

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YOL DÜZGÜNSÜZLÜKLERİNİN İNCELENMESİ
VE YOLUN YENİDEN YARATILMASI**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Uğur HASDEDEOĞLU

503981083

101401

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Haziran 2001

Tez Danışmanı Prof.Dr. A. Işık ERZİ

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Murat EREKE (İ.T.Ü)

Prof.Dr. İrfan YAVAŞLIOĞLU (Y.T.Ü)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Yol düzgünsüzlükleri, taşıt titreşimlerine sebep olan en önemli kaynaklardan biri olması nedeniyle taşıt tekniği açısından önemli bir çalışma alanı teşkil etmektedir. Bu alanda bugüne kadar yapılmış olan çalışmaların azlığı ve gelişmeye açık bir konu olması, beni bu konu üzerinde çalışmaya teşvik etmiştir.

Çalışmam süresince beni sürekli destekleyen, bilgi birikiminden fazlasıyla faydalandığım ve kendisinden çok şey öğrendiğim, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. A. Işık Erzi'ye, tezimde kullandığım bazı şekillerin bilgisayar ortamına aktarılmasında yardımcı olan arkadaşım Cemil Fidanlıgöl'e ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Haziran, 2001

Uğur HASDEDEOĞLU

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Yol Düzgünsüzlüklerinin Tanımı, Nedenleri ve Etkileri.....	1
1.2 Önceki Çalışmalar.....	3
2. YOL DÜZGÜNSÜZLÜKLERİ İLE İLGİLİ BAZI TANIMLAR.....	7
2.1 Fourier Analizi	7
2.2 Güç Yoğunluğu Spektrumu	10
2.3 Gauss Dağılımı.....	10
3. YOL PROFİLİNİN MATEMATİKSEL İFADESİ.....	14
3.1 İstatistiksel Özellikler	15
3.1.1 Aritmetik Ortalama	15
3.1.2 Karesel Ortalama.....	16
3.1.3 Standart Sapma.....	16
3.1.4 Olasılık Yoğunluğu	16
3.1.5 Duraganlık.....	17
3.2 Spektral Özellikler	18
4. MEVCUT YOLLARIN İNCELENMESİ.....	24
4.1 Yol Dataları	24
4.2 Yolların Analizi	25
4.2.1 Yol Profili.....	25
4.2.2 Yol Düzgünsüzlüklerinin Güç Yoğunluğu Spektrumu	26
4.2.3 Harmoniklerin Faz Açıları	26
4.2.4 Yol Düzgünsüzlüklerinin Dağılımı	27

4.3	Örnek İnceleme Sonuçları.....	27
4.3.1	11/1400/94061901.....	27
4.3.2	20/1010/90041401.....	28
4.3.3	55/3014/90060601.....	29
4.4	İncelemenin Genel Sonuçları	30
5.	YOLUN YENİDEN YARATILMASI.....	34
5.1	Kullanılan Yöntem.....	35
5.1.1	Eşit Frekans Aralıkları Kullanılarak Yolun Yaratılması.....	36
5.2	Yol Yaratma Örnek Sonuçları.....	36
6.	SONUÇLAR.....	40
KAYNAKLAR.....		42
EKLER.....		44
ÖZGEÇMİŞ.....		61

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1	Braun'un ifadesinde kullanılabilecek yol düzgünsüzlüğü güç yoğunluğu spektrumu parametreleri.	22
Tablo 3.2	Yol düzgünsüzlüklerinin uluslar arası sınıflandırılması (Braun).	22
Tablo 3.3	Yol düzgünsüzlüklerinin uluslar arası sınıflandırılması (Dodds).	23
Tablo C.1	Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 1).	57
Tablo C.2	Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 2).	58
Tablo C.3	Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 3).	59
Tablo C.4	Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 4).	60



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>	
Şekil 1.1	Yolu meydana getiren profiller.	2
Şekil 2.1	Fourier katsayılarının grafik üzerinde gösterimi.	7
Şekil 2.2	$\sigma = 1$ için Gauss dağılımı.	11
Şekil 2.3	Dağılımın Gauss dağılımına göre farklılık göstermesi.	13
Şekil 3.1	Eşit aralıklarla ölçülmüş yol profili örneği.	14
Şekil 3.2	Yolun herhangi bir yükseklik aralığındaki noktalarının tespiti.	17
Şekil 3.3	Braun'un ölçümlerine göre elde edilen güç yoğunluğu spektrumu eğrileri.	20
Şekil 4.1	17/1003/90032101 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.	31
Şekil 5.1	Yolu yaratmakta kullanılacak güç yoğunluğu spektrumu.	37
Şekil 5.2	Eşit frekans aralıkları kullanılarak yaratılmış örnek yol profili.	38
Şekil 5.3	Eşit frekans aralıkları kullanılarak yaratılmış bir yol için düzgünlüklerin dağılımı.	39
Şekil B.1	11/1400/94061901 için yol profilinin standart sapmaya oranı.	49
Şekil B.2	11/1400/94061901 için güç yoğunluğu spektrumu.	50
Şekil B.3	11/1400/94061901 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.	50
Şekil B.4	11/1400/94061901 için yol düzgünlüklerinin dağılımı.	51
Şekil B.5	20/1010/90041401 için yol profilinin standart sapmaya oranı.	51
Şekil B.6	20/1010/90041401 için güç yoğunluğu spektrumu.	52
Şekil B.7	20/1010/90041401 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.	52
Şekil B.8	20/1010/90041401 için yol düzgünlüklerinin dağılımı.	53
Şekil B.9	55/3014/90060601 için yol profilinin standart sapmaya oranı.	53
Şekil B.10	55/3014/90060601 için güç yoğunluğu spektrumu.	54
Şekil B.11	55/3014/90060601 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.	54
Şekil B.12	55/3014/90060601 için yol düzgünlüklerinin dağılımı.	55

SEMBOL LİSTESİ

A_1, A_2	Yolu tanımlayan parametreler (Marcondes'in önerisi için)
A, B	Fourier dönüşümleri
a_0	Fourier serisi için sabit terim
a_k, b_k	Fourier katsayıları
C_k	Kompleks Fourier Katsayısı
f	Frekans
h	Yol profili
k	Tamsayı değişken
L	Yolun uzunluğu
	Dalga boyu
m	Yolu tanımlayan parametre (Marcondes'in önerisi için)
N	Sayısal değer miktarı
p	Olasılık yoğunluğu
p, q	Yolu tanımlayan parametreler (Marcondes'in önerisi için)
T	Periyot
t	Zaman
V	Hız
w, w_1, w_2	Dalgalık katsayıları
X	Kompleks Fourier dönüşümü
x	Rastlantısal fonksiyon
	Yatay mesafe
α_k	Faz açısı
α, β	Yolu tanımlayan parametreler (Parkhilovski'nin önerisi için)
Φ	Güç yoğunluğu spektrumu
Φ_h	Yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu
θ	Açı
σ	Standart sapma
Ω	Yola bağlı frekans
Ω_0	Referans frekansı
Ω_1	Asimptot frekansı
ω	Frekans

YOL DÜZGÜNSÜZLÜKLERİNİN İNCELENMESİ VE YOLUN YENİDEN YARATILMASI

ÖZET

Yol düzgünsüzlükleri, yolun belirli bir kısmında, seçilmiş olan belirli bir çizgi boyunca ölçülen yükseklik değişimleridir. Yolun yapısında var olan bu yükseklik değişimleri, üzerinde hareket eden taşıtlara düşey yönde kuvvetler uygulayarak titreşim yapmaya zorlaması nedeniyle, taşıtların emniyeti, konforu ve ömrü üzerinde etkili, dolayısıyla da taşıt tekniği açısından önemlidir. Bunun yanında, titreşim yapmaya zorlanan taşıt yola dinamik kuvvetler uygulayacağından, yol düzgünsüzlükleri, yolun ömrüne de etki etmektedir.

Yol düzgünsüzlüklerinin incelenmesinde, Fourier analizi ile elde edilen, düzgünsüzlüğün güç yoğunluğu spektrumundan faydalanılır. Yolu yeniden yaratmak için ise güç yoğunluğu spektrumundaki bilgilerden elde edilen frekans ve genliklerin oluşturduğu Fourier serisi kullanılır. Ancak bu aşamada bir problemle karşılaşılır. Güç yoğunluğu spektrumu, frekansa bağlı genlik bilgilerini vermekte, ancak yolu meydana getiren harmoniklerin faz açılarına ilişkin bilgiyi içermemektedir. Daha önceki yayınların çoğunda, söz konusu faz açılarının tamamen rastlantısal bir dağılım gösterdiğinden bahsedilmektedir. Fakat bu araştırma kapsamında analiz edilen yolların çok büyük bir kısmında faz açılarının belirli bir düzene az yada çok yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı da genellikle Gauss dağılımına benzer bir karakter göstermemektedir.

Bu çalışmada, ölçülmüş yol datalarına Fourier analizi uygulanarak yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları için bir kural olup olmadığı incelenmiş ve yol düzgünsüzlüklerinin Gauss dağılımına ne derece yakın olduğu araştırılmıştır. Bunun için, Michigan Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nün (University of Michigan Transportation Research Institute) internet sitesindeki mevcut ölçülmüş yol datalarının bir kısmı kullanılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında, yolun gerçeğe daha yakın bir şekilde yaratılması için yeni bir yöntem bulunmasına çalışılmıştır.

INVESTIGATION OF ROAD ROUGHNESS AND REGENERATION OF ROAD PROFILE

SUMMARY

Road roughness is the deviations of a road surface, measured along a chosen longitudinal line on the selected section of road. These surface deviations, which are consistent in the structure of the road, apply vertical forces to the vehicles passing over and force them to make vibration. Being effective on safety, comfort and life of vehicles, road roughness is an important subject in vehicle technology. Besides this, the vehicle which was excited by the road, applies dynamical forces to the road surface, so road roughness also effects the life of the road.

In the investigation of road roughness, power spectral density (PSD) obtained by Fourier analysis, is used. To regenerate the road profile, the Fourier series, which is formed by the frequency and the amplitude informations obtained from the PSD of road roughness is used. But at this point a problem occurs. PSD has the information about amplitudes dependent to the frequencies, but does not have any information about the phase angles of the harmonics that create the road profile. In most of the early investigations, phase angles assumed to be random and uniformly distributed. But in most of the road profiles analysed for this study, it has been seen that the phase angles are converging to a definite order. Also probability distribution function of the road profile elevation does not show a resembling character as the Gaussian distribution generally.

In this study, Fourier analysis is applied to the measured road data to investigate if there is a correlation for the phase angles of the harmonics and if the distribution of the elevations fits the Gaussian distribution curve. For this purpose, some part of the measured road data present at the web site of the University of Michigan Transportation Research Institute is used. With the information obtained, a better way to regenerate the road profile is tried.

1. GİRİŞ

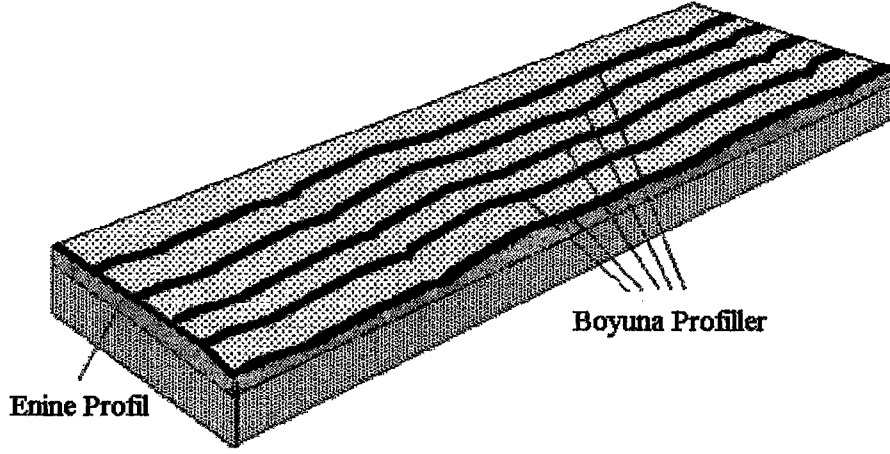
Titreşimler, hareket halindeki karayolu taşıtları için göz ardı edilemeyecek kadar önemli faktörlerdir. Taşıt titreşimlerinin bir kısmı taşıtın kendi mekanik yapısından kaynaklanmaktadır. Bunlar; motordaki dengelenmemiş kütle kuvvetleri, tekerleklerdeki dengesizlikler tahrik momenti salınımları gibi taşıtı oluşturan mekanik kısımlardan kaynaklanan titreşimlerdir. Taşıt titreşimlerinin büyük bir kısmı ise taşıtın hareket ettiği ortamdan kaynaklanmaktadır ve bu kısmı oluşturan başlıca titreşim kaynağı yol düzgünsüzlükleridir.

Yol düzgünsüzlükleri, bölgesel yol kaplaması hataları nedeniyle meydana gelen yol çukurlarından, yol yüzeyinin inşası ve korunmasındaki hassasiyetin sınırlarını yansıtan mevcut rastlantısal yükselti değişimlerine kadar her şeyi içerir (Gillespie, 1992). Karayollarındaki taşıt trafiğinin yoğunluğunun ve hızının giderek artıyor olması, geometrik yol düzgünsüzlüklerinin gerek taşıt tekniği, gerekse yol yapım ve bakım tekniği açısından önemini arttırmaktadır (Gökten, 1992). Çoğunlukla kontrol dışı bir faktör olarak ortaya çıkması nedeniyle, yol düzgünsüzlüklerinin matematiksel olarak tanımlanabilecek parametreler cinsinden ifade edilebilmesi ve farklı karakterdeki yolların bu parametreler yardımı ile sınıflandırılabilmesi taşıt imalatçıları açısından büyük önem taşımaktadır. Bunun yanında yol düzgünsüzlüklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi yol yapımcıları açısından da oldukça önemlidir.

1.1 Yol Düzgünsüzlüklerinin Tanımı, Nedenleri ve Etkileri

Yol düzgünsüzlükleri, yolun belirli bir referans yüzeyine göre ölçülecek yükseklik değerleri olarak tanımlanır. Yolun bir yüzey teşkil etmesi nedeniyle, bu yükseklik değerleri enine ve boyuna olmak üzere iki boyutlu bir değişim gösterir. Ancak birbirine paralel boyuna profiller istisnai durumlar dışında Şekil 1.1 deki gibi birbirlerine çok benzeyeceğinden, yol tek bir boyuna çizgiye indirgenerek enine yöndeki yükseklik değişimleri inceleme dışı bırakılabilir. Bu durumda, yol

düzgünsüzlükleri, yolun boyuna eksenine paralel bir çizgi, yani yol üzerinde seçilmiş olan boyuna profillerden biri boyunca ölçülecek yükseklik değişimleri olarak tarif edilebilir. Bu çalışmada da yol tek bir çizgiye indirgenerek inceleme yapılacaktır.



Şekil 1.1 Yolu meydana getiren profiller.

Yol düzgünsüzlüklerinin nedenleri inşaatlarındaki yöntemden ve yapısal özelliklerinden kaynaklanabilir. İkinci bir neden yolun yıpranması ile ortaya düzgünsüzlükler çıkmasıdır. Bu son neden kaynak da olabilir, yani yoldaki bir düzgünsüzlük taşıtları titreşime zorlar, bu titreşimler de dinamik tekerlek yükü salınımlarını artırarak yolun yıpranmasını ve düzgünsüzlüğü artırır. (Erzi, 1998)

Yol düzgünsüzlükleri, üzerinde hareket eden taşıtlara düşey yönde kuvvetler uygulayarak titreşim yapmaya zorlarlar ve bu da dinamik tekerlek yükü salınımlarına sebep olur. Bu durum tekerlekler ile yol arasındaki teması doğrudan etkileyeceğinden taşıtın sürüş emniyetini de önemli ölçüde etkilemektedir. Dinamik tekerlek yükü salınımlarının bir diğer önemli sonucu da bu salınımlar nedeniyle ortaya çıkan kuvvetlerin yolun yıpranmasına sebep olmasıdır. Yolun düzgünsüzlüğünün artması, üzerinde su birikimlerine yol açarak yıpranmayı hızlandırmakta ve ayrıca üzerinde seyreden taşıtların tekerleklerinin yuvarlanma sırasında çıkardıkları gürültüyü artırarak gürültü emisyonunu kötü yönde etkilemektedir (Göktan, 1992). Hareket kanunlarından bilindiği üzere, hareket eden cisimler yer değiştirme ve hız nedeniyle herhangi bir etkiye maruz kalmazlar, fakat ivme ve ivme değişimleri nedeniyle söz konusu cisimler üzerinde atalet kuvvetleri oluşur. İnsan vücudu da bu atalet kuvvetlerine karşı duyarlıdır. Hareket eden taşıt, yol düzgünsüzlükleri nedeniyle sürekli olarak değişen bir düşey ivmeye sahiptir. Bu nedenle taşıt içerisindeki

yolcuların konforu ve taşınan yükün emniyeti yol düzgünsüzlüklerinden etkilenmektedir. Ayrıca, yol düzgünsüzlüklerinin sebep olacağı titreşimler nedeniyle taşıt parçalarının ömrü de kötü yönde etkilenecektir. Yolun yapısı taşıt tekerleklerinin yuvarlanma dirençleri üzerinde de etkilidir. Bu nedenle yolun düzgünsüzlüğü arttıkça taşıt tekerleklerin yuvarlanma dirençleri artmakta, bu da taşıtın yakıt tüketimini arttırmaktadır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Yol düzgünsüzlüklerinin tespit edilmesi ve incelenmesine ilişkin ilk çalışmalar, yeni yapılmış bir yolun projeye uygunluğu ve eskimiş olan yolların durumunun değerlendirilmesi amacıyla yol yapımcıları tarafından geliştirilmiş bazı yöntemlerden ibarettir. Bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar genellikle referans yüzeyinden sapmaların miktarını ve ortalama değerlerini ifade eden bazı istatistiksel değerlerden oluşmaktadır. Bu istatistiksel değerler yolun genel olarak kalitesi hakkında bilgi vermektedir, ancak herhangi bir yol için elde edilen bu istatistiksel değerler ile o yolun sebep olacağı titreşimleri incelemek mümkün değildir.

Taşıtların sürüş karakteristiklerini incelemek için yapılan ilk girişimlerde, yoldan gelen uyarılar için sinüs dalgaları, basamak fonksiyonları veya üçgen dalgalar kullanılmıştır (Wong, 1993). Bu tip basit yaklaşımlar, taşıta gelecek uyarıları incelemek için bir temel teşkil etmesine rağmen yol düzgünsüzlüklerinin etkilerini anlamak ve ifade etmek için yetersizdir. Daha sonraları, yol profilinin rastlantısal fonksiyonlar ile daha gerçekçi ifade edilebileceği düşünülmüştür. Rastlantısal fonksiyonların özelliği anlık değerlerinin bilinmemesidir. Bu tip bir fonksiyon çok sayıda periyodik dalga fonksiyonunun toplamı şeklinde ifade edilebilir. Rastlantısal fonksiyonların frekans içeriğini incelemek için Fourier analizi kullanılır. Fourier analizi ile ilgili daha detaylı bilgi sonraki bölümlerde verilecektir.

Karayollarındaki düzgünsüzlükler ile ilgili ilk çalışmalar Parkhilovski (1968) ile başlamıştır, ancak aynı dönemde Braun'un (1966) da araştırması bulunmaktadır. Braun'a göre karayollarındaki düzgünsüzlüğün güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu, Ω yola bağlı frekans olmak üzere

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \quad (1.1)$$

şeklindedir. Burada, Ω_0 keyfi seçilecek referans frekansı, $\Phi_h(\Omega_0)$ bu frekanstaki güç yoğunluğu spektrumu değeri ve w boyutsuz bir katsayı olan dalgalılıktır. Bu fonksiyon çift logaritmik diyagramda bir doğru ile gösterilir. Bu ifade ile ilgili sonraki bölümlerde daha detaylı bilgi verilecektir. Parkhilovski'nin önerisi ise

$$\Phi_h(\Omega) = \frac{\alpha}{\beta^2 + \Omega^2} \quad (1.2)$$

şeklindedir. Bu ifadede görülen α ve β , yolla ilgili katsayılarıdır. (1.1) ifadesindeki güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu uzun dalga boylarında, yani düşük frekanslarda gerçekten uzak şekilde çok yüksek güç yoğunluğu spektrumu değerleri vermektedir. (1.2) ifadesi ile verilen öneride ise böyle bir hata bulunmamaktadır.

Bu konu ile ilgili daha sonraki yaklaşımlar Dodds ve Robson (1973) tarafından yapılmış, ve yol yüzeyinin homojen ve izotropik iki boyutlu Gauss dağılımına uygun rastlantısal fonksiyon olarak alınabileceği söylenmiştir. Hesaplarda yolu iki boyutlu bir yüzey olarak kullanmışlar ve herhangi bir yol için spektral özelliklerin seçilen boyuna profilden bağımsız olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada yol, düşük ve yüksek frekanslar için iki ayrı güç yoğunluğu spektrum fonksiyonu ile

$$\Phi_h(\Omega) = \begin{cases} \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w_1}, & \Omega \leq \Omega_0 \\ \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w_2}, & \Omega \geq \Omega_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada Ω_0 süreksizlik frekansıdır ve değeri $1/(2\pi)$ çevrim/m olarak verilmiştir. w_1 ve w_2 ise birbirinden farklı dalgalılık katsayılarıdır. (1.3) fonksiyonu çift logaritmik diyagramda kırık bir doğru ile gösterilmektedir ve süreksizlik frekansı bu gösterimdeki kırılma noktasına tekabül etmektedir. Aynı çalışmada verilmiş olan tablolara göre (1.3) ifadesindeki dalgalılık katsayılarının farklı yol tipleri için aldığı ortalama değerler w_1 için 1.945-2.28, w_2 için 1.36-1.428

aralıklarında verilmiştir. Bu verilere göre çift logaritmik diyagramda çizilen güç yoğunluğu spektrumu, düşük frekansları temsil eden kısmı daha dik olan bir kırık doğru ile gösterilebilir. Daha sonra Heath (1989), bu çalışmayı esas alarak karayolları için daha gelişmiş bir çok izli düzgünsüzlük modeli geliştirmiştir.

Marcondes ve diğ. (1991), yaptıkları çalışmada düşük ve yüksek frekans değerleri için iki farklı karakterde eğri fonksiyonu kullanarak yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu için gerçeğe daha yakın bir ampirik ifade geliştirmişler, ve farklı yol kaplaması tipleri için bu ifadede kullanılması gereken katsayıları tablolar halinde sunmuşlardır. Söz konusu ifade

$$\Phi_h(\Omega) = \begin{cases} A_1 e^{-m\Omega^p}, & \Omega \leq \Omega_0 \\ A_2 (\Omega - \Omega_1)^q, & \Omega \geq \Omega_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

şeklinde verilmiştir. Bu ifadede, Ω_0 süreksizlik frekansı; Ω_1 yüksek frekanslar için verilmiş olan eğri fonksiyonunun asimptot frekansı; A_1 , A_2 , m , p ve q ise yukarıda bahsedilen tablolardaki, yol düzgünsüzlüklerini karakterize etmek için kullanılan sabitlerdir. Bu kaynakta, Ω_0 süreksizlik frekansı değeri olarak 0.005208 çevrim/in. (0.205 çevrim/m) kullanılmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda, bu verilen Ω_0 değerinin (1.4) ifadesinin ilk kısmı için incelenen data'lara uyum gösteren en yüksek frekans değeri olduğu söylenmiştir.

Rouillard ve diğ. (1996), araştırmalarında Avustralya'daki bazı yollar için ölçümler yapmış ve yol düzgünsüzlüklerinin spektral ve istatistiksel özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları incelemelerde yolun herhangi bir bölümünün spektral şeklinin yol profilinden bağımsız olduğu, Gauss dağılımına göre farklılıklar gösterdiği ve yol boyunca yol düzgünsüzlüklerinin karesel ortalamasının değişkenlik göstermesi nedeniyle yol düzgünsüzlüklerinin durağan kabul edilememesi gerektiği sonuçlarına ulaşmışlardır. Yolun farklı kısımlarının farklı özellikler gösterdiği ve birbirlerinden ayrı olarak değerlendirilmesi gerektiği de yine aynı kaynakta belirtilmiş bulunmaktadır.

Bruscella ve diğ. (1999) yaptıkları istatistiksel inceleme sonucunda yol profilinin Gauss dağılım eğrisine uymayan ve durağan olamayan yükseklik dağılımlarından

oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bunun sonucu olarak, yolların sınıflandırılmasında sadece spektral özelliklerin kullanılmasının yeterli olmadığını, düşey ivmenin etkileri incelenerek daha doğru sonuçlar elde edileceğini vurgulamışlardır. Bunun yanında doğru bir inceleme için yüksek tümsekler ve yol çukurları gibi geçici ve ani değerlerin analiz dışı tutulup ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.



2. YOL DÜZGÜNSÜZLÜKLERİ İLE İLGİLİ BAZI TANIMLAR

2.1 Fourier Analizi

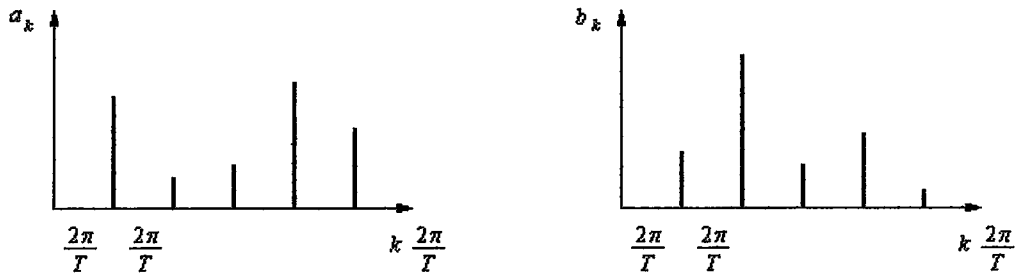
Çoğu mühendis periyodik fonksiyonları harmonik bileşenlerine ayırarak frekans analizi yapma fikri ile tanıştıktır (Newland, 1975). Keyfi bir periyodik $x(t)$ fonksiyonu, t zaman, T periyot olmak üzere Fourier serisi olarak bilinen sonsuz trigonometrik ifadenin toplamı şeklinde ifade edilebilir.

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad (2.1)$$

a_0 , a_k ve b_k sabit Fourier katsayılarıdır ve

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \\ a_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \end{aligned} \quad (2.2)$$

şeklinde verilmektedir.



Şekil 2.1 Fourier katsayılarının grafik üzerinde gösterimi.

(2.2) ifadesinde verilmiş olan a_k ve b_k Fourier katsayıları, Şekil 2.1 de grafik üzerinde görülebileceği gibi ayrık seri meydana getirmektedirler. Bu şekle göre T periyodu büyüdükçe Fourier katsayıları arasındaki fark giderek küçülecektir. T nin sonsuza gitmesi durumunda ise bu fark sıfıra yakınsayacaktır. Böyle bir durumda ayrık seri şeklindeki harmonik bileşenlerden bahsedilemez. Artık Fourier serisi Fourier integrali, ayrık Fourier katsayıları da frekansın sürekli fonksiyonu olan Fourier dönüşümleri halini almıştır.

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos(\omega t) d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin(\omega t) d\omega \quad (2.3)$$

Bu ifade de ω frekans olmak üzere $A(\omega)$ ve $B(\omega)$ frekansın sürekli fonksiyonu olan Fourier dönüşümleridir ve

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(\omega t) dt \\ B(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(\omega t) dt \end{aligned} \quad (2.4)$$

şeklinde gösterilir. (2.3) ifadesi ise ters Fourier dönüşümü yada Fourier integrali olarak adlandırılır.

Yukarıda verilmiş olan $x(t)$ rastlantısal periyodik fonksiyonunu tanımlamak için (2.1) ifadesi yerine

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos\left(\frac{2\pi k t}{T} - \alpha_k\right) \quad (2.5)$$

ifadesi de kullanılabilir. Burada C_k , a_k ve b_k yerine kullanılan Fourier katsayıları, α_k ise faz açısıdır, ve aşağıda verildiği gibidir.

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (2.6a)$$

$$\alpha_k = \arctan\left(\frac{b_k}{a_k}\right) \quad (2.6b)$$

(2.5) ifadesinde verilen bu yeni Fourier serisi tanımı, C_k ve α_k yukarıda verildiği şekilde kullanıldığı takdirde (2.1) de tanımlanmış olan Fourier serisi ile, aynı frekans için tamamen aynı $x(t)$ değerlerini verecektir.

Fourier dönüşümlerinin bir başka sık kullanılan şekli de kompleks gösterim şeklidir. Euler özdeşliklerinden bilindiği üzere

$$\begin{aligned} e^{i\theta} &= \cos \theta + i \sin \theta \\ e^{-i\theta} &= \cos \theta - i \sin \theta \end{aligned} \quad (2.7)$$

olmaktadır. Eğer

$$X(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad (2.8)$$

olacak şekilde Fourier dönüşümlerini tanımlayıp (2.4) ifadesinde verilmiş olan $A(\omega)$ ve $B(\omega)$ değerlerini (2.8) içerisinde kullanırsak

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)(\cos \omega t - i \sin \omega t) dt \quad (2.9)$$

elde edilir. (2.7) deki ikinci özdeşliği kullandığımızı (2.9) ifadesi

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.10)$$

şeklinde kompleks olarak tanımlanan Fourier dönüşümü halini alır. Bu şekilde tanımlanan Fourier dönüşümü için ters Fourier dönüşümü

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2.11)$$

olarak tanımlanır. (2.10) ve (2.11) eşitlikleri Fourier dönüşüm çifti olarak da adlandırılır.

Bu Fourier dönüşüm çiftinde yer alan $1/(2\pi)$ çarpanı için farklı kaynaklarda farklı görüşler mevcuttur. Bazı kaynaklarda bu çarpan, burada olduğu Fourier dönüşümünün çarpanı olarak yer alırken, bazı kaynaklarda (2.11) ifadesinde görülen ters Fourier dönüşümünün çarpanı olarak yer almaktadır. Bazı kaynaklarda ise her iki dönüşüm ifadesine de $1/\sqrt{2\pi}$ çarpanı dahil edilmektedir. Bu sebeple Fourier analizi yaparken açıklanan farklı Fourier dönüşümü ifadelerinden hangisinin kullanıldığına veya kullanılacağına dikkat etmek gereklidir.

2.2 Güç Yoğunluğu Spektrumu

Güç yoğunluğu spektrumu, rastlantısal olayları tanımlamak için kullanılan bir büyüklüktür. Rastlantısal titreşimlerin bir çok harmoniğin toplamından meydana geldiği düşünüldüğünde, güç yoğunluğu, spektrumu her bir harmoniğin bu titreşim içindeki etkinliği hakkında bilgi veren bir büyüklük olarak tarif edilebilir.

Güç yoğunluğu spektrumu diyagramları, genellikle çift logaritmik eksen takımında, güç yoğunluğu spektrumu değerlerinin frekans eksenine çizilmesi ile elde edilir. Güç yoğunluğu spektrumu değeri titreşimin genliğinin karesi ile orantılı bir büyüklüktür ve C_k , Ω_k frekanslı dalganın genliği ve $\Delta\Omega$, ardışık frekansların farkı olmak üzere

$$\Phi(\Omega_k) = \frac{2|C_k|^2}{\Delta\Omega} \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir.

Karayollarındaki yol düzgünlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonunu ifade etmek için farklı araştırmacılar tarafından verilmiş farklı öneriler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Bölüm 1.2 de verilmiştir.

2.3 Gauss Dağılımı

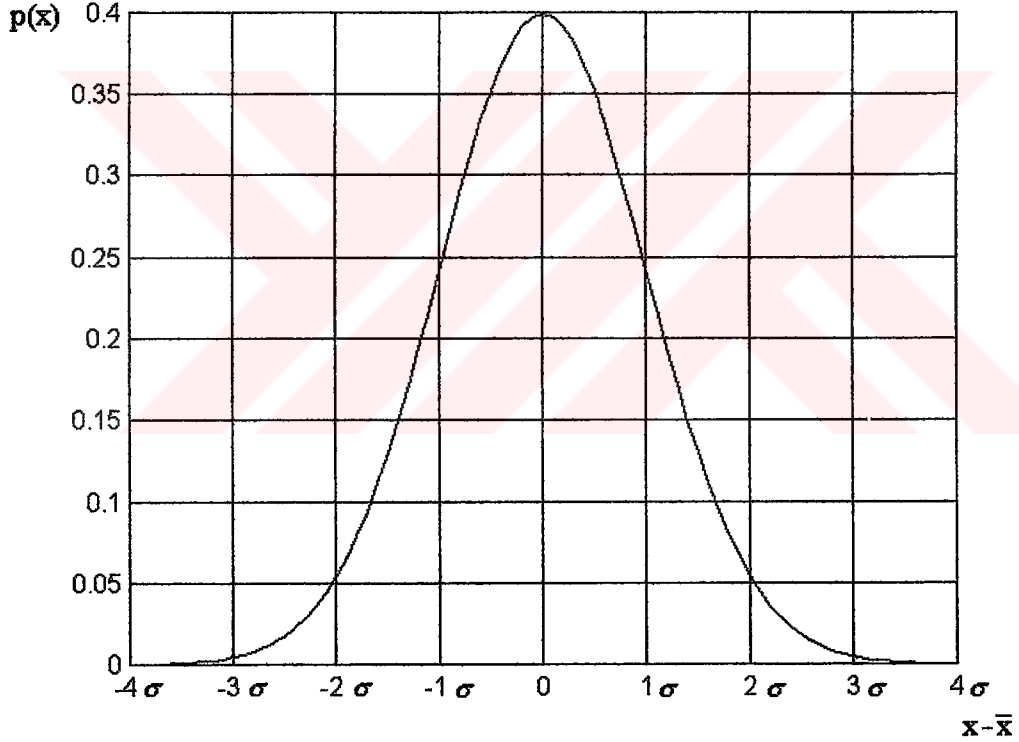
Rastlantısal titreşim problemlerinde sıklıkla başvuru alan ve geniş analize imkan veren tek olasılık dağılımı Gauss dağılımıdır (Miles ve Thomson, 1976). Rastlantısal

fonksiyonu meydana getiren değerlerin σ standart sapması ve $\bar{x}$ aritmetik ortalamasına bağlı olan Gauss olasılık yoğunluğu fonksiyonu

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir.

Gauss dağılımının grafiği Şekil 2.2 de görüldüğü gibidir. Doğada meydana gelen pek çok rastlantısal olay ilginç bir şekilde bu çan eğrisi şeklindeki dağılıma uyum göstermektedir.



Şekil 2.2 $\sigma = 1$ için Gauss dağılımı.

İncelenen herhangi bir rastlantısal fonksiyona ait verilerin dağılımının grafiğinin Gauss eğrisine göre farklılığını gösteren iki temel boyutsuz büyüklük tanımlanmıştır (Press ve diğ., 1992).

Çarpıklık faktörü (skewness), incelenen rastlantısal fonksiyonun aldığı değerlerin dağılımının aritmetik ortalamaya göre asimetrikliğini gösteren boyutsuz bir büyüklüktür ve N , incelenen fonksiyonu tanımlayan toplam veri sayısı olmak üzere

$$skew(x_1 \dots x_N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{x_k - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (2.14)$$

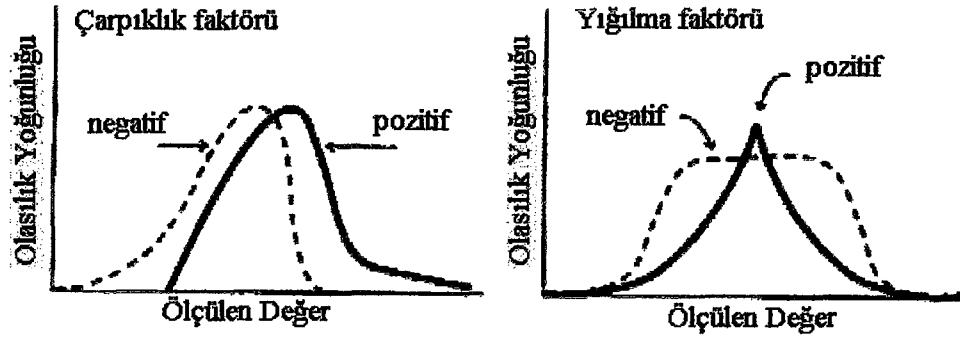
şeklinde ifade edilir. Çarpıklık faktörünün pozitif bir değer alması durumunda incelenen rastlantısal fonksiyonun aldığı değerlerin dağılımını gösteren grafik pozitif değerlere doğru asimetrik bir uzama gösterecek, negatif bir değer alması durumunda ise bu grafik negatif değerlere doğru bir asimetrik uzama gösterecektir. Gauss dağılımının çarpıklık faktörü sıfırdır.

Yığılma faktörü (kurtosis), incelenen rastlantısal fonksiyonun aldığı değerlerin dağılımının aritmetik ortalama etrafındaki yığılma durumunu gösteren boyutsuz bir sayıdır ve

$$kurt(x_1 \dots x_N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{x_k - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad (2.15)$$

olarak ifade edilir. Yığılma faktörünün pozitif bir değer alması incelenen rastlantısal fonksiyonun aldığı değerlerin aritmetik ortalama civarında yoğunlaştığı anlamına gelmektedir, ve bu durumda fonksiyona ait olasılık dağılımının grafiği aritmetik ortalama civarında sivrileşen bir eğri görünümünde olacaktır. Yığılma faktörünün negatif olması durumunda ise söz konusu fonksiyonun olasılık dağılımının grafiği daha basık bir görünümde olacaktır. Gauss dağılımının yığılma faktörü, (2.14) ifadesinde verildiği şekilde hesaplandığında sıfırdır. Ancak bazı kaynaklarda (2.14) ifadesinde verilmiş olan -3 terimi ifadeye dahil edilmemektedir. Bu durumda Gauss dağılımının yığılma faktörü 3 olmaktadır.

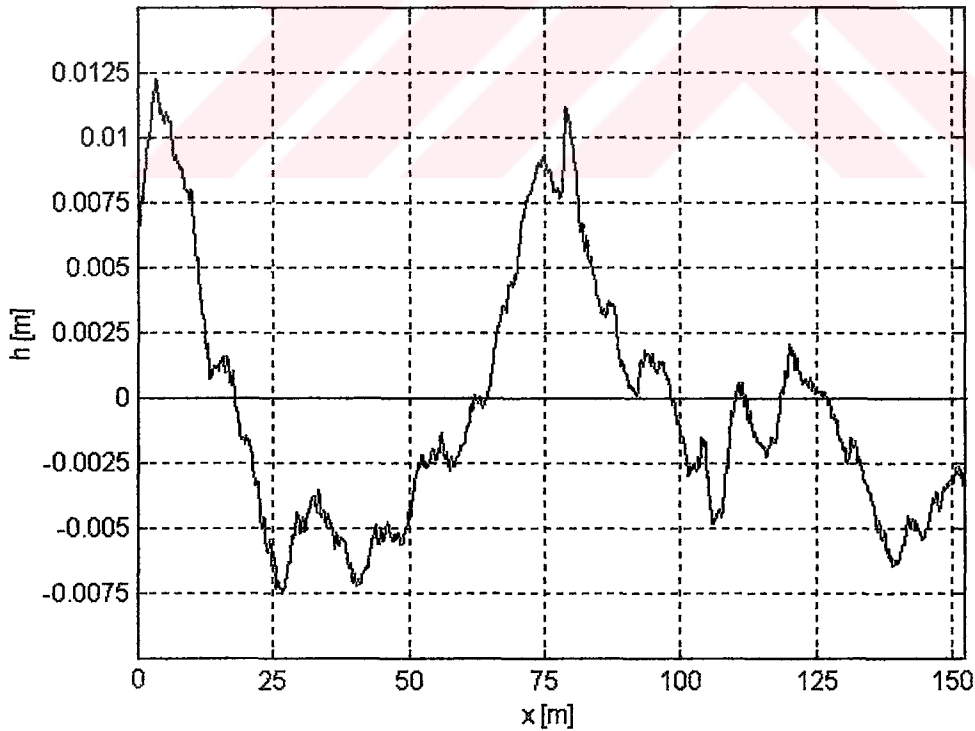
Bu değerlerin pozitif veya negatif olması durumunda herhangi bir dağılımın grafiği Şekil 2.3 te görüldüğü gibi bir değişim gösterecektir.



Şekil 2.3 Dağılımın Gauss dağılımına göre farklılık göstermesi.

3. YOL PROFİLİNİN MATEMATİKSEL İFADESİ

Yol düzgünsüzlüklerinin, rastlantısal bir fonksiyon olması nedeniyle açık bir matematiksel ifadesi yoktur. Örnek bir yol profili Şekil 3.1 de görüldüğü gibidir. Böyle bir yol profili, sayısal olarak, eşit aralıklarla belirli bir referans yüzeyine göre ölçülmüş yükseklik değerlerinden meydana gelmektedir. Tamamen rastlantısal bir fonksiyon özelliği göstermesi nedeniyle yol üzerindeki herhangi bir noktanın referans yüzeyine göre h yükseklik değerini, q noktanın başlangıç noktasından yatay uzaklığı x in bir fonksiyonu olarak tanımlamak mümkün değildir. Bunun yerine yollar, içerdikleri düzgünsüzlüklerin istatistiksel büyüklükleri ve yolu meydana getiren periyodik fonksiyonların yapısı hakkında bilgi veren spektral özellikleri ile tanımlanırlar.



Şekil 3.1 Eşit aralıklarla ölçülmüş yol profili örneği.

İstatistiksel inceleme, tamamen rastlantısal bir fonksiyon söz konusu olduğu için cebirsel yöntemlerle değil sayısal yöntemlerle yapılır. Bunun getireceği en büyük

farklılık, h yol düzgünsüzlüğü değerlerinin gerçek yollarda olduğu gibi başlangıç noktasından x yatay uzaklığının sürekli bir fonksiyonu olmayıp ayrık dizi şeklinde olmasıdır. Söz konusu ayrık diziyi oluşturmak için belirli ve sabit aralıklarla, istatistiksel olarak incelenecek yol yüzeyinin belirli bir referans yüzeyine göre yükseklik değerlerinin ölçülmesi gerekir.

3.1 İstatistiksel Özellikler

İstatistiksel incelemenin getireceği iki önemli sonuç mevcuttur. Birincisi, incelemede sayısal analiz yöntemleri kullanılacağı için, herhangi bir problemin bu şekilde çözülmesinde çoğunlukla yaklaşık hesap yapılacağı ve dolayısıyla bir miktar hata payının her zaman için olabileceğidir. İkinci önemli sonuç ise istatistiğin temel kuralı niteliğinde sayılabilir. İstatistik hiçbir zaman bir şeyi ispatlayamaz, sadece aksini ispatlayabilir (Press ve diğ., 1992). Aşağıda yol düzgünsüzlüklerinin incelenmesinde kullanılacak olan bazı istatistiksel kavramlar açıklanacaktır.

3.1.1 Aritmetik Ortalama

Herhangi bir yolun L uzunluğu boyunca, eşit aralıklarla n tane nokta için ölçüm yapıldığını varsayarsak, h_k , k indisli noktanın yüksekliği olmak üzere yolun aritmetik ortalaması

$$\bar{h} = \frac{\sum_{k=1}^n h_k}{n} \quad (3.1)$$

şeklindedir.

Aritmetik ortalama, yolun düzgünsüzlüğü hakkında herhangi bir bilgi vermez ve değeri de seçilecek olan referans yüzeyine bağlı olarak değişir. Fourier analizi açısından önemi ise, aritmetik ortalamanın (2.1) ve (2.5) ifadeleri ile verilen Fourier serisi tanımlarında yer alan a_0 katsayısına eşit olmasıdır. Yolun analizi aşamasında referans yüzeyi uygun şekilde kaydırılarak aritmetik ortalama sıfır yapılabilir. Böylece yolun matematiksel ifadesindeki sabit terim ortadan kalkacaktır.

3.1.2 Karesel Ortalama

Yine yukarıdaki gibi tarif edilmiş bir yol için, karesel ortalama

$$\overline{h^2} = \frac{\sum_{k=1}^n h_k^2}{n} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir.

h_k^2 değerlerinin ortalamasına eşit olan karesel ortalama, yolun düzgünsüzlüğü hakkında bir miktar bilgi verir. İncelenen yol için karesel ortalama ne kadar büyük ise yol o kadar bozuk demektir. Ancak ölçüm için kullanılan referans yüzeyi karesel ortalama değerinde farklılık yaratacağından, bu tip bir incelemede standart sapmanın kullanılması daha doğrudur.

3.1.3 Standart Sapma

Standart sapma,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (h_k - \overline{h})^2}{n}} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Karesel ortalamaya benzer şekilde, sayısal olarak ölçülmüş bir yol profili için standart sapma, yolun genel olarak düzgünsüzlüğü hakkında bilgi verir. Bir yolun σ standart sapması ne kadar büyük ise yol o kadar bozuk demektir.

Aritmetik ortalamanın sıfır olması halinde standart sapma, karesel ortalamanın kareköküne eşit olacaktır. Bu sebeple standart sapma, seçilecek referansa yüzeyinden bağımsızdır, ve farklı yolların kalitesini birbiri ile karşılaştırmak için standart sapma karesel ortalamaadan daha kullanışlıdır.

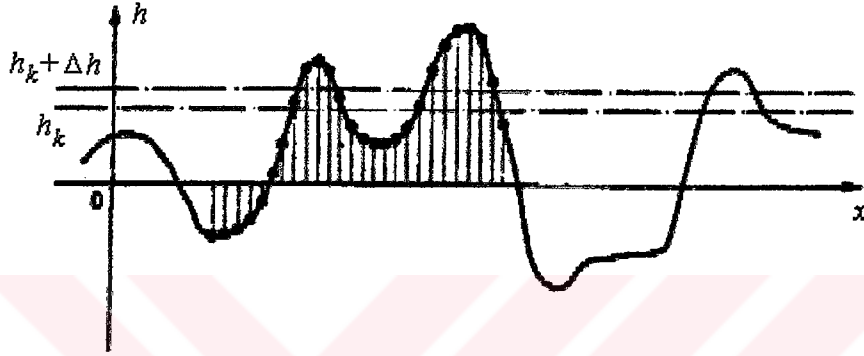
3.1.4 Olasılık Yoğunluğu

Daha önce de belirtildiği gibi, sonlu bir yol profili, L uzunluğu boyunca eşit aralıklarla ölçülmüş olan N tane h_k yüksekliğinin oluşturduğu bir dizi olarak düşünülebilir. Bu şekilde tarif edilmiş olan yol, Δh yüksekliğinde eşit yatay dilimlere

ayrıldığında her bir aralığa düşen nokta sayısı tespit edilebilir. N tane noktadan oluşan bir yol için, Şekil 3.2 de görüldüğü gibi, herhangi bir $(h_k)-(h_k + \Delta h)$ aralığında n_k tane nokta varsa bu aralık için olasılık yoğunluğu

$$p(h_k)\Delta h = \frac{n_k}{N} \quad (3.4)$$

şeklinde hesaplanır.



Şekil 3.2 Yolun herhangi bir yükseklik aralığındaki noktalarının tespiti.

Bu şekilde tüm yükseklik aralıkları için hesaplanan olasılık yoğunluğu değerleri veya bu yükseklik aralıklarında bulunan noktaların sayısı dik koordinatlarda yükseklik değerleri üzerine çizdirildiğinde, yol boyunca hangi yükseklik değerlerinin ne oranda yer aldığı kolayca görülebilir. Daha önce Gauss dağılımı konusunda bahsi geçen (2.11) ifadesi ise, doğal olarak meydana gelen pek çok rastlantısal titreşimin uyum gösterdiği bir olasılık yoğunluğu fonksiyonu tanımıdır.

3.1.5 Durağanlık

Yol düzgünsüzlükleri gibi rastlantısal olaylarında kullanılacak başka bir kavram da durağanlıktır. Eğer yolun herhangi bir parçası için elde edilmiş olan istatistiksel özellikler yolun başka bir parçası yada yolun tamamı için de aynı ise, o yol profilinin durağan olduğu söylenebilir. Bu şartlar altında, yolun bir parçasından elde edilen istatistiksel özellikler tüm yol yüzeyinin özelliklerini tanımlamak için kullanılabilir (Wong, 1993).

3.2 Spektral Özellikler

Yol profilinin istatistiksel özellikleri yolun düzgünsüzlüğü hakkında bir fikir verse de sadece bu bilgilerle yol düzgünsüzlüklerinin taşıt titreşimleri üzerindeki etkisini tanımlamak mümkün değildir. Bu etkiyi anlayabilmek için yolun spektral özelliklerinin incelenmesi gereklidir.

Titreşimlerin hesabı en kolay olarak bu uyarının harmonik fonksiyonların toplamlarından meydana gelmesi şeklinde düşünülerek yapılabilir. Bu uyarıların frekansları yoldaki düzgünsüzlüklerin dalga boyları ve taşıtın hızının bir fonksiyonudur. Titreşim ise bu frekanslarla taşıtın doğal frekansları arasındaki oranlara ve bu dalga boylarındaki genliklere bağlıdır. (Erzi, 1998)

Bu aşamada yola Fourier analizi uygulanır ve N tane harmonikten meydana gelen yol (2.5) ifadesine benzer şekilde

$$h(x) = a_0 + \sum_{k=1}^N C_k \cos(\Omega_k x - \alpha_k) \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada a_0 yol profilinin aritmetik ortalamasını, C_k Fourier katsayılarını, yani yolu meydana getiren dalga fonksiyonlarının genliklerini, Ω_k bu dalga fonksiyonlarının frekansını ve α_k faz açılarını ifade etmektedir. Bu ifadede frekans olarak geçen Ω_k , zaman içindeki titreşimleri tanımlayan frekanstan farklı olarak yola bağlı frekansı ifade etmektedir ve birimi 1/m dir. L uzunluğundaki sonlu bir yol için frekanslar

$$\Omega_k = \frac{k2\pi}{L} \quad (3.6)$$

şeklinde tarif edilir. Birbirini takip eden frekanslar arasındaki $\Delta\Omega$ frekans aralığı ise

$$\Delta\Omega = \frac{2\pi}{L} \quad (3.7)$$

olarak ortaya çıkar.

Referans yüzeyi uygun şekilde seçilerek (3.5) ifadesindeki a_0 , sıfıra eşitlenebilir. Bu durumda (3.5) ifadesi

$$h(x) = \sum_{k=1}^N C_k \cos(\Omega_k x - \alpha_k) \quad (3.8)$$

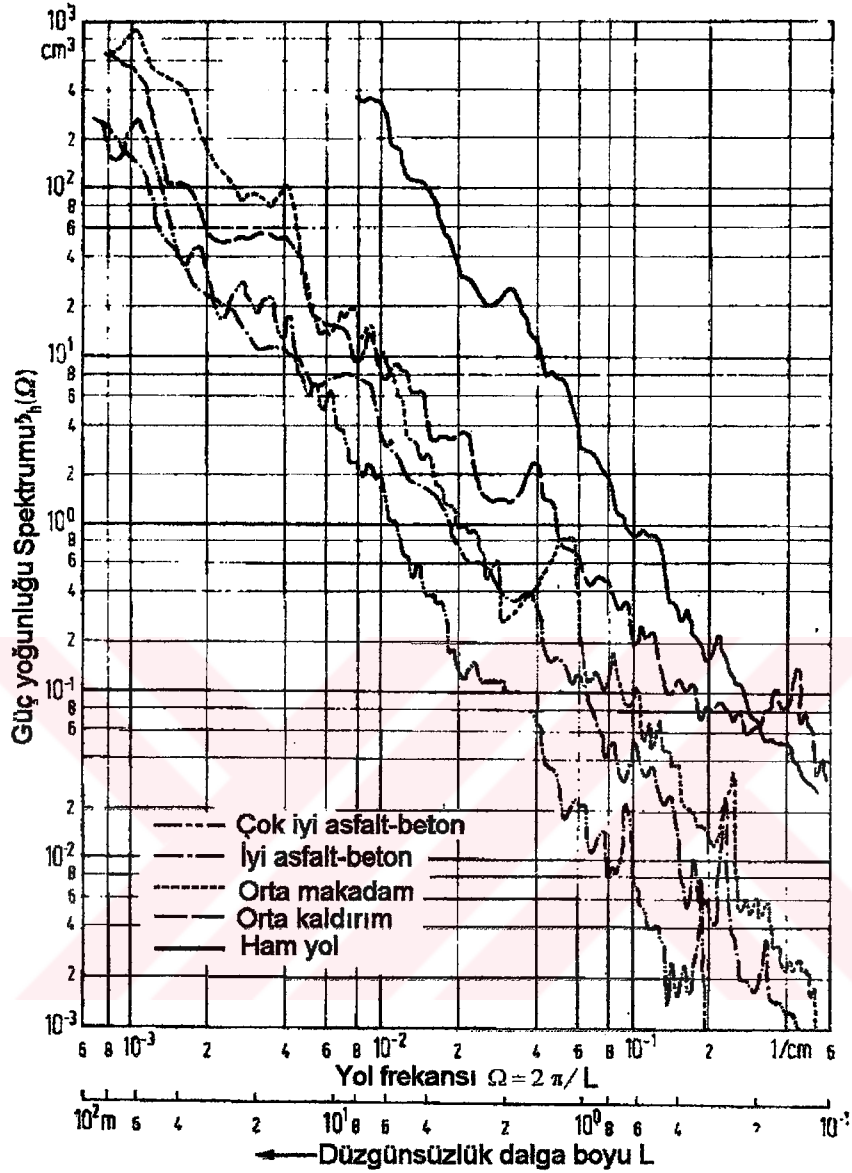
şekline dönüşür. Bu araştırmanın yolun yeniden yaratılması kısmında da bu ifadeden faydalanılacaktır.

Sayısal ölçüm yapılmış bir yola ait C_k değerlerinin bulunması için o yola Fourier dönüşümü uygulanır. Neticede elde edilecek olan Fourier katsayıları ile, güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu (2.12) de verildiği gibi

$$\Phi(\Omega_k) = \frac{2|C_k|^2}{\Delta\Omega} \quad (2.12)$$

şeklinde tanımlanır.

Karayolları için yol düzgünlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu ile ilgili ilk çalışmalar, daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi Braun (1966) tarafından yapılmıştır. Braun'un ölçümlerine göre elde edilen spektrum değerlerinin çift logaritmik diyagramda çizdirilmiş hali Şekil 3.3 de görüldüğü gibidir. Bu eğrilerde görülen ekstremumlar, otobandaki beton plakların boyları gibi yoldaki periyodik düzgünlüklere karşılık gelmektedir.



Şekil 3.3 Braun'un ölçümlerine göre elde edilen güç yoğunluğu spektrumu eğrileri.

Braun'a göre yol düzgünlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu (1.1) ifadesinde verildiği gibidir.

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \quad (1.1)$$

Bu fonksiyon çift logaritmik diyagramda bir doğru ile gösterildiğinde $\Phi_h(\Omega_0)$, doğrunun diyagramdaki yerini gösterecektir. Yol ne kadar kötü ise $\Phi_h(\Omega_0)$ o kadar büyük olacak ve söz konusu doğru o kadar yukarı kayacaktır. (1.1) ifadesindeki w ise

bu doğruların eğimini verir, yani düzgünsüzlüğün karesel ortalamasının uzun ve kısa dalga boylarına nasıl dağıldığını ifade eder. Braun'a göre $\Omega_0 = 0.01$ 1/cm olmak üzere $\Phi_h(\Omega_0)$ ve w değerlerinin bulunduğu aralıklar

$$0.6 \text{ cm}^3 < \Phi_h(\Omega_0) < 323 \text{ cm}^3$$

$$1.72 < w < 2.29$$

olarak verilmiştir. Bu parametreler için yol tipine göre kullanılabilecek ortalama değerler Tablo 3.1 de verilmiştir.

Yolların sınıflandırılması için uluslar arası standart önerileri de vardır (Erzi, 1998). International Standardization Organisation (ISO)' ya göre yolların sınıflara ayrılmasında kullanılmak üzere önerilen $\Phi_h(\Omega_0)$ değerleri Tablo 3.2 de verilmiştir. Bu değerler, $\Omega_0 = 1 \text{ m}^{-1}$ ve $w = 2$ için Braun'un (1.1) ifadesinde kullanılacak olan değerlerdir. Bu tablodaki altı çizili olan değerler en çok rastlanan değerleri ifade etmektedir.

Yine ISO' ya göre, yol düzgünsüzlüklerinin sınıflandırılmasında kullanılan değerleri gösteren bir başka tablo da Tablo 3.3 de görülmektedir. Bu tablodaki değerler ise Dodds'un (1.3) ifadesinde kullanılmak üzere verilmiş $\Phi_h(\Omega_0)$ değerlerinden oluşmaktadır. Bu tabloda verilmiş olan değerlerin kullanılabilmesi için, $\Omega_0 = 1/2\pi$ çevrim/m , $w_1 = 2$ ve $w_2 = 1.5$ alınması gerektiği belirtilmektedir.

Tablo 3.1 Braun'un ifadesinde kullanılabilecek yol düzgünlüğü güç yoğunluğu spektrumu parametreleri.

Yolun Tipi	Sınıflandırma	Ortalama değerler	
		w	$\Phi_h(\Omega_0)$ [cm ³]
Çimento-beton	çok iyi	2,29	0,6
	iyi	1,97	4,5
	ortalama	1,97	8,7
	kötü	1,72	5,6
Asfalt-beton	çok iyi	2,2	1,3
	iyi	2,18	6
	ortalama	2,18	22
Makadam	iyi	2,26	9
	ortalama	2,26	24
	kötü	2,15	43
	çok kötü	2,15	158
Kaldırım taşı	iyi	1,75	14
	ortalama	1,75	23
	kötü	1,81	36
	çok kötü	1,81	323
Toprak yol	iyi	2,25	32
	ortalama	2,25	15
	kötü	2,14	602
	çok kötü	2,14	16300

Tablo 3.2 Yol düzgünlüklerinin uluslar arası sınıflandırılması (Braun).

Sınıflandırma	DIN-FANAK (C8)		ISO (TC 108)
		$\Phi_h(\Omega_0)$ [cm ³]	
	Alt sınır	<u>Ortalama</u>	Üst sınır
A	-		...0.25...< 0.5
B (çok iyi)	...1...< 2		1.5 ...1 ...< 2
C (iyi)	2 ...	4	... < 8
D (orta)	8 ...	16	... < 32
E (kötü)	32 ...	64	... < 128
F (çok kötü)	> 128		128...256 ...512
G	-		512...1024...2048
H	-		> 2048

Tablo 3.3 Yol düzgünsüzlüklerinin uluslar arası sınıflandırılması (Dodds).

Sınıflandırma	Düzgünsüzlük derecesi	
	$\Phi_h (\Omega_0) 10^{-6}$	$[m^2/çevrim/m]$
A (çok iyi)	< 8	4
B (iyi)	8 - 32	16
C (ortalama)	32 -128	64
D (kötü)	128 - 512	256
E (çok kötü)	512 - 2 048	1024
F	2 048 - 8 192	4096
G	8192-32 768	16 384
H	< 32 768	

4. MEVCUT YOLLARIN İNCELENMESİ

Bu bölümde yol düzgünsüzlüklerinin incelenmesinde, Michigan Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nün, http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/ltp_erd.html adresli internet sayfasındaki mevcut bulunan ölçülmüş yol datalarının bir kısmı kullanılmıştır. Matlab programı kullanılarak, inceleme için seçilen yol datalarına Fourier dönüşümü uygulanıp yoldaki düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu eğrileri ve yolu meydana getiren harmonik fonksiyonların faz açıları incelenmiştir. Daha sonra yol profilinin olasılık yoğunluğu hesaplanarak, yolun σ standart sapmasından faydalanılarak elde edilen uygun Gauss dağılımı eğrisi ile karşılaştırılmıştır.

4.1 Yol Dataları

Yukarıda adresi verilen internet sayfasında, Amerika Birleşik Devletleri'nin hemen her eyaleti için ölçülmüş yol dataları, yine her eyalet için farklı bir sıkıştırılmış arşiv dosyası halinde bulunmaktadır. Bu arşiv dosyalarının diske kaydedilmesi ve açılması ile ilgili bilgiler de yine aynı sayfada yer almaktadır.

Arşiv dosyaları açıldığında, sayısal olarak ölçülmüş yol datalarının kaydedilmiş olduğu 'erd' uzantılı dosyalar ortaya çıkar. Düz yazı olarak kaydedilmiş olan bu dosyalar, bazı genel bilgileri içeren başlık kısmı ve yola ait ölçülmüş yükseklik değerlerini içeren data kısmından meydana gelmiştir. Michigan Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nün internet sitesinden 'erd' dosyalarının yapısı ile ilgili daha geniş bilgiye ulaşılabilir.

İncelemede kullanılacak olan dosyalarda, yolun hem sol hem de sağ iz profilleri için yükseklik ölçümleri farklı sütunlar halinde kaydedilmiş bulunmaktadır. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, herhangi bir yol için her iki yol profilinin de benzer özellikler göstereceği varsayılarak, bu çalışmada sadece sol iz profili için analiz yapılacaktır. İncelemede kullanılacak olan Ek A.1 deki program dosyasında küçük

değişiklikler yaparak sağ iz profili veya her iki profil için de sonuçların elde edilmesi mümkündür.

4.2 Yolların Analizi

Yolların analizi için Matlab programından faydalanılmıştır. Diske kaydedilmiş ‘erd’ dosyaları içerisindeki yol datalarını okuyarak analiz eden komut satırları, Matlab tarafından çalıştırılacak ‘m’ uzantılı m-file dosyası olarak yazılmış ve Ek A.1 de verilmiştir.

Bu m-file çalıştırıldığında kullanıcıdan bir ‘erd’ dosyası seçmesini istemekte, ve sonra seçilen dosyadaki yol datalarını okuyup yol düzgünsüzlüklerinin analizini gerçekleştirmektedir. Analiz sonuçları dört adet grafikte sunulmaktadır. Grafikler sırasıyla; yol profili, yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu, yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları ve yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı ile ilgili bilgileri vermektedir. Bu grafiklere ait bilgiler aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

4.2.1 Yol Profili

Analiz edilen ‘erd’ dosyasındaki dataların okunarak, yine aynı dosyada verilmiş olan aralıklarla dik koordinat sisteminde çizdirilmesi sonucunda elde edilen yol profili grafiği, Şekil 3.1 dekine benzer bir grafikdir. Ancak burada, analizi kolaylaştırmak ve yollar arasında karşılaştırma yapmayı mümkün kılmak amacıyla referans eksenini kaydırılarak yol yüksekliklerinin aritmetik ortalaması sıfır yapılmış ve yükseklik değerlerinin, yolun standart sapmasına oranı kullanılmıştır. Yani, yolun ölçülmüş h_k yükseklik değerleri yerine

$$h'_k = \frac{h_k - \bar{h}}{\sigma} \quad (4.1)$$

şeklinde normalleştirilmiş yükseklik oranları kullanılarak yol profili grafiği çizdirilmiştir.

4.2.2 Yol Düzgünsüzlüklerinin Güç Yoğunluğu Spektrumu

Yola ait güç yoğunluğu spektrumu değerlerini elde etmek için Matlab programı dahilinde bulunan 'fft' fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon verilen yol datalarına

$$X(k) = \sum_{j=1}^n x(j) e^{\frac{-2\pi i}{n}(j-1)(k-1)} \quad (4.2)$$

olarak ifade edilmiş Fourier dönüşümünü uygulayarak X kompleks Fourier katsayılarını hesaplamaktadır. Daha sonra bunların modülü alınarak ve (2.12) ifadesinde verilmiş olan güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu tarifi kullanılarak çift logaritmik diyagramda frekans üzerine çizdirilmekte ve böylece yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu grafiği elde edilmektedir.

Grafik çizdirilirken, Fourier dönüşümü neticesinde elde edilen n tane güç yoğunluğu spektrumu değerinin sadece yarıya kadar olan kısmı, yani ilk $n/2$ değer çizdirilmesi gerekmektedir, çünkü ikinci yarıyı oluşturan değerler ilk yarıdakilerin simetriği şeklinde ortaya çıkmaktadır. Zaten güç yoğunluğu spektrumunu meydana getiren değerler de ilk $n/2$ lik kısımdaki değerlerdir. Bunun sebebi, Fourier dönüşümünde, Fourier serisini meydana getiren her bir periyodik dalganın, rastlantısal fonksiyonu oluşturan noktalardan iki tanesi ile tanımlanıyor olmasıdır. Yani n tane noktadan oluşan bir diziye Fourier dönüşümü uygulandığında $n/2$ tane harmonik fonksiyon elde edilir.

4.2.3 Harmoniklerin Faz Açıları

Yolu meydana getiren harmoniklerin faz açılarını bulmak için, Fourier dönüşümü sonunda elde edilen X kompleks Fourier katsayıları kullanılır.

$$\alpha_k = \arctan \frac{\text{Im}(X_k)}{\text{Re}(X_k)} \quad (4.3)$$

ifadesi kullanılarak α_i faz açıları bulunabilir. Burada $\text{Im}(X_k)$ kompleks X_k sayısının imajiner kısmını $\text{Re}(X_k)$ ise bu sayının reel kısmını ifade etmektedir. Her frekans için bulunan faz açıları diyagram üzerinde noktalarla işaretlenerek yolu meydana getiren harmoniklerin faz açılarının grafiği elde edilmiştir.

Faz açılarının elde edilmesinde Forier dönüşümü sonucunda elde edilen kompleks Fourier katsayıları kullanıldığından, faz açısı değerlerinin de güç yoğunluğu spektrumu değerlerine benzer şekilde ikinci yarısı ilk yarısının simetriği şeklindedir. Bu sebeple, grafik çizdirilirken sadece ilk yarıyı oluşturan $n/2$ tane faz açısı değeri kullanılmıştır.

4.2.4 Yol Düzgünsüzlüklerinin Dağılımı

Yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı, Bölüm 3.1.4' te anlatıldığı şekilde tespit edilmiştir. Yol, yüksekliği boyunca -3.6σ ile 3.6σ aralığında 0.2σ yüksekliğinde dilimlere ayrılarak her dilimde yer alan nokta sayısı standart sapma σ üzerinde gösterilmiştir. Karşılaştırma yapmak için yolun standart sapması kullanılarak hesaplanan Gauss dağılımının grafiği de bu grafiğe eklenmiştir.

Bu grafikte ayrıca yolun standart sapması σ , ve düzgünsüzlüklerin dağılımının Gauss dağılımından ne kadar ve ne şekilde farklılıklar gösterdiğini ifade eden çarpıklık faktörü ve yığılma faktörü değerleri de grafiğin sol üst köşesinde yazılı olarak verilmektedir.

4.3 Örnek İnceleme Sonuçları

Ek A.1 de verilen m-file kullanılarak incelenen örnek yollardan birkaç tanesi için yukarıda anlatılan grafikler burada incelenecektir. Aşağıda bu yolların incelendiği alt bölümlerin başlıklarında yer alan ilk numara bu yolun bulunduğu eyaleti, ikinci numara yolu, üçüncü numara ise kaydedilmiş yol datalarının bulunduğu 'erd' dosyasını simgelemektedir. Michigan Üniversitesi'nin internet sitesinden indirilen sıkıştırılmış arşiv dosyaları açıldığında da aynı dizin yapısı ile diske kaydedilmektedir.

4.3.1 11/1400/94061901

Bu yol için yapılan analizin sonuçlarını gösteren grafikler Şekil B.1,2,3 ve 4 te verilmiştir.

Yol profilini meydana getiren yükseklik değerlerinin σ standart sapma değerine oranı Şekil B.1 de, yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu grafiği ise Şekil B.2

de görülmektedir. Bu yol için güç yoğunluğu spektrumu grafiği, Braun'un yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu için önerdiği ifadede olduğu gibi çift logaritmik diyagramda bir doğru ile temsil edilebilecek şekildedir.

Şekil B.3 te görüldüğü üzere, bu yol için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları oldukça düzgün dağılmakta ve grafikte kalın çizgi ile gösterilmiş olan doğruya belirgin şekilde yakınsamaktadır. Bu doğruyu ifade eden fonksiyon aynı grafiğin sağ alt köşesinde görülmektedir. Analiz sonucunda elde edilen ve noktalarla gösterilen faz açısı değerlerini ifade etmek için kullanılabilecek en uygun birinci derece polinomu gösteren bu doğrunun, yolu meydana getiren harmoniklerin yer aldığı tüm frekans aralığı boyunca yaklaşık olarak $-\pi/2$ ile 0 arasında lineer olarak artan bir doğru olduğu varsayılabilir.

Bu yol için yol düzgünsüzlüklerinin olasılık dağılımı grafiği Şekil B.4 te görülmektedir. Grafikte kesik çizgilerle çizilmiş olan eğri, bu yola ait σ değeri için hesaplanmış olan Gauss dağılımını göstermektedir. Bu grafikte görüldüğü üzere yol düzgünsüzlüklerinin olasılık dağılımı görsel olarak Gauss dağılımından oldukça farklıdır.

4.3.2 20/1010/90041401

Bu yol için yapılan analizin sonuçlarını gösteren grafikler Şekil B.5,6,7 ve 8 de verilmiştir.

Yol profilini meydana getiren yükseklik değerlerinin σ standart sapma değerine oranı Şekil B.5 te, yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu grafiği ise Şekil B.6 da görülmektedir. Bu yol için de yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu grafiği, Braun'un önerisinde tarif edilene benzer biçimde çift logaritmik diyagramda bir doğru ile gösterilebilecek şekildedir.

Yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları, bu yolda da bir önceki örnekteki benzer bir uyum göstermektedir. Şekil B.7 de görüldüğü gibi faz açıları düzgün bir dağılım göstermekte ve faz açılarını gösteren noktalar arasından geçirilen kalın doğruya yakınsamaktadır. Bu örnek için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları arasında ortaya çıkan uyumun bir önceki örnektekinden tek farkı, faz açısı değerlerinin bulunduğu aralığın farklı olmasıdır. Bu yol için yolu meydana getiren

harmoniklerin faz açılarının, bütün frekans aralığı için yaklaşık olarak $\pi/2$ ile π arasında lineer olarak artan bir doğru civarında değerler aldığı söylenebilir. Yine faz açısı değerlerinin yakınsadığı birinci derece polinom, bu grafiğin alt kısmında verilmiştir.

Şekil B.8 de bu yol için yol düzgünsüzlüklerinin olasılık dağılımı, uygun Gauss dağılımı eğrisi ile birlikte verilmiş bulunmaktadır. Bir önceki örnekteki benzer şekilde bu yol için de yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı Gauss dağılımına benzememektedir.

4.3.3 55/3014/90060601

Bu yol için yapılan analizin sonuçlarını gösteren grafikler Şekil B.9,10,11 ve 12 de verilmiştir.

Yol profilini meydana getiren yükseklik değerlerinin σ standart sapma değerine oranı Şekil B.9 da, yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu grafiği Şekil B.10 da görüldüğü gibidir. Bu yola ait güç yoğunluğu spektrumu grafiği, önceki örneklerden farklı olarak, çift logaritmik diyagramda bir doğru ile ifade edilecek şekilde bir eğri görünümünde değildir. Buna göre, bu yol için yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu, Braun'un önerisi kullanıldığında tam olarak ifade edilemez.

Şekil B.11 de yolu meydana getiren harmoniklerin faz açılarının grafiği verilmiştir. Elde edilen faz açısı değerleri, önceki iki örnekte görüldüğünün aksine, herhangi bir şekilde kendi aralarında uyum göstermemekte, $-\pi$ ile $+\pi$ aralığında rastlantısal olarak dağılmaktadırlar. Grafikte görülen kalın çizgi, yine elde edilen faz açısı değerlerini ifade etmek için kullanılacak en uygun birinci derece polinomu göstermektedir. Ancak burada yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları arasında bir uyum olmadığı için fazla bir önemi yoktur.

Şekil B.12 de ise bu yol için yol düzgünsüzlüklerinin olasılık dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı Gauss dağılımına büyük ölçüde uyum göstermektedir.

4.4 İncelemenin Genel Sonuçları

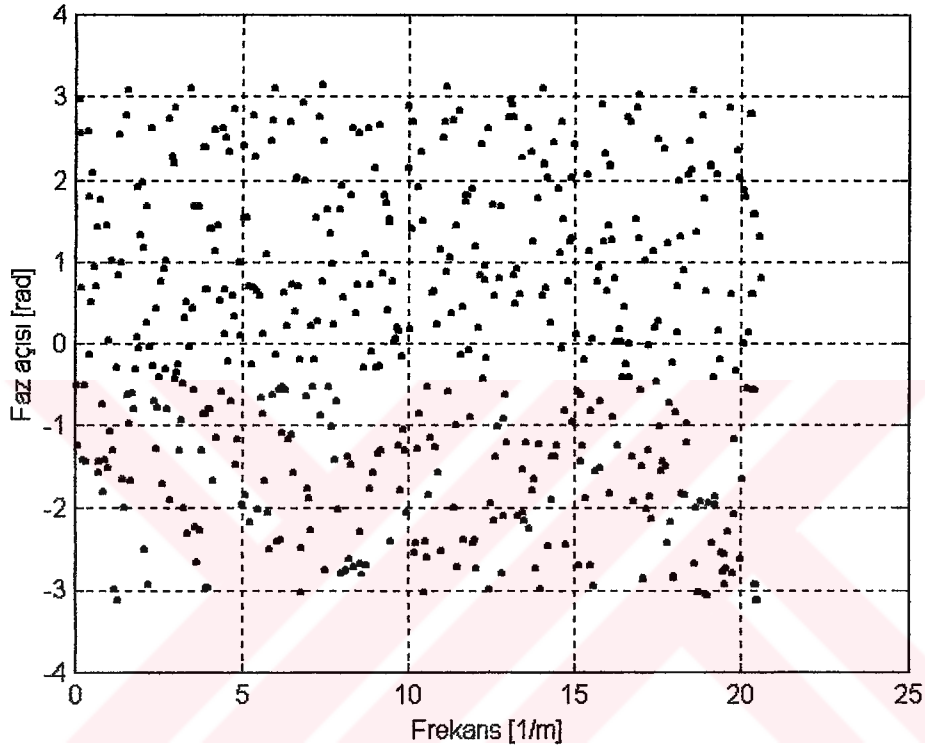
Çalışma kapsamında, Michigan Üniversitesi'nin internet sitesinden indirilmiş olan yol datalarının yaklaşık iki yüz tanesi, Ek A.1 de verilmiş olan m-file kullanılarak Matlab ortamında analiz edilmiştir. Her bir yol için analiz sonucunda elde edilen yola ait standart sapma σ , çarpıklık faktörü ve yığılma faktörü değerleri Tablo C.1, 2, 3 ve 4 te verilmiştir.

İncelen yollara ait standart sapma σ değerleri 0,0021001 m. ile 0.03158 m. arasında değişmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, standart sapma yol düzgünsüzlüklerini değerlendirmek için kullanılabilecek bir istatistiksel büyüklüktür. Standart sapma σ değeri büyüdükçe yolun düzgünsüzlüğü de artmaktadır.

Yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu grafikleri genellikle iki farklı grup içerisinde değerlendirilebilir. Grafiklerin bir kısmında, güç yoğunluğu spektrumu değerleri, Braun'un öngördüğü şekilde çift logaritmik diyagramda bir doğru ile ifade edilebilecek şekilde yer almaktadır. Güç yoğunluğu spektrumu değerlerinin söz konusu doğru etrafında dağılma şekli, veya başka bir ifade ile grafiği meydana getiren güç yoğunluğu spektrumu değerlerinin bu doğrunun yakınında veya uzağında yer alması incelenen yola göre farklılık göstermektedir. Yukarıdaki ilk iki örnekte elde edilen güç yoğunluğu spektrumu grafikleri bu sınıfa dahil olan grafikler için örnek olarak gösterilebilir. Grafiklerin diğer bir kısmında ise, çift logaritmik diyagramda, güç yoğunluğu spektrumu değerleri belirli bir frekansa kadar bir doğru üzerinde yer alırken bu frekanstan daha yüksek frekanslarda güç yoğunluğu spektrumu değerleri hızla azalan bir eğri şeklini almaktadır. Yukarıda verilen son örnek için elde edilen güç yoğunluğu spektrumu grafiği bu tipteki grafikler için örnek olarak verilebilir.

Yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları, incelen yolların büyük bir kısmı için yukarıda verilen ilk iki örnekteki gibi, bütün frekans aralığı için tanımlanmış bir doğruya az yada çok yakınsamakta; diğer bir kısmı için ise $-\pi$ ile $+\pi$ aralığında rastlantısal olarak dağılmaktadır. Liu ve Herman (1998) yaptıkları çalışmada yolu meydana getiren harmoniklerin faz açılarının dağılımına kısaca değinmişler ve bazı yollar için buradaki gibi bir uyumun varlığından bahsetmişlerdir. Belirli bir düzen içerisinde dağılım gösteren harmoniklerin faz açıları için iki farklı yaklaşımdan

bahsetmek mümkündür. Yolların bir kısmı $-\pi/2$ ile 0 arasında lineer olarak artan bir doğruya yakınsarken, bir kısmı $\pi/2$ ile π arasında lineer olarak artan bir doğruya yakınsamaktadır. Bazı yollar için bu yakınsama grafik üzerinde net olarak görülürken bazı yollar için o kadar net değildir. Tamamen rastlantısal olarak dağılmış faz açılarını gösteren bir grafik Şekil 4.1 de görülmektedir.



Şekil 4.1 17/1003/90032101 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.

Bu çalışma kapsamında analiz edilen iki yüz kadar yol için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı genellikle Gauss dağılımına uyum göstermemektedir. Az sayıda yol için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımının grafiği şekil itibariyle Gauss dağılımına uyum göstermekte, ancak Gauss dağılımının matematiksel ifadesine tam olarak uymamaktadır. Yukarıdaki en son örnekte incelenen yola ait yol düzgünsüzlüklerinin dağılımını gösteren grafik, incelen tüm yollar arasında Gauss dağılımına en yakın yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı grafiğini vermektedir. İncelenen yolların düzgünsüzlüklerinin Gauss dağılımından farklılığını gösteren değerlerden yığılma faktörü genellikle negatif değerler almakta çarpıklık faktörü ise -2.0168 ile 1.4903 aralığında değerler almaktadır.

Yapılan inceleme sonucunda güç yoğunluğu spektrumu grafiği, yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları ve yol düzgünlüklerinin dağılımı grafiklerinin görsel olarak kavranabilecek bazı özelliklerinin birbirlerine belli ölçüde bağlı olduğu göze çarpmaktadır.

Yol düzgünlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu değerlerinin çift logaritmik diyagramda meydana getirdiği eğrinin şekli ile faz açılarının dağılımı arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Güç yoğunluğu spektrumu eğrisi, genel olarak Braun'un önerdiği (1.1) ifadesinde olduğu gibi bir doğru görünümünde ise faz açıları da yukarıdaki ilk iki örnekte açıklandığı şekilde, yolu meydana getiren harmoniklerin yer aldığı tüm frekans aralığı için tanımlanmış bir doğruya yakınsayacak şekilde dağılım göstermektedir. Güç yoğunluğu spektrumu değerlerinin, bahsi geçen çift logaritmik diyagramdaki doğruya yakınlığı arttıkça faz açıları da tüm frekans aralığı için tarif edilen söz konusu doğruya daha fazla yakınsamaktadır. Güç yoğunluğu spektrumu eğrisinin görünümü bundan farklı olarak, belli frekansa kadar bir doğru, daha yüksek frekanslar için ise hızla azalan bir eğri görünümünde olduğu zaman da faz açıları, yukarıda verilen son örnekte olduğu gibi $-\pi$ ile $+\pi$ arasında rastlantısal bir dağılım göstermektedir.

Yol düzgünlüklerinin dağılımı ile faz açılarının dağılımı, dolayısıyla da güç yoğunluğu spektrumu arasında da belirli bir ilişkinin var olduğu söylenebilir. Yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları $-\pi$ ile $+\pi$ aralığında tamamen rastlantısal bir dağılım gösterdiğinde, yol düzgünlüklerinin dağılımı Gauss dağılımına uyum göstermektedir. Faz açıları, incelemede kullanılan tüm frekans aralığı için daha önce tarif edildiği şekilde bir doğruya yakınsayacak şekilde bir dağılım gösterdiğinde ise yol düzgünlüklerinin dağılımı Gauss dağılımından oldukça farklı bir görünüme sahip olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında incelenen yollar içerisinde yukarıda tarif edilen ilişkilere uyum göstermeyen az sayıda yol profili de bulunmaktadır. Bu sebeple, herhangi bir yola ait güç yoğunluğu spektrumu grafiği, yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları ve yol düzgünlüklerinin dağılımı grafikleri arasında yukarıdaki paragraflarda anlatılan şekilde bazı bağıntıların var olduğu kesin bir kural olarak söylenemez. Ancak incelenen örneklerin çok büyük bir kısmında yol datalarından

elde edilen grafikler için bu ilişkilerin gözlemlenmesi böyle bir genelleme yapmanın yanlış olmayacağını göstermektedir.

Sonuç olarak incelenen yolların büyük bir kısmı için yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu, yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları ve yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı arasında istatistiksel olarak saptanmış belirli bir uyum söz konusudur. Söz konusu uyum, incelenen iki yüz kadar yola ait dataların analizi sonucunda elde edilen grafikler arasında sıklıkla gözlemlenmesi nedeniyle bir genelleme olarak burada verilmiştir.



5. YOLUN YENİDEN YARATILMASI

Taşıt titreşimlerinin yol düzgünsüzlüklerinden ne şekilde etkilendiğinin incelenmesi amacıyla simülasyon teknikleri kullanılır. Böyle bir simülasyonun gerçekleştirilebilmesi için bir rastlantı titreşimi olan yolun yeniden yaratılması gerekmektedir. Bunun yerine, ölçülmüş gerçek bir yola ait yol profili de kullanılabilir, ancak bu durumda taşıtın sadece bu ölçülmüş olan yol üzerindeki davranışları hakkında bilgi sahibi olabiliriz, farklı bir yol üzerinde nasıl davranacağını bilemeyiz.

Daha önce de birçok kez belirtildiği gibi, yol genel olarak birçok harmonik fonksiyonun toplamından meydana gelen bir Fourier serisi olarak kabul edilebilir. Bu şekilde bir yol matematiksel olarak (3.5) ifadesinde verildiği gibi,

$$h(x) = a_0 + \sum_{k=1}^N C_k \cos(\Omega_k x - \alpha_k) \quad (3.5)$$

şeklinde gösterilebilir. Teorik olarak yolun sonsuz sayıda harmonik fonksiyondan meydana geldiği varsayılsa da analiz için yolu ifade etmeye yetecek kadar harmonik kullanılır.

Yolun yeniden yaratılmasında, yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumundan faydalanılır. Güç yoğunluğu spektrumu, yolu meydana getiren trigonometrik fonksiyonların frekansa bağlı olarak genliklerini bulmak için gerekli bilgiyi sağlamaktadır. Buradan yola çıkarak yolu meydana getiren harmoniklerin genliklerini, yani (3.5) ifadesindeki C_k değerlerini bulmak mümkündür. Ancak yolu yaratmak için α_k , yani faz açısı bilgilerine de ihtiyaç vardır ve güç yoğunluğu spektrumu bu bilgiyi içermemektedir. Genel olarak kullanılan yöntem yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumuna, rastlantısal faz açıları kullanarak ters Fourier dönüşümü uygulamaktır. Bu yöntem neticesinde ortaya çıkan yolun Gauss dağılımına uyum gösterdiği ve durağan olduğu söylenmektedir.

Yaratılan yolun simülasyon neticesinde taşıt dinamiği için geçerli bilgiler verebilmesi için güç yoğunluğu spektrumunun doğru frekans bölgesinde tanımlanması gerekmektedir. Taşıt titreşimleri açısından önemli olan frekans bölgesi 0.5 - 30 Hz arasındadır (Göktan, 1992). Titreşimlerin inceleneceği taşıt hızı aralığı ise 10 - 50 m/s olarak seçildiğinde, L dalga boyu, V hız ve f frekans olmak üzere

$$L = \frac{V}{f} \quad (5.1)$$

bağıntısı kullanılarak inceleme için kullanılacak dalga boyu aralığı 0.3 - 100 m olarak bulunur.

Çalışmanın bu kısmında karayollarında yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu olarak Braun'un önerdiği ifade kullanılarak yeniden bir yol yaratılmasına çalışılacaktır.

5.1 Kullanılan Yöntem

Yolun yeniden yaratılmasında yöntem olarak güç yoğunluğu spektrumu eşit frekans aralıkları ile dilimlere ayrılarak bu dilimlerin alanları entegrasyon ile hesaplanmıştır. Yolun yeniden yaratılması için Matlab programı kullanılmıştır. Bu yöntemi kullanarak yolu yaratan komut satırlarını içeren m-file Ek A.3 te verilmiştir.

Bu yöntemle yolun yaratılmasında kullanılacak olan güç yoğunluğu spektrumu değerlerini hesaplayan Matlab fonksiyon dosyası Ek A.2 de verilmiştir. Bu fonksiyon, girdi olarak verilen frekans değeri için Braun'un (1.1) ifadesini kullanarak güç yoğunluğu spektrumu değerini hesaplamaktadır. Bu fonksiyon dosyasında kullanılan ' ϕ_m ', ' ω ' ve ' w ' değişkenleri sırasıyla Braun'un (1.1) ifadesindeki $\Phi_h(\Omega_0)$, Ω_0 ve w parametrelerini temsil etmektedirler. Farklı tipte bir yol yaratmak için bu değişkenlerin değerleri Tablo 3.1 de verilmiş olan değer aralıklarından seçilebilir. Temel ölçü birimi olarak cm kullanılmıştır. Ek A.3 te verilmiş olan m-file dosyasının çalıştırılabilmesi için Ek A.2 de verilmiş olan Matlab fonksiyon dosyasının Matlab programına tanımlanmış bir dizin içerisine ' braun.m ' adıyla kaydedilmesi gerekmektedir.

5.1.1 Eşit Frekans Aralıkları Kullanılarak Yolun Yaratılması

Bu yöntemde yolu ifade etmekte kullanılacak tüm frekans aralığı m-file içerisindeki 'frsamp' değişkeni ile tanımlanmış sayıda eşit genişlikte dilimlere ayrılmaktadır. Bu değişkenin değeri, aynı zamanda yolu meydana getirecek harmoniklerin sayısını da vermektedir. Fourier dönüşümünde bir dalgayı ifade etmek için en az iki noktaya ihtiyaç vardır. Bu sebeple yol profilini oluşturacak olan noktaların sayısı harmonik sayısının iki katı olmalıdır.

Güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu (2.12) ifadesinden yola çıkarak

$$C_k = \sqrt{\frac{1}{2} \int_{\Omega_k}^{\Omega_{k+1}} \Phi(\Omega_k) d\Omega} \quad (5.2)$$

şeklinde entegrasyon yapıldığında harmoniklerin genliklerini veren C_k Fourier katsayıları bulunur. Bu ifade de Ω_k ve Ω_{k+1} yukarıda bahsedilen dilimlerin sınırlarını oluşturan frekanslardır. Ardışık frekanslar birbirlerinden eşit uzaklıktadırlar.

Daha sonra hesaplanan C_k Fourier katsayıları ve rastlantısal faz açıları ile (3.5) dönüşümüne benzer bir ifade kullanılarak yol profilini meydana getiren noktalar elde edilir. Aritmetik ortalamaya tekabül eden a_0 , hesaplarda sıfır olarak alınmıştır. Matlab'ın Fourier ve ters Fourier dönüşümleri için kullandığı hesap yöntemine uyum sağlamak için, yol profilinin hesaplanmasında (3.5) ifadesinden farklı olarak, N yolu meydana getiren harmoniklerin sayısı olmak üzere

$$h(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_k \cos(\Omega_k x - \alpha_k) \quad (5.3)$$

ifadesinden faydalanılmıştır.

5.2 Yol Yaratma Örnek Sonuçları

Burada, yukarıda tarif edilen yöntem kullanılarak yeni bir yol profili yaratılacak ve sonuç olarak elde edilen yol profilinin düzgünlük dağılımı incelenecektir.

Bu yöntemle yolun yaratılmasında ilk olarak güç yoğunluğu spektrumu oluşturulmuştur. Braun'un önerdiği tanıma göre oluşturulan güç yoğunluğu spektrumu için bu örnekte kullanılmış olan parametrelerin değerleri aşağıda verilmiştir.

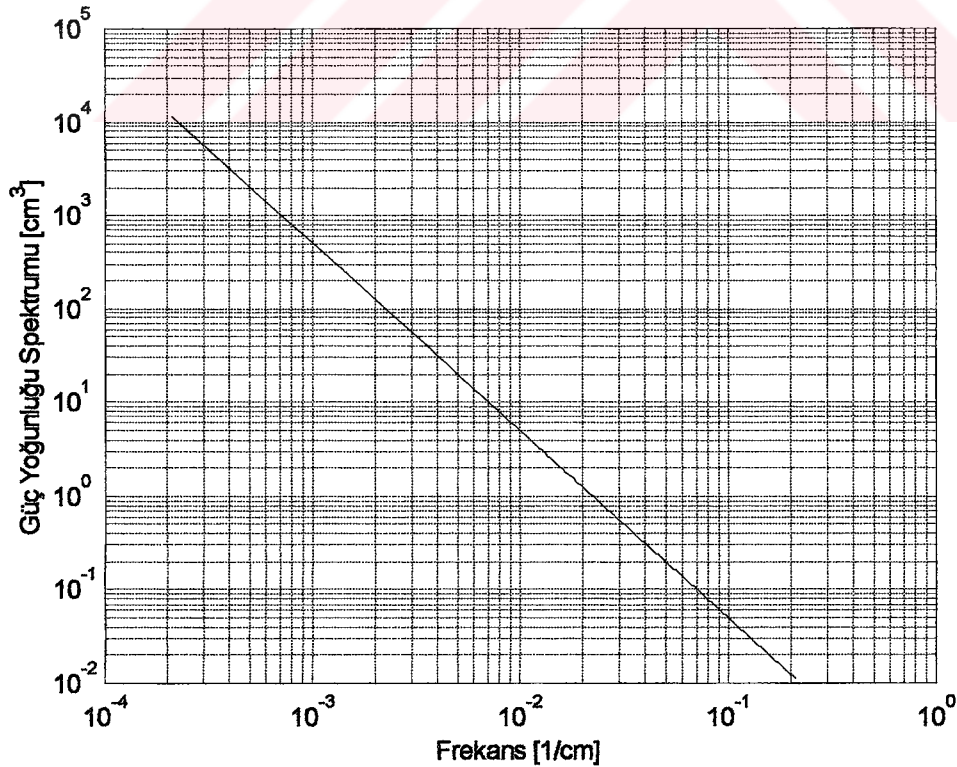
$$\Omega_0 = 0.01 \text{ 1/cm}$$

$$\Phi_h(\Omega_0) = 5 \text{ cm}^3$$

$$w = 2$$

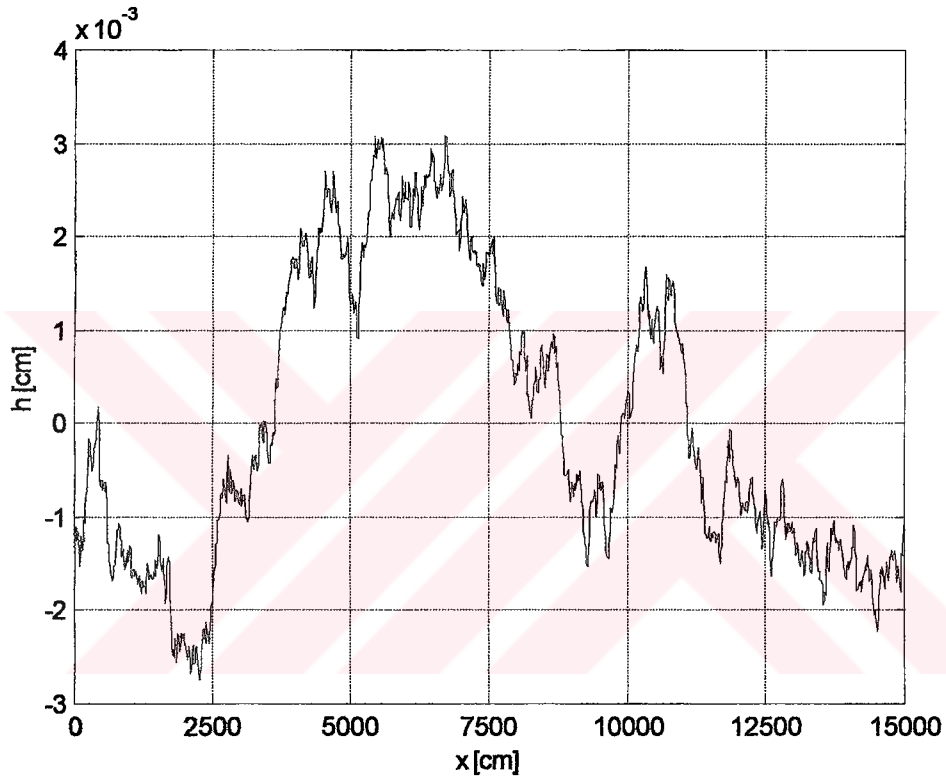
Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 de yapılmış olan sınıflandırmaya göre parametreleri böyle seçilmiş bir yol iyi olarak değerlendirilmektedir.

Bu parametrelere göre yol profilinin hesaplamasında kullanılacak frekans aralığı olan $4.1888 \times 10^{-4} - 2.0944 \times 10^{-1} \text{ 1/cm}$ bölgesi için yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumunu çift logaritmik diyagramda gösteren grafik Şekil 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.1 Yolu yaratmakta kullanılacak güç yoğunluğu spektrumu.

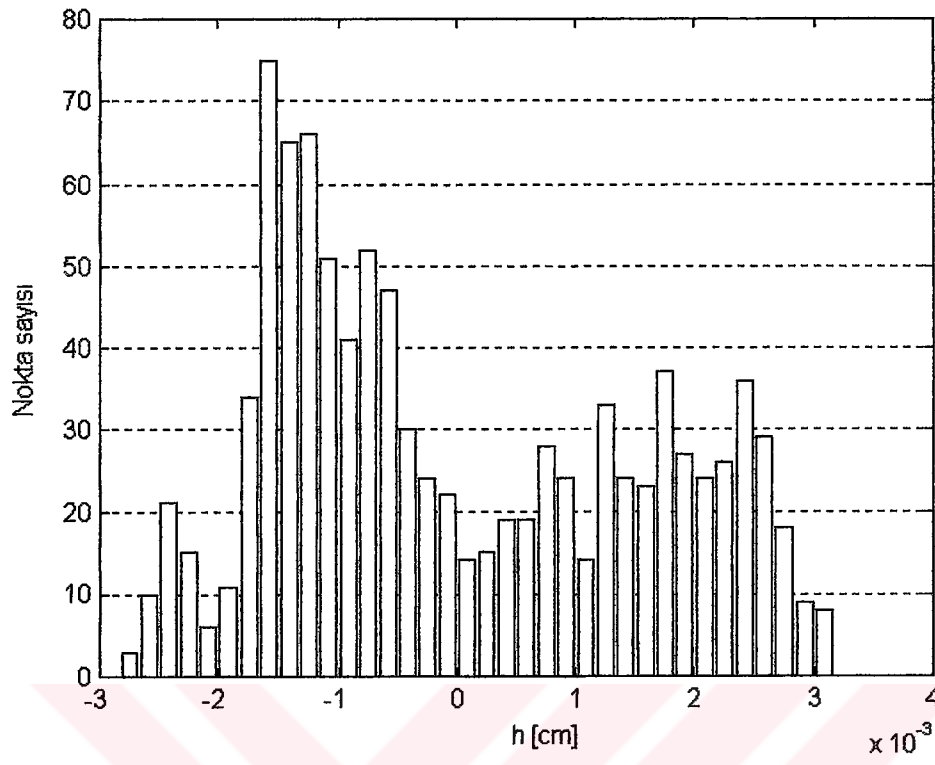
Bu şekilde hesaplar için gerekli olan frekans bölgesi için hesaplanmış güç yoğunluğu spektrumu bilgisinden yola çıkarak (5.3) ifadesindeki C_k Fourier katsayılarına tekabül eden, yolu meydana getiren harmoniklerin genlikleri hesaplanmıştır. Yol profilini elde etmek için 500 tane harmonik ve 1000 tane nokta kullanılmıştır. Bu bilgilerle birlikte (5.3) ifadesi ile verilen ters Fourier dönüşümü ifadesi ve yolu meydana getiren harmonikler için rastlantısal faz açıları kullanılarak elde edilmiş olan örnek bir yol profili Şekil 5.2 de görülmektedir.



Şekil 5.2 Eşit frekans aralıkları kullanılarak yaratılmış örnek yol profili.

Yolu meydana getiren noktalar arasındaki mesafe 15 cm olarak seçilmiştir. Seçilmiş olan bu mesafeye göre en kısa dalga boyu 30 cm, en yüksek frekans ise $2\pi/30$ 1/cm (0.2094 1/cm) olmaktadır.

Elde edilen bu yol için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımını gösteren grafik Şekil 5.3 te verilmiştir. Bu örnekte de görüldüğü gibi, bu şekilde edilen bir yol için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı, genellikle beklendiği şekilde Gauss dağılımına benzerlik göstermemektedir.



Şekil 5.3 Eşit frekans aralıkları kullanılarak yaratılmış bir yol için düzgünsüzlüklerin dağılımı.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma temel olarak iki kısımdan meydana gelmiştir. İlk kısımda gerçek yollara ait ölçülmüş yol profilleri incelenmiş, ikinci kısımda ise Braun'un yol düzgünsüzlüklerinin güç yoğunluğu spektrumu fonksiyonu için önerdiği (1.1) ifadesinden yola çıkarak ve yolu meydana getiren harmonikler için rastlantısal faz açıları kullanarak yeni bir yol profili yaratılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında Michigan Üniversitesi'nin internet sitesinden indirilmiş olan yollardan yaklaşık iki yüz kadarı, Matlab programı kullanılarak istatistiksel ve spektral yöntemlerle incelenmiştir. Ek A.1 de verilmiş olan m-file ile incelenen yola ait, yol profili, güç yoğunluğu spektrumu, yolu meydana getiren harmoniklerin faz açılarının dağılımı ve yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı grafikleri ve yola ait bazı istatistiksel değerler elde edilebilmektedir. Her bir yol için analiz sonucunda elde edilen yola ait istatistiksel değerler; standart sapma σ , çarpıklık faktörü ve yığılma faktörü değerleri Tablo C.1-4 te verilmiştir. İncelenen yollar arasında çoğunlukla rastlanan tipteki farklı yolları temsil etmek üzere üç adet yola ait yukarıda adı geçen grafikler Şekil B.1-12 de verilmiştir.

Mevcut yolların incelenmesi sonucunda, herhangi bir yol için elde edilen güç yoğunluğu spektrumu, harmoniklerin faz açıları ve yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı grafikleri arasında çoğunlukla belli bir ilişki olduğu ve yolların büyük bir kısmı için harmoniklerin faz açılarının tüm frekans aralığı için tanımlanmış bir doğruya yakınsadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen grafikler arasındaki söz konusu ilişki ve faz açıları için gözlemlenen uyum daha detaylı olarak Bölüm 4.4 te açıklanmıştır. Çalışmanın bu kısmı için varılmış olan bir diğer önemli sonuç da yol düzgünsüzlüklerinin dağılımının büyük bir çoğunlukla, gerek matematiksel gerek görsel olarak Gauss dağılımına uyum göstermediğidir.

Çalışmanın ikinci kısmında Ek A.2 ve 3 te verilen m-file dosyaları kullanılmış ve Braun'un önerdiği güç yoğunluğu spektrumdan yola çıkarak yeni bir yol profili yaratılmıştır. Verilmiş olan m-file dosyalarının ne şekilde kullanıldığı ve bu yöntem

kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma sonucunda elde edilen grafikler Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2 de verilmiştir. Bu şekilde yaratılan yol profili için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı Gauss dağılımına uyum göstermemektedir.



KAYNAKLAR

- Braun, H.**, 1966. Untersuchungen über Fahrbahnunebenheiten, *Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik*, **186**, 1-83.
- Bruscella, B., Rouillard, V. and Sek, A.**, 1999. Analysis of Road Surface Profiles, *J. Transp. Engrg.*, ASCE, **125**, 55-59.
- Dodds, C.J. and Robson, J.D.**, 1973. The Description of Road Surface Roughness, *J. Sound and Vibration*, **31**, 175-183.
- Erzi, A.I.**, 1998. Cadde ve Ray Taşıtları Titreşimleri Ders Notları.
- Gillespie, T.D.**, 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics, pp. 125-189 Society of Automotive Engineers, Warrendale.
- Göktan, A.G.**, 1992. Geometrik Yol Düzgünsüzlükleri, *Mühendis ve Makina*, **392**, 30-40.
- Heath, A.N.**, 1989. Modelling and Simulation of Road Roughnes, *Vehicle Sys. Dyn.*, **18**, 241-245.
- Liu, C. and Herman, R.**, 1998. Road Profiles, Vehicle Dynamics, and Human Judgement of Serviceability of Roads: Spectral Frequency Domain Analysis, *J. Transp. Engrg.*, ASCE, **124**, 106-111.
- Marcondes, J., Burges, G.J., Harichandran, R. and Snyder, M.B.**, 1991. Spectral Analysis of Highway Pavement Roughness, *J. Transp. Engrg.*, ASCE, **117**, 540-549.
- Miles, J.W. and Thomson, W.T.**, 1976. Statistical Concepts in Vibration, in *Shock & Vibration Handbook*, Eds. Harris, C.M. and Crede, C.E., McGraw-Hill, Inc., New York.
- Newland, D.E.**, 1975. An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis, Longman, London.
- Parkhilovski, I.G.**, 1968. Investigations of the Probability Characteristics of the Surfaces of Distributed Type of Roads, *Avtomobil'naya Promyshlennost'*, **8**, 18-22.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P.**, 1992. Numerical Recipes in FORTRAN The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, New York.

Rouillard, V., Sek, M.A. and Perry, T., 1996. Analysis and Simulation of Road Profiles, *J. Transp. Engrg.*, ASCE, **122**, 241-245.

Wong, J.Y., 1993. Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, Inc., New York.



EKLER

- Ek A** Bilgisayar Programları (Matlab tarafından çalıştırılmak üzere yazılmış m-file dosyaları)
- Ek B** Örnek Yol Analizlerine Ait Şekiller
- Ek C** İncelenen Yolların İstatistiksel Değerlerini Gösteren Tablolar



EK A.1

Mevcut yol datalarını analiz etmek için kullanılan m-file.

```
clear
curdir=cd; cd c:\;
[file,pthn]=uigetfile('*.erd','Bir ERD dosyası seçin');
filename=[pthn,file]
file=fopen(filename,'rt');
F2='END';
for k=1:inf
    F=fgetl(file);
    fler=isequal(F,F2);
    if k==2
        B1=(F(8:13));
        nsamp=str2num(B1);
        B2=(F(36:43));
        step=str2num(B2);
    end
    if fler==1
        break
    end
end
TXT=['Nokta sayısı ',B1]; disp(TXT)
TXT=['Noktalar arası mesafe ',B2]; disp(TXT)
for k=1:nsamp
    A=fgetl(file);
    B1=(A(1:10));
    C1=str2num(B1);
    E1(k,1)=C1;
    x(k)=k*step;
end
fclose(file);
ME=mean(E1);
E1=(E1-ME)/1000;
sigma=std(E1);
E=E1/sigma;
xmax=max(x);
plot(x,E); xlim([0 xmax])
xlabel('Mesafe [m]'); ylabel('Yol profili yüksekliği/\sigma [-]')
waitforbuttonpress
FT=fft(E1);
a=2*pi/xmax;
for k=1:ceil(nsamp/2)-1
    x2(k)=k*a;
end
magnFT=abs(FT);
spek=(2*magnFT.^2)/a;
figure; loglog(x2,spek(2:ceil(nsamp/2)))
xlabel('Frekans [1/m]'); ylabel('Güç yoğunluğu spektrumu [m^3]')
waitforbuttonpress
PA=angle(FT);
xPA=x2(1:ceil(nsamp/2)-1);
figure;plot(xPA,PA(2:ceil(nsamp/2)),'.')
```

```

xlabel('Frekans [1/m]'); ylabel('Faz açısı [rad]')
waitforbuttonpress
if sum(PA(2:ceil(nsamp/2)))<0
    for k=1:ceil(nsamp/2)-1
        if PA(k+1)>=pi/2
            PAnew(k)=PA(k+1)-2*pi;
        else
            PAnew(k)=PA(k+1);
        end
    end
else
    for k=1:ceil(nsamp/2)-1
        if PA(k+1)<=-pi/2
            PAnew(k)=PA(k+1)+2*pi;
        else
            PAnew(k)=PA(k+1);
        end
    end
end
katsay=polyfit(xPA,PAnew,1);
for k=1:ceil(nsamp/2)-1
    PAint(k)=katsay(1)*xPA(k)+katsay(2);
end
hold on; plot(xPA,PAint,'k','LineWidth',2)
A1=num2str(katsay(1)); A2=num2str(katsay(2));
TXT=['f(x) = ',A1,'x + ',A2];
text(max(xPA),min(PA),TXT,'HorizontalAlignment','right')
hold off; waitforbuttonpress
ex=-3.6:0.2:3.6;
nl=hist(E(:,1),ex);
s=0; kat=0.2*nsamp*sigma(1);
for k=-3.6:0.2:3.6
    s=s+1;
    prob(s)=exp(-0.5*k^2)/(sigma(1)*sqrt(2*pi));
    prob(s)=prob(s)*kat;
end
skew=0; kurt=0;
for k=1:nsamp
    skew=skew+(E(k,1)^3);
    kurt=kurt+(E(k,1)^4);
end
skewn=num2str(skew/nsamp);
kurto=num2str(kurt/nsamp-3);
figure; bar(ex,nl); xlim([-3.5 3.5]);
xlabel('Yol profili yüksekliği/\sigma'); ylabel('Nokta sayısı')
hold on; plot(ex,prob,':k')
AS=num2str(sigma(1));
TXT=['\sigma = ',AS]; text(-3.45,max(nl)-3,TXT)
TXT=['skewness = ',skewn]; text(-3.45,max(nl)-9,TXT)
TXT=['kurtosis = ',kurto]; text(-3.45,max(nl)-15,TXT)
hold off
cd (curdir)

```

EK A.2

Braun'un önerdiği yol düzgünlüklerinin güç yoğunluğu spektrumunu elde etmek için kullanılan fonksiyon dosyası. Ek A.3 te verilmiş m-file dosyasının çalıştırılabilmesi için bu dosyanın, Matlab programına tanımlanmış bir dizin içerisine 'braun.m' adıyla kaydedilmesi gerekmektedir.

```
function y=braun(x)
%      Braun'un formülünü kullanarak yol düzgünlüğünün güç
%      yoğunluğu spektrumunu hesaplar.
phiom0=5; omega0=0.01; w=2;
y=phiom0*(x/omega0).^(-w);
```



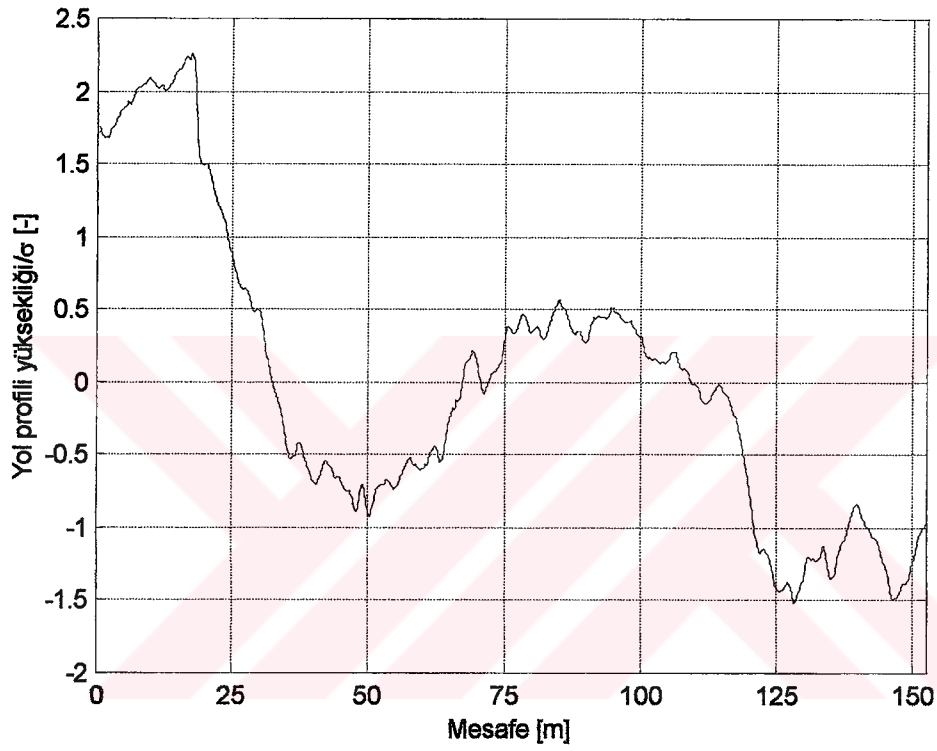
EK A.3

Yolu yeniden yaratmak için kullanılan m-file.

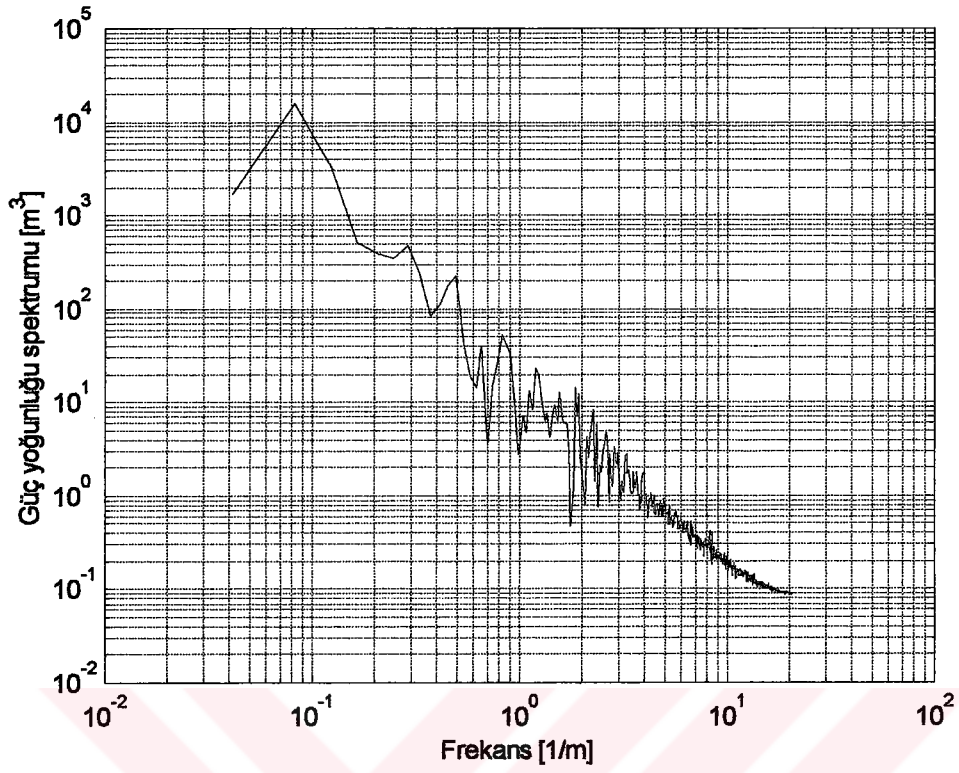
```
% Yolun yeniden yaratılması.
clear
frsamp=500; delx=15
frekmin=2*pi/(2*frsamp*delx);
PA=rand(frsamp,1).*(2*pi)-pi;
for k=1:frsamp+1
    omega(k)=(k-0.5)*frekmin;
    spek(k)=braun(omega(k));
end
figure
loglog(omega,spek)
xlabel('Frekans [1/m]'); ylabel('Güç yoğunluğu spektrumu [m^3]')
waitforbuttonpress
for k=1:frsamp
    amp(k)=sqrt(quad('braun',omega(k),omega(k+1))/2);
    ortomeg(k)=(omega(k)+omega(k+1))/2;
end
figure
plot(ortomeg,PA,'.')
xlabel('Frekans 2\pik/L'); ylabel('Faz açısı [rad]')
waitforbuttonpress
for k=1:2*frsamp
    h(k)=0; x(k)=k*delx;
    for j=1:frsamp
        h(k)=h(k)+amp(j)*cos(ortomeg(j)*x(k)-PA(j));
    end
    h(k)=h(k)/frsamp;
end
figure
plot(x(1:2*frsamp),h)
xlabel('x[cm]'); ylabel('h[cm]')
waitforbuttonpress
stpx=(max(h)-min(h))/35;
ex=min(h):stpx:max(h);
figure
hist(h,ex)
xlabel('h[cm]'); ylabel('Nokta sayısı')
```

EK B

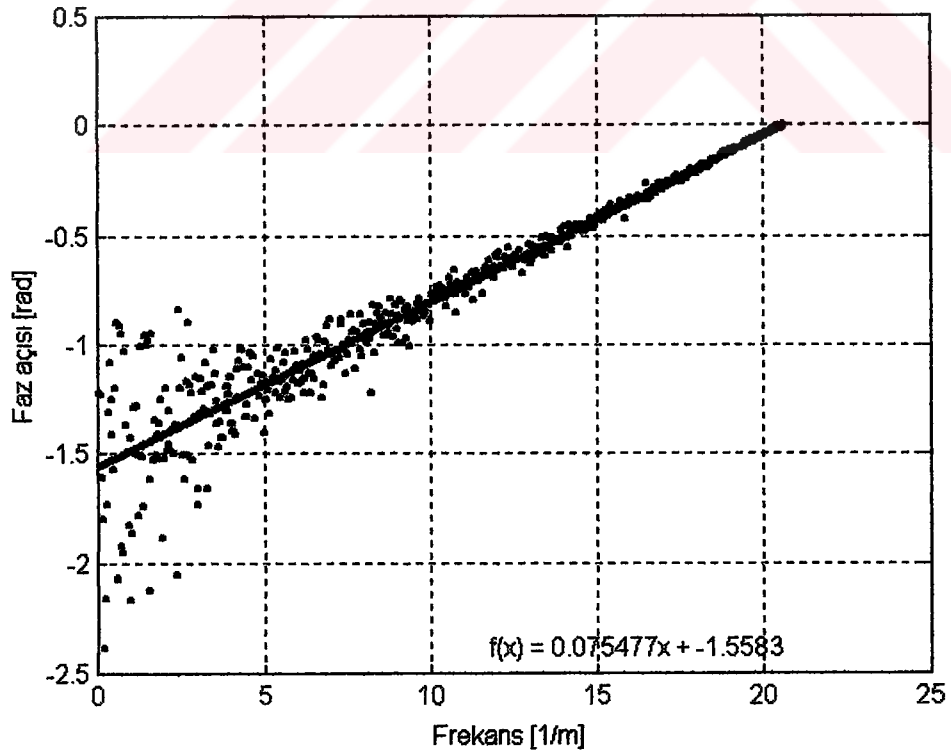
İncelenen örnek yolların sonuçlarını gösteren grafikler.



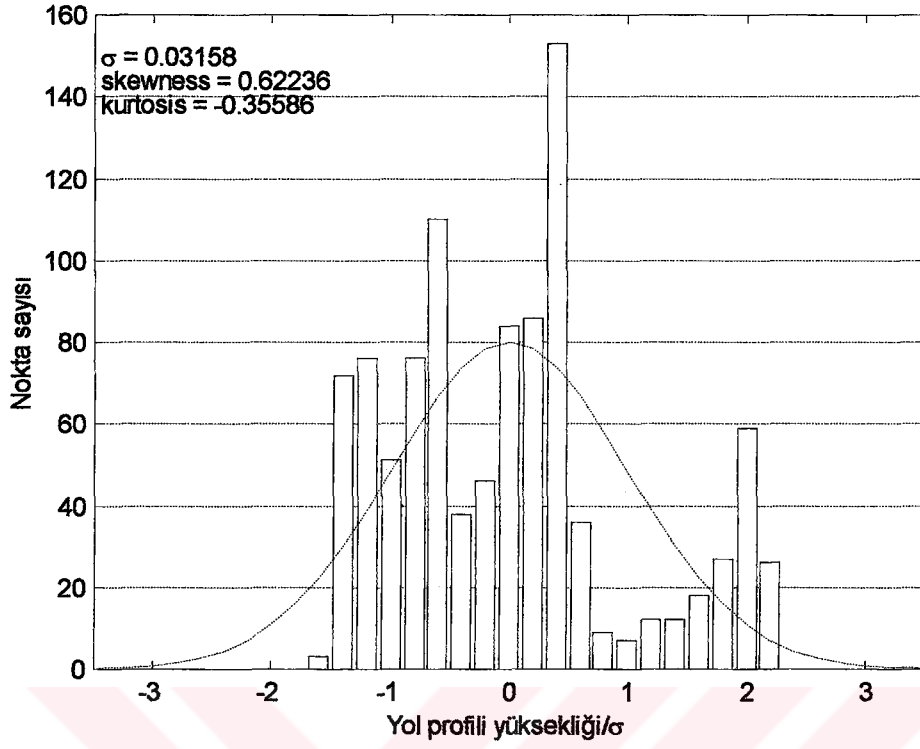
Şekil B.1 11/1400/94061901 için yol profilinin standart sapmaya oranı.



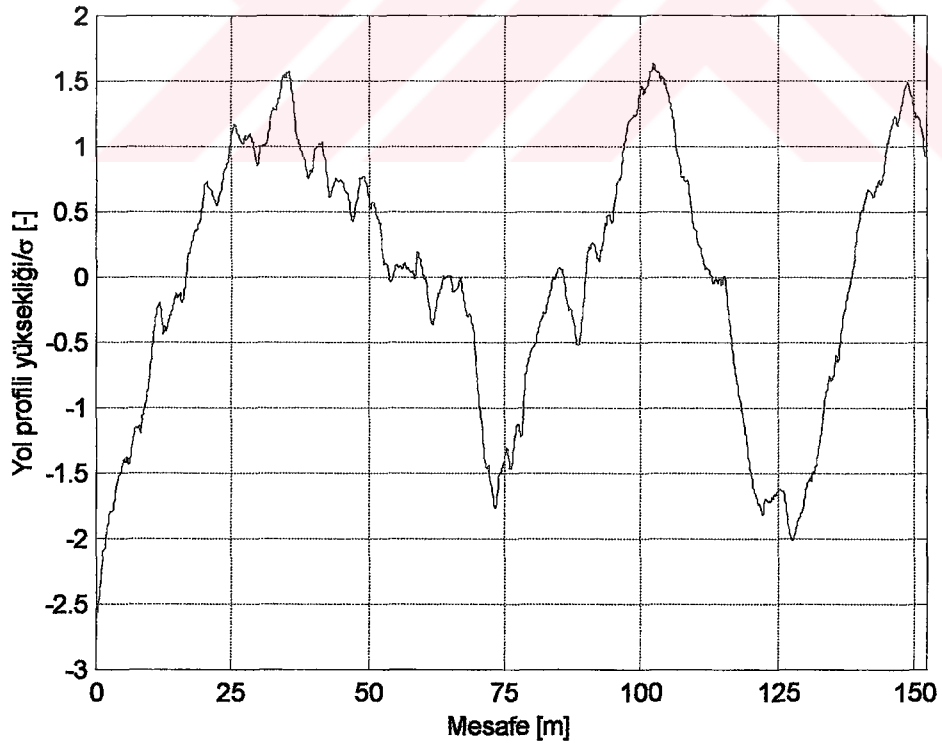
Şekil B.2 11/1400/94061901 için güç yoğunluğu spektrumu.



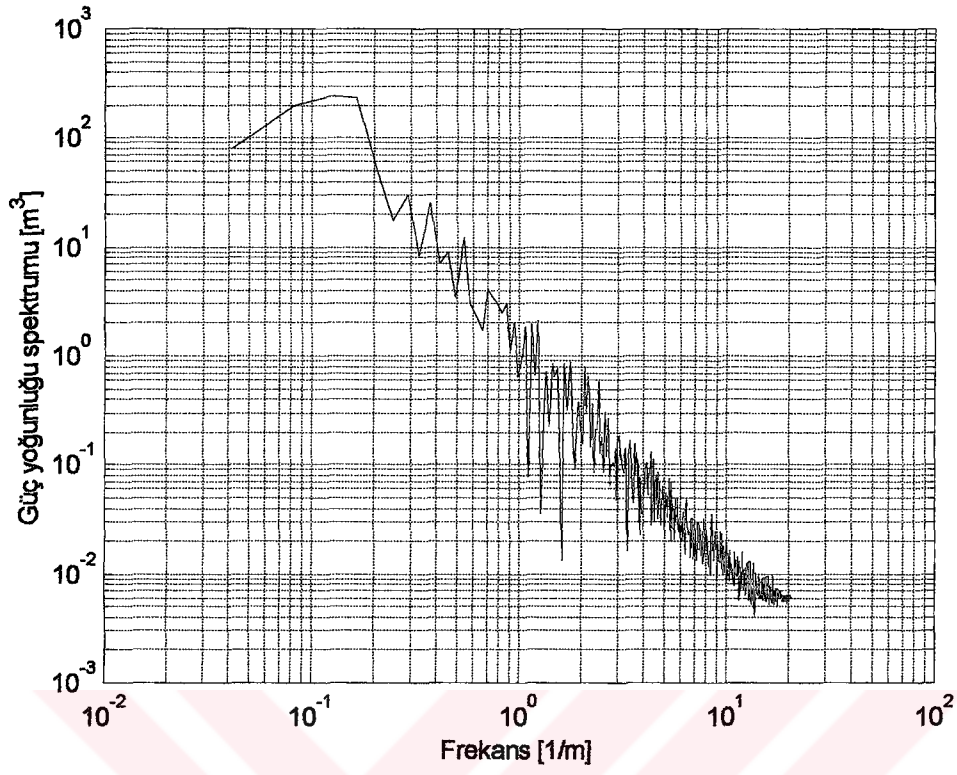
Şekil B.3 11/1400/94061901 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.



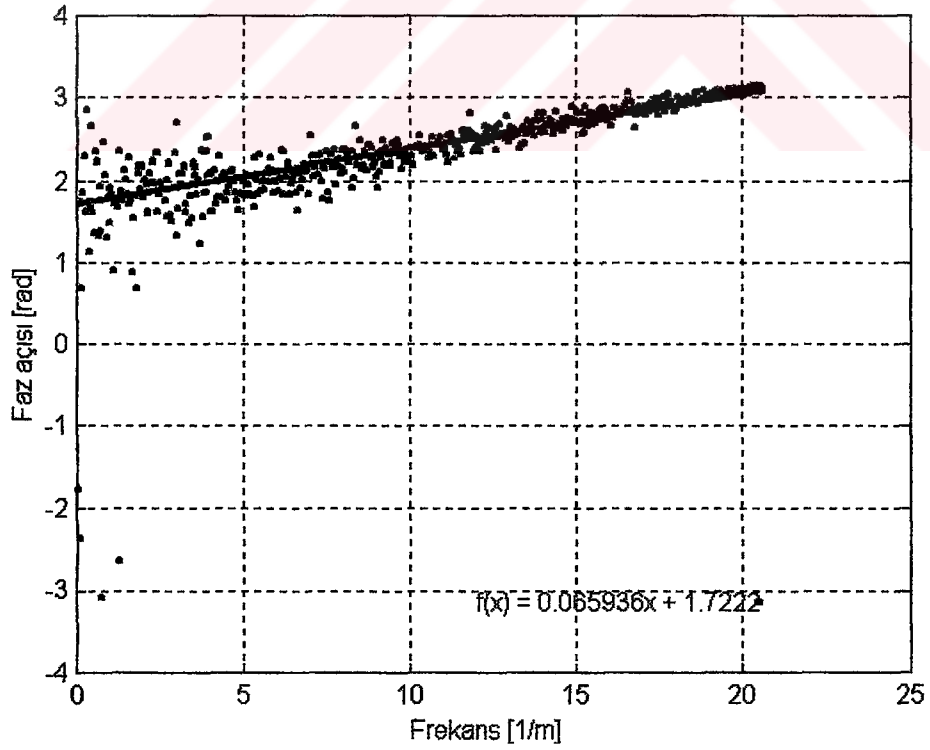
Şekil B.4 11/1400/94061901 için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı.



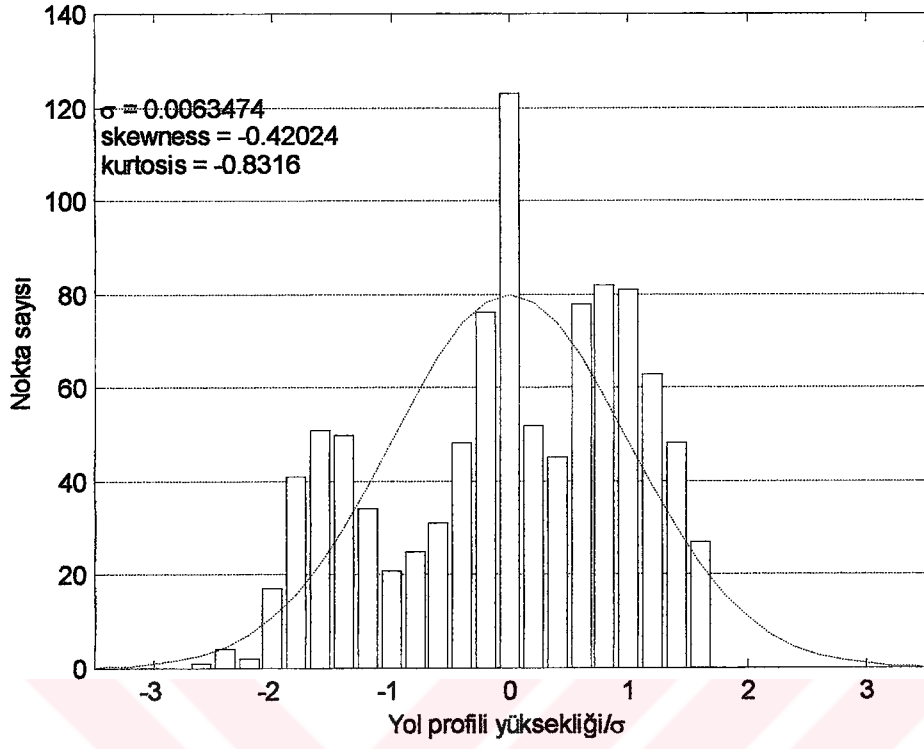
Şekil B.5 20/1010/90041401 için yol profilinin standart sapmaya oranı.



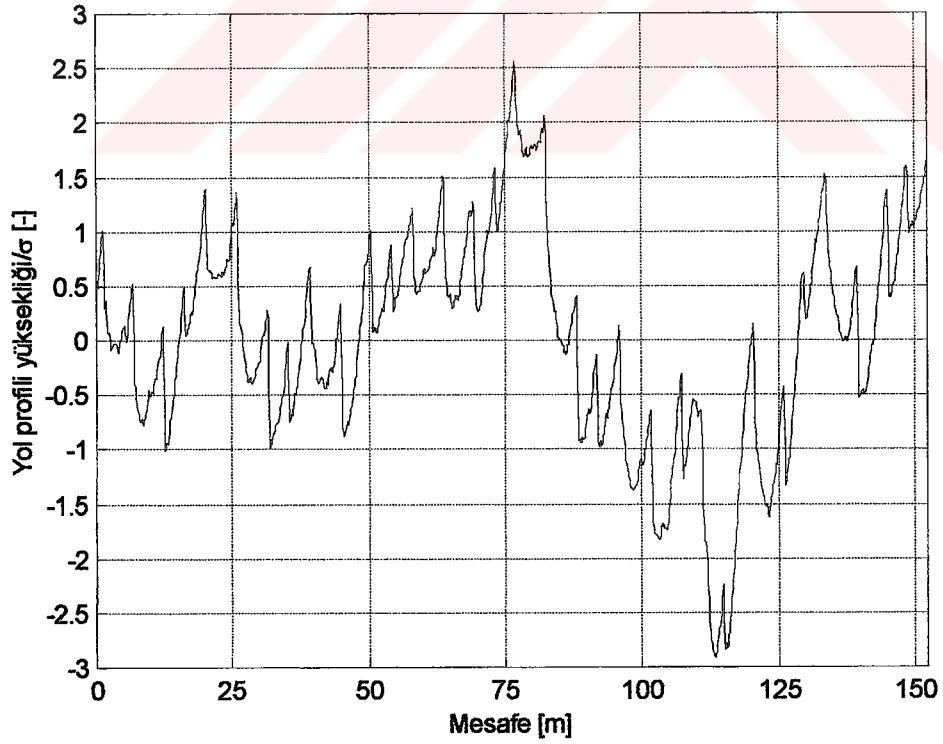
Şekil B.6 20/1010/90041401 için güç yoğunluğu spektrumu.



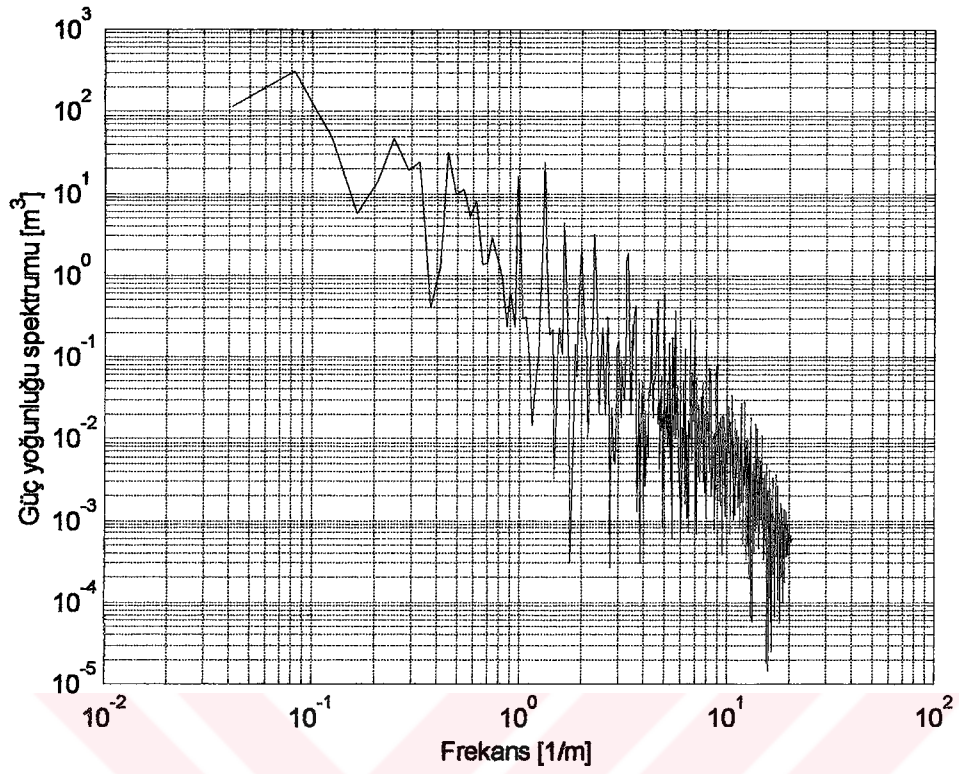
Şekil B.7 20/1010/90041401 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.



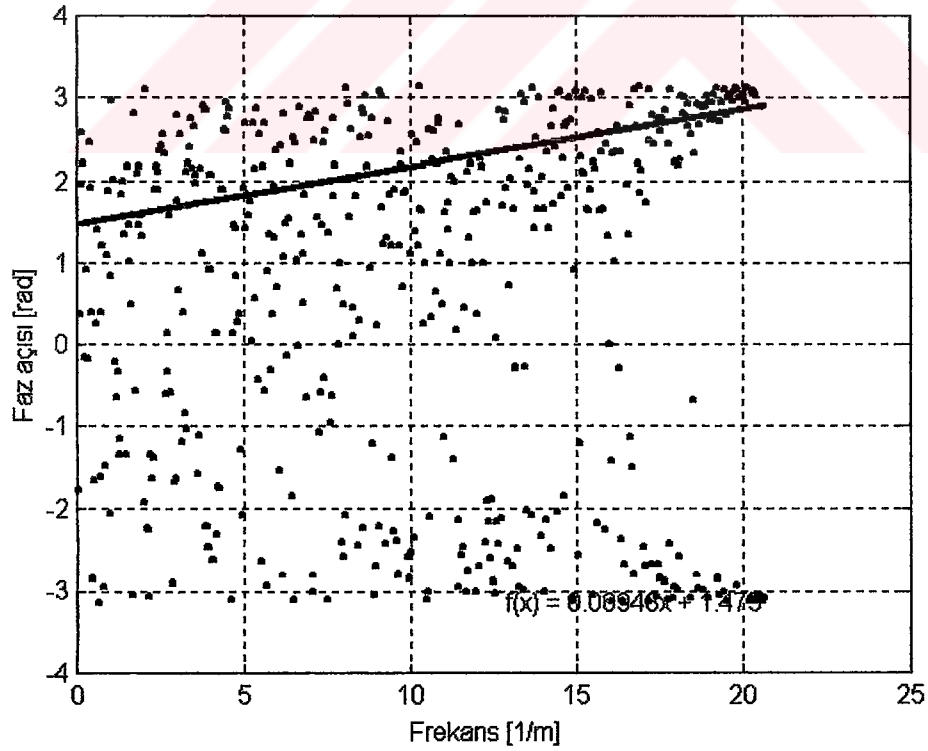
Şekil B.8 20/1010/90041401 için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı.



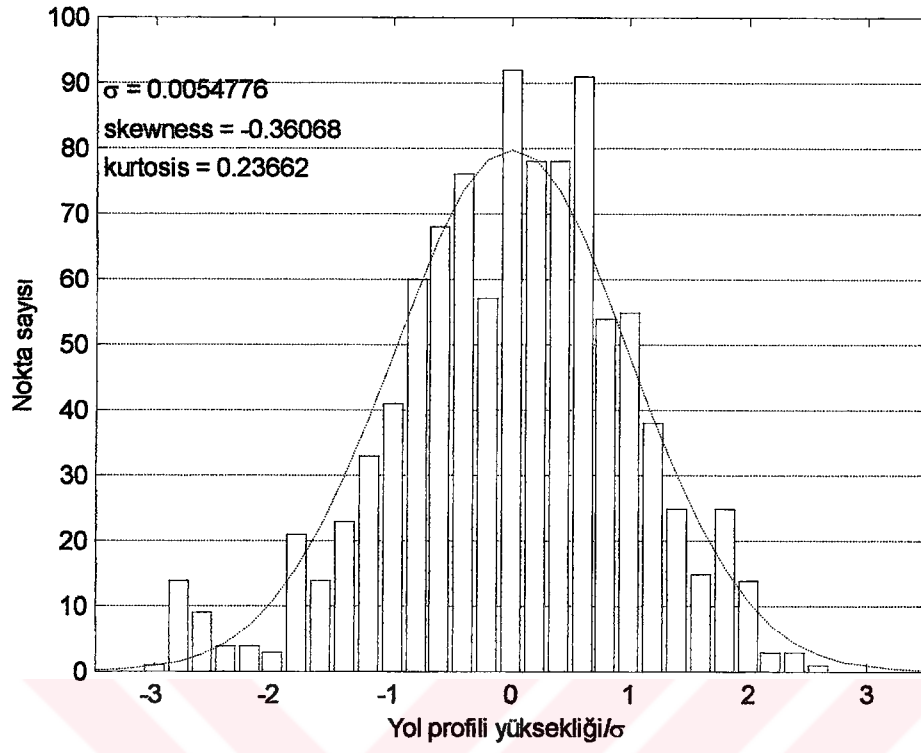
Şekil B.9 55/3014/90060601 için yol profilinin standart sapmaya oranı.



Şekil B.10 55/3014/90060601 için güç yoğunluğu spektrumu.



Şekil B.11 55/3014/90060601 için yolu meydana getiren harmoniklerin faz açıları.



Şekil B.12 55/3014/90060601 için yol düzgünsüzlüklerinin dağılımı.

EK C

İncelenen tüm yolların standart sapma (σ), çarpıklık faktörü (skewness) ve yığılma faktörü (kurtosis) değerlerini gösteren tablolar.



Tablo C.1 Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 1).

Eyalet	Yol	σ [m]	Çarpıklık	Yığılma
01	1001	0,0044438	-0,093475	-0,7801
02	1001	0,0083030	0,431300	-0,9700
04	1001	0,0099283	0,486660	-0,5789
05	2042	0,0123327	0,660280	-0,4949
06	1253	0,0098880	0,115460	-0,0362
08	1029	0,0066364	0,571470	-0,1956
09	1803	0,0088375	0,034695	-0,7196
10	1201	0,0056024	-0,066571	0,8003
11	1400	0,0315802	0,622360	-0,3559
12	1030	0,0035061	0,539030	0,0450
13	1001	0,0064832	0,673080	0,1026
16	1001	0,0074237	-0,392590	-0,8265
17	1002	0,0083255	-0,218640	0,1645
18	1028	0,0032664	-0,212230	-0,8618
19	1044	0,0050273	-0,406110	-0,5562
20	1005	0,0085899	0,257680	-0,5362
21	1010	0,0097839	0,412930	-0,6098
22	3056	0,0022585	0,348200	-0,1401
23	1001	0,0052483	0,069884	-0,4162
24	1632	0,0049171	1,383300	2,3696
25	1002	0,0063164	0,042415	-0,3390
26	1001	0,0022221	-0,351350	0,1293
27	1016	0,0059691	0,255270	0,1375
28	1001	0,0046977	0,990980	0,0002
29	1002	0,0089863	-1,037000	0,0684
30	1001	0,0056507	-0,093655	-1,2519
31	1030	0,0034961	-0,105040	-0,9258
32	1020	0,0049436	-0,065923	-0,8557
33	1001	0,0035464	-0,142090	-0,6970
34	1003	0,0093564	-0,211280	-1,1474
35	1002	0,0124618	-0,091617	-1,0299
36	1008	0,0065251	-0,337780	-0,2091
37	1006	0,0073397	-0,137010	-0,9839
38	2001	0,0050877	0,491860	0,7988
39	3013	0,0054722	-0,426940	-0,1193
40	1015	0,0062383	-0,031203	-0,3237
41	2002	0,0034014	0,811470	0,9224
42	1597	0,0135354	-0,892420	0,1655
44	7401	0,0036474	-0,121700	-0,5970
45	1008	0,0046660	-0,338910	-0,7570
46	3009	0,0066625	-0,308390	-0,5164
47	1023	0,0087059	-0,019556	-1,1688
48(1)	0001	0,0089313	0,435570	-0,3488
48(2)	2108	0,0042486	0,022756	-0,0911
48(3)	4142	0,0079308	-0,808160	0,7500
49	1001	0,0068937	-0,011785	-0,2010
50	1002	0,0141756	0,907770	1,1057
51	1002	0,0096696	-0,374830	-0,4748
53	1002	0,0102168	0,687740	-0,6815
54	1640	0,0153533	0,387000	0,5812
55	3009	0,0051531	0,704690	1,6342
56	1007	0,0101095	-0,246370	-1,3269

Tablo C.2 Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 2).

Eyalet	Yol	σ [m]	Çarpıklık	Yığılma
01	1011	0,0048012	0,795160	-0,2483
02	1002	0,0118648	-0,153180	-0,4434
04	1002	0,0079441	0,150540	-0,2375
05	3011	0,0031862	-0,239220	-0,8321
06	2002	0,0093870	-0,331290	-1,0005
08	1047	0,0074523	1,217100	1,0995
09	4008	0,0045928	-0,424630	-0,2151
10	1450	0,0116467	-0,395870	-0,7049
11	-	-	-	-
12	1060	0,0049275	0,631480	0,1387
13	1004	0,0044046	0,219680	-0,4783
16	1005	0,0056751	-0,517080	-0,7004
17	1003	0,0049761	0,517640	0,2634
18	1037	0,0077025	0,091210	-0,5221
19	3006	0,0091072	0,836390	1,2655
20	1006	0,0079708	0,461620	-0,2884
21	1014	0,0190073	0,338910	-0,3810
22	4001	0,0052673	-0,091972	-0,3899
23	1009	0,0051772	0,261220	-0,8475
24	1634	0,0042757	0,557660	0,3080
25	1003	0,0188809	0,272600	-0,7820
26	1004	0,0138239	-0,002958	-0,6636
27	1018	0,0065358	0,018757	-0,9605
28	1016	0,0096408	-0,542930	-0,3905
29	1005	0,0034333	-0,001404	-0,4956
30	6004	0,0067476	-0,035745	-1,1038
31	3018	0,0027958	-0,690250	0,0949
32	1021	0,0066039	-0,681840	0,0733
33	-	-	-	-
34	1011	0,0055489	0,378510	-0,2197
35	1003	0,0114289	0,142520	-0,1915
36	1011	0,0094611	1,021300	0,6674
37	1024	0,0048687	-0,653220	-0,1050
38	3005	0,0024883	-0,315310	-0,4293
39	3801	0,0063947	0,466430	0,4661
40	1017	0,0085145	-0,200240	-0,0530
41	5005	0,0021001	-0,096336	-0,0670
42	1598	0,0034080	-0,062083	-0,7337
44	-	-	-	-
45	1011	0,0044797	0,496700	0,5930
46	3010	0,0056595	-0,315480	-0,4930
47	1028	0,0104936	0,032571	-0,3293
48(1)	1039	0,0042511	0,375600	0,9906
48(2)	2133	0,0043185	-0,054158	-0,8456
48(3)	4143	0,0052761	0,340700	-0,1972
49	1004	0,0144776	-0,404170	-0,8677
50	1004	0,0069257	1,490300	2,0425
51	1023	0,0069745	-0,263030	0,2330
53	1005	0,0038752	1,027400	1,2255
54	4003	0,0083272	0,424000	-1,2488
55	3010	0,0097658	0,921440	0,2699
56	2015	0,0060423	0,825710	1,3008

Tablo C.3 Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 3).

Eyalet	Yol	σ [m]	Çarpıklık	Yığılma
01	1019	0,0044280	-0,131360	-0,5549
02	1004	0,0149719	-0,174960	-0,2854
04	1003	0,0108941	-0,105260	-0,1891
05	3048	0,0115918	-0,317890	-0,6724
06	2004	0,0072318	-0,267170	-0,4663
08	1053	0,0054850	0,143670	-0,5189
09	4020	0,0078077	0,114730	3,0000
10	4002	0,0173628	-0,602390	-0,8764
11	-	-	-	-
12	1370	0,0134075	0,049725	-1,4978
13	1005	0,0040548	-0,340020	-1,0795
16	1007	0,0055639	0,526700	-0,7921
17	4074	0,0059309	0,240070	0,5572
18	2008	0,0038162	-0,138300	-0,4731
19	3009	0,0118366	-0,337980	-0,6714
20	1009	0,0120335	0,127740	-0,4545
21	1034	0,0041542	-0,467800	-0,2148
22	-	-	-	-
23	1012	0,0058903	0,143880	-0,8590
24	2401	0,0049268	0,589940	-0,1339
25	1004	0,0045915	0,081316	-1,0142
26	1010	0,0037876	0,057381	0,3841
27	1019	0,0089792	-0,644660	0,4868
28	1802	0,0040194	0,047493	-0,6287
29	1008	0,0125321	-0,856230	-0,3114
30	7066	0,0079434	0,363700	-1,0431
31	3023	0,0040523	-0,185830	-0,0180
32	1030	0,0140842	-0,244130	-1,2257
33	-	-	-	-
34	1031	0,0039457	-2,016800	4,4485
35	1005	0,0059436	-0,496330	-0,9626
36	1643	0,0053636	-0,261520	-0,8117
37	1028	0,0054397	0,650650	0,1043
38	3006	0,0078941	0,161920	-1,3772
39	4018	0,0030932	-0,311620	0,5339
40	3018	0,0055094	-0,192770	-1,0972
41	5006	0,0036597	-0,093808	-0,0782
42	1599	0,0120728	0,796990	0,4823
44	-	-	-	-
45	1024	0,0187063	-0,079269	-0,8577
46	3012	0,0040766	0,398970	0,1582
47	1029	0,0082175	-0,757720	-0,3235
48(1)	1046	0,0071061	0,083151	-1,1420
48(2)	2172	0,0125924	0,397750	-0,4923
48(3)	4146	0,0064319	-0,439150	-0,2423
49	1005	0,0058629	-0,100940	-0,5088
50	1681	0,0097215	0,671660	-0,1037
51	1417	0,0075002	-1,019500	0,7189
53	1006	0,0080376	0,178500	-0,8501
54	4004	0,0155583	0,342620	-0,6623
55	3012	0,0067320	0,543320	0,0954
56	2017	0,0063083	-0,207070	-0,2652

Tablo C.4 Yol düzgünsüzlüklerine ait istatistiksel değerler (set 4).

Eyalet	Yol	σ [m]	Çarpıklık	Yığılma
01	1021	0,0077422	0,490970	-0,3591
02	1008	0,0120051	-0,134940	-1,0629
04	1006	0,0053607	-0,412340	-0,4940
05	3058	0,0037406	0,127230	-1,1730
06	2038	0,0037974	0,130230	-0,3986
08	1057	0,0059643	-0,540350	0,2130
09	5001	0,0032935	-0,049630	0,0199
10	5004	0,0095473	-0,490800	-0,2480
11	-	-	-	-
12	3804	0,0042229	0,190410	0,1815
13	1031	0,0029473	-0,051627	-0,9700
16	1009	0,0043912	-0,115240	-0,1771
17	4082	0,0027633	0,309110	-0,3400
18	2009	0,0050001	0,160220	-1,0209
19	3028	0,0051039	0,198200	-0,5612
20	1010	0,0063474	-0,420240	-0,8316
21	3016	0,0061065	-0,110900	-0,6547
22	-	-	-	-
23	1026	0,0083126	0,123070	-1,1860
24	2805	0,0064229	-0,068896	-0,8262
25	-	-	-	-
26	1012	0,0035841	0,382720	-0,9236
27	1023	0,0074267	0,627200	0,1217
28	2807	0,0064585	-0,439000	-0,7174
29	1010	0,0042099	0,574040	-0,6319
30	7075	0,0084618	0,037116	-1,2550
31	3024	0,0026833	0,057079	-0,8699
32	2027	0,0031507	-0,264280	-0,4640
33	-	-	-	-
34	1033	0,0049708	-0,710380	0,1924
35	1022	0,0089433	0,266570	-1,1022
36	1644	0,0058884	-0,285090	-1,0286
37	1030	0,0040459	-0,440950	-0,5472
38	5002	0,0046394	0,003475	-1,0753
39	4031	0,0078857	0,416080	-0,7056
40	4086	0,0060720	0,121920	-1,1038
41	5008	0,0025072	-0,263320	-0,2994
42	1605	0,0062282	-0,353590	-0,3435
44	-	-	-	-
45	1025	0,0165726	0,439160	-0,5886
46	3013	0,0041400	0,153860	-0,8010
47	2001	0,0043793	-1,162900	2,0888
48(1)	1047	0,0069596	-0,645610	-0,4601
48(2)	2176	0,0100431	0,121730	-1,0574
48(3)	4152	0,0074939	0,359300	-0,1982
49	1006	0,0090488	-0,370460	0,3686
50	1682	0,0054799	0,364190	0,3794
51	1419	0,0079285	-0,188060	-0,8814
53	1007	0,0059251	-0,161090	-0,8040
54	5007	0,0037780	0,000138	-0,7131
55	3014	0,0054776	-0,360680	0,2366
56	2018	0,0202752	0,543910	-0,6425

ÖZGEÇMİŞ

Uğur Hasdedeoğlu, 1976 yılında İstanbul'da doğdu. 1982 yılında TED Kayseri Koleji'nde başladığı ilköğrenimini 1987 yılında İstanbul Özel Kültür İlkokulu'nda tamamlayarak aynı okulun ortaokul ve lise kısımlarına devam etti. 1994 yılında İstanbul Özel Kültür Lisesi'nden mezun olan Uğur Hasdedeoğlu, aynı yıl İ.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 1998 yılında buradan mezun olarak İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Programı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

