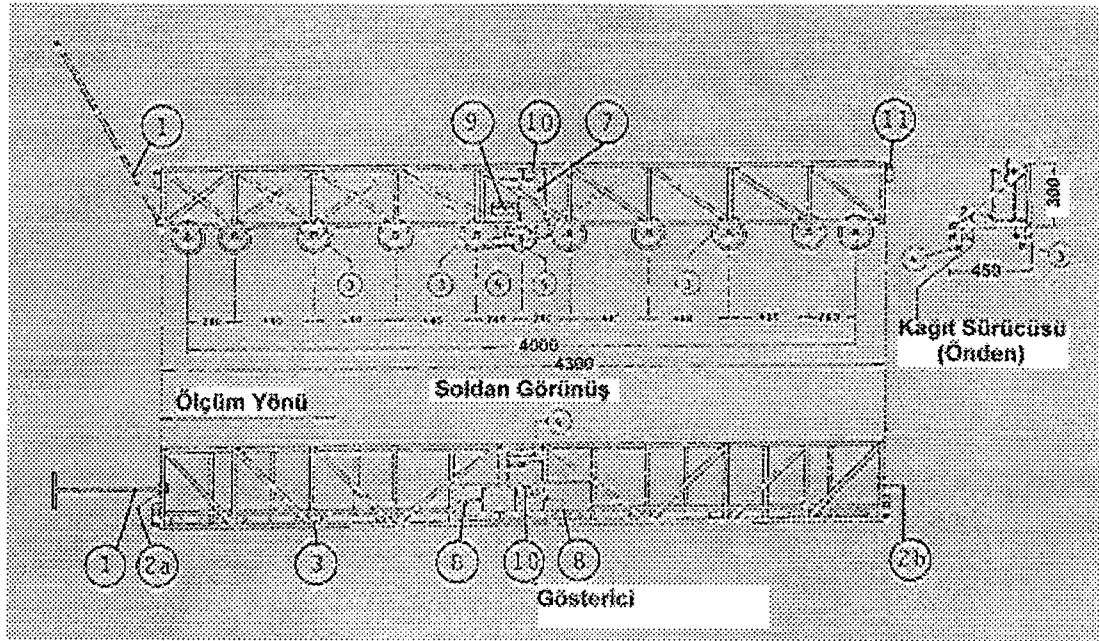


Şekil 3.15 Taşıt gövdesi ivmesi ölçümlerinden elde edilen comfort-value değerlerinin sıklık dağılımı

3.2.3. Planograf

Alet yapısı, ölçüm yöntemi

Planograf, boyuna doğrultuda 10 tekerleğin ard arda yerleştirilmiş olduğu bir boru kafes çerçevesinden meydana gelmektedir. Yaklaşık 4.3 m boyundaki aletin çerçevesinin ortasında bulunan bir destek tekerleği yana devrilmeyi engellemektedir. Şekil 3.16 alet üzerine genel bir bakış teşkil etmektedir.



Şekil 3.16 Planograf

a) Şematik yapı b) Toplu bakış

Ortada bulunan iki tekerleğin ortasında, yol yüzeyi ve aletin ön ve arka kısmındaki birer tekerleğin kalkması sonucu oluşan anlık referans çizgisi arasındaki mesafeyi kaydeden temas bir tekerleği bulunmaktadır.

Ölçüm aleti 3...5 km/h'lık bir ölçüm hızıyla ölçüm yolu üzerinde elle çekilmektedir. Yaklaşık 40 mm'lik bir ölçüm bölgesinde temas tekerleğinin dik yöndeki hareketleri, destek tekerleği tarafından tahrik edilen bir yazı tamburuna taşınmaktadır ve yola göre senkronize olarak 1:400'lük yol mesafesi ölçeğinde kağıt üzerine çizilmektedir. Ölçüm değeri akışı, ölçülen yüzey profili üzerinde dikkat çeken yerlerin hemen fark edilebilmesi için ölçüm seyri boyunca bir ekrandan izlenebilmektedir.

Yol yüzeyinin tekerlek alt kenarlarının 4 m uzunluğundaki bağlantı doğrularından bütün sapmaları, temas tekerleğinin ölçüm izinde ölçülmektedir. Profil çizimi yol yüzeyinin resmini, anlık ve tesadüfi referans çizgisi olarak tekerlek alt kenarlarının bağlantı doğruları şeklinde vermektedir.

Pürüzlülük ölçümünün hassasiyeti, boyuna profilin pürüz yapısına bağlı olmaktadır. Kısa dalga bölgesinde düzgünlüğün iyi olduğu durumda izafi sapmalar ≤ 1 mm'de bulunmaktadır. Yol mesafesi ölçümü $\leq \%0.5$ izafi sapmalar göstermektedir.

Yol üzerinde servis personeli tarafından seçilen tek bir izde ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm izi, aletin boyuna eksenine göre (seyir yönünde) planografin sistem çizgisinin yaklaşık 200 mm solunda bulunmaktadır..

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik, değerlendirme esasları

Değerlendirilecek ölçüm büyüklüğü bir pürüzün max derinliğidir. Ölçüm değeri çizimi üzerinde, aşımaları halinde ölçüm değeri akışında ekstrem değerlerin lokalize edilmesine ve böylece direkt olarak bir değerlendirmeye izin veren yükseklik çizgileri verilmektedir. Bu sınır çizgiler, çizim üzerinde sıfır çizgisi olarak verilen anlık referans çizgisine göre 4, 6, 8, 10, 12 ve 15 mm'lik mesafede bulunmaktadırlar.

Değerlendirme genellikle aşağıdaki adımlarla manuel olarak yapılmaktadır:

1. Profilin çizilmesi (ölçüm değeri alınması);
2. Bir sonuç protokolüne ekstrem değerlerin taşınması;
3. Sınır çizgilerin aşılma sıklıklarının toplanması;
4. Yolun onaylanması için bir eksiklik belirleme formülüne konulması;
5. Her 100 m'de bir başına bir sayı (pürüzlülük sayısı ≥ 4 mm) konularak yol yüzeyinin işaretlenmesi.

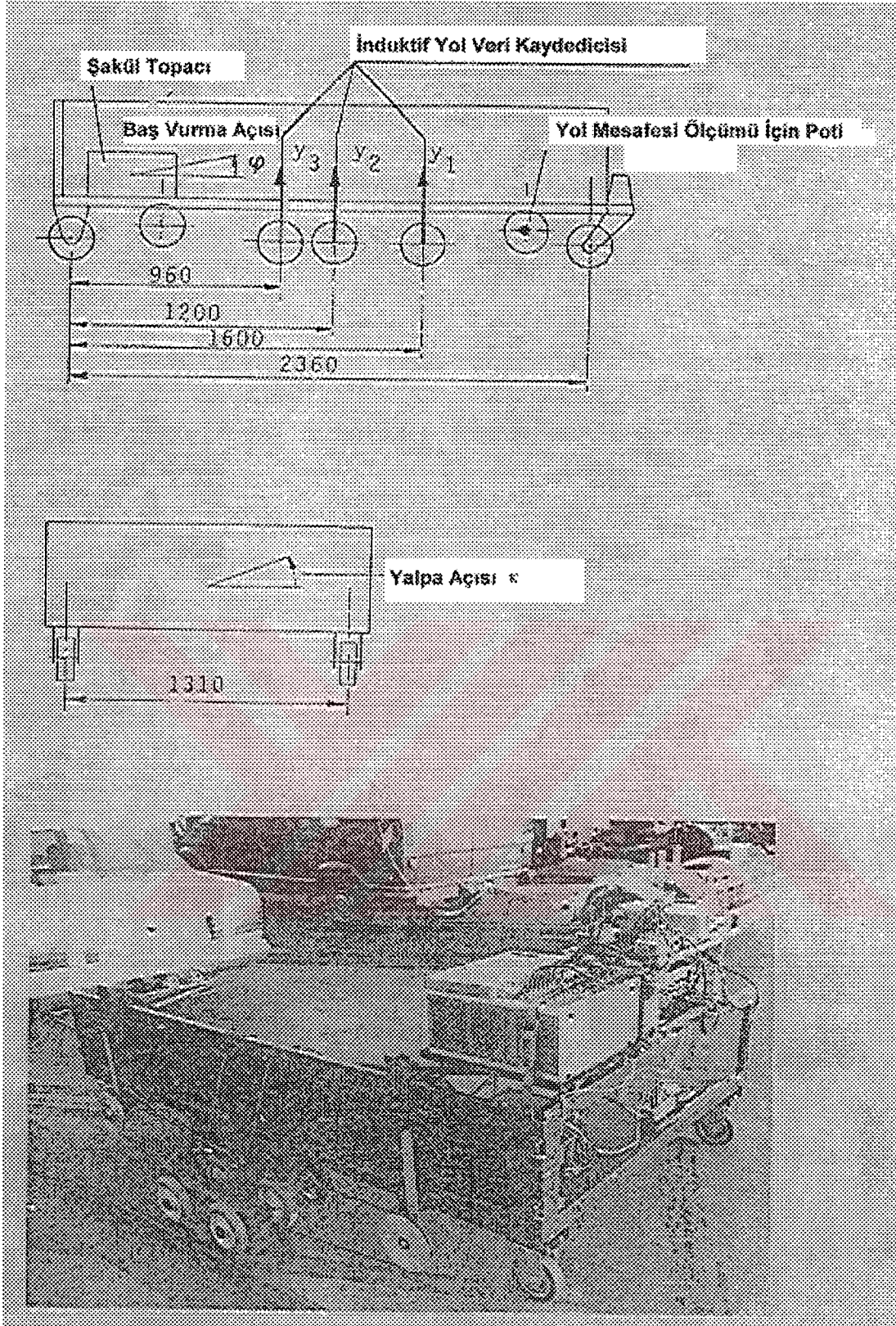
Çalışma adımı 4, pürüzlülüklerin değerlendirildiği ve eksikliklerin belirlenmesi için kullanıldığı yapılmış bir yolun kabulü için kullanılmaktadır. Çalışma adımları 3 ve 5 sonuç protokolünde verilmektedir.

Tekrarlanabilirlik şimdiye kadar araştırılmamıştır; bir değerlendirme temeli mevcut değildir.

3.2.4.DB-2 iz

Alet yapısı

Ölçüm sistemi, römork olarak bir kamyon tarafından çekilen düz, üçgen şeklinde taşıyıcı bir çerçeve üzerinde bulunmaktadır. İki izli römork, solda iki ve sağda iki olmak üzere toplam 4 tekerlek üzerinde ilerlemektedir, Şekil 3.17.



Şekil 3.17 DB-2 iz ölçüm aleti (laboratuar yapısı)

a) Şematik yapı b) Kısmi bakış

Üzerinden geçilen yol pürüzleri, sol yuvarlanma izinde ard arda yerleştirilmiş üç temas tekerleğinden dikey doğrultuda ölçüm yapan yol vericisine taşınmaktadır. Ölçüm sırasında taşıyıcı çerçevenin (anlık referans çizgisi olarak) başlangıç şartlarından elde edilen referans düzlemine göre konumu, yalpa ve baş vurma açılarının şakül topacı yardımıyla ölçülmesi sonucunda belirlenmekte ve her iki yuvarlanma izindeki pürüzlülüğün elde edilmesi için kullanılmaktadır.

Yol mesafesi ölçümü, lastik kayış ile tahrik edilen bir tekerlek yardımıyla yapılmaktadır. Belirli bir çapa sahip olan bu tekerleğin devir sayısının tespit edilmesi ile yol mesafesi hesaplanabilmektedir.

Ölçüm yöntemi

Ölçüm sırasında üç yol veri kaydedicisi, ± 50 mm'lik ölçüm bölgesinde $< \%2$ 'lik ölçüm hatası göstermektedir. Yalpa açısı χ , baş vurma açısı ϕ ve sol ölçüm izinin üç pürüzlülük sinyali h_A , h_B ve h_C ölçülmektedir. Tablo 3.4'te açı ölçümü için ölçüm hassasiyeti gösterilmektedir.

Tablo 3.4 DB-2 iz ölçüm aletinin açı ölçüm hassasiyeti

	Yalpa κ	Baş vurma ϕ
Sfır konumu	$6' = 2.3$ mm	$6' = 4.1$ mm
Çözünme	$15' = 5.7$ mm	$5' = 3.4$ mm

Yol mesafesi ölçümünde, ölçüm aletindeki kayma nedeniyle yaklaşık $\%4$ 'lük hata meydana gelmektedir.

Ölçümün başlangıcı öncesinde, başlangıç şartı olarak bir referans düzlemi belirlenmektedir. Pürüzlülük değerleri zamana bağlı veriler olarak ölçülmektedir. Zamana bağlı veriler, ölçüm hızının yaklaşık 15 km/h'lık olduğu dikkate alınarak yola bağlı değerlere çevrilmektedirler. Buradan, birbirlerine göre 0.04 m'lik mesafede bulunan ölçüm noktalarından oluşan ölçüm yolunun pürüzlülük profili belirlenmektedir. Üç yol veri kaydedicisinin birbirlerine olan mesafeleri yardımıyla yaklaşık olarak 0.08 m'den büyük pürüz dalga boyları belirlenebilmektedir.

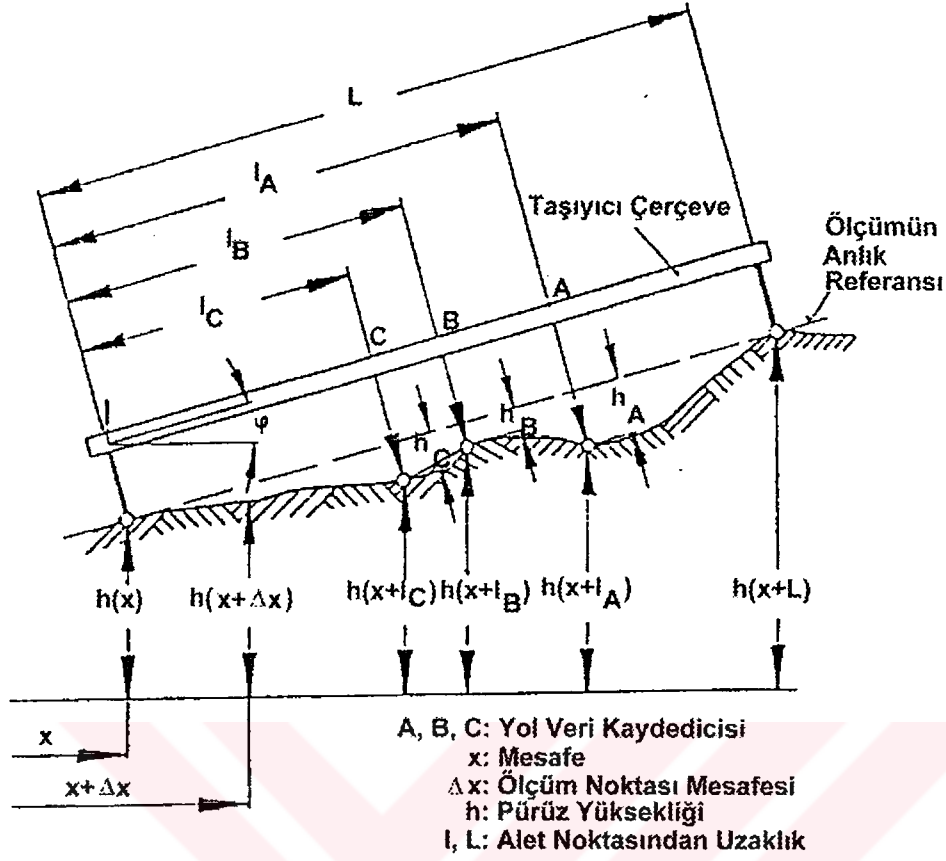
Yol veri kaydedicisinin üç sinyali h_A , h_B ve h_C 'den ve ölçüm aletinin φ baş vurma açısından (3.17) ve (3.18) denklemlerine göre sol ölçüm izinin pürüzlülüğü elde edilmektedir:

$$h_i(x + l_i) = h(x) + l_i \sin \varphi(x) + h_i(x) / \cos \varphi(x) \quad (3.17)$$

burada $i = A, B, C$

$$h(x+L) = h(x) + L \sin \varphi(x) \quad (3.18)$$

Şekil 3.18, ölçüm prensibini göstermektedir. Şekil 3.18'den ve (3.17) ve (3.18) denklemlerinden, ölçüm başında bir referans yüzeyinin belirlenmesi gerektiği görülmektedir.



Şekil 3.18 DB-2 ölçüm aletiyle pürüzlülük ölçümü

0.04 m ölçüm noktaları için söz konusu dört ölçüm değeri, ancak bir L mesafesinden sonra (3.17) ve (3.18) denklemlerine göre elde edilmektedir. Bu dört değer, (3.19) denklemi ile bir araya getirilmektedir ve pürüz yüksekliğinin tahmini değeri olarak pürüzlülük profilinin ifadesi için kullanılmaktadır.

$$h(x + \Delta x) = \frac{1}{4}(x) \sum_{i=1}^4 h_i(x + \Delta x) \quad (3.19)$$

Sağ ölçüm izinin h_r pürüzlülükleri., ölçüm aletinin χ yalpa açısı yardımıyla sol izin h_l pürüzlülük profilinden hesaplanmaktadır:

$$h_r(x) = h_l(x) + s \sin \chi(x) \quad (3.20)$$

Burada aletin iz uzunluğu $s = 1.31 \text{ m}$ 'dir.

Pürüzlülük verileri manyetik bantlar üzerine kaydedilmektedir.

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik, değerlendirme esasları

Değerlendirme ölçüm aletinde değil, belirli bir yere yerleştirilmiş bir veri işleme tesisatında yapılmaktadır. Pürüz genliklerinin spektral yoğunluğu, koherans fonksiyonu ($\hat{=}$ her iki yuvarlanma izinin pürüzlülüğünün birbiriyle bağlantısı) ve ölçüm izleri arasındaki faz açısı akışı elde edilmektedir; $0.1 \dots 0.82 \text{ m}$ 'lik bir dalga boyu bölgesinde hesap yapılmaktadır.

Bu ölçüm sistemi 1983'te yapılan karşılaştırma ölçümleri sırasında henüz geliştirilme aşamasında bulunduğundan, ilgili kaynakta tekrarlanabilirlik için sonuçlar ve pürüzlülük değerlendirmesi için ifadeler bulunmamaktadır.

Günümüze kadar elde edilen ölçüm sonuçları, taşıt davranışının hesapsal simülasyonunda başlangıç büyüklüğü olarak kullanılmıştır.

3.2.5.FMPA ve BAST'ın profil eğim ölçüm aletleri

FMPA ve BAST'ın profil eğim ölçerleri büyük ölçüde benzer yapıya sahip oldukları için ayrı tariften kaçınılmıştır.

Alet yapısı

Ölçüm aleti, seyir çizgisinin her iki izinde boyuna profil eğiminin belirlenmesi için iz başına birer aletten, izafi iz doğrultusundaki oluk derinliğinin elde edilmesi için diğer bir aletten ve aletleri çeken ve ölçüm büyüklükleri için kayıt aletlerini taşıyan bir çekici taşıttan meydana gelmektedir. Şekil 3.19’da profil eğim ölçüm aleti görülmektedir.

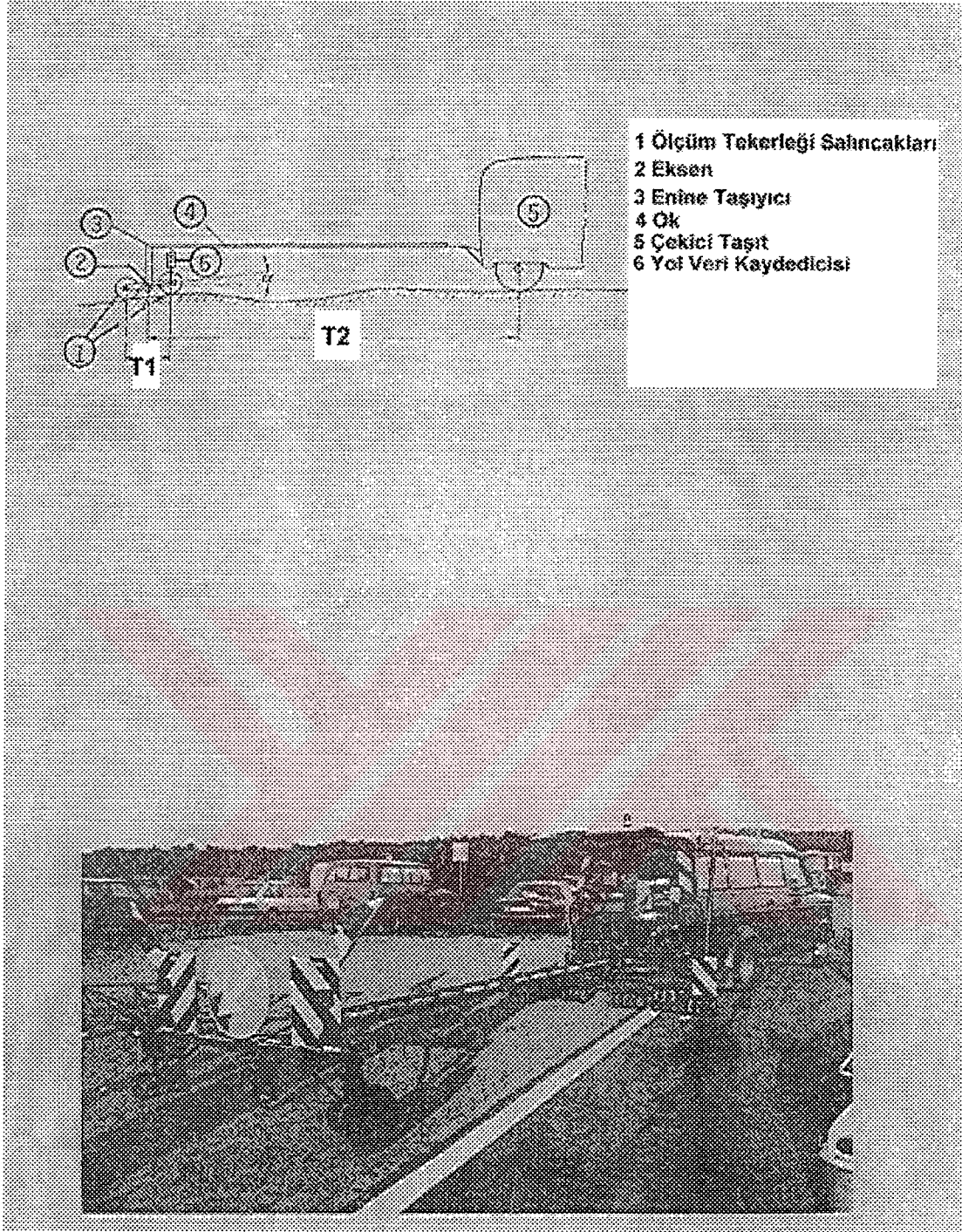
Eğim ölçüm römorku, her biri bir orta eksen çevresinde (2) dönebilir olarak ilerleyen iki yuvarlanma çiftinden (1) oluşmaktadır. Yaklaşık 1.80 m enindeki enine doğrultudaki taşıyıcının (3) (~ ortalama iz doğrultusundaki oluk mesafesi) solunda ve sağında bulunan bu iki ölçüm tekerleğinin salıncakları, ortada bulunan ok (4) yardımıyla çekici taşıt tarafından ilerletilen ölçüm sistemini oluşturmaktadır. Oka göre ölçüm tekerleği salıncaklarının açılarının ölçülmesi için her iki salıncak ve ok arasına yol veri kaydedicileri (6) yerleştirilmiştir.

Ölçüm yöntemi

Ölçüm büyüklüğü, pürüzlülük nedeniyle ölçüm tekerleği salıncığının oka göre konumunu değiştirdiği α açısıdır. Burada, bir salıncığın her iki tekerlek ekseninin birbirlerine olan mesafesinin ok boyuna oranı $l_1 / l_2 \ll 1$ olduğu için, okun çekici taşıttın dik hareketlerine bağlı konum değişiklikleri ihmal edilebilmektedir. α açısı, her iki salıncak tarafından ölçüm yolu üzerinde sürekli olarak ölçülmektedir ve çekici taşıttaki ölçüm protokolüne kaydedilmektedir.

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik

Ölçüm protokolü, elde edilen diyagramı sayısal değerlere çeviren bir alet yardımıyla bir metrelik ölçüm yolu için yuvarlanma izi başına yaklaşık 5 değer ile ekranda gösterilmektedir. Bu verilerden, istenilen uzunlukta seçilebilen bir ölçüm bölümü için - genelde 200...500 m- her iki ölçüm izindeki eğim değerlerinin varyantı elde edilmektedir. Her iki izdeki eğim değerlerinin varyantının ortalaması, boyuna profildeki pürüzlülüğü ifade eden büyüklük olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.19 BAS ve FMPA'nın profil eğim ölçüm aleti

a) Eğim ölçüm aletinin şematik yapısı

b) Toplu bakış

Böylece yol değerlendirmesi için sonuç ifadesi, aşağıda anlatılan sürülebilirlik değerleri yanında eğim varyantlarını, ölçüm bölümünün yer ifadelerini ve -istenildiği takdirde- her iki ize ait iz doğrultusundaki oluk derinliğinin ortalama değerini içermektedir.

Değerlendirme esasları

Boyuna profildeki eğim varyantının kullanılması ile yol düzgünlüğünün değerlendirilmesi, p sürülebilirlik katsayısı yardımıyla yapılmaktadır. Bu değere, (3.14) denklemine göre, iz doğrultusundaki oluk derinliklerinin ölçüm değerleri ve ölçüm yolunun durumu da etki etmektedir.

p sürülebilirlik katsayısı $5 \geq p \geq 0$ bölgesinde bulunmaktadır. Bu bölgede ölçek genelde lineer olmamaktadır ve alt sınır yalnızca teorik olarak sıfırın altına düşebilmektedir. $p = 5$ ile ideal düzgün ve kesinlikle hasarsız, $p = 0$ ile ideal pürüzlü, hasarlı ve hiçbir şekilde kullanılamaz yol ifade edilmektedir.

Yol durumunun değerlendirilmesinde sürülebilirlik katsayısına bağlı olarak aşağıdaki sınıflandırma yapılmaktadır:

$5.0 \geq p \geq 4.0$ çok iyiden iyiye kadar,

$4.0 \geq p \geq 3.0$ iyiden tatmin ediciye kadar,

$3.0 \geq p \geq 2.0$ tatmin ediciden kötüye kadar,

$2.0 \geq p \geq 1.0$ kötüden çok kötüye kadar.

Sürülebilirlik katsayısı olarak $p = 1.5$ değerinin altında bir değere sahip olan bir yol, tecrübelerle göre artık trafiğe elverişli olmamaktadır.

Değerlendirme için belirtilen sınırlar kesin değerler teşkil etmemektedir. Bu değerler, ölçüm yolu üzerinde yapılacak ölçümlerde verilen sınır şartlara bağlı olmaktadır. Almanya’da FMPPA tarafından yapılan ölçümlerden sonra yol sınıflarına göre bu sınır değerler elde edilmiştir. Buna göre otobanlarda $p \geq 4.3$, milli yollarda $p \geq 4.0$ ve diğer yollarda $p \geq 3.8$ değerleri elde edilirse ilgili yollar kabul edilebilir (eksiksiz) sayılmaktadır.

3.2.6.Açı ölçer ISETH

Alet yapısı

Açı ölçme aleti, aralarında 1 m uzaklıkla 3 tekerleğin ard arda bağlı olduğu yaklaşık 2.3 m uzunluğunda, birbirlerine paralel olarak yerleştirilmiş iki adet katı U profilden oluşmaktadır. Bu tekerlekler hem ilerleyen tekerlek, hem de temas tekerleği fonksiyonunu yerine getirmektedir. Ölçüm aletinin çekici taşıta bağlanması ile ölçüm aletin yan yöndeki stabilitesi sağlanmış olmaktadır, Şekil 3.20.

Dik yönde itilebilir olarak ilerleyen üç temas tekerleği, yol yüzeyinin pürüzlülüğünü ilgili ölçüm sinyallerini oluşturan induktif yol veri kaydedicilerine iletmektedir. Arka tekerlek, dikey eksen çevresinde sabit olarak bulunmaktadır. Her iki ön tekerlek dönebilir şekilde çerçeveye bağlı olmaktadır.

Ölçüm yöntemi

Üç yol veri kaydedicisinin yaptıkları mesafe ölçümü sonucunda, alt bölüm 3.1.3’te tarif edilen yönteme göre, pürüz açısı değeri elde edilmektedir. Pürüz açısı değeri, (3.12) denkleminde göre, yol veri kaydedicisinin ± 50 mm’lik çalışma aralığı aşılmadığı sürece, açı ölçümünün referans çizgisini oluşturan kirişin konumundan bağımsız olmaktadır. Pürüz açısı değerleri, -yol mesafesi ölçüm aleti yardımıyla- 25 mm’lik adım uzunluğunda dijital olarak belirlenmektedir ve çekici taşıtta bulunan bantlar üzerine kaydedilmektedir. Pürüz açısı değerleri aynı anda bir veri ekranında da gösterilebilmektedir.

Yol mesafesi ölçümü için ifadeler bulunmamaktadır. Ölçüm hızı, pürüz yüksekliğine bağlı olarak 10...25 km/h bölgesinde seçilebilmektedir.

Açı ölçümünün hassasiyeti, 0/oo 1/100'den (mutlak) daha iyi olmaktadır. Yol mesafesi ölçümünde $\pm 0/oo 0.5$ 'ten daha küçük olan izafi hatalar ortaya çıkmaktadır.

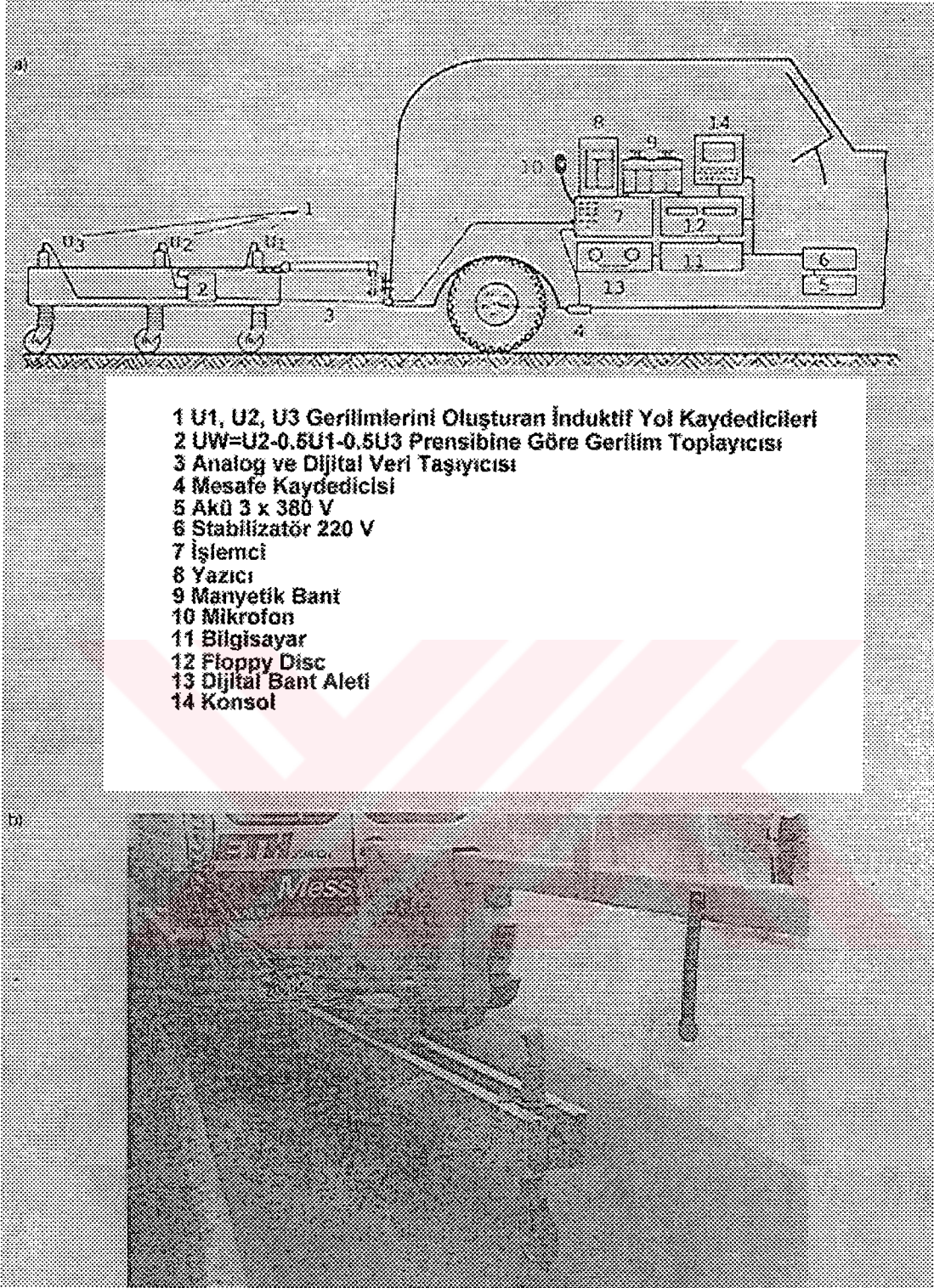
Ölçüm izi, yaklaşık 30 cm enindeki açı ölçüm aletinin ortasında bulunmaktadır. Römork, çekici taşıtın boyuna ekseninin 45 cm solunda veya sağında çekici taşıta asılı bulunmaktadır. Ölçüm izi, genel olarak bir yol çizgisinin sağ yuvarlanma izidir.

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik

Çekici taşıtın veri işleme tesisatı yardımıyla

- pürüzlerin W açı değeri;
- sahip oldukları açı değerlerinin, İsveç normlarına göre belirlenmiş olan sınır değerlerden büyük olduğu kısmi yolların bütün ölçüm yoluna oranları;
- kısmi bölümlerin açı değerlerinin s_w standart sapmaları;
- örneğin köprü gibi yapıların dikkate alınarak bütün yol için S_w açı değerlerinin standart sapmalarının ortalama değeri

değerlendirilmektedir.



Şekil 3.20 Açık ölçer ISETH'in yapısı

a) Şematik yapı

b) Kısmi bakış

Bu değerlere götüren önemli adımlar:

- Ölçüm parametrelerinin (örneğin yol mesafesi ifadeleri) kontrolü ve gerekirse düzeltilmesi;
- Bütün ölçüm yolunun 250 m'lik kısmi bölümlere ayrılması;
- Üzerlerinde, örneğin köprüler gibi lokal pürüzlülüklerin bulunduğu kısmi bölümlerin işaretlenmesi;
- Ortalama değerlerin, standart sapmaların ve verilmiş olan sınır değerlerin aşıldığı 250 m bölümlerinin bütün ölçüm yoluna oranlarının hesaplanması ve tablo şeklinde ifade edilmesi.

Sonuçlar genelde

- açı değerlerinin diyagramları ve
 - SW standart sapmalarının ve sınır değerlerinin aşıldığı yol kısımlarının tabloları
- şeklinde verilmektedir.

Bu pürüzlülük ölçüm yönteminin tekrarlanabilirliği şu verilerle ifade edilmektedir: Almanya'da 8 yıl süresince yıllık olarak ölçülen bir yolun 16 kısmi bölümünün sw değerlerinin varyasyon katsayısı %1.88 ve 6.09 arasında bulunmuştur. 2 km uzunluğundaki ölçüm yolu üzerinde varyasyon katsayısı %3.6 olmuştur. Yol mesafesi ölçümünün varyasyon katsayısı %0.014 olmuştur.

Değerlendirme esasları

Ölçüm sonuçlarının değerlendirmesi, önceden belirtilen İsveç normlarını baz almaktadır. Yollar için kabul ve pürüzlülük sınır değerleri, 80 km/h'ye kadar olan ve bunun üzerinde bulunan işletme hızlarında verilmektedir. Pürüzlülüğün skalalanması sayısal olmaktadır. Skalalama, açı değerlerinin standart sapmaları normlanmış değerlere göre orantılı olarak yapılmaktadır. Skala sıfır değeriyle başlamaktadır ve yol

düzgünlüğünün kötüleşmesiyle artmaktadır. Lokal pürüzlülüğe sahip kısmi bölümlerde, üzerlerinde sahip oldukları aç ı değerlerinin verilen sınır değerlere ulaştığı kısmi bölümlerin bütün yola göre oranları değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme de sayısal skalalama şeklinde yapılmaktadır.

3.2.7.BI

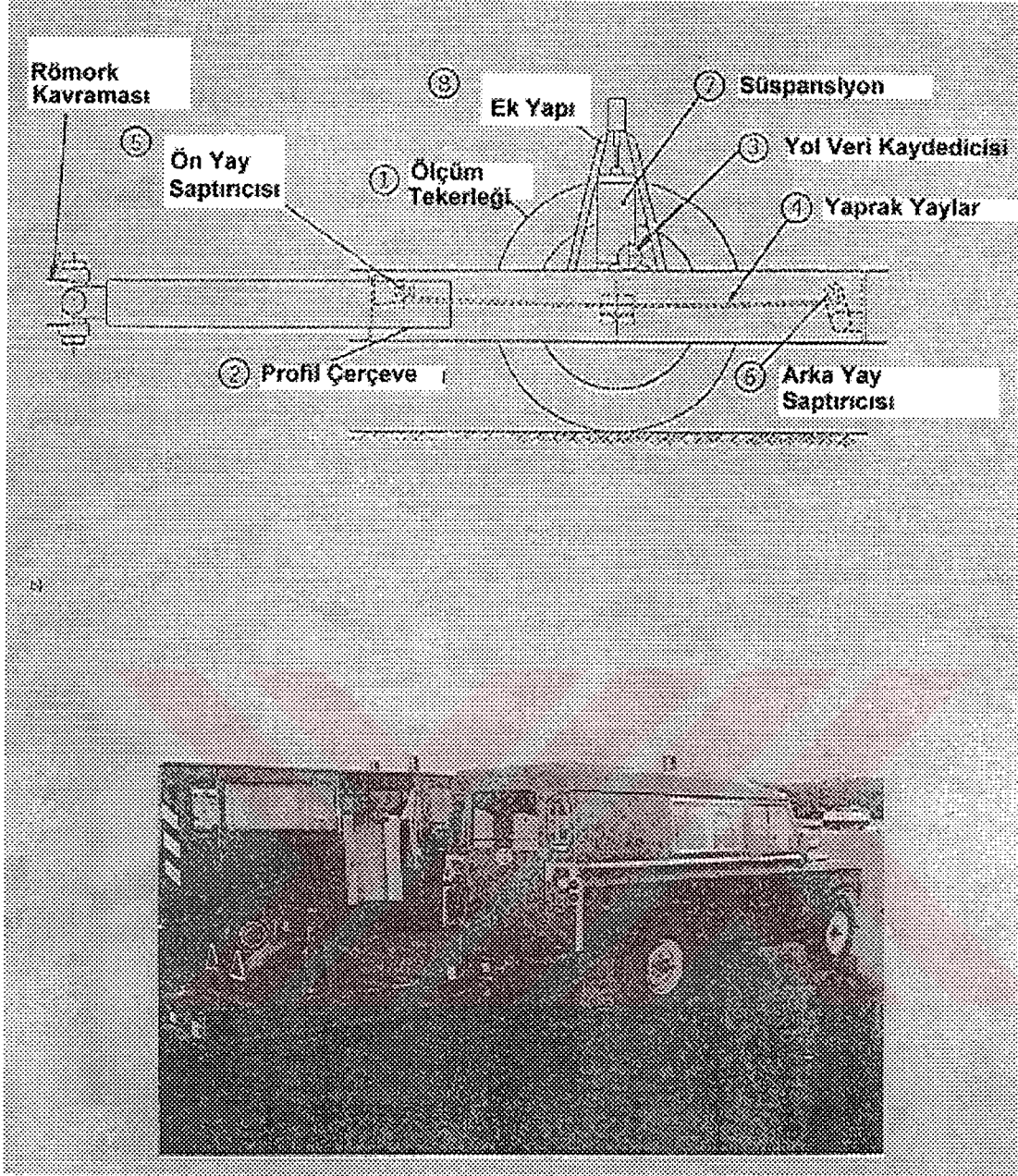
Alet yapısı

TRRL tarafından geliştirilen ve Western Ltd. Tarafından işletilen BI, tek tekerlekli bir ölçüm römorku ve değerlendirme ve ölçüm değeri kayıt aletleri için çekici ve taşıyıcı taşıttan oluşmaktadır, Şekil 3.21.

Ölçüm sisteminin önemli bölümleri ölçüm tekerleği (1), bu tekerleğin asılı bulunduğu profil çerçeve (2) ve tekerleğin çerçeveye göre dik hareketlerinin kaydedilmesi için kayıt aleti (3) olmaktadır. Tekerlek, çerçeveye her iki yanda boyuna doğrultuda asılı olarak bulunan yaprak yaylar (4) üzerine yerleştirilmiştir (ön saptırıcı (5) dönebilir, arka saptırıcı (6) boyuna doğrultuda itilebilir şekilde bulunmaktadır). Rahatsız edici salınım hareketlerinin sönümlenmesi için her iki yay birer sönümleyici (7) üzerinden çerçevenin ek çerçevesine (8) dayanmaktadır.

Ölçüm tekerleğinin kalkma hareketlerinin (3) belirlenmesi için bulunan induktif alıcı yanında, tekerlek eksen ı üzerinde bulunan diğ er bir alıcı, kat edilen mesafenin ve zaman ölçümü yardımıyla hız ifadelerinin hesaplandığı dönme sayısını kaydetmektedir.

Ölçüm sisteminin salınım davranışının (ve böylece ölçüm sonuçlarının) tekerlek hava basıncına göre değ işebilmesi nedeniyle ölçüm tekerleğinin 2.06 bar olarak verilmiş lastik hava basıncının tam olarak korunulmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.21 BI

- a) Şematik yapı
- b) Toplu bakış

Sistemin salınım davranışı nedeniyle pürüzlülük ölçümünün hassasiyeti için genel ifadelerin verilmesi mümkün olmamaktadır. Yol mesafesi ölçümü, normal şartlar altında % 0.25'lik bir izafi hatay ile yapılmaktadır. Olması gereken ölçüm hızına göre oluşan küçük sapmalar, matematiksel bir düzeltme yöntemi yardımıyla ölçüm sırasında elimine edilmektedir (ileride).

Normalde ölçüm römorkunun, römorkun orta ekseninin ölçüm izi üzerinde bulunduğu en dış sağ yol çizgisinin sağ yuvarlanma izinde ölçüm yapılmaktadır.

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik

Toplamı alınan salınım yolları, -1m'lik adımlarla 30 m'den 1000 m'ye kadar olan bir bölgede belirlenebilen ve genelde 100 m uzunluğunda olan- serbest olarak seçilebilen ve ölçüm akışı sırasında değişebilen bir değerlendirme bölümü için kağıt üzerine basılmaktadır. Bölümler arasında karşılaştırmalar yapabilmek için bir kısmi bölümün ölçüm sonucu, pürüzlülük indeksi olarak, km yol başına cm salınım yoluna çevrilmektedir. Kullanılan sonuç ifadesi bölgesi 100 (düz yol) ve 500 (pürüzlü yol) cm/km arasında bulunmaktadır. Bu sınır değerlerin belirlenmesinde dayanan temel üzerine bilgiler bulunmamaktadır.

Bir ölçüm bölümünün sonuç ifadesinde fark edilemeyecek olan tekil engeller, aşılmaları halinde engellerin ölçüm değeri akışında lokalize edilebildiği sınır değerlerin operatör tarafından verilmesi ile belirli hale getirilmektedir. Ölçüm akışı boyunca değeri değişebilen bu sınır değerler, 15 mm'den 89 mm'ye kadar olan aşağı yöndeki hareket bölgesinde küçük hesaplama tesisatına verilmektedir. Sınır değere ulaşırsa veya bu değer aşılsa, ilgili yol mesafesi ifadesi ve ölçüm bölümü başına aşılmaların toplam aşılma sayısı ile sınır değer aşılma yükseklikleri ayrıca sonuç ifadesinde bulunmaktadır.

Olması gereken ölçüm hızına göre oluşan ve bu şekilde sonuçların karşılaştırılabilirliğini sınırlandıracak olan sapmalar matematiksel olarak düzeltilmektedir. Bu düzeltme yöntemi, bütün pürüzlülük indeksi ifadelerini 32 km/h'lık olması gereken hızın korunmasıyla oluşan değerlere çevirmektedir.

24 km/h...48 km/h arasındaki hız bölgesinde bir v_1 seyir hızında bir r_{v1} pürüzlülük indeksi elde edilirse, buradan (3.21) denklemi ile yapılan bir çevirme sonucunda bir $r_{32\text{km/h}}$ pürüzlülük indeksi ortaya çıkmaktadır:

$$r_{32\text{km/h}} = (v_1 / 32)^n (r_{v1} - 47) + 47, \quad (3.21)$$

burada $32 \text{ km/h} \leq v \leq 48 \text{ km/h}$ hız bölgesinde

$$n = 1.53 - 0.0033 v_{32} \quad (3.22a)$$

burada $24 \text{ km/h} \leq v \leq 32 \text{ km/h}$ hız bölgesinde

$$n = 0.6 \quad (3.22b)$$

olmaktadır.

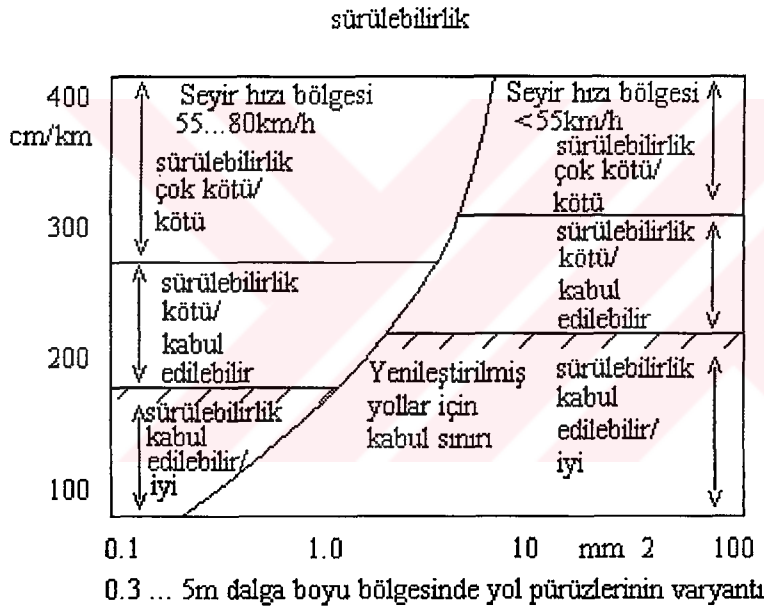
Sonuç ifadesi, değerlendirme bölümü başına r_{32} km/h pürüzlülük indeksi yanında ölçüm başından itibaren kat edilen yol mesafesini, tekil engellerin belirlenmesi için seçilen sınır değeri (ilgili bölümdeki ölçülen değer, yol mesafesi ifadesi ve sınır değer toplam aşılma sayısı dahil olmak üzere) ve kısmi ölçüm yolu için seyir hızının ortalama değerini içermektedir.

Pürüzlülük indeksi belirlenmesinin tekrarlanabilirliği, iz tutmadaki (diğer ölçüm aletleri için de geçerli olan) problemler nedeniyle yalnızca belirli şartlar altında verilebilmektedir. Aynı çekici taşıt tarafından çekilen, ardarda ilerleyen iki BI'nin ölçüm değerleri $\leq \%1.5$ 'luk sapma göstermiştir.

Değerlendirme esasları

Pürüzlülük indeksi, yeni yapılmış olan yolların kabulü ve trafik altında bulunan yolların incelenmesinde kullanılmaktadır. Bu konuda, İngiltere’de çeşitli yol sınıfları için seyir hızı 65 km/h’nın altında ve 65’ten 80 km/h’ye kadar olmak üzere bir değerlendirme yapılmıştır.

Şekil 3.23, hıza bağlı her iki yol kategorisi için r_{32} km/h pürüzlülük indeksi ve bu indeksle ilgili olan 0.3...5 m’lik dalga boyu bölgesindeki pürüz yüksekliklerinin varyantı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 3.23 Farklı seyir hızı bölgeleri için pürüzlülük indeksi ve sürülebilirlik arasındaki ilişki

3.2.8.Bayern’in pürüz etki aleti

Alet yapısı

Bayern’in pürüz etki aleti, BI’ye benzer şekilde, boyuna profildeki yol pürüzlülüğünün salınım kabiliyeti olan bir ölçüm sistemi üzerine etkisini ölçmektedir.

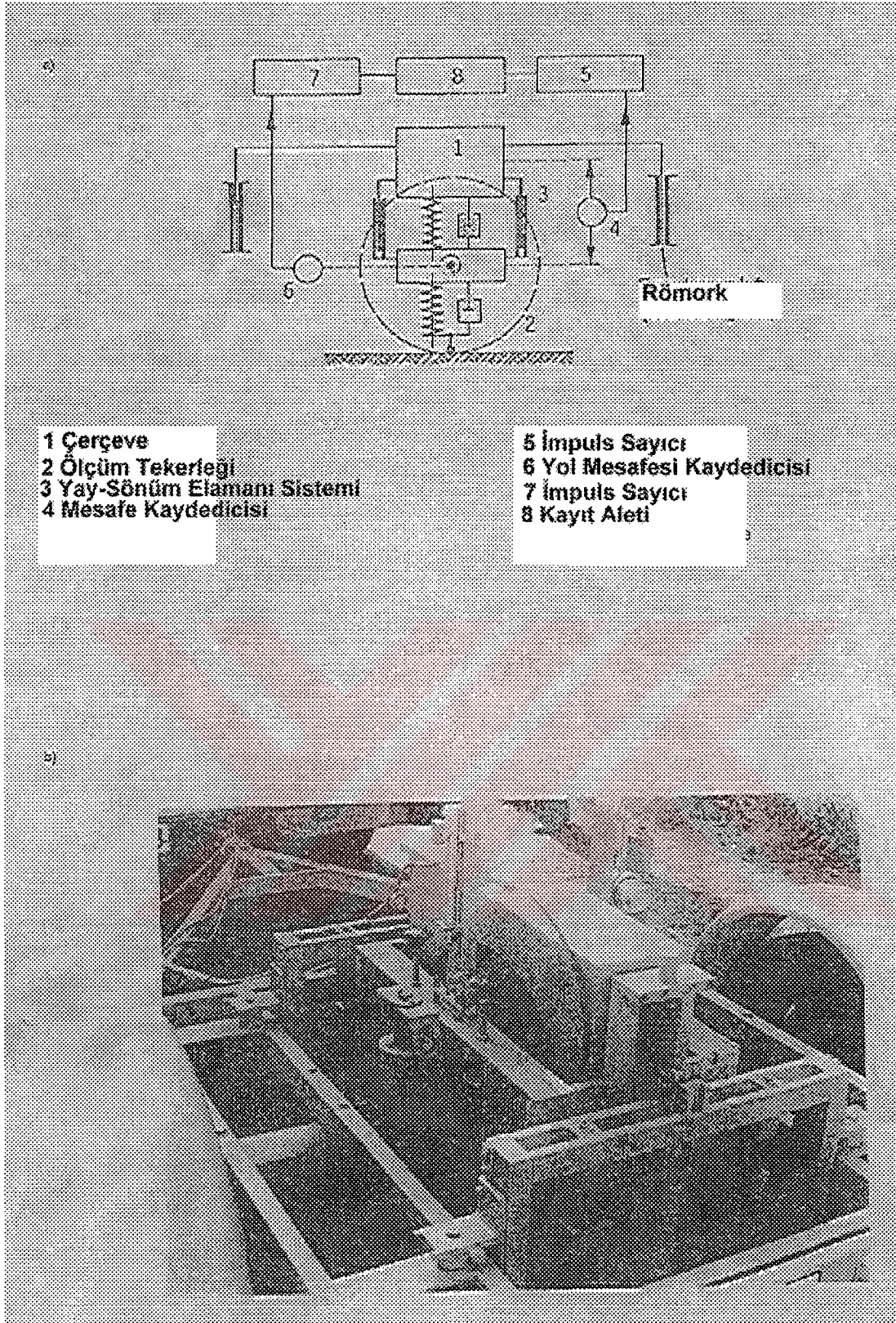
Ölçüm sistemi tek akslı römorktan oluşmaktadır, Şekil 3.24. Römork taşıyıcı çerçeve (1), ölçüm tekerleği (2) ve çerçevedeki yay-sönüm elemanı sistemi (3) ve mesafe ölçüm aletinden (4) (5) (BI'ye benzer şekilde) oluşmaktadır. Bir yol mesafesi ölçüm aleti (6) (7) ve çekici taşıtta bulunan kayıt aletleri (8) yapıyı tamamlamaktadır.

Ölçüm yöntemi

Pürüzlerin üzerinden geçerken tekerlek eksenini ve çerçeve arasında oluşan dikey yöndeki izafi hareketler, bir halat ceri ve bir halat kasnağı yardımıyla dönme hareketlerine çevrilmekte ve impuls vericiye (4) iletilmektedir. Bu, mm dik yol başına sadece bir yönde sayan sayıcıya (5) bir impuls vermektedir. Bir değerlendirme bölümünde oluşan her kalkma hareketinin impuls toplamalarının toplamı elde edilmektedir. Bu toplam bir kilometre yol mesafesi için olan değere çevrilmektedir ve sonuç olarak verilmektedir. Bir ölçüm bölümündeki dikey yöndeki hareketlerin toplamına göre ölçüm hassasiyeti $\leq 1\text{mm}$ olmaktadır.

Yol mesafesi vericisi (6), 2 mm'lik hareket başına sayıcı (7) tarafından kaydedilen bir impuls üretmektedir. Yazıcı, bu şekilde belirlenen yol mesafesine göre sonuç vermektedir. Sayıcı (7), değeri belirlenmiş bir seviyeye ulaşınca salınım mesafesi ölçüm değerleri kaydedilmektedir ve veriler yazıcı yardımıyla basılmaktadır.

Yol mesafesi ölçümünün hassasiyeti için ifadeler bulunmamaktadır.



Şekil 3.24 Bayern'in pürüz etki aleti

a) Şematik yapı

b) Kısmi bakış

Ölçüm hızı genel olarak 60 km/h olmaktadır. Ölçüm aletinin boyuna ekseninin direkt olarak ölçüm izi üzerinde bulunduğu bir yol çizgisinin sağ yuvarlanma izinde ölçüm yapılmaktadır.

Değerlendirme, tekrarlanabilirlik, değerlendirme esasları

En az 25 m'lik min uzunluğunda olmak kaydıyla, istenilen uzunlukta seçilebilen yol bölümlerinde sonuç elde edilebilmektedir. Sonuç ifadesi, km yol başına cm olarak toplam salınım yoluna çevrilmektedir. Bu değer, ortalama seyir hızının da belirtilmesiyle bir protokolde verilmektedir. Ölçüm değerlerinin diğer bir şekilde işlenmesi genelde yapılmamaktadır.

İşletici verilerine göre 100 m uzunluğundaki bir yol bölümünde yapılan tekrarlanabilirlik ölçümlerinde 173 cm/km ortalama değerde $\pm 4,0$ cm/km bölgesinde bulunan standart sapmalar ortaya çıkmaktadır. Bu %2.3'lük bir varyasyon katsayısına eşit olmaktadır.

Ölçüm sistemi üzerine henüz yeterli pratik bilgiler bulunmamaktadır. Aynı şekilde bir değerlendirme temeli ve sonuç ifadesinin bir değerlendirmesi bulunmamaktadır.

3.2.9. APL

Alet yapısı

Ölçüm aleti, ölçüm römorku ve çekici taşıtta taşınan veri işleme aletlerinden oluşmaktadır. Şekil 3.25 ölçüm sistemini göstermektedir.

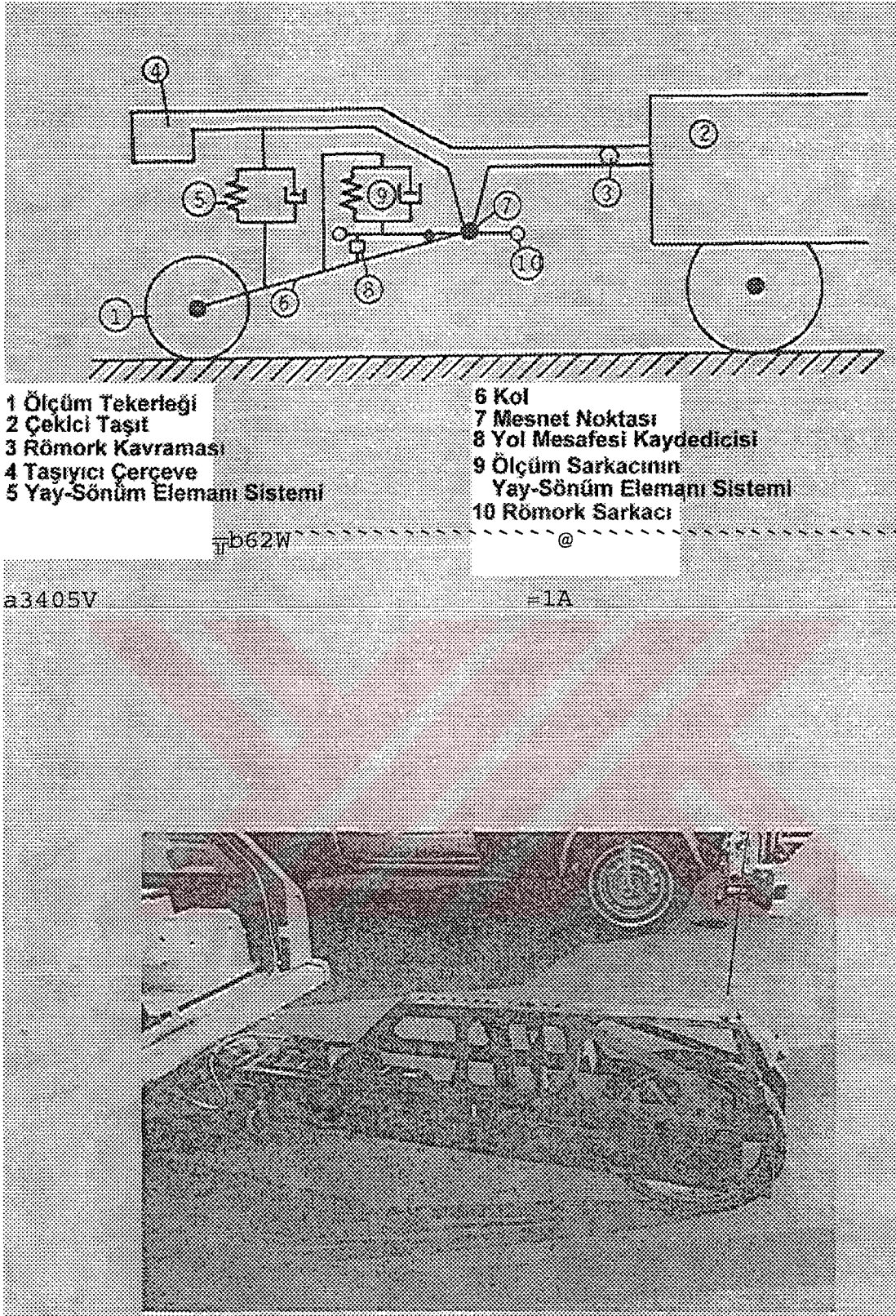
Römorkun önemli kısımları ölçüm aletlerini taşıyan çerçeve (4), yay-sönüm elemanı sistemi (5) üzerinden çerçeveye asılı olan ve kol (6) tarafından ilerletilen ölçüm tekerleği, ölçümün referans temeli olarak kullanılan, hareketleri yay-sönüm elemanı sistemi (9) tarafından etkilenen ağır sarkaç (10) ve kol ve sarkaç arasında bulunan induktif mesafe ölçüm aletidir (8).

Ölçüm yöntemi

Sarkaç, referans doğruyu oluşturmaktadır. Sarkaca göre kola bağlı olan ölçüm tekerleğinin dikey doğrultudaki hareketi ölçülmektedir. Sürekli olarak elde edilen bu sinyal, boyuna profildeki yükseklik farklarını temsil etmektedir. Ölçüm değerleri, 0.25 m'lik mesafede yola bağlı olarak dijital şekilde alınmaktadır. Bu sinyal, veri işleme tesisatı tarafından yazıcıya iletilmektedir.

Ölçüm değeri elde edilmesinin adım uzunluğu, çekici taşıtın tahrik edilmeyen arka sağ tekerleği tarafından yapılan bir yol mesafesi ölçümü yardımıyla belirlenmektedir. Ölçüm değerlerinin yanında ölçüm yolunun diğer özellikleri de kaydedilebilmektedir.

Sistemin ölçüm bölgesi, 0.8...20 m'lik dalga boyu bölgesinde 75 mm'lik bir max genlik ile sınırlanmaktadır. Ölçüm hassasiyeti için ifadeler bulunmamaktadır. Normalde ölçüm hızı 72 km/h (= 20 m/s) sabit olmaktadır. Römorkun boyuna ekseninin ölçüm izi üzerinde bulunduğu bir yol çizgisinin sağ yuvarlanma izinde ölçüm yapılmaktadır.



Şekil 3.25 APL

- a) Şematik yapı
b) Kısmi bakış

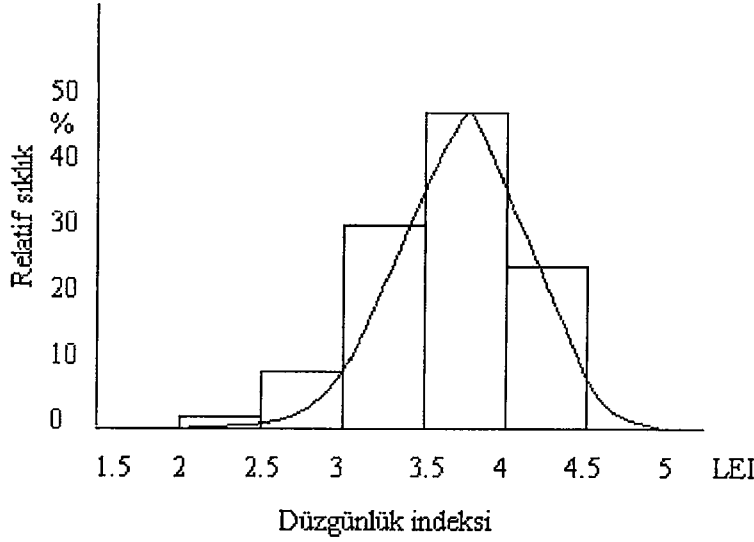
Değerlendirme, tekrarlanabilirlik

Dijitalize edilmiş ölçüm değerlerinden (ölçüm sisteminin Hollanda'ya ait olan şeklinde) çekici taşıtın veri işleme tesisatında yüzey profilinin boyuna eğim varyantı hesaplanmaktadır. Eğimin değerinin belirlenmesi için her seferinde yükseklik profilinin komşu iki ölçüm değeri kullanılmaktadır (alt bölüm 3.1.3'te anlatılan yöntemle göre). Bu değerlerden bir 100 m bölümü için (yani toplam 400 eğim değerinden), düzgünlük indeksinin (3.15) denklemine göre elde edilen varyantı belirlenmektedir.

Ölçüm sonucu, içinde ölçüm bölümü, seyir hızı, düzgünlük indeksi ve düzgünlük indeksinin belirlenen bir sınır değerinin aşılma sıklığının bulunduğu tablolar şeklinde verilmektedir.

Değerlendirme esasları

Yol yüzeyinin değerlendirilmesi, normal yollar üzerinde $6 \text{ (çok iyi)} \leq LEI \leq 0 \text{ (çok kötü)}$ bölgesinde olmaktadır. 25.2 km uzunluğundaki bir ölçüm yolu üzerinde bu değerlendirme kullanılarak Şekil 3.26'da gösterilen sıklık dağılımı elde edilmektedir. Bundan başka bilgiler bulunmamaktadır.



Şekil 3.26 Almanya’da APL ile 25.2 km uzunluğundaki ölçüm yolu üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen düzgünlük değerlendirmesinin sıklık dağılımları

3.3.Uzun yol ölçümleri

3.3.1.Deney yapılışı

Bu konudaki araştırmalar eylül/ekim 1983’te Almanya’da HSRM ile yapılmıştır [1]. Ölçüm izinin konumu, ölçüm başlangıcından önce birimsel olarak belirlenmiştir. HSRM’nin ölçüm sonuçları IfF tarafından değerlendirilmiştir.

3.3.2.Değerlendirme

IfF’deki verilerin istatistiksel değerlendirmesi, $\phi_h(\Omega)$ pürüz genliklerinin yola bağlı açısal frekansa bağlı spektral yoğunluk akışlarına göre tek taraflı spektrumlar şeklinde, 3, 10, 30, 50, 80 ve 109.6 m olarak seçilen kayan ortalama boydaki pürüz yüksekliklerinin standart sapmalarına göre yapılmıştır.

Spektrumların hesaplanması için hızlı Fourier transformasyonu (Fast-Fourier-Transformation, kısaca FFT) kullanılmıştır [1,2,5], EK A . Burada bir ölçüm yolunun toplam spektrumuna, 109.568 m’lik uzunluktaki kısmi bölümlerde tekil spektrumların

belirlenmesi ile yaklaşılmaktadır. Bunun için, bütün bölümlerin spektral değerlerinin müstakil frekanslara göre lineer olarak ortalaması alınmaktadır. Bu ortalama değer, toplam spektrumun ilgili frekanstaki tahmini değeri olarak kullanılmaktadır [1].

Standart sapmalar, alt bölüm 3.1.3'te açıklanan moving-average yöntemine göre elde edilmektedir.

İşlenmemiş verilerin hazırlanması

Verilerin işlenmesinde FFT'nin kullanılabilmesi için incelenen verilerin kararlı olması gerekmektedir. Bunun anlamı, inceleme bölgesi kaydırılırsa veya genişletilirse verilerin toplamından alınan kısmi miktarın istatistiksel özelliklerinin (örneğin normal dağılım) önemli ölçüde değişmemesi gerekmektedir.

Pürüzlülük incelemeleri açısından önemli olan en uzun dalga boyundan daha büyük dalga boyuna sahip yol eğimleri, ortalama pürüz yüksekliğinin artmasına ve böylece istatistiksel özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Ortalamanın bu şekilde bir artış eğilimi göstermesi göz önüne alınarak "moving-average" yöntemiyle bu etki yok edilmektedir. Ortalama değer elde edildiği veri penceresi, yaklaşık 100 m uzunluğundaki önemli olan en uzun dalga boyu uzunluğunda olmaktadır.

Diğer değerlendirmelerin yapılabilmesi için trendin önlenmesi yanında, bütün değerlendirme bölümlerinde genliklerin ortalama değeri sıfır olacak şekilde, her bölge için bir lineer ortalama değer ayarlaması yapılması gerekmektedir.

FFT'nin kullanılması

Bu şekilde hazırlanan verilerden, FFT yardımıyla, her bölge için $\phi_n(\Omega)$ pürüzlülük genliklerinin spektral yoğunluğu hesaplanmaktadır

FFT'nin kullanılması sırasında, bir bölgenin sonlu ve böylece sınırlı veri miktarı nedeniyle, genlik spektrumunun Ω yola bağlı açısal frekansa bağlı kısmı yanında

FFT'nin spektrumunu silen yan bantlar oluşmaktadır (leakage effect). Bu yan bantların oluşumunun engellenmesi için FFT öncesinde N sayıdaki ölçüm değerleri bir U_{Bi} penceresi (Bingham penceresi) ile çarpılmaktadır [1]. Bingham penceresi, verileri aşağıda belirtilen fonksiyonlar ile kaplamaktadır:

$$U_{Bi} = \begin{cases} 0.5 (1 - \cos (10 i / N)) & i = 1 \dots N / 10 \\ 1 & i = N/10 \dots 9N / 10 \\ 0.5 (1 - \cos (10 i / N)) & i = 9N/10 \dots N \end{cases} \quad (3.22)$$

Burada $N / 10$, $0.1 N$ 'ye en yakın tamsayı olmaktadır.

Ancak Bingham penceresi ile yapılan düzeltme sonrasında spektrumun genlikleri azalmaktadır. Bu durum, Bingham penceresi ile yapılan düzeltme sonrasında elde edilen spektrumun cos-penceresi düzeltme katsayısı ile ($Q_{Bi}^{-1} = 1 / 0.875$) çarpılması ile düzeltilmektedir [3].

FFT, dijital veri takımlarında $N = 2^q$ sayıdaki ölçüm değerleri üzerinde uygulanmaktadır. Burada $q = 10$ olmaktadır, yani her değerlendirme bölümü için $2^{10} = 1024$ ölçüm değeri kullanılmaktadır. Böylece, HSRM ile yapılan ölçümlerde 0.107 m'lik adım uzunluğu ile $1024 * 0.107 \text{ m} = 109.568 \text{ m}$ ($\Omega = 0.0573 \text{ 1/m}$) uzunluğunda bölge elde edilmektedir (buna göre FFT'nin çözünürlük frekansı $B = 2\pi / L_{\max} = 0.0573 \text{ 1/m}$ olmaktadır). Dikkate alınan en küçük dalga boyu 0.107 m'lik adım uzunluğu ($\Omega = 58.72 \text{ 1/m}$) ile sınırlandırılmıştır.

Yol üzerine spektrumların daha pratik şekilde yerleştirilmesi için değerlendirmede 100 m'de bir bölge kaydırması yapılmaktadır. Bu şekilde, birbirini takip eden değerlendirme bölümleri 9.568 m ile birbirlerini izlemektedirler.

Spektral pürüz yoğunluğunun düzeltilmesi

Yola bağlı açısal frekansa bağlı spektrumun çift logaritmik diyagramda ifade edilmesi sırasında yoğunluk fonksiyonunun yüksek frekanslı kısımları, sabit B çözünürlük frekansı nedeniyle kaplanmaktadır. Çözüm olarak üç bantlı aritmetik frekans ortalaması oluşmaktadır [6]:

- değerlendirilen en düşük frekans bölgesinden $\Omega_C = 1.1923$ 1/m değerindeki ($L \approx 32$ m) orta frekansa kadar bir oktavlık frekans bandı üzerinden,

- bundan sonraki bölgeden $\Omega_C = 1.5708$ 1/m ($L \approx 4$ m) orta frekansına kadar bir oktav / 3 üzerinden ve

- bundan sonraki bölgeden değerlendirilen en yüksek frekansa kadar bir oktav / 12 üzerinden.

Ω_C ortalama frekansı genel olarak aşağıdaki denklemden elde edilmektedir:

$$\Omega_C = 2\pi 2^{\exp} \quad (3.23)$$

Burada exp ortalama frekans üssü, üç bant olmak üzere aşağıdaki bölgeler içinde bulunmaktadır:

1/1 oktav: $\exp \leq -5$ 1 adım uzunluğunda

1/3 oktav: $-4 \frac{1}{3} \leq \exp \leq -2$ 1/3 adım uzunluğunda

1/12 oktav $-1 \frac{5}{6} \leq \exp$ 1/12 adım uzunluğunda

Her bandın sınır frekansları, yarım adım uzunluğunun exp üssüne toplanması veya ondan çıkartılması ile elde edilmektedir. Bir bandın sınırlarında bulunan frekans değerlerinin dikkate alınmasıyla, sınır frekansları arasında bulunan spektral yoğunluk değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu ortalama değer (3.24) denkleminde göre elde edilmektedir [1]:

$$\phi_h(\Omega_C) = \frac{B}{\Omega_H - \Omega_L} = \sum_{i=1}^n k_i \frac{\phi_h(\Omega_i) + \phi_h(\Omega_i + 1)}{2} \quad (3.24)$$

Burada B: Çözünürlük frekansı

n: Müstakil frekansların toplam sayısı

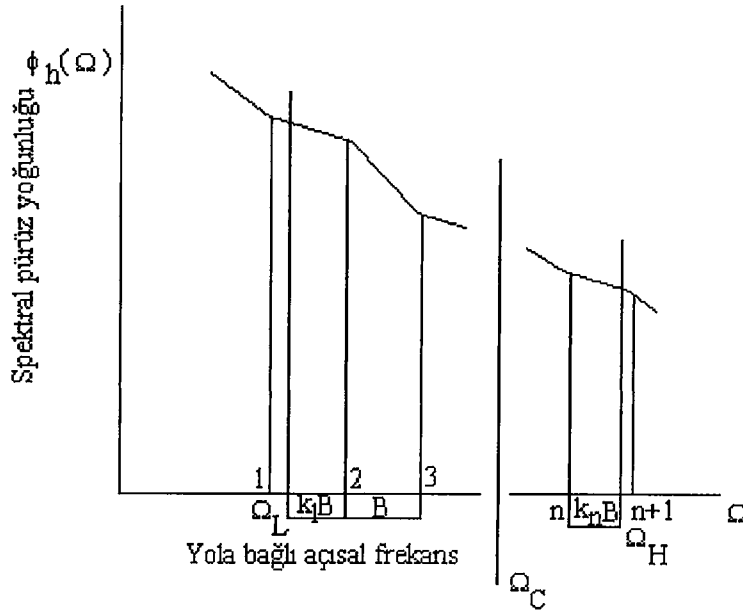
$$k_1 = (\Omega_2 - \Omega_L) / B$$

$$k_2 \dots k_{n-1} = 1$$

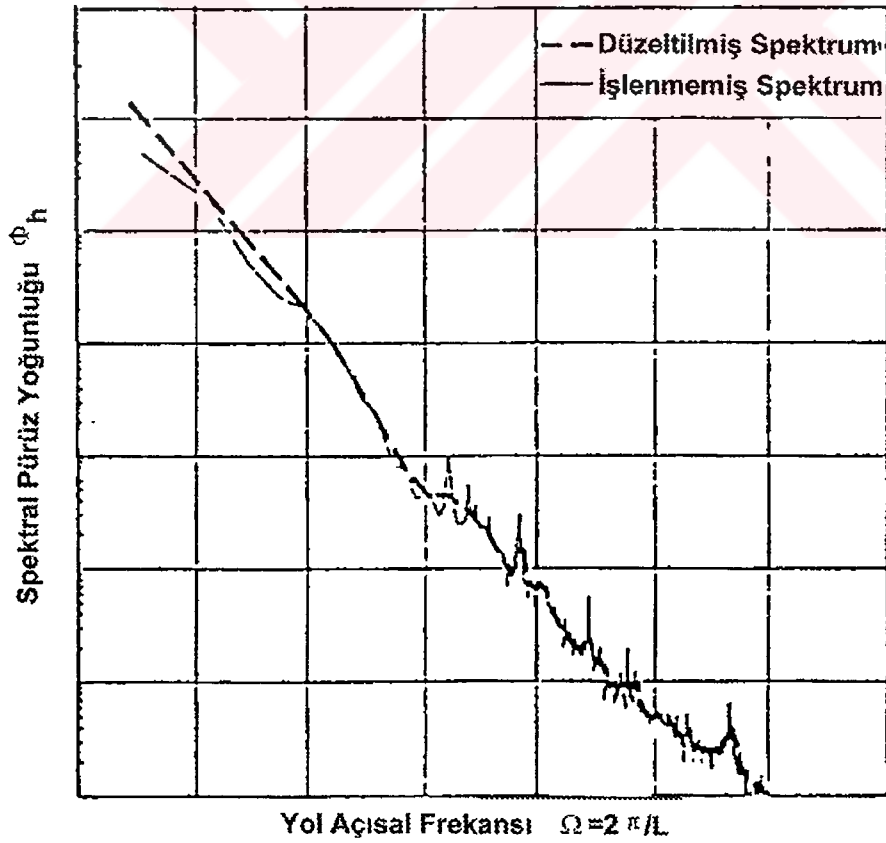
$$k_n = (\Omega_H - \Omega_n) / B$$

Şekil 3.27, frekans ortalaması alınmasını şematik bir şekilde göstermektedir.

Şekil 3.28, bu frekans düzeltme işleminin spektral yoğunluk akışı üzerine olan etkisini işlenmemiş spektrumla karşılaştırmak suretiyle göstermektedir. Spektrumun eğimi, frekans ortalamasının alınmasıyla daha belirgin şekilde görülmektedir. Ancak, bunun yanında spektrum akışında bulunan dar uçlar da düzeltilmektedir. Bu şekilde, spektrumda genelde yola bağlı açısız frekanslar ($2\pi \cdot \text{dalga boyu}^{-1}$) ile sınırlandırılmış, belirgin tepeler şeklinde ortaya çıkan keskin periyodlukların fark edilmesi zorlaşmaktadır.



Şekil 3.27 Spektral yoğunluğun frekans ortalaması alınmasının şematik olarak gösterilmesi



Şekil 3.28 Düzeltilmiş ve düzeltilmemiş pürüz spektrumu arasındaki karşılaştırma

Doğrularla spektrumlara yaklaşma

Spektral yoğunluğun karakteristik büyüklüklerinin ifade edilmesi için spektrumun düzeltilmiş akışına bir doğru yerleştirilmektedir. Bu,

$$\phi_h(\Omega) = c \Omega^w \quad (3.25)$$

denklemini ile ifade edilen logaritmik regresyon yardımıyla yapılmaktadır [1].

Burada c ve w sabitleri, en küçük farkların kareleri yöntemine göre belirlenmektedir.

Tanım değerleri olarak $\Omega_0 = 1$ 1/m değerindeki $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsü ve çift logaritmik diyagramdaki logaritmik regresyon eğrisinin eğimi olarak w dalgalılığı kullanılmaktadır (alt bölüm 3.1.3 ile karşılaştırınız).

Diğer değerlendirme

Spektral pürüz yoğunluğu üzerine değerlendirme temeli için ilk bağıntılar araştırılmıştır. Bu bağıntılar, belirli yol özelliklerinin dikkate alınmasıyla,

- elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük büyüklükleri ve w dalgalılıklarının bir araya getirilmesi ve

- her iki spektrumun tanım değerleri ve kaplama cinsi, yol sınıfı, subjektif değerlendirme ve ölçüm izi konumu özellikleri arasındaki ilişkiler

şeklinde spektrumların tanım değerlerinin analizi yardımıyla elde edilmektedir.

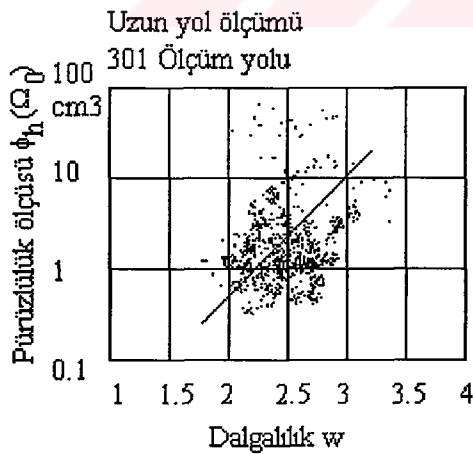
3.3.3.Sonuçlar

İleride, spektrumların tanım değerleri olan $\phi_h(\Omega_0)$ ve w 'nin yapılan ölçümlerden elde edilen sonuç değerleri ve belirli yol özelliklerine göre bu tanım değerleri arasındaki ilişkiler gösterilmektedir [1].

Tanım değerlerinin elde edilmesi sonucunda varılan sonuçlar

Şekil 3.29, VW test arazisi üzerinde yapılan karşılaştırma ölçümlerinde elde edilen sonuçlar da dahil olmak üzere, Almanya'da yapılan ölçümlerde elde edilen spektrumların tanım değerlerini göstermektedir: Pürüzlülük büyüklüğü $\phi_h(\Omega_0) = 0.35 \dots 78.82 \text{ cm}^3$ bölgesinde, dalgalılık $w = 1.78 \dots 3.31$ bölgesinde bulunmaktadır.

$\phi_h(\Omega_0)$ ve w tanım değerleri için uygulanan bir korelasyon hesaplaması, incelenen yol kolektifi için pürüzlülük büyüklüğü ve dalgalılık arasında önemli bir ilişki bulunmadığını göstermektedir (korelasyon katsayısı 0.26). Yol özelliklerinin göz önünde bulundurulması ile tanım değerleri arasında daha iyi korelasyon ilişkileri elde edilmektedir (bkz aşağıda).



Şekil 3.29 VW test arazisindeki karşılaştırma yolları da dahil olmak üzere, Almanya'daki bütün ölçüm yolları için $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük büyüklüğü ve w dalgalılığı arasındaki ilişki

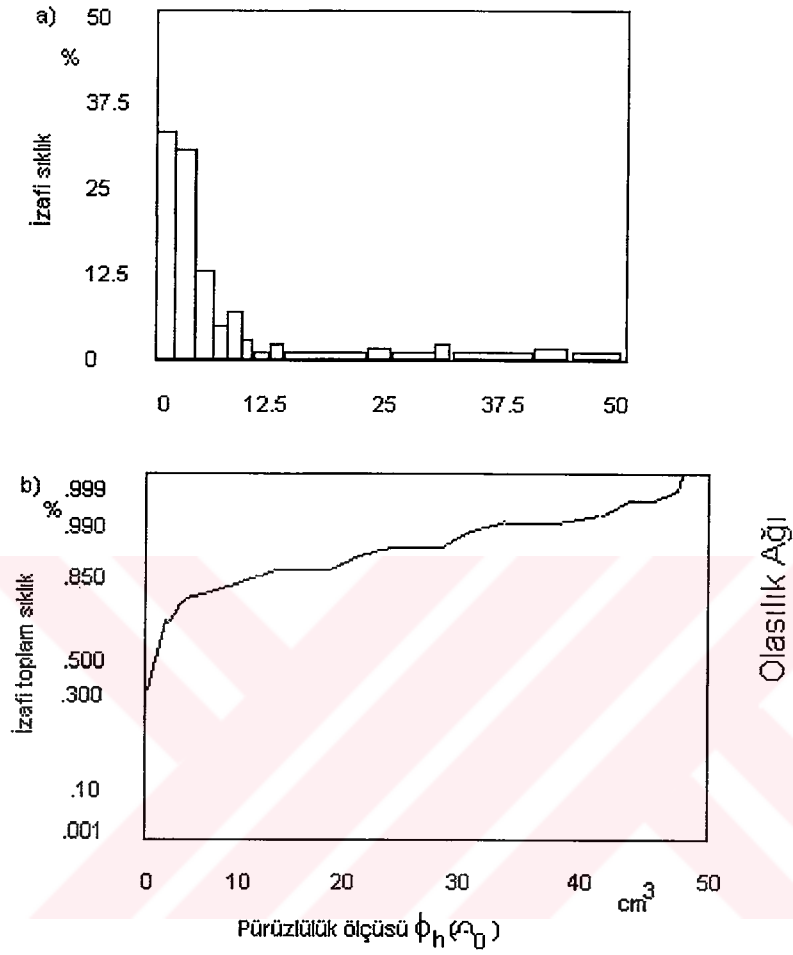
Bütün ölçüm yolları dikkate alınarak, spektrumun tanım değerleri için aritmetik ortalama değerler elde edilmiştir. Bu değerler, pürüzlülük değeri için $\phi_h(\Omega_0) = 4.5$ ve dalgalılık için $\bar{w} = 2.5$ olmaktadır.

Spektrumun tanım değerleri olan $\phi_h(\Omega_0)$ ve w 'nin veri kolektifi için bir sıklık analizi uygulanmıştır. Bunun için $\phi_h(\Omega_0)$ 'nin kolektifi $0...50 \text{ cm}^3$ bölgesinde $\Delta \phi_h(\Omega_0) = 1.0 \text{ cm}^3$ genişliğindeki sınıflara ve w 'nin kolektifi $\Delta w = 0.1$ 'lik sınıflara ayrılmıştır. Bu sınıflarda bulunan veri miktarının bütün veri miktarına oranları, ait oldukları sınıfa bağlı olarak, ayrı ayrı gösterilmektedir (izafi sıklıklar, izafi toplam sıklıklar ve bunların ihtimal ağına taşınması).

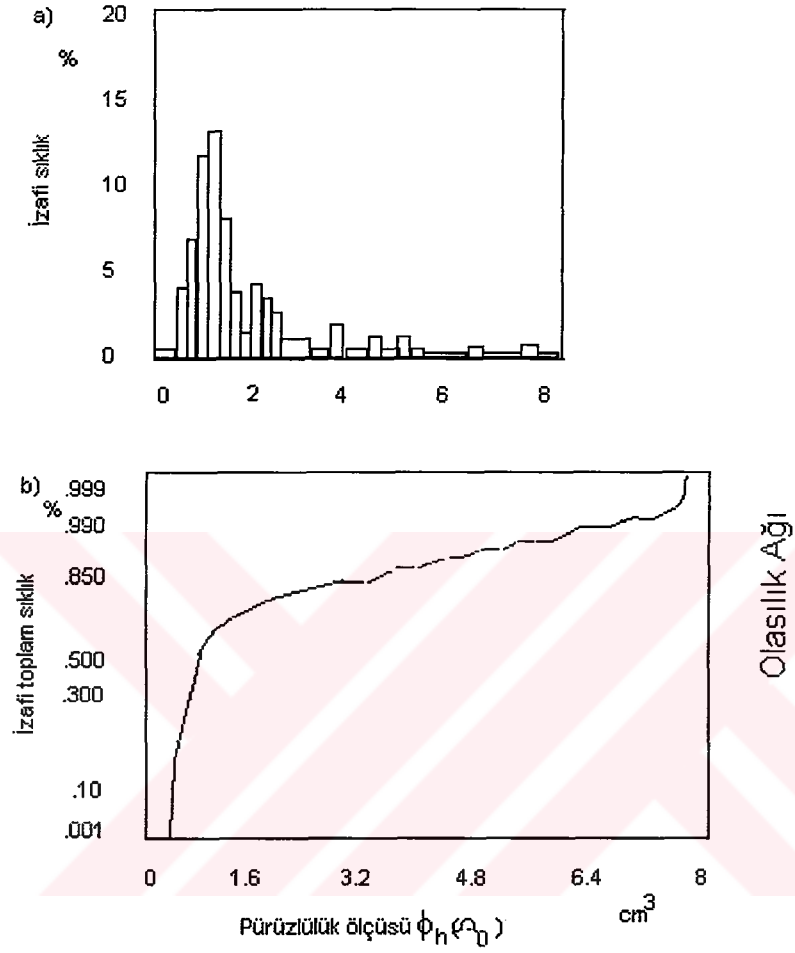
Eğer yaklaşık olarak normal dağılımlı bir veri kolektifi söz konusu ise, ihtimal ağına taşınmış olan toplam sıklıklar bir eşitleme doğrusu ile ifade edilebilmektedir. Bu doğru yardımıyla, örneğin aritmetik ortalama değeri %50 değeri olacak şekilde ve %50 değerine simetrik olarak bulunan standart sapma değeri olarak %15.87 ve %84.13 değerleri olacak şekilde, önemli büyüklükler hesaplama yapılmadan kolayca belirlenebilmektedir. Normal dağılımlı bir veri kolektifi söz konusu değilse bu ilişkiler ortaya çıkmamaktadır.

Şekil 3.30 ve 3.31'deki izafi sıklık dağılımı ve izafi toplam sıklık eğrilerinden de görüldüğü gibi, $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değerinin ve w dalgalılığının veri kolektifi için farklı bir dağılım elde edilmektedir.

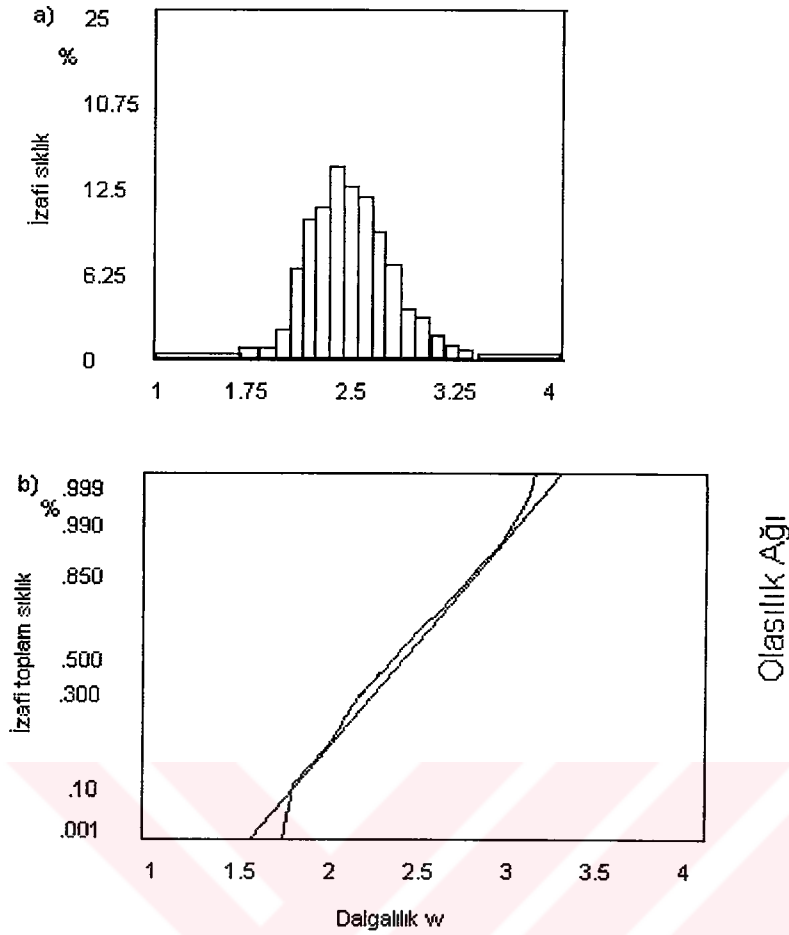
Dalgalılık yaklaşık olarak normal bir dağılım gösterirken -aritmetik ortalama değeri ihtimal ağından direkt olarak %50 değeri olarak alınabilir (Şekil 3.31)-, pürüzlülük değeri için farklı bir dağılım oluşmaktadır (Şekil 3.30-1). Elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ kolektifinin büyük kısmı skalanın alt bölgesinde bulunmaktadır. Yalnızca çok az sayıdaki veri skalanın üst bölgesinde bulunmaktadırlar. Diyagram $0 \leq \phi_h(\Omega_0) \leq 8 \text{ cm}^3$ bölgesiyle $\Delta \phi_h(\Omega_0) = 0.16 \text{ cm}^3$ olmak üzere sınırlandırılırsa küçük pürüzlülük değerlerindeki dağılım daha iyi fark edilmektedir. Şekil 3.30-2 izafi (a) ve toplam (b) sıklıkları göstermektedir.



Şekil 3.30-1 $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsünün veri kolektifi için izafi sıklık dağılımı (a) ve izafi toplam sıklık (Örnek: Almanya’da yapılan ölçümlerde test edilen 298 ölçüm yolu)



Şekil 3.30-2 $\phi_h(\Omega_0)$ porüzlülük ölçüsünün veri kolektifi için izafi sıklık dağılımı (a) ve izafi toplam (Örnek: Almanya’da yapılan ölçümlerde test edilen 298 ölçüm yolu)

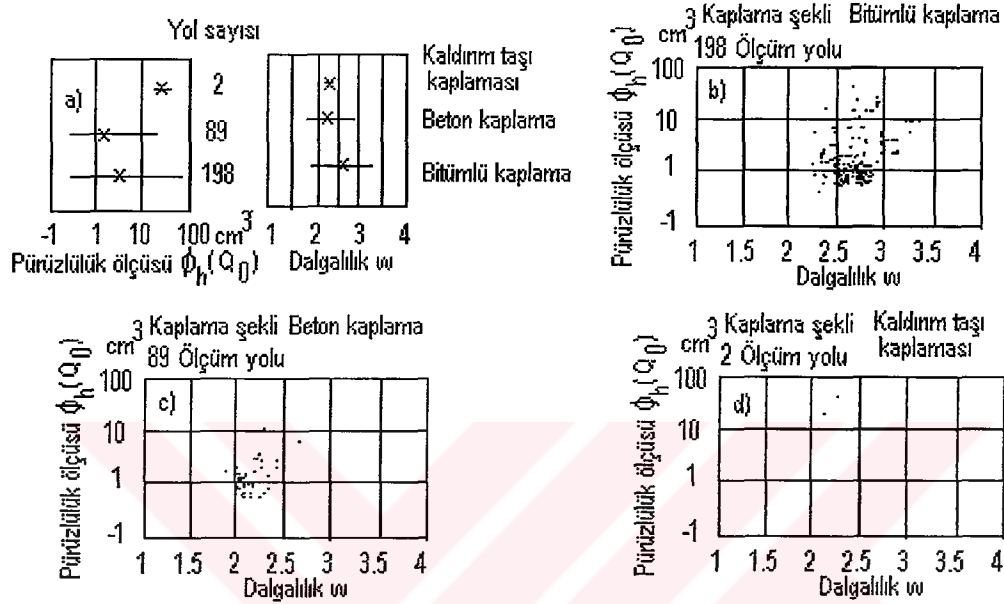


Şekil 3.31 w dalgallığının veri kolektifi için izafi sıklık dağılımı ve eşitleme doğrusu ile birlikte izafi toplam sıklık

Yol kaplaması cinsinin etkisi

Şekil 3.32’de ve Tablo 3.5’te bitümlü kaplamalar üzerinde bütün kolektif için spektrumun her iki tanım değerinin, beton kaplamalara oranla oldukça yüksek max değerlere uzandığı görülmektedir. Bunun yanında, değerlerin büyük çoğunluğunun dağılımın üst bölgesinde bulunduğu dikkat çekmektedir. Beton yollar üzerinde dalgallılık bütün bölgede ufak değerlere doğru kaymaktadır. Yani beton yollar üzerinde kısa dalga boyları ağırlıklı olarak bulunmaktadır. Bunun yanında bitümlü kaplamalar üzerinde uzun dalgalar belirgin şekilde görülmektedir (b ve c’yi karşılaştırınız). Her iki yol kaplaması cinsi üzerinde elde edilen en iyi değerler pratik olarak eşit olmaktadır. Bu durumda çimento beton yollar üzerinde, küçük w değeri yüzünden, az sayıda uzun,

bunun yanında çok sayıda kısa dalgalar görülmektedir. Kötü durumda olan bitümlü kaplamalar, özellikle kısa dalga bölgesinde, yüksek pürüzlülük değerlerine sahip olmaktadır (küçük w değeri) [1,2].



Şekil 3.32 Almanya’da yapılan ölçümlerde farklı yol kaplamaları üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri

a) Tekil değerlerin bir araya toplanması

(I: Aritmetik ortalama değer)

$\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değerinin ve w dalgalılığının kombinasyonu

b) Bitümlü kaplamalar için

c) Çimento kaplamalar için

d) Kaldırım taşı kaplamaları için

Tablo 3.5 Farklı kaplama cinsleri için pürüzlülük ve dalgalılık sınırlar değerleri

Tanım değerleri	Sınırlar					Kaplama cinsi (Sayı)
	min	...	orta	...	max	
Pürüzlülük ölçüsü	0.36	...	3.89	...	75.27	Bitümlü yol (198)
	0.35	...	2.07	...	21.90	Çimento beton (89)
$\phi h(\Omega_0)$, cm3	33.89	...	38.62	...	43.35	Kaldırım taşı (2)
Dalgalılık w	2.00	...	2.63	...	3.31	Bitümlü yol (198)
	1.86	...	2.22	...	2.92	Çimento beton (198)
	2.33	...	2.40	...	2.47	Kaldırım taşı (2)

Her iki kaplama cinsi yol sınıflarına göre karşılaştırıldıklarında bu eğilimler yine korunmaktadır (bkz ilerideki Şekil 3.38): En düzgün yollar, her iki kaplama cinsinde yaklaşık olarak eşit pürüzlülük değerlerine sahip olmaktadır. Bitümlü kaplamaların pürüzlülük değerleri ortalama olarak daha yüksek olmaktadır. Bitümlü kaplamalar büyük miktarda uzun dalgalı, ancak küçük miktarda kısa dalgalı olmaktadır. Bitümlü kaplamaların küçük miktarda kısa dalgalı olması konfor üzerine pozitif olarak etki etmektedir (bkz aşağısı).

Her iki kaplama cinsindeki spektrumların tanım değerleri arasındaki fark, taşıtın pürüz etkili salınım davranışları hakkındaki basit teorik düşünceler yardımıyla açıklanabilmektedir [1].

Bu salınım davranışları genelde salınım büyüklüklerinin efektif değerleri ile ifade edilmektedir (örneğin dinamik tekerlek yükünün efektif değerleri veya taşıt gövdesinin dikey yöndeki ivmesinin efektif değerleri). Bu değerler pürüz etkisi ile matematiksel olarak bağlantılı olmaktadır. Örneğin dinamik tekerlek yükünün efektif değerlerinin elde edilmesi için

$$\tilde{F}_{zdyn} = \sqrt{\phi_h(\Omega_0) \Omega_0^w v^{w-1} \int_0^\infty V_{Fz}^2 \omega^{-w} d\omega} \quad (3.26)$$

Yol pürüz- Seyir Taşıt özellikleri

lülüğü hızı

denklemini kullanılmaktadır.

Örnek olarak Şekil 3.32 a)'dan alınan $\phi_h(\Omega_0)$ 'ın aritmetik ortalama değeri her iki kaplama cinsi arasında karşılaştırma büyüklüğü olarak kullanılırsa, eşit w dalgalılığında ve aynı seyir hızı ve taşıt özellikleri için, her iki kaplama cinsi üzerinde taşıttaki salınım davranışlarının efektif değerleri arasındaki oran $\sqrt{\phi_h(\Omega_0)_{\text{Bitümlü}} / \phi_h(\Omega_0)_{\text{Beton}}}$ denklemi ile ifade edilmektedir.

Bitümlü ve beton kaplamalar için Şekil 3.32 a) ve Tablo 3.5'ten alınan $\phi_h(\Omega_0)_{\text{Bitümlü}} = 3.0 \text{ cm}^3$ ve $\phi_h(\Omega_0)_{\text{Beton}} = 2.1 \text{ cm}^3$ değerindeki (aritmetik) ortalama değerlerden $3.9/2.1 = 1.37$ 'lik bir oran elde edilmektedir. Yani bitümlü yol kaplamaları üzerinde, çimento beton kaplamaları üzerindeki göre dinamik tekerlek yükü ve konfor için %37 daha kötü değerler ortaya çıkmaktadır.

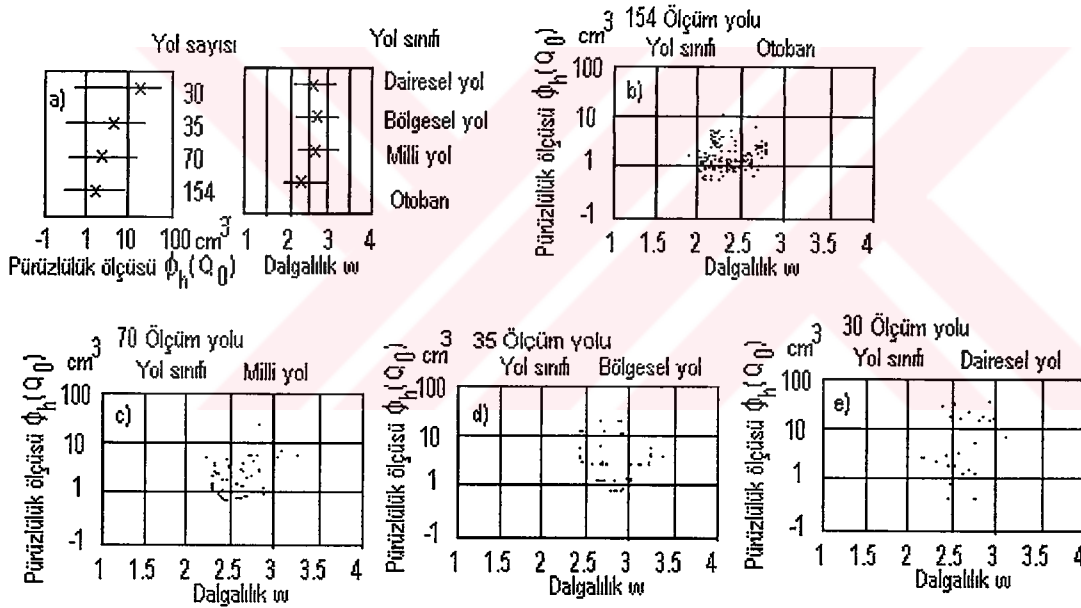
Yol sınıfının etkisi

Şekil 3.33 a-e) ve Tablo 3.6'ya göre Almanya'da yapılmış olan ölçümler sonrasında otobanlar diğer yol sınıflarına göre belirgin bir şekilde düşük bir pürüzlülük değeri ve alçak bir dalgalılık, milli yollar bölgesel yollara göre düşük bir pürüzlülük değeri ve bölgesel yollar çevresel yollara göre daha düşük bir pürüzlülük göstermektedir.

Değerlerin dağılım aralığı -bunun anlamı pürüzlülük sınır değerleri arasındaki farklar-, otobanlar dışındaki yol sınıflarında büyük olmaktadır. Otobanlar dışındaki yol sınıflarının dalgalılık değerleri arasındaki farklar küçük olmaktadır. Kaplama cinsinin etkisi ileride Şekil 3.39'da görülmektedir.

Tablo 3.6 Almanya’da yapılan ölçümlerde farklı yol sınıfları için pürüzlülük değeri ve dalgalılık sınır değerleri

Tanım değeri	Sınırlar			Yol sınıfı (Sayı)
	min	... orta	... max	
Pürüzlülük ölçüsü $\phi_h(\Omega_0)$ cm ³	0.35	... 1.26	... 9.47	Otoban (154)
	0.48	... 2.49	... 11.48	Milli yol (70)
	0.49	... 6.35	... 35.28	Bölgesel yol (35)
	0.79	... 14.78	... 75.27	Çevresel yol (30)
Dalgalılık w	1.86	... 2.36	... 2.92	Otoban (154)
	2.08	... 2.65	... 3.29	Milli yol (70)
	2.24	... 2.74	... 3.31	Bölgesel yol (35)
	2.13	... 2.65	... 3.26	Çevresel yol (30)



Şekil 3.33 Almanya’da yapılan ölçümlerde farklı yol sınıfları üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri

a) Tekil değerlerin bir araya getirilmesi (I: Aritmetik ortalama değer)

$\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değerinin ve w dalgalılığının kombinasyonları

b) Milli otobanlar için

c) Milli yollar için

d) Bölgesel yollar için

e) Çevresel yollar için

Taşıttaki pürüz etkili salınım davranışlarına kaplama cinsinin etkisi üzerine olduğu gibi, benzer şekilde yol sınıfının etkisinin açıklanması üzerine teorik düşünceler bulunmaktadır [1].

Salınım davranışı seyir hızına bağlı olmaktadır ((3.26) denklemi ile karşılaştırınız). Bu nedenle bir salınım büyüklüğünün belirli bir efektif değeri için farklı $\phi_h(\Omega_0)$ 'da aynı efektif değere, örneğin aynı büyüklükteki dinamik tekerlek yüküne götüren seyir hızının belirlenmesi için farklı yol sınıflarının $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değerleri arasındaki oranlar (aynı dalgalılık değerinde $-w = 2$ - ve aynı taşıt özelliklerinde) kullanılmaktadır.

$$v_{Bstr} = \left[\frac{\phi_h(\Omega_0)_{BAB}}{\phi_h(\Omega_0)_{Bstr}} v_{BAB}^{w-1} \right]^{\frac{1}{w-1}} \quad (3.26a)$$

Bu denkleme göre, örneğin otobanlar üzerinde $v_{BAB} = 130$ km/h'lik bir seyir hızı için elde edilen efektif değer referans büyüklüğü olarak alınırsa, -örnek olarak Şekil 3.33 ve Tablo 3.6'daki bölgesel ve çevresel yollar üzerinde ortaya çıkan ortalama değerler kullanılarak- milli yollar üzerinde

$$v_{Bstr} = \left[\frac{\phi_h(\Omega_0)_{BAB} v_{BAB}^{1.5}}{\phi_h(\Omega_0)_{Bstr}} \right]^{\frac{1}{1.5}} = 89 \text{ km/h,}$$

bölgesel ve çevresel yollar üzerinde

$$v_{Lstr+kstr} = 34 \text{ km/h}$$

seyir hızlarıyla, milli otobanlar üzerindeki $v_{BAB} = 130$ km/h'lik seyir hızındaki efektif değer in aynısı ortaya çıkmaktadır.

Ölçüm izi konumunun etkisi

Yapılan araştırmalar sonucunda, yol kaplama cinsi aynı olan ve aynı trafik yükü altında bulunan yollar üzerinde paralel seyir izlerinin pürüz akışları ve spektrumları aynı olmaktadır [2].

Çok düzgün (uzun zamandır trafik altında bulunmayan) yollar üzerinde yuvarlanma izleri arasındaki pürüzlülük farkı küçük olmaktadır. Yollar pürüzlü oldukça (uzun süre kullanıldıkça) sağ ve sol yuvarlanma izlerinin pürüzlülük değerleri, ortadaki yuvarlanma izininkine göre daha yüksek olmaktadır. Bu etki, bitümlü kaplamalar üzerinde, çimento beton kaplamalar üzerindeki göre daha kuvvetli olmaktadır.

Periyodikliklerin ortaya çıkması

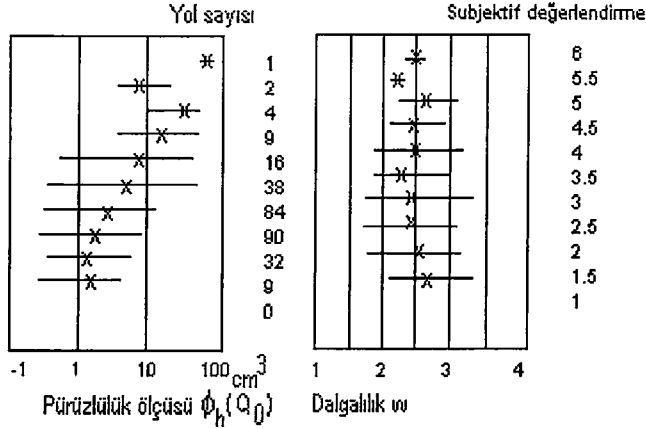
Eşit aralıklarla tekrarlanan pürüzler, spektrumda belli uçlar şeklinde ortaya çıkmaktadırlar. Uçlar kırık şeklinde ilerliyorsa pürüzler üst dalgalar şeklinde, uçların yükseklikleri eşit değilse alt harmonik şeklinde ortaya çıkmaktadırlar [2].

Plastik deformasyona uğrayabilen yollar ve bitümlü yollar üzerinde ağır taşıtların (özellikle ağır taşıtlar yaklaşık aynı hızla seyrediyorlarsa) dinamik tekerlek yükleri sonucu oluşan zorlama ile periyodiklikler oluşmaktadır.

Spektrumların tanım değerleri - subjektif değerlendirme ilişkisi

Düzensizlik değerlendirmesi, ölçüm yolunun optik olarak incelenmesine göre yapılmaktadır. Düzensizlik değerlendirmesi, sonradan yapılan (ve düzensizlik değerlendirmesinden farklı sonuç veren) konfor değerlendirmesi yardımıyla düzeltilebilmektedir. Pürüzlerin etkisiyle taşıtta oluşan salınımlar konfor değerlendirmesini etkilemektedir ve seyir hızına bağlı olmaktadır (alt kısım 3.1.2 ile karşılaştırınız). Buna göre farklı seyir hızları, farklı konfor değerlendirmelerine ve böylece farklı subjektif değerlendirmelere neden olmaktadır.

Şekil 3.34’de Almanya’da yapılan ölçümlerde elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ ve w pürüzlülük tanım değerleri, Şekil 3.35’te ve Tablo 3.7’de elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ ve w pürüzlülük tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişkiler görülmektedir.



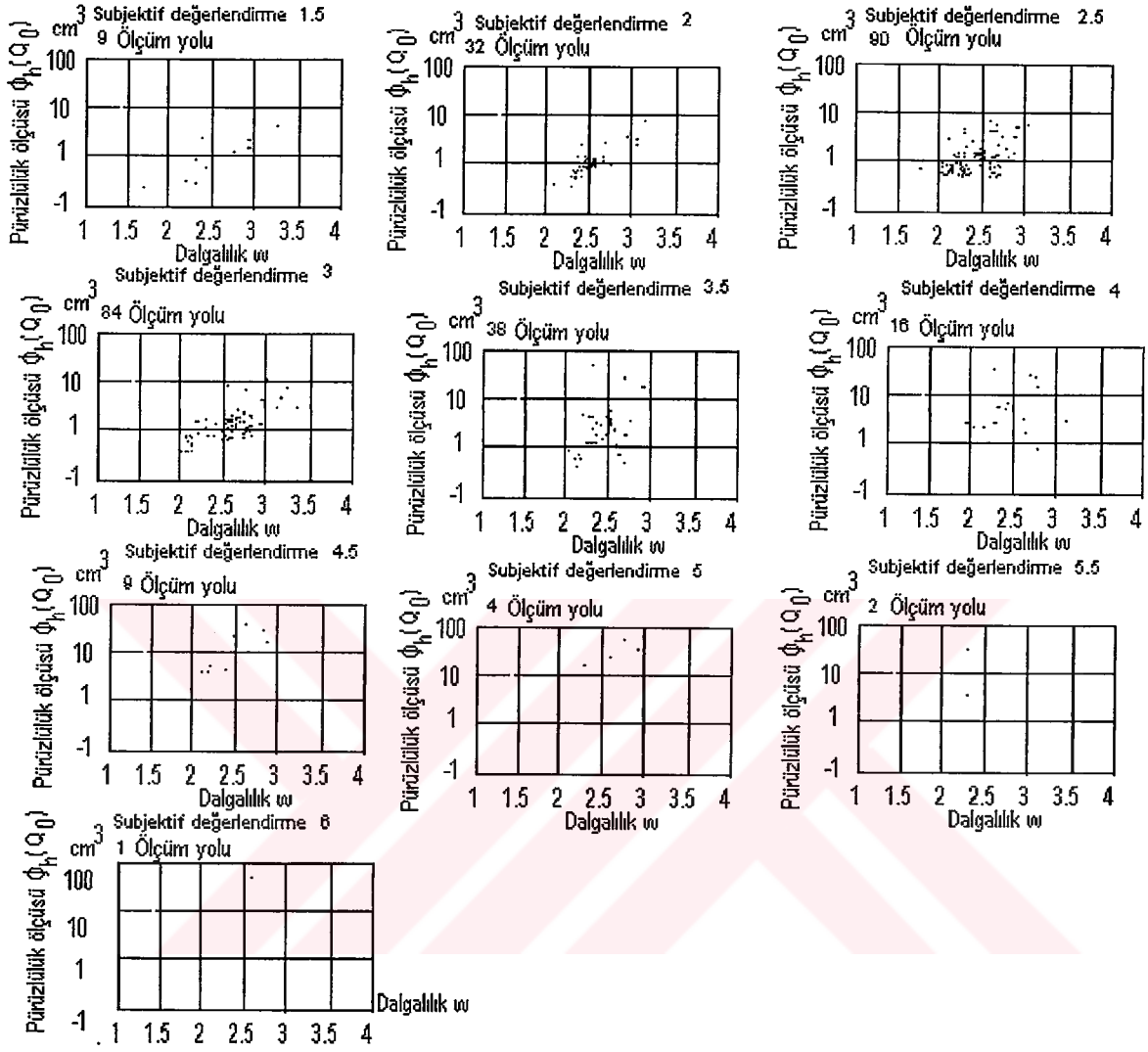
Şekil 3.34 Yapılan çeşitli subjektif değerlendirmeler sonucunda elde edilen spektrumların tanım değerleri

(I: Aritmetik ortalama değer)

Şekil 3.36’den 3.38’e kadar spektrumların tanım değerleri, farklı yol özelliklerinin kombinasyonları olarak gösterilmektedir.

Şekil 3.36’da bitümlü yol kaplamasına sahip olan yolların betondan olanlara göre daha yüksek pürüzlülük değerleri gösterdiği görülmektedir. Bitümlü kaplamalar üzerinde dalgallılık değeri ortalama olarak daha yüksek (kısa dalga miktarı az) olmaktadır. Bu durum, çimento beton kaplamalar üzerinde ortaya çıkan kısa dalgalı pürüzlülüğe göre çoğu kez tercih edilmektedir [1].

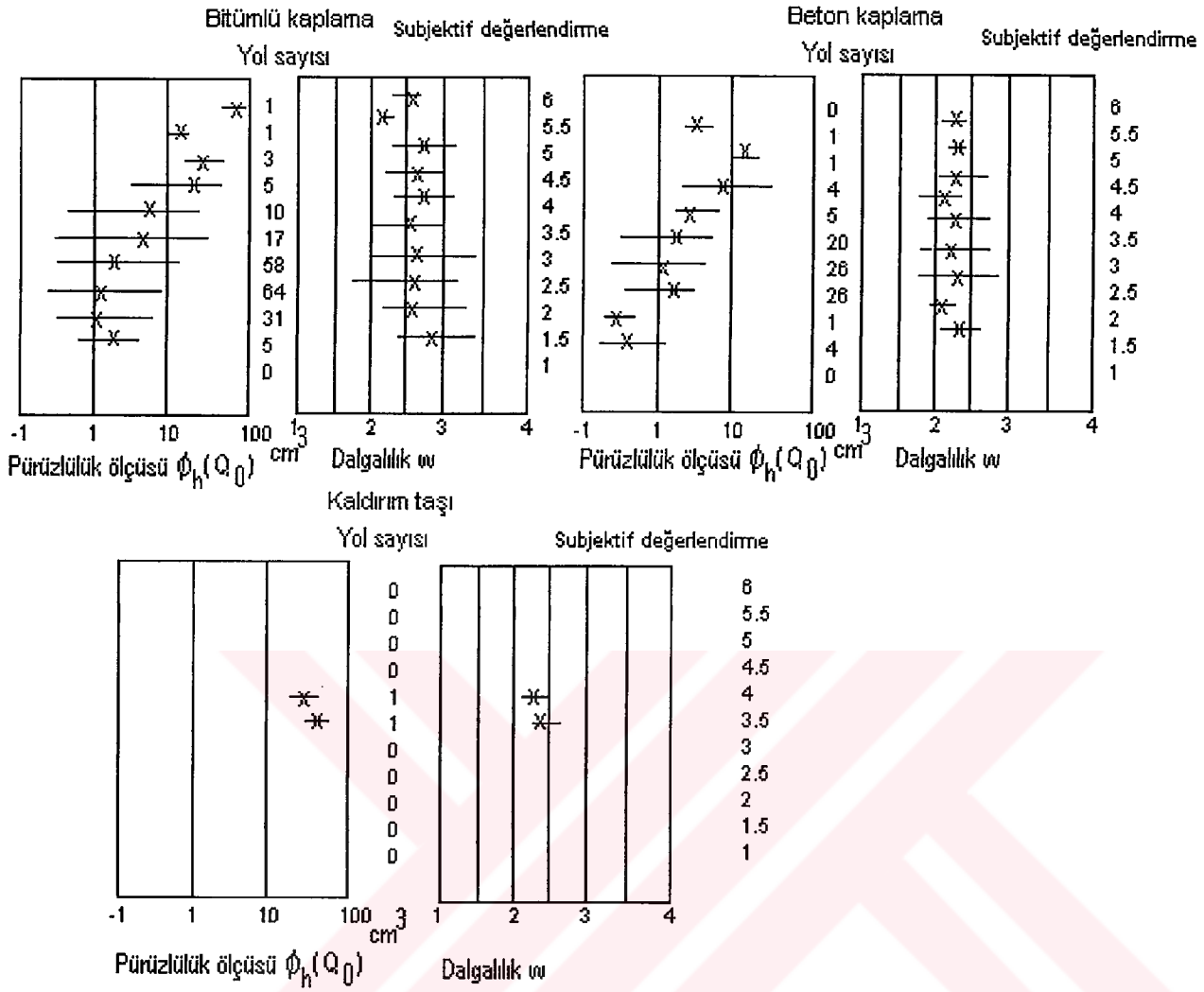
Belirli bir subjektif değerlendirmede ortaya çıkan $\phi_h(\Omega_0)$ ve w ’nin bütün kombinasyonları için korelasyonlar elde edildiği zaman, subjektif değerlendirme ve spektrumların tanım değerleri arasındaki ilişkiler daha belirgin hale gelmektedir. Tablo 3.8, ortaya çıkan korelasyon katsayılarını göstermektedir.



Şekil 3.35 Yapılan çeşitli subjektif değerlendirmeler sonucunda elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülüğü ve w dalgallığı arasındaki ilişki

Tablo 3.7 Yapılan çeşitli subjektif değerlendirmeler sonucunda elde edilen pürüzlülük ölçüsü ve dalgalılığın sınır değerleri

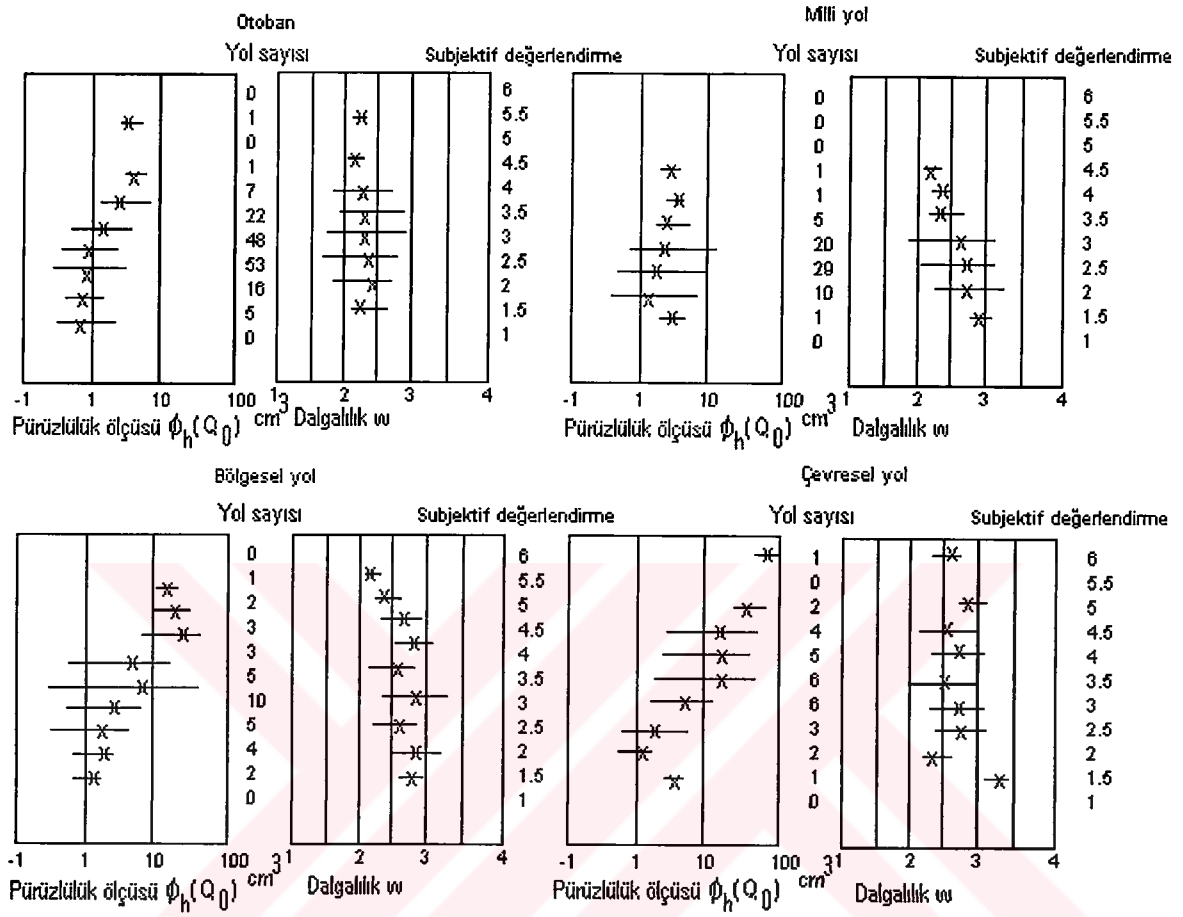
Tanım değerleri	Sınırlar	Subjektif değerlendirme
	min ... orta ... max	
Pürüzlülük ölçüsü $\phi h(\Omega_0)$ cm3	0.35 ... 1.61 ... 4.61	1.5
	0.44 ... 1.21 ... 5.91	2
	0.36 ... 1.42 ... 7.55	2.5
	0.42 ... 1.92 ... 10.69	3
	0.49 ... 4.88 ... 43.35	3.5
	0.87 ... 7.69 ... 33.89	4
	4.04 ... 15.90 ... 42.43	4.5
	14.49 ... 9.02 ... 47.49	5
	4.03 ... 9.26 ... 14.49	5.5
	75.27	6
Dalgalılık w	2.20 ... 2.62 ... 3.26	1.5
	2.05 ... 2.56 ... 3.13	2
	1.86 ... 2.52 ... 3.03	2.5
	1.94 ... 2.50 ... 3.31	3
	2.03 ... 2.39 ... 2.88	3.5
	1.98 ... 2.53 ... 3.04	4
	2.16 ... 2.52 ... 2.89	4.5
	2.36 ... 2.69 ... 2.97	5
	2.27 ... 2.28 ... 2.29	5.5
	2.57	6



Şekil 3.36 Çeşitli yol kaplaması cinsleri üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişki

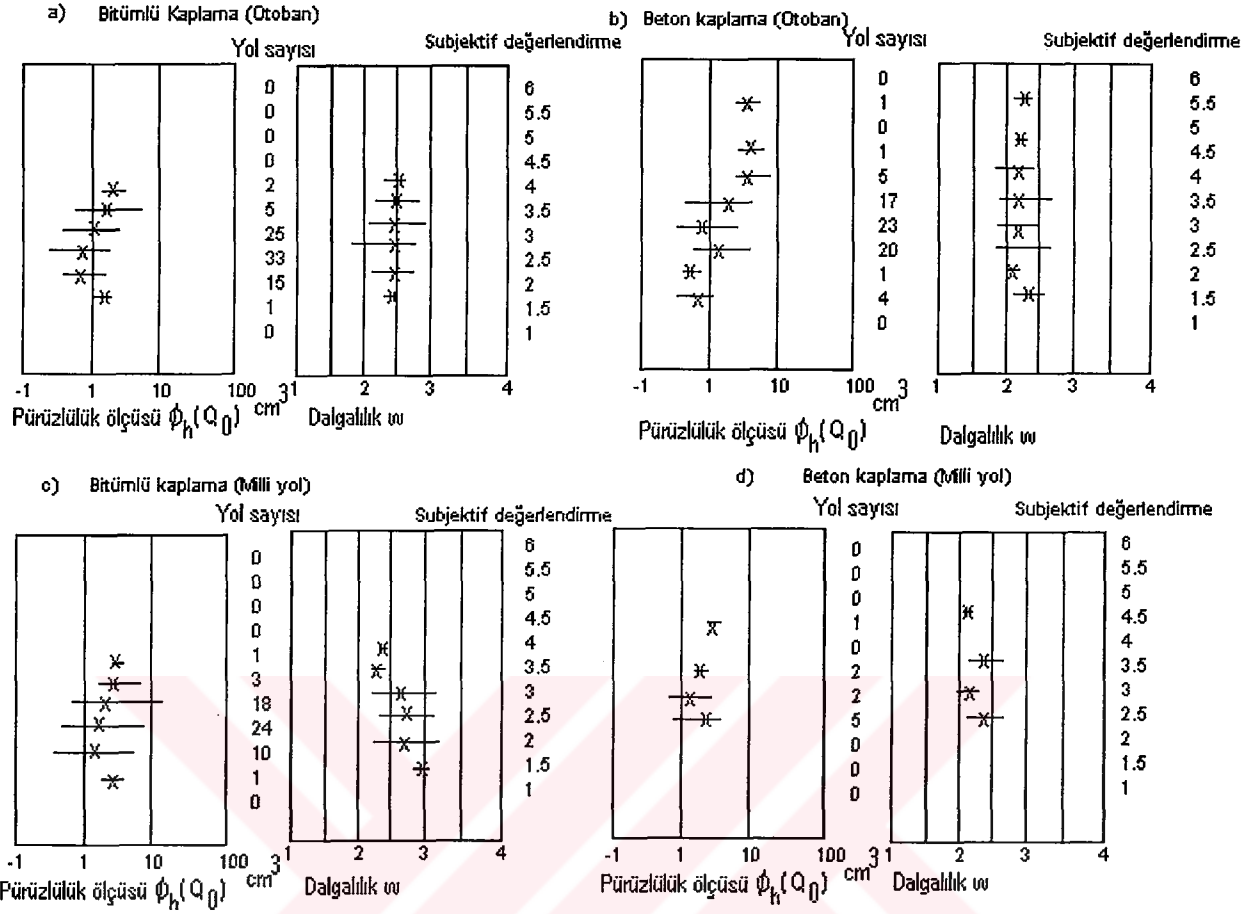
(I: Aritmetik ortalama değer)

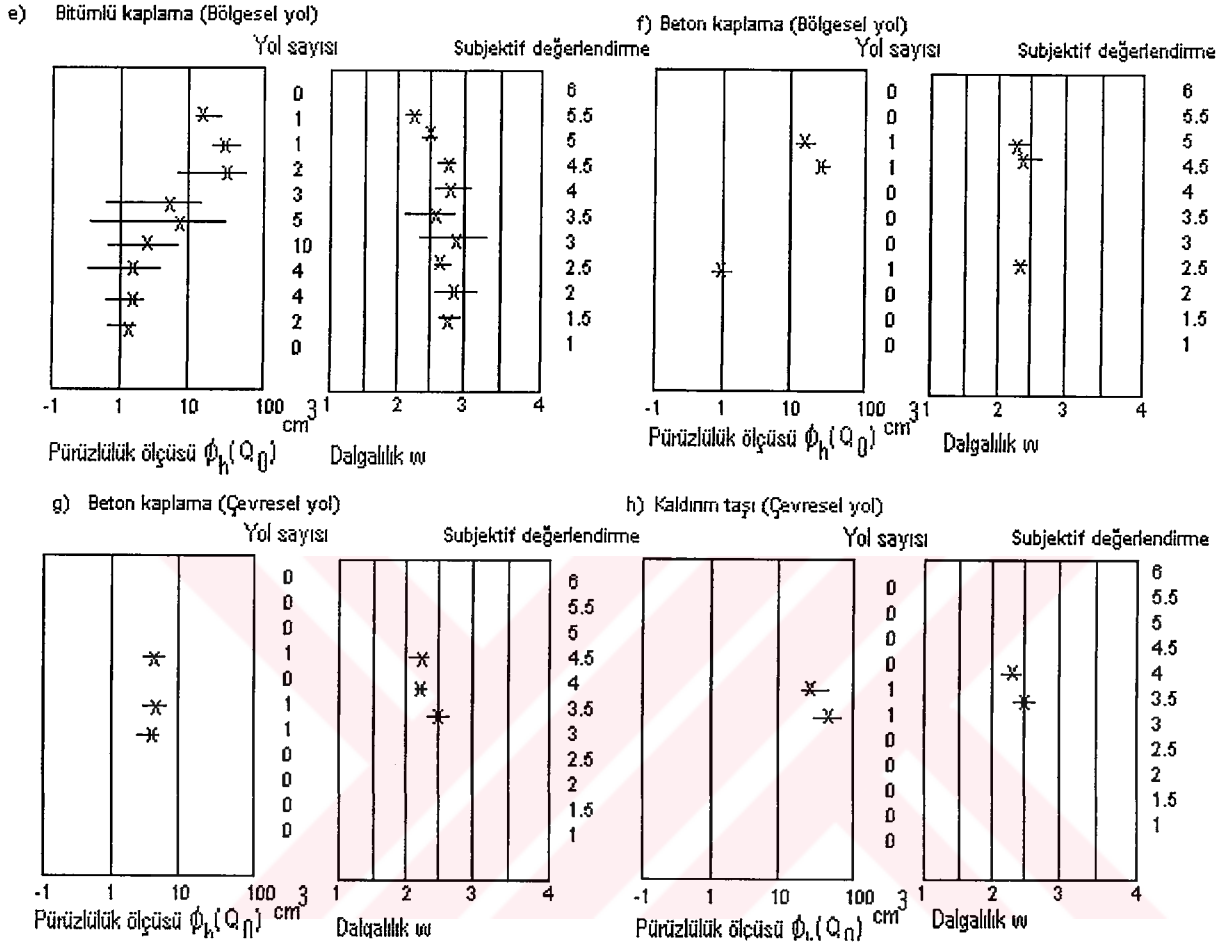
- Bitümlü kaplama
- Çimento beton kaplama
- Kaldırım taşı kaplaması



Şekil 3.37 Çeşitli yol sınıfları üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişki

- Milli otobanlar
- Milli yollar
- Bölgesel yollar
- Çevresel yollar





Şekil 3.38 Çeşitli yol sınıfları ve yol kaplaması cinsleri üzerinde elde edilen spektrumların tanım değerleri ve yapılan subjektif değerlendirmeler arasındaki ilişki

(I: Aritmetik ortalama değer)

a ve b) Milli otobanlar

c ve d) Milli yollar

e ve f) Bölgesel yollar

g ve h) Çevresel yollar

Tablo 3.8 Çeşitli subjektif değerlendirmelerde elde edilen $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük ölçüsü ve w dalgalılığı arasındaki ilişki

Subjektif değerlendirme	$\phi_h(\Omega_0)$ cm ³ ; w için r korelasyon katsayısı
1.0	çok az/veri yok
1.5	0.93
2.0	0.79
2.5	0.24
3.0	0.63
3.5	0.42
4.0	0.12
4.5	0.71
5.0	0.95
5.5	çok az/veri yok
6.0	çok az/veri yok

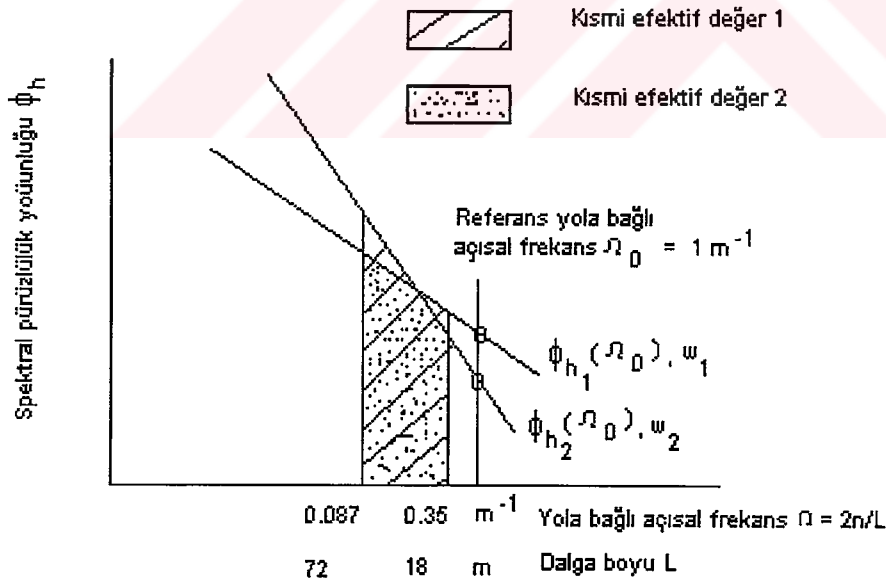
Özellikle çok iyi olarak ve çok kötü olarak değerlendirilen yollarda, spektrumun her iki tanım değeri arasında kuvvetli ilişkiler oluşmaktadır. Bu durum, subjektif değerlendirmenin $\phi_h(\Omega_0)$ ve w 'nin belirli kombinasyonlarından oluştuğunu göstermektedir. Bu, aşağıdaki teoriye göre de kanıtlanmaktadır [1]:

Alt kısım 3.1.2'ye göre, taşıt içindeki yolcu özellikle 1'den 5 Hz'e kadar olan etki frekansı bölgesinde taşıtın dikey yöndeki salınım hareketlerine karşı büyük reaksiyon göstermektedir. Bu frekanslardan (3.4) denklemi yardımıyla pürüz akışının dalga boyları ortaya çıkmaktadır. Normal seyir hızlarında ($< 50 \text{ m/s} \hat{=} 180 \text{ km/h}$) 50 m'ye kadar olan dalga boyu bölgesi, insan yapısını etkileyen salınım zorlaması konusunda önem taşımaktadır.

Bu dalga boylarından, 3.1 denklemi yardımıyla, $\phi_h(\Omega_0)$ pürüz genliklerinin yola bağlı açısal frekansa bağlı spektral yoğunluk akışı elde edilmektedir. Bu şekilde pürüzlülüğün her iki tanım değerleri $\phi_h(\Omega_0)$ ve w elde edilmektedir.

İnceleme bölgesi, -taşıt gövdesinin dikey yöndeki ivme değerinde ortaya çıkan uçlardan dolayı salınım zorlamasının taşıt yolcuları üzerindeki etkisinin en büyük olduğu- taşıt gövdesinin rezonans bölgesiyle ($w / 2n$ 0.5...2 Hz) sınırlandırılırsa ve ilgili yola bağlı açısal frekans bölgesinde -örneğin $v_{BAB} = 130$ km/h'lik yönetmelik hızına sahip otobanlar üzerinde dalga boyu $L = 72...18$ m, açısal frekans $\Omega = 0.087...0.35$ m^{-1} olmaktadır- spektral yoğunluk akışından bir kısmi efektif değer elde edilirse, bu değer, Şekil 3.39'da görüldüğü gibi, farklı spektrumların akışları için aynı olmaktadır. Bu şekilde, Şekil 3.39'daki doğruların alt kısmındaki yüzey hacimleri aynı büyüklükte olmaktadır. Buna göre (3.26) denklemi ile karşılaştırınız) boyuna profildeki farklı pürüz akışlarında aynı subjektif değerlendirme elde edilmektedir.

Bu nedenle düzgünlük durumunun değerlendirilmesi, değişken w dalgahlık değerlerinde alçak frekanslı taşıt gövdesi salınımları nedeniyle, yalnızca subjektif değerlendirme dikkate alınarak yapılmamalıdır. Değerlendirme için, ek olarak, kısa dalgalı pürüzlerle ilgili, örneğin aks rezonans bölgesindeki bir değerlendirme büyüklüğünün (örneğin dinamik tekerlek yükünün) tespit edilmesi gerekli olmaktadır



Şekil 3.39 Farklı $\phi_h(\Omega_0)$ -w kombinasyonlarından aynı konfor değerlendirmesinin elde edilmesi

3.4.Karşılaştırma ölçümleri

3.4.1.Deney yapılışı

Konuyla ilgili olarak Almanya'da 3-4 Ekim 1983'te yapılmış olan ölçümler dikkate alınmaktadır [1].

Uzun yol ölçümlerinde olduğu gibi ölçüm izinin konumu, ölçüm başlangıcından önce birimsel olarak belirlenmiştir.

Çeşitli aletlerden elde edilen ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilir olması için sonuç ifadelerinde 100 m bölümlerindeki tanım değerleri değerlendirilmiştir. Bu şekilde, istatistiksel ifadelerin elde edilmesi pürüzlülük akışının kararlı olması şartı sağlanmıştır. Bunun yanında hasarlı yol bölümlerinin kolaylıkla belirlenmesi sağlanmıştır.

3.4.2.Durum büyüklüklerinin karşılaştırılmaları için değerlendirme

Almanya'da yapılan ölçümlerde, (spektrumun her iki tanım değeri $\phi_h(\Omega_0)$ ve w de dahil olmak üzere) boyuna profildeki düzgünlük durumu için kullanılan bütün ifade büyüklükleri durum büyüklükleriyle ifade edilmişlerdir.

Her bir aletin ölçümlerinden elde edilen boyuna profildeki düzgünlüğün durum büyüklüklerinin karşılaştırılması için aşağıdaki yöntemler kullanılmıştır [1]:

- Sıklık analizleri,
- Korelasyon analizleri,
- Tekrarlanabilirlik incelemeleri.

Ölçüm sistemleri alt bölüm 3.1.3'e göre karşılaştırılmaktadır. Çeşitli ölçüm aletlerinin ölçümleri sırasında elde edilen durum büyüklükleri fiziksel büyüklük olarak birbirleriyle uyuşmasalar bile -örneğin pürüz yükseklikleri ve profil eğim değerleri gibi- elde edilen değerlerin korelasyonları karşılaştırılabilir olduğu için düzgünlüğün bütün durum büyüklükleri birbirleriyle karşılaştırılabilmektedirler. Logaritmik veya karesel olarak kullanılan skalalar nedeniyle ortaya çıkabilecek hatalar, kullanılan skalanın lineer skalaya çevrilmesi sonucu engellenmiştir.

Sıklık analizi

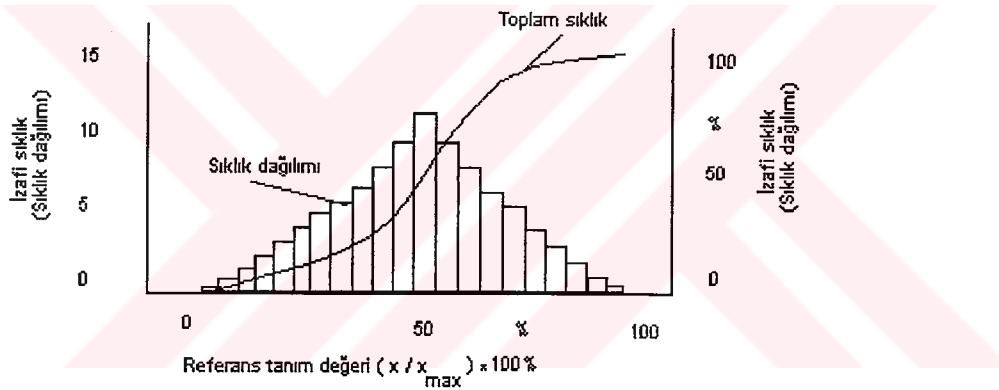
Ölçüm aletlerinin birbirleriyle karşılaştırılmasında durum büyüklüklerinin dağılımını göstermek için sıklık analizi kullanılmaktadır.

Her alet için sıklık analizi aşağıdaki adımlarla yapılmaktadır:

- Elde edilen bütün 100 m bölüm değerlerini büyüklük sırasına göre düzenleme,
- Drop-out'ların (değersiz veriler) yok edilmesi,
- Boyutsuz, böylece karşılaştırılabilir bir ifade elde etmek için bütün verilerin değerlerinin max değere oranlanması.

Skalada en küçük değer olarak ($\hat{=}$ %0) ideal düzgün yüzey için geçerli olan değer - eğer biliniyorsa ve ifade edilebiliyorsa, aksi takdirde ortaya çıkan en küçük değerdeki durum büyüklüğü- seçilmektedir. Elde edilen en büyük değerdeki durum büyüklüğü en büyük sınır değeri ($\hat{=}$ %100) oluşturmaktadır. Kullanılan diyagramlarda bütün durum büyüklükleri için kullanılan skalanın sol kısmında düzgün yollar, sağ kısmında pürüzlü yollar bulunmaktadır.

Mutlak sıklık dağılımlarını göstermek için her aletin veri miktarı aynı genişlikteki 25 sınıfa ayrılmaktadır. Her sınıfta bulunan veri miktarının toplam veri miktarına oranının çizelgesi bir histogram şeklinde olmaktadır. Aynı diyagramda mutlak toplam sıklık, ilgili durum büyüklüğünün toplanmış ölçüm değer sayısı olarak (yukarıdaki gibi boyutsuz olarak) gösterilmektedir.



Şekil 3.40 Sıklık analizinin diyagram şeklindeki gösterimi (örnek: İdeal normal dağılımın şematik çizimi)

Şekil 3.40’da örnek olarak ideal normal dağılıma sahip bir veri miktarı için sıklık analizi diyagramı verilmektedir.

Korelasyon analizi

Ölçüm sonuçlarının korelasyon analizi, iki farklı ölçüm aletinin verileri arasındaki fonksiyonel ilişkinin kuvvetini ve doğrultusunu göstermektedir. Korelasyon analizi, iki farklı aletin veri miktarının ilişkisini denklem şeklinde ifade eden korelasyon katsayılarının her iki regresyon doğrusundan elde edilmesi ile yapılmaktadır. 1. aletin veri miktarı X ile, toplam N sayıdaki değerleri x_i ile ve 2. aletin veri miktarı Y ile, aynı şekilde toplam N sayıdaki değerleri y_i ile ifade edilirse

$$r = b_{yx} b_{xy} \quad (3.27)$$

denklemleri ile ifade edilen r korelasyon katsayısı, her iki regresyon katsayısının

$$b_{yx} = \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i y_i \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) \right] \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right]^{-1} \quad (3.28a)$$

$$b_{xy} = \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i y_i \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) \right] \left[\left(\sum_{i=1}^N y_i^2 \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right]^{-1} \quad (3.28b)$$

regresyon denklemlerinden elde edilmesi ile hesaplanmaktadır.

İki farklı sistemin ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonun belirlendiği durum büyüklüğü miktarı, her iki sistemin veri miktarlarından ölçüm yolu başına veri miktarı daha küçük olan kadar olmaktadır. Aralarında korelasyonun belirlendiği iki ölçüm aletlerinden birinin ölçüm sonuçlarında ortaya çıkan drop-out'lar, karşılaştırılabilirliğin korunabilmesi açısından her iki aletin veri miktarının azalmasına neden olmaktadır.

Korelasyon analizinde her iki regresyon doğrusu, bu doğrular çevresindeki dağılım, her iki regresyon doğrusundan elde edilen ortalama doğru elde edilmektedir ve korelasyon katsayısı hesaplanmaktadır.

İdeal düzgün bir yol için bilinen sınır değerler korelasyonda dikkate alınmaktadır. Aletlerin biri veya her ikisi için sınır değerleri ifade edilemiyorsa her iki karşılaştırma aletinin veri miktarının en küçük değere sahip olan durum büyüklüğü her iki alet için alt sınır olmaktadır.

Korelasyon hesaplarında kullanılan veri akışları, ölçüm yolu üzerinde gösterilmektedir. Bunun için 100 m bölüm değerleri, her iki veri miktarının max değerine göre izafi hale getirilmektedir. Bu çizimden her bir ölçüm bölümünün ölçüm yolu akışında elde edilen durum büyüklükleri yardımıyla ne ölçüde tekrar lokalize edilebileceği anlaşılmaktadır.

Tekrarlanabilirlik

Tekrarlanabilirlik incelemelerinde tekrarlanan ölçümlerin sonuçları, ilgili ortalama değerle bağlantılı olarak varyasyon katsayısı ile ifade edilmektedir. V_K varyasyon katsayısı (3.29) denklemi ile

$$V_K = (s/x) 100\% \quad (3.29)$$

İfade edilmektedir. Burada M sayıdaki ölçümlerde elde edilen değerlerin standart sapması

$$s = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (x_j)^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{j=1}^M x_j \right)^2} \quad (3.30)$$

olmaktadır ve M sayıdaki ölçümlerde x ortalama değeri

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_j \quad (3.31)$$

olmaktadır. Burada, tekrarlanan ölçümlerde en düşük ölçüm değeri sayısı olarak belirlenen durum büyüklüğü sayısı önemli olmaktadır.

3.4.3.Sonuçlar

Almanya’da çeşitli aletler yardımıyla yapılan ölçümlerde boyuna profildeki düzgünlüğün durum büyüklüklerinin karşılaştırılmaları için kullanılan yöntemlerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Sıklık analizleri

Elde edilen 100 m bölüm değerlerinin sayısı Tablo 3.9’da görülmektedir. Tablo, ek olarak tekrarlanabilirlik üzerine bilgiler içermektedir.

Diğer ifadeler durum büyüklüklerinin sıklık analizlerinden alınabilmektedir. Tablo 3.10’da skala üzerinde ayrılan sınıflar için aritmetik ortalama değer dahil olmak üzere elde edilen değerler ifade edilmektedir.

Tablo 3.9 Karşılaştırma ölçümlerinde tekrarlanabilirlik incelemeleri için her bir ölçüm aleti tarafından tekrarlanan ölçüm sayısı ve elde edilen ölçüm değerlerinin sayısı; durum büyüklüğü başına ifadeler $\hat{=}$ tekrarlanabilirlik akışı

[illegible]

Tablo 3.10 Yapılan ölçümlerde elde edilen durum büyüklükleri. Skaladaki dağılım

		Karşılaştırma ölçümlerinden elde edilen durum büyüklükleri					Skalanın sınır değerleri	
Alet	Durum büyüklüğü	Birim	Min	Orta	Max	Skala cinsi	min (düzgün)	max (pürüzlü)
HSRM	s3	mm	0.29	1.66	13.51	lineer	0	--
	s10	mm	0.56	3.57	19.61	lineer	0	--
	s30	mm	0.53	8.48	34.54	lineer	0	--
	s50	mm	0.82	8.07	39.52	lineer	0	--
	$\phi h(\Omega_0)$	cm3	0.11	2.36	187.75	logaritmik	0	--
	w	1	1.39	2.58	3.8	lineer	0	--
LRST	CV	1	1	3.81	9	lineer	1	9
Planograf	$\Sigma FU / 100$	1	0	0.05	1.44	sınır değerle lineer	0	--
Açı ölçer ISETH	sW	o/oo	1.09	1.78	3.79	lineer	0	--
PN ölçer BAST	sol SV	10e-6	0.76	13.79	211.4	karesel	0	--
	p*	1	4.53	3.18	0.56	logaritmik	5	0
PN ölçer FMPA	sağ SV	10e-6	0.7	26.23	1161	karesel	0	--
	Sağ SV	10e-6	0.7	26.13	861.3	karesel	0	--
	sağ SV	1	4.51	2.74	-0,68	logaritmik	5	0
APL	sol SV	10e-6	1.32	17.69	1200.48	karesel	0	--
	LEI	1	4.34	3.15	-0.54	logaritmik	5	0
BI	cm/km	cm/km	102	184.3	484	lineer	100	500
Bay pürüz etki ölçeri	cm/km	cm/km	59	228.3	1953	lineer	0	--

Tekrarlanabilirlik

Aynı yol üzerinde tekrarlanan ölçümlerden elde edilen durum büyüklükleri kötü bir tekrarlanabilirlik göstermektedirler. Tablo 3.11, bu ölçümlerde sık olarak ortaya çıkan varyasyon katsayılarını göstermektedir. Değerlerin geniş bir bölge üzerine yayılması, büyük ölçüde birbirini takip eden ölçümlerde bütün ölçüm aletleri tarafından iz tutmanın zor olmasından kaynaklanmaktadır (ölçüm sistemleri genel olarak yüksek bir çözünürlükle ölçüm yaptıkları için, iyi bir düzgünlük durumunda bile ize göre meydana gelebilecek çok küçük sapmalar varyasyon katsayısı üzerinde önemli bir etkide bulunabilmektedir).

Tablo 3.11 Tekrarlanan ölçümlerden elde edilen varyasyon katsayısı

Yol	530	23	30	16	23	25	15	72			57	5	22	38	2	61	43	23	12
	525	59	18	19		57	19												
	518	92	41	23															
	511	79	22	55		72	18												
	501	30	30	38				12			10	12	17	17	38	10	23		2
Alet	Tanım değeri	s3	s10	s30	s50	$\phi h(Q_0)$	w	CV	$\Sigma FU/100m$	sW	SV	p*	SV	SV	p*	SV	LEI	cm/km	cm/km
											sol		sol	sağ		sol			
		HSRM						LRST	Planograf	Açı ölçer	PN ölçer BAST			PN ölçer FMFA		APL	BI	Bay pür etki ölçeri	

Korelasyon analizi

Tablo 3.11’de bütün ölçüm yolu için korelasyon katsayıları görülmektedir.

BÖLÜM 4 YOLUN BOYUNA PROFİLİNİN ELDE EDİLMESİ

4.1. Boyuna profilde yol pürüzlülüğünün elde edilmesi için gerekli ifadelerin oluşturulması

Yol pürüzlülüğü frekans bölgesinde aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir:

$$\phi_h(\Omega) = \phi_h(\Omega_0) (\Omega / \Omega_0)^{-w} \quad (4.1)$$

burada

$\phi_h(\Omega)$ Pürüzlerin spektral yoğunluğu

$\phi_h(\Omega_0)$ Pürüzlülük ölçüsü

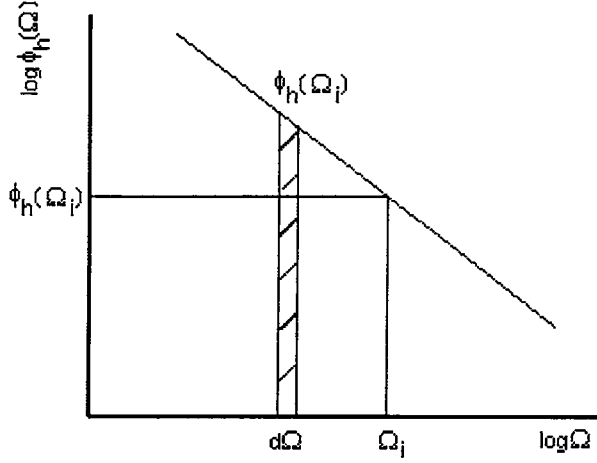
w Dalgalılık

Ω Yola bağlı açısal frekans

Ω_0 Referans yola bağlı açısal frekans

Yol pürüzlülüğünün x yoluna bağlı olarak elde edilmesi için $\phi_h(\Omega)$ spektral yoğunluğu, Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi $d\Omega$ genişliğinde N kısmi efektif değerlere ayrılmaktadır ve buradan b_i Fourier katsayılarının mutlak değerleri hesaplanmaktadır:

$$b_i^2 = 2 * d\Omega * \phi_h(\Omega_i) \quad (4.2)$$



Şekil 4.1 $\phi_h(\Omega)$ spektral yoğunluğun kısmi efektif değerlere ayrılması

$\phi_h(\Omega)$ spektral yoğunluk faz bilgisi içermediğinden dolayı kompleks Fourier katsayılarının belirlenmesi için gerekli olan faz açıları rasgele seçilmektedir.

Yalnızca tek bir izde ölçüm yapılıyorsa, kompleks Fourier katsayılarının yardımıyla ters Fourier transformasyonun kullanılması sonucu yol pürüzlülüğü dx mesafesinde N_1 destek noktasında hesaplanabilmektedir. Burada, hesaplama için gerçel kısımların dikkate alınması yeterli olmaktadır:

$$h(k) = \text{Re}\left(\sum_{i=1}^n b_i * e^{j*2*\pi*\frac{i}{N_i}}\right) k = 1, N_i \quad (4.3)$$

Yol pürüzlülüğünün elde edilmesi sırasında arka tekerleklerin izlerinin ön tekerleklerin izlerini takip ettiği ve böylece her iki prosesin birbirlerinden, taşıtın tekerlek konumu ve yol pürüzlülüklerinin ilgili dalga boyları ile belirlenen bir φ faz açısı ile ayrıldıkları kabul edilmektedir. Frekans bölgesinde Fourier katsayıları arasındaki ilişki

$$b_{arkai} = b_{öni} * e^{-j\varphi} \quad (4)$$

denklemini ile ifade edilmektedir.

(4.4) denkleminde arka seyir izinin Fourier katsayıları hesaplanmaktadır ve (4.3) denkleminin kullanılmasıyla aynı şekilde arka izin pürüzlülüğü elde edilmektedir. Sol ve sağ seyir izi arasındaki ilişki koherans fonksiyonu ile ifade edilmektedir [1], EK A.

Koherans fonksiyonu ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\gamma_h = \frac{|\phi_{hsolsag}(\Omega)|}{\phi_h(\Omega)} \quad (4.5)$$

burada

$\phi_{hsolsag}(\Omega)$ Sol ve sağ seyir izinin çapraz spektrumu

$\phi_h(\Omega) = \phi_{sol}(\Omega) = \phi_{sağ}(\Omega)$ Sol ve sağ seyir izlerinin oto spektrumu

İki iz arasındaki korelasyon ve bu korelasyona karşılık gelen spektrum yoğunluk fonksiyonları, izotropi kavramı kullanılarak tek bir izin spektrumu yardımıyla elde edilebilmektedir [8,9]. Yol yüzeyinin izotropik olduğu kabulü yapılarak gerçek spektrumdan çok büyük bir sapma göstermeyen bir spektrum (bir yol yüzeyi profili) elde edilmektedir.

Yol pürüzlülüğünün oto ve çapraz korelasyon fonksiyonlarının ve Fourier transformasyonlarının elde edilmesi ile, γ_h koherans fonksiyonu ve $\varphi_{sağ}$ ve φ_{sol} faz açıları arasında, yol pürüzlülüğünün elde edilmesinde sadece gerçel kısımların kullanıldığının dikkate alınmasıyla,

$$\varphi_{sağ} = \varphi_{sol} \arccos(\gamma_h) \quad (4.6)$$

ilişkisinin bulunduğu görülmektedir.

Pratikte önce (4.2) denklemine göre bir tekerlekte (örneğin ön sol tekerlekte) pürüzlülüğün kompleks Fourier katsayıları belirlenmektedir. Taşıtın diğer izlerindeki Fourier katsayıları (4.4) ve (4.5) denklemlerine göre ilgili faz açıları ile yapılan çarpım sonucu elde edilmektedir. En sonunda (4.3) denklemine göre ters Fourier transformasyonunun kullanılmasıyla diğer seyir izlerinin pürüzlülüğü elde edilmektedir. Seyir hızının dikkate alınmasıyla

$$dt = dx / v \quad (4.7)$$

denklemini yardımıyla pürüzlülük zamana bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Burada dt, iki destek noktası arasındaki zaman olarak uzaklığı ifade etmektedir.

4.2. Yolun boyuna profilinin pürüzlülüğünün bilgisayar programı yardımıyla elde edilmesi

Fortran dilinde yazılmış olan bir program yardımıyla bir izdeki yol pürüzlülüğü elde edilmektedir, EK B .

Programda pürüzlülüğün ve dalgalılığın çıkış verilerinden elde edilen diyagram üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelenebilmesi için aşağıdaki prosedür uygulanmıştır:

- $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değerin yol pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için $w = 2.5$ sabit olmak üzere $\phi_h(\Omega_0)$ için alt bölüm 3.3.3'e göre çeşitli değerler verilmiştir, EK C;

- w dalgalılık değerin yol pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için $\phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ cm}^3$ sabit olmak üzere w için alt bölüm 3.3.3'e göre çeşitli değerler verilmiştir, EK D;

Programın akışı

Programda giriş değerleri $\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değeri ve w dalgalılık olmaktadır.

$\phi_h(\Omega)$, (4.1) denklemi yardımıyla giriş değerlerine göre elde edilmektedir. Buradan (4.2) denklemi yardımıyla b_i Fourier katsayıları elde edilmektedir. Elde edilen b_i Fourier katsayıları kompleks hale getirilmektedir. (4.3) denkleme göre ters Fourier transformasyonunun kullanılmasıyla dx mesafesindeki h pürüz yükseklikleri elde edilmektedir. Elde edilmiş olan h pürüz yüksekliklerinin gerçel kısımları çıkış dosyasına yazılmaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yolların korunabilmesi, gerekli bakımların tespit edilmesi için yolların düzgünlük durumunun belirlenmesi, bunun için bu doğrultuda geliştirilmiş olan aletlerin tedarik edilmesi gerekmektedir. Bu konuda devlet ve özel sektörün kolektif bir çalışma içinde bulunmaları gerekmektedir.

Yapılacak ölçümler sırasında belirli bir prosedürün takip edilmesi ve ölçümün dokümante edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle daha önce yapılmış olan ölçümlerin proseslerinin incelenmesi gerekmektedir.

Bu düşünce altında tavsiyem, ilgili konuda yayımlanmış olan yabancı dokümanların incelenmesi ve bu alandaki gelişmelerin takip edilmesidir.

Finansal açıdan gerekli kaynakların araştırılması da bu alandaki çalışmaların yapılması ve geliştirilmesi için, ülkemiz şartları göz önünde bulundurulduğunda, önemli bir koşul olarak gözükmektedir.

İlgili ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi için otomotiv sektöründeki firmaların AR-GE departmanlarının konuyla ilgili olarak gerekli çalışmaları yapmaları devlet desteği altında sağlanmalıdır.

Bunun yanında, ilgili ölçümlerin yapılacağı, ölçüm yapmaya uygun ölçüm yollarının tesbit edilmesi ve ilgili arazilerin devlet tarafından kamulaştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] BRAUN, H., LIESNER, W., MITSCHKE, M., GERZ, U., OHNEMÜLLER, L.,
ALTENDORFER, D., SULTEN, P. und HELLENBROICH, T.
Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik
Heft 598, 1991.
Sammlung und Auswertung von Strassenunebenheitsdaten
Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr
Bergisch Gladbach, Mai 1985
- [2] VDI Berichte 877 (Verein Deutscher Ingenieure)
Unebenheiten von Schiene und Strasse als Schwingungsursache
VDI Verlag, Tagung Braunschweig, 23-24. April 1991
- [3] BORMANN, V.
Fahrbahnunebenheiten paralleler Fahrspuren und Anwendung der Ergebnisse
Vortragsausdrucke der 1. IfF-Tagung
Braunschweig, 1976
- [4] MITSCHKE, M.
Dynamik der Kraftfahrzeuge
Band B: Schwingungen
Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1984

[5] GÖKTAN, A.

Geometrik Yol Düzgünsüzlükleri

Mühendis ve Makina Cilt 33, Sayı 392, Eylül 1992

[6] KLINGENBERG, H.

Automobil-Messtechnik, Akustik

Springer-Verlag, 1991

[7] CRANDALL, H.

Random Vibration

The Technology Press of The Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapman & Hall, Ltd., London, 1958

[8] KAMASH, KMA. and ROBSON, J.D.

The Application of Isotropy in Road Surface Modelling

Journal of Sound and Vibration

Vol.57, p.89-100, 1978

[9] HEATH, A.N.

Application of The Isotropic Road Roughness Assumption

Journal of Sound and Vibration

Volume 115, p.131-144, 1987

EK A KOHERANS İFADESİ

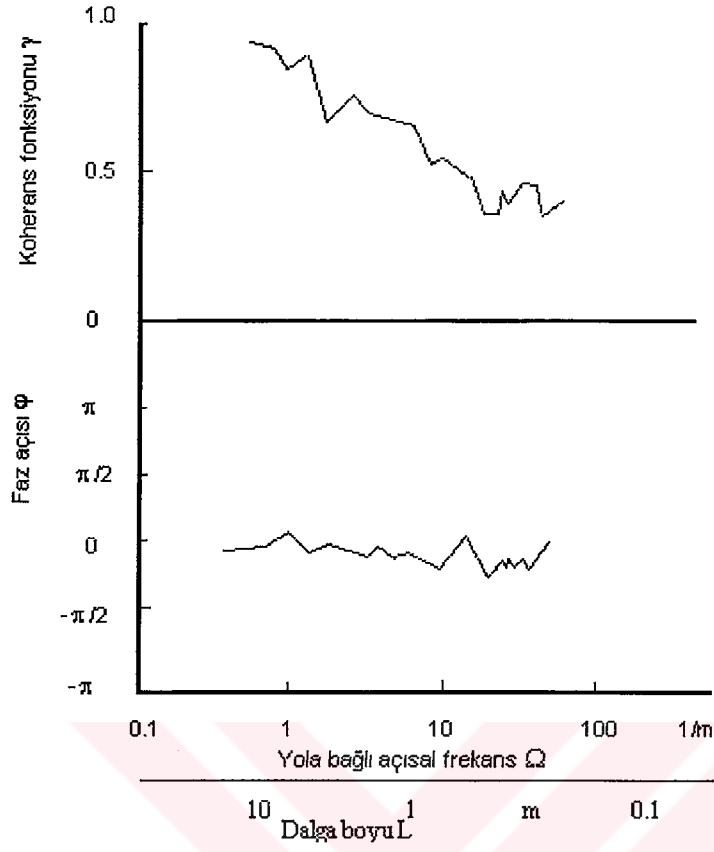
Sol ve sağ seyir izi arasındaki ilişki koherans fonksiyonu ile ifade edilmektedir [1].

Koherans fonksiyonu şu şekilde tanımlanmaktadır:

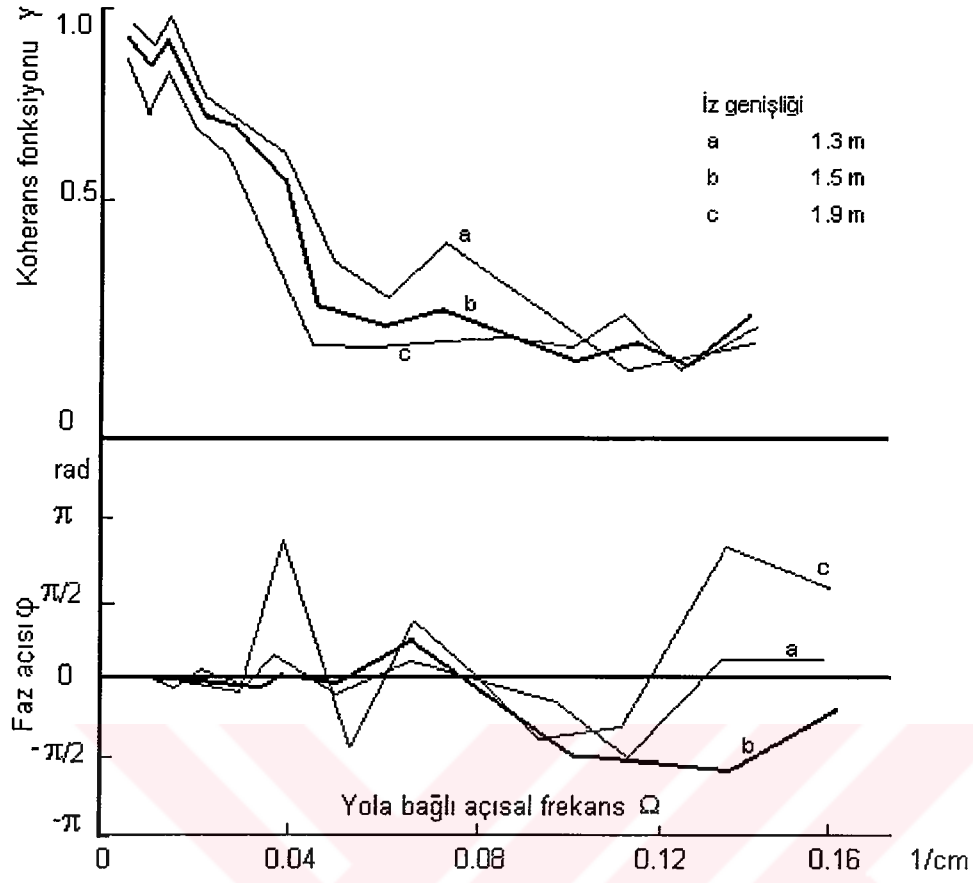
$$\gamma_h = \frac{|\phi_{hsolsag}(\Omega)|}{\phi_h(\Omega)} \quad (A1)$$

Her iki iz arasındaki ilişki kuvvetlendikçe koherans değeri 1'e yaklaşmaktadır; tam ilişki halinde bu değer 1 olmaktadır. Her iki iz arasında ilişki bulunmaması halinde koherans değeri 0 olmaktadır.

Koherans değeri, dalga boyu büyüdükçe (Şekil A.1.) veya iz genişliği azaldıkça (Şekil A.2.) 1'e yaklaşmaktadır [3,4].



Şekil A1 Koherans değerinin dalga boyu ile değişimi



Şekil A2 Koherans değerinin iz genişliği ile değişimi

EK B BİLGİSAYAR PROGRAMI

Fortran dilinde yazılmış olan program, boyuna profildeki yol pürüzlülüğünü bir izde elde etmektedir:



```

C *****
C *      PROGRAMIN AMACI: Zamana göre yol fonksiyonu olarak pürüzlülüğün bulunması
C *
C *      ALT PROGRAMLAR: Hesap.for FORIER KATSAYILARININ HESAPLANMASI
C *                      Fout.for DÜZENLEME
C *
C *      DATA DOSYASI: 'Yol.txt'
C *      1. SATIR x (YOL) 2. SATIR SOL ÖN İZ,
C *      YOLUN TANIM DEĞERLERİ DOSYASI: 'Veri.txt'
C *      İFADE EDİLMESİ GEREKENLER:
C *      Phil: YOLUN SPEKTRAL YOĞUNLUĞU
C *      w1:   DALGALILIK
C *      V:    TAŞIT HIZI
C *      Wiz:  TAŞIT İZ GENİŞLİĞİ
C *      lr:   TEKERLEK KONUMU
C *      N:    FOURIER KATSAYILARI SAYISI
C *      Nst:  KULLANILAN DESTEK YERLERİ SAYISI
C *      Rand: FORIER KATSAYISININ BELİRLENMESİ İÇİN RANDOM OLUŞTURUCUN
UN
C *      BELİRLENMESİ İÇİN DEĞİŞKEN
C *      Kont: YÖNLENDİRİCİ DEĞİŞKEN ( Kont=1 GRAFİK ÇIKIŞ )
C *
C *****
C *
C      Program Puruz
C
C      INTEGER N
C      INTEGER Nst,Nstg,Seg,z
C
C      REAL Phil,W1,V,Wiz,Lmax,dx
C      REAL Lmin,fmax,Lg,dt,sv
C      REAL*4 Ks
C
C      COMMON /Hesap1/Phil,W1,Wiz,Lmin,Lmax,Ks
C VERİ PARAMETRELERİNİN OKUNMASI
C      Open(Unit=42,File='Veri.txt',STATUS='UNKNOWN')
C      Rewind(42)
C      READ(42,*)
C      READ(42,*)
C      READ(42,*) Phil,w1
C      READ(42,*)
C      READ(42,*) V,sv
C      READ(42,*)
C      READ(42,*) N,z
C      READ(42,*)
C      READ(42,*) Ks
C      CLOSE(42)
C      Wiz=sv
C
C HESAPLANMASI GEREKEN YOL AÇISAL FREKANS BÖLGESİNİN ELDE EDİLMESİ
C KABUL: fmax=20Hz
C VERİLEN: v ve dt
C dt, BİR SİN SALINIMININ TARİF EDİLMESİ İÇİN EN AZ 8 NOKTANIN
C GEREKLİ OLDUĞU KABULÜNDEN ORTAYA ÇIKMAKTADIR
C HESAPLANILACAK MIN dt :  $dt=1/(fmax*8)=6.25*e-3$  s
C
C      fmax=20
C EN KÜÇÜK DALGA BOYU
C      Lmin=v/fmax
C      dt=1/(fmax*z)
C      dx=v*dt
C      Nst=N*z

```

c OLUŞTURULACAK BÖLGENİN BOYU

Lmax=v/Fmax*N

c BÖLGE SAYISI: 1

Seg=1

c YOL BOYU İÇİN BÜTÜN DESTEK YERLERİNİN HESAPLANMASI

Nstg=Nst*Seg

Lg=Seg*Lmax

c ÇIKIŞ VERİ DOSYASININ AÇILMASI

c STOKASTİK PÜRÜZLÜLÜKLER

OPEN(Unit=30,file='Yol.txt',STATUS='UNKNOWN')

REWIND(30)

write(30,*) 'Phil=',Phil, 'w1=',w1, 'V=',V

write(30,*) 'Wiz=',Wiz, 'Lmax=',Lmax

write(30,*) 'Nst=',Nst, 'N=',N, 'Lg=',Lg, 'Seg=',seg

write(30,*) 'Nst,N,v,dx,seg'

write(30,*) Nst,N,v,dx,seg

c

c PÜRÜZLÜLÜKLERİN BELİRLENMESİ İÇİN Hesap'İN ÇAĞIRILMASI

CALL Hesap(N,Nst,dx)

close(45)

END

INCLUDE 'Hesap.for'

INCLUDE 'fout.for'

c YOLUN OLUŞTURULMASI

CALL Fout(N,Nr,Alpha,beta,Nst,dx)

RETURN

END



```

C *****
C *      PROGRAMIN AMACI: Zaman bölgesinde pürüzlülüklerin hesaplanması
C *
C *      PAREMETRE LİSTESİ
C *      Snul:      BÖLGE UZUNLUĞU
C *      N:          KULLANILAN FOURIER KATSAYILARININ SAYISI
C *      Eingang:   (COMMON)
C *
C *      Phil:       SPEKTRAL REFERANS YOĞUNLUĞU
C *      w1:         DALGALILIK
C *      v:          HIZ
C *      dx:         YOL ELEMANI
C *      wiz:        İZ GENİŞLİĞİ
C *      Ks:         TESADÜFİ FAZ AÇISININ OLUŞTURULMASI İÇİN DEĞİŞKE
N
C *
C *****

```

```

SUBROUTINE HESAP(N,Nst,dx)

```

```

  INTEGER N,I,Nr,Nst

```

```

  REAL*4 Ks

```

```

  PARAMETER(Nr=2048)

```

```

  REAL ALPHA(1:1024)

```

```

  REAL BETA(1:1024)

```

```

  REAL W1,Wiz,PHI1,PI,EK1,EK2

```

```

  REAL PHIA

```

```

  REAL OM,OMNUL,dx

```

```

  REAL Lmin,Lmax,ommax,dOm,ommin

```

```

  COMMON/HESAP1/ PHI1,W1,Wiz,Lmin,Lmax,Ks

```

```

  Pi=3.1415927

```

```

C BAŞLANGIÇ DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI

```

```

C EN ALT ve EN ÜST YOL FREKANSLARI

```

```

  ommin=2.*Pi/lmax

```

```

  Ommax=2.*Pi/Lmin

```

```

  dom=Ommax/N

```

```

  OMNUL=dom

```

```

  alpha(1)=0

```

```

C EFEKTİF DEĞERLERİN HESAPLANMASI

```

```

  DO 10 I=2,N+1

```

```

    Om=dom*(I-1)

```

```

    EK1=PHI1*Om**(-w1)

```

```

    Alpha(I)=SQRT(2.*dom*EK1)

```

```

10  CONTINUE

```

```

C FAZ AÇISININ BELİRLENMESİ

```

```

  DO 20 I=2,N+1

```

```

    CALL RANDOM(Ks)

```

```

    Phia=Ks*2.*Pi

```

```

    EK2=Alpha(I)

```

```

C ÖN SOL SEYİR İZLERİNİN OLUŞTURULMASI

```

```

  Alpha(I)=EK2*COS(Phia)

```

```

  Beta(I)=EK2*SIN(Phia)

```

```

20  CONTINUE

```

```

  Alpha(1)=0.

```

```

  Beta(1)=0.

```

```

C *****
C *      PROGRAMIN AMACI: Program FOURIER katsayılarından yolun pürüzlülüğünü
C *      hesaplamaktadır
C *
C *      GİRİŞ PAREMETRELERİ
C *      U(nr)      : İZİN FOURIER KATSAYILI VEKTÖRÜ
C *      ÇIKIŞ PAREMETRELERİ
C *      U(nr)      : İZİN FONKSİYON DEĞERLERİ
C *      Nst        : FONKSİYON DEĞERLERİNİN SAYISI
C *      N          : FOURIER KATSAYILARININ SAYISI
C *      Nr         : ALAN BOYUTLANDIRMASI
C *****

      SUBROUTINE Fout(N,Nr,vlr,vli,Nst,dx)

      INTEGER k,I,N,Nr,Nst,k1

      REAL vlr(1:nr),vli(1:nr)
      REAL Pi,Arg,x
      REAL svl

      COMPLEX Ftvl(1:2048)
      COMPLEX sumvl

      Pi=3.1415927
c vlr REAL KISIM; vli: İMAJİNER KISIM
      DO 10 I=1,N
         Ftvl(I)=CMPLX(vlr(I),vli(I))
10      CONTINUE

c İŞLENME
      DO 20 K=0,Nst-1
         sumvl=(0.,0.)
         DO 30 I=0,N-1
            arg=I*2.*Pi*k/Nst
            sumvl=sumvl+Ftvl(I+1)*CMPLX(COS(arg),SIN(Arg))
30      CONTINUE
         k1=k+1
         x=k*dx
c OLUŞTURULAN YOL PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÇIKIŞ DOSYASINA YAZILMASI
         svl=REAL(sumvl)
         write(30,*) x,svl
20      CONTINUE

      return

      end

```

c SEYİR İZİNİN OLUŞTURULMASI İÇİN DATA DOSYASI

c SPEKTRAL YOĞUNLUK $\Phi(w)$, DALGALILIK w

0.35e-6, 2.5

c HIZ v , İZ GENİŞLİĞİ Δ

20, 2.03

c FOURIER KATSAYISI N , DEĞİŞKEN z ($Nst = z * N_{koef}$)

128, 8

c K_s

15



EK C $\phi_h(\Omega_0)$ PÜRÜZLÜLÜK DEĞERİNİN YOL PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNE ETKİSİ

$\phi_h(\Omega_0)$ pürüzlülük değerinin yol pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için programda giriş değerleri olarak $w = 2.5$ sabit olmak üzere $\phi_h(\Omega_0)$ için alt bölüm 3.3.3'e göre çeşitli değerler konulmuştur ve çıkış değerleri ilgili tablolarda ve şekillerde gösterilmiştir:

- $w = 2.5, \phi_h(\Omega_0) = 0.35 \text{ e-6 cm}^3$ (Tablo C 1, Şekil C 1)

- $w = 2.5, \phi_h(\Omega_0) = 1 \text{ e-6 cm}^3$ (Tablo C 2, Şekil C 2)

- $w = 2.5, \phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ e-6 cm}^3$ (Tablo C 3, Şekil C 3)

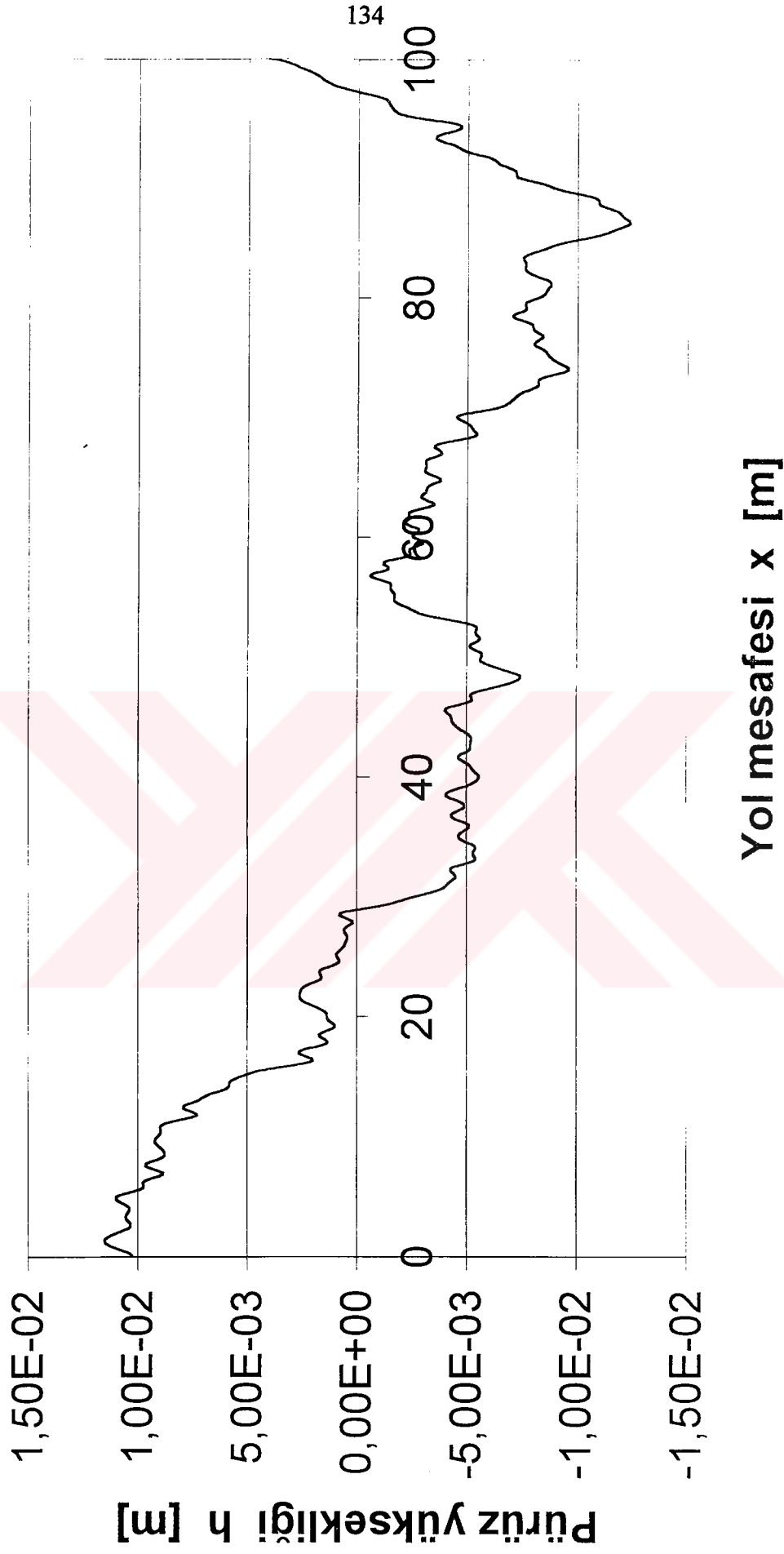
- $w = 2.5, \phi_h(\Omega_0) = 10 \text{ e-6 cm}^3$ (Tablo C 4, Şekil C 4)

- $w = 2.5, \phi_h(\Omega_0) = 78.82 \text{ e-6 cm}^3$ (Tablo C 5, Şekil C 5)

Tablo C.1 $\phi_h(\Omega_0) = 0.35e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri

Phi1=	3.500000E-07	w1=	2.500000	V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000		
Nst=	1024	N=	128	Lg=	128.000000
Seg=					1
Nst,N,v,dx,seg					
1024	128	20.000000	1.250000E-01		1
0.000000E+00	1.024753E-02				
1.250000E-01	1.027094E-02				
2.500000E-01	1.033882E-02				
3.750000E-01	1.045787E-02				
5.000000E-01	1.062035E-02				
6.250000E-01	1.080874E-02				
7.500000E-01	1.100211E-02				
8.750000E-01	1.118144E-02				
1.000000	1.133217E-02				
1.125000	1.144431E-02				
1.250000	1.151122E-02				
1.375000	1.152882E-02				
1.500000	1.149560E-02				
1.625000	1.141341E-02				
1.750000	1.128815E-02				
1.875000	1.112991E-02				
2.000000	1.095220E-02				
2.125000	1.077073E-02				
2.250000	1.060205E-02				
2.375000	1.046193E-02				
2.500000	1.036343E-02				
2.625000	1.031447E-02				
2.750000	1.031540E-02				
2.875000	1.035750E-02				
3.000000	1.042363E-02				
3.125000	1.049171E-02				
3.250000	1.054039E-02				
3.375000	1.055528E-02				
3.500000	1.053329E-02				
3.625000	1.048347E-02				
3.750000	1.042391E-02				
3.875000	1.037608E-02				
4.000000	1.035866E-02				
4.125000	1.038319E-02				
4.250000	1.045216E-02				
4.375000	1.055916E-02				
4.500000	1.069007E-02				
4.625000	1.082408E-02				
4.750000	1.093522E-02				
4.875000	1.099526E-02				
5.000000	1.097916E-02				
5.125000	1.087280E-02				
5.250000	1.068060E-02				
5.375000	1.042906E-02				
5.500000	1.016291E-02				
5.625000	9.933200E-03				
5.750000	9.780135E-03				
5.875000	9.717449E-03				
6.000000	9.725199E-03				
6.125000	9.755587E-03				
6.250000	9.750878E-03				
6.375000	9.667127E-03				
6.500000	9.493871E-03				
6.625000	9.261061E-03				

$\phi(0)=0.35E-06$ $w=2.5$

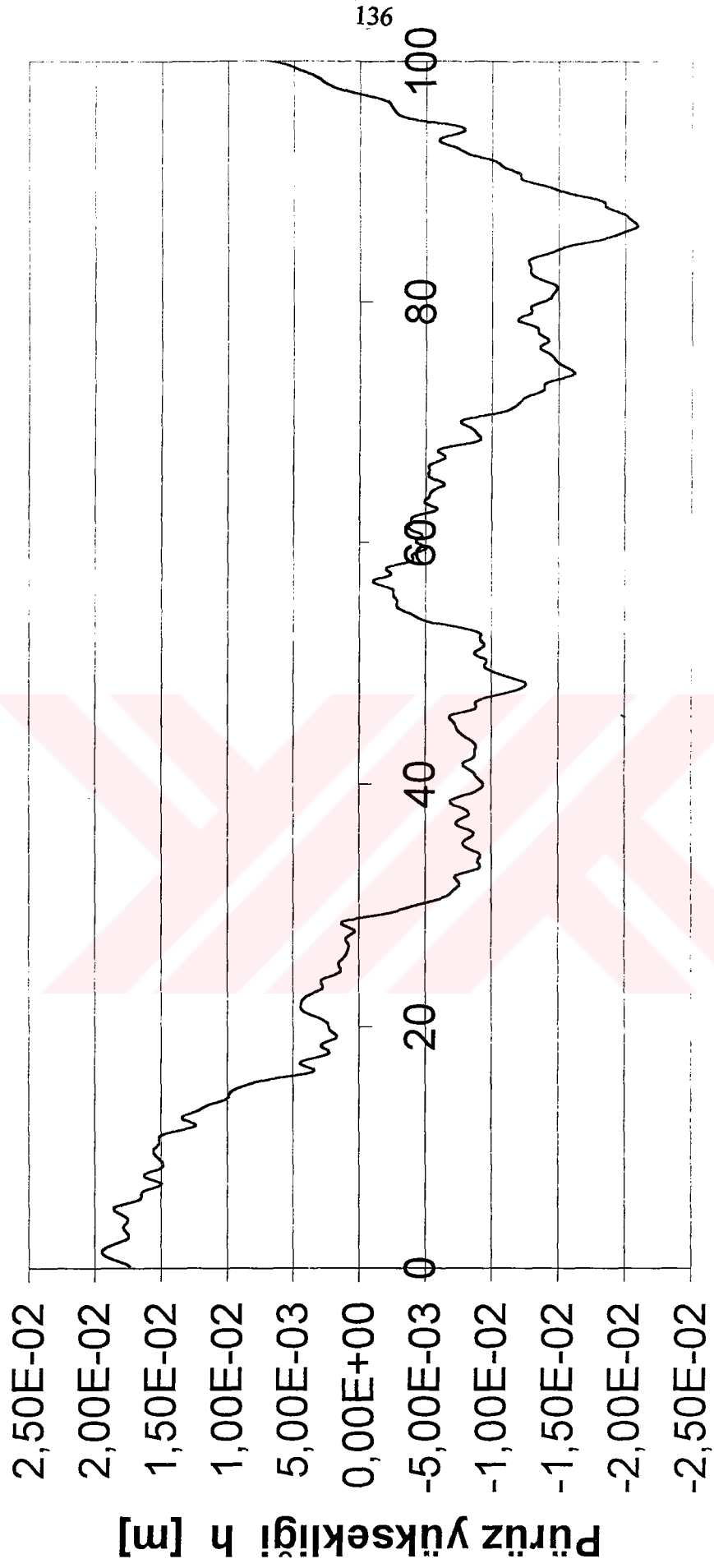


Şekil C 1 $\phi_h(\Omega_0) = 0.35e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri diyagramı

Tablo C2 $\phi_h(\Omega_0) = 1e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri

Phi1=	1.000000E-06	w1=	2.500000	V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000		
Nst=	1024	N=	128	Lg=	128.000000
Seg=					1
Nst,N,v,dx,seg					
1024	128	20.000000	1.250000E-01		1
0.000000E+00	1.732148E-02				
1.250000E-01	1.736104E-02				
2.500000E-01	1.747579E-02				
3.750000E-01	1.767702E-02				
5.000000E-01	1.795167E-02				
6.250000E-01	1.827011E-02				
7.500000E-01	1.859697E-02				
8.750000E-01	1.890008E-02				
1.000000	1.915487E-02				
1.125000	1.934441E-02				
1.250000	1.945751E-02				
1.375000	1.948727E-02				
1.500000	1.943111E-02				
1.625000	1.929218E-02				
1.750000	1.908047E-02				
1.875000	1.881299E-02				
2.000000	1.851259E-02				
2.125000	1.820585E-02				
2.250000	1.792074E-02				
2.375000	1.768389E-02				
2.500000	1.751739E-02				
2.625000	1.743463E-02				
2.750000	1.743621E-02				
2.875000	1.750737E-02				
3.000000	1.761914E-02				
3.125000	1.773422E-02				
3.250000	1.781650E-02				
3.375000	1.784167E-02				
3.500000	1.780450E-02				
3.625000	1.772030E-02				
3.750000	1.761964E-02				
3.875000	1.753877E-02				
4.000000	1.750933E-02				
4.125000	1.755081E-02				
4.250000	1.766738E-02				
4.375000	1.784824E-02				
4.500000	1.806951E-02				
4.625000	1.829604E-02				
4.750000	1.848391E-02				
4.875000	1.858537E-02				
5.000000	1.855815E-02				
5.125000	1.837838E-02				
5.250000	1.805351E-02				
5.375000	1.762831E-02				
5.500000	1.717846E-02				
5.625000	1.679018E-02				
5.750000	1.653143E-02				
5.875000	1.642548E-02				
6.000000	1.643860E-02				
6.125000	1.648995E-02				
6.250000	1.648200E-02				
6.375000	1.634044E-02				
6.500000	1.604756E-02				
6.625000	1.565404E-02				

$\phi(0)=1.E-06$ $w=2.5$

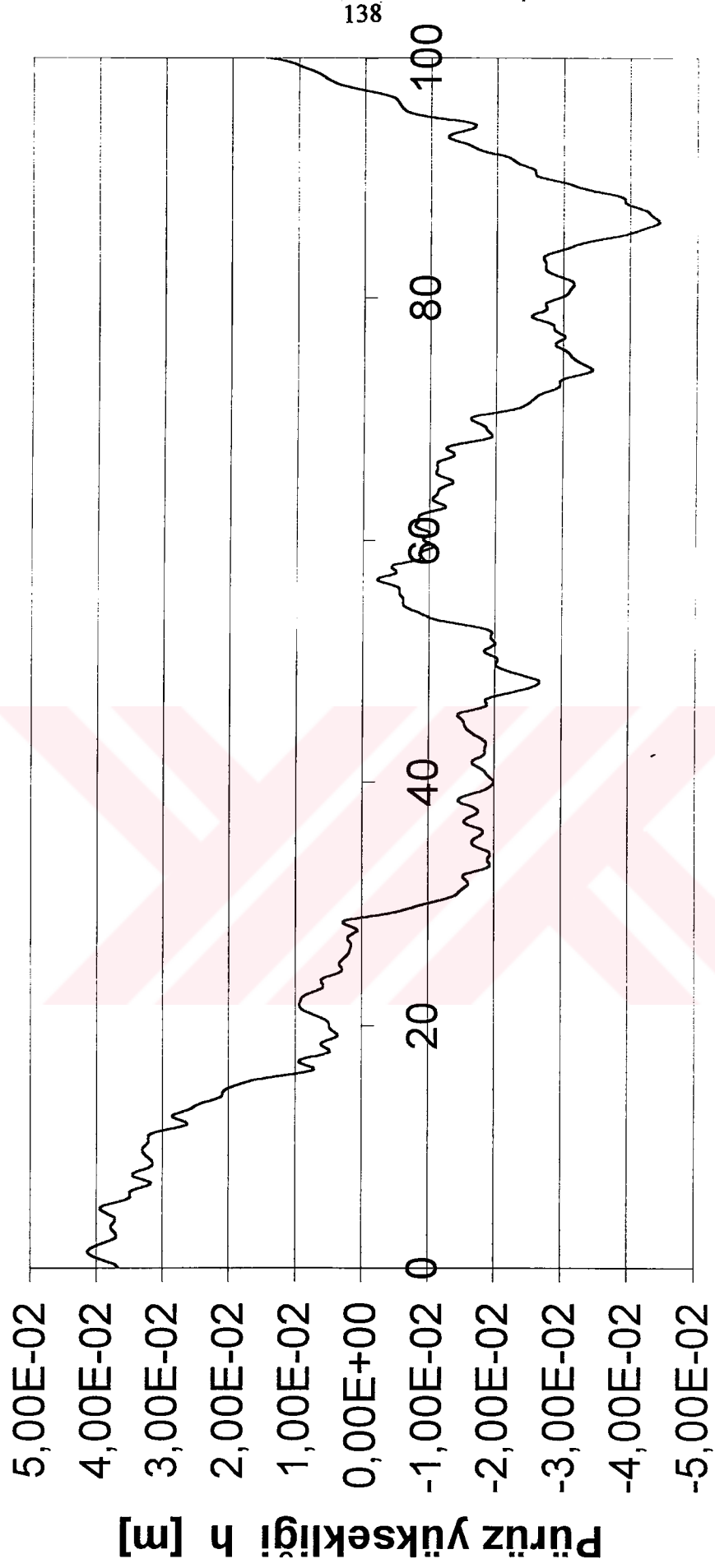


Şekil C 2 $\phi_h(\Omega_0) = 1e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri diyagramı

Tablo C.3 $\phi_n(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri

Phi1=	4.500000E-06	w1=	2.500000V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000	
Nst=	1024	N=	128	Lg= 128.000000Seg= 1
Nst,N,v,dx,seg				
1024	128	20.000000	1.250000E-01	1
0.000000E+00	3.674445E-02			
1.250000E-01	3.682832E-02			
2.500000E-01	3.707177E-02			
3.750000E-01	3.749865E-02			
5.000000E-01	3.808121E-02			
6.250000E-01	3.875674E-02			
7.500000E-01	3.945012E-02			
8.750000E-01	4.009311E-02			
1.000000	4.063362E-02			
1.125000	4.103568E-02			
1.250000	4.127561E-02			
1.375000	4.133873E-02			
1.500000	4.121961E-02			
1.625000	4.092491E-02			
1.750000	4.047577E-02			
1.875000	3.990841E-02			
2.000000	3.927113E-02			
2.125000	3.862045E-02			
2.250000	3.801565E-02			
2.375000	3.751320E-02			
2.500000	3.715999E-02			
2.625000	3.698444E-02			
2.750000	3.698777E-02			
2.875000	3.713876E-02			
3.000000	3.737586E-02			
3.125000	3.761996E-02			
3.250000	3.779450E-02			
3.375000	3.784792E-02			
3.500000	3.776906E-02			
3.625000	3.759041E-02			
3.750000	3.737688E-02			
3.875000	3.720535E-02			
4.000000	3.714289E-02			
4.125000	3.723086E-02			
4.250000	3.747816E-02			
4.375000	3.786184E-02			
4.500000	3.833120E-02			
4.625000	3.881171E-02			
4.750000	3.921026E-02			
4.875000	3.942555E-02			
5.000000	3.936779E-02			
5.125000	3.898644E-02			
5.250000	3.829727E-02			
5.375000	3.739530E-02			
5.500000	3.644105E-02			
5.625000	3.561735E-02			
5.750000	3.506845E-02			
5.875000	3.484372E-02			
6.000000	3.487154E-02			
6.125000	3.498047E-02			
6.250000	3.496360E-02			
6.375000	3.466328E-02			
6.500000	3.404205E-02			
6.625000	3.320725E-02			

$\phi(0)=4.5E-06$ $w=2.5$



Şekil C.3 $\phi_b(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri diyagramı

Tablo C 4 $\phi_h(\Omega_0) = 10e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri

Phi1=	1.000000E-05	w1=	2.500000	V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000		
Nst=	1024	N=	128	Lg=	128.000000
Seg=					1
Nst,N,v,dx,seg					
1024	128	20.000000	1.250000E-01		1
0.000000E+00	5.477535E-02				
1.250000E-01	5.490040E-02				
2.500000E-01	5.526333E-02				
3.750000E-01	5.589966E-02				
5.000000E-01	5.676816E-02				
6.250000E-01	5.777515E-02				
7.500000E-01	5.880873E-02				
8.750000E-01	5.976728E-02				
1.000000	6.057301E-02				
1.125000	6.117237E-02				
1.250000	6.153005E-02				
1.375000	6.162413E-02				
1.500000	6.144658E-02				
1.625000	6.100724E-02				
1.750000	6.033774E-02				
1.875000	5.949190E-02				
2.000000	5.854196E-02				
2.125000	5.757198E-02				
2.250000	5.667035E-02				
2.375000	5.592138E-02				
2.500000	5.539485E-02				
2.625000	5.513312E-02				
2.750000	5.513814E-02				
2.875000	5.536317E-02				
3.000000	5.571666E-02				
3.125000	5.608052E-02				
3.250000	5.634072E-02				
3.375000	5.642030E-02				
3.500000	5.630276E-02				
3.625000	5.603645E-02				
3.750000	5.571818E-02				
3.875000	5.546247E-02				
4.000000	5.536936E-02				
4.125000	5.550051E-02				
4.250000	5.586914E-02				
4.375000	5.644110E-02				
4.500000	5.714077E-02				
4.625000	5.785710E-02				
4.750000	5.845121E-02				
4.875000	5.877214E-02				
5.000000	5.868603E-02				
5.125000	5.811752E-02				
5.250000	5.709023E-02				
5.375000	5.574563E-02				
5.500000	5.432305E-02				
5.625000	5.309517E-02				
5.750000	5.227702E-02				
5.875000	5.194192E-02				
6.000000	5.198341E-02				
6.125000	5.214581E-02				
6.250000	5.212066E-02				
6.375000	5.167298E-02				
6.500000	5.074687E-02				
6.625000	4.950242E-02				

$\phi(0)=10.E-06$ $w=2.5$



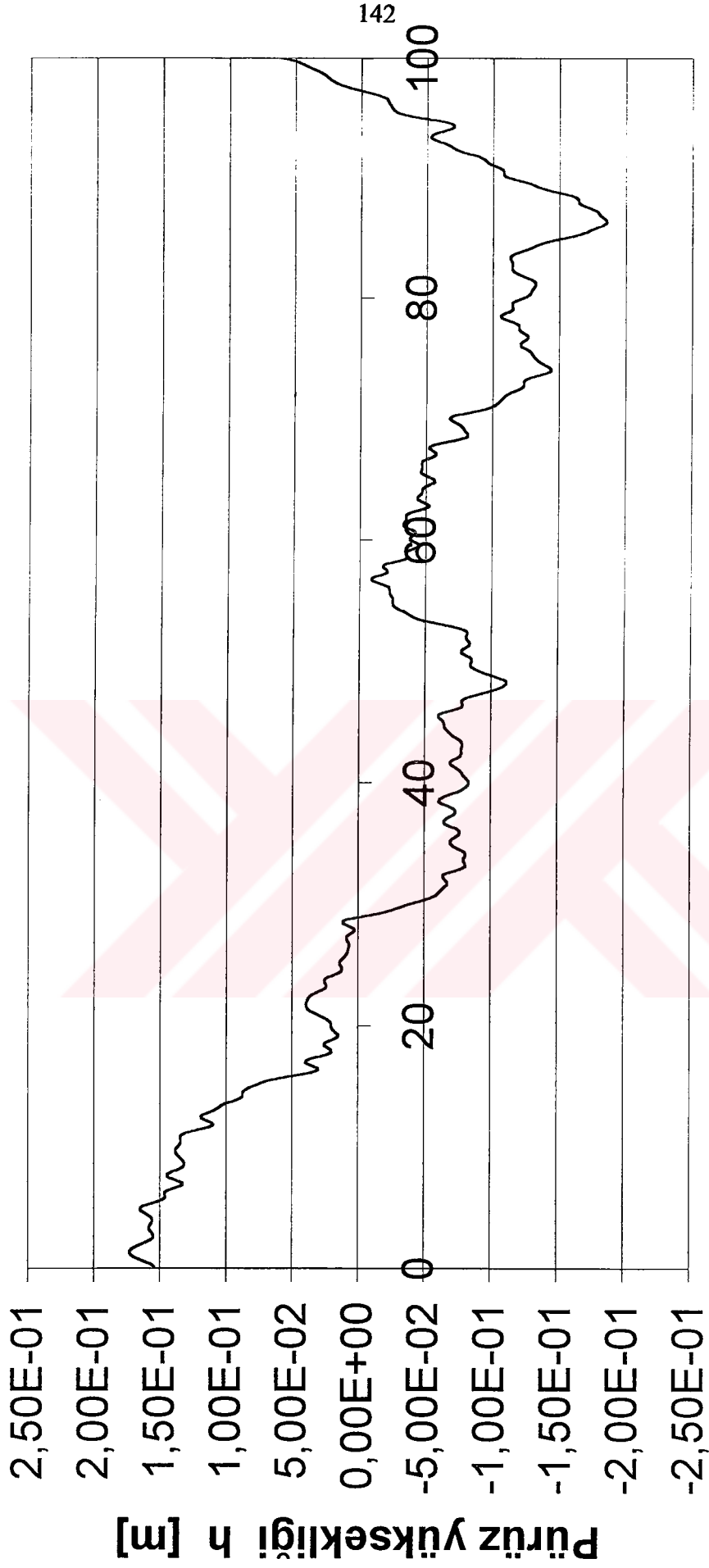
Yol mesafesi x [m]

Şekil C $4\phi_h(\Omega_0) = 10e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri diyagramı

Tablo C.5 $\phi_h(\Omega_0) = 78.82e-6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri

Phi1=	7.882000E-05	w1=	2.500000	V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000		
Nst=	1024	N=	128	Lg=	128.000000
Seg=					1
Nst,N,v,dx,seg					
1024	128	20.000000	1.250000E-01		1
0.000000E+00	1.537812E-01				
1.250000E-01	1.541324E-01				
2.500000E-01	1.551512E-01				
3.750000E-01	1.569377E-01				
5.000000E-01	1.593760E-01				
6.250000E-01	1.622031E-01				
7.500000E-01	1.651050E-01				
8.750000E-01	1.677961E-01				
1.000000	1.700582E-01				
1.125000	1.717409E-01				
1.250000	1.727450E-01				
1.375000	1.730091E-01				
1.500000	1.725106E-01				
1.625000	1.712772E-01				
1.750000	1.693976E-01				
1.875000	1.670229E-01				
2.000000	1.643559E-01				
2.125000	1.616328E-01				
2.250000	1.591014E-01				
2.375000	1.569987E-01				
2.500000	1.555205E-01				
2.625000	1.547857E-01				
2.750000	1.547997E-01				
2.875000	1.554315E-01				
3.000000	1.564240E-01				
3.125000	1.574455E-01				
3.250000	1.581762E-01				
3.375000	1.583994E-01				
3.500000	1.580695E-01				
3.625000	1.573218E-01				
3.750000	1.564282E-01				
3.875000	1.557105E-01				
4.000000	1.554489E-01				
4.125000	1.558172E-01				
4.250000	1.568521E-01				
4.375000	1.584579E-01				
4.500000	1.604222E-01				
4.625000	1.624332E-01				
4.750000	1.641011E-01				
4.875000	1.650022E-01				
5.000000	1.647604E-01				
5.125000	1.631645E-01				
5.250000	1.602802E-01				
5.375000	1.565053E-01				
5.500000	1.525115E-01				
5.625000	1.490642E-01				
5.750000	1.467671E-01				
5.875000	1.458263E-01				
6.000000	1.459428E-01				
6.125000	1.463988E-01				
6.250000	1.463282E-01				
6.375000	1.450714E-01				
6.500000	1.424714E-01				
6.625000	1.389775E-01				

$\phi(0)=78.82\text{E-}06$ $w=2.5$



Şekil C5 $\phi_h(\Omega_0) = 78.82\text{e-}6 \text{ m}^3$, $w = 2.5$ için çıkış değerleri diyagramı

EK D w DALGALILIK DEĞERİNİN YOL PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNE ETKİSİ

w dalgalılık değerinin yol pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için programda giriş değerleri olarak $\phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ cm}^3$ sabit olmak üzere w için alt bölüm 3.3.3'e göre çeşitli değerler konulmuştur ve çıkış değerleri ilgili tablolarda ve şekillerde gösterilmiştir:

- $\phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ e-6 cm}^3$, w = 1.78 (Tablo D1, Şekil D1)

- $\phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ e-6 cm}^3$, w = 2 (Tablo D2, Şekil D2)

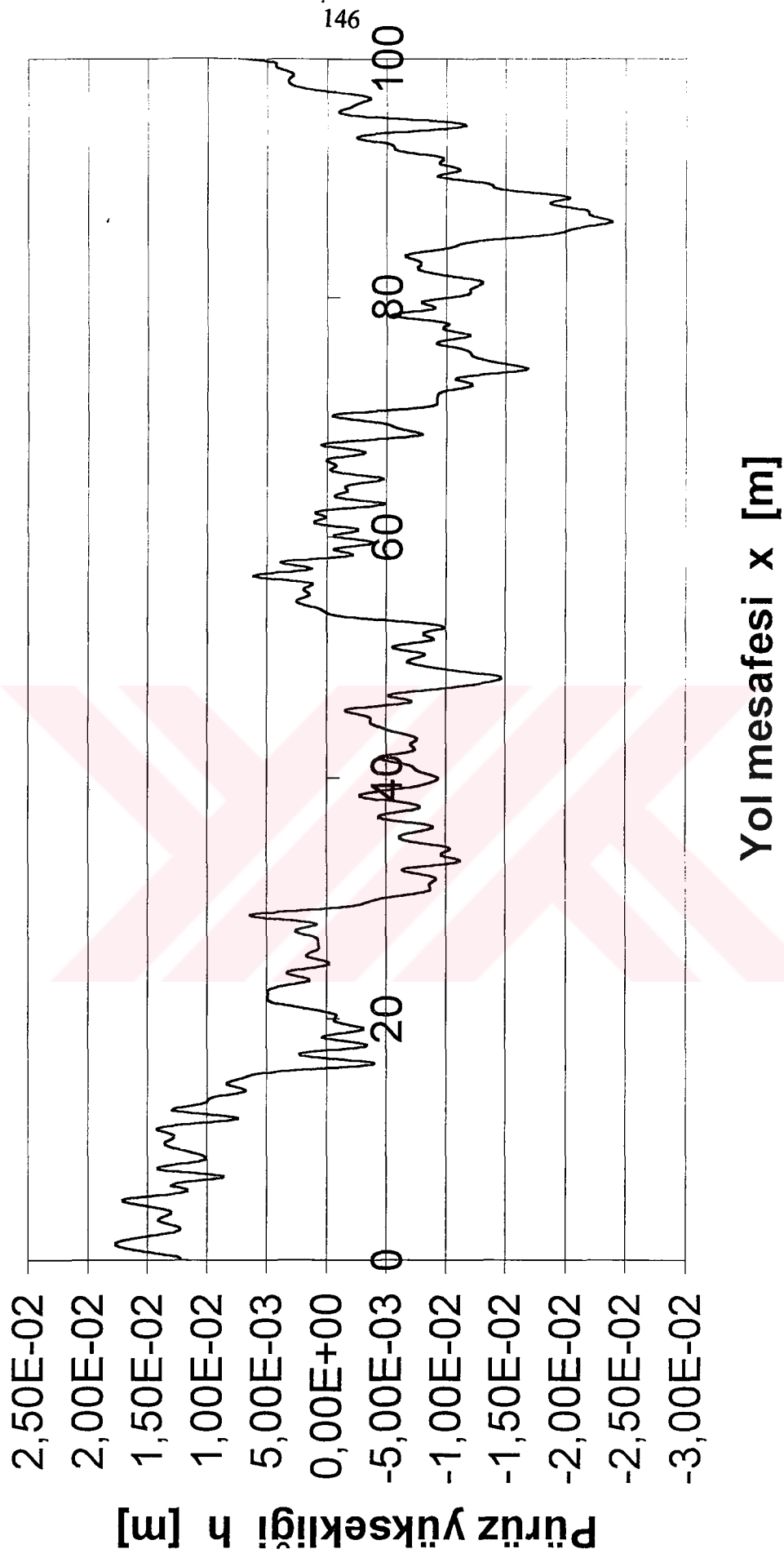
- $\phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ e-6 cm}^3$, w = 3 (Tablo D3, Şekil D3)

- $\phi_h(\Omega_0) = 4.5 \text{ e-6 cm}^3$, w = 3.31 (Tablo D4, Şekil D4)

Tablo D $\downarrow \phi_b(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 1.78$ için çıkış değerleri

Phi1=	4.500000E-06	w1=	1.780000	V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000		
Nst=	1024	N=	128	Lg=	128.000000
Seg=					1
Nst,N,v,dx,seg					
1024	128	20.000000	1.250000E-01		1
0.000000E+00	1.226569E-02				
1.250000E-01	1.215945E-02				
2.500000E-01	1.232094E-02				
3.750000E-01	1.278945E-02				
5.000000E-01	1.351518E-02				
6.250000E-01	1.439202E-02				
7.500000E-01	1.530000E-02				
8.750000E-01	1.613775E-02				
1.000000	1.683531E-02				
1.125000	1.734982E-02				
1.250000	1.765462E-02				
1.375000	1.773168E-02				
1.500000	1.757179E-02				
1.625000	1.718049E-02				
1.750000	1.658373E-02				
1.875000	1.582946E-02				
2.000000	1.498390E-02				
2.125000	1.412533E-02				
2.250000	1.333743E-02				
2.375000	1.270222E-02				
2.500000	1.229049E-02				
2.625000	1.214796E-02				
2.750000	1.227936E-02				
2.875000	1.263683E-02				
3.000000	1.312139E-02				
3.125000	1.360219E-02				
3.250000	1.395122E-02				
3.375000	1.408185E-02				
3.500000	1.397684E-02				
3.625000	1.369340E-02				
3.750000	1.334355E-02				
3.875000	1.305830E-02				
4.000000	1.295024E-02				
4.125000	1.308818E-02				
4.250000	1.348874E-02				
4.375000	1.412055E-02				
4.500000	1.491174E-02				
4.625000	1.575435E-02				
4.750000	1.650764E-02				
4.875000	1.700974E-02				
5.000000	1.710737E-02				
5.125000	1.670360E-02				
5.250000	1.580929E-02				
5.375000	1.457221E-02				
5.500000	1.325939E-02				
5.625000	1.218495E-02				
5.750000	1.160159E-02				
5.875000	1.159723E-02				
6.000000	1.204429E-02				
6.125000	1.263295E-02				
6.250000	1.298501E-02				
6.375000	1.280726E-02				
6.500000	1.202112E-02				
6.625000	1.081043E-02				

$\phi(0)=4.5E-06$ $w=1.78$



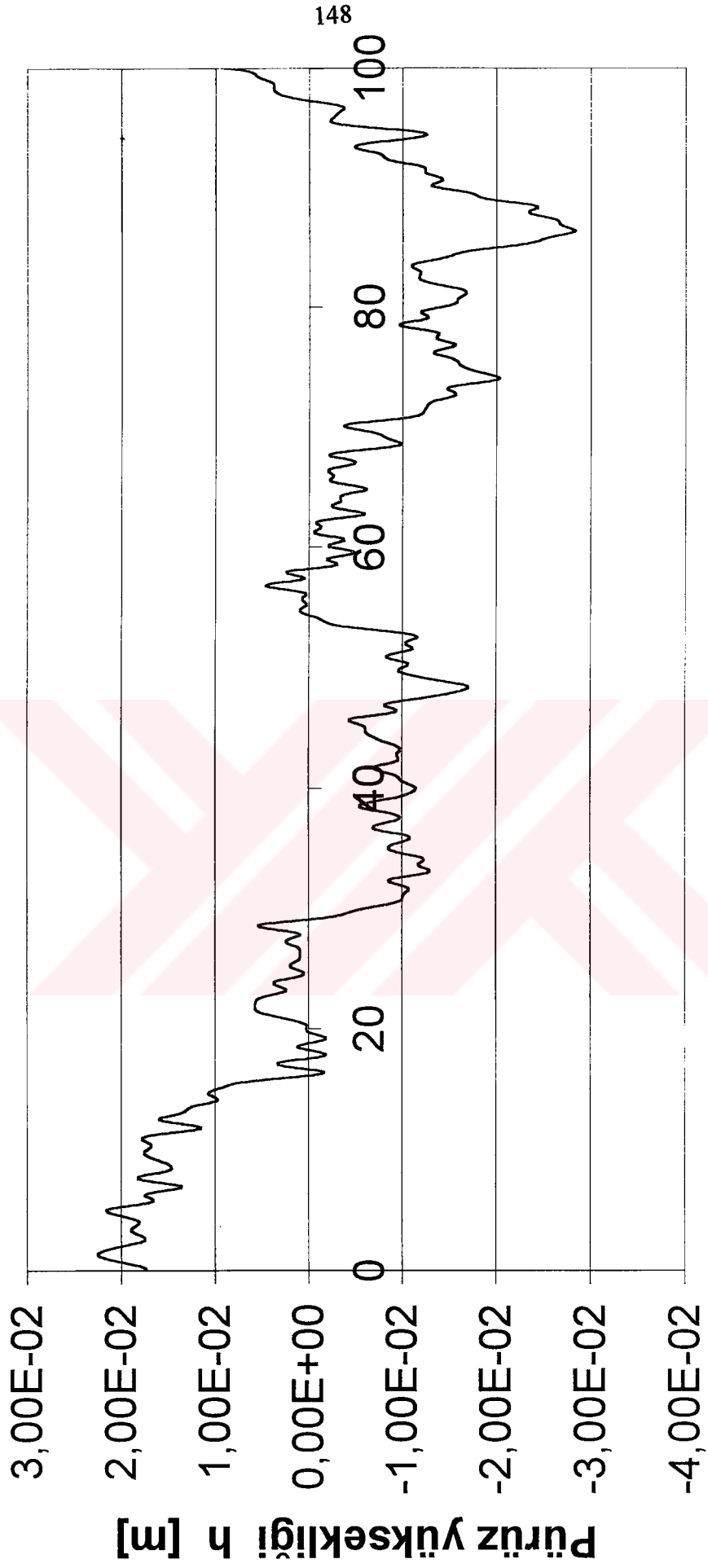
Şekil D1 $\phi_h(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 1.78$ için çıkış değerleri diyagramı

TabloD2 $\phi_h(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 2$ için çıkış değerleri

Phi1=	4.500000E-06	w1=	2.000000V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000	
Nst=	1024	N=	128	Lg= 128.000000Seg= 1
Nst,N,v,dx,seg				
1024	128	20.000000	1.250000E-01	1
0.000000E+00	1.732440E-02			
1.250000E-01	1.728781E-02			
2.500000E-01	1.747963E-02			
3.750000E-01	1.793390E-02			
5.000000E-01	1.860933E-02			
6.250000E-01	1.941584E-02			
7.500000E-01	2.024974E-02			
8.750000E-01	2.102133E-02			
1.000000	2.166640E-02			
1.125000	2.214399E-02			
1.250000	2.242807E-02			
1.375000	2.250159E-02			
1.500000	2.235680E-02			
1.625000	2.199982E-02			
1.750000	2.145515E-02			
1.875000	2.076682E-02			
2.000000	1.999499E-02			
2.125000	1.921052E-02			
2.250000	1.848871E-02			
2.375000	1.790267E-02			
2.500000	1.751466E-02			
2.625000	1.736405E-02			
2.750000	1.745397E-02			
2.875000	1.774227E-02			
3.000000	1.814325E-02			
3.125000	1.854471E-02			
3.250000	1.883736E-02			
3.375000	1.894732E-02			
3.500000	1.885959E-02			
3.625000	1.862231E-02			
3.750000	1.833042E-02			
3.875000	1.809531E-02			
4.000000	1.801326E-02			
4.125000	1.814340E-02			
4.250000	1.849976E-02			
4.375000	1.905394E-02			
4.500000	1.974125E-02			
4.625000	2.046514E-02			
4.750000	2.110140E-02			
4.875000	2.150977E-02			
5.000000	2.156010E-02			
5.125000	2.117293E-02			
5.250000	2.036173E-02			
5.375000	1.925568E-02			
5.500000	1.808322E-02			
5.625000	1.711033E-02			
5.750000	1.654954E-02			
5.875000	1.647410E-02			
6.000000	1.677676E-02			
6.125000	1.719862E-02			
6.250000	1.742489E-02			
6.375000	1.721277E-02			
6.500000	1.649918E-02			
6.625000	1.544005E-02			

Şekil D.2 $\phi_n(\Omega_0) = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, $w = 2$ için çıkış değerleri diyagramı

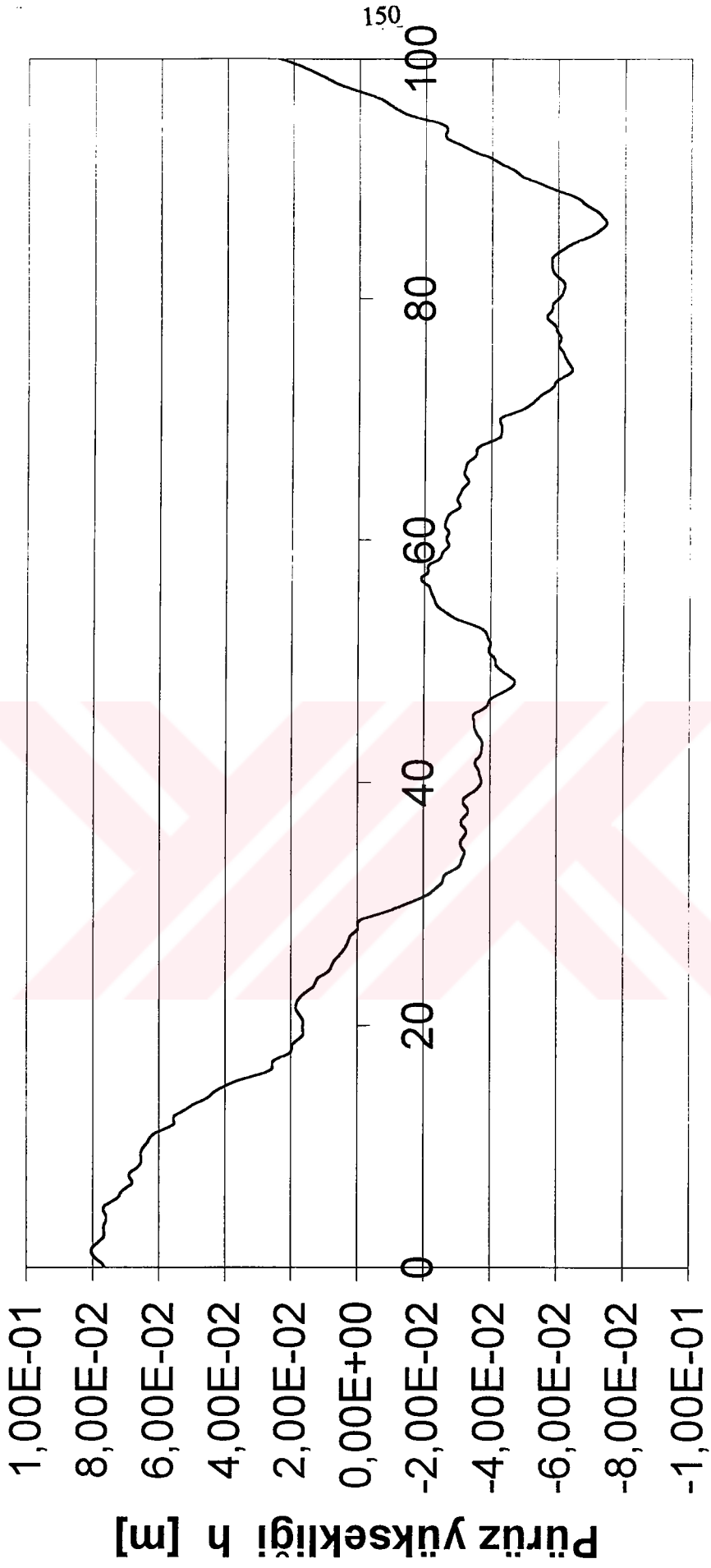
$\phi(0)=4.5\text{E-}06$ $w=2$



TabloD-3 $\phi_h(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 3$ için çıkış değerleri

Phi1=	4.500000E-06	w1=	3.000000V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000	
Nst=	1024	N=	128	Lg= 128.000000Seg= 1
Nst,N,v,dx,seg	1024	128	20.000000	1.250000E-01 1
0.000000E+00	7.642748E-02			
1.250000E-01	7.658984E-02			
2.500000E-01	7.686301E-02			
3.750000E-01	7.726300E-02			
5.000000E-01	7.777034E-02			
6.250000E-01	7.834030E-02			
7.500000E-01	7.891783E-02			
8.750000E-01	7.945082E-02			
1.000000	7.989733E-02			
1.125000	8.022661E-02			
1.250000	8.041802E-02			
1.375000	8.045907E-02			
1.500000	8.034595E-02			
1.625000	8.008496E-02			
1.750000	7.969412E-02			
1.875000	7.920313E-02			
2.000000	7.865077E-02			
2.125000	7.808217E-02			
2.250000	7.754386E-02			
2.375000	7.707997E-02			
2.500000	7.672611E-02			
2.625000	7.650325E-02			
2.750000	7.641209E-02			
2.875000	7.642995E-02			
3.000000	7.651288E-02			
3.125000	7.660500E-02			
3.250000	7.665256E-02			
3.375000	7.661941E-02			
3.500000	7.649710E-02			
3.625000	7.630743E-02			
3.750000	7.609437E-02			
3.875000	7.591086E-02			
4.000000	7.580302E-02			
4.125000	7.579935E-02			
4.250000	7.590466E-02			
4.375000	7.610030E-02			
4.500000	7.634653E-02			
4.625000	7.658615E-02			
4.750000	7.674974E-02			
4.875000	7.676398E-02			
5.000000	7.656694E-02			
5.125000	7.612646E-02			
5.250000	7.545794E-02			
5.375000	7.463101E-02			
5.500000	7.375894E-02			
5.625000	7.296807E-02			
5.750000	7.235744E-02			
5.875000	7.196101E-02			
6.000000	7.173201E-02			
6.125000	7.155778E-02			
6.250000	7.130304E-02			
6.375000	7.086594E-02			
6.500000	7.022510E-02			
6.625000	6.945477E-02			

$\phi(0)=4.5E-06$ $w=3$

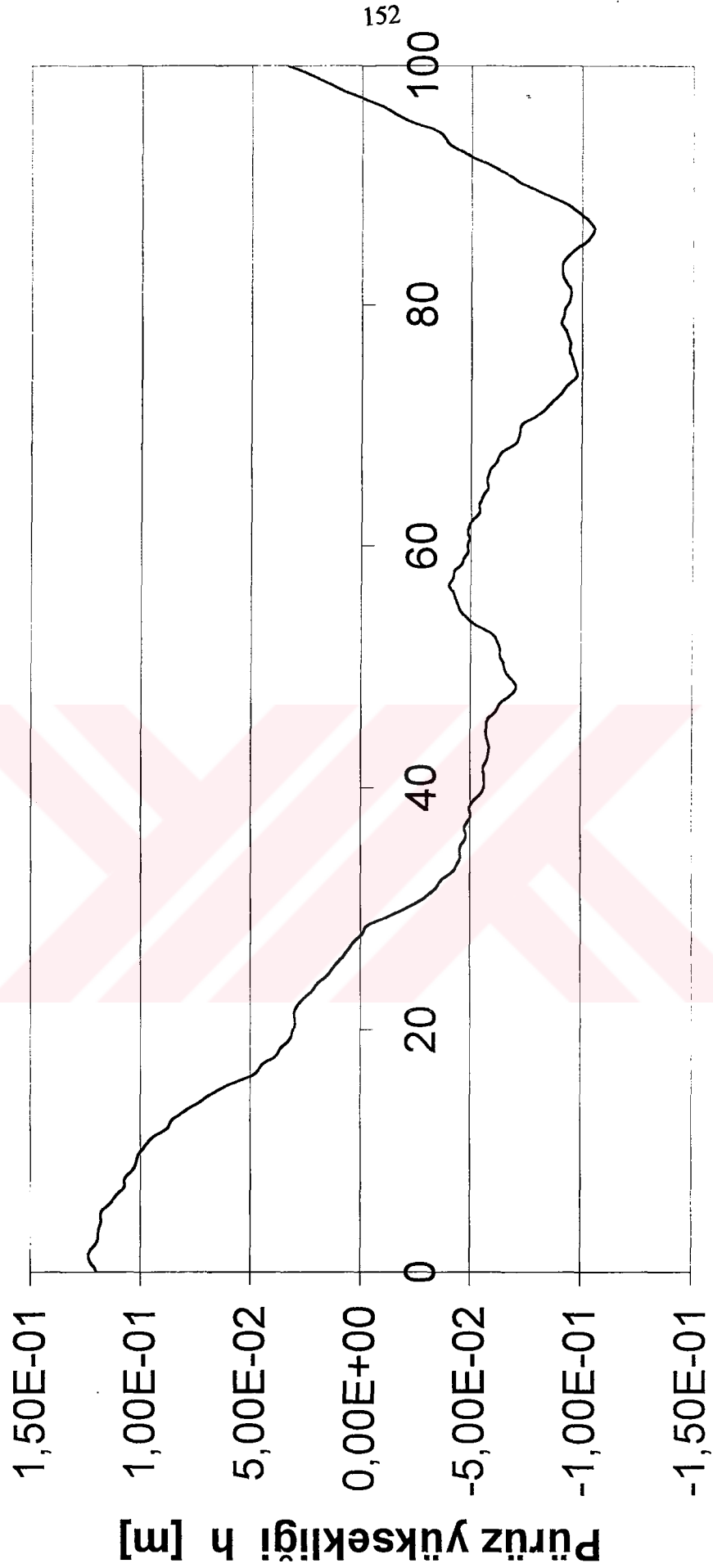


Şekil D3 $\phi_h(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 3$ için çıkış değerleri diyagramı

Tablo D4 $\phi_h(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 3.31$ için çıkış değerleri

Phi1=	4.500000E-06	w1=	3.310000	V=	20.000000
Wiz=	2.030000	Lmax=	128.000000		
Nst=	1024	N=	128	Lg=	128.000000
Seg=					1
Nst,N,v,dx,seg					
1024	128	20.000000	1.250000E-01		1
0.000000E+00	1.199719E-01				
1.250000E-01	1.201646E-01				
2.500000E-01	1.204445E-01				
3.750000E-01	1.208236E-01				
5.000000E-01	1.212858E-01				
6.250000E-01	1.217945E-01				
7.500000E-01	1.223040E-01				
8.750000E-01	1.227700E-01				
1.000000	1.231558E-01				
1.125000	1.234341E-01				
1.250000	1.235858E-01				
1.375000	1.235999E-01				
1.500000	1.234731E-01				
1.625000	1.232116E-01				
1.750000	1.228313E-01				
1.875000	1.223586E-01				
2.000000	1.218273E-01				
2.125000	1.212767E-01				
2.250000	1.207470E-01				
2.375000	1.202759E-01				
2.500000	1.198937E-01				
2.625000	1.196182E-01				
2.750000	1.194500E-01				
2.875000	1.193705E-01				
3.000000	1.193444E-01				
3.125000	1.193265E-01				
3.250000	1.192738E-01				
3.375000	1.191570E-01				
3.500000	1.189691E-01				
3.625000	1.187267E-01				
3.750000	1.184645E-01				
3.875000	1.182243E-01				
4.000000	1.180425E-01				
4.125000	1.179413E-01				
4.250000	1.179236E-01				
4.375000	1.179729E-01				
4.500000	1.180552E-01				
4.625000	1.181220E-01				
4.750000	1.181152E-01				
4.875000	1.179753E-01				
5.000000	1.176527E-01				
5.125000	1.171234E-01				
5.250000	1.164016E-01				
5.375000	1.155449E-01				
5.500000	1.146445E-01				
5.625000	1.138017E-01				
5.750000	1.130949E-01				
5.875000	1.125518E-01				
6.000000	1.121369E-01				
6.125000	1.117637E-01				
6.250000	1.113285E-01				
6.375000	1.107544E-01				
6.500000	1.100263E-01				
6.625000	1.092037E-01				

$\phi(0)=4.5E-06$ $w=3.31$



Yol mesafesi x [m]

Şekil D4 $\phi_n(\Omega_0) = 4.5e-6 \text{ m}^3$, $w = 3.31$ için çıkış değerleri diyagramı

ÖZGEÇMİŞ

17.01.71 tarihinde Karabük'te doğdu. 1990 tarihinde İstanbul Alman Lisesi'nden mezun oldu ve üniversite öğrenimine İ.T.Ü. Makina Fakültesi'nde başladı ve öğrenimini 1994'te tamamladı.

