TEKERLEK-YOL ETKİLEŞİMİNE DAYALI PVDF SENSÖRLERİYLE ULUSLARARASI DÜZGÜNSÜZLÜK İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet RİZELİOĞLU

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKERLEK-YOL ETKİLEŞİMİNE DAYALI PVDF SENSÖRLERİYLE ULUSLARARASI DÜZGÜNSÜZLÜK İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet RİZELİOĞLU

0000-0002-5331-9336

Prof. Dr. Turan ARSLAN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

TEKERLEK-YOL ETKİLEŞİMİNE DAYALI PVDF SENSÖRLERİYLE ULUSLARARASI DÜZGÜNSÜZLÜK İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet RİZELİOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Turan ARSLAN

Bu tez çalışmasında, yol kaplamasının konfor göstergelerinden biri olan Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI) ilk kez tekerlek-yol etkileşimine dayalı yeni bir yöntem ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için test aracı olarak bir dağ bisikleti seçilmiştir. Bu bisikletin ön tekerleğine 6 adet poliviniliden florür (PVDF) tabanlı piezoelektrik sensörler yerleştirilmiştir. PVDF sensörlerinin verileri ve GPS ile elde edilen konumlar eş zamanlı olarak test aracının üzerinde tasarlanan veri toplama sisteminde (VTS) kaydedilmiştir. Bursa Uludağ Üniversitesi yerleşkesinde bulunan 660 m uzunluğundaki bölünmüş yolun her iki yöndeki (gidiş-geliş toplam 1320m) düzgünsüzlük bilgisi, referans IRI verisi olarak değerlendirilen lazer profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Yeni oluşturulan test aracı ile aynı yol farklı zamanlarda 13 kez test edilmiştir. Elde edilen sensör verileri ile test yolunun IRI değerini tahmin etmek için Destek Vektör Regresyon (DVR) algoritması kullanılmıştır. Bu sensör verilerinden 1320 m uzunluğundaki test yolunun her 10m, 30m, 60m ve 100m'lik bölümlerinde 32 özellik veri seti çıkarılmış ve bu özellik veri setleri DVR algoritmasında girdi verisi olarak kullanılmıştır. Hazırlanan öznitelik alt kümesinin %85'i eğitim verisi ve %15'i de test verisi olacak şekilde algoritmanın performansı test edilmiştir. Aynı zamanda VTS içinde bulunan 3 eksenli bir ivmeölçer ile çeyrek araç modeli gibi geleneksel yöntemler kulanılarak test yolunun IRI değerleri aynı yol üzerinde tahmin edilmeye çalışılmıştır. Böylece geleneksel yöntem ile yeni yöntemin performansı karşılaştırımıştır. Her iki yöntemin performansı, ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karesel hata (MSE), ortalama karesel hatanın karekökü (RMSE) metrikleri ile değerlendirilmiştir. Buna göre, geleneksel yöntem için test yolunun 10m, 30m, 60m ve 100m'lik bölümlerinde en iyi MAPE sonuçları 23.79, 17.58, 17.13 ve 12.65 olarak bulunmuştur. Aynı yol aralıklarında yeni yönteme göre ölçülen MAPE değerleri ise sırasıyla 18.08, 13.64, 10.73 ve 5.34 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin yolların düzgünsülüğünü belirlemede tatmin edici sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Böylece bu çalışma, karayollarının IRI değerlerinin belirlenmesinde geleneksel yöntem ve araçlara nispeten karayolu yetkililerine daha ucuz, kolay ve alternatif bir yöntem sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI), PVDF sensörler, Destek Vektör Regresyonu, Tekerlek-yol etkileşimi, Çeyrek Araç Modeli
2022, xi + 117 sayfa.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX WITH PVDF SENSORS BASED ON TIRE-ROAD INTERACTION

Mehmet RİZELİOĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Turan ARSLAN

In this thesis, the International Roughness Index (IRI), one of the comfort indicators of road pavement, is tried to be determined for the first time with a new method based on tire-road interaction. For this, a mountain bike is chosen as the test vehicle. Six polyvinylidene fluoride (PVDF) based piezoelectric sensors are mounted in the front wheel of this bike. The data of the PVDF sensors and the positions obtained by GPS are simultaneously recorded in the data acquisition system (VTS) designed on the test vehicle. The roughness information of the 660 m long dual carriageway in Bursa Uludağ University campus in both directions (1320 m) is measured with a laser profilometer device as the reference international roughness index (IRI) data. With the newly constructed test tool, the same road is tested 13 times at different times. Support Vector Regression (DVR) algorithm is used to estimate the IRI value of the test road with the obtained sensor data. With these sensor data, 32 feature data sets are extracted from each 10m, 30m, 60m, and 100m sections of the 1320 m long test road, and these feature datasets are used as input data in the DVR algorithm.The algorithm's performance is tested, with the prepared feature subset %85 as training data and 15% as test data. At the same time, the IRI values of the test road are tried to be estimated on the same road by using traditional methods such as a quarter vehicle model with a 3-axis accelerometer in the VTS. Thus, the performance of the traditional method and the new method are compared. The performance of both methods is evaluated with mean absolute percentile error (MAPE), mean absolute error (MAE), mean square error (MSE), and root mean square error (RMSE) metrics. According to this, For the traditional method, the best MAPE results are found to be 23.79, 17.58, 17.13, and 12.65 at the 10m, 30m, 60m, and 100m sections of the test road. The MAPE values measured according to the new method at the same road intervals are found to be 18.08, 13.64, 10.73, and 5.34, respectively. These results revealed that the proposed method gives satisfactory results in determining the roughness of the roads. Thus, this study offers a cheaper, easier, and alternative method to road authorities in determining the IRI values of highways compared to traditional methods and tools.

Keywords: International Roughness Index (IRI), PVDF sensors, Support Vector Regression, Tire-Road Interaction, Quarter Car Model
2022, xi + 117 pages.

TEŞEKKÜR

Cenab-ı Hak'kın inayet ve tevfikiyle hitamına muvafak olduğum bu tez çalışmam boyunca bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen herkese teşekkürlerimi arz ederim. Özellikle danışman hocam Prof. Dr. Turan Arslan'a

Prof. Dr. Halit ÖZEN'in tavsiyesiyle araştırmaya başladığım tez konuma hem yeni bir yöntem sunması hem de bu çalışmanın gelişmesine ve olgunlaşmasına öncülük etmesi ve ayrıca bilgi ve tecrübesinden çokça istifade ettiğim ümit aşılayıcı hocam Prof. Dr. Murat YAZICI'ya

Çalışmanın elektronik aksamının kurulmasında bilgilerinden faydalandığım Elek. Elektronik Mühendisleri Cüneyt Arpacı ve Rasim Kadirhan'a ve yazılım bilgileri konusunda kendi çalışmasıymış gibi bana yardımcı olan Öğr. Gör. Gökhan Manav'a ve ayrıca sinyal işleme konusunda bilgilerinden faydalandığım Dr. Yunus Emre ACAR'a

Bu çalışmanın en önemli aşamalarından biri olan verilerin çözümlenmesi için uygun algoritmanın seçimi ve kullanımında büyük desteklerini gördüğüm Doç. Dr. Enes YİĞİT'e

Tez çalışmam sırasında bana motivasyon katan ve manevi destek veren çalışma arkadaşlarım Dr. Öğretim Üyesi Süleyman ÖZEN, Arş. Gör. Cavit SERHATOĞLU, Dr. M. Ömer Timurağaoğlu, Dr. R. Emre ÇAKMAK, Dr. Quy Thue NGUYEN, elektrik teknikerimiz Eyüp TARHAN'a ve İnş. Yük. Müh. Barış ESEN'e

Hayatımın her döneminde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem, babam ve dualarında bana yer ayıran tüm aile fertlerime,

Son olarak, sabrı ve metaneti ile bana destek olan, tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan eşim Rümeysa'ya ve çocuklarım Hasan Tahir ve Muhammed Zahid'e ve dualarını esirgemeyen eşimin tüm ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Mehmet RİZELİOĞLU

12/10/2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET ……i
ABSTRACT……ii
TEŞEKKÜR……iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ……vi
ŞEKİLLER DİZİNİ……viii
ÇİZELGELER DİZİNİ……xi
1. GİRİŞ ……1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI……8
2.1. Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI)……8
2.1.1. IRI ölçüm yöntemleri……14
2.2. Sinyal İşleme……15
2.2.1. Fourier dönüşümü……15
2.2.2. Güç spektral yoğunluğu……16
2.2.3. Sinyal filtreleme işlemleri……17
Bant geçiren filtre……17
Hareketli ortalama filtresi……18
Eğim düzeltme filtresi……19
2.3. Kaynak Araştırması……19
3. MATERYAL ve YÖNTEM……28
3.1. TY-PVDF Sistemi……28
3.1.1. TY-PVDF'nin çalışma prensibi……29
3.1.2. Veri toplama sistemi (VTS)……29
3.1.3. Tek serbest dereceli sistem (TSD)……32
3.1.4. PVDF sensörler……33
3.1.5. Test aracının kurulumu ve sensörlerin tekerleğe montelenmesi……36
3.2. GPS ve İvmeölçer Sensörlerinden IRI Hesabı……40
3.2.1. Ölçüm mesafesi hesabı……40
3.2.2. Düşey yer değiştirmenin belirlenmesi……41
3.3. Saha Çalışması……43
3.4. Veri Setinin Hazırlanması……48
3.5. Geleneksel Yöntem ile IRI Hesabı……52
3.5.1. Tekerleğin rijitlik ve sönüm katsayı değerlerinin hesabı……52
3.5.2. Yol profilinin hesap edilmesi……56
3.6. TY-PVDF……57
3.6.1. Özellik çıkarımı……58
3.6.2. Performans ölçütleri……60
3.6.3. Destek Vektor Regresyon (DVR)……61
4. BULGULAR ve TARTIŞMA……68
4.1. Geleneksel yöntem ile IRI tahmini……68
4.2. Geleneksel Yönteme Göre Tamin Edilen IRI Değerleri ile Referans IRI Değerlerinin Karşılaştırılması……76
4.3. TY-PVDF ile IRI Hesabı……81
4.3.1. DVR algoritması ile IRI tahmini……83
4.4. Geleneksel Yöntem ile TY-PVDF Yönteminin Karşılaştırılması……99
5. SONUÇ ……101

KAYNAKLAR 105
ÖZGEÇMİŞ.....117

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Bileşke ivme değeri
a_x	x ekseni yönündeki düşey ivmelenme
a_y	y ekseni yönündeki düşey ivmelenme
a_z	z ekseni yönündeki düşey ivmelenme
c_s	Süspansiyonun sönümleme katsayısı
c_t	Tekerleğin sönümleme katsayısı
C	Kontrol parametresi
C_1	Lazer profilometre aracının yay sabiti
C_2	Lazer profilometre aracının tekerlek sönümleme katsayısı
d	İki nokta arası mesafe
d_{ij}	Piezoelektrik Gerilme Sabiti
dV_i	Malzemenin hacmi
D_i	Dielektrik yerdeğiştirme
h_i	z aksı yönündeki yerdeğiştirme
h_p	Profil Yüksekliği
h_{ps}	Düzeltilmiş profil yüksekliği
g	Yerçekim ivmesi
f	Frekans
k_s	Yay rijitliği
k_t	Tekerlek rijitliği
I	Akım
K_1	Lazer profilometre aracının yay sabiti
K_2	Lazer profilometre aracının tekerlek rijitliği
L	Aracın kat ettiği mesafe
L_B	Hareketli ortalama temel uzunluğu
m	Tekerleğin temas yüzeyine uyguladığı yük
max	İki argüman arasındaki en yüksek değer
m_s	Araç gövdesinin kütlesi (yaylı kütle)
m_u	Tekerlek ve süspansiyonun kütlesi (yaysız kütle)
M_1	Lazer profilometre aracının kütlesi
M_2	Lazer profilometre aracının aks-tekerlek kütlesi
n	Örneklemin yeri
n_{int}	En yakın tamsayı
N	Örneklem sayısı
P	Pyroelektrik katsayısı
q	Sensör üzerindeki yük
r	Dünyanın yarıçapı
R	Direnç
t	zaman
u_0	İlk genlik değeri
u_{son}	Son genlik değeri
w	Normal vektör
$x[k]$	Frekans alanındaki sinyalin gösterimi
$x[n]$	Zaman alanındaki sinyalin örneklenmiş formu
x_s	Yaylı kütlenin düşey hareketi
x_u	Yaysız kütlenin düşey hareketi
$\dot{x}_s$	Yaylı kütlenin hızı

$\dot{x}_u$	Yaysız kütlenin hızı
$\ddot{x}_s$	Yaylı kütlenin ivmesi
$\ddot{x}_u$	Yaysız kütlenin ivmesi
V_t	t zamanındaki hız
y	Yol profili
Y	Elastisite modülü
z	Yer değiştirme
$\dot{z}_i$	Hız
$\ddot{z}_i$	İvme
σj	Dielektrik yer değiştirmenin mekanik gerilme tepkisi
σ	Standart sapma
ε	Hata parametresi
$\varepsilon/\varepsilon_0$	Dielektrik sabiti
λ_i	Boylam
φ	Enlem
ξ	Aykırı değerler
ψ	Sönümleme oranı
β	Düzeltme faktörü

Kısaltmalar	**Açıklama**
IRI	Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi
PVDF	Polivinilidin Florür
VTS	Veri toplama sistemi
DVR	Destek Vektör Regresyon
YSA	Yapay Sinir Ağları
MAE	Ortalama Mutlak Hata
MSE	Ortalama Karesel Hata
RMSE	Ortalama Karesel Hatanın Karekökü
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata
PCI	Kaplama Koşul İndeksi
MTD	Ortalama Doku Derinliği
PASER	Kaplama Yüzey Değerlendirme Sistemi
RCI	Sürüş Konfor İndeksi
RN	Sürüş Sayısı
TSD	Tek Serbest Dereceli
PSI	Üstyapı Yüzey İndeksi
GMDH	Grup Veri İşleme Yöntemi
UVKP	Uzun Vadeli Kaplama Performansı
BKÇ	Belirli Kaplama Çalışmaları
GPÇ	Genel Performans Çalışması
UNBÇS	UygulanabilirNöral Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi
RBF	Açısal Temel Fonksiyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Çeşitli yol deformasyon örnekleri: (a) çukur, (b) çatlak, (c) yama (Pavement Interactive) ……...	1
Şekil 1.2.	Bir yolun ömrü boyunca farklı bozulma seviyelerinde bakım maliyetleri (Purdue University, 2012) ……	2
Şekil 1.3.	Yol düzgünsüzlük örneği ……...	4
Şekil 1.4.	Yol düzgünsüzlüğü tipik gösterimi ……	4
Şekil 2.1.	(a) Yol profili örneklem noktaları, (b) tekerlek temas yüzeyi ……	8
Şekil 2.2.	Kaplama yüzey tipleri (Hall ve Smith, 2009) …….	9
Şekil 2.3.	Kaplamalı bir yol üzerinde IRI ölçek tanımı [ASTM E1926-08] (Sayers, 1986) …….	10
Şekil 2.4.	Boyuna yol profili örneği ……...	10
Şekil 2.5.	Çeyrek Araç Modeli (sönümlü kütle-yay modeli) ……	12
Şekil 2.6.	Bazı profilometre cihazları: (a) Walking profilometre, (b) Dipstick profilometre, (c) Lazer profilometre ……..	14
Şekil 2.7.	IRI tespitinde sinyal verileri üzerinde uygulanan işlemler …….	15
Şekil 2.8.	Bant geçiren filtrenin temsili bir gösterimi ……	18
Şekil 3.1.	Test sisteminin bileşenleri ve bağlantı şeması ……...	31
Şekil 3.2.	VTS ve test aracı üzerindeki konumu ……	32
Şekil 3.3.	Sönümsüz kütle-yay modeli ……...	33
Şekil 3.4.	Yeni test düzeneğinde kullanılan PVDF sensör …….	34
Şekil 3.5.	Çalışmada kullanılan PVDF sensörlerin boyutları …….	36
Şekil 3.6.	Bisikletin veri alabilir duruma getirilmesi …….....	37
Şekil 3.7.	PVDF sensörler ve onların tekerlek üzerindeki konumları ……	38
Şekil 3.8.	Bisiklet tekerleğinin ortasına konumlandırılan slip ring ……	39
Şekil 3.9.	GPS ve ivmeölçer ile IRI hesabı ……	40
Şekil 3.10.	Bisiklet tekerleğinin maruz kaldığı salınım hareketleri …….....	42
Şekil 3.11.	Bursa Uludağ Üniversitesi çalışma bölgesi …….....	44
Şekil 3.12.	Çalışma yapılan sahasının görüntüsü …….....	44
Şekil 3.13.	(a) Referans lazer profilometre aracı, (b) laser profilometre ve ivmeölçer, (c) kamera, (d) kontrol ünitesi …….....	45
Şekil 3.14.	Test yolunun boyuna profili: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti ……	47
Şekil 3.15.	Test yolunun lazer profilometre ile ölçülen IRI değerleri: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti …….	48
Şekil 3.16.	Test yolunun ölçülen kısmı ……	49
Şekil 3.17.	Bisiklet test aracı ile test yolu üzerinden ölçğm alınması …….....	50
Şekil 3.18.	IRI'nın geleneksel yöntem ve TY-PVDF ile tahmin edilmesi için akış şeması …….....	51
Şekil 3.19.	Bisiklet ön tekerleğine gelen yükün hesabı ……	53
Şekil 3.20.	Tekerleğin rijitlik ölçümü ……...	54
Şekil 3.21.	Tekerleğin serbest titreşim altında sönüm oranı: (a) tekerleğe darbe anı, (b) sönümleme …….	55

Şekil 3.22. Diferansiyel denkelmin çözümü için Simulink'te oluşturulan blok diyagramı …… 57
Şekil 3.23. Tekerleğin bir tam turu ……... 58
Şekil 3.24. SVR'nin basit bir gösterimi …… 63
Şekil 4.1. Bursa istikametinde ölçülen ivmelenme verileri …… 69
Şekil 4.2. Üniversite istikametinde ölçülen ivmelenme verileri ……. 69
Şekil 4.3. İvmelenme değerlerinin Güç Spektral Yoğunlukları: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti ……... 70
Şekil 4.4. Bant geçiren filtre …….. 72
Şekil 4.5. Ham ve filtrelenmiş sinyal verileri: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti ……..... 73
Şekil 4.6. Filtrelenmiş ivmelenme verilerine göre her iki yönde belirlenen yol profili: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti ……... 75
Şekil 4.7. Yol profilinden elde edilen IRI değerleri: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti …… 76
Şekil 4.8. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 10m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri ……. 77
Şekil 4.9. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 30m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri ……. 77
Şekil 4.10. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 60m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri ……. 78
Şekil 4.11. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 100m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri ……. 78
Şekil 4.12. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 10m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri …… 79
Şekil 4.13. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 30m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri …… 80
Şekil 4.14. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 60m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri …… 80
Şekil 4.15. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 100m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri …… 81
Şekil 4.16. PVDF sensörlerinden elde edilen verilerin görünümü: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti ……... 83
Şekil 4.17. 10m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları …….. 85
Şekil 4.18. 30m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları …….. 85
Şekil 4.19. 60m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları …….. 86
Şekil 4.20. 100m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları …… 87
Şekil 4.21. 10m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8 90
Şekil 4.22. 30m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8 92
Şekil 4.23. 60m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8 94

Şekil 4.24. 100m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8 96
Şekil 4.25. Geleneksel yöntem ve TY-PVDF'in performans ölçütlerine göre karşılaştırılması …….. 100

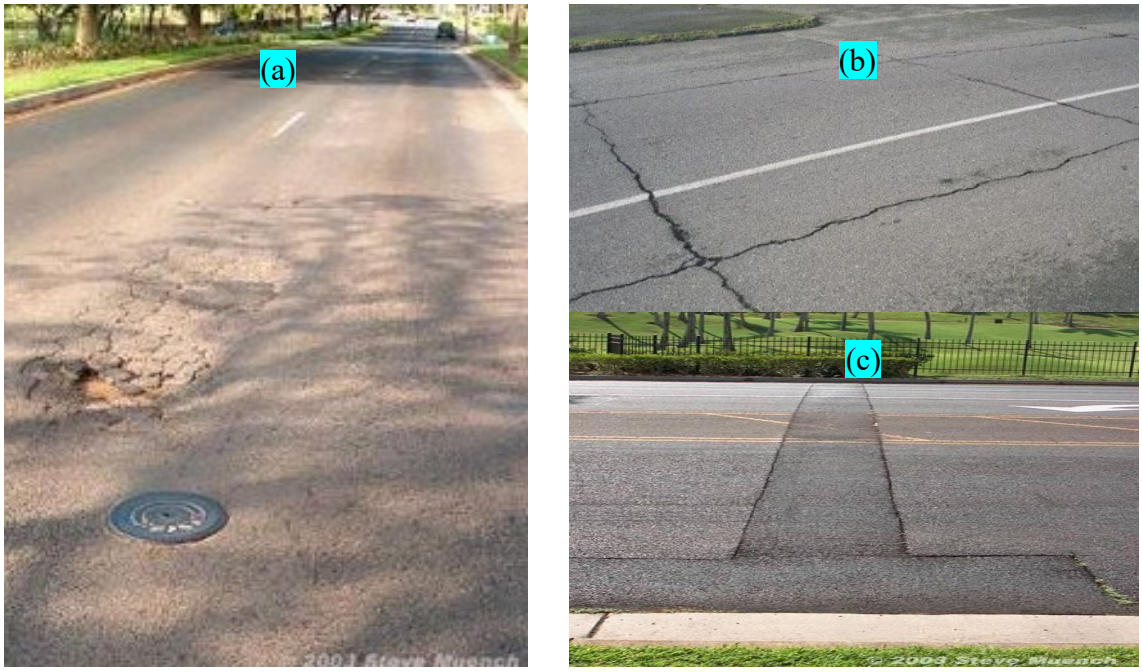
ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Makine öğrenme yöntemlerine dayalı IRI tahminleri …….	25
Çizelge 3.1.	PVDF sensörün bükülme miktarına göre potansiyel olarak verebildiği yük ve voltaj çıktıları …….	34
Çizelge 3.2.	PVDF piezoelektrik sensörünün bazı fiziksel ve elektriksel karakteristikleri ……	35
Çizelge 3.3.	Çeyrek araç modelinin fiziksel sabitleri ……..	45
Çizelge 3.4.	Tekerleğin rijitlik hesabında kullanılan değerler …….	53
Çizelge 3.5.	Tekerleğin serbest titreşim sonucu bulunan sönüm değerleri ……..	56
Çizelge 3.6.	Test aracında kullanılan fiziksel sabitler ……..	57
Çizelge 3.7.	Özellik setlerinin sahip oldukları grup sayıları ……	60
Çizelge 4.1.	Geleneksel yöntem ile tahmin edilen IRI değerlerinin referans IRI değerlerine göre belirtilen aralıklara göre performans değerleri …..	81
Çizelge 4.2.	MAPE değerlerinin modelin hassasiyeti üzerindeki etkileri ……	96
Çizelge 4.3.	Test yolunun farklı kesit aralıklarında farklı özellik kombinasyonlarına göre değerlendirme ölçütleri ……	97
Çizelge 4.4.	Geleneksel yöntem ile TY-PVDF'nin performans ölçütlerine göre karşılaştırılması ……	100

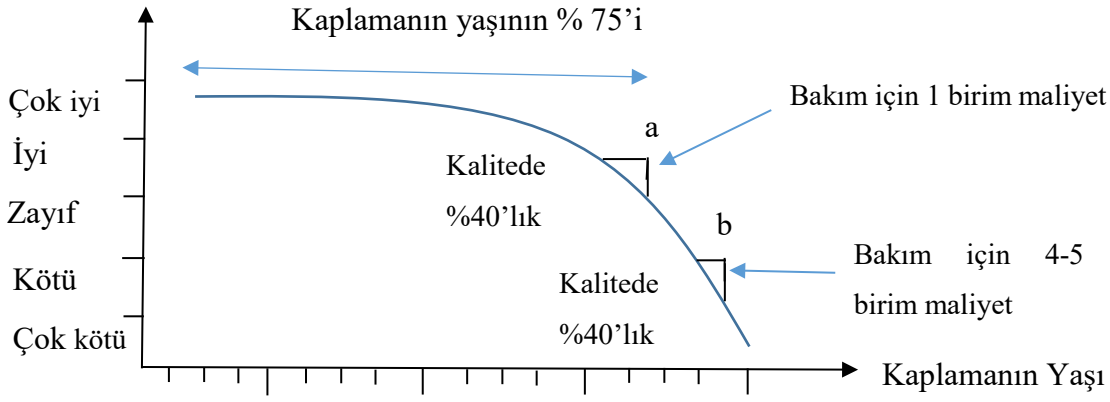
1. GİRİŞ

Sürücü ve yaya kaynaklı kazaların haricinde meydana gelen kazaların çoğunun yol durumundan (kaplamadaki deformasyonlar, yol geometrisi) kaynaklaması karayolu üstyapı kalitesinin önemini göstermektedir (Selimoğlu, 2014). Karayolu üstyapısı dinamik trafik yüklerinden ve iklim değişikliklerinden kaynaklı gerilmelere maruz kalmakta ve bu durum yol üstyapısında bozulmalara (çatlaklar, kalıcı deformasyonlar, suya bağlı bozulmalar) neden olmaktadır. Şekil 1.1'de çeşitli yol üstyapı bozulmaları gösterilmiştir (a: çukur, b: çatlak, c: yama). Kaplama üzerindeki bozulmalar; yolun hizmet kabiliyetini (Ghasemlou vd., 2016), araçların hızlarını ve trafik akışını olumsuz etkilerken, trafik kazaları üzerinde de önemli etkiye sahiptirler (Akgüngör ve Doğan 2009; Prentkovskis vd., 2010; Dell'Acqua ve Russo 2011). Dolayısıyla bu bozulmalar, araç kontrolü ve sürüş konforu gibi sürüş kabiliyetlerini kısıtlar ve trafik kaza olasılıklarını, araçların işletim ve bakım maliyetlerini artırırlar (Akgüngör, Demirel 2008; Ben-Edigbe 2010, 2016; Dell'Acqua ve Russo, 2011).



Şekil 1.1. Çeşitli yol deformasyon örnekleri: (a) çukur, (b) çatlak, (c) yama (Pavement Interactive)

Karayollarının inşasının ardından düzenli olarak bakım çalışmalarının yapılması da karayollarının inşası kadar önemlidir. Eğer yolların uygun bir şekilde bakımı yapılmazsa gelecek yıllarda çok daha maliyetli bakım ve iyileştirme çalışmaları gerekebilir. Bu bakım ve iyileştirme çalışmaları için de en önemli hususun bakım maliyetleri olduğu söylenebilir. Çünkü karayollarının bakımı için ayrılan bütçe göz ardı edilmemesi gereken bir hususdur (Zhao, 2015). Eğer doğru zamanda yol bakım faaliyetleri yapılırsa ileriki zamanlarda oluşabilecek daha kötü bozulmaların önüne geçilebilir ve böylece bakım maliyetinden tasarruf sağlanabilir. Şekil 1.2'de karayolların ömürleri boyunca farklı kaplama bozulma seviyeleri için bakım maliyetlerindeki değişim gösterilmiştir. Buna göre; yol kaplama yaşının %75'lik diliminde (a ile belirtilen kesim) kaplama kalitesinde %40 oranında bir azalma görülmekte iken kaplama kalitesindeki diğer %40'lık azalma kaplama yaşının bundan sonraki kısmı için görülmektedir (b ile belirtilen kesim). Bununla beraber kaplama yaşının son dönemlerinde yapılan kaplama bakım maliyetleri kaplama yaşının %75'lik dilmine göre 4-5 kat artmaktadır.



Şekil 1.2. Bir yolun ömrü boyunca farklı bozulma seviyelerinde bakım maliyetleri (Purdue University, 2012).

Bu şekilden de anlaşılacağı üzere ulaşım kurumlarının, yolların bakım ve rehabilitasyon faaliyetlerini uygun bir şekilde planlamaları gerekmektedir ve bunun için yol üstyapı kalitesi yolların ömrü boyunca takip edilmelidir. Bu faaliyetler, otoyollar için bütçe planlaması ve tahsisinin yanı sıra sürücüler için daha iyi ve daha güvenli bir sürüş deneyimine de katkı yapacaktır. Dolayısıyla sürüş kalitesi üzerinde önemli etkiye sahip olan yolların kaplama kalitelerinin değrlendirilmesi gerekmektedir.

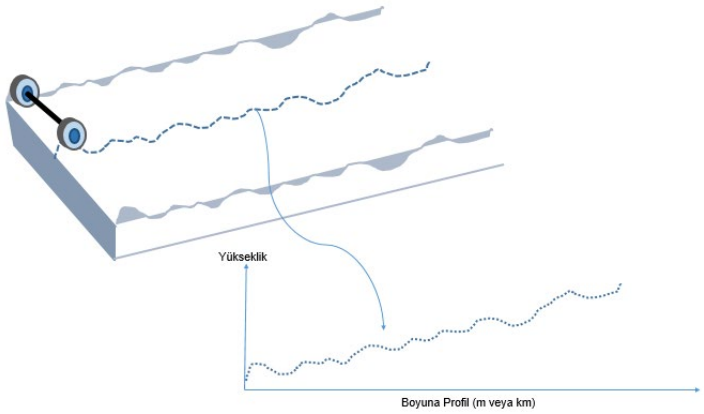
Bu doğrultuda; kaplama koşul indeksi (Pavement Condition Index, PCI), uluslararası düzgünsüzlük indeksi (International Roughness Index, IRI), ortalama doku derinliği (Mean Texture Depth, MTD), kaplama yüzey değerlendirme sistemi (Pavement Surface Evaluation and Rating, PASER) gibi yol üstyapı sürüş kalitesini belirleyen birçok değerlendirme ölçütleri vardır. Bu değerlendirme ölçütleri arasında IRI en önemli olanlarından birisidir (Smith ve Ram, 2016). IRI yol ağlarının bakım ve iyileştirme ihtiyaçlarının belirlenmesi açısından önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Kaplama yüzey dokusunda meydana gelen bozulmalar pürüzlülük olarak adlandırılırken, yol boyuna profilindeki deformasyonlar düzgünsüzlük (Şekil 1.3) olarak adlandırılırlar (PIARC 1987, Loprancipe ve Cantisani, 2013). Düzgünsüzlük en genel tanımı ile; düzlemsel bir yüzeyden yol profilinin sapması olarak tanımlanır (ASTM-E 867, 2002). Yol performansının değerlendirilmesinde çok önemli bir unsur olan düzgünsüzlük; güvenlik, konfor, seyahat hızı, araç işletim ve bakım maliyetlerini etkiler (Pooja 2015, Zang vd., 2018). Ayrıca düzgünsüzlük, enerji tüketimini (Ghosh vd., 2015; Akbarian vd., 2015; Louhghalam vd., 2015) ve dolayısıyla sera gazı yayılımını (Gonzales, 2016; Louhghalam vd., 2017) ve lastiklerin aşınmasını (Abulizi vd., 2016) artırır. Özellikle ağır araçların tekrarlı kullanımı üst yapıdaki düzgünsüzlüğü ileri boyuta götürebilir ve üstyapının kullanılmayacak biçime girmesine neden olabilir. Bu nedenle karayolu mühendisleri ve otomotiv mühendisleri açısından düzgünsüzlüğün miktarı önem arz etmektedir (Awashti vd., 2003).

Karayollarının düzgünsüzlüğünün belirlenmesinde birçok yöntem ve araç kullanılmaktadır. 1950-60 yıllarında başlayan düzgünsüzlük belirleme çalışmalarının sonucunda sürüş konforu indeksi (Riding Comfort, Index, RCI), sürüş sayısı (Ride Number, RN) gibi çeşitli değerlendirme ölçütleri ortaya çıkmıştır (Haas vd., 1994). Ancak kullanılan yöntemlerin ve değerlendirme kriterlerinin farklı olması gibi nedenlerden dolayı ortak bir ölçüt sistemi oluşturulamamıştır. Nihayetinde 1982 yılında Brezilya'da yapılan Uluslararası Yol Düzgünsüzlük Deneyi'nde, Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (International Roughness Index-IRI) gündeme getirilmiş ve Dünya Bankası tarafından 1986 yılında evrensel düzgünsüzlük ölçütü olarak kabul edilmiştir (Sayers vd., 1986). IRI kısaca bir aracın yol üstyapısındaki düzgünsüzlüğe vermiş olduğu tepki olarak tanımlanır (Sayers ve Karamihas, 1998). IRI; aracın tüm

kütlesinin her tekerleğine eşit miktarda dağıtıldığı kabulünü esas alan ve çeyrek araç modeli olarak bilinen matematiksel bir model kullanılarak hesaplanır (Shahin, 2002). Şekil 1.4'te, bir yolun boyuna profilinde bulunan düzgünsüzlükler ve bu düzgünsüzlüklerin yol boyunca toplamı gösterilmiştir. Buna göre bu yol düzgünsüzlük toplamlarının aracın kat ettiği mesafeye oranı IRI standart değerlerini verir (Sayers vd., 1986).



Şekil 1.3. Yol düzgünsüzlük örneği (https://m.demotywatory.pl/5021513, Erişim Tarihi: 27.09.2022)



Şekil 1.4. Yol düzgünsüzlüğü tipik gösterimi

Günümüzde IRI'yı belirlemek için çeşitli araçlar kullanılmaktadır. Çubuk ve yağ profilometreleri, profilograflar, araç aksındaki tepkinin ivmelenmesini ölçen tepki tipli araçlar, sabit profiller ve lazer profilometreler bunlardan bazılarıdır (Smith ve Ram, 2016; Perera vd., 2008; Sayers ve Karamihas, 1998). Bu araçların birbirlerine karşı üstün ve zayıf yönleri vardır. Lazer profilometreler gibi bazı cihazların hassasiyet derecesi yüksektir ancak bunların yüksek maliyeti ve bazı yol koşullarında (derin çukur ve çatlak gibi çeşitli yol kusurları, kar kaplı yollar, bitüm kusması gibi yol yüzey kirliliği ve yol üzerinde ışığa etki eden parlamalar) uygulanamaması gibi dezavantajları vardır (Smith ve Ram, 2016). Tepki tipli yol düzgünsüzlük belirleme araçları ise uygun maliyetlidir (Li ve Goldberg, 2018) ancak lazer profilometrelere göre hassasiyet dereceleri düşüktür.

Bu tez çalışmasında; tekerlek-yol etkileşimini dikkate alan, uygun maliyet ve yeterli hassasiyette ve ayrıca her yol tipine uygulanabilecek yeni bir yol düzgünsüzlük ölçüm sistemi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda; IRI'yı belirlemek için tepki tipli ölçüm sistemleri gibi geleneksel yöntemler yerine ilk kez makine öğrenmesi ve tekerlek-yol etkileşimine dayalı yeni bir yöntem sunulmuştur. Akıllı tekerlek için kullanılan tekerleğe monte sensörler ile tekerlek basıncının ölçülmesi ve yol bozukluklarının (çukur, yama vb.) belirlenmesi gibi bazı çalışmalar yapılmıştır. (APOLLO, 2005; Erdogan vd., 2011; Moon vd., 2007; Yi, 2008; Yi ve Liang, 2008). Ancak benzer yöntem ile IRI'yı tahmin etmek için herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Böylece; karayolu düzgünsüzlüğünün araç tekerleğinde meydana getirdiği deformasyonların ölçülerek IRI'nın tahmin edilmesi bu tez çalışmasının ana fikrini oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, bir bisikletin ön tekerleğine PVDF piezoelektrik sensörler monte edilmiş ve bu sensörler ile yol düzgünsüzlüğünün tekerlekte meydana getirdiği deformasyonlar ölçülmüştür. Bu deformasyon ölçüm sonuçlarından onların ayırt edici özellikleri çıkartılmış ve bu özellikler önemli makine öğrenme algoritmalarından biri olan Destek Vektör Regresyon (DVR) algoritması için girdi verisi olarak kullanılmıştır. Daha sonra bu veriler DVR'da modellenmiş ve IRI değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bursa Uludağ Üniversitesi yerleşkesinde bulunan 660 m uzunluğundaki çift şeritli bölünmüş bir yol kesimi (gidiş-geliş toplam 1320m) ölçüm sahası olarak seçilmiştir. Referans ölçüm değerleri ise Bursa Karayolları Müdürlüğünden getirilen Lazer profilometre ölçüm aracı ile belirlenmiştir. Ayrıca, bu tez

çalışmasında geleneksel ölçüm yöntemlerinden biri olan tepki tipli ölçüm sistemi esas alınarak ivmeölçerli bir ölçüm sistemi tasarlanmış ve yukarıda belirtilen ölçüm sahasında bu sistem de test edilmiştir. Böylece her iki sistemin performansı en çok kullanılan değerlendirme ölçütlerinden olan ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE), ortalama karesel hata (Mean Squared Error, MSE), ortalama karesel hatanın karekökü (Root Mean Squared Error, RMSE) ve ortalama mutlak yüzdesel hata (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Bununla beraber; bu çalışma özellikle motorsuz yolların düzgünsüzlüğünün değerlendirilmesine de olanak sağlayacaktır. Çünkü günümüzde hızlı yükselen enerji fiyatları, artan trafik yoğunluğu ve pandeminin de tetiklemesiyle oldukça önem kazanan bireysel ulaşım düşüncesi motorsuz ulaşıma olan ilgiyi daha çok artırmış ve bu durum motorsuz yolların bakım ihtiyaçlarının karşılanmasını da gerekli kılmıştır. Bu yeni geliştirilen ölçüm sisteminin bu ihtiyacı da karşılayacağı söylenebilir. Çünkü hâlihazırdaki düzgünsüzlük ölçüm araçları motorlu yolların kalitelerini değerlendirmek için kullanılmaktadır ve motorsuz yolların kalitelerini değerlendirmek için böyle bir test aracının eksikliği görülmektedir. Böylece bu çalışma, motorsuz ulaşım yollarının kalitelerini değerlendirmek için de alternatif bir ölçüm sistemi sunmaktadır.

Özetle, bu tez çalışmasında; akıllı tekerlek konseptine uygun, düşük maliyetli ve her yol durumunda uygulanabilecek yeni bir yol düzgünsüzlük tespit yöntemi sunulmuştur. Çalışmanın bundan sonraki kısmında, tepki tipli ölçüm yöntemlerinden biri olan "ivmeölçer ile çeyrek araç modeline göre IRI tahmini" için **geleneksel yöntem** ifadesi ve tekerlek-yol etkileşimli PVDF veya tekerlek-yol etkileşimli PVDF ile IRI tahmini ifadeleri için ise **TY-PVDF** kısaltması kullanılacaktır. Bu tez çalışmasının organizasyonu şu şekildedir; ikinci bölümde, IRI ve IRI'yı hesap etmek için kullanılan matematiksel modeller ve ayrıca sinyal filtreleme işlemlerini içinde barındıran kuramsal temeller ve kaynak araştırması verilmiştir. Yeni ölçüm sistemi, bu ölçüm sisteminde kullanılan ekipmanlar, geleneksel yöntem ile IRI hesabının tanıtımı, test yolu ve bu yol üzerinde referans IRI değerlerinin belirlenmesi, DVR algoritması ve özellik çıkarımı çalışmanın üçüncü bölümü olan metodoloji ve yöntem başlığında sunulmuştur. Dördüncü bölümde

ise geleneksel yöntem ve TY-PVDF'in karşılaştırılması yapılarak IRI tahmin bulguları sunulmuş ve son bölümde ise sonuçlar ile tez çalışması nihayete erdirilmiştir.

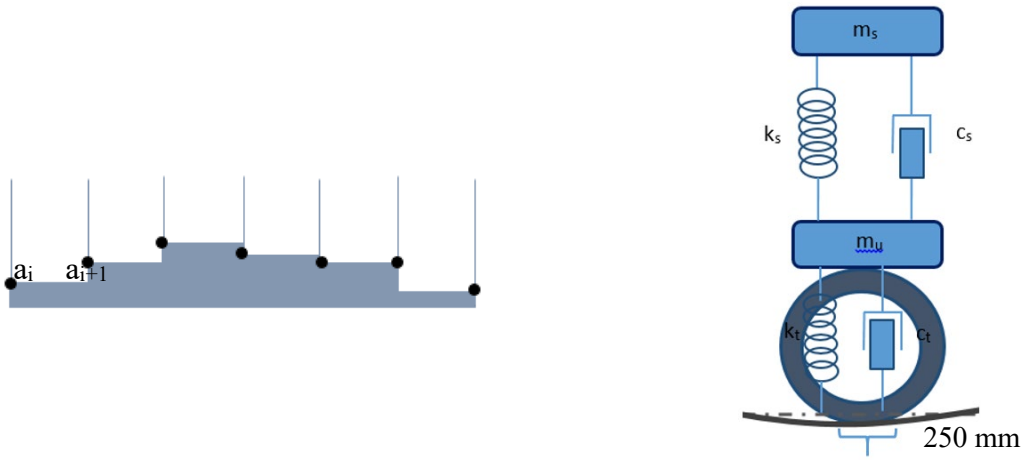
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde IRI'nın tanımı ve onun hesabı için yapılması gereken işlemler ve ayrıca geçmişte yapılan benzer çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.1. Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI)

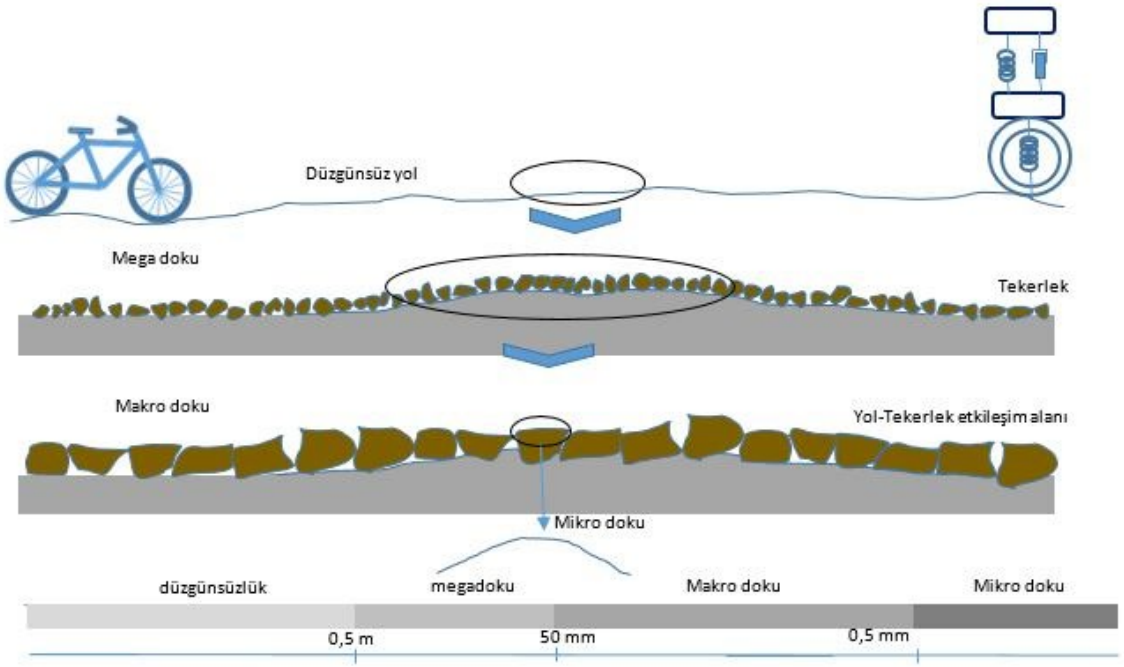
1986 yılında dünya bankası tarafından uluslararası standartları belirlenen IRI, bu tarihten itibaren yolların düzgünsüzlüğünü belirlemek için karayolları birimleri tarafından geniş çapta kabul görerek kullanılmaya başlanmıştır. IRI genel tanımlaması şöyledir;

- Yolun boyuna profili esas alınarak hesaplanır.
- Şekil 2.1 (a)'da gösterildiği gibi yol profilinden alınan örneklem verileri arasındaki eğim sabit olmak zorundadır (a örneklem yerini göstermektedir).
- Şekil 2.1 (b)'de gösterildiği gibi tekerleğin temas yüzeyi uzunluğu 250 mm olarak kabul edilir ve yol profili, bu uzunluk esas alınarak hareketli ortalama filtresi (bölüm 2.2.4'te detaylı anlatılmıştır) ile düzeltilir.
- Düzeltilmiş yol profili çeyrek araç simülasyonu kullanılarak kalibre edilir (bu bölümde detalı olarak anlatılmıştır).
- Aracın süspansiyonunda meydana gelen hareketler toplanır ve profil uzunluğuna bölünerek IRI elde edilir (Sayers, 1995) (bu bölümde detalı olarak anlatılmıştır).



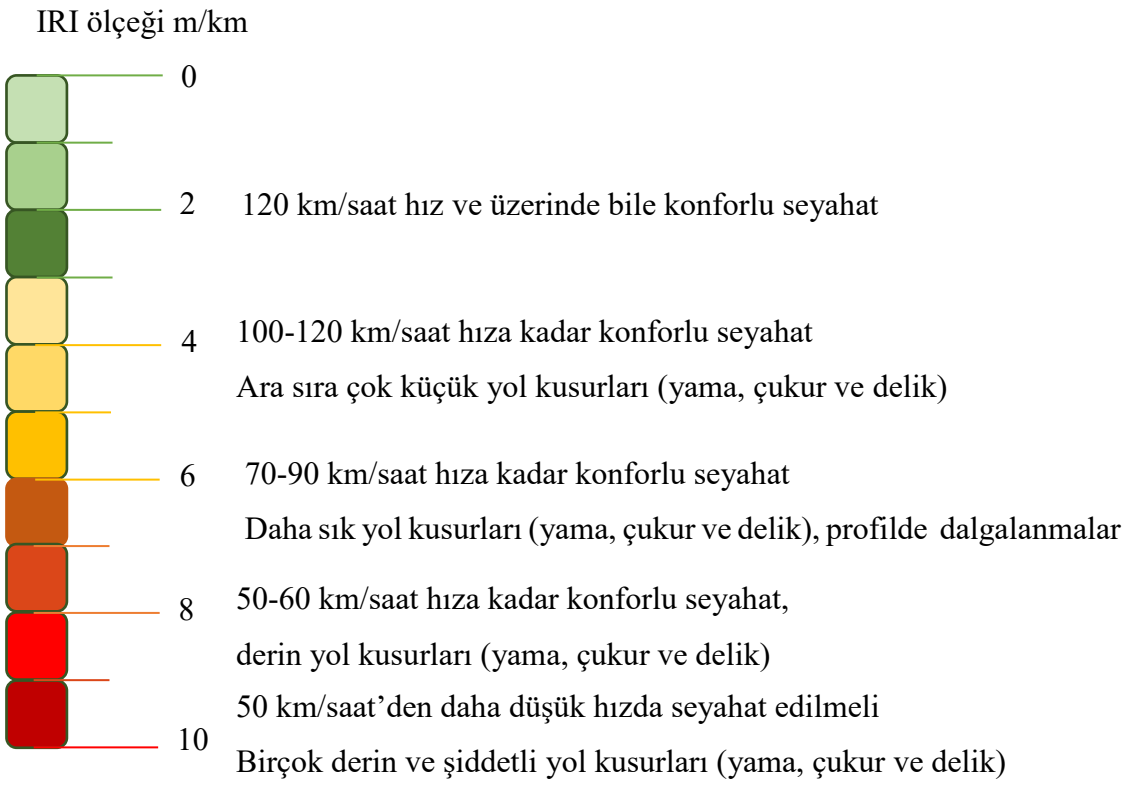
Şekil 2.1. (a) Yol profili örneklem noktaları, (b) tekerlek temas yüzeyi

Ayrıca karayolu kaplamaları sahip oldukları özelliklere göre farklı şekillerde nitelendirilmektedirler. Şekil 2.2'de bir yol kaplamasının farklı yüzey tipleri sahip oldukları profil uzunluklarına göre ayrı ayrı değerlerlendirilmiştir. L, yol profil uzunluğunu temsil ettiği düşünülürse, bir yol kaplaması üzerinde L < 0,5 mm mikro dokuyu, 0,5 mm < L < 50 mm makro dokuyu, 50 mm < L < 50 cm mega dokuyu ve L > 50 cm ise yol düzgünsüzlüğünü temsil etmektedir (Hall ve Smith, 2009).



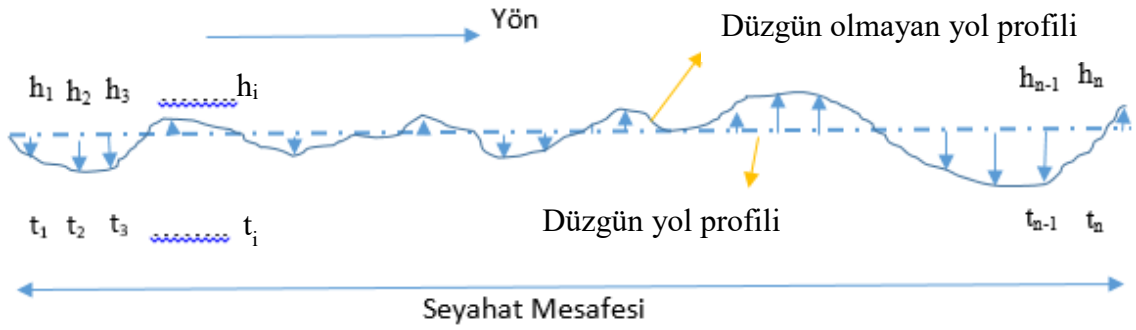
Şekil 2.2. Kaplama yüzey tipleri (Hall ve Smith, 2009).

ASTM standartlarına göre bir yolun IRI değerlerinin konfor üzerindeki etkileri Şekil 2.3'te verilmiştir (ASTM E1926-08) (Sayers, 1986). Buna göre yolun IRI değerleri yükseldikçe yolun düzgünsüzlüğü artmakta ve dolayısıyla konfor durumu azalmaktadır. IRI değeri 2 veya daha az olan yollarda 120 km/saat hız konforlu bir seyahat sağlarken IRI değerinin yükseldikçe konfor seviyesinin korunması için seyahat hızının düşürülmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.3. Kaplamalı bir yol üzerinde IRI ölçek tanımı [ASTM E1926-08] (Sayers, 1986)

Daha önceden bahsedildiği gibi IRI; v hızında seyahat eden bir aracın süspansiyon hareketlerinin toplamının (düşey yöndeki) aracın kat ettiği L mesafesine oranı olarak ifade edilir (Sayers, 1995). Şekil 2.4'te temsili bir yol profili örneği görülmektedir. Burada; t_i ($i \in [1, n]$) peşpeşe alınan iki veri arasındaki zamanı (örneklem zamanı) ve h_i ise t_i zamanındaki yol yüzeyinin referans noktasına göre düşey yerdeğiştirmesini ifade etmektedir.



Şekil 2.4. Boyuna yol profili örneği

Böylece her örnek aralığının düşey yer değiştirmesi (Δh_i) pozitif olup aşağıdaki formülden bulunur:

$$\Delta h_i = |h_i - h_{i-1}| \tag{2.1}$$

IRI tanımına bakıldığında, tüm örneklem aralıklarında düşey mesafeler toplamının seyahat edilen mesafeye bölümü olacağından IRI değeri aşağıdaki formülden bulunur (Denklem 2.2).

$$IRI = \frac{\sum_{i=2}^{n} Xh_i}{L} = \frac{\sum_{i=2}^{n} |h_i - h_{i-1}|}{L} \tag{2.2}$$

Öyleyse her örneklem zamanındaki düşey yer değiştirme ve toplam seyahat mesafesi hesap edilmelidir. Seyahat mesafesi; odometre, GPS gibi çeşitli araçlar ile hesap edilebilirken düşey yer değiştirmenin doğrudan hesabı zordur. Her ne kadar bazı mesafe sensörleri (örneğin ultrasonic sensörler) ile düşey yer değiştirme hesabı yapılsa da (Nakashima vd., 2016) bunların hassasiyet dereceleri daha gelişmiş sensörler karşısında düşük kalmıştır. Bu nedenle düşey yer değiştirme hesabında yaygın olarak kullanılan yöntem, ivmeölçer sensör verilerinin kullanılmasıdır. Fiziksel olarak; mesafenin zamana göre birinci türevi hızı (Denklem 2.3) ve ikinci türevi de ivme (Denklem 2.4) değerini verecektir. Yani;

$$V = \frac{\partial \Delta_h}{\partial t} \tag{2.3}$$

$$a = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta_h}{\partial^2 t} \tag{2.4}$$

olacaktır. Burada; t zamanı, V düşey hızı, a düşey ivmelenmeyi ve Δ_h düşey yer değiştirmeyi ifade etmektedir. İvme değerlerinin çift katlı integrali ise düşey yer değiştirme mesafesini verecektir. Buna göre;

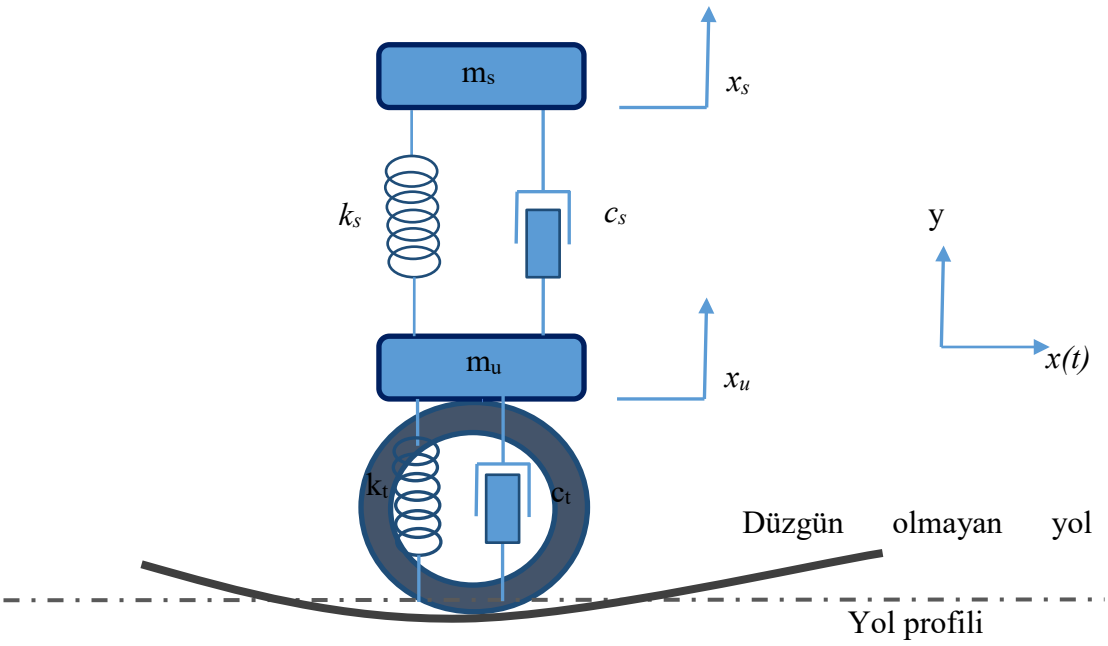
$$\sum Xh = \iint_{t_0}^{t_n} |a| (\partial t)^2 \tag{2.5}$$

olacaktır. Öyleyse IRI formulü;

$$IRI = \frac{\sum_{i=2}^{n} \Delta h_i}{L} = \frac{\iint_{t_0}^{t_n} |a|(\partial t)^2}{L} \tag{2.6}$$

yazılabilir.

Buraya kadar verilen denklemler mesafe-hız-ivme ilişkisinin matematiksel bir gösterimidir. Bununla beraber IRI, genel olarak Golden Car denilen bir çeyrek araç modeli kullanarak hesap edilir. Şekil 2.5'te bir çeyrek aracın fiziksel modeli gösterilmiştir. Çeyrek araç modeli; araç gövdesi, süspansiyon ve tekerlek aksamlarının birleşimlerinden meydana gelmektedir. Yol düzgünsüzlüğünün hesabında; araç gövdesinin kütlesi (m_s), tekerlek-süspansiyonun kütlesi (m_u), yayın rijitliği (k_s), tekerleğin rijitliği (k_t), süspansiyonun sönümleme katsayısı (c_s), tekerlek sönümleme katsayısı (c_t), yaysız ve yaylı kütlelerin düşey hareketleri (sırasıyla; x_u ve x_s), araç gövdesinin ve tekerlek-süspansiyon kütlelerinin hızı ($\dot{x}_s$, $\dot{x}_u$) ve ivmeleri ($\ddot{x}_s$,$\ddot{x}_u$) değişkenleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.5. Çeyrek Araç Modeli (sönümlü kütle-yay modeli)

Çeyrek araç modelinde; yaylı kütle (çeyrek aracın kütlesi) ve yaysız kütle (aks kütlesinin yarısı ve tekerlek) den oluşan iki kütleli bir hareket denklemi ele alınır. Yaylı ve yaysız kütlelerinin hareket denklemi, sırasıyla:

$$m_s\ddot{x}_s + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_s(x_s - x_u) = 0 \tag{2.7}$$

$$m_u\ddot{x}_u + k_s(x_s - x_u) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_t(x_u - y) + c_t(\dot{x}_u - \dot{y}) = 0 \tag{2.8}$$

şeklinde olacaktır. Burada;

m_s : Yaylı kütle
m_u : Yaysız kütle
x_s : Yaylı kütlenin yer değiştirmesi
$\dot{x}_s$: Yaylı kütlenin hızı
$\ddot{x}_s$: Yaylı kütlenin ivmesi
x_u : Yaysız kütlenin yer değiştirmesi
$\dot{x}_u$: Yaysız kütlenin hızı
$\ddot{x}_u$: Yaysız kütlenin ivmesi
c_s : süspansiyonun sönümleme katsayısı
k_s : süspansiyonun rijitliği
k_t : tekerleğin rijitliği
c_t : tekerleğin sönümleme katsayısı
y : x yönünde hareket eden aracın hızına bağlı yol düzgünsüzlüğünü ifade etmektedirler.

Çeyrek araç modeli kullanılarak oluşturulan hareket denklemi sonucunda IRI;

$$IRI = \frac{1}{L}\iint_{t_0}^{t_n} |\ddot{x}_s - \ddot{x}_u| \, \partial t \tag{2.9}$$

şeklinde ifade edilebilir. Yani yaylı ve yaysız kütlelerin mutlak ivme farklarının çift katlı integrali toplam yer değiştirmeyi ve bu toplam yer değiştirmenin kat edilen mesafeye oranı da IRI değerini vermektedir.

2.1.1. IRI ölçüm yöntemleri

IRI değerini hesaplamak için yol profilinin ölçülmesi gerektiğinden bahsedilmişti. Mevcut profil ölçümlerinde başlıca iki yöntem kullanılır. Bunlar; manuel ve mobil profil ölçümleridir (Zhao, 2015).

Manuel profil ölçümlerde profilometreyi itmek için bir kişi gereklidir. Bu ölçüm cihazının hızı profilometreyi kullanan kişinin yürüme hızıdır (yaklaşık olarak 5 km/saat). Walking profilometre ve dipstick profiler (Harris vd., 2010) bunlara örnek olarak verilebilir (Şekil 2.6 (a) ve (b)). Düşük hızları, yüksek işçilik maliyetleri, ölçüm sürecinin uzun zaman gerektirmesi, gerektiğinde trafik akışının durdurulması ve ölçüm aletini kullanmak için uzman bir kişi gerektirmesi bu ölçüm cihazlarının önemli dezavantajlarıdır.

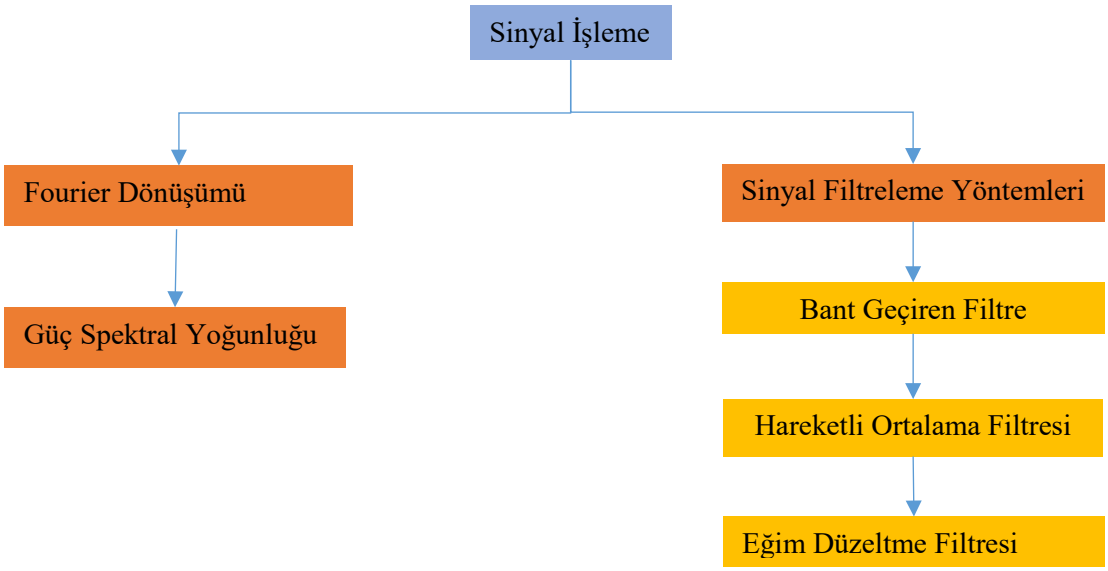
Mobil profilometre ölçümlerinde ise (Şekil 2.6 c) genellikle; bir aracın ön ve/veya arka tamponuna ivmeölçerli lazer sensörler yerleştirilerek yol profilini normal sürüş hızında ölçen araçlar kullanılır (Stevenson, 2021). Yüksek maliyeti ve ölçüm hatalarına sebep olan; çukur, rögar kapakları gibi olası yol kusurları ile hassasiyet kaybına neden olan; yağlanma, bitüm kusmaları, parlak metal kaplamalar, güçlü güneş ışığı (ki bunlar lazer ışığının yansımasını etkilemektedirler) bu cihazların önemli kullanım dezavantajlarıdır (Zhao, 2015).



(a) (b) (c)

Şekil 2.6. Bazı profilometre cihazları: (a) Walking profilometre, (b) Dipstick profilometre, (c) Lazer profilometre.

IRI ölçüm yöntemlerinden toplanan veriler üzerinde bazı sinyal işleme uygulamaları kullanılır. IRI tespiti için izlenen yolun akış şeması Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Buna göre sinyal verileri üzerinde aşağıda detaylı anlatılacağı üzere sinyal dönüşümleri uygulanır ve bu dönüşüm sonrasında sinyal verileri çeşitli filtreleme işlemlerine tabi tutulurlar.



Şekil 2.7. IRI tespitinde sinyal verileri üzerinde uygulanan işlemler

2.2. Sinyal İşleme

Yol profilleri çeşitli frekans ve genliklerden oluşan bir sinüzoidal sinyalin toplamı olarak düşünülebilir (Hesami ve McManus, 2009). Öyleyse yol profilininin belirlenmesi bu sinüzoidal sinyal verilerinin çözümlenmesini gerektirmektedir. Alt bölümlerde mevcut sinyal üzerinde yapılan çeşitli sinyal işleme uygulamaları sunulmuştur.

2.2.1. Fourier dönüşümü

Yol profili üzerinden sensörler aracılığıyla zamana bağlı olarak sinyal verileri alınmaktadır. Yol profil sinyalinin belirli bir zaman aralığında (zaman alanında) gösterimi bu profil içinde bulunan düzgünsüzlüğü kolayca sunamaz. Çünkü bir yol profil sinyali çeşitli frekanslardan oluşan dalgaboylarının toplamı olarak düşünülebilir (Hesami ve McManus 2009). Öyleyse yol profilinin içinde bulunan sinyal bilgilerini bulmak için

zaman alanında elde edilen sinyal bileşenlerine frekans alanında bir dönüşüm yapmak gerekmektedir. Fourier dönüşümleri bunun için uygun bir araçtır. Fourier dönüşümleri sinyal verilerini zaman alanından frekans alanına dönüştürerek kolayca anlaşılmasını sağlayan fonksiyonlardır. Dönüşüm esnasında hiçbir veri kaybı yaşanmaz. Bununla beraber fourier dönüşümleri sürekli sinyallerin dönüşümü için geliştirilmiştir ve bu durum sinyal işleme uygulamalarında kullanılamamaktadır. Çünkü sinyaller belirli aralıklarla örnekler alınarak işlenmektedir. Bu nedenle fourier dönüşümünün bir başka türevi olan ayrık fourier dönüşümleri sinyal işlemede kullanılmaktadır. Böylece zaman alanında elde edilen sinyal verileri frekans alanına dönüştürülerek yol profili hakkında bilgiler alınır ve istenmeyen sinyaller filtrelenir. Denklem 2.10'da ayrık fourier dönüşümünün formülü gösterilmiştir:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-i2\pi \frac{kn}{N}} \tag{2.10}$$

Dönüşüm sonrası ters ayrık fourier dönüşümü uygulanarak ayrık frekans bileşenleri birleştirilir. Denklem 2.11'de ise ters ayrık fourier dönüşümü gösterilmiştir.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{i2\pi \frac{kn}{N}} \tag{2.11}$$

Burada; $x[n]$ zaman alanındaki sinyalin örneklenmiş formudur, $X[k]$ ise frekans alanındaki sinyalin gösterimidir. N; sinyalden elde edilen örneklem sayısı, k; frekans ve n ise örneklemin yerini göstermektedir.

2.2.2. Güç spektral yoğunluğu

Ayrık Fourier dönüşümleri sınırlı sayıda baskın frekans bileşenlerinde oldukça iyi çalışmaktadırlar ancak yol profilleri gibi rastgele titreşim sinyal verilerini karakterize etmek için güç spektral yoğunlukları kullanılır (Lubis vd, 2016). Güç spektral yoğunluğu, bir sinyalin enerjisinin frekansa göre nasıl dağıldığını tanımlar (Karaman, 2018). Ayrıca sinyalin bilgisinin hangi bant genişliğinde olduğunu gösterir. Böylece farklı sinyal uzunluklarına sahip rastgele titreşim sinyallerinin doğru bir şekilde karşılaştırılmasını

sağlar. İvmelenme verileri gibi titreşim ölçümlerinde güç spektral yoğunluğunun birimi g^2/Hz'dir. Burada g ivmelenme değerinin karesini göstermktedir.

Güç spektral yoğunluğu ile yol profilinin düzgünsüzlüğünün nasıl dağıldığı da açıklanabilir. Güç spektral yoğunluğu, yol profilini bir dizi dalga bandı (Mann vd., 1998; Pont ve Scott, 1999) olarak analiz etmek için fourier dönüşümünü kullanır. Denklem 2.12'de güç spektral yoğunluğu -$P(k)$- gösterilmiştir.

$$P(k) = \frac{1}{N} |X[k]|^2 \tag{2.12}$$

Sinyal verileri üzerinde yukarıda bahsedilen dönüşümler ve güç spektral yoğunluğu uygulandıktan sonra bu sinyal verileri üzerinde çeşitli sinyal filtreleme işlemleri yapılmaktadır.

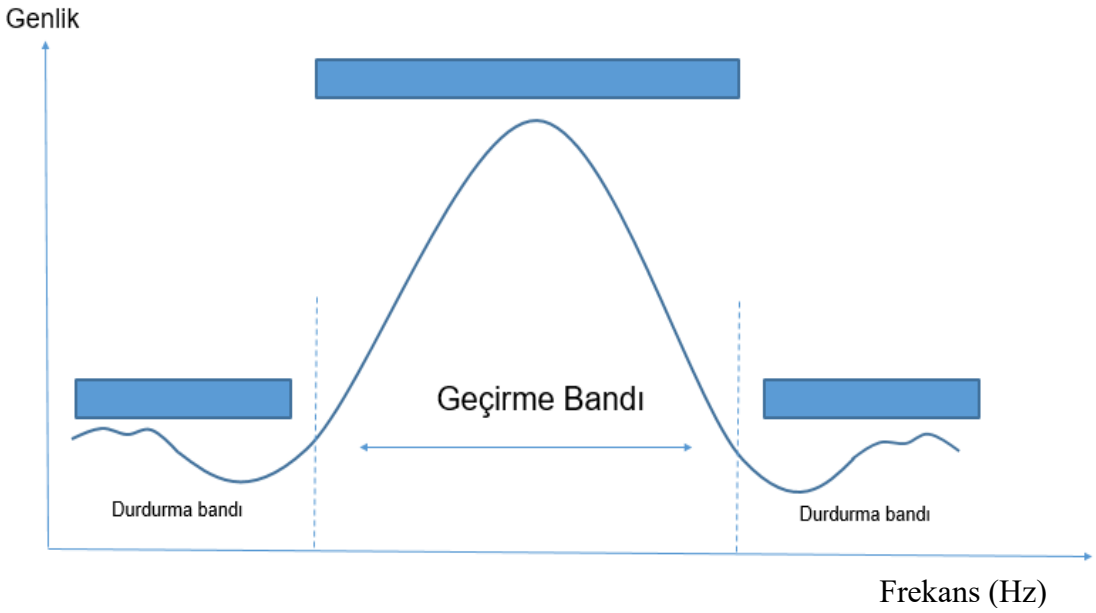
2.2.3. Sinyal filtreleme işlemleri

Dijital sinyaller kendi içlerinde istenmeyen birçok gürültü sinyalleri barındırırlar. İstenilmeyen dalgabyolarındaki sinyallerin ortadan kaldırılması için bu sinyal verileri çeşitli sinyal filtreleme işlemine tabi tutulurlar. Aşağıda IRI tespitinde kullanılan çeşitli filtrelerden bahsedilmiştir.

Bant geçiren filtre

Bir yol profili çeşitli büyüklükte dalgaboylarına sahip sinyallerden oluşur. Çok küçük ve çok büyük dalga boylarındaki sinyaller yol profil düzgünsüzlük hesabında dikkate alınmazlar (bkz. Şekil 2.2). Bu nedenle yolların düzgünsüzlük hesabı için belirli aralıklardaki sinyallerin geçirilmesine izin verilir. Sinyal işlemede; alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren, bant durduran gibi birçok sinyal filtreleme işlemi bulunmaktadır. Bu çalışmada belirli dalgaboylarındaki sinyallerin geçirilmesine izin verilecektir (Bölüm 4.1'de detaylı anlatılmıştır). Bu nedenle bant geçiren filtre kullanılmıştır. Bant geçiren filtrenin temsili bir görseli Şekil 2.8'de verilmiştir. Bu şekle göre istenen frekans

aralıklarındaki sinyallerin geçirilmesine izin verilirken (geçirme bandı) istenmeyen sinyaller bastırılmıştır (durdurma bandı).



Şekil 2.8. Bant geçiren filtrenin temsili bir gösterimi

Hareketli ortalama filtresi

Yol profili standart IRI kabullerine göre hareketli ortalama filtresinden geçirilmesi gerekmektedir. Bu filtre; yol profili üzerinden alınan her bir veri noktasının belirli aralıklardaki ortalamasını esas alır. (Sayers ve Karamihas, 1996). Hareketli ortalama filtresi aşağıdaki formülden bulunur:

$$h_{ps}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} h_p(j) \tag{2.13}$$

$$k = \max\ [1, nint\ (L_B / \Delta_p)] \tag{2.14}$$

burada;

h_p = Profil Yüksekliği,

h_{ps} = düzeltilmiş profil yüksekliği,

max = iki argüman arasındaki en yüksek değer,
nint = en yakın tam sayı,
L_B = hareketli ortalama temel uzunluğu, 250 mm
Δ_p = peşpeşe alınan iki nokta arasındaki mesafe değerini göstermektedir.

Eğim düzeltme filtresi

Yol profilinden elde edilen özellikle çok düşük frekanslı sinyal verileri baskın frekans aralığı üzerinde bir eğilim oluşturabilirler. Bu eğilim sinyal verilerinin bir yöne doğru kaymasına neden olur. Bu kayma, özellikle zaman alanından frekans alanına dönüşüm yapılırken bazı çok düşük frekanslı (yüksek dalga boyları) verilerin yüksek frekanslı veriler üzerindeki etksinin bir sonucudur. Bu eğilim yol profil hesabında doğru olmayan sonuçlar doğurmaktadır. Öyleyse bu eğilimin de düzeltilmesi gerekmektedir. Eğilim genellikle zaman içinde ortalamadaki bir değişikliği ifade eder. Denklem 2.15'te gösterilmiştir:

$$x_{yeni} = x_{eski} - \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{2.15}$$

Burada, x_{yeni} filtrenin sonucu, x_{eski} filtre öncesi değer ve n örneklem boyutu ifade etmektedir.

2.3. Kaynak Araştırması

1950-60 yıllarında başlayan yol düzgünsüzlüğünü belirleme çalışmaları günümüze kadar birkaç evreden geçmiştir. İlk başlarda uzman kişilerce belirli ölçütlere göre görsel değerlendirme yapılmıştır. Ancak her ne kadar bu kişiler alanlarında uzman olsa da tam olarak nesnel bir ölçüm yapılamayacağından araştırmacılar mekaniksel ölçüm tekniği geliştirmeye yönlenmiştir. Daha sonra yolların hizmet kabiliyetlerinin üstyapı düzgünsüzlüğü ile ilişkili olduğu anlaşılmış ve sürüş konforu indeksi (Riding Comfort Index, RCI), sürüş sayısı (Ride Number, RN), üstyapı hizmet yeteneği (Pavement Service Index, PSI) gibi çeşitli değerlendirme ölçütleri ortaya çıkmıştır (Haas vd., 1994). Ancak kullanılan yöntemlerin ve değerlendirme kriterlerinin farklı olması gibi nedenlerden

dolayı ortak bir ölçüt sistemi oluşturulamamıştır. Nihayetinde 1982 yılında Brezilya'da yapılan Uluslararası Yol Düzgünsüzlük Platformunda, Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (International Roughness Index-IRI) gündeme getirilmiştir. Bu indeks daha sonra Dünya Bankası tarafından 1986 yılında düzgünsüzlük ölçütü olarak kabul edilmiştir (Sayers vd., 1986). IRI kısaca yol üstyapındaki düzgünsüzlük etkisine karşı bir aracın vermiş olduğu tepki olarak tanımlanır (Sayers ve Karamihas, 1998). Bir çeyrek araç modelinin yol üstyapı düzgünsüzlüğünden ötürü süspansiyonunda meydana gelen hareketlerin toplamının aracın kat ettiği mesafeye oranı IRI değerlerini verir (Sayers vd., 1986).

Daha önceden de belirtildiği gibi yol kaplamasının düzgünsüzlüğü sürüş kalitesinden güvenliğe, yol bakım maliyetlerinden aracın dinamik etkilerine kadar birçok alanı ilgilendirmektedir. Düzgünsüzlük üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur ve halen de günümüzde güncelliğini koruyan bir konudur. Genel olarak incelenen konular ana hatları ile; düzgünsüzlük nedeniyle araçta meydan gelen düşey doğrultudaki titreşimlerin sürüş konforuna etkisi (Wang ve Easa, 2016; Cantisani ve Loprencipe, 2010; Sayers ve Karamihas, 1996), farklı beton kaplamalı yollarda farklı seyahat hızları ile IRI arasındaki ilişki (Abudinen vd., 2017), bitümlü sıcak karışım ile taş kaplamalı yolların araçta meydana getirdiği titreşimler (Duarte ve Melo 2018), kaplama yüzey koşullarının kazaların şiddeti üzerindeki etkileri (Lee vd., 2015), akıllı telefonlar kullanılarak sürüş sırasında meydana gelen titreşimlerin ölçülmesi ile düzgünsüzlük tahminleri (Aydın vd., 2017; Strazdins vd., 2011) ve yol yüzeyinin izlenmesi (Perttunen vd., 2011; Strazdins vd., 2011; Mohan vd., 2008; Eriksson vd., 2008), ayrıca matematiksel yöntemler ile (regresyon analizi, yapay sinir ağları, karınca kolonisi, genetik algoritma) üstyapı performansının ve geleceğe yönelik bozulmaların tahmini (Choi vd., 2004; Lin vd., 2003; Roberts ve Okkine 1998; Yu, 2005) gibi geniş konularda araştırmalar yapılmaktadır.

Douangphachanh ve Oneyama (2014), kaplama düzgünsüzlüğünü akıllı telefonlardaki sensörler yardımıyla aldıkları veriler ile belirlediler. Aracın uygun yerlerine yerleştirilen telefonlar, sürüş esnasında aracın dingilinde meydana gelen titreşimleri kendi donanımlarında bulunan ivmeölçer sensörleri ile alırlar. Çalışmada yol kaplamasının mevcut durumunu belirlemek için akıllı telefonların kullanılabilir olduğunu gösterdiler.

Zuraulis vd., (2014) farklı sürüş hızlarında yol düzgünsüzlüğünün araç süspansiyonu üzerindeki etkisini analiz ettiler. Düzgün olmayan bir yolda araçların 50 km/saat'den 80 km/saat'e kadar hız artımında süspansiyon deplasmanlarının 1.6 kat artmakta olduğunu gözlemlediler.

Armstrong vd., (2015) zemin-tekerlek etkileşimini karakterize etmek için piezoelektrik sensörler ile donatılmış bir mobil robot geliştirdiler. Bu mobil robot farklı güç seviyeleri, farklı yüklemeler ve farkı tekerlek boyutları dikkate alınarak çimento, kum ve buz kaplı bir yüzey üzerinde hareket ettirildi ve piezoelektrik sensörlerin zemin karakteristiğini belirlemek için kullanılabilir algılayıcılar olduğunu gösterdiler.

Pooja. M (2015) uygun maliyetli yol düzgünsüzlük ölçüm aracı geliştirmiş ve çatlamış, sökülmüş ve yamalı yollar üzerinde kaplama performansını lineer regresyon ile tahmin etmeye çalışmıştır.

Abulizi vd., (2016) Hokkaido kenti yollarını incelemek için kaplama düzgünsüzlüğünü gerçek zamanlı olarak izlediler. Çalışmaları üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak; yol profilini kolayca ölçmek için, pahalı lazer profilometrelerinin aksine daha uygun maliyetli iki ivmeölçerli yeni bir mobil profiler kullandılar. Ayrıca GIS ve Japonya dijital yol haritaları ile topladıkları IRI verilerini görselleştirdiler. Böylece her bir yol güzergâhının düzgünsüzlüğü bu iki uygulama ile kolaylıkla netleştirildi. İkinci olarak; farklı mevsimlerde iki farklı şehrin IRI ölçüm sonuçlarını GIS ile değerlendirdiler. Son olarak ta sürüş simülatörü ve profiler kullanarak sürüş kalitesini ölçtüler. Sonuçlar, sürüş kalitesi açısından sürüş simülatörünün yol yüzeyinin durumunu gerçek profil verilerine yakın değerlerde analiz ettiğini göstemiştir.

Aydın ve Topal (2016) yol kaplama deformasyonlarının trafik akışına ve sürücü davranışlarına olan etkisini incelediler. Bunun için, trafikte kaplama üzerindeki deformasyonların oluşturduğu şok dalgalarını ve darboğaz oluşumlarını tahmin etmek için modeller geliştirdiler. Çalışmada deforme olmuş yol ağı üç bölüme ayrılarak analizler yapıldı. Sonuçlar; yüzey deformasyonlarının yol hizmet seviyesi üzerinde negatif bir etki oluşturduğunu ve kapasitede önemli azalmalar meydana getirdiğini gösterdiler.

Surblys vd., (2017) lazer sensörler ile simetrik ve asimetrik düzgünsüzlük tahmin metotlarını incelediler. Bilinen iki yol profili üzerinde Japonya metodu kullanılarak yapılan deneysel çalışma, araç gövde salınım hareketi ve süspansiyon hareketinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Süspansiyon hareket dengesinin düzgünsüzlüğü değerlendirme üzerine yeterli hassasiyeti vermediğini görmüşlerdir.

Kırbaş, U. (2018); karayolu üstyapılarının mevcut hizmet düzeyi ile sürücü konforu arasındaki ilişkiyi araştırmış ve sürüş konforuna göre IRI'nın sınır değerlerini belirlemiştir. Bunun için ortalama sürüş hızı, ağırlıklandırılmış frekans ortalama ve IRI arasında YSA tekniğini kullanarak matematiksel bir model geliştirmiş ve buna bağlı olarak farklı sürüş hızlarına bağlı olarak IRI'nın sınır değerlerini belirtmiştir. Çalışma sonucunda hız arttıkça IRI'nın sınır değerlerinin azaldığını tespit etmiştir.

Zang vd., (2018) bisiklet üzerine takılan akıllı telefonlar ve GPS sensörler ile yaya ve bisiklet yollarının düzgünsüzlüğünü ölçtüler. Ayrıca yollardaki çukurlar ve tümsekleri belirlemek için bir algoritma geliştirdiler. Bu algoritmayı değerlendirmek için üç farklı test yapıldı ve deney sonuçlarının profesyonel araçlar ile yapılan ölçümlerin sonuçları ile oldukça tutarlı olduğu kanıtlandı. Bu yöntem ile profesyonel araçların giremediği yaya ve bisiklet yolların düzgünsüzlüğünün ölçülebilir olduğu gösterildi.

Bridgelall vd., (2019) yol etki faktörü ve IRI'nın hassasiyetlerini baskın profil dalga boyundaki değişime göre incelediler. Sonuçlar, her iki indeksin eşit duyarlılıkta 2 m'ye kadar dalga boylarında düzgünsüzlüğü karakterize edebildiğini gösterdi.

Loprencipe ve Zoccali (2019) havaalanı kaplama düzgünsüzlüğünü IRI ve BBI (Boeing Bump Index) gibi farklı değerlendirme yöntemleri kullanarak analiz ettiler. Çalışmada; çeyrek araç modeline göre belirlenen IRI indeksinin; pist düzgünsüzlüğünü gerçek olarak temsil edememesi ve pist profilindeki uzun dalga boylarının hareket sırasında uçaklarda oluşturduğu tepkiyi doğru değerlendirememesinden dolayı havaalanı pist düzgünsüzlüğünü değerlendirmede yetersiz kaldığını görmüşlerdir. IRI ve BBI arasındaki düzgünsüzlük ilişkisi kısa dalga boylarında iyi (R2=%91) olduğunu buldular. IRI ile

kokpitin düşey ivmelenmesi arasındaki ilişki çok düşük (R2=%3) iken BBI ile kokpitin düşey ivmelenmesi arasındaki ilişkinin daha iyi olduğunu buldular (R2=%59).

Bidgoli vd., (2019) yolların düzgünsüzlüğünü ölçmek için uygun maliyetli bir veri toplama sistemi geliştirdiler. Bunun için ivmeölçerler ve GPS ile donatılmış ekstra bir tekerlek kullandılar. Geliştirilen sistemin IRI tahmini için tatminkâr sonuçlar verdiği görülmüştür. Zhu vd., (2019) ivmeölçerli dinamik tekerlek basınç sensörü kullanarak tekerlek-yol etkileşiminden yol düzgünsüzlüğünü tahmin eden bir çalışma yaptılar.

Bununla beraber IRI tahmininde; regresyon, naive bayes, markov zincirleri gibi birçok istatistiksel ve matematiksel modeller de kullanılmaktadır. Bu modeller her ne kadar IRI'yı belirli bir hassasiyetle tahmin edebilse de IRI ve tahmin değişkenleri arasındaki ilişki doğrusal olmamasından kaynaklı kısıtlamalar söz konusudur (Wang vd., 2020; Zeiada vd., 2020) ve bu durum tahmin hassasiyetinin azalmasına neden olmaktadır (Choi vd., 2004; Kargah-Ostadi vd., 2010; Zeiada vd., 2020).

Bilgisayar biliminin ilerlemesi ve ayrıca makine öğrenme algoritmalarının gelişmesi yol kaplamalarının kalitelerinin değerlendirilmesine de olanak sağlamıştır. Geleneksel hesap yönteminin yerine kullanılabilecek olan bu algoritmalar yeni yöntemlerin kullanılmasında geleneksel yöntemlere nispeten büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Makine öğrenme algoritmaları kullanılarak yol kaplamaları ile ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır (Kobayashi vd., 2012; Okuda vd., 2018). Bunun yanı sıra bazı araştırmacılar IRI'yı tahmin etmek için bazı yollardan örnek veriler alarak makine öğrenme algoritmalarını kullandılar (Lin vd., 2003; Choi vd., 2004; Bajic vd., 2021). Bu algoritmalardan biri olan yapay sinir ağları IRI tahmin çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır (Abd El-Hakim & El-Badawy, 2013; Abdelaziz vd., 2020; Choi vd., 2004; Chou ve Pellinen, 2005; Georgiou vd., 2018; Hossain vd., 2020; Kaloop vd., 2020; La Torre vd., 1998; Lin vd., 2003; Mazari ve Rodriguez, 2016; Teomete vd ., 2004; Ziari vd., 2015). Gabrielli vd., (2019) yol düzgünsüzlüğünü sınıflandırmak için Siamese yinelemeli sinir ağları kullandı. Liu vd., (2019) farklı yol kaplamalarının düzgünsüzlüğünü belirlemek için bir yol düzgünsüzlük tespit sistemi geliştirdiler ve Adaboost geriye yayılım algoritmasını kullanarak Boltzmann makine derin sinir ağı algoritmasını modellediler. Chandra (2012), IRI ile yol bozuklukları arasındaki ilişkiyi

doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri ve yapay sinir ağları ile incelemiş ve YSA modelinin regresyon modellerinden daha başarılı olduğu sonucuna varmıştır. Gong vd., (2018) trafik, iklim, bakım ve yol üstyapı verilerindenden esnek kaplamaların IRI'sını tahmin etmek için bir rastgele orman regresyon modeli geliştirdiler. Geliştirilen bu modelin hem eğitim hem de test veri setlerinde doğrusal regresyon modelinden daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

Zaman içinde yol kaplamalarında meydana gelen bozulmaların tahmini ile ilgili de makine öğrenme algoritmasını kullanan birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar uzun vadeli süreçlerde yol kaplama ile ilgili bilgilerin derlenip geleceğe yönelik IRI tahminlerinden oluşur. Çizelge 2.1'de makine öğrenme algoritmaları kullanılarak yol kaplama performansının uzun vadeli tahminine yönelik yapılan çalışmalar gösterilmiştir. Çalışmamızla alakalı olarak özetle; Ziari vd., (2016) yol üstyapısının gelecek performansını tahmin etmek için destek vektör makine (DVM) algoritmasını kullanmışlardır. Üst yapı bozulması üzerinde dokuz etkili değişken dikkate alınmış ve beş tip DVM algoritması kullanılmıştır. Çalışma DVM'in kaplama performansını kısa ve uzun vadede tahmin etme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir. Ziari vd., (2016) esnek üstyapı koşullarını tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) ve grup veri işleme yöntemini (GMDH) 1 yıl, 2 yıl ve uzun vadeli olacak şekilde üç düzeyde analiz etmişlerdir. Bunun için; trafik koşulları, çevresel değişiklikler ve üstyapı cinsleri olmak üzere IRI üzerinde etkili olan üç grubu incelemişler ve girdi değişkenleri olarak dokuz etkin değişken seçmişlerdir. Çalışmada YSA modellerinin üstyapının gelecekteki durumunu kısa ve uzun vadede yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini ve GMDH modellerinin kabul edilen doğruluğa sahip olmadığını göstermişlerdir.

Çizelge 2. 1. Makine öğrenme yöntemlerine dayalı IRI tahminleri (Damircilo vd., 2021)

Çalışmalar	Algoritma	Değişken sayısı	Değişken Tipleri						Örneklem Boyutu	Veri Kaynağı
			IRI	Yaş	Trafik	Tehlike (Kaza vb.)	İklim	Malzeme Özellikleri		
Zhang vd., (2020)	Gradient Boosting	20	2	1	1	4	2	10	285	UVKP-BKÇ5
Sollazo vd., (2017)	YSA	12	1	1	2	0	5	3	1021	UVKP
Mazari ve Rodriguez (2016)	YSA ve gen ekspresyon programına dayalı iki model	3	0	1	1	0	0	1	95	UVKP (Amerika'da 8 ve Kanada'da 2 eyalet)
Kaloop vd., (2020)	Optimal aşırı öğrenme makinesi ve dalgacık analizi	8	1	1	0	3	1	2	184	UVKP (Beton Yol-GPÇ)
De Luca (2020)	YSA-regresyon	3	0	0	0	0	0	3	Rapor edilmemiş	Lamezia Terme Havalimanı (2010-2014)
Zeiada vd., (2017)	YSA- İSÖS*-regresyon	13	1	0	1	0	8	3	Rapor edilmemiş	UVKP (Soğuk Bölgeler)
Zeiada vd., (2020)	YSA- İSÖS*-regresyon ağacı-DVM-bagging-boosting-Gauss	7	1	0	1	0	4	1	Rapor edilmemiş	UVKP (Sıcak Bölgeler)

	process regresyon;geleneksel regresyon modelleri									
Karballaeezadeh vd., (2020)	Rastgele Orman	12	0	0	0	12	0	0	118	Tehran-Qom Otoyolu, İran
Marcelino vd., (2019)	Rastgele Orman	9	1	0	1	0	5	2	1370	UVKP
Gong vd., (2019)	Rastgele Orman	17	0	1	0	0	0	16	443	UVKP
Gong vd., (2018)	Rastgele Orman	18	1	1	1	11	2	2	11715	UVKP
Ziari vd., (2016)	DVM	9	0	1	3	0	3	2	205	UVKP
Ziari vd., (2016)	YSA-Grup veri işleme yöntemi	9	0	1	3	0	3	2	205	UVKP
Ziari vd., (2015)	Uyarlanabilir nöral tabanlı bulanık çıkarım sistemi (UNBÇS)- Grup veri işleme yöntemi	9	0	1	3	0	3	2	205	UVKP
Terzi (2013)	UNBÇS	3	0	1	1	0	0	1	118	UVKP
Kargah-Ostadi vd., 2010)	YSA	8	1	2[b]	0	0	0	5	1072	UVKP (BKÇ-5)
Kargah-Ostadi vd., 2014)	YSA-Radial Basis Function (RBF) network-DVM	14	1	2[c]	1	0	4	6	3361	UVKP (BKÇ-1 ve BKÇ-5)
Choi ve Do (2020)	Yinelemeli YSA	8[d]	0	0	2	0	4	1	1880	Kore
Attoh ve Okine 999)	YSA	4	0	0	1	3	0	0	265	Kansas (1993)
Choi vd., (2004)	YSA	7	0	0	1	0	0	6	Rapor edilmemiş	UVKP
Abdelaziz vd., (2020)	YSA-regresyon	5	1	1	0	3	0	0	2439	UVKP

Chandra vd., (2013)	YSA-doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon	5	0	0	0	5	0	0	Rapor edilmemiş	Hindistan
Lin vd., (2003)	YSA	14	0	0	0	14	0	0	125	Taiwan
Georgiou vd., (2018)	YSA-DVM	1[e]	1	0	0	0	0	0	Rapor edilmemiş	Rapor edilmemiş
Elhadidy vd., (2021)	Regresyon	1	1	0	0	0	0	0	12744	UVKP
Al-Omari ve Darter 995)	Regresyon	4	0	0	4	0	0	0	Rapor edilmemiş	UVKP
Mactutis vd., (2000)	Regresyon	3	0	0	0	2	0	1	317	UVKP (Reno, Nevada)
Mubaraki (2009)	Regresyon	3	0	0	0	3	0	0	Rapor edilmemiş	Suudi Arabistan
Mubaraki (2016)	Regresyon	3	0	0	0	3	0	0	Rapor edilmemiş	Suudi Arabistan
Albuquerque and Nunez (2011)	Regresyon	3	0	0	1	0	1	1	Rapor edilmemiş	Brezilya

Not: UVKP = Uzun Vadeli Kaplama Performansı, BKÇ = Belirli Kaplama Çalışmaları, GPÇ= Genel Performans Çalışmaları, *ileri sıralı özellik seçimi
[a]Marcelino vd., (2019) farklı sayıda girdi değişkenine sahip farklı veri kümeleri kullandı. Bunlardan biri verildi.
[b]Rehabilitasyon yaşını ve önceki IRI'den bu yana geçen süreyi dikkate aldılar.
[c]Önceki IRI ölçümünden bu yana geçen süreyi ve son sıcak karışım asfalt betonu yerleşiminden bu yana geçen süreyi dikkate aldılar.
[d]Belirtilen yedi değişkene ek olarak, kaplama durumu inceleme ekipmanı için bir kukla değişkeni dikkate aldılar.
[e]IRI'yi tahmin etmek için yalnızca önceki IRI'leri kullandılar.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Önceki çalışmalarda IRI'nın tahmininin, yol kaplamasının araçta meydana getirdiği etkinin ölçülmesi (tepki tipli ölçüm araçları) veya lazer sensörlerle yol ile lazer arasındaki mesafe değişimlerinin hesaplanması ile belirlendiği söylenmişti. Bu çalışmada ise önceki çalışmalardan farklı olarak tekerlek-yol etkileşimi esas alınmıştır. Bu tekerlek-yol etkileşimi ile mevcut ölçüm cihazlarının ölçüme etki eden kusurları (yağ lekeleri, bitüm kusması, ışık etkisi vb) giderilmeye çalışılmış ve yeni bir ölçüm metodu kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla bir test aracının (dağ bisikleti) ön tekerleğine PVDF piezoelektrik sensörler yerleştirilmiştir. Böylece yol düzgünsüzlüğünün tekerlekte meydana getirdiği deformasyonlar bu sensörler ile belirlenmiş ve IRI tahmini yapılmıştır.

Bu bölüm altı ana başlıktan oluşmaktadır. IRI'yı hesap etmek için önerilen ölçüm sisteminin geliştirilmesi birinci bölümde ele alınmıştır. Yeni geliştirilen ölçüm sisteminde ivmeölçer sensörü, PVDF sensörler, bu sensörler ile eş zamanlı çalışan GPS sensörü, veri depolama ünitesi ve OLED ekran modülü kullanılmıştır. Bu bölümde çalışma için kullanılan sensörlerin tanıtımı ve kurulumu açıklanmıştır. İkinci bölümde ivmeölçer ve GPS sensörüne dayalı IRI hesabından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışma yapılacak yol sahasından ve referans olarak kullanılacak lazer profilometre cihazının özellikleri ve bu cihazın belirlenen yol üzerindeki test sonuçlarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, veri setinin hazırlanmasından, beşinci bölümde geleneksel yöntemden ve son bölümde ise değerlendirme ölçütleri, özellik çıkarımı ve DVR algoritmalarını içinde barındıran TY-PVDF'den bahsedilmiştir.

3.1. TY-PVDF Sistemi

IRI'yı ölçmek için kullanılan mevcut profilometre cihazlarının bazı avantaj ve kısıtlarından bahsedilmişti (bkz. 2.1.1). Bu tez çalışmasında bu kısıtların aşılması hedeflenmiş ve TY-PVDF sistemi tanıtılmıştır.

3.1.1. TY-PVDF'nin çalışma prensibi

Bu çalışmanın ana fikri; araç seyir halinde iken tekerlek-yol etkileşimine dayalı olarak yol düzgünsüzlüğünün araç tekerleğinde meydana getirdiği deformasyonların belirlenmesine dayanmaktadır. Bu deformasyonlar ile yolların durumu hakkında bilgiler alınarak düzgünsüzlük seviyesi belirlenecektir. Düzgün bir yolda tekerleklerdeki deformasyonlar doğal olarak stabil kalacaktır. Ancak bozuk yollarda tekerleklerde ani değişimler meydana gelecektir. Burada ki asıl amaç, tekerlek yüzeyinde meydana gelen bu ani değişimleri çözümlemektir. Bunun için; PVDF piezoelektrik sensörlerden faydalanılmıştır. Bu sensörler, iyi esneme kabiliyeti, yüksek çalışma sıcaklığı ve kimyasal maddelere dayanım gibi özellikleriyle araç tekerleği için uygun bir yapıya sahiptirler. Test aracının tekerleğine monte edilen PVDF sensörler tekerleğin yol ile teması sırasında tekerlekte meydana gelen deformasyon sonucu eğilmeye maruz kalacaklar ve bunun sonucunda bu malzemelerde elektrik akımları oluşacaktır. Ortaya çıkan bu elektriksel akımlar ve aynı zamanda test cihazına yerleştirilen 3-eksenli ivmeölçer sensörünün ivmelenme verileri toplanacaktır. Elde edilen veriler analiz edilerek yol düzgünsüzlük seviyesi belirlenecektir.

Bu test aracının bir avantajı diğer profilometre cihazlarının aksine yol ile doğrudan temas sağlamasıdır. Bu nedenle her türlü yol tipinde uygulanabilme özelliğine sahip olacaktır. Ayrıca, çeyrek araç modelinde kullanılan, araç gövdesinin ve süspansiyonun rijitliği ve sönümleme oranları bu yeni ölçüm sisteminde dikkate alınmayacaktır. Böylece bu çalışma daha basit bir yöntem sunarak karmaşık matematiksel ifadelere ihtiyaç duymayacaktır. Bu bölümün devamında; veri toplama sistemi (VTS), TSD sistem, PVDF sensörler ve test aracının kurulumu hakkında bilgiler verilmektedir.

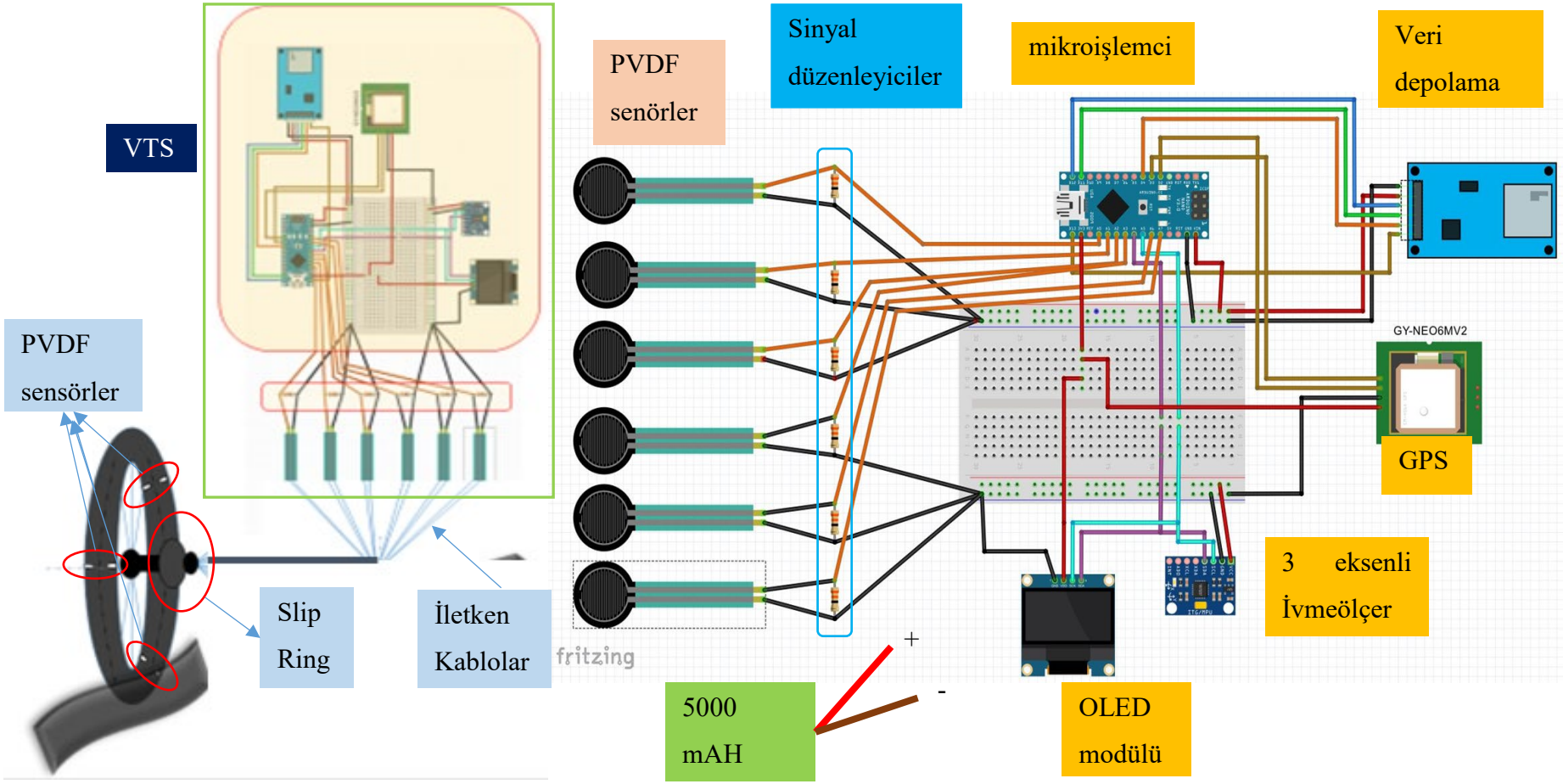
3.1.2. Veri toplama sistemi (VTS)

VTS tüm sensör verilerinin toplandığı ve depolandığı yerdir. Burada; 6 PVDF sensörü, 1 ivmeölçer sensörü, 1 GPS modulü, toplanan verilerin kaydedildiği depolama modülü ve OLED ekrandan oluşan toplamda 10 adet sensör çalışmaktadır. VTS'de ki tüm elektronik donanımların ve sensörlerin eş zamanlı çalışması için Arduino Nano kart kullanıldı.

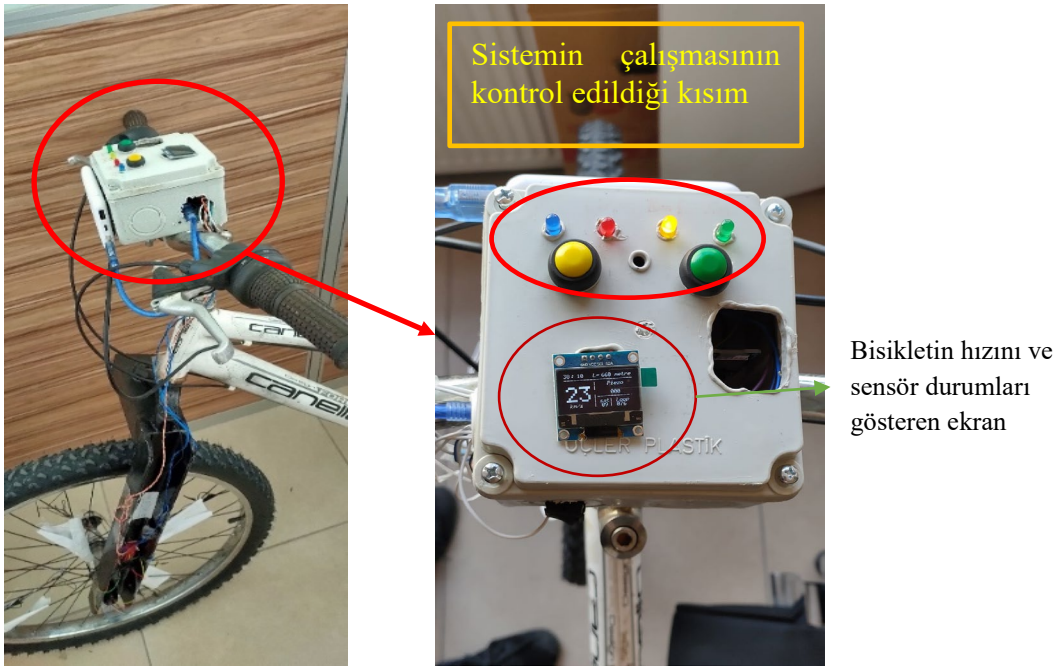
Arduino Nano; 0-5 V çalışma gerilimi ve 10 bit/4,88 mV analog sinyal çözünürlüğe sahip bir mikrodenetleyici karttır. Ayrıca 16 MHz işlemci hızına sahip Atmega 328 mikroişlemci kullanmakta, ve 8 analog pin giriş desteği vermektedir.

Test aracında; x, y ve z yönleri olmak üzere 3 eksende de ivmelenme değerlerini alabilen bir ivmeölçer (MPU-6050) kullanılmıştır. Bu ivmeölçer 3-5 V arası gerilim değerinde çalışmakta ve ±2, ±4, ±6, ±8, ±16 g hassasiyet aralıklarında kullanılmaktadır. Bu değerler ±16 g değerine kadar ivmelenme değerlerinin ölçülebildiğini göstermektedir. Bu çalışmada, yollardaki muhtemel bozukluklar gözönüne alındığından ve bu bozukluklar yüksek ivmelenme değerleri oluşturacağından dolayı kullanılan ivmeölçerin hassasiyet aralığı ±8 g değerine ayarlanmıştır.

Test aracının hız, konum ve zaman bilgilerinin elde edilmesi için 1 Hz örneklem ve 2,5 m yatay mesafe duyarlılığına sahip bir GPS modülü (NEO-6 GPS modulus datasheet) kullanılmıştır. Tüm bu sensörlerden elde edilen veriler 16 GB kapasiteli bir mikro SD karta depolanmıştır. Sistemin çalışma protokolü Arduino programında yazılmıştır. Ayrıca test aracının hızını, sensör durumlarını ve olası sorunları izlemek için 0,96 inç boyut ve 128x64 çözünürlüğe sahip bir OLED ekran modülü kullanılmıştır. Sistemin çalışmasını kontrol etmek için VTS içinde bir kontrol ünitesi oluşturulmuştur. Böylece VTS üzerinde bulunan butonlar ve led ışıklar sayesinde sistemin işleyişi düzenlenebilecek ve oluşabilecek problemler takip edilebilecektir. VTS'nin enerjisini karşılamak için 5000 mAH gücünde bir powerbank kullanılmıştır. VTS, plastik kelepçelerle test aracının gidon kısmına güvenli bir şekilde takılmıştır. Şekil 3.2'de test sisteminin bileşenleri ve bağlantı şeması ve Şekil 3.3'te VTS ve onun test aracı üzerindeki konumu gösterilmiştir.



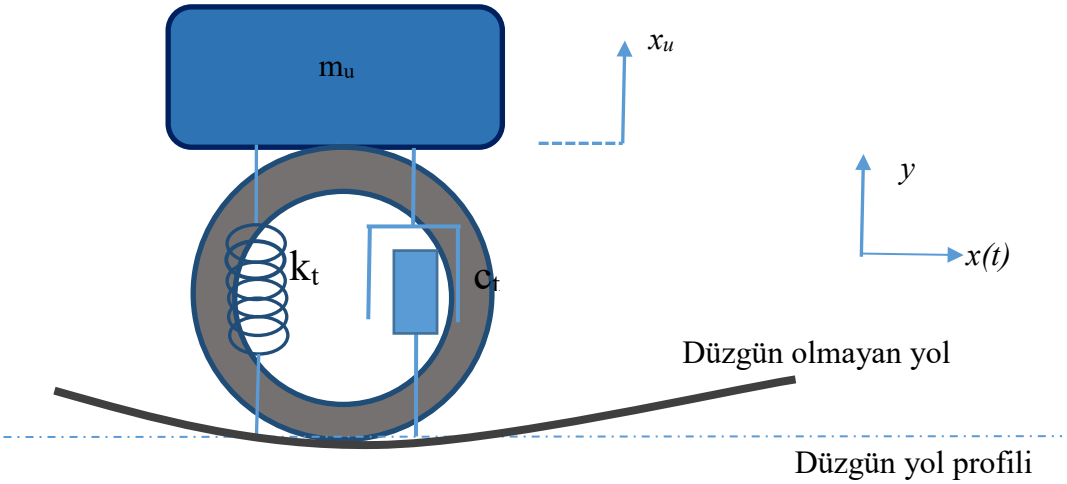
Şekil 3.1. Test sisteminin bileşenleri ve bağlantı şeması



Şekil 3.2. VTS ve test aracı üzerindeki konumu

3.1.3. Tek serbest dereceli sistem (TSD)

Bu tez çalışmasında test ölçüm aracı olarak bisiklet kullanılmıştır. Sonraki bölümlerde yapısı daha detaylı olarak anlatılacak olan bu ölçüm aracı özel olarak tasarlanmış ve araç süspansiyonun sönümleme etkisi ortadan kaldırılarak tek serbest dereceli (TSD) bir sistem haline dönüştürülmüştür. TSD'li yapılarda araç çerçevesinin (gövdesinin) elastiklik kapasitesi yok denecek kadar azdır. Çünkü sönümlü kütle yay modelindeki (bkz. Şekil 2.5) yaylı kütle hesaba katılmamaktadır. Bu nedenle yeni geliştirilen test aracı rijit bir yapı olarak dikkate alınabilir. Öyleyse, yaylı kütle (m_s), yay rijitliği (k_s) ve süspansiyon sönüm katsayısı (c_s) hesaba katılmayacak ve sadece tekerleğin rijitliği ve sönüm katsayısı hesaba katılacaktır. Böylece Şekil 3.3'te görüleceği gibi sönümsüz bir kütle-yay modeli oluşacak ve yaysız kütlenin hareket denklemi dikkate alınacaktır. Burada; $x(t)$ yer değiştirme mesafesini, x_u yaysız kütlenin yerdeğişimini ve y yol düzgünsüzlüğü temsil etmektedir.



Şekil 3.3. Sönümsüz kütle-yay modeli

Böylece; denklem 2.7 ve 2.8'de yaylı kütle ve buna bağlı süspansiyonun rijitlik ve sönümleme katsayıları elimine edilirse denklem 3.1 ve 3.2'de gösterilen TSD'li çeyrek araç modelinin hareket denklemi elde edilmiş olur:

$$m_u\ddot{x}_u + k_t(x_u - y) + c_t\dot{x}_u = 0 \tag{3.1}$$

$$y = \frac{m_u\ddot{x}_u + c_t\dot{x}_u + k_t x_u}{(k_t)} \tag{3.2}$$

şeklinde olacaktır.

3.1.4. PVDF sensörler

Bu çalışmada 1cm * 2,5cm boyutlarında ve 28µm kalınlığında Polivinilidin florür (PVDF) sensörler kullanılmıştır (Şekil 3.4). Bu sensörler; eğilmeye maruz bir gerilim (baskı, titreşim, kuvvet vb.) altında elektrik enerjisi üretme yeteneğine sahip polimer piezoelektrik malzemelerdir (Meitzler vd., 1988; Sirohi ve Chorpa, 2000). Bu gerilmeler ile malzemenin eksi ve artı yükleri arasında kutuplaşma meydana gelir ve böylece iki kutup arasında potansiyel fark oluşur yani elektrik akımı üretilir. 0,001 Hz – 10^9 Hz'e kadar geniş frekans aralığına sahiptirler (Measurement Specialties Inc., 2008). Aynı gerilim altında piezo seramiklerden 10'kata kadar yüksek voltaj çıkışına sahiptirler (90^o

bükülmede 70 Volt'a kadar voltaj üretebilmektedir). Çizelge 3.1'de PVDF sensörlerin bükülme oranlarına göre yük ve voltaj çıktıları verilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere tekerleğe monte sensörlerin yüksek deformasyon etkilerinde daha fazla eğilmeye maruz kalacağını ve dolayısıyla voltaj çıktılarının artacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4. Yeni test düzeneğinde kullanılan PVDF sensör

Çizelge 3. 1. PVDF sensörün bükülme miktarına göre potansiyel olarak verebildiği yük ve voltaj çıktıları

Eğilme miktarı	**Yük çıktısı**	**Voltaj çıktısı**
2 mm	3.4 nC	7 V
5 mm	7.2 nC	15 V
10 mm	10 – 12 nC	20- 25 V
Mak. (90^0)	> 30 nC	> 70 V

Measurement Specialties Inc. (2008), LDT0-028K Piezo Vibration Rev 1

Bu sensörler, su ve insan dokusuna yakın düşük akustik empedans katsayısına sahiptirler ki bu özelliği ile piezo seramiklere nispeten daha iyi bir sinyal iletimi sağlarlar ve ayrıca 0-85ºC sıcaklıkta çalışabilmektedirler (Measurement Specialties, Piezo Film Sensors Technical Manual) (LDT0-028K). PVDF sensörler; yüksek frekans aralığı, iyi esneme kabiliyeti ve yüksek hassasiyetleri açısından, küçük boyutlu ve mekaniksel olarak esneme gereksinimi duyan projelerde (Gu vd., 2005) piezo seremiklere nispeten tercih edilirler. Bu açıdan bu çalışmadaki gibi tekerlek gibi esneyebilen yapılarda kullanımı uygun malzemelerdir.

Piezoelektrik malzemenin yüzeyi üzerinde üretilen toplam yük aşağıdaki formülden bulunur:

$$q = D_i * dV_i \tag{3.3}$$

Burada; q malzemenin yükü, D_i ise malzmenin dielektrik yer değiştirmesidir ki denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$D_i = \sigma_j * d_{ij} \tag{3.4}$$

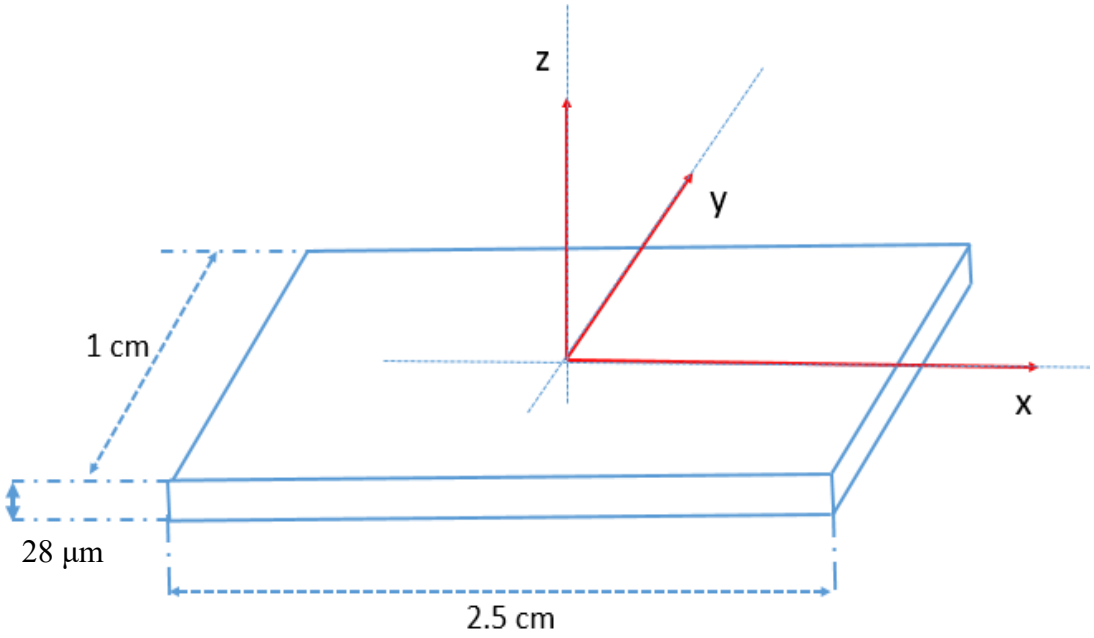
Burada; σ_j ve d_{ij} sırasıyla mekanik gerilme tepkisi ve piezoelektrik gerilme sabititir (Meitzler, 1988; Sirohi and Chorpa, 2000). Çizelge 3.2'de PVDF sensörlerinin diğer bazı fiziksel ve elektriksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. 2. PVDF piezoelektrik sensörünün bazı fiziksel ve elektriksel karakteristikleri

Sembol	**Parametre**	**Değer**	**Birim**
Y	Elastisite modülü	4-6	GPa
d_{31}	Piezoelektrik gerilme katsayısı	$23*10^{-23}$	C/N
d_{32}	Piezoelektrik gerilme katsayısı	$2.5\text{-}3*10^{-12}$	C/N
d_{33}	Piezoelektrik gerilme katsayısı	$-33*10^{-23}$	C/N
P	Pyroelektrik katsayısı	$30*1.0^{-6}$	$\frac{C}{m^2}$K
ε / ε_0	Dielektrik sabiti	10.7	ε_0 = 8.85pF/m

Source: Measurement Specialties Inc. (2008), Sirohi and Chorpa (2000).

Şekil 3.5'te çalışmada kullanılan PVDF sensörünün aksları gösterilmiştir. PVDF sensörlerinden yüksek frekans çıktısı alınabilmesi için kendi boyutlarının uzun kenarı yönünde eğilmeye maruz bırakılırlar. Bu nedenle bu sensörler uzun kenarları (x aksı yönü) boyunca tekerleğe monte edilmiştir.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan PVDF sensörlerin boyutları

3.1.5. Test aracının kurulumu ve sensörlerin tekerleğe montelenmesi

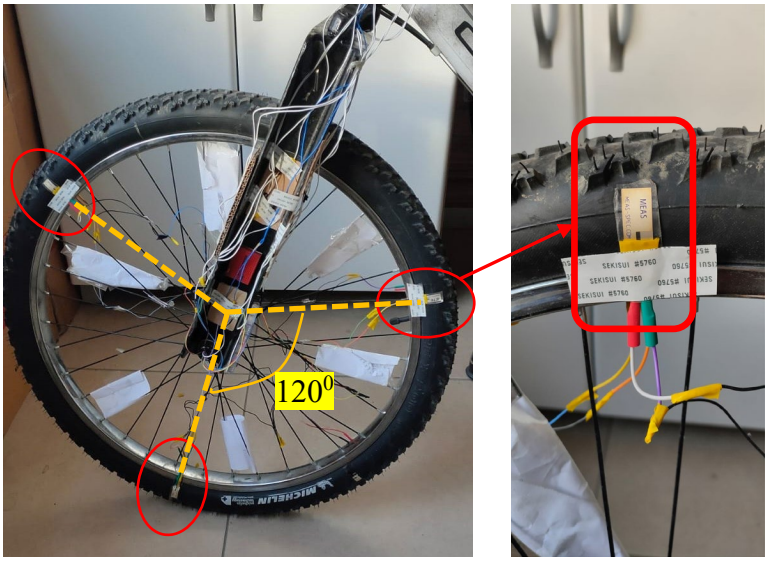
Bu çalışmada ölçüm aracı olarak 52-559 ölçülerinde pnömatik ve şişirilebilir tekerlekli bir dağ bisikleti kullanılmıştır. Tekerlek basıncının deformasyon üzerinde etkisi vardır. Tekerlek basıncı düşük olursa tekerlekte yüksek deformasyonlar meydana gelirken yüksek tekerlek basınçlarında düşük deformasyonlar oluşur. Bu çalışmada kullanılan tekerleğin basıncı 30 psi olarak ayarlanmıştır. Tekerlek-yol etkileşiminden faydalanılarak yol yüzeyinden toplanan sinyaller, yol profiline paralel olacak şekilde bisikletin gidon kısmına yerleştirilen VTS'ye (bkz. Şekil 3.2) iletilecektir. Bu amaçla, iletken kabloların janta takılmasını engellemek için bisikletin ön aksamındaki maşa kaldırılmış ve tekerleğin bir yüzü açık kalmak kaydı ile bu kısma bisiklet gövdesini ve sürücüyü taşıyabilecek boyutlarda bir çelik profil eklenmiştir. Böylece kablo takılmaları ve kesilmelerinin önüne geçilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Bisikletin veri alabilir duruma getirilmesi

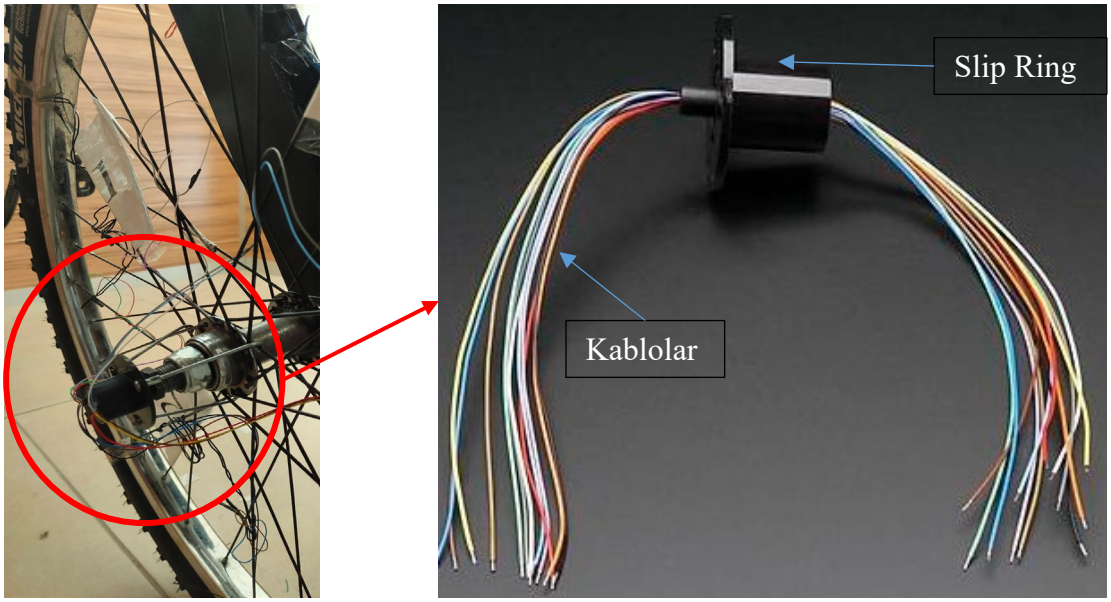
PVDF sensörlerin tekerlek üzerine konumlanması ve VTS ile bağlantısı için izlenen adımlar şöyledir:

- 6 adet PVDF sensörü, bisikletin ön tekerleğinin her iki tarafına simetrik olacak şekilde 120° açı ile monte edilmiştir (Şekil 3.7). Böylece bisikletin yalpalanması ile oluşabilecek farklı tekerlek deformasyon etkilerinin sensörler üzerinde oluşturacağı istemsiz gerilmeler ve dolayısıyla farklı elektrik akımları minimize edilmiştir.
- PVDF sensörlerinin uzun kenarı (x ekseni) yol eksenine 90^{o} olacak şekilde monte edilmiş ve 0,21 mm kalınlığında basınç algılayıcı çift taraflı bant kullanılarak yapıştırılmıştır (3M 9088). Çift taraflı bant yapıştırılmadan önce, sensörler ile lastik arasındaki aderansı arttırmak için lastiğin kauçuk yüzeyi önce zımparalanmış ve ardından alkollü kolonya ile temizlenmiştir.



Şekil 3.7. PVDF sensörler ve onların tekerlek üzerindeki konumları

- Sinyal verileri dönen bir nesneden sabit bir nesneye aktarılacaktır. Bazı çalışmalarda, bunun için kablosuz yöntemler kullanılmaktadır (Erdogan vd., 2011; Gondal, 2007; Hua vd., 2005; Yi, 2008). Ancak kablosuz veri iletimi ek bir güç kaynağı gerektirir ve bir miktar veri kaybı meydana gelebilir. Bu nedenle yollardan elde edilen sinyallerin test aracının gövdesine iletilmesi için Slip Ring tercih edilmiştir (bkz. Şekil 3.8). Slip Ring, herhangi bir engele maruz kalmadan dönen nesnelerden veri alınmasına izin veren, bir tarafı hareketli diğer tarafı sabit olan elektronik bir cihazdır. Çalışmada kullanılan Slip Ring'te 18 adet iletken kablo bulunmaktadır. Ayrıca 2-36A aralıklarda akım taşıyabilmekte ve 240 Volt gerilime kadar çalışabilmektedir (M220 Series Capsule Slip Ring). Bu değerler çalışmada üretilecek akım ve voltaj gerilimlerinin iletimi için oldukça yeterlidir. Slip Ring tekerlek jantının orta kısmına yerleştirilmiştir. Böylece bisiklet hareket halinde iken meydana gelebilecek kablo kesilmelerinin önüne geçilmiştir.
- PVDF sensörlerinin özdirenci çok yüksek olduğu için bu sensörler yüksek voltaj üretirler. Bu durum VTS'nin algılama eşiğinin (0-5V) üzerinde değerler verebilmekte ve dolayısıyla bazı veri kayıpları oluşabilmektedir. Ayrıca bu sensörlerdeki yüksek direnç sistemde gürültü sinyallerine neden olacaktır. Bu sinyallerin de filtrelenmesi gerekmektedir. Bu olumsuz durumları ortadan kaldırmak için sinyal koşul devresi kurulmuştur.



Şekil 3.8. Bisiklet tekerleğinin ortasına konumlandırılan slip ring

Bunun için, her sensöre paralel olarak kendi direncinden daha küçük bir direnç bağlanır ve sistemin eşdeğer direnci azaltılır. Fizikte;

$$V = I * R \tag{3.5}$$

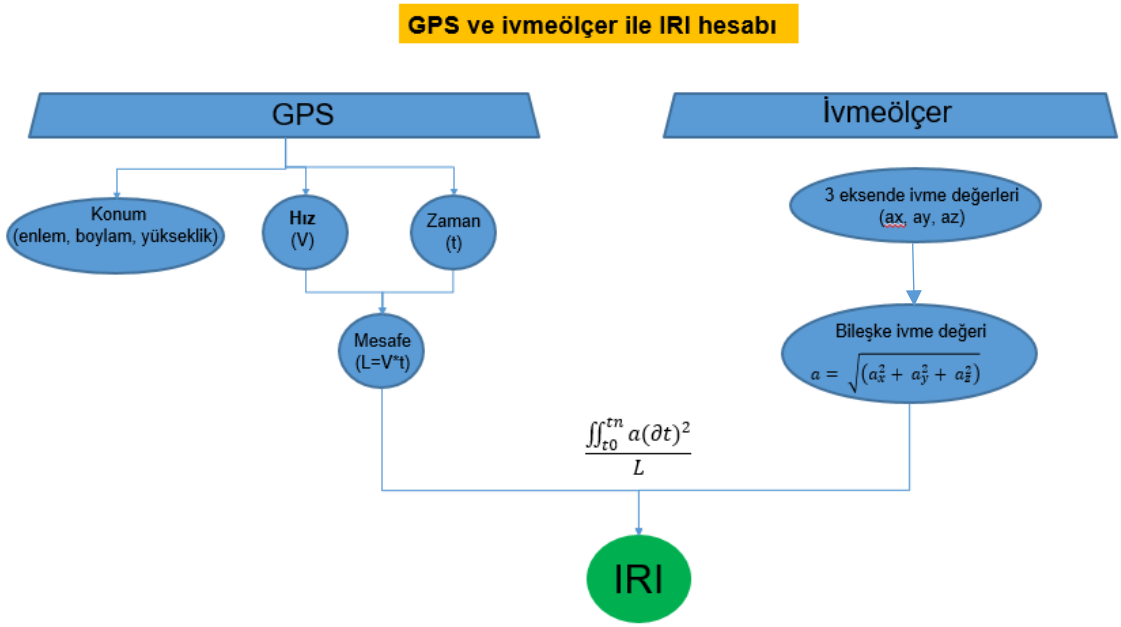
formülünden sabit bir akımda çıkış voltajının düşürülmesi için direncin düşürülmesi gerekmektedir. Fizikte ohm kanununa göre; birbirine paralel bağlı dirençler için eşdeğer direnç formülü;

$$R_{eşdeğer} = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n})^{-1} \tag{3.6}$$

şeklindedir. Burada önemli bir husus devreye bağlanılması gereken direnç değerinin ne kadar olduğudur. Bunun için bisikletin maruz kalabalieceği en kötü darbe durumu dikkate alınarak optimum bir direnç değeri bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada deneme-yanılma yöntemi ile her bir sensöre paralel bir şekilde 3.3 mΩ'luk dirençlerin bağlanması uygun bulunuştur. Böylece bu eşdeğer direnç ile devrenin direnci düşürülmüş ve dolayısıyla sensörün çıkış voltajı düşürülmüştür.

3.2. GPS ve İvmeölçer Sensörlerinden IRI Hesabı

Daha önce bahsedildiği üzere IRI hesabı için, boyuna yol profilinin toplam düşey yer değiştirme değerleri ve toplam ölçüm mesafesi bulunmalıdır. Bu değerler yeni kurulan test aracı ile elde edilecektir. Şekil 3.9'da şematik olarak gösterildiği gibi test düzeneğinin içinde bulunan GPS modülü ile aracın konum (enlem, boylam ve yükselti) ve hız bilgileri elde edilir ve böylece aracın seyahat mesafesi (L) rahatlıkla hesaplanabilir. Aracın ivmelenme değerleri de ivmeölçer verileri kullanılarak elde edilir. Aşağıda IRI'yı hesap etmek için bu değerlerin nasıl kullanılacağı gösterilmiştir.



Şekil 3.9. GPS ve ivmeölçer ile IRI hesabı

3.2.1. Ölçüm mesafesi hesabı

Seyahat mesafesi iki yöntem ile hesaplanabilir. Birincisi; her örneklem noktasında ölçülen seyahat hızı kullanılarak hesaplanır. Aşağıdaki formüle göre;

$$L = \int_{t=0}^{t=n} V_t \ \partial t \tag{3.7}$$

seyahat mesafesi ölçülebilir. Burada; V_t, t zamanında ölçülen hızdır. Bu değer GPS sensörlerinden doğrudan alınabilmektedir.

İkinci yöntemde ise Haversine formülü kullanılmaktadır. Haversine formülü; dünya üzerindeki herhangi iki noktanın enlem ve boylam bilgilerini kullanarak bu iki nokta arasındaki mesafeyi ölçebilmektedir. Ancak % 0,3'lük yanılma payı söz konusudur (https://www.movabletype.co.uk/scripts/latlong.html). GPS sensörü her örneklem noktasındaki enlem ve boylam bilgilerini alabilmektedir. Böylece seçilen iki nokta arasındaki mesafe bu noktaların konum bilgileri (enlem ve boylam) kullanılarak iki örneklem noktası arasındaki mesafe aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

$$d = 2 * r * arcsin\left(\sqrt{sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + cos\ cos\ (\varphi_1)\ * cos\ cos\ (\varphi_2)\ * sin\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}\right) \quad (3.8)$$

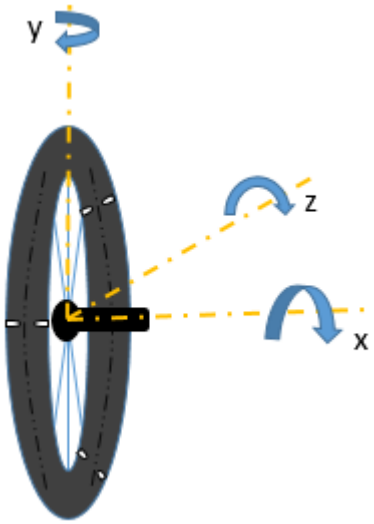
formülüne göre hesaplanabilir. Burada; φ_1 ve λ_1 sırasıyla başlangıç noktasının enlem ve boylam değerlerini, φ_2 ve λ_2 ise sırasıyla bitiş noktasının enlem ve boylam değerlerini r ise dünyanın yarıçapını (ortalama yarıçap = 6371 km) vermektedir.

Özellikle uzun mesafelerde dünyanın kürevi yapısından dolayı Haversine formülü tercih edilmektedir (Daidzic, 2017). Ancak bu çalışmada kullanılan GPS sensöründen (NEO6MV2) alınan enlem ve boylam bilgileri 2,5 m'ye kadar ölçüm hassasiyeti sağlamaktadır. Bununla beraber GPS sensörü aracın hızı noktasında 0,1 - 0,2 m/sn'ye kadar hassasiyet göstermektedir. Bu nedenle, hız bilgileri kullanılarak belirlenen mesafe değeri, enlem ve boylam bilgileri kullanılarak ölçülen mesafe değerinden daha hassastır. Bu nedenle bu tez çalışmasında ölçüm mesafesi denklem 3.7'ye göre hesaplanmıştır.

3.2.2. Düşey yer değiştirmenin belirlenmesi

GPS sensörleri bulunduğu konumun yükselti bilgilerini de verdiğinden bu yükselti değerleri kullanılarak düşey mesafe hesabı yapılabileceği teorik olarak mümkündür. Ancak GPS sensörlerinin yükselti hassasiyeti enlem ve boylam hassasiyetlerine göre oldukça zayıf kalmaktadır (Zang vd., 2018). Ayrıca örneklem frekansı 1 Hz değerindedir.

Yani saniyede yalnızca 1 defa kendini güncelleyebilmektedir. Bu nedenle GPS sensöründeki yükselti değerinin kullanılması düşey yer değiştirme hesabında hassas bir ölçüm sağlamayacaktır. Bu çalışmada düşey yer değiştirme hesabı için yüksek örneklem oranı sağlayan ivmeölçerlerden faydalanılmıştır. Düşey yöndeki ivmelenme verilerinin çift katlı integrali düşey yöndeki mesafe değerini verecektir. Ancak ivmeölçerin z aksı yönündeki ivmelenme değerleri (a_z) tam olarak düşey yöndeki ivmelenme (a) değerlerini vermemektedir. Bunun nedeni; bisikletin x, y ve z yönlerinde yalpalanma, yuvarlanma ve sapma hareketlerine maruz kalmasıdır. Bu hareketler ivmeölçerin 3 ekseninde de dönüş hareketi oluşturur (Şekil 3.10). Bu nedenle bisiklet hareket halinde iken bisikletin 3-eksendeki açısal hareketi sonucu ortaya çıkan tüm ivme değerleri (a_x, a_y ve a_z) kullanılmış ve bu 3 açısal hareketin bileşke ivmesi hesap edilmiştir. Çünkü bileşke ivmenin yönü her zaman yol yüzeyine dik olacaktır.



Şekil 3.10. Bisiklet tekerleğinin maruz kaldığı salınım hareketleri

Dünyanın yerçekimsel kuvveti nedeniyle ivmeölçer z aksı yönünde 1 g kuvveti (9,81 m/sn^2) vermektedir. Bu nedenle kullanılan ivmeölçerin (MPU-6050) kalibrasyonu bu bilinen yerçekimsel kuvvetin referans alınması ile yapılmıştır. Böylece bileşke ivmelenme değeri;

$$a = \sqrt{\left(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2\right)} - g \tag{3.9}$$

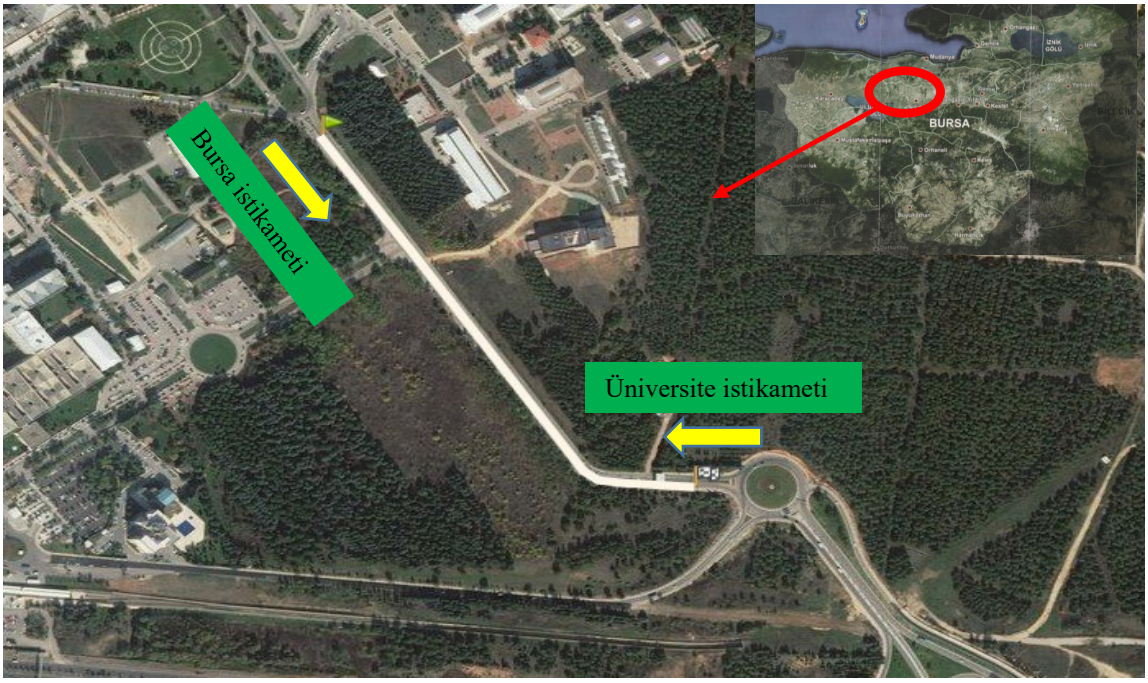
şeklinde olacaktır. Burada; a_x, a_y ve a_z değerleri sırasıyla x,y ve z akslarındaki ivmelenme değerlerine karşılık gelir. Bileşke ivme değerinden yerçekim ivmesi çıkarılarak anlık düşey ivme değeri bulunur.

3.3. Saha Çalışması

Bu bölüm, test yapılacak yolun belirlenmesini ve referans olarak kullanılacak lazer profilometre cihazının özelliklerini ve bu cihazın belirlenen yol üzerindeki ölçüm sonuçlarını içermektedir. Saha çalışması için Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünde çift şeritli bölünmüş bir yol tercih edilmiştir (Şekil 3.11). Yolun uzunluğu tek yön boyunca 660m'dir. Her iki yönde toplam uzunluk (Bursa istikameti ve Üniversite istikameti) 1320m'dir. Kaplama tipi bitümlü sıcak karışım asfalt bir yoldur (Şekil 3.12). Kaplama üzerinde ölçümü etkileyebilecek bitüm kusması, şiddetli yarıklar, lazer ölçümüne etki eden ışık yansıtıcı gibi parlayan cisimler bulunmamaktadır. Yolun sağ şeridi üzerinde kaldırıma yakın bölgelerde sıklıkla mazgal yapıları bulunmaktadır. Bu yapıların, ölçüm sırasında aracın sabit hızına etki etmesi söz konusudur. Ayrıca bu yapılar aracın ani manevra hareketlerine neden olabileceğinden ölçümün sıhhatini etkileyebilmektedirler. Bundan dolayı yolun sol şeridi ölçüm için tercih edilmiştir.

Geliştirilen yeni test aracının doğruluğunu kanıtlayabilmek için belirlenen yolun Uluslararası standartlara uygun ve referans ölçüm değerleri verebilecek bir ölçüm aracı ile ölçülmesi gerekmektedir. Böylece yeni test aracının hangi oranda referans IRI değerlerine yaklaştığı belirlenebilecek ve uygun kalibrasyonlar ile yeni aracın ölçümleri referans IRI'ya göre ayarlanabilecektir.

Bu amaç doğrultusunda belirtilen yolun referans IRI değerlerini belirlemek için Bursa Karayolları Müdürlüğü'nden lazer profilometre (Dynatest) cihazı getirilmiştir. Şekil 3.13'de gösterildiği gibi Lazer profilometre aracının ön tampon aksamında bir ölçüm kirişi bulunmaktadır. Bu kirişin sağ-sol tekerlek hizaları ve iki tekerlek ortası olan merkez aks kısmında ivmelenme değerlerini alabilen ivmeölçerler (1µg çözünürlüklü) bulunmaktadır. Ayrıca yine bu sağ ve sol tekerlek hizasında yol ile ölçüm cihazı arasındaki düşey mesafeyi belirlemek için lazer aksamı yerleştirilmiştir.



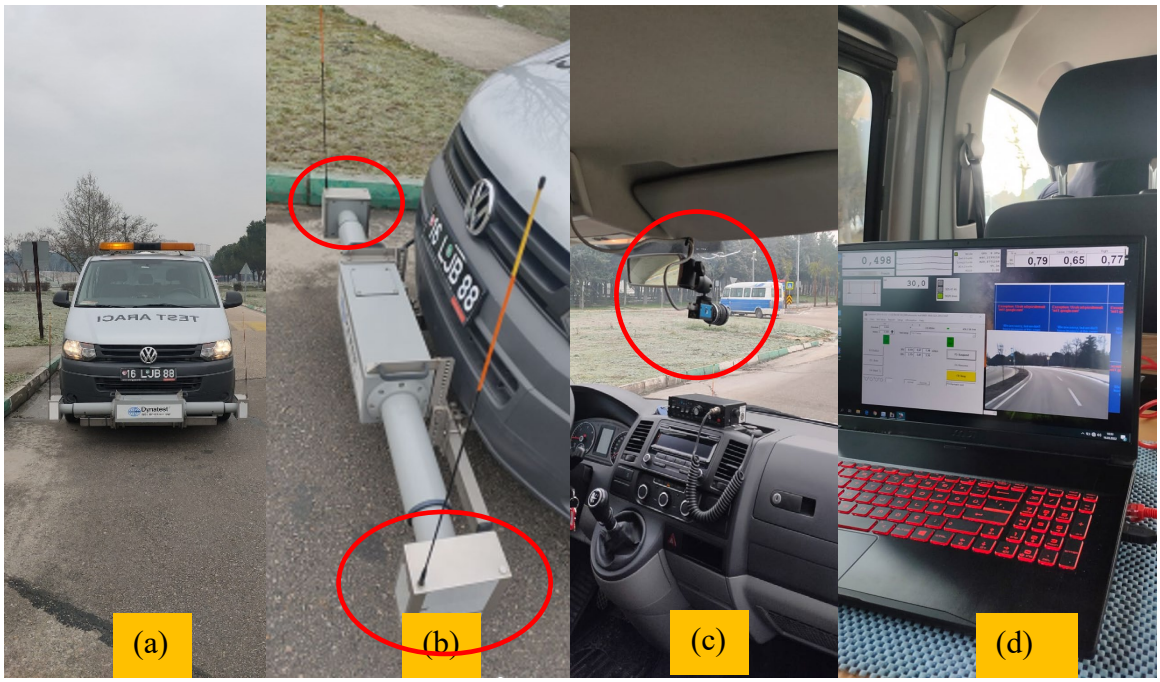
Şekil 3.11. Bursa Uludağ Üniversitesi çalışma bölgesi



Şekil 3.12. Çalışma yapılan sahasının görüntüsü

Bununla beraber, araç içinde bulunan kamera (Şekil 3.13-c) ile konumsal olarak yol durumlarının görüntüleri alınmakta ve araç içindeki bilgisayar (Şekil 3.13-d) ile sistemin çalışması kontrol edilmektedir. Lazer profilometre cihazının özellikleri Çizelge 3.3'te

verilmiştir. Burada, tekerlek üzerine düşen aracın kütlesi; M_1, araç yay sabiti; K_1, yay sönümleme sabiti; C_1, aks-tekerlek kütlesi; M_2, tekerlek rijitliği; K_2, tekerlek sönümleme katsayısı; C_2 olacaktır.



Şekil 3.13. (a) Referans lazer profilometre aracı, (b) laser profilometre ve ivmeölçer, (c) kamera, (d) kontrol ünitesi

Ölçüm hızının IRI değerleri üzerinde etkisi vardır. Bu nedenle ölçüm araçları ölçüm sırasında sabit bir hızla gitmeli ve ani ivmelenme hareketlerinden ve manevralardan kaçınmalıdır. Bu nedenle yeni geliştirilen test aracının (ölçüm bisikleti) normal şartlarda yapabileceği hız ile de uyumlu olması açısından 25 (± 1 km/sa) km/saat ölçüm hızı her iki araç için tercih edilmiştir.

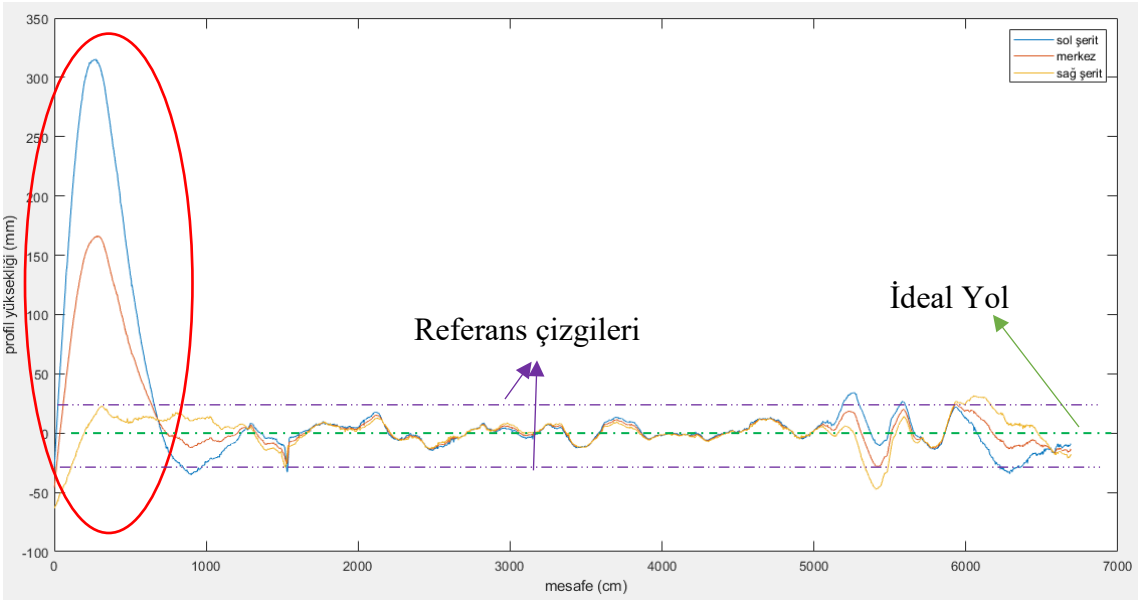
Çizelge 3. 3. Lazer Profilometre aracının fiziksel sabitleri

Parametre	IRI	Birim
K_1/M_1	63.3	s^{-2}
K_2/M_1	653	s^{-2}
M_2/M_1	0.15	-
C_1/M_1	6	s^{-1}

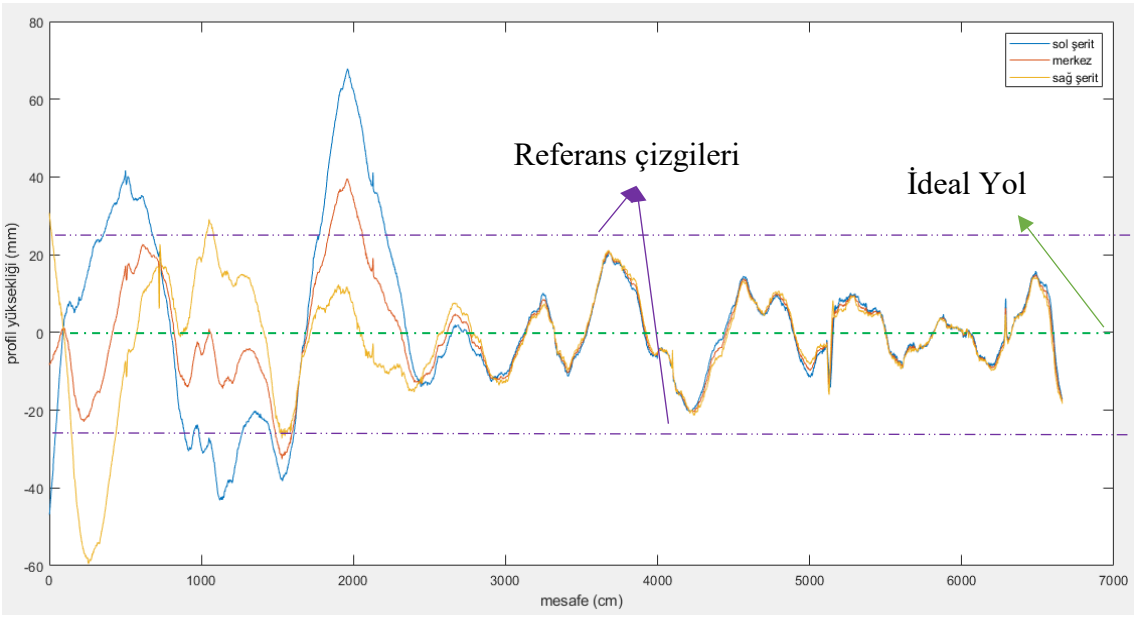
C_2/M_1	0	s^{-1}

Ölçüm hızının IRI değerleri üzerinde etkisi vardır. Bu nedenle ölçüm araçları ölçüm sırasında sabit bir hızla gitmeli ve ani ivmelenme hareketlerinden ve manevralardan kaçınmalıdır. Bu nedenle yeni geliştirilen test aracının (ölçüm bisikleti) normal şartlarda yapabileceği hız ile de uyumlu olması açısından 25 (± 1 km/sa) km/saat ölçüm hızı her iki araç için tercih edilmiştir. Referans ölçüm aracının hızı ve test yolunun uzunluğu, IRI'yı ölçmek için kabul edilebilir aralıklardadır ve bu nedenle bu değerler ölçümün sıhhatine zarar vermeyecektir (ASTM, 1985).

Saha çalışması referans lazer profilometre aracı ile Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünde yukarıda belirtilen çift şeritli bölünmüş bir yolun sol şeridinden her iki yönde ölçümler alınarak yapılmıştır. Yol yüzeyinden profilometre aracının sol tekerleği, sağ tekerleği ve iki tekerleğin ortası olmak üzere 3 farklı profil yükseklik değerleri ve IRI değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.14'te test yolunun boyuna profil değerleri gösterilmiştir. Buna göre, her iki istikametteki (Bursa ve Üniversite istikameti) sonuçları rahatça kıyaslayabilmek için düzgün yol profilinden ±2,5 cm (25 mm) fark olacak şekilde hatlar çizildi. Şekil 3.14 (a)'dan görüleceği gibi, profilometre aracının teste başladığı konumdan yaklaşık olarak 5 m (500 cm) sonrasında yol profil yükseklik değerlerinde ani bir sıçrama olduğu görülmektedir. Bu durum bu mevkide yol kaplaması üzerinde tümseğe benzer bir yol kusuru olduğunu göstermektedir. Ayrıca yine aynı şekilde yol profilinin 500. metresi ve sonrasında kaplama üzerinde hafif bozulmaların var olduğu anlaşılmaktadır. Bu iki kusurlu noktalar arasındaki kısımda ise ölçüm değerlerinin ideal yol profiline yakın sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Şekil 3.14 (b)'de ise yolun 50. ve 100. metrelerindeki yol kusurları hariç ölçüm değerlerinin genellikle ideal yol profiline yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla beraber, yeni ölçüm sistemi ile test yolunun sol şeridinin sağ tekerlek izi boyunca ölçümler yapılacaktır (sonraki bölümlerde anlatılmıştır). Öyleyse referans IRI değerlerinin sadece sağ tekerlek izi boyunca ortaya çıkan sonuçlara bakılabilir. Bu durum için hemen hemen her iki istikamet için de ideal yol profil hattına yakın ölçüm sonuçlarının çıktığı görülebilir.



(a)

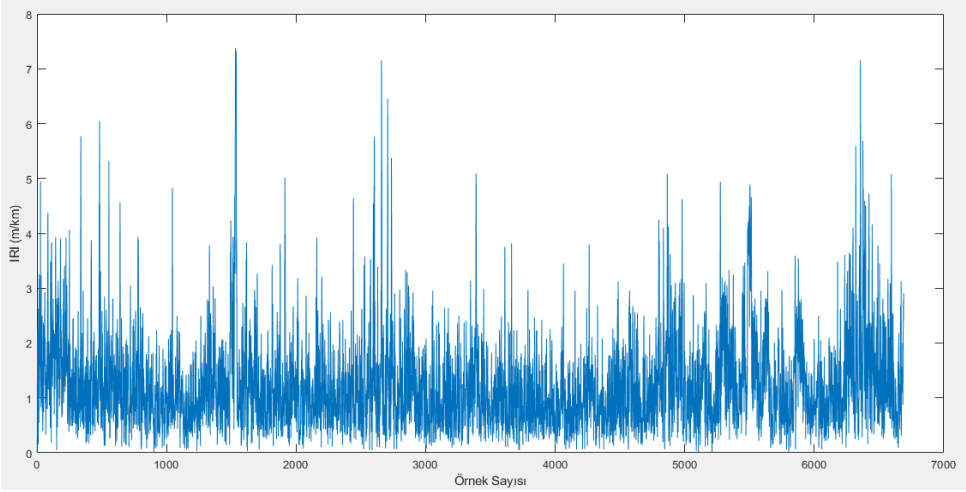


(b)

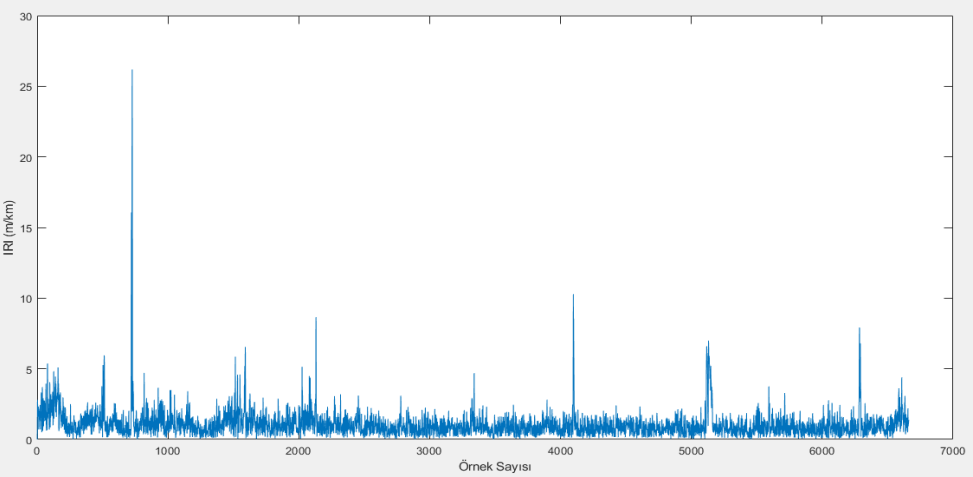
Şekil 3.14. Test yolunun boyuna profili: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti

Referans lazer profilometre aracı ile Bursa istikametinde ölçülen yolun ortalama IRI değeri 1,235 mm/m (m/km), Üniversite istikametinde ölçülen yolun IRI değeri ise 1,128 mm/m (m/km) olarak bulunmuştur. Böylece test edilen yolun ortalama IRI değerlerinin iyi olduğu ve bu yolun konforlu bir sürüşe izin verebildiği söylenebilir (bkz. Şekil 2.2).

Şekil 3.15'te ise lazer profilometre ile ölçülen test yolunun referans IRI değerleri gösterilmiştir. Bu değerler profilometre aracının sağ tekerlek izi boyunca elde edilen IRI değerleridir. Buna göre şeklin x ekseni 660 m uzunluğundaki test yolu üzerinden toplanan örnek sayısını ve y ekseni ise IRI değerlerini göstermektedir.



(a)



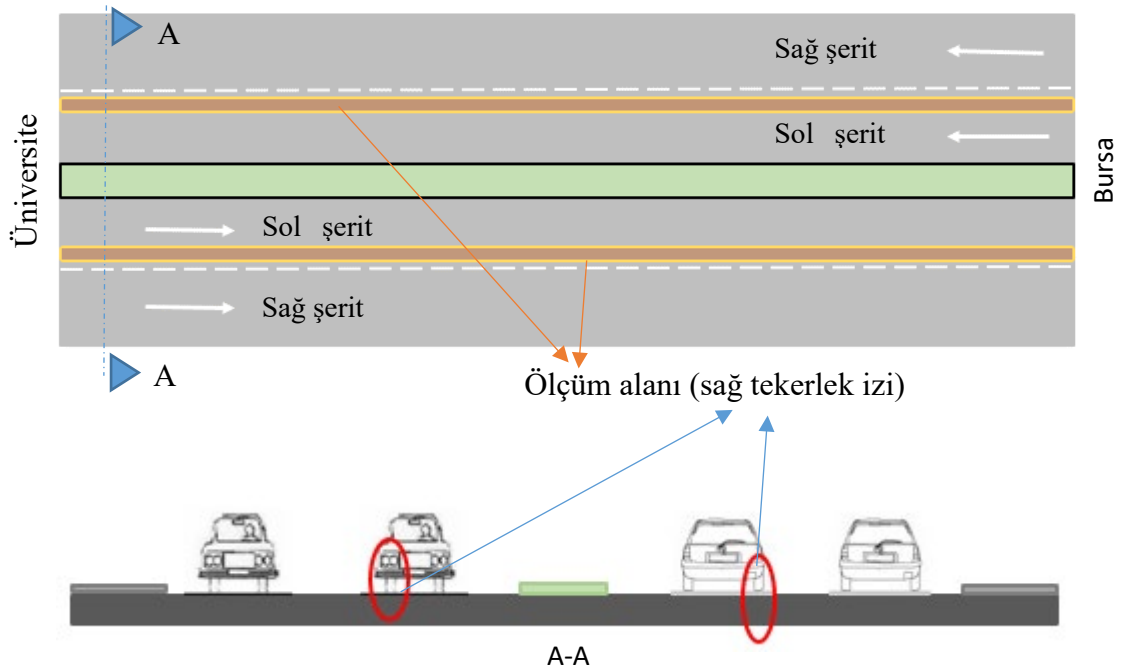
(b)

Şekil 3.15. Test yolunun lazer profilometre ile ölçülen IRI değerleri: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti

3.4. Veri Setinin Hazırlanması

Yeni geliştirilen test aracı ile lazer profilometre aracının sağ tekerlek izini takiben ölçüm alınmıştır. Test yolunun temsili bir gösterimi Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Buna göre test

yolunun sol şeridi boyunca profilometre aracının sağ tekerlek izi takip edilmiştir. Şekil 3.17'de ise saha çalışmasından bir kesit gösterilmiştir. Test aracı ile Bursa istikametinde 6 kez, Üniversite istikametinde ise 7 kez ölçüm yapılmıştır.



Şekil 3.16. Test yolunun ölçülen kısmı

25 km/h (± 1 km/h) hıza ulaşmak için, test aracı ölçüm başlangıç noktasından daha geride başlatılmış ve ölçüm noktasında istenen hıza ulaşılmıştır. Test aracının koordianat bilgileri ve sensör verileri referans profilometre cihazından elde edilen referans IRI değerleri ile Google Haritalar uygulaması kullanılarak konumsal olarak hizalandı ve GPS verileri tüm sensörlere enterpolason yöntemi ile eşleştirildi.

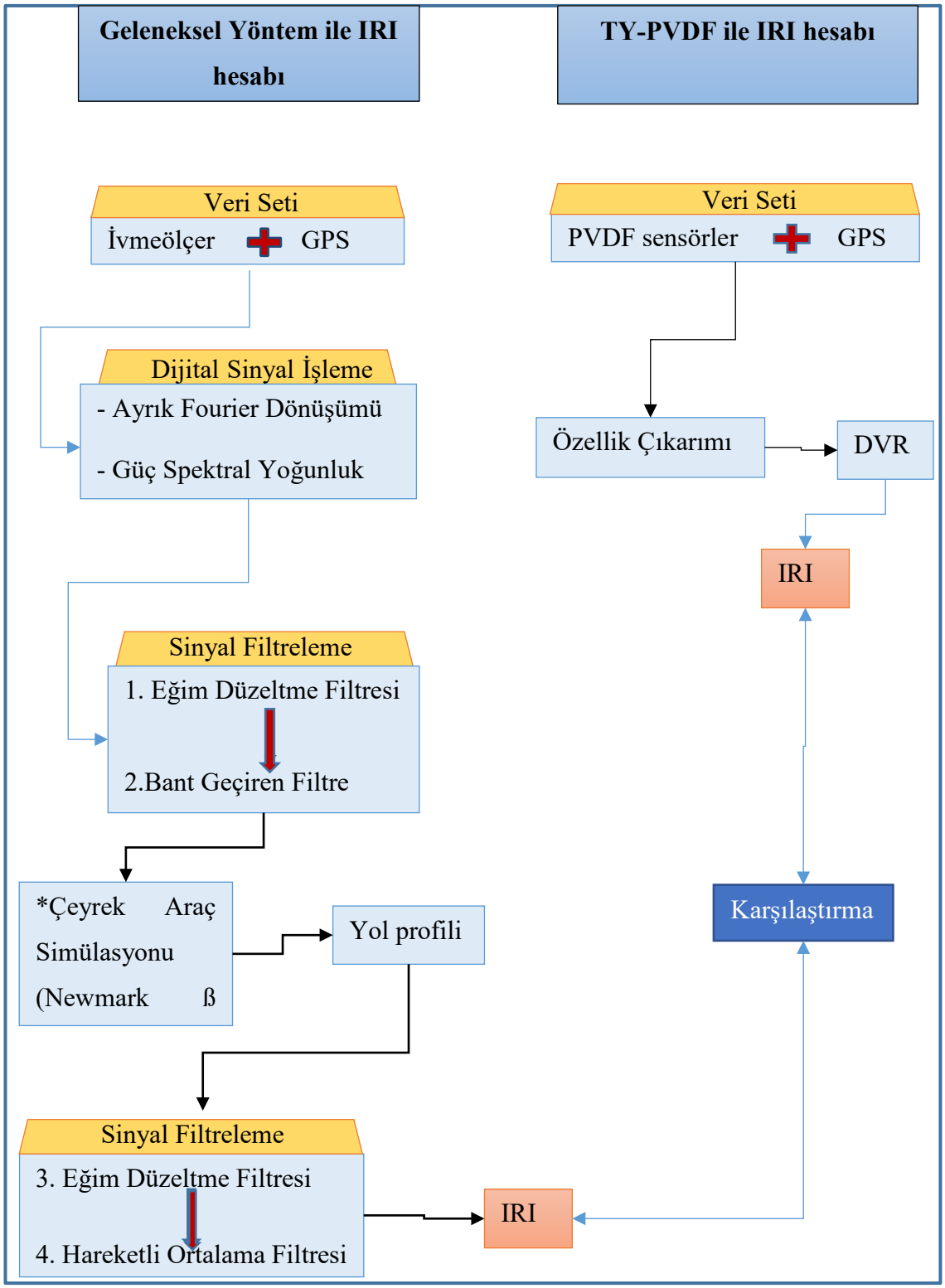
Şekil 3.18'de IRI'nın geleneksel yöntem ve TY-PVDF ile tahmini için izlenecek yolun akış şeması gösterilmiştir. Geleneksel yöntemler ile IRI'nın hesap edilmesi için izlenen yol şöyledir; öncelikle, ivmeölçer ve GPS sensörleriyle test yolundan farklı frekans ve dalga boylarında çeşitli sinyaller alınmış ve bu sinyal verileri VTS'de kaydedilmiştir.

Toplanan sinyal verilerine, çeşitli sinyal filtreleme (bant geçiren filtre, hareketli ortalama, eğilim düzeltme) işlemleri uygulanmıştır. Burada, ham sinyalin içinde bulunan gürültü sinyallerin temizlenmesi ve istenilen dalga boylarındaki sinyallerin kullanılması

amaçlanmıştır. Sonrasında filtrelenmiş sinyal verileri ile yolun boyuna profilini ölçmek için Newmark ß (bkz. Bölüm 3.5.2) yöntemi kullanılmış ve ölçülen yol profili üzerine eğim düzeltme ve hareketli ortalama filtreleri uygulanarak IRI hesap edilmiştir. TY-PVDF ile IRI hesabında izlenen yol ise; GPS ve kendisiyle eş zamanlı olarak çalışan PVDF sensörleri ile test yolundan veriler toplanmış ve VTS'ye kaydedilmiştir. PVDF sensörlerinden toplanan veriler ile yolun boyuna profiline en uygun eşleşebilecek özellik veri setleri çıkarılmıştır. Bu özellik veri setleri, IRI değerlerinin kestirimi için makine öğrenme algoritmalarından biri olan DVR'da girdi verisi olarak kullanılmış ve IRI değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.17. Bisiklet test aracı ile test yolu üzerinden ölçüm alınması



*Tek Serbest Dereceli sistem

Şekil 3.18. IRI'nın geleneksel yöntem ve TY-PVDF ile tahmin edilmesi için akış şeması

3.5. Geleneksel Yöntem ile IRI Hesabı

Bu yöntem, yol durumuna bağlı olarak sürüş sırasında test aracında meydana gelen ivmelenme değerlerinin belirlenmesine dayalıdır. Test aracının 3 eksendeki (x,y ve z) ivmelenme değerleri lazer profilometre aracının sağ tekerlek izi boyunca belirlenmiştir. Aracın yalpalanma gibi istenmeyen manevra hareketleri göz önünde bulundurularak bu 3 eksenin ivme değerlerinin bileşkesi hesap edilmiştir (bkz. Denklem 3.9). Böylece araç salınımlarından kaynaklı farklı ivmelenme değerleri minimize edilmiştir.

Çalışmada kullanılan test aracı TSD'li bir dağ bisikletidir. Yol profil hesabından önce hareket denkleminde (bkz. Denklem 3.1) gösterildiği gibi bu TSD sistemin ön tekerlek kısmının kütlesi (m), ön tekerleğin rijitliği (k_t) ve yine aynı tekerleğin sönümleme katsayısının (c_t) bilinmesi gerekmektedir. Kaplamanın düzgünsüzlüğünü ve yapısını incelemek amacıyla, bisiklet ile yapılan daha önceki çalışmalarda (Zang vd., 2018, Li vd., 2013, Qian vd., 2020, Wigan ve Cairney, 1985), bisiklet tekerleğinin rijitlik ve sönümleme katsayıları dikkate alınmamıştır. Hâlbuki TSD sistemlerinin dinamik hesaplamalarında bu değişkenlerin de hesaba katılması çalışmanın hassasiyetini artıracaktır. Bu çalışmada bisiklet tekerleğinin rijitliği ve çoğu zaman da ihmal edilen tekerleğin sönümleme katsayıları hesaba dâhil edilmiştir. Böylece bu açıdan da bu çalışmanın yenilikçi bir yönü olduğu söylenebilir.

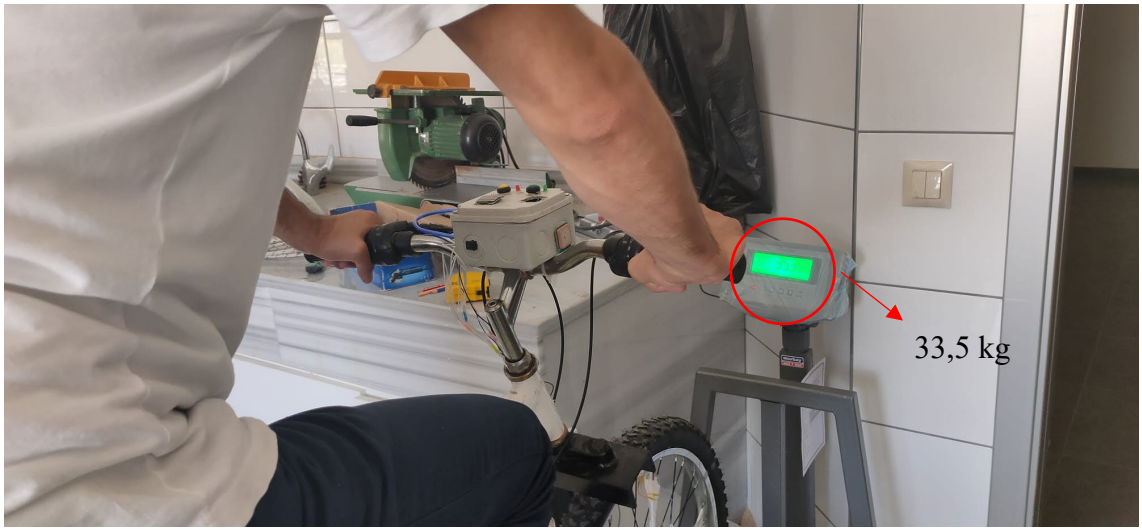
3.5.1. Tekerleğin rijitlik ve sönüm katsayı değerlerinin hesabı

Bir kütle-yay modelinin hareket denkleminde yay ve tekerleğin rijitlik ve sönümleme oranlarının bilinmesi modelin çözümlenmesinde önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan TSD'li sistemin rijitlik ve sönümleme katsayıları bulunmuş ve hareket denkleminde kullanılmıştır.

Rijitlik katsayısı (k_t)

Rijitlik, bir malzemenin bir yük altında bükülmeye, gerilmeye, veya deformasyona gösterdiği dayanımdır. Çalışmada bisikletin ön tekerleği üzerine eklenen yükün tekerlekte meydana getirdiği deplasman miktarı belirlenmiş ve tekerleğin rijitliği hesap edilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda, çalışmada kullanılan bisikletin ön tekerleğinin (30 psi basınç) zemine uyguladığı yüksüz ağırlık 11.25 kg'dır. 78 kg ağırlığındaki sürücü ile birlikte ön tekerleğin zemine uyguladığı yük 33.5 kg olmaktadır. Şekil 3.19'da bisikletin ön tekerleğine gelen yükün hesabı yapılmaktadır.

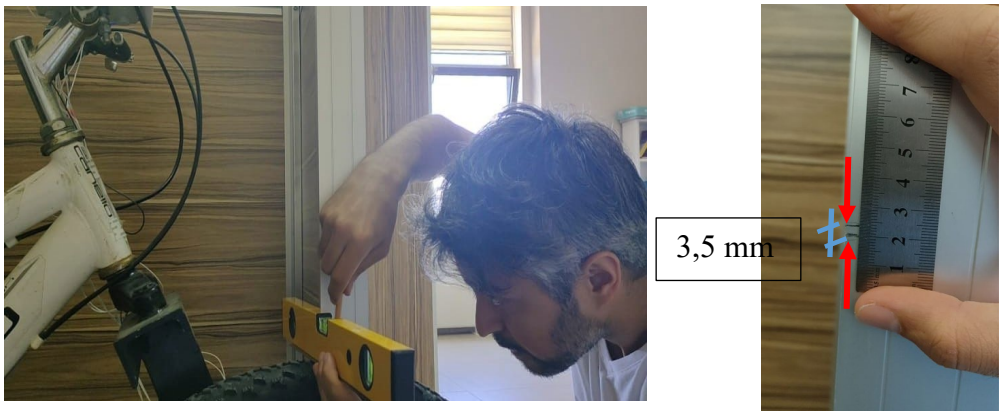


Şekil 3.19. Bisiklet ön tekerleğine gelen yükün hesabı

Sürücü yükü ile beraber bisikletin ön tekerleğinde meydana gelen yük artışı 33,5-11,25 = 22,25 kg (m) olmuştur. Böylece her iki yük eklendiği zaman bisikletin ön tekerleğinde meydana gelen deplasman (h_2) miktarı ile, sürücü yükü olmaksızın tekerlekte meydana gelen deplasman miktarı (h_1) arasındaki fark $h_2 - h_1 =$ 3,5 mm olarak ölçülmüştür. Tekerleğin rijitliği $k_t = m * g/(h_2 - h_1)$ formülünden: 63064,3 N/m olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 3.20). Burada g yer çekim ivmesidir ve 9,81 m/sn^2 alınmıştır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3. 4. Tekerleğin rijitlik hesabında kullanılan değerler

Inertia load (kg)	**Sürücü ekli yük (kg)**	**Fark**	**Deplasman miktarı (mm)**	**Yerçekimi ivmesi (m/sn^2)**	**Ön tekerlerin rijitliği (N/m)**
11,25	33,5	22,25	3,5	9,81	63064,3



Şekil 3.20. Tekerleğin rijitlik ölçümü

Sönümleme katsayısı (c_t)

Sönüm oranı, belirli bir yük altında tekerleğin serbest bir titreşim altında gösterdiği sönüm miktarına göre belirlenmiştir. Buna göre sürücü yükü dâhil edilmiş bisiklet tekerleğine demir bir kalıp ile serbest titreşim oluşturacak şekilde bir darbe vuruşu gerçekleştirilmiş ve tekerleğin titreşiminde meydana gelen azalma değeri hesap edilmiştir. Şekil 3.21'de ön tekerleğe uygulanan darbe sonucu tekerlekte meydana gelen zorlanmış titreşim ve sonrasında oluşan serbest titreşim gösterilmektedir.

Denklem 3.10'da görüldüğü gibi; sönümleme değeri (c), sönümleme oranı (ψ) ve kritik sönümleme (c_{kritik}) değerine bağlıdır.

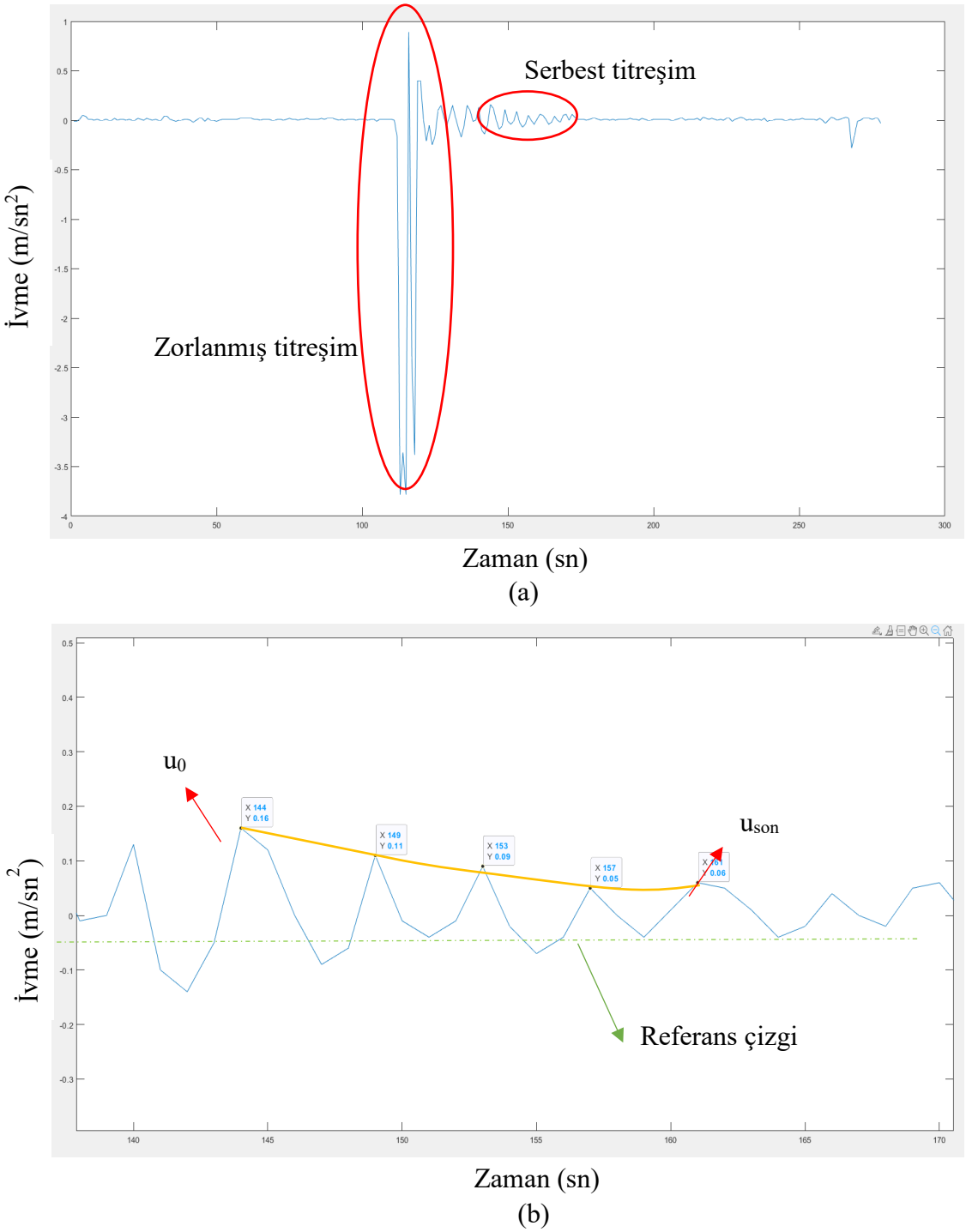
$$\psi = \frac{c}{c_{kritik}} \tag{3.10}$$

Öyleyse c_{kritik}ve ψ değerlerinin bulunması gerekmektedir. Buna göre;

$$\psi = \frac{1}{2 * \pi * \Delta_i} \, ln \frac{u_0}{u_{son}} \tag{3.11}$$

$$c_{kritik} = 2 * \sqrt{k_t * m} \tag{3.12}$$

formüllerinin çözümlenmesi gerekmektedir. Burada; Δ_i aralık sayısı, u_0 ve u_{son} (Şekil 3.21 b) sırasıyla sönümleme oranını bulmak için alınan ilk ve son genlik değerleri, k tekerlerleğin rijitlik değeri ve m ise tekerleğin temas yüzeyine uyguladığı yük miktarıdır.



Şekil 3.21. Tekerleğin serbest titreşim altında sönüm oranı: (a) tekerleğe darbe anı, (b) sönümleme

Şekil 3.21 (b)'de gösterildiği gibi, bisikletin ön tekerleğinin darbe sonrası serbest titreşime geçtiği anda okunan ilk değer (u_0) 0.16 g ve son değer ise (u_{son}) 0.06 g olmuştur. Denklem 3.11'e göre dört aralık değerinde (Δ_i) bulunan sönümleme oranı (ψ) değeri 0.062 (%6,62) olmuştur. Kritik sönümleme değeri ise denklem 3.12'ye göre 3100 Ns/m olmuştur. Böylece denklem 3.10'a göre sönümleme değeri (c) 192,2 Ns/m olarak elde edilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3. 5. Tekerleğin serbest titreşim sonucu bulunan sönüm değerleri

u_0 (g)	u_{son} (g)	ψ	c_{kr} (Ns/m)	c (Ns/m)
0,16	0,06	0,062 (%6,62)	3100	192,2

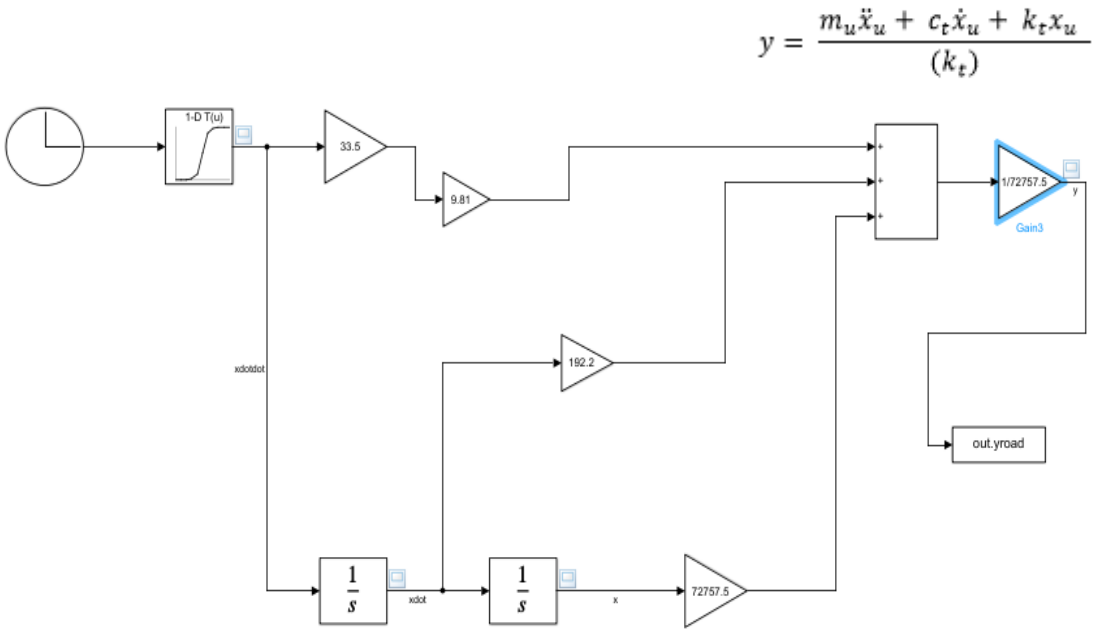
3.5.2. Yol profilinin hesap edilmesi

Yol profilinin düşey yönde yer değiştirmesinin hesaplanması için ivmelenme verilerinin çift katlı sayısal entegrasyonu alınmalıdır. Çift katlı sayısal entegrasyon için; Simpsons, trapezoidal, kümülatif trapezoidal, kümülatif toplam, Riemann ve Newmark β metodu gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. Eshkabilov ve Yunusov (2018), bu yöntemler içinde Newmark β metodunun yol profillerinin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesi için kullanılması gereken en uygun yöntem olduğunu söylemişlerdir. Bu çalışmada da çift katlı sayısal entegrasyon için Newmark β yöntemi kullanılmıştır. Newmark β yöntemi, özellikle dinamik sistemleri modellemek için ikinci mertebeden diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan bir sayısal entegrasyon yöntemidir (Newmark, 1959). Denklem 3.13'te Newmark β denklemi gösterilmiştir.

$$\dot{z}_{i+1} = \dot{z}_i + (\ddot{z}_i + \ddot{z}_{i+1})\frac{\Delta t}{2}$$
$$z_{i+1} = z_i + \Delta_t \dot{z}_i + \frac{1-2\beta}{2}\Delta t^2 \ddot{z}_i + \beta \Delta t \ddot{z}_{i+1} \qquad , i>1 \qquad (3.13)$$

Burada; z_i, $\dot{z}_i$ve $\ddot{z}_i$ sırasıyla yer değiştirme, hız ve ölçülen ivme değerleridir. Δt iki veri arasındaki zaman adımıdır, β ise modelin önemli bir düzeltme faktörüdür (β = 0.5 alınır).

Matlab Simulink aracı diferansiyel denklemlerin çözümünde kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle Newmark β denkleminin çözümünde Simulink aracından faydalanılmıştır. Şekil 3.22 ve Çizelge 3.6'da sırasıyla çalışmada kullanılan TSD'ye göre Simulink aracında oluşturulan blok diyagramı ve bu blok diyagramda kullanılan fiziksel sabitler gösterilmiştir. Böylece, düşey yol profili (bkz. denklem 3.2) Newmark β yöntemi kullanılarak Simulink ortamında analiz edilmiştir. Bu analizin sonuçları bölüm 4.1'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 3.22. Diferansiyel denkelmin çözümü için Simulink'te oluşturulan blok diyagramı

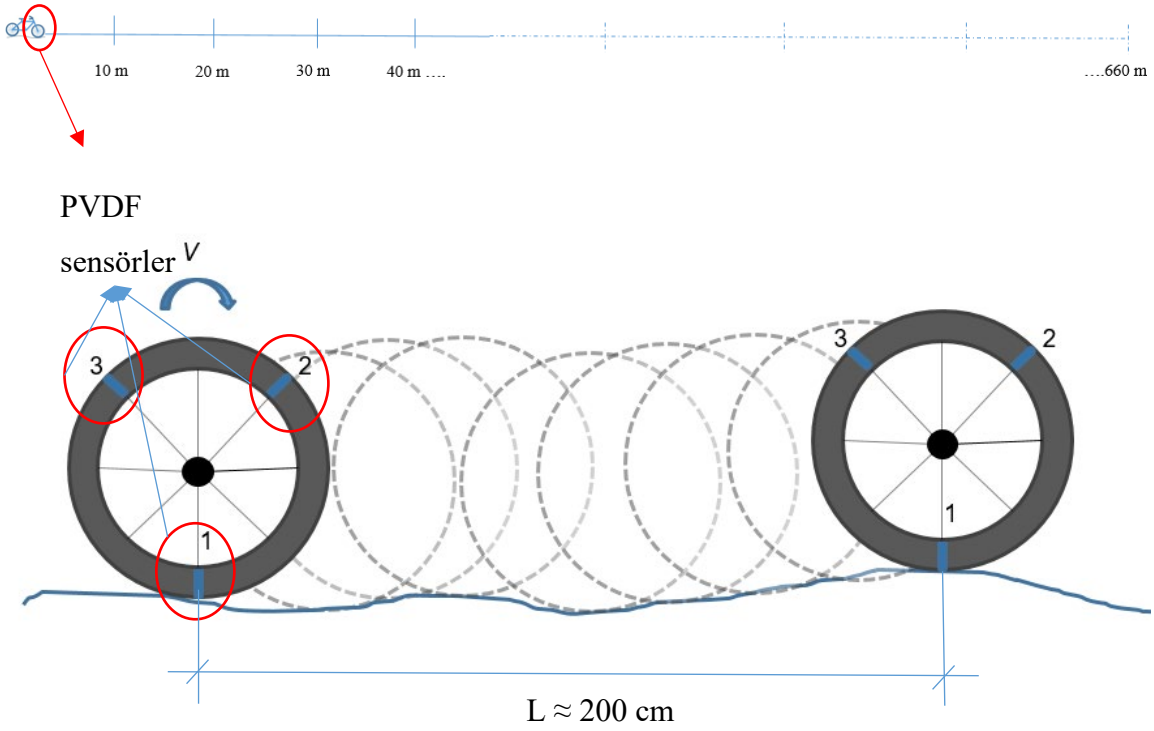
Çizelge 3. 6. Test aracında kullanılan fiziksel sabitler

Değişkenler	Sabitler	Değer	Birim
Aracın Kütlesi	m	33	kg
Tekerleğin rijitliği	k_t	72757,5	N/m
Sönümleme	c_t	192,2	Ns/m

3.6. TY-PVDF

Bu yöntemde IRI'yı hesap etmek için PVDF sensörler kullanılmıştır. 6 adet sensör tekerleğin her iki tarafında 3'er adet olmak üzere simetrik bir şekilde 120^0 açı ile bisikletin

ön tekerleğine monte edilmiştir (bkz. 3.1.5). 52-559 ölçülerindeki (26 inç x 2,1 inç) tekerleğin 1 tam turu yaklaşık olarak 2 m civarındadır (Şekil 3.23). Böylece bu tekerlek ile yol üzerinden 2m/3 = 60-65 cm aralığında veri alınabilmektedir. Bu durum tahmin edilmeye çalışılan IRI değerlerinin bu çalışma için olması gereken minimum mesafesini göstermektedir. Bununla beraber test aracı, tekerleğinin bir tam turunda yaklaşık olarak 2m yol kat etmektedir. Bu çalışmada PVDF sensörlerinin her birinin en az 5 defa yol ile teması göz önünde bulundurulmuş ve böylece incelenen yol 10 m'lik kesimlere ayrılarak saha verileri elde edilmiştir. Ayrıca aralık miktarı artırılarak ölçümlerdeki olası değişikliği gözlemlemek için yolun uzunluğu ile orantılı olması için 30m, 60m ve 100m aralıklarla da ölçümler yapılmış ve elde edilen verilerden onların ayırt edici özellikleri çıkarılmış ve bu özellikler DVR algoritmasında girdi verisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.23. Tekerleğin bir tam turu

3.6.1. Özellik çıkarımı

Test aracından TY-PVDF ile her iki yönde 580914 sensör verisi elde edilmiştir. DVR algoritmasında tüm bu verilerin işlenmesi çok zaman kaybına neden olacak ve bu algoritmanın performansını düşürecektir. Bu nedenle elde edilen sensör verilerinin öne

çıkan özellikleri (tüm sensör verilerinin toplamı, ortalaması, standart sapması, her bir sensörün cos ve sin değerleri gibi.) belirlenmiştir. Bu öne çıkan özellikler için optimal altküme oluşturulmuştur. DVR algoritmasında etkisi olmayan özellikler verideki gürültüyü artırdığı ve eğitim sürecini zorlaştırdığı için özellik altkümesinden çıkartılmıştır. Hazırlanan özellik alt kümesinin %85'i eğitim verisi ve %15'i de test verisi olacak şekilde DVR algoritmasının performansı test edilmiştir.

Özellik altkümeleri sahip oldukları niteliklere göre farklı gruplara ayrılmıştır. Böylece her bir özellik kendi içinde farklı gruplar halinde değerlendirilmiştir. İlk özellikte; her bir sensörün yukarıda belirtilen yol kesim (10m, 30m, 60m ve 100m) aralıkları için tüm enerji değişimlerinin toplamı dikkate alınmış ve 6 sensör için 6 grup elde edilmiştir. j sensör numarasını, x sensörün anlık kaydettiği voltaj değeri olmak üzere, her bir sensörün 10m, 30m, 60m ve 100m'lik mesafe boyunca toplam enerjisi aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$F_{1j} = \sum_{i=1}^{N} (x)_i : j = 1, 2, \ldots .6 \tag{3.14}$$

İkinci özellikte; her bir sensörün ortalama değeri belirlenmiş ve denklem 3.15'te verilmiştir. İkinci özellik te toplam 6 gruptan oluşmaktadır.

$$F_{2j} = \frac{1}{N} F_{1j} : j = 1, 2, \ldots 6 \tag{3.15}$$

Üçüncü özellikte tüm sensörlerin toplam değeri alınmış ve aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$F_3 = \sum_{j=1}^{6} \sum_{i=1}^{N} (x)_{ji} \tag{3.16}$$

Dördüncü özellik olarak, F_3'ün ortalama değeri alınmış ve aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$F_4 = \frac{F_3}{N} \tag{3.17}$$

Beşinci özellikte, her bir sensörün belirtilen mesafeler (10m, 30m, 60m ve 100m) boyunca standart sapmaları bulunmuş ve denklem 3.18'de belirtilmiştir.

$$F_5 = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}} : j = 1, 2, \ldots 6 \quad (3.18)$$

ve son olarak ta altıncı ve yedinci özellik için; her bir sensörün cos ve sin değerleri alınmış ve denklem 3.19 ve 3.20'de;

$$F_{6j} = \sum_{i=1}^{N} \cos(x)_i : j = 1, 2, \ldots 6 \quad (3.19)$$

$$F_{7j} = \sum_{i=1}^{N} \sin(x)_i : j = 1, 2, \ldots 6 \quad (3.20)$$

şeklinde verilmiştir. Böylece, birinci, ikinci, beşinci, altıncı ve yedinci gruplarda 6 şar olmak üzere, toplam 32 özellik seçimi yapılmış ve bunlar DVR'nun girdi verileri olarak belirlenmiştir (Çizelge 3.7). Çıktı olarak, her bir 10m, 30m, 60m ve 100m'ye karşılık gelen, IRI değerleri tanımlanmıştır. Böylece çıkarılan bu özellikler DVR algoritmasının girdi verisi olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3. 7. Özellik setlerinin sahip oldukları grup sayıları

Özellik	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
Grup Sayısı	6	6	1	1	6	6	6

3.6.2. Performans ölçütleri

Çalışmada IRI'yı hesap etmek için kullanılan geleneksel yöntem ve TY-PVDF yönteminin performansnı değerlendirmek için dört değerlendirme ölçütü kullanılmıştır. Bunlar; ortalama mutlak hata (mean absolute error, MAE):

$$\text{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|IRI_{i,gerçek} - IRI_{i,tahmin}\right| \tag{3.21}$$

, ortalama mutlak yüzdelik hata (mean absolute percentage error, MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|IRI_{i,gerçek} - IRI_{i,tahmin}\right|}{IRI_{i,gerçek}} \times 100 \tag{3.22}$$

, ortalama kare hata (mean squared error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(IRI_{i,gerçek} - IRI_{i,tahmin})^2 \tag{3.23}$$

ve kök ortalama kare hata (root mean squared error, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(IRI_{i,gerçek} - IRI_{i,tahmin})^2} \tag{3.24}$$

şeklindedir. Burada, $IRI_{i,gerçek}$, $IRI_{i,tahmin}$ değerleri sırasıyla verinin gerçek ve tahmin edilen IRI değerlerini göstermektedirler. N ise toplam veri sayısıdır. Bu hata ölçüm metrikleri ne kadar küçük olursa tahmin edilen IRI hata değerinin de o ölçüde az olduğu anlaşılır.

3.6.3. Destek Vektor Regresyon (DVR)

Girdi ve çıktı verileri arasında doğrusal bir ilişki bulunmadığı durumlarda veriler arasındaki ilişkinin çözümlenmesi için makine öğrenme algoritmaları kullanılabilir. Bu çalışmadan elde edilen gerçek ve tahmini IRI değerleri arasındaki ilişki de doğrusal olmadığından dolayı bu veriler arasındaki ilişkinin çözümlenmesi için destek vektör

regresyonu (DVR) algoritması kullanılmış ve bu algoritmanın modellenmesi ve değerlendirilmesi MATLAB programında yapılmıştır.

DVR'ın anlaşılabilmesi için öncelikle Destek Vektor Makineleri (DVM) algoritmasının bilinmesi gerekmektedir. DVM, verilerin sınıflandırılması ve regresyonu için kullanılan yeni ve gözetimli bir makine öğrenme algoritmasıdır. Farklı veri kümeleri arasında bir hiper düzlem oluşturularak bir kenar boşluğu oluşturulur ve çözüm optimal olduğunda kenar boşluğunun genişliği en büyük seviyeye ulaşır. Sınıflandırıcının genelleme hatası minimuma ulaştığında optimal çözüm elde edilir ve bu durum iki hiper düzlem arasındaki en yüksek aralıkta sağlanır. Optimal aralığı temsil eden veri alt kümesine destek vektörü denir. DVM'nin amacı sınıflar arasındaki aralığı en büyük tutmak yoluyla en uygun çözümü bulmaya çalışır (Mia ve Dhar, 2019). DVM esas olarak sınıflandırma problemleri için kullanılmaktadır. Bununla beraber, Vladimir Vapnik (1996) tarafından regresyon problemleri için DVR olarak bilinen DVM'nin bir versiyonu tanıtılmıştır. DVR algoritması ile geleneksel veya diğer yapay zekâ teknikleri yaklaşımı ile oldukça zor olan regresyon problemlerinin çözümünde kolaylık sağlandığı görülmüş ve böylece DVR, regresyon problemlerinin çözümünde büyük ilgi görmeye başlamıştır (Mia ve Dhar, 2019).

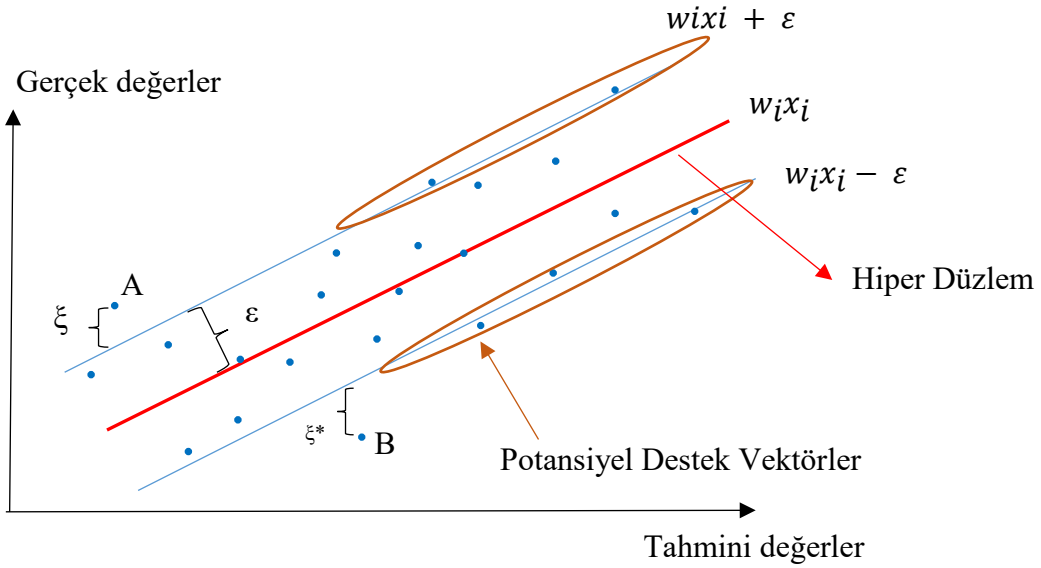
DVM'in bir çeşidi olan DVR'nin asıl amacı girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki regresyon çizgisinin en uygun durumunu bulmaktır (Abdollahpour vd., 2020). Başka bir deyişle, belirli bir aralıkta maksimum veriyi en küçük hata ile alabilecek doğru bulunmaya çalışılır. DVR kullanmanın ana avantajlarından biri, çok az sayıda ayarlanabilir parametreye sahip olması ve bu da daha az çaba gerektirmesi ve uygun mimariyi bulmak amacıyla deneme ihtiyacını azaltmasıdır (Mia ve Dhar, 2019).

DVR'da bir eğitim veri seti:

$$D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \tag{3.25}$$

şeklinde olsun. Burada; x_i N boyutlu girdi değişkenlerinden herbiri, y_i çıktı değişkenleri olmak üzere; $f(x) = \langle \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x} \rangle + b$ fonksiyonu bulunmak isteniyor. Burada $\boldsymbol{w}$ normal vektör, $\boldsymbol{x}$ ise girdi vektörüdür ve eş boyutlu vektörel bir çarpım söz konusudur.

DVR'da amaç öyle bir f(x) fonksiyonunun bulunmasıdır ki y_i gerçek değerleri en fazla ε miktarı kadar bir tolerans aralığına izin verecek şekilde tahmin edilebilsin ve bu iki düzlem arasındaki ε mesafesi en düşük olsun. Burada ε hata (tolerans) parametresidir. Şekil 3.24'te iki paralel düzlem arasındaki kalın (kırmızı) çizgi f(x) fonksiyonunu göstermektedir. Bu f(x) fonksiyonu ± ε'a eşit veya daha düşük hata miktarları ile tahmin edilmelidir.



Şekil 3.24. SVR'nin basit bir gösterimi

Böyle bir f(x) fonksiyonun bulunması için minimum bir w vektörü aranır. Bunun için, w vektörünün normu minimize edilir ki bu duruma amaç foksiyonu denir.

$$\text{Amaç fonsiyonu} = \min_w \frac{1}{2} \|w\|^2 \tag{3.26}$$

$$\text{Kısıtlar} \quad \begin{cases} y_i - \langle w, x_i \rangle - b \leq \varepsilon \\ \langle w, x_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases} \tag{3.27}$$

Burada DVR algoritması amaç fonksiyonunu olabildiğince iyi çözer ancak Şekil 3.24'te A ve B ile belirtilen bazı veriler hala çizilen düzlemin dışında kalmaktadır. Öyleyse ε'dan büyük ve ξ uzaklığında belirtilen bu A ve B aykırı değişkenlerini de hata terimleri olarak hesaba katmak gerekecektir. Hiper düzlemden sapan veya ε'nun dışında kalan (A ve B noktaları gibi) herhangi bir değere aykırı değerler denir. Bu algoritmada bu düzlemin dışında kalan noktalarında olabildiğince az tutulması gerekmektedir. Bu nedenle bu değişkenler de amaç fonksiyonuna (denklem 3.26) eklenirse yeni amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\text{Amaç fonksiyonu} = \quad min\frac{1}{2}\,\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n}|\xi_i + \xi_i^*| \tag{3.28}$$

Bu durumuda yeni kısıtlarda aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\text{Kısıtlar} \quad \begin{cases} y_i - \langle w_i\, x_i\rangle - b \;\le\; \varepsilon + \xi_i \\ \langle w_i\, x_i\rangle + b - y_i \;\le\; \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \;\ge\; 0 \end{cases} \tag{3.29}$$

Burada C ayarlanabilir bir kontrol parametresi olarak söylenebilir. Yani C arttıkça hiper düzlem dışındaki noktalara olan toleransımızda artar.

Veriler arasına çizilen hiperdüzlem boyutunun olabildiğince küçük tutulması gerektiğinden yukarıda bahsetmiştik. Yani en küçük aralıkta en fazla veri bu hiper düzlemin içinde bulunması gerekmektedir. Bunun için ε değerinin en küçük yapılması için bir optimizasyon işlevi uygulanacaktır. Bunun için optimizasyon problemlerinin çözümünde max ve min değerleri bulmak için Lagrange denklemlerinden faydalanılmıştır. Lagrange teoremine göre optimizasyon denklemimiz;

$$L\left(w, \xi, \xi^*, \lambda, \lambda^*, \alpha,\ \alpha^*\right) = \frac{1}{2}\,\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{N}\xi_i + \xi_i^* - \sum_{i=1}^{N}(\lambda_i\xi_i + \lambda_i^*\xi_i^*) \tag{3.30}$$

$$- \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(\varepsilon + \xi_i - y_i + \langle w, x_i \rangle + b)$$

$$- \sum_{i=1}^{N} \alpha_i^*(\varepsilon + \xi_i^* + y_i - \langle w, x_i \rangle - b)$$

şeklinde olacaktır. Burada; L, Lagrange ve $w, \xi, \xi^*, \lambda, \lambda^*, \alpha, \alpha^*$ ise Lagrange çarpanlarıdır. Tepe noktası koşulundan, L'nin asal değişkenlere (w, b, ξ_i, ξ^*) göre kısmi türevlerinin optimal bir sonuçta 0 olması gerekmektedir. $\alpha_i^{(*)}$; α_i ve α_i^* ve $\partial_{\xi i}^{(*)}$; ξ_i ve ξ_i^* ifadelerinin ikisini de kapsadığını göz önünde bulundurarak;

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = w - \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i = 0 \tag{3.32}$$

$$\partial_{\xi_i^{(*)}} L = C - \alpha_i^{(*)} - \lambda_i^{(*)} = 0 \tag{3.33}$$

olacaktır. 3.31, 3.32 ve 3.33 denklemleri 3.30 denkleminin yerine yazılarak denklem 3.34'te gösterilen Lagrange optimizasyon problemi ortaya çıkar;

$$maks. \begin{cases} -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*)\langle x_i, x_j \rangle \\ -\varepsilon \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^{N} y_i(\alpha_i - \alpha_i^*) \end{cases} \tag{3.34}$$

$$kısıtlar = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \; ve \; \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, \mathrm{C}] \tag{3.35}$$

Denklem 3.34 türetilirken λ_i, λ_i^* ikili değişkeni $\lambda_i^{(*)} = C - a_i^{(*)}$ (denklem 3.33) olarak yeniden formüle edilmiştir. Böylece denklem 3.32 yeniden yazılırsa;

$$w = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i \tag{3.36}$$

olacaktır. Böylece DVR algoritması için formülümüz:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*) \langle x_i, x \rangle + b \tag{3.37}$$

şeklinde olacaktır. Bu ifade doğrusal DVR için ifade edilmektedir. Halbuki veri kümesindeki özellikler doğrusal bir özellik taşımazlar ve bu özelliklerin doğrusal olmayan formlara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için çekirdek fonksiyonları kullanılır. Veri kümesindeki özellikler için çekirdek fonksiyonları kullanılarak doğrusal olmayan verilerin özellikleri algoritmada çözümlenir. Öyleyse;

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*) \langle \emptyset(x_i), \emptyset(x) \rangle + b \tag{3.38}$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} (\alpha_i - \alpha_i^*) K\langle x_i, x \rangle + b \tag{3.39}$$

ile artık 3 boyutlu bir düzleme geçilmiş olur. Burada; $\emptyset(x)$ x değişkeninin dönüşümünü temsil eder. Dönüşüm için kullanılan; Lineer, Polinominal ve Gauss çekirdek fonksiyonu en bilinen çekirdek fonksiyonlarıdır. Bu çalışmada Gauss çekirdek fonksiyonu kullanılmış (Denklem 3.40) ve ε = 0,01 olarak belirlenmiştir.

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3.40}$$

Burada, σ standart sapmadır. Böylece gauss çekirdek fonksiyonu ile doğrusal olmayan veriler arasında uygun bir dönüşüm yapılarak DVR algoritması çözümlenir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde geleneksel yöntem ile ve TY-PVDF ile bulunan IRI bulguları sunulmuş ve iki yöntem birbiriyle karşılaştırılmıştır.

4.1. Geleneksel yöntem ile IRI tahmini

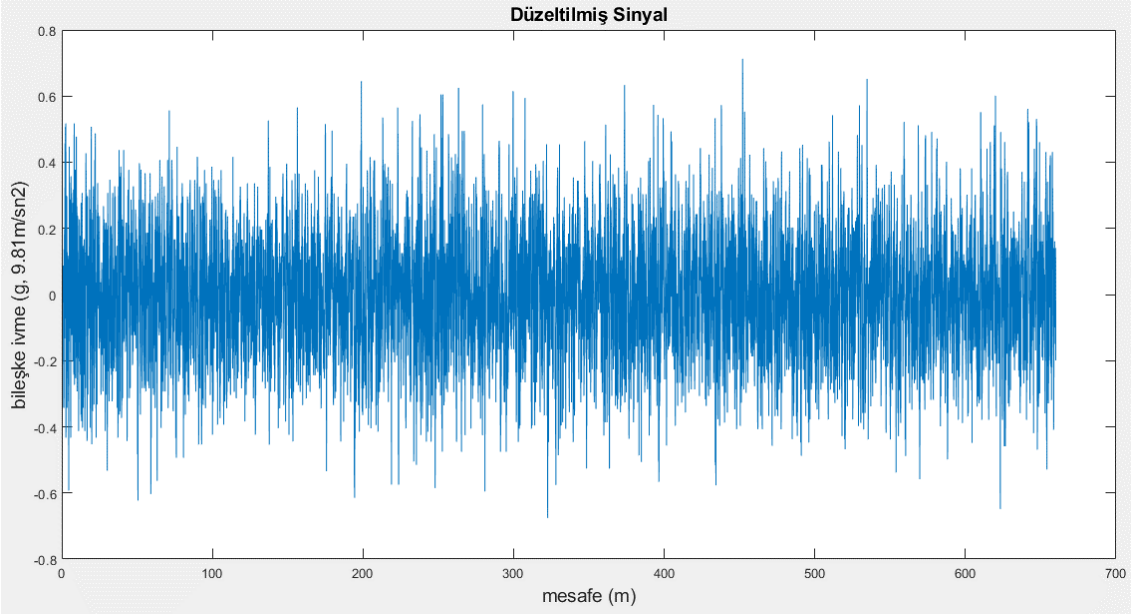
Bu yöntemde; yol tepkisini ölçmek için test aracı üzerine 3 akslı (x, y ve z eksenleri) bir ivmeölçer (MPU-6050) ve konum bilgilerini bulmak için ise bir GPS sensörü (GY-NEO6MV2) yerleştirilmiştir. İvmeölçer ve GPS sensörlerinin eş zamanlı çalışması ile test yolu üzerinden ivmelenme ve konum verileri elde edilmiştir. GPS sensöründen elde edilen konum bilgileri Google haritalar uygulaması kullanılarak referans IRI ölçümünden elde edilen konum bilgileriyle enterpolasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

İvmeölçerden alınan verilerin örnekleme frekansı (f_s) 82 Hz'dir. Yani 1 saniyede test yolu üzerinden 82 ivme verisi alınmaktadır. Örnekleme periyodu $T = 1/f_s = 0{,}0122$ saniyedir. Böylece örneklem aralığı (Δl):

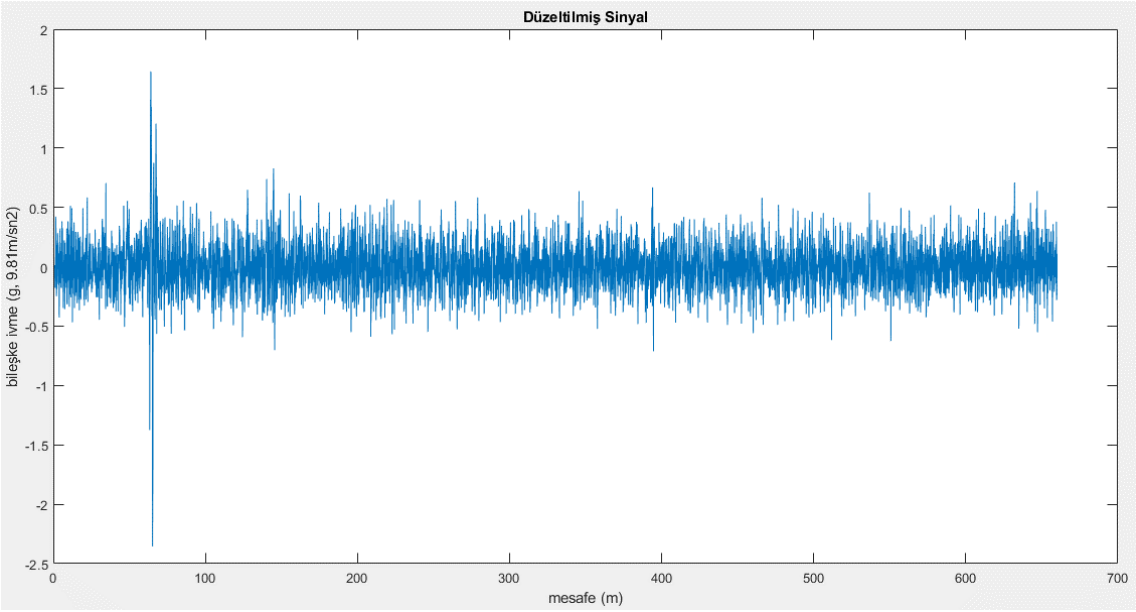
$$\Delta l = 25 * \frac{1000}{3600} \left(\frac{m}{sn}\right) * 0{,}0122(sn) = 8{,}4\ cm \tag{4.1}$$

şeklinde olacaktır. Yani yol yüzeyinden her 8,4 cm'de bir veri alınabilmektedir.

Daha önceden de bahsedildiği üzere (bkz. bölüm 2.2.3), sinyal verileri farklı frekans ve dalgaboylarına sahiplerdir ve bu nedenle istenilen dalga boylarını elde etmek için ivmelenme değerleri filtrelenmelidir. İvmelenme verileri belirli bir eğilim göstererek zaman alanında yükseliş veya azalış göstermektedirler. Bu nedenle ilk olarak veriler eğim düzeltme filtresi ile (detrend filtresi) filtrelenir. Böylece zaman alanlı girdi-çıktı verilerinden ofsetler veya doğrusal eğilimler çıkarılmış olur. Şekil 4.1 ve 4.2'de sırasıyla Bursa istikameti ve Üniversite istikametinde test aracı ile ölçülen düzeltilmiş ivmelenme grafikleri verilmiştir. Şekillerde; x ekseni test aracı ile ölçülen yolun mesafesini ve y ekseni ise test yolundan toplanan bileşke ivme değerlerini göstermektedir.



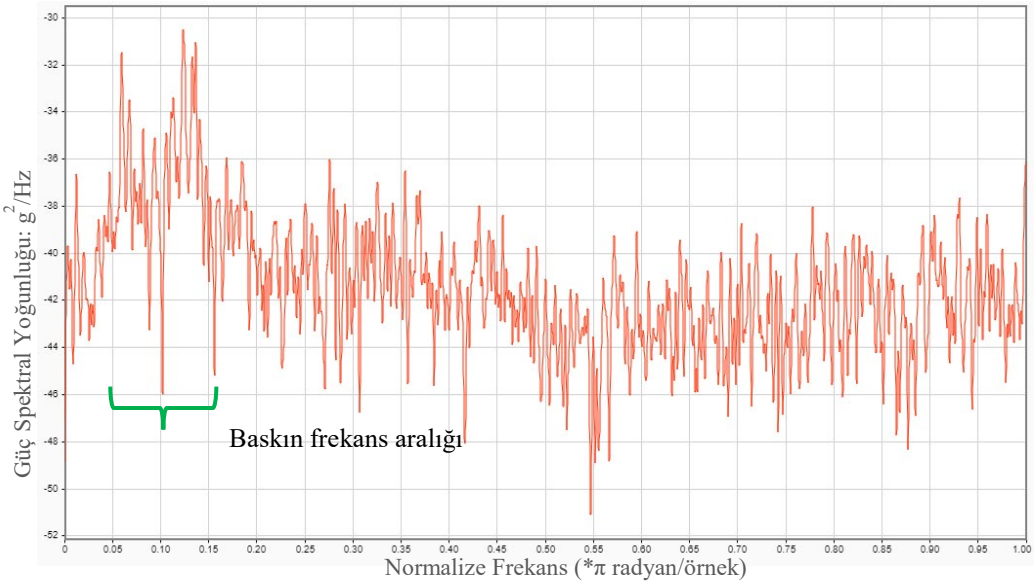
Şekil 4.1. Bursa istikametinde ölçülen ivmelenme verileri



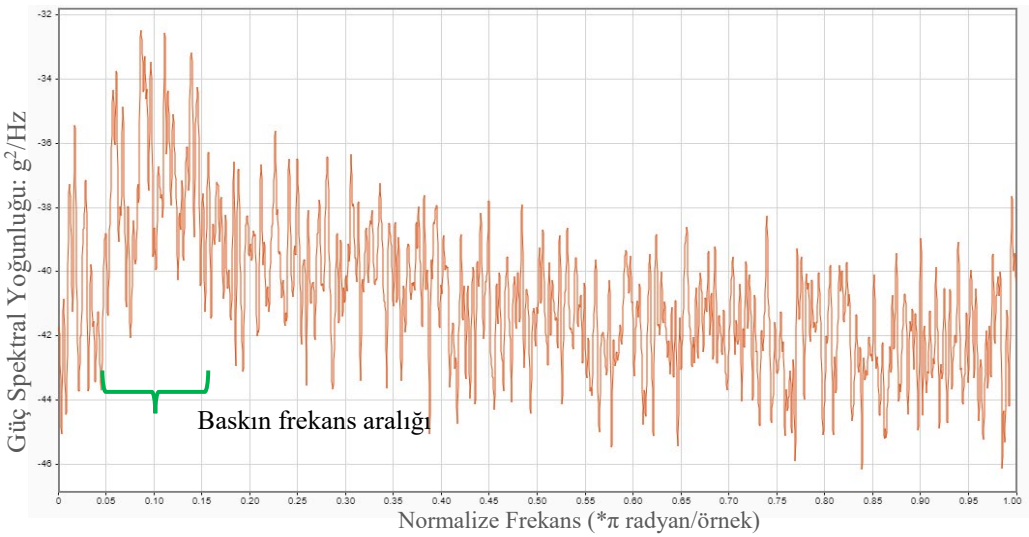
Şekil 4.2. Üniversite istikametinde ölçülen ivmelenme verileri

Bu sinyaller zaman alanı çıktısının bir fonksiyonudur. Yani zamana göre elde edilmiş ivmelenme (genlik) değerlerini göstermektedir. Ancak sinyallerin bu şekilde anlaşılması zordur ve bu sinyallerin anlaşılabilir formalara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için zaman alanı girdisi ayrık fourier dönüşümü ile frekans alanına dönüştürülmüş ve bu sinyal verilerinin güç yoğunluğunu ifade eden güç spektral yoğunluk grafikleri çizilmiştir. Şekil

4.3 Bursa istikameti ve Üniversite istikametinde ölçülen ivmelenme değerlerinin güç spektral yoğunluk grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklere göre 0,05-0,15π radyan/örnek aralığındaki frekansların enerji değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum bu test yolunun bu frekans aralıklarında diğer frekans aralıklarına göre daha baskın dalgaboylarından oluştuğu söylenebilir.



(a)



(b)

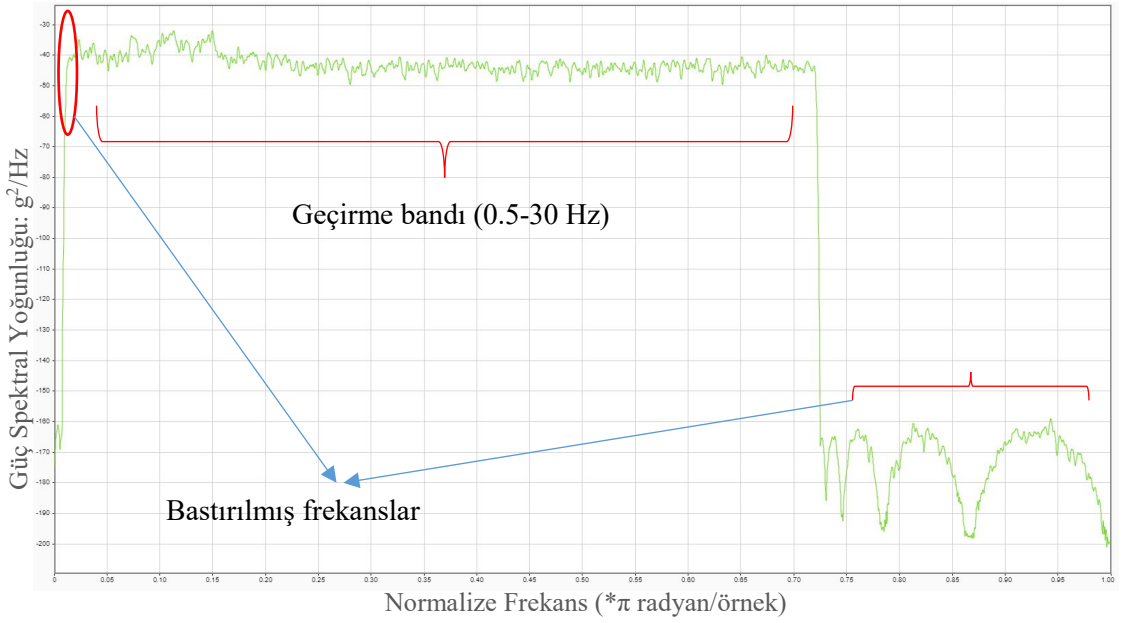
Şekil 4.3. İvmelenme değerlerinin Güç Spektral Yoğunlukları: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti

Elde edilen sinyal verileri kendi içlerinde birçok gürültü sinyalleri barındırmaktadır. Bu gürültülü sinyal verileri, bisikletin manevra hareketleri ve çeşitli manyetik alan dalgalarının sensörler üzerinde oluşturduğu parazitlerden kaynaklanmaktadır. Bu manevra hareketleri ölçüm sisteminde düşük frekanslı sinyaller meydana getirmekte ve bu sinyaller sistemin gürültüsünü artırmaktadır. Ayrıca yol profilinin belirli dalga boylarındaki sinyalleri işleme alınacaktır (bkz. Bölüm 2.2.1). Bu nedenle hem gürültü sinyallerinin hem de istenilmeyen dalga boylarındaki sinyallerin ham verilerden temizlenmesi için bu veriler üzerinde sinyal filtreleme işlemleri gerçekleştirilecektir.

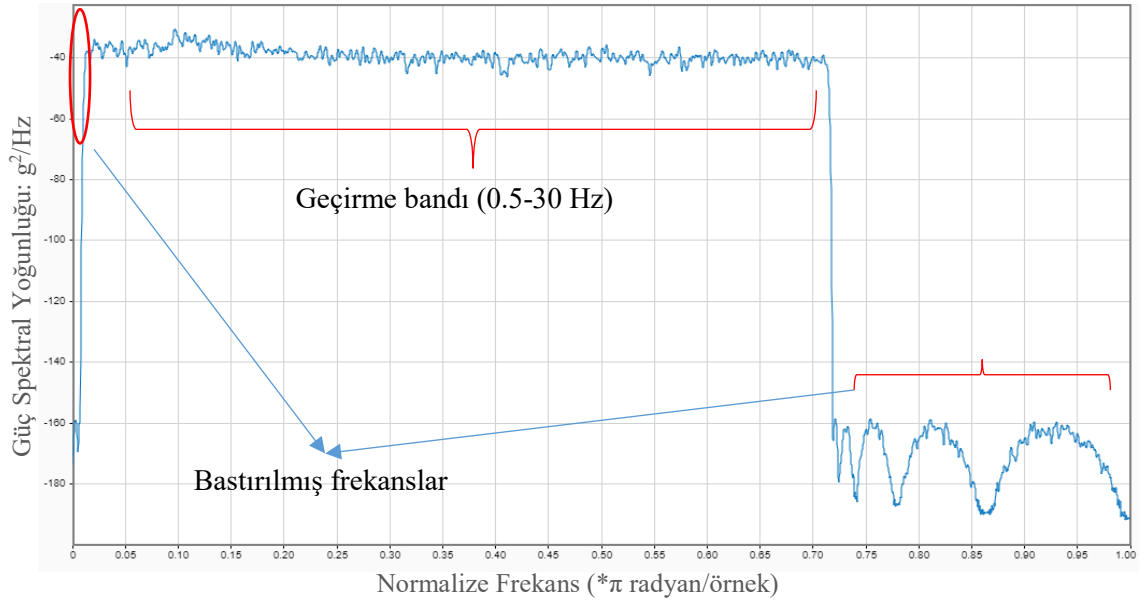
Eshkabilov ve Yunusov (2018)'a göre, ivmeölçer ile toplanan verilerdeki gürültü sinyallerini ortadan kaldırmak için kullanılacak en uygun dijital filtrenin [0,5-50 Hz] aralığındaki bant geçiren filtre olduğu gösterilmiştir. Bu frekans bandı aralığındaki sinyaller gürültü sinyallerinin çoğunu elimine edebilir. Bu doğrultuda, çalışmada filtreleme için kullanılan frekans bandı aralığı [0,5–30 Hz] seçilmiştir. Bu değer MPU 6050 gibi ivmeölçerler için kabul edilebilir bir aralıktır (Eshkabilov ve Yunusov, 2018). Ayrıca test aracının yalpalanmasından kaynaklı düşük frekans içerikleri elimine edilecek hem de test aracından elde edilen maksimum frekans aralığında dalgaboyları yol yüzeyinden alınabilecektir. Şekil 4.4'de her iki istikamette (Bursa istikameti ve Üniversite istikameti) ölçülen ivmelenme değerlerinin filtrelenmiş güç spektral yoğunluk grafiği verilmiştir. Sinyalin 0,5-30 Hz aralığının dışında kalan frekanslar bastırılmış yani sinyal verisinden çıkarılmış, 0,5-30 Hz aralığındaki sinyallerin geçirilmesine (geçirme bandı) izin verilmiştir. Şeklin x ekseni normalize edilmiş frekansı göstermektedir. Normalize frekans; bir sinyalin örnekleme frekansının [-π, π] aralığında (2π uzunluğunda) ifade edilmesine denir. Örneğin, bu çalışmada belirtilen 30 Hz'lik frekansın normalize edilmiş hali:

$$f = \frac{30 * \pi}{\frac{f_s}{2}} = 0{,}73Hz \tag{4.2}$$

şeklinde olacaktır. Burada; $f\ ve f_s$ sırasıyla normal frekans ve örneklem frekansını (bu çalışmada 82 Hz) belirtmektedir. Şeklin y ekseni ise frekansa göre ivme değerlerlerindeki enerji değişimini göstermektedir.



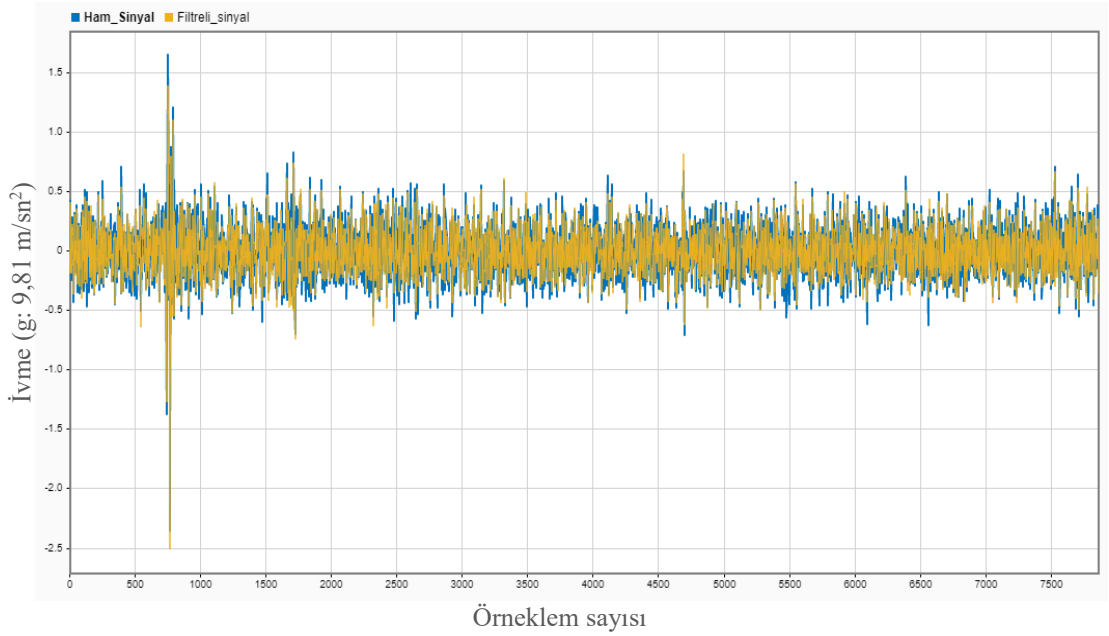
(a)



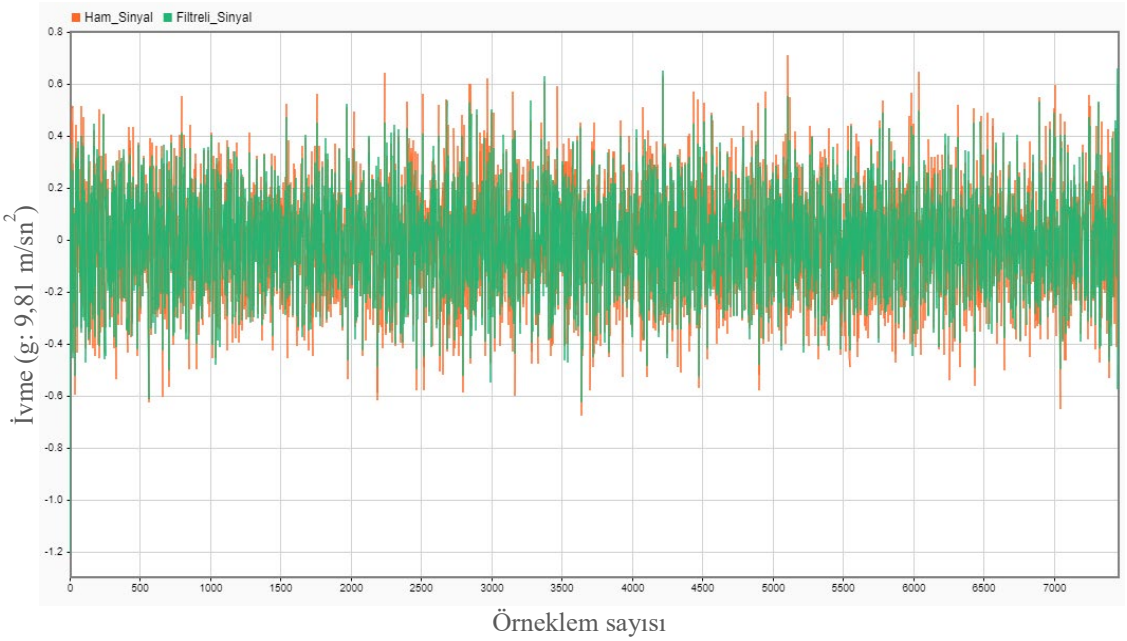
(b)

Şekil 4.4. Bant geçiren filtre [0.5-30 Hz] kullanılarak filtrelenmiş sinyal verilerinin güç spektral yoğunlukları: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti

Şekil 4.5'te ise ivme verilerinin ham ve filtrelenmiş görüntüsü verilmiştir. Şekilde, x ekseni test yolu üzerinden toplanan verilerin sayısını ve y ekseni ise ivmelenme değerlerini göstermektedir.



(a)



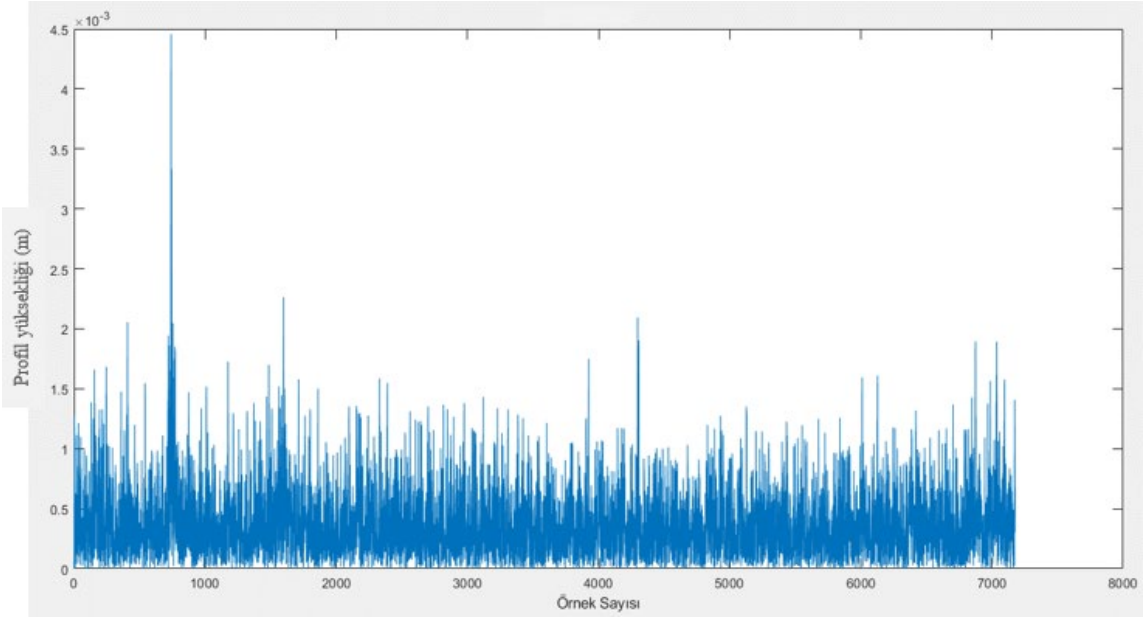
(b)

Şekil 4.5. Ham ve filtrelenmiş sinyal verileri: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti

Temizlenen ivmelenme verileri (filtrelenmiş veriler) çeyrek araç simülasyonunda girdi verisi olarak kullanılmıştır. Yol profilini hesaplamak için denklem 3.2'deki diferansiyel

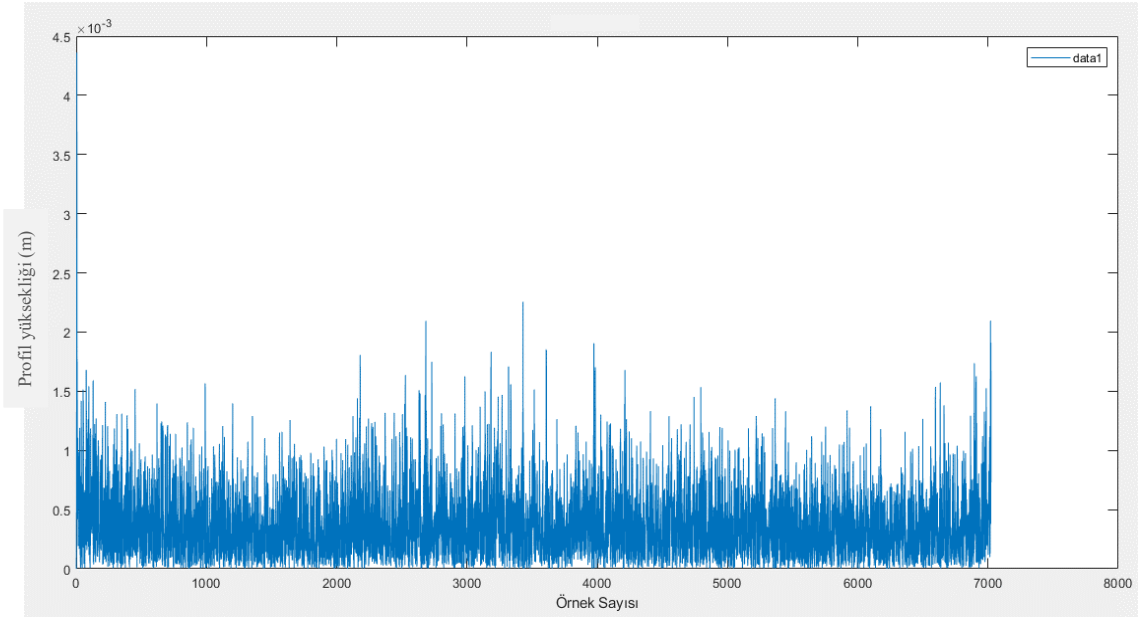
denklemlerin çözümü için MATLAB Simulink aracının blok diyagramları kullanılmış ve Newmark ß yöntemi ile yol profilinin yükseklik değerleri hesaplanmıştır. Ancak yukarıda belirtildiği gibi bu sonuçlar düşük frekans verilerinin etkisiyle yol profilinde istenmeyen bir yönlenmeye sebep olur. Bu nedenle elde edilen profil verilerine tekrardan eğim düzeltme filtresi uygulanır ve bu yönlenme ortadan kaldırılır. Böylece hem eğim düzeltme filtresi hem de bant geçiren filtre ile temizlenen yol profil yükseklik verileri elde edilmiş olur. Şekil 4.6'da eğim düzeltme ve hareketli ortalama filtreleri ile filtrelenmiş yol profilinin test yolu üzerinden alınan örnek verilere göre yükseklik değerleri gösterilmiştir.

Yol profilleri artık IRI hesabında kullanılabilecek formalara gelmiştir. Bu yol profil verileri hareketli ortalama filtresi ile filtrelenmelidir (bkz. Bölüm 2.1). Buna göre geleneksel yöntem ile ivmeölçer kullanılarak bulunan IRI değerleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Üniversite istikametinde test yolunun yaklaşık 80'inci metresinde (elips içinde gösterilmiştir) yüksek IRI değeri görülmektedir. Bu durum belirtilen konumda yol üzerinde diğer yerlere göre ciddi bir bozukluk olduğunu göstermektedir. Bu şekildeki sarı çizgi ise her iki istikametteki ortalama IRI değerini göstermektedir.



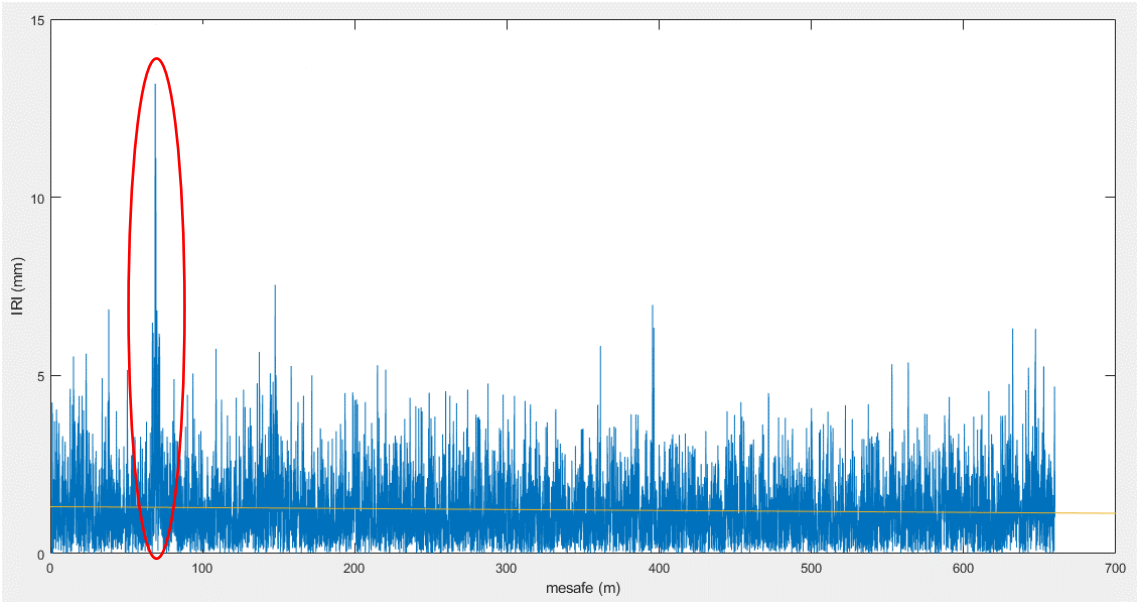
(a)

Şekil 4.6. Filtrelenmiş ivmelenme verilerine göre her iki yönde belirlenen yol profili: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti

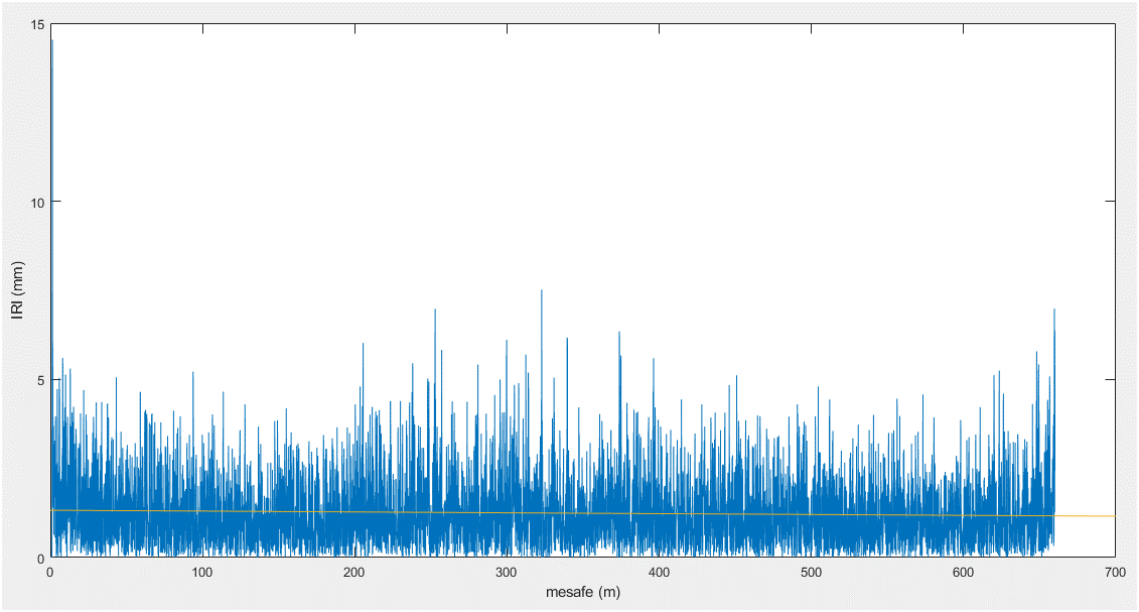


(b)

Şekil 4.6. Filtrelenmiş ivmelenme verilerine göre her iki yönde belirlenen yol profili: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti (devam)



(a)



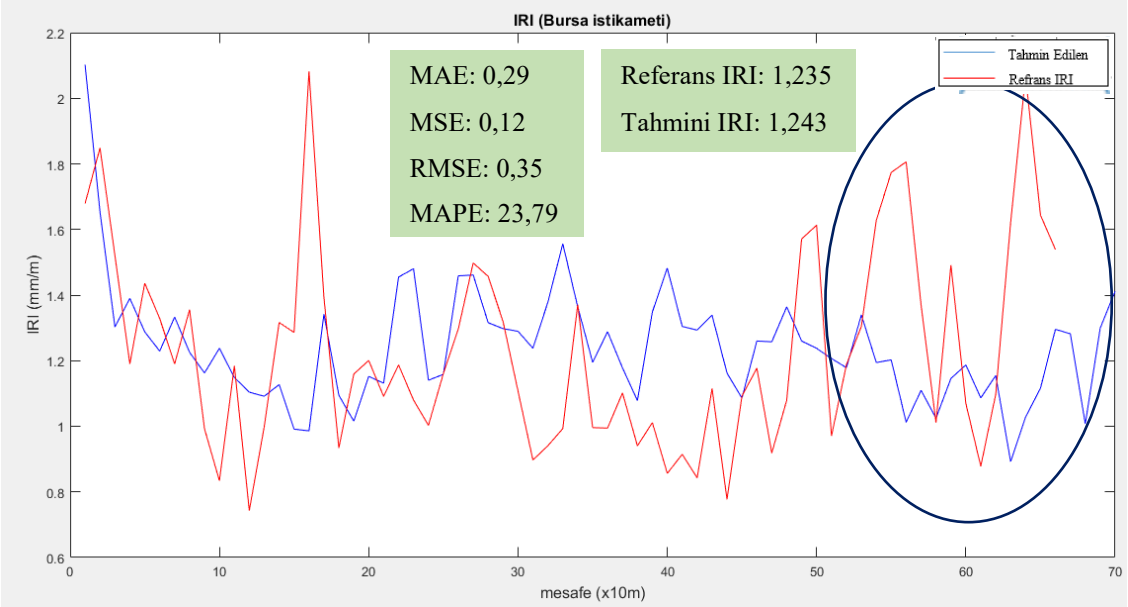
(b)

Şekil 4.7. Yol profilinden elde edilen IRI değerleri: (a) Üniversite istikameti, (b) Bursa istikameti (devam)

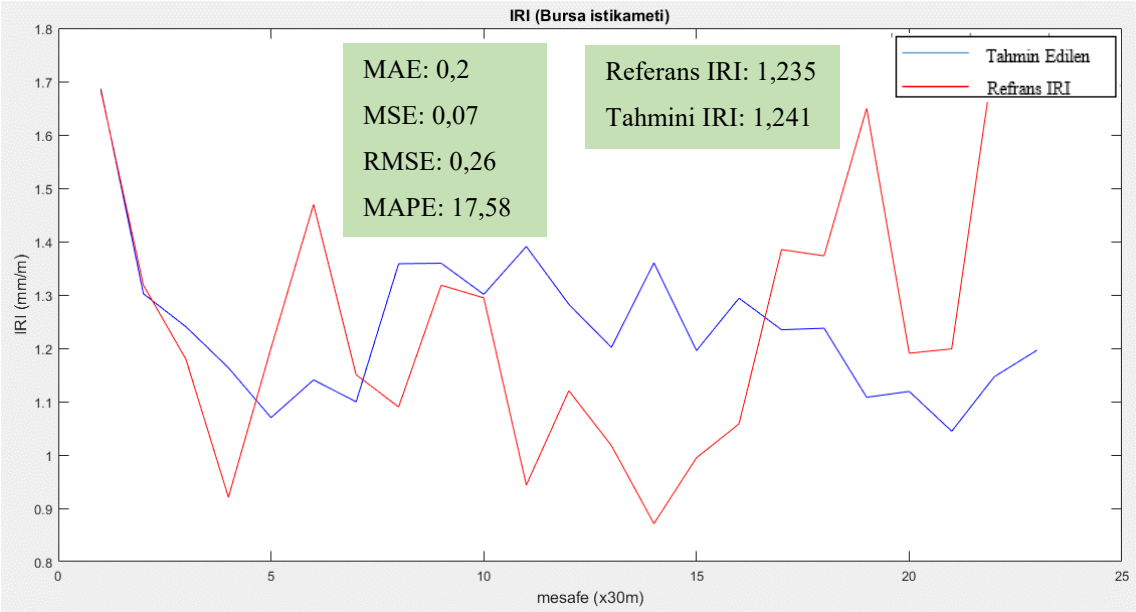
4.2. Geleneksel Yönteme Göre Tamin Edilen IRI Değerleri ile Referans IRI Değerlerinin Karşılaştırılması

Geleneksel yöntem ile hesaplanan IRI değerleri bir sonraki bölümde daha detaylı anlatılacak olan belirli yol kesit aralıklarına göre referans IRI sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun için test yolunun belirli aralıkları (10m, 30m, 60m ve 100m) dikkate elınmış ve sonuçlar en çok kullanılan dört değerlendirme ölçütü (MAE, MSE, RMSE ve MAPE) ile karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki şekillerde kırmızı renk ile belirtilen çizgi lazer profilometre ile ölçülen referans IRI değerlerini, mavi renk ile belirtilen çizgi ise ivmeölçer kullanılarak çeyrek araç modeline göre belirlenen tahmini IRI değerlerini göstermektedir. Buna göre Şekil 4.8, 4.9, 4.10, 4.11'de sırasıyla Bursa istikameti yönünde incelenen test yolunun 10m, 30m, 60m ve 100m kesit aralıklarına göre belirlenmiş Referans IRI ve tahmini IRI değerleri gösterilmiştir. Grafiklerin x ekseni belirtilen mesafe aralıklarını (10m, 30m, 60m ve 100m), y ekseni ise ortalama IRI değerini (mm/m) göstermektedir. Buna göre geleneksel yöntemde yolun 10m ve 30m kesitlerinde yolun 500 metre mesafesine kadar olan referans IRI eğilim grafiğinin yakalanabildiği ve 60m ve 100m aralıklar için ise test yolunun ancak yarısına kadar referans IRI eğiliminin yakalanabildiği söylenebilir. Test yolunun tüm kesitleri için IRI tahmin değerlerinin

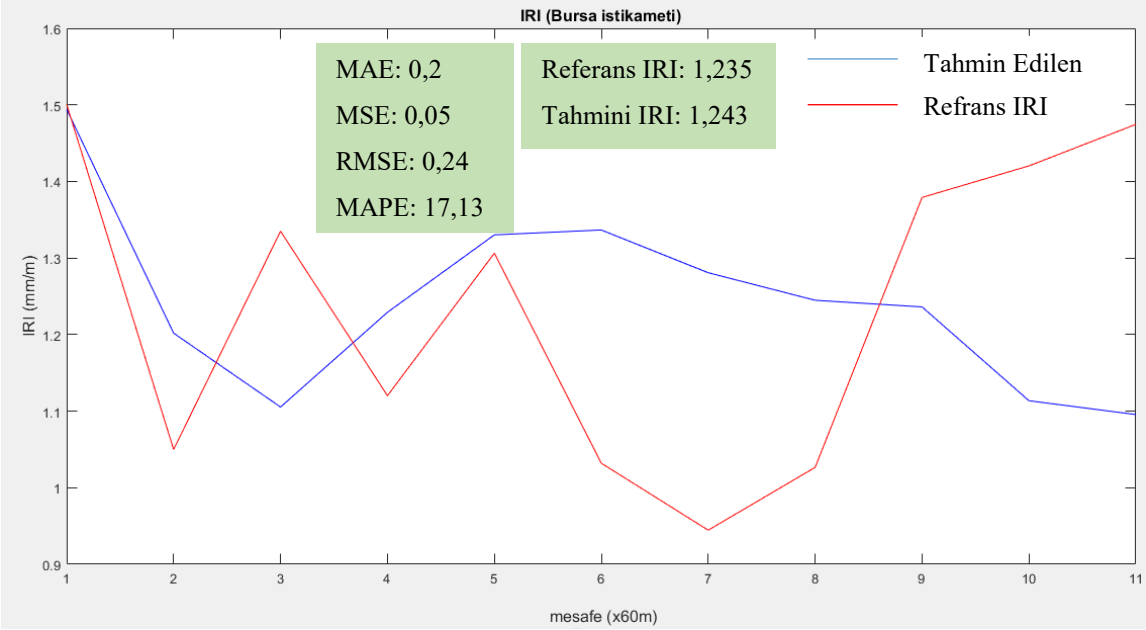
kabul edilebilir sınırlar dâhilinde kaldığını, ayrıca 30m 60m ve 100m kesit aralıları için tahmin değerinin iyi olduğu (MAPE<20) söylenebilir. Bununla beraber test yolunun kesit aralıkları büyüdükçe beklenildiği gibi IRI tahmin değerlerinde iyileşmenin olduğu söylenebilir (bkz. Şekil 4.9, 4.10, 4.11).



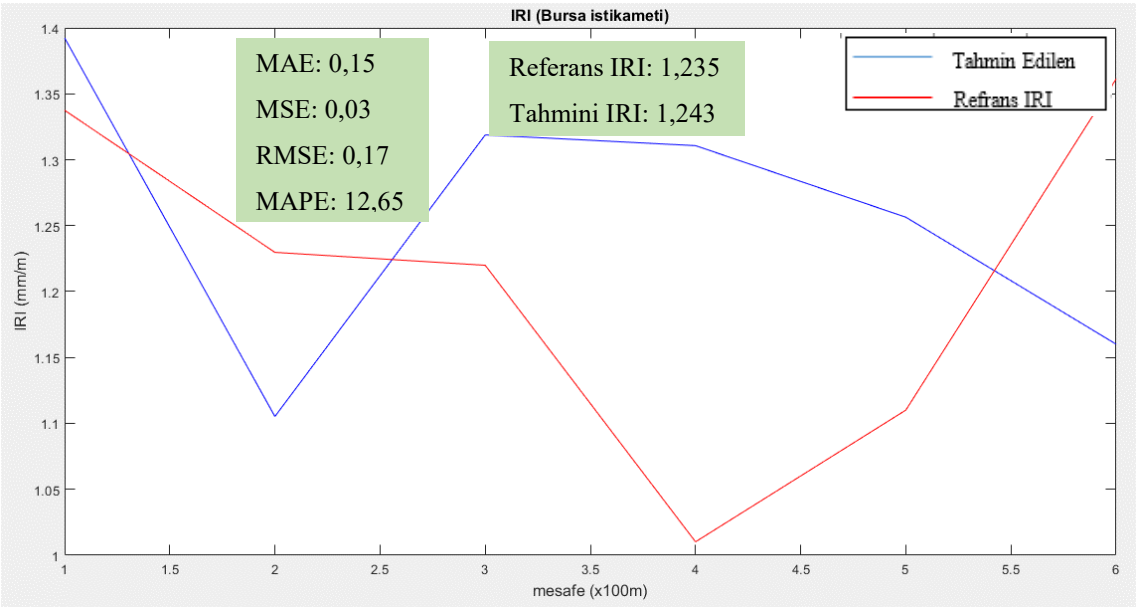
Şekil 4.8. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 10m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri



Şekil 4.9. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 30m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri



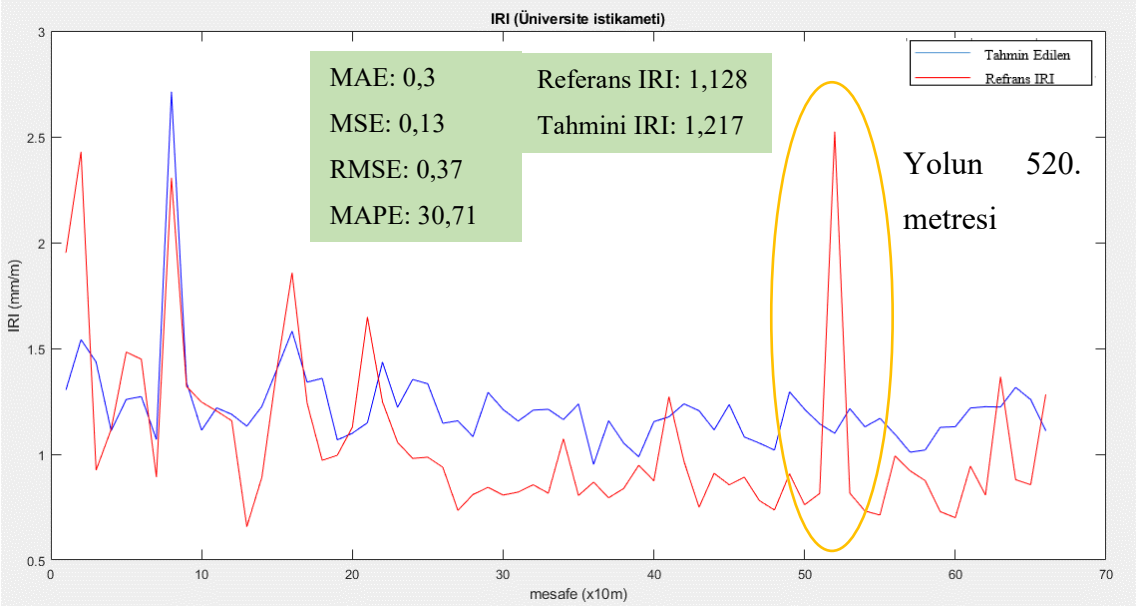
Şekil 4.10. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 60m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri



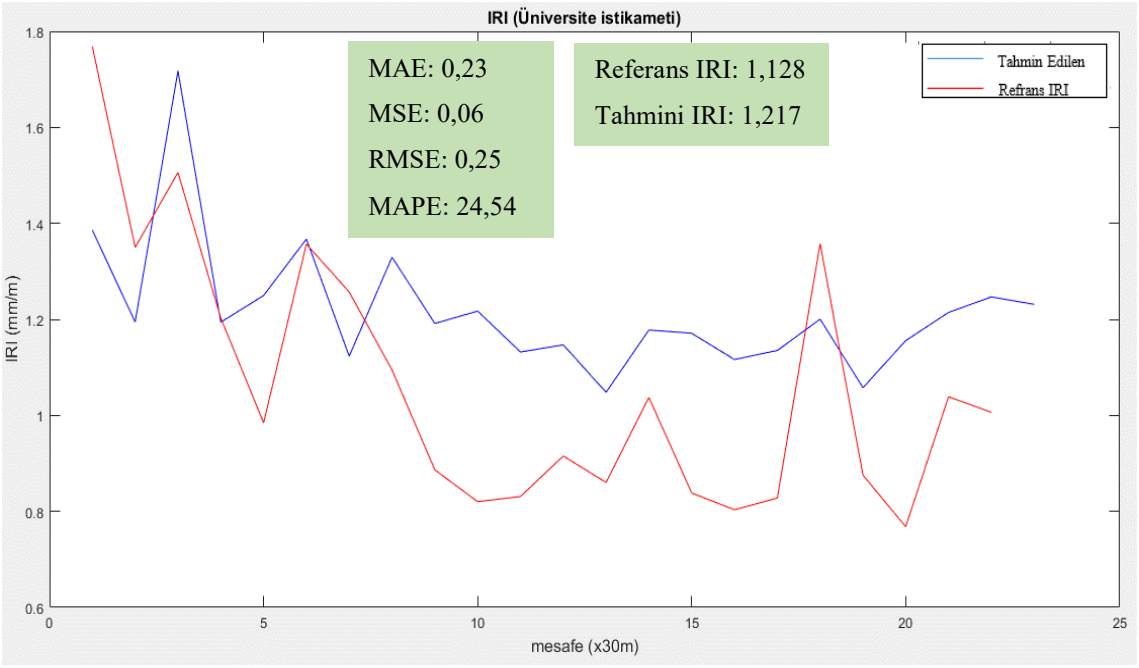
Şekil 4.11. Bursa istikametinde incelenen test yolunun 100m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri

Bununla beraber Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15'te sırasıyla Üniversite istikameti yönünde incelenen test yolunun 10m, 30m, 60m ve 100m kesit aralıklarına göre belirlenmiş Referans IRI ve tahmini IRI değerleri gösterilmiştir. Grafiklerin x ekseni belirtilen mesafe

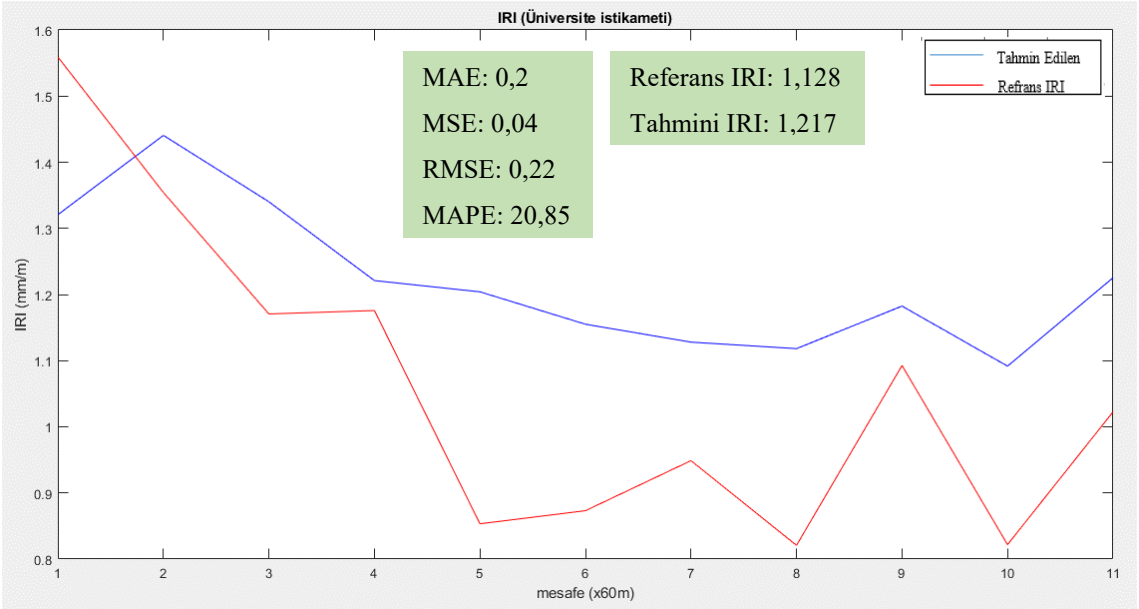
aralıklarını (10m, 30m, 60m ve 100m), y ekseni ise ortalama IRI değerini (mm/m) göstermektedir. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere, 10m aralık değeri için test yolunun 520. Metresinde elips içinde gösterilen referans IRI değerindeki zirve hariç tüm aralık değerleri için tahmini IRI değerlerinin referans IRI eğilimini yakalayabildiği ve IRI tahmin değerlerinin kabul edilebilir sınırlar dâhilinde kaldığı söylenebilir. Bununla beraber sadece 100m kesit aralığı için IRI tahmin değerlerinin iyi olduğu görülmektedir (MAPE<20). Çizelge 4.1'de her iki istikamette ölçülen IRI değerlerinin referans IRI'ya göre performans karşılaştırılması verilmiştir. Buna göre; Bursa istikametinde tahmin edilen IRI değerlerinin Üniversite istikametine göre daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır (bkz. Çizelge 4.1 MAPE değerleri).



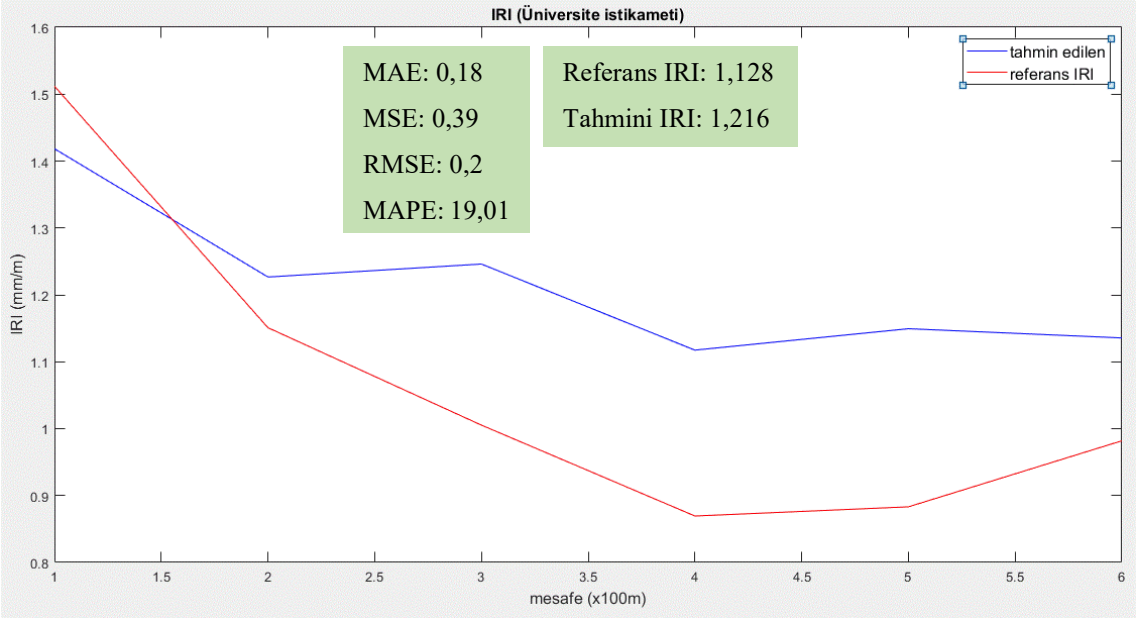
Şekil 4.12. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 10m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri



Şekil 4.13. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 30m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri



Şekil 4.14. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 60m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri



Şekil 4.15. Üniversite istikametinde incelenen test yolunun 100m kesit aralıklarında referans IRI ve tahmini IRI değerleri

Çizelge 4. 1. Geleneksel yöntem ile tahmin edilen IRI değerlerinin referans IRI değerlerine göre belirtilen aralıklara göre performans değerleri

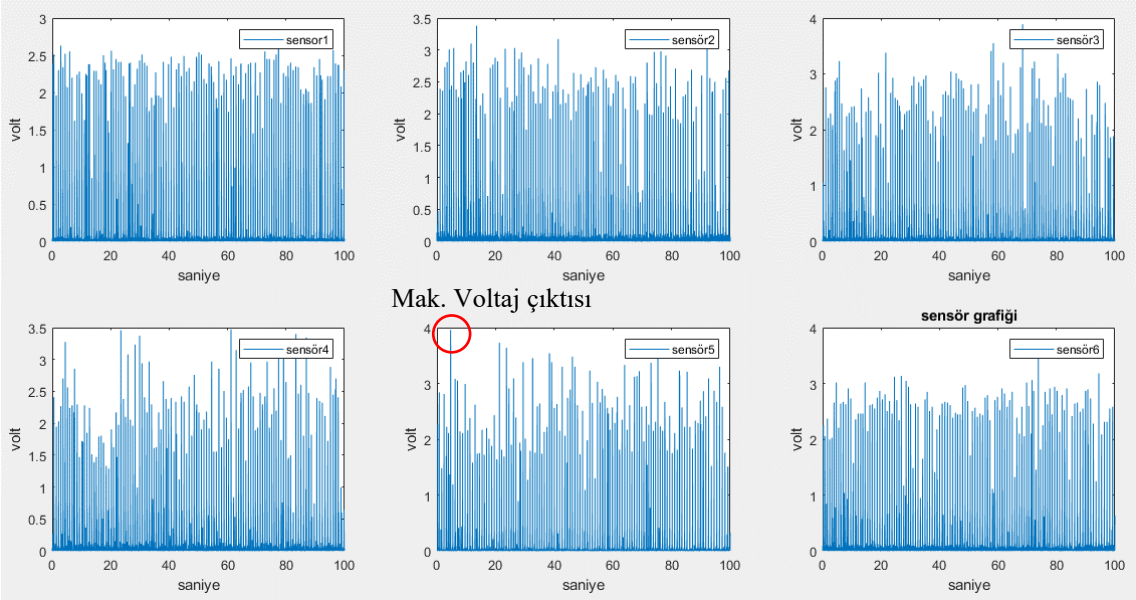
	Bursa İstikameti (1,235*)					**Üniversite İstikameti (1,128*)**				
Aralık (m)	MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)	Tahmini IRI	MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)	Tahmini IRI
10	0,29	0,12	0,35	23,79	1,243	0,3	0,13	0,37	30,71	1,217
30	0,2	0,07	0,26	17,58	1,241	0,23	0,06	0,25	24,54	1,217
60	0,2	0,05	0,24	17,13	1,243	0,2	0,04	0,2	20,85	1217
100	0,15	0,03	0,17	12,65	1,243	0,18	0,39	0,2	19,01	1,216

*Referans IRI değerleri

4.3. TY-PVDF ile IRI Hesabı

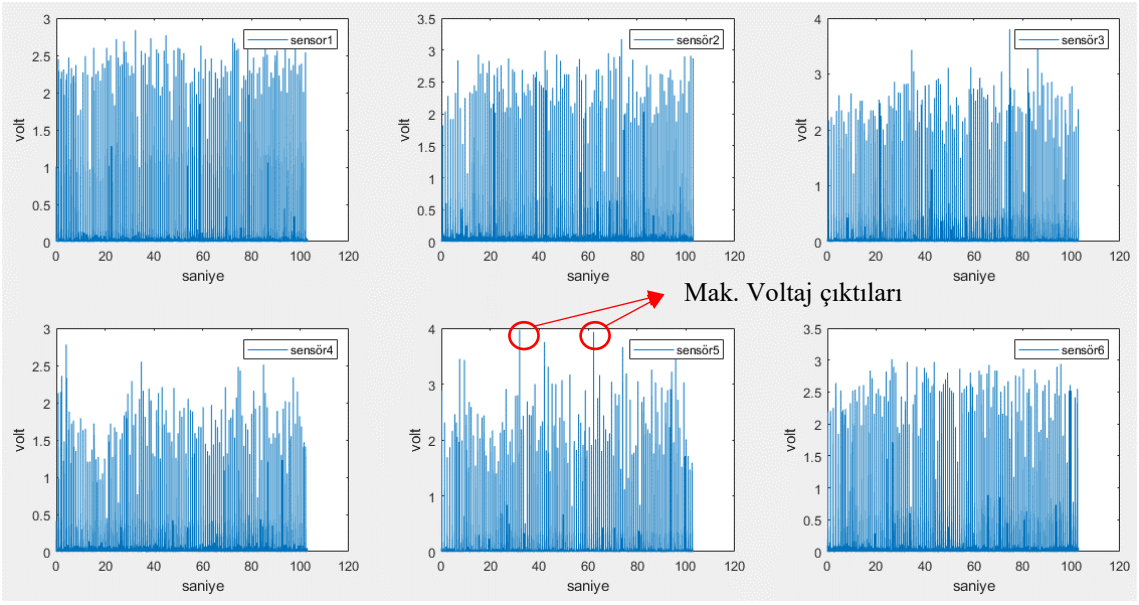
Bölüm 3.1.5'te açıklandığı üzere, bisiklet test aracının tekerleğine 120^0'lik açılarla monte edilmiştir. Tekerleğin bir tam tur dönmesiyle yol yüzeyinden 6 farklı PVDF sensör verisi (Voltaj) elde edilmektedir. Tekerleğin bir tam tur dönüşü yaklaşık olarak 2m'dir. IRI hesabı için yolun 10 m'lik bölümleri dikkate alınımıştır. Ayrıca yolun farklı bölümlerinde ölçüm sonuçlarını tahmin etmek için yolun uzunluğuyla orantılı olarak 30m, 60m ve 100m'lik kesitlerinde de ölçümler yapılmıştır. Buna ek olarak, yeni geliştirilen test

aracından elde edilen veri setleri, Google Haritalar uygulaması kullanılarak lazer profilometre cihazından elde edilen referans IRI değerleri ile konumsal olarak hizalanmıştır. Bu sensör verileri toplanmadan önce VTS üzerine sinyal düzenleyicisi oluşturulmuştur (bkz. Bölüm 3.1.5). Böylece PVDF sensörleri üzerinde oluşan yüksek gerilim değerleri düşürülmüş ve değerler sistemin algılayabileceği uygun sinyal düzeylerine çekilmiştir. Şekil 4.16'da Bursa istikameti ve Üniversite istikameti boyunca bisiklet test aracının PVDF sensörleriyle test yolu üzerinden alınan sinyaller gösterilmiştir. Bu grafikler test yolu üzerinde toplanan sensör verilerinin zamana göre Voltaj çıktılarını göstermektedir. Bu grafiklerden, test yolu üzerindeki düzgünsüzlüğün PVDF sensörler üzerinde en fazla 4V'luk bir gerilim oluşturduğu ve sensör çıktılarının izin verilen aralık (0-5V) dahilinde olduğu görülebilmektedir.



Mak. Voltaj çıktısı

(a)



(b)

Şekil 4.16. PVDF sensörlerinden elde edilen verilerin görünümü: (a) Bursa istikameti, (b) Üniversite istikameti

4.3.1. DVR algoritması ile IRI tahmini

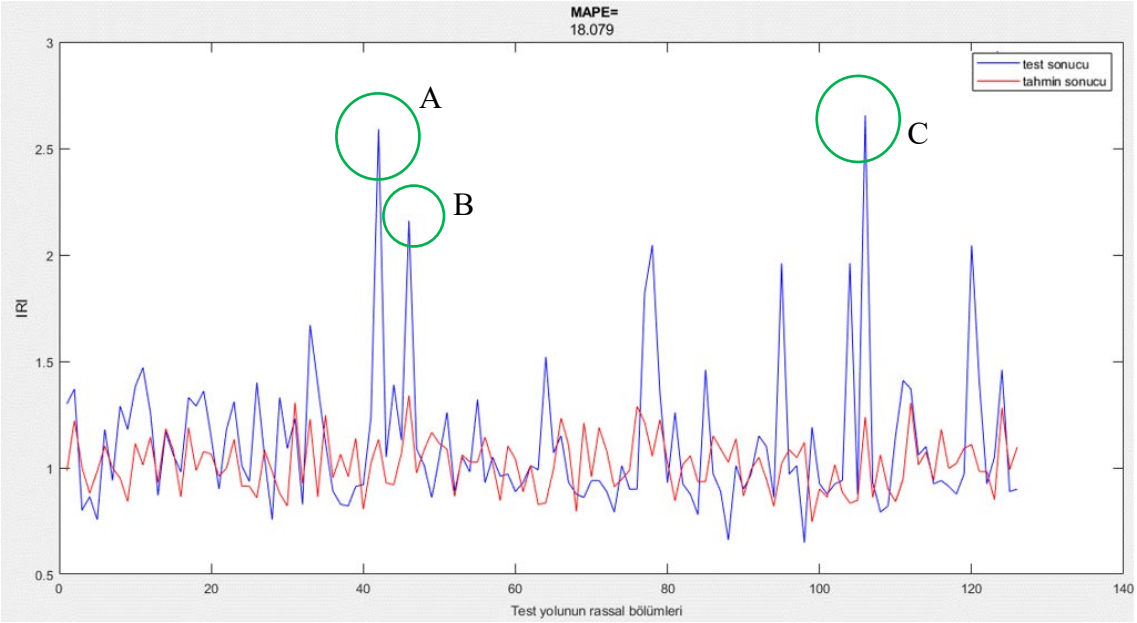
Doğrusal olmayan veriler arasındaki ilişkilerin çözümlenmesi için makine öğrenme algoritmaları kullanılabileceği Bölüm 3.6.3'te açıklanmıştı. Yol düzgünsüzlük indeksinin doğrusal regresyon yöntemleri ile ilişkilendirilmesi de zor olduğu için bu çalışmada makine öğrenme algoritmalarından biri olan DVR algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın performansı için de yine en sık kullanılan dört değerlendirme ölçütü (MAE, MSE, RMSE, MAPE) seçilmiştir. Bu değerlendirme ölçütleri ile veri setinden çıkarılan sensörlerin ortalaması, toplamı, standart sapmaları, sinüs ve cosinüs değerleri gibi özelliklerin algoritmanın performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme ölçütlerindeki değerlerin küçülmesi hata miktarının azaldığı anlamına gelmektedir.

Test yolunun gidiş ve geliş istikametleri kesintisiz tek bir yol gibi düşünüldü. Bölüm 3.6'da anlatılan yönteme uygun olarak test yolundan bisiklet test aracı ile (TY-PVDF yöntemine göre) elde edilen sensör verileri DVR algoritmasına girdi verisi olarak tanıtıldı. Test yolunun her iki istikametinden toplamda 580914 sensör verisi elde edilmiş ve bu toplam veri gidiş ve geliş olmak üzere yolun 10m, 30m, 60m ve 100m'sine karşılık

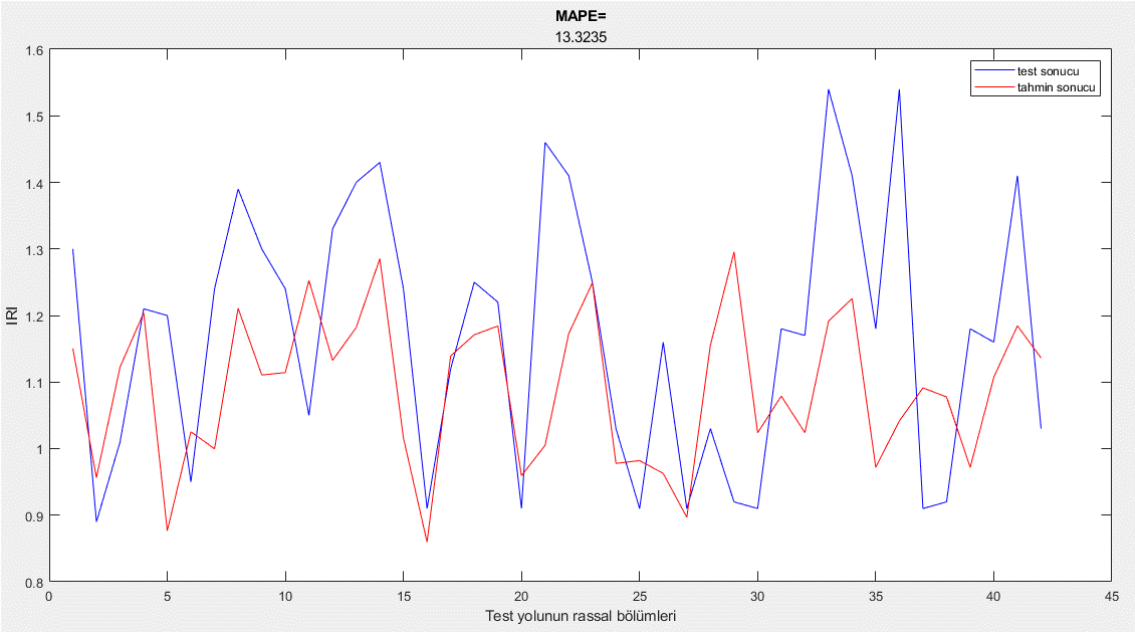
gelecek şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra bu sensör verileri DVR algoritmasını test etmek ve eğitmek için kullanılmıştır. PVDF sensör verilerinin referans IRI sonuçları ile doğru olarak eşleştirilebilmesi için en uygun özellik setinin DVR algoritmasına girilmesi gerekmektedir. Bunun için bölüm 3.6.1'de belirtilen sensörlerin ortalaması, toplamı, standart sapmaları, sinüs ve cosinüs gibi ayırt edici özelliklerinden hangisi veya hangilerinin algoritmanın performansı üzerinde en iyi sonucu verdiğini görmek için deneme yanılma yöntemi yapılmıştır. Bunun sonucunda ise algoritmanın performansı üzerinde en iyi sonucu gösteren özellikler algoritmaya girdi verisi olarak eklenmiştir. Bu çalışmada verilerin %85'i rassal olarak algoritmada eğitilir ve geriye kalan %15'lik veri de test verisi olarak kullanılır. Böylece algoritma her seferinde farklı veri gruplarını eğitir ve test eder. Algoritmanın içinde bulunan hata aralığı (ε) ve kontrol parametre (c) değerleri algoritmanın en iyi sonucu vereceği duruma göre ayarlanmıştır. Yani algoritma farklı parametre değerlerine karşın farklı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada algoritmayı optimize edecek en uygun parametre değerleri belirli aralık değerleri içinde deneme-yanılma yöntemi ile bulunmaya çalışıldı. Nihayetinde ε= 0,01 ve c=1 değerlerinin algoritmanın sonucunu en iyi yansıttığı görülmüş ve girdi parametreleri olarak bu değerler kullanılmıştır. Ayrıca algoritmaya dâhil edilen özellik verileri doğrusal olmayan bir dağılım göstermektedir ve bu durum özellik verilerinin lineer regresyon vb. çözüm yöntemleri ile çözümlenmesine imkân vermemektedir. Bu nedenle DVR algoritmasının içinde bulunan çekirdek fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon ile veriler doğrusal olmayan bir form üzerine eşleştirilerek verilerin çözümü mümkün hale getirilir. Çalışmada çok yaygın olarak kullanılan Gauss çekirdek fonksiyonu kullanılmış ve çekirdek boyutu olarak algoritma tarafından veriler üzerinde uygulanabilecek en uygun değer program tarafından otomatik olarak seçilmiştir.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 sırasıyla 10m ve 30m aralıklarda test yolunun rassal bölümlerine karşılık gelen IRI değerlerini göstermektedir. Yani belirtilen aralıklarda test yolunun herhangi 10m (Şekil 4.17) veya 30m (Şekil 4.18)'sine karşılık gelen referans IRI değerleri ve TY-PVDF kullanılarak tahmin edilen IRI sonuçları gösterilmektedir. Bu şekillerde; mavi renk ile belirtilen çizgi referans lazer profilometre ile ölçülen IRI test sonucunu gösterirken kırmızı renk ile belirtilen çizgi ise TY-PVDF ile elde edilen IRI tahmin sonucunu göstermektedir. Şekil 4.17'de bazı zirve noktalar (A, B ve C) görülmektedir.

DVR algoritmasını kullanan TY-PVDF ile bu zirve noktalar her ne kadar yakalanamamış olsa da modelin performansı üzerinde ciddi bir etki oluşturmamaktadır. Çünkü tahmin sonuçlarının MAPE değerleri modelin tüm özellik dizileri için kabul edilebilir sınırlar dâhilinde kaldığı ve en uygun özellik gruplarında iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

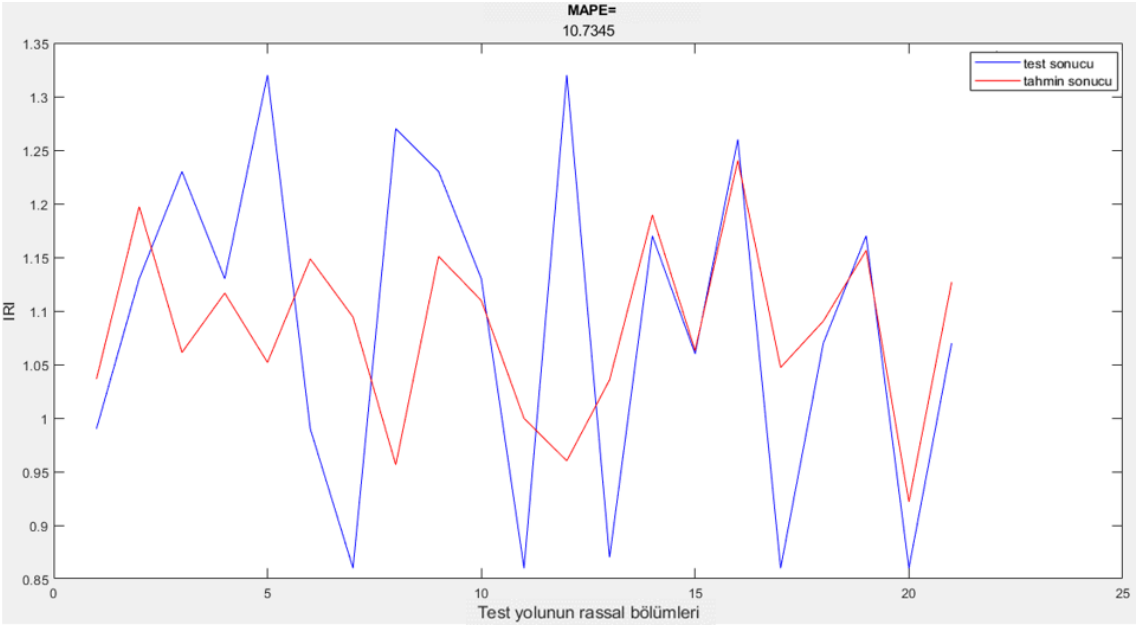


Şekil 4.17. 10m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları



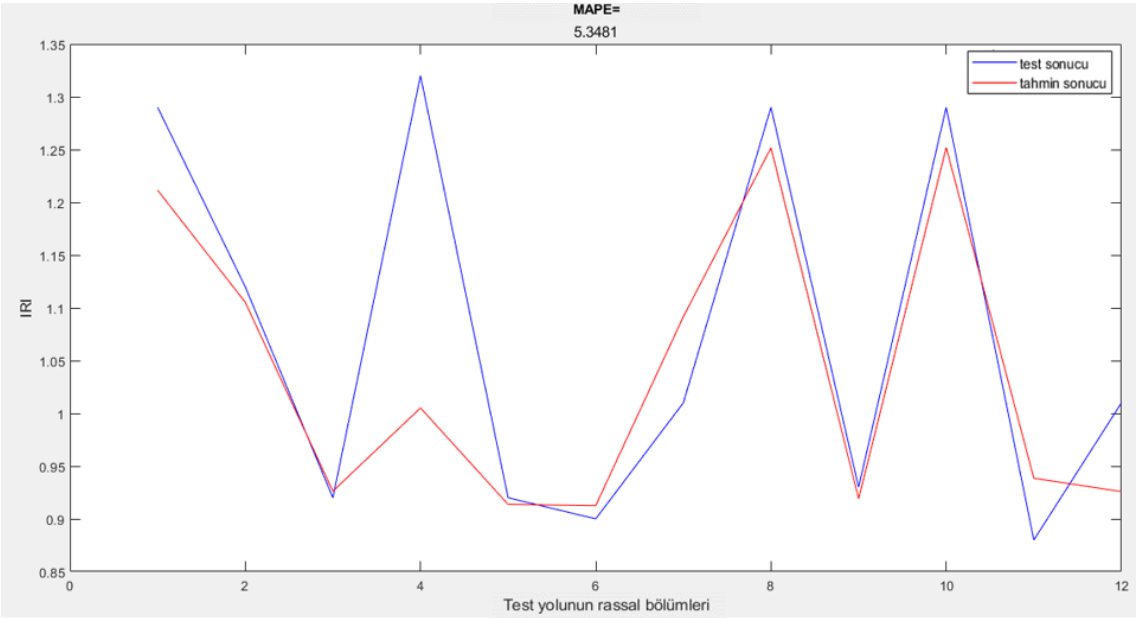
Şekil 4.18. 30m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları

Şekil 4.19'da yolun 60m'lik kesimlerinde algoritmanın en iyi performansının F_2, F_3, F_6 ve F_7 özelliklerini içeren Komb.6[c] (0,12 MAE, 0,021 MSE, 0,145 RMSE, 10,75 MAPE) olduğu görülmüştür. Bu aralık değeri için de bazı durumlarda algoritmanın içine dâhil edilen özellik veri sayısı arttıkça algoritmanın performansının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (bkz. Çizelge 4.3).



Şekil 4.19. 60m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları

Şekil 4.20 ise test yolunun 100m'lik kesitlerine karşılık gelen referans IRI değerleri ile tahmini IRI sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, F_3, F_4 ve F_5 özelliklerini içeren Komb.5[d] (0,09 MAE, 0,009 MSE, 0,09 RMSE, 5,34 MAPE) diğer özellik grupları içinde en iyi performansı sergilemiştir. Bu yol kesimi için modele fazladan özellik verisinin eklenmesi verilerin bulanıklığını artırmaktadır. Ayrıca özellik veri sayısındaki azalma da algoritmanın performansını olumsuz etkilemektedir (bkz. Çizelge 4.3).

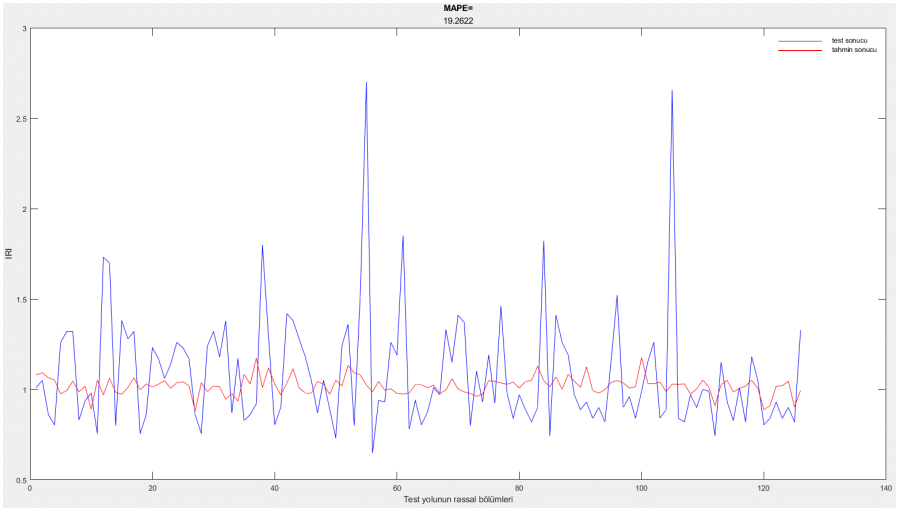


Şekil 4.20. 100m aralıklı yol kesimlerinde test ve tahmin sonuçları

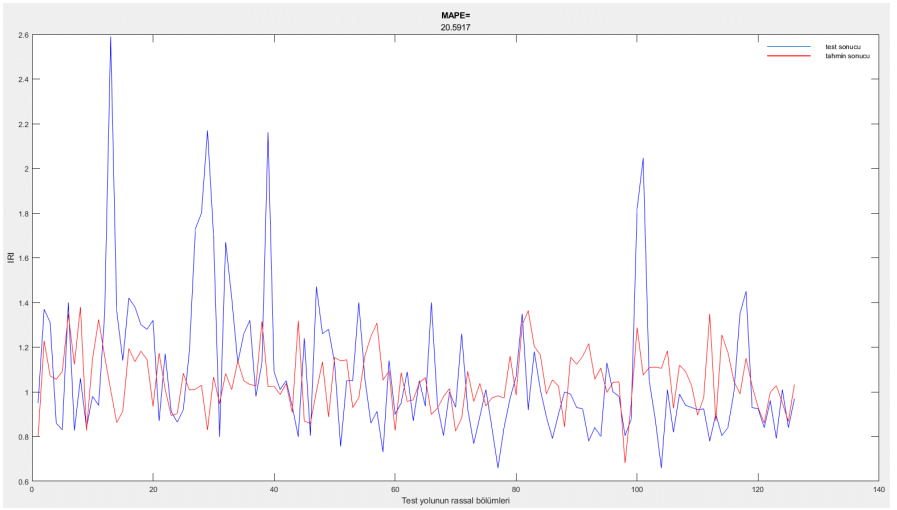
Farklı özellik kombinasyonları için test yolunun belirli aralıklarında tahmin edilen IRI değerlerinin grafiksel gösterimleri de Şekil 4.21, 4.22, 4.23, 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.21'de, 10m'lik yol kesitlerinde IRI tahmin bulguları her ne kadar kabul edilebilir sınırlar (bkz. Çizelge 4.2) dâhilinde kalsa da referans IRI değerlerinin eğilimini yakalamakta zorlandığı görülebilir. Diğer aralık değerleri ve seçilen tüm özellik grupları için ise MAPE değerlerinin iyi sonuçlar verdiği söylenebilir (Şekil 4.22, 4.23, 4.24).

Çizelge 4.2, MAPE oranlarının Lewis (1982)'e göre modelin duyarlılığı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Buna göre MAPE oranının %20'nin altında olması modelin iyi olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.3 ise farklı özellik ve ölçüm aralıklarında veri setinin sonuçlarını göstermektedir. Buna göre incelenen yol kesiminin aralık değerleri büyüdükçe tüm özellik durumları için performans değerlerinin beklenildiği üzere daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Çizelgede en iyi sonucu gösteren kombinasyonlar koyu renk ile belirtilmiştir. Çizelge 4.3'te DVR algoritması kullanılarak test edilen yolun 10m aralıklı kesimlerinde algoritmanın en iyi performansının F_6 ve F_7 özelliklerini içeren Komb.4[a] (0,19 MAE, 0,06 MSE, 0,25 RMSE, 18,08 MAPE) olduğu görülmektedir. Ayrıca 30m aralıklı kesimlerde de algoritmanın en iyi performansının yine F_6 ve F_7 özelliklerini içeren Komb.4[b] (0,14 MAE, 0,026 MSE, 0,161 RMSE, 13,64 MAPE) olduğu görülmüştür. Her iki yol kesimlerinde (10m ve 30m) modele ekstra özellikler eklenmesi,

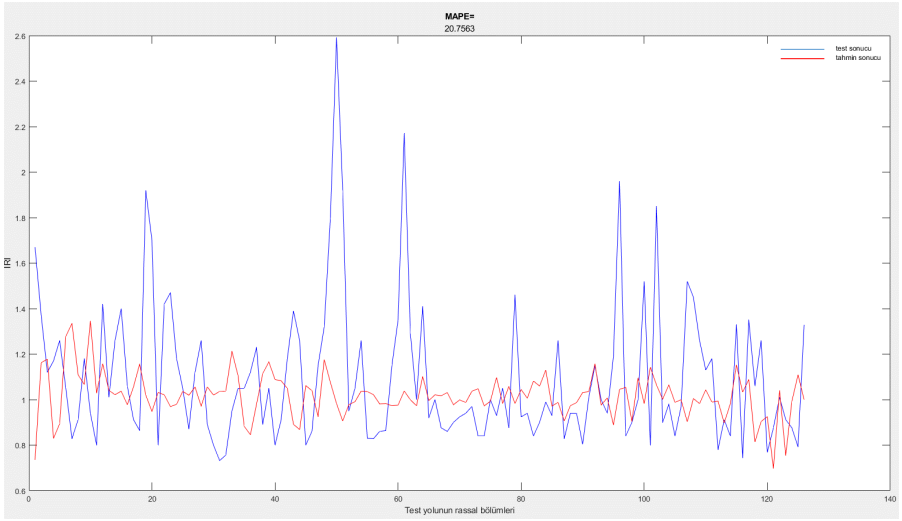
yani özellik veri sayısının fazla olması modelin bulanıklığını artırmakta ve bu da sonuçların tahmin edilen değerlerden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Ayrıca özellik veri sayısı da düştükçe yine algoritmanın performansının kötüleştiği anlaşılmaktadır.


MAPE=
19.2622
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

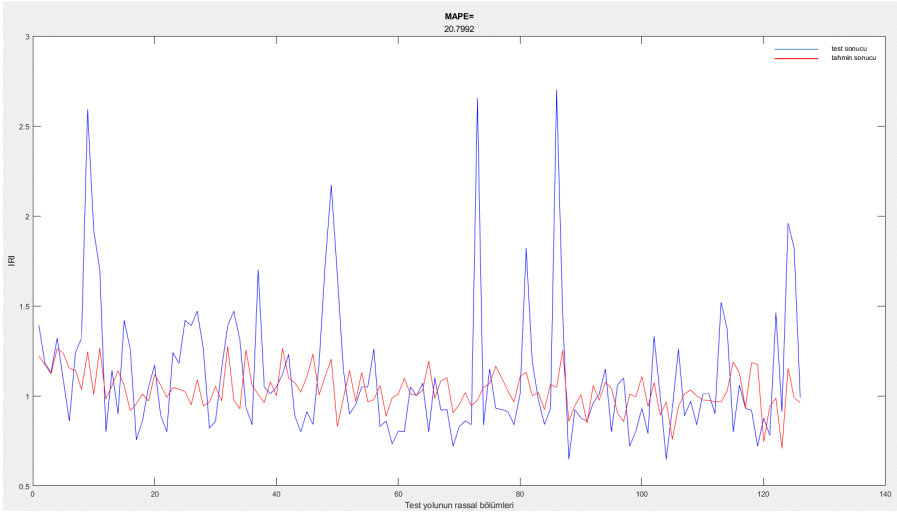
(a)


MAPE=
20.5917
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

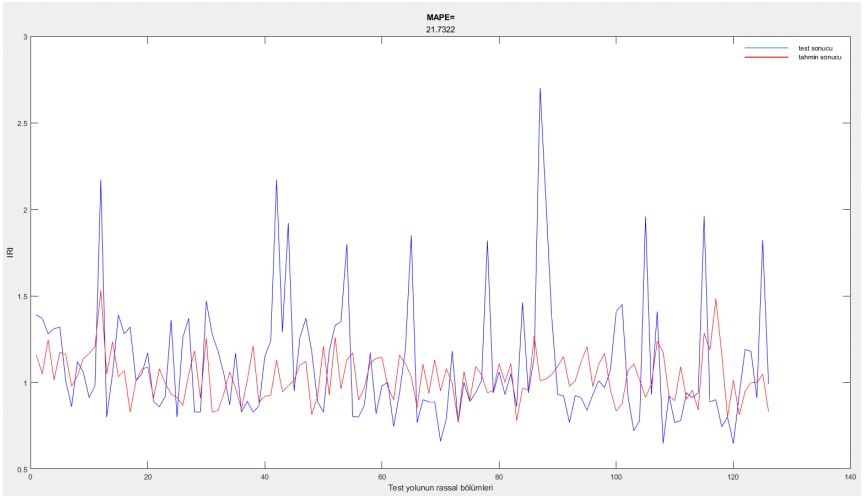
(b)


MAPE=
20.7563
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

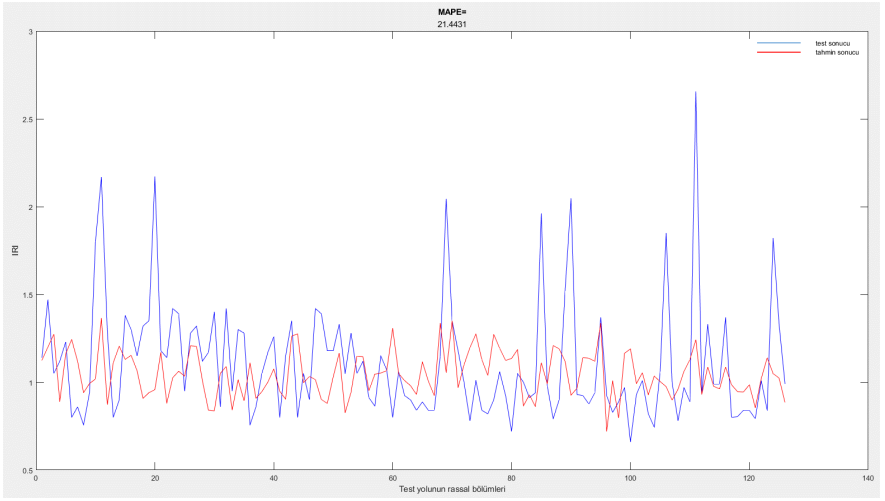
(c)


MAPE=
20.7992
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

(d)

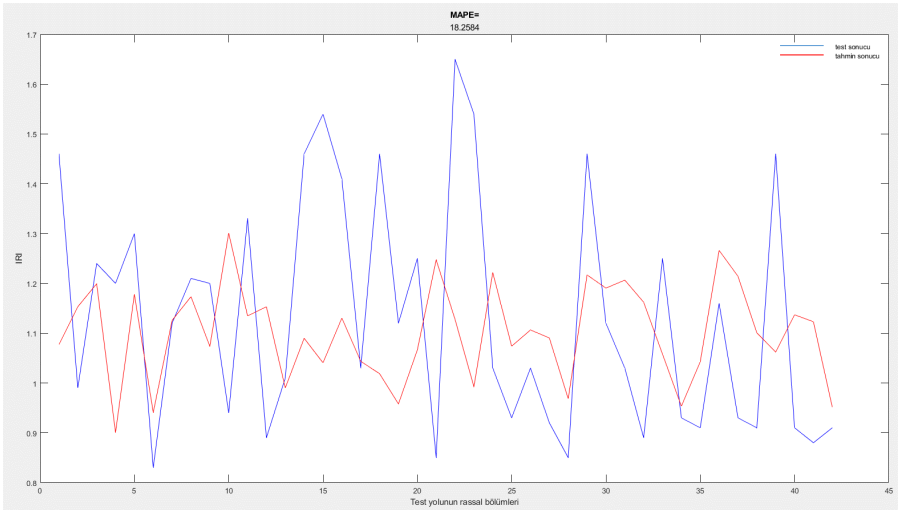


(e)

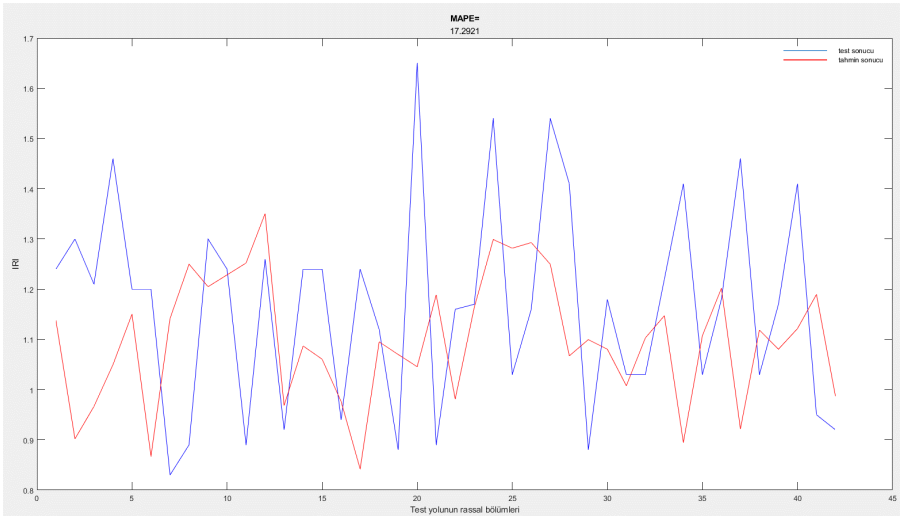


(f)

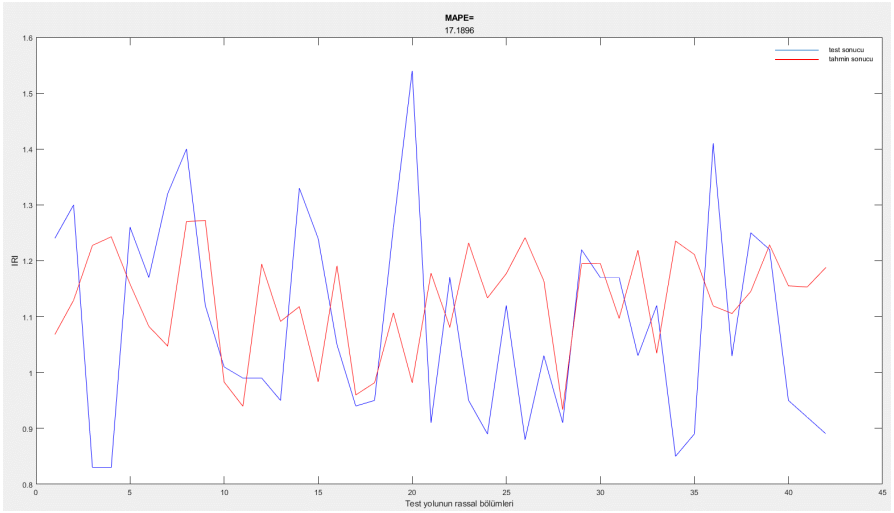
Şekil 4.21. 10m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F_3, (b): F_1 ve F_2, (c): F_3 ve F_4, (d): F_3, F_4 ve F_5, (e): F_2, F_3, F_6 ve F_7, (f): F_2, F_3, F_6, F_7 ve F_8 (devam)


MAPE=
18.2584
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

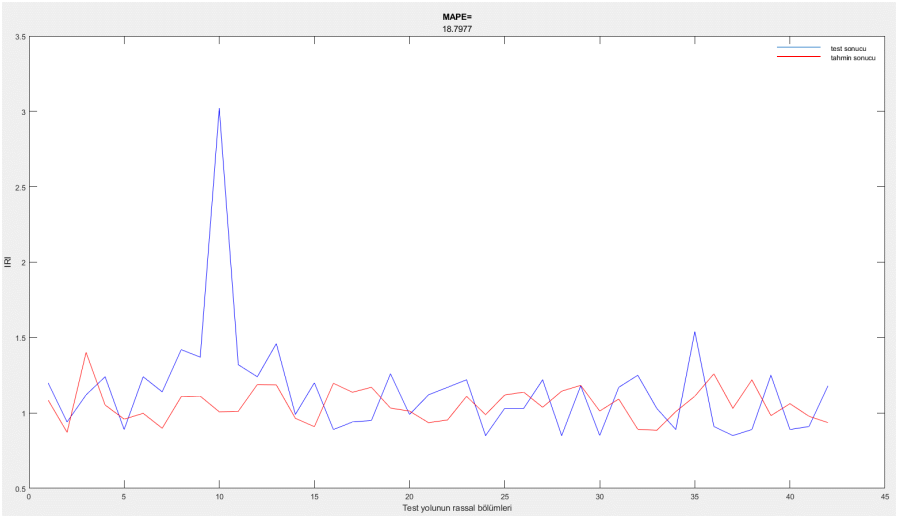
(a)


MAPE=
17.2921
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

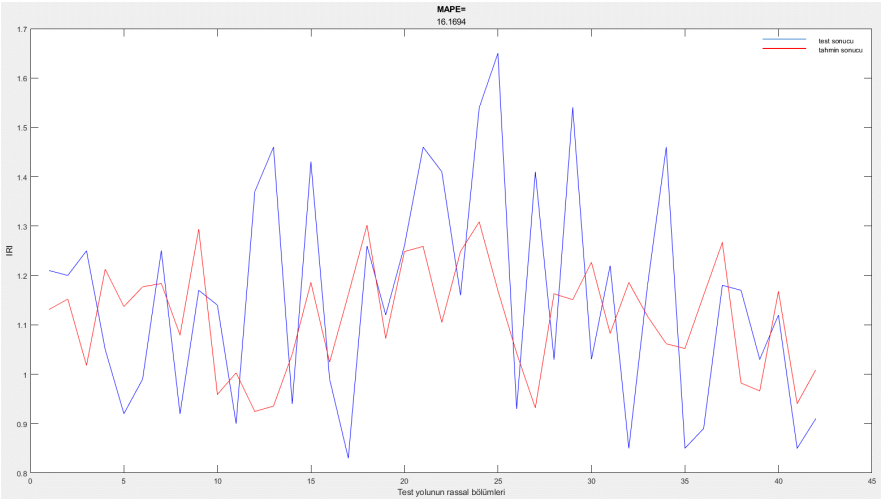
(b)


MAPE=
17.1896
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

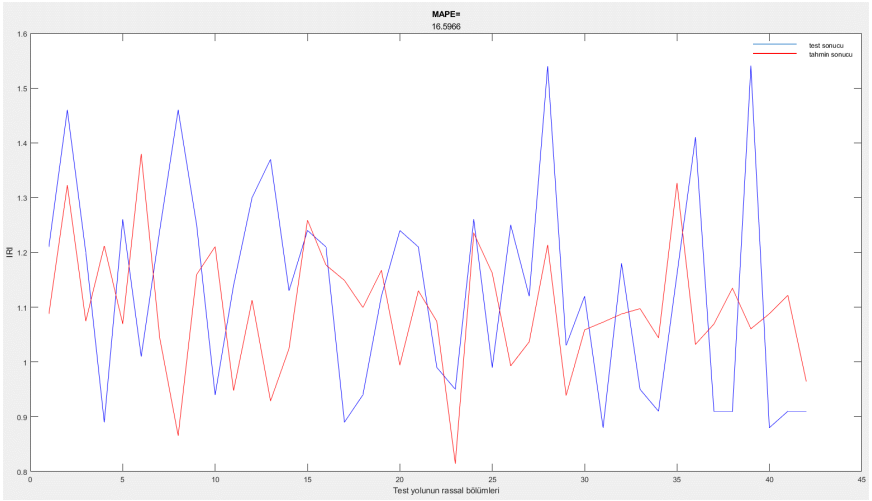
(c)


MAPE=
18.7977
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

(d)

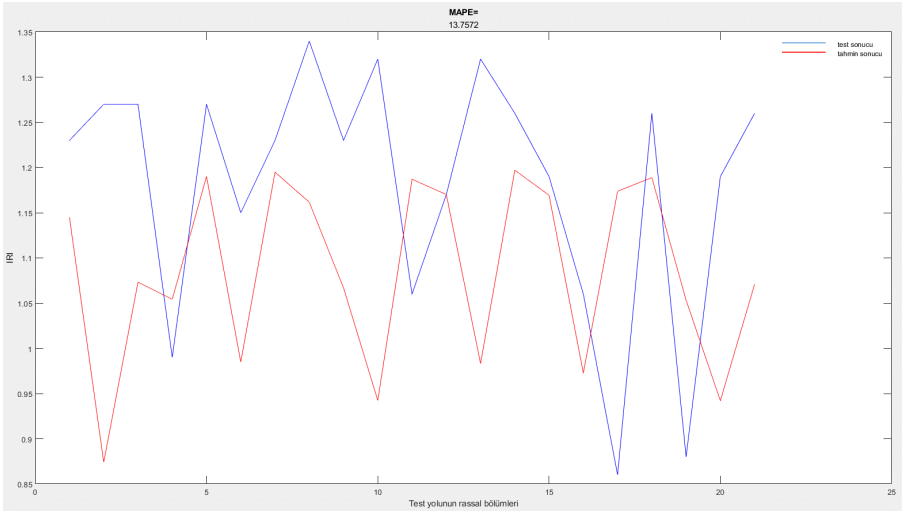


(e)

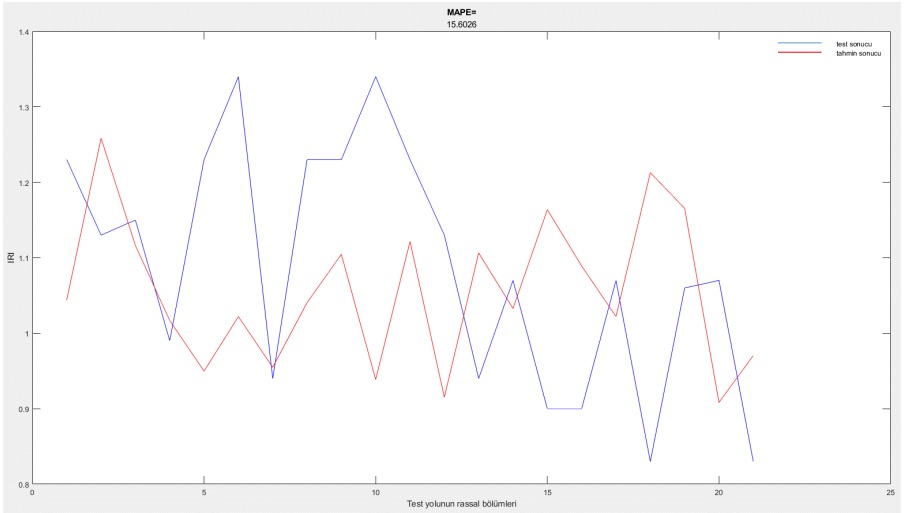


(f)

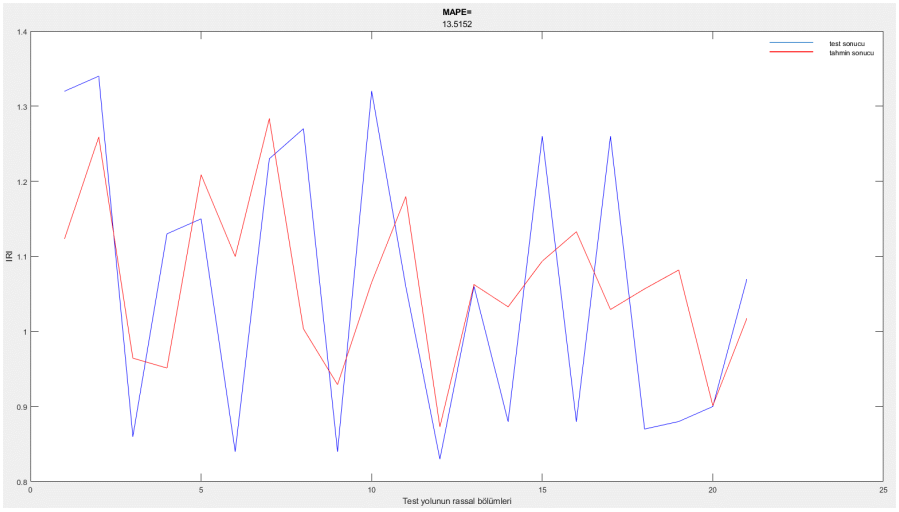
Şekil 4.22. 30m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8


MAPE=
13.7572
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

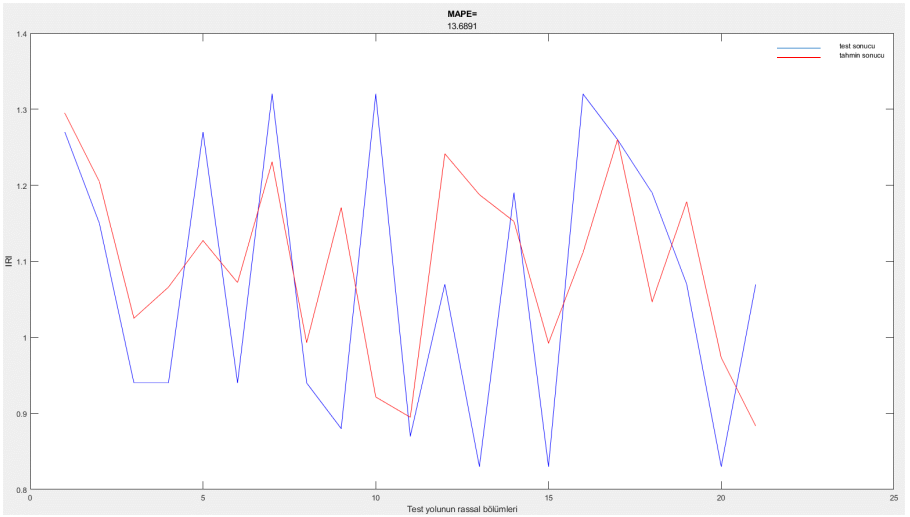
(a)


MAPE=
15.6026
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

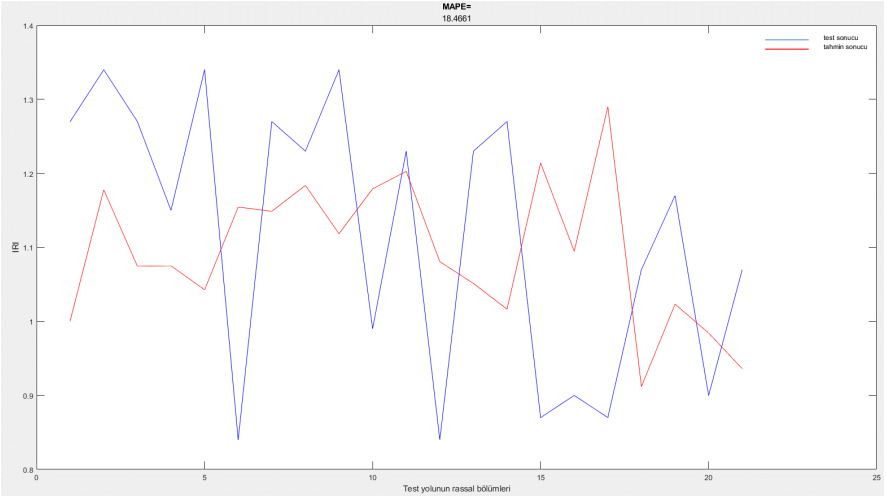
(b)


MAPE=
13.5152
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

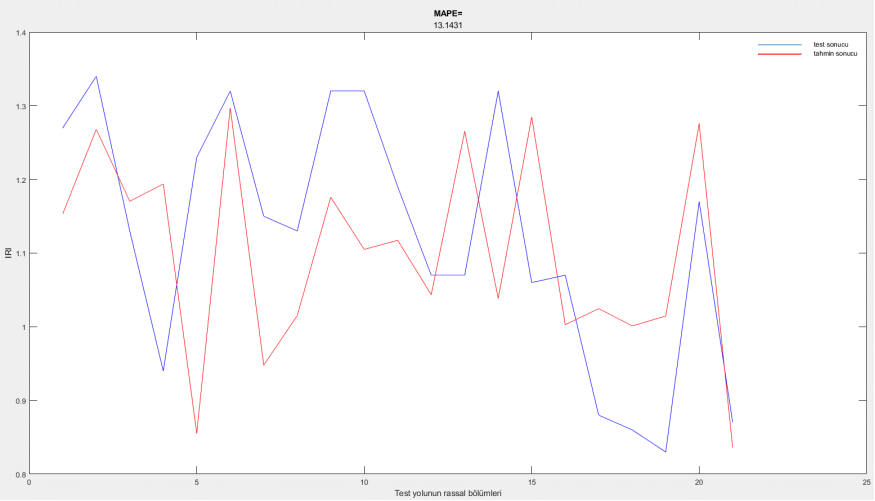
(c)


MAPE=
13.6891
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

(d)

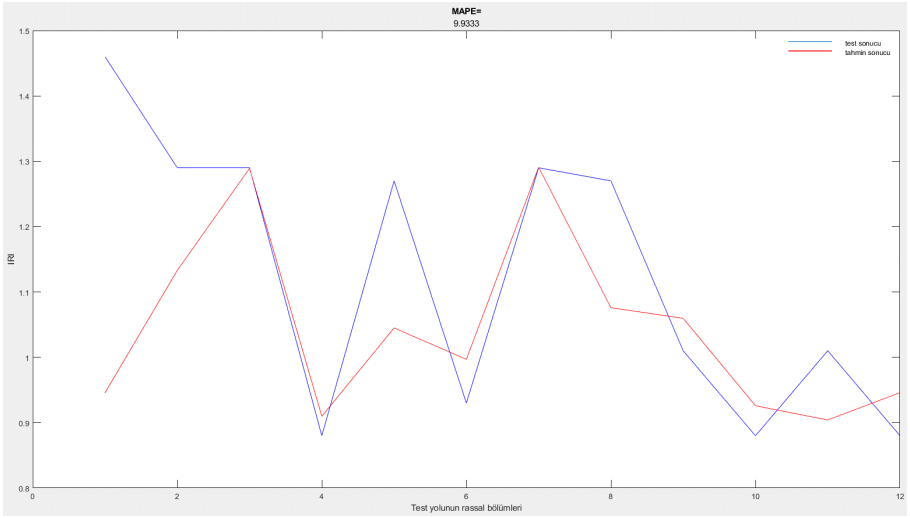


(e)

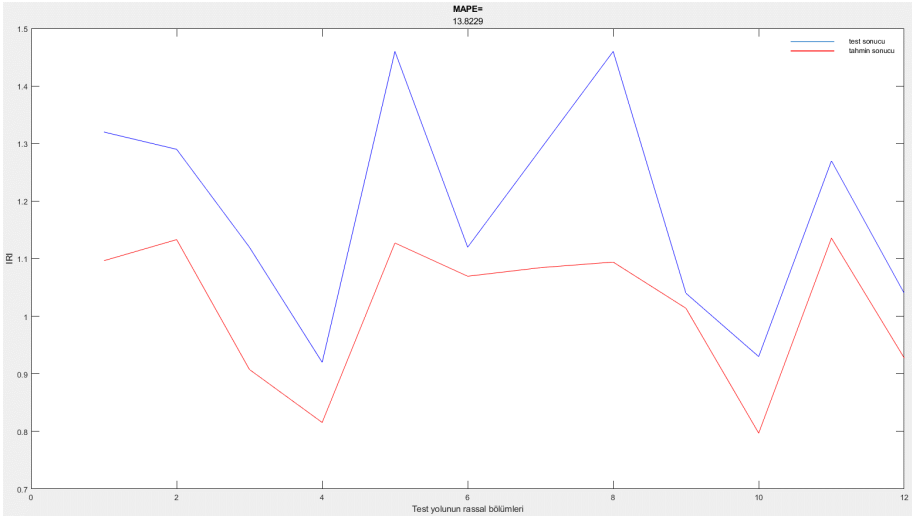


(f)

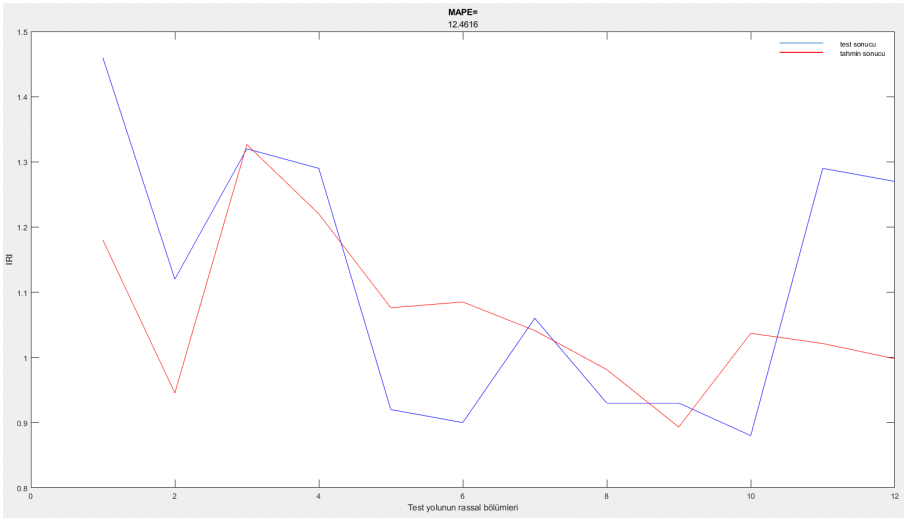
Şekil 4.23. 60m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8


MAPE=
9.9333
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

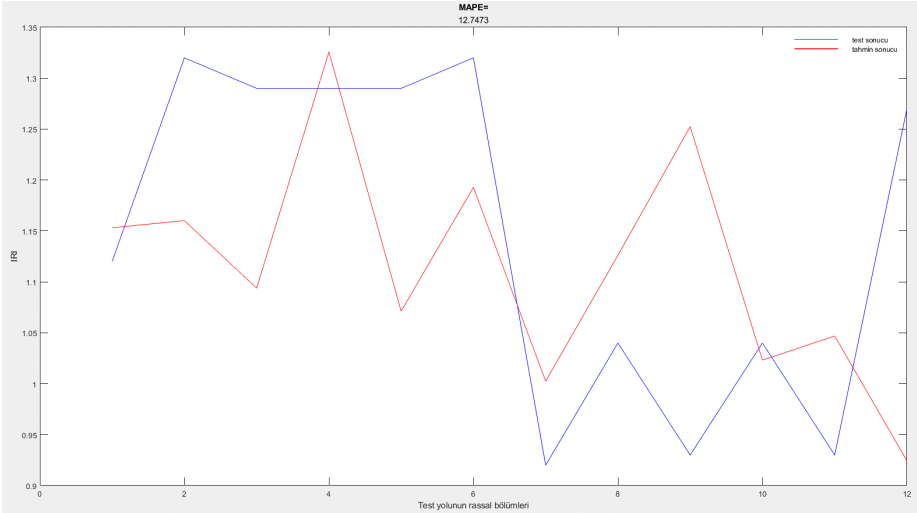
(a)


MAPE=
13.8229
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

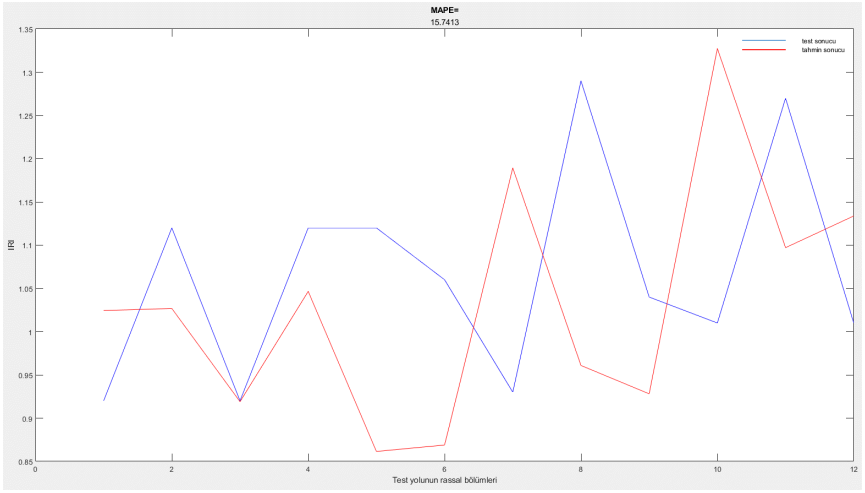
(b)


MAPE=
12.4616
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

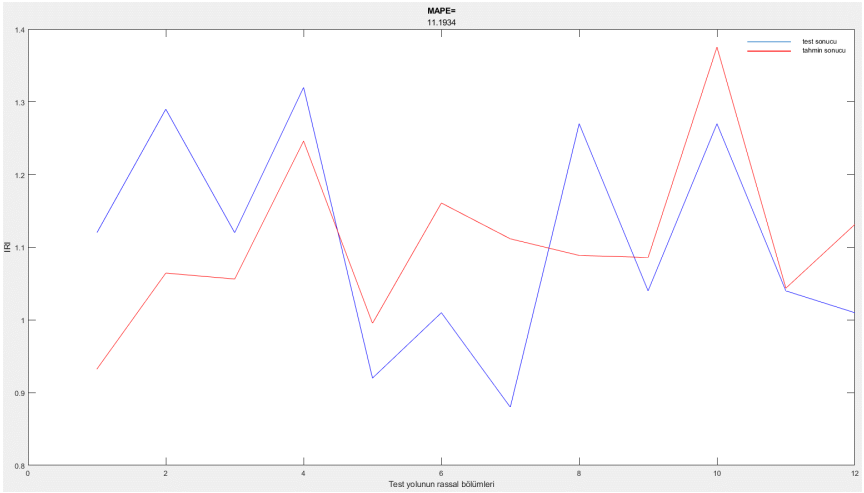
(c)


MAPE=
12.7473
test sonucu
tahmin sonucu
IRI
Test yolunun rassal bölümleri

(d)



(e)



(f)

Şekil 4.24. 100m aralıklı yol kesimlerinde farklı özellik veri setlerinden elde edilen test ve tahmin sonuçları; (a): F3, (b): F1 ve F2, (c): F3 ve F4, (d): F3, F4 ve F5, (e): F2, F3, F6 ve F7, (f): F2, F3, F6, F7 ve F8

Çizelge 4. 2. MAPE değerlerinin modelin hassasiyeti üzerindeki etkileri (Lewis, 1982)

MAPE	<10%	10% - 19,9%	20% - 49,9%	>50%
Hassasiyet	Çok iyi	İyi	Uygun	Uygun değil

Çizelge 4. 3. Test yolunun farklı kesit aralıklarında farklı özellik kombinasyonlarına göre değerlendirme ölçütleri

Kesit Uzunluğu (m)	Kombinasyonlar	Özellik Fonksiyonları (bkz. Özellik çıkarımı)	Özellik veri sayısı	%85 eğitim	%15 test	Değerlerdirme Ölçütleri			
						MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)
10 ([a])	Komb.1[a]	F_3	841	715	126	0,22	0,10	0,32	19,26
	Komb.2[a]	F_1, F_2	10092	8578	1514	0,23	0,11	0,34	20,59
	Komb.3[a]	F_3, F_4	1682	1430	252	0,24	0,12	0,35	20,75
	Komb.4[a]	**F_6, F_7**	**10092**	**8578**	**1514**	**0,19**	**0,06**	**0,25**	**18,08**
	Komb.5[a]	F_3, F_4, F_5	2523	2145	378	0,25	0,14	0,37	20,8
	Komb.6[a]	F_2, F_3, F_6, F_7	15979	13582	2397	0,25	0,13	0,36	21,73
	Komb.7	F_2, F_3, F_4, F_6, F_7	16820	14297	2523	0,25	0,12	0,35	21,44
30 ([b])	Komb.1[b]	F_3	280	238	42	0,21	0,06	0,25	18,25
	Komb.2[b]	F_1, F_2	3360	2856	504	0,2	0,06	0,25	17,29
	Komb.3[b]	F_3, F_4	560	476	84	0,18	0,04	0,22	17,19
	Komb.4[b]	**F_6, F_7**	**3360**	**2856**	**504**	**0,14**	**0,02**	**0,16**	**13,64**
	Komb.5[b]	F_3, F_4, F_5	840	714	126	0,23	0,14	0,37	18,8
	Komb.6[b]	F_2, F_3, F_6, F_7	5320	4522	798	0,19	0,05	0,23	16,17
	Komb.7[b]	F_2, F_3, F_4, F_6, F_7	5600	4760	840	0,18	0,05	0,22	16,6
	Komb.1[c]	F_3	139	118	21	0,16	0,04	0,19	13,75
	Komb.2[c]	F_1, F_2	1668	1418	250	0,16	0,04	0,2	15,6
	Komb.3[c]	F_3, F_4	278	236	42	0,14	0,03	0,16	13,51

60 (^{c})	Komb.4^{c}	F_6, F_7	1668	1418	250	0,14	0,03	0,17	13,68
	Komb.5^{c}	F_3, F_4, F_5	417	354	63	0,19	0,04	0,21	18,46
	Komb.6^{c}	**F_2, F_3, F_6, F_7**	**2641**	**2245**	**396**	**0,12**	**0,02**	**0,14**	**10,73**
	Komb.7^{c}	F_2, F_3, F_4, F_6, F_7	2780	2363	417	0,14	0,03	0,17	13,14
	Komb.1^{d}	F_3	77	65	12	0,12	0,02	0,13	9,93
	Komb.2^{d}	F_1, F_2	924	785	139	0,17	0,04	0,19	13,83
	Komb.3^{d}	F_3, F_4	154	131	23	0,16	0,02	0,13	12,46
100 (^{d})	Komb.4^{d}	F_6, F_7	924	785	139	0,14	0,024	0,15	12,88
	Komb.5^{d}	**F_3, F_4, F_5**	**231**	**196**	**35**	**0,09**	**0,009**	**0,09**	**5,34**
	Komb.6^{d}	F_2, F_3, F_6, F_7	1463	1244	219	0,13	0,023	0,15	12,74
	Komb.7^{d}	F_2, F_3, F_4, F_6, F_7	1540	1309	231	0,13	0,02	0,15	11,19

4.4. Geleneksel Yöntem ile TY-PVDF Yönteminin Karşılaştırılması

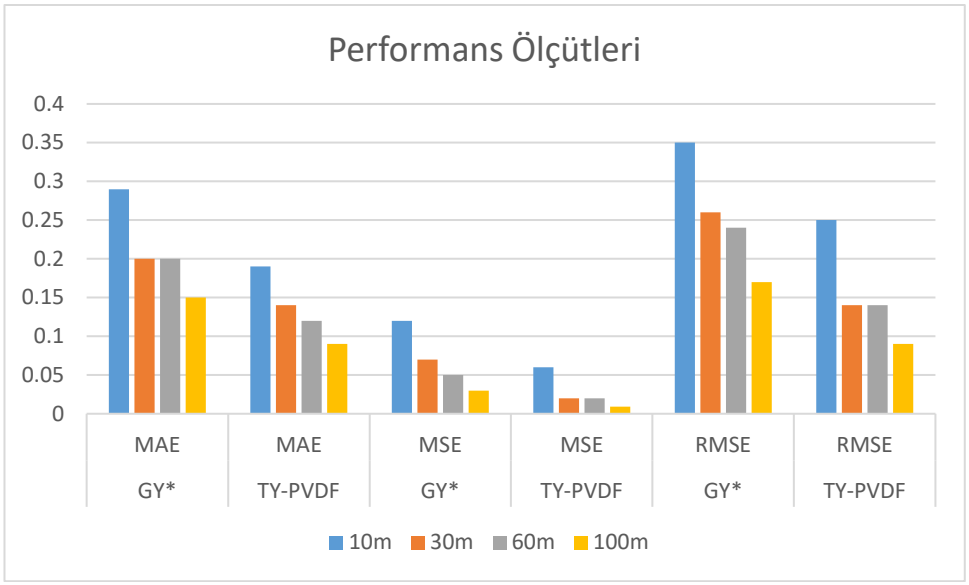
TY-PVDF'te sensörlerin tekerlek üzerindeki konumu ve sensörlerin yol kaplaması üzerinden belirli mesafeler aralığında veri alabildiği göz önünde bulundurularak test yolu belirli aralıklara bölünmüş ve bu aralıklar içinde IRI değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca geleneksel yöntem ile karşılaştırma yapılabilmesi açısından geleneksel yöntemde de aynı aralıklar dâhilinde IRI tahminleri yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında yeni önerilen yöntemin (TY-PVDF) ivmeölçer kullanılarak oluşturulan geleneksel yönteme göre referans IRI değerlerine nazaran daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Üstelik sinyal filtreleme ve birçok karmaşık matematiksel işlemlere gerek duyulmadan daha kolay ve etkin bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Ancak bu yöntem sadece belirli aralıklar dâhilinde IRI tahminleri yapabilmektedir. Bu durum geleneksel yöntemler ile kıyaslandığında TY-PVDF'in geliştirilmesi gerektiğinin bir göstergesidir. Bununla beraber bu çalışmada yüksek hassasiyetli bir ivmeölçer kullanılmamıştır. Bu çalışma daha hassas ivmeölçerler kullanılarak yeni yöntem ile karşılaştırılmalıdır.

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.25'te geleneksel yöntem ve TY-PVDF'e göre test yolu üzerindeki tahmini IRI değerlerinin performans ölçütlerine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çizelgede her iki yöntem için modelin en iyi sonucunu veren durumlar karşılaştırılmıştır. Yani geleneksel yöntemde Bursa istikametinin performans ölçümleri ve TY-PVDF'de ise her aralık için en iyi kombinasyonu gösteren performans ölçümleri gösterilmiştir. Buna göre, TY-PVDF'nin geleneksel yönteme göre tüm yol kesit aralıkları (10m, 30m, 60m ve 100m) ve performans ölçütlerine (MAE, MSE, RMSE, MAPE) göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca Şekil 4.25'te test yolunun aralık değerleri arttıkça performans ölçütlerinin daha da iyileştiği görülmektedir.

Çizelge 4. 4. Geleneksel yöntem ile TY-PVDF'in performans ölçütlerine göre karşılaştırılması

Aralık	Geleneksel Yöntem				TY-PVDF			
(m)	MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)	MAE	MSE	RMSE	MAPE (%)
10	0,29	0,12	0,35	23,79	0,19	0,06	0,25	18,08
30	0,2	0,07	0,26	17,58	0,14	0,02	0,14	13,64
60	0,2	0,05	0,24	17,13	0,12	0,02	0,14	10,73
100	0,15	0,03	0,17	12,65	0,09	0,009	0,09	5,34



*Geleneksel Yöntem, **TY-PVDF

Şekil 4.25. Geleneksel yöntem ve TY-PVDF'in performans ölçütlerine göre karşılaştırılması

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında IRI'yı hesap etmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu çalışma iki aşamada özetlenebilir. Birinci aşamada; IRI'yı hesap etmek için geleneksel hesap yöntemleri kullanılmıştır. Bunun için 3 eksenli bir ivmeölçer kullanılarak test yolundan ivmelenme verileri toplanmış ve hareket denklemleri kullanılarak belirlenen test yolunun IRI'sı tahmin dilmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada ise; geleneksel hesap yöntemlerinin yerine tekerlek-yol etkileşiminden faydalanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir bisikletin tekerleğine PVDF sensörler yerleştirilmiştir. Bu sensörler ile yol düzgünsüzlüğünün tekerlekte meydana getirdiği deformasyonlar ölçülmüş ve bu ölçüm verileri yeni geliştirilen veri toplama sisteminde (VTS) kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler, önemli makine öğrenme algoritmalarından biri olan DVR algoritmasında girdi verisi olarak kullanılmıştır. Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsü içinde 660m uzunluğunda bölünmüş, çift şeritli ve sıcak karışım asfalt kaplamalı bir yol test için kullanılmıştır. Test yolunun referans IRI değerleri Bursa Karayolu Müdürlüğünden getirtilen lazer profilometre aracı ile belirlenmiştir.

TY-PVDF'de test aracının tekerleğine monte edilen sensörlerin konumları dikkate alınmış ve test yolu bu sensör konumlarına göre 10m, 30m, 60m ve 100m'lik kesitler olacak şekilde dört ayrı grupta incelenmiş ve sonuçlar dört değerlendirme ölçütüne (MAE, MSE, RMSE ve MAPE) göre hesaplanmıştır. Burada belirtilen yol kesit aralıkları hem TY-PVDF hem de karşılaştırma yapılabilmesi için geleneksel yöntemde referans aralıklar olarak belirlenmiştir. Çeyrek araç geleneksel yöntemde veri toplama işleminden sonra, sinyal filtreleme, yol profilinin oluşturulması, IRI'nın tahmini ve bu sonuçların referans IRI değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. TY-PVDF ise, test yolundan elde edilen PVDF sensör verilerinin öne çıkan özellikleri belirlenmiş ve bu özellikler DVR algoritmasında referans IRI'nın tahmin edilmesi için girdi verisi olarak kullanılmıştır. Daha sonra bu algoritmanın sonuçları ile referans IRI değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. TY-PVDF ile tahmin edilen IRI değerlerinin yolun her bir aralık değerleri için modelin doğruluğunda tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle her bir aralık değerinde en uygun özellik kombinasyonlarının modelin doğruluğunda iyi sonuçlar (MAPE<20) verdiği görülmüştür. 10m ve 30m aralık değerleri için aynı özellik grupları

en iyi sonuçları vermiştir. Buna göre; 10m aralık için 0.19 MAE, 0.06 MSE, 0.25 RMSE ve 18,08 MAPE (Komb.4[a]) sonuçları, 30m aralık için ise 0.14 MAE, 0.02 MSE, 0.16 RMSE ve 13.64 MAPE (Komb.4[b]) sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca 60m aralık değeri için 0.12 MAE, 0.02 MSE, 0.14 RMSE, 10,73 MAPE (Komb.6[c]) ve 100m aralık değeri için ise 0.09 MAE, 0.009 MSE, 0.09 RMSE ve 5,34 MAPE (Komb.5[d]) sonuçları elde edilmiştir. Sonuç olarak, incelenen yol kesit aralıkları büyüdükçe beklenildiği gibi modelin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çeyrek araç geleneksel yöntemi ile Bursa istikameti ve Üniversite istikametinden elde edilen tahmini IRI sonuçlarına göre; test yolunun tüm kesit aralıklarında en iyi sonucu Bursa istikametinde elde edilen IRI değerleri göstermiştir. Referans IRI değerlerine göre 10m kesit aralıklarında; 0.29 MAE, 0.12 MSE, 0.35 RMSE ve 23,79 MAPE, 30m kesit aralıklarında 0.2 MAE, 0.07 MSE, 0.23 RMSE ve 17,58 MAPE, 60m kesit aralıklarında 0.2 MAE, 0.05 MSE, 0.23 RMSE ve 17,13 MAPE ve 100m kesit aralıklarında ise 0.15 MAE, 0.03 MSE, 0.17 RMSE ve 12,65 MAPE değerleri görülmüştür.

Bu tez çalışmasında sunulan TY-PVDF'in geleneksel yönteme göre test yolunun tüm kesit aralıklarında daha tutarlı ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca yolların düzgünsüzlüğünün belirlenmesi için kullanılabilecek alternatif ve etkin bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Bu TY-PVDF'in sunduğu tekerlek-yol etkileşim özelliği ile özellikle lazer profilometrelerin ölçümü etkileyen unsurlarının (yol kaplamasının temizliği, ışık ve parlama etkisi vb.) kısmen elimine edilmesine olanak sağlanmıştır. Ayrıca belirli bir yol kesiminin yıllara göre IRI değerlerindeki değişiminin izlenmesinde de alternatif ve etkin bir yöntem sunulmuştur. Bu durum karayollarının sürekli bakım ihtiyaçlarının karşılanmasında geleneksel yöntem ve araçlara nispeten karayolu yetkililerine daha ucuz, kolay ve alternatif bir yöntem sunmaktadır.

Bununla beraber; günümüzde giderek yükselen enerji fiyatları ve bunun yanında özellikle kent merkezlerindeki trafik yoğunluğu insanların bireysel ulaşıma olan ilgisini artırmaktadır. Üstelik pandeminin etkisi ile önemi artan bireysel ulaşım gibi kavramların motorsuz ulaşıma olan ilgiyi artırması bu yolların da bakım ihtiyaçlarının karşılanmasını gerektirmektedir ve TY-PVDF'nin bu ihtiyacı karşılayabileceği görülmektedir.

Bu çalışma ayrıca, tekerleğe monte sensörler ile tekerlek basınç ölçümü, yol sürtünme katsayısının ve yol kusurlarının belirlenmesi için yapılan akıllı tekerlek konsept çalışmaları için de uygun bir niteliktedir.

Burada dikkate alınması gereken unsurlardan biri; sürücünün ağırlığı, tekerlek rijitliği ve sönüm oranının dikkate alınması gerekliliğidir. Geleneksel yöntem için kullanılan bu kavramlar, önerilen bu TY-PVDF için de geçerlidir. Çünkü bu değişkenler tekerleğin deformasyonu üzerinde etkilidir ve dolayısıyla bu değişkenler tekerleğe monte PVDF sensörlerin üzerinde oluşacak yük miktarını etkileyecektir. Bu çalışmadaki sonuçlar tüm bu değişkenler nazara alınarak ortaya konulmuştur. Farklı tekerlek tipleri ve dolayısıyla farklı rijitlik ve sönüm oranlarına göre bu sonuçlar değişiklik arz edecektir.

Burada unutulmaması gereken bir husus; bu çalışmada çok daha hassas ivmeölçerlerin kullanılabileceği durumudur. Böylece geleneksel yöntem ile referans IRI değerlerine çok daha yakın sonuçlar alınabilecektir. Ayrıca TY-PVDF yönteminde kullanılan sensör sayıları artırılarak yol üzerinden daha kısa mesafe aralıklarında veriler alınabilir. Bir diğer önemli husus ise, GPS sensör verilerinin enterpolasyon yöntemi ile referans verilerle eşleştirilmesidir. Burada her ne kadar IRI değerlerinde yakın sonuçlar çıkmış olsa da enterpolasyondan ve GPS sensöründen kaynaklı hatalar meydana gelmiş ve bu durum ölçümün hassasiyetine etki etmiştir.

Bu çalışma; tekerleğe monte edilen sensörlerin tekerlek üzerindeki konumlarının optimizasyonu ve sensör sayılarının artırılması ile iyileştirilebilir. Tekerleğe monte edilen sensörlerin sayısının artması daha kısa aralıklarda yol kaplamalarının değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca normal bir test aracı üzerine bu yeni önerilen yöntem de kurularak test çalışmaları yapılabilir. Böylece hem test aracındaki ölçüm sistemi hem de yeni önerilen yöntem eş zamanlı olarak çalışabilir ve harita üzerinde GPS sensörünün hataları minimize edilebilir ve enterpolayon işlemi ortadan kaldırılabilir. Bunun yanı sıra, bu çalışma daha bozuk bir yol üzerinde test çalışmaları yapılarak zenginleştirilmeli ve TY-PVDF yönteminin bu duruma göre performansı ölçülmelidir.

Sonuç olarak; bu tez çalışmasında sunulan TY-PVDF yöntemi, yolların IRI değerlerinin belirlenmesinde alternatif bir yöntem sunmuş ve olumlu sonuçlar vermiştir. Böylece bu yöntem ile karayollarının sürekli bakım ihtiyaçlarının karşılanmasında karayolu yetkililerine ucuz ve kolay bir IRI ölçüm olanağı verilmektedir.

KAYNAKLAR

A. Mann, K. J. McManus and R. P. Evans (1998). The Use of Power Spectral Density Analysis to Determine Deterioration Modes in Pavement Structures. *9th Road Engineering Association of Asia and Australasia Conference, (2),* 263-268.

Abd El-Hakim, R., & El-Badawy, S. (2013). International roughness index prediction for rigid pavements: an artificial neural network application. *Advanced Materials Research*, *723*, 854–860. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.854

Abdelaziz, N., Abd El-Hakim, R. T., El-Badawy, S. M., & Afify, H. A. (2020). International roughness index prediction model for flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, *21*, 88–99. https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1441414.

Abdollahpour, A. Kosari-Moghaddam, and M. Bannayan. (2020). Prediction of wheat moisture content at harvest time through ANN and SVR modeling techniques. *Inf. Process. Agricult., vol. 7*(4), 500–510. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.01.003

Abudinen, D., Fuentes, L.G., Carvajal Muñoz, J.S. (2017). Travel Quality Assessment of Urban Roads Based on International Roughness Index. *Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board,* 2612, 1-10.

Abulizi, N., Kawamura, A., Tomiyama, K., Fujita, S. (2016). Measuring And Evaluating of Road Roughness Conditions With A Compact Road Profiler And ArcGIS. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 3(5): 398-411. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.004.

Akbarian, M. , vd., (2015). Network analysis of Virginia's interstate pavement-vehicle interactions: mapping of roughness and deflection-induced excess fuel consumption. *Proceedings of 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.

Akgüngör, A. P; Demirel, A. (2008). Investigating urban traffic-based noise pollution in the city of Kirikkale, Turkey, Transport 23(3): 273–278. https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.273-278

Akgüngör, A. P. Doğan, E. (2009). An artificial intelligent approach to traffic accident estimation: Model development and application, Transport 24(2): 135–142. https://doi.org/10.3846/1648-4142.2009.24.135-142.

Albuquerque, F. S., and W. P. Núnez. (2011). Development of roughness prediction models for low-volume road networks in northeast Brazil. *Transp. Res. Rec.* 2205 (1): 198–205. https://doi.org/10.3141/2205-25.

Al-Omari, B., and M. I. Darter. (1995). Effect of pavement deterioration types on IRI and rehabilitation. *Transp. Res. Rec.* 1505 (1): 57–65.

American, A., & Standard, N. (1984). An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 31(2), 8–10. https://doi.org/10.1109/T-SU.1984.31464.

Amr A. Elhadidy, Sherif M. El-Badawy & Emad E. Elbeltagi. (2021). A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation. *International Journal of Pavement Engineering, 22*(5), 643-652, doi: 10.1080/10298436.2019.1633579

Anonim, (2010). NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet. https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/NEO6MV2%20GPS%20Module%20Datasheet.pdf. (Erişim Tarihi: 08.10.2022)

Anonim, 2018. Movable Type Scripts. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. https://www.movabletype.co.uk/scripts/latlong.html. (Erişim: 04.09.2018).

APOLLO: Final Report Including Technical Implementation Plan (Annex) Deliverable 22/23, 2005. <www.vtt.fi/apollo/deliverables/ apollo_finalreport.pdf?>.

Armstrong, E. G., Sandu, C., & Taheri, S. (2015). Investigation into use of piezoelectric sensors in a wheeled robot tire for surface characterization. *Journal of Terramechanics, 62,* 75–90. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.07.003

ASTM E867, (2002). Terminology relating to vehicle-pavement systems. Philadelphia, PA: *American Society for Testing and Materials.*

ASTM E1926-08, (2008). Standart Practice for Computing International Roughness Index of Roads From Longitudinal Profile Measurements. West Conshohocken, PA: *American Society of Testing And Material*.

Attoh-Okine, N. O. (1999). Analysis of learning rate and momentum term in backpropagation neural network algorithm trained to predict pavement performance. *Adv. Eng. Software*, 30 (4): 291–302. https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00071-4.

Awasthi, G.P., Singh, T., & Das, A.C. (2003). On pavement roughness indices. *Journal of the Institution of Engineers*. India. Civil Engineering Division, 84, 33-37.

Aydin, M. M., Topal, A. (2016). Effect of road surface deformations on lateral lane utilization and longitudinal driving behaviours. *Transport, 31*(2), 192–201. https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1193049

Aydın, M.M., Yıldırım, M.S., Forslof, L. (2017). The Use of Smart Phones to Estimate Road Roughness: A Case Study in Turkey. *International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET 2017),* 21-23.

Bajic, M., Pour, S. M., Skar, A., Pettinari, M., Levenberg, E., Alstrom, T. S. (2021). Road Roughness Estimation Using Machine Learning. *Computer Science.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.01199

Bayrak, M. B. (2004). Use of Artificial Neural Networks for Predicting Rigid Pavement Roughness. *Midwest Transportation Consortium fall student consortium*, 1–16.

Ben-Edigbe, J. (2010). Assessment of speed-flow-density functions under adverse pavement condition. *International Journal of Sustainable Development and Planning, 5*(3), 238–252. https://doi.org/10.2495/SDP-V5-N3-238-252

Ben-Edigbe, J. (2016). Computing flexible pavement distress zone travel time differentials on multilane highway. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(14), 8340–8344.

Bidgoli, M. A., Amir Golroo, Nadjar, H. S., Rashidabad, A. G., Ganji, M. (2019). R. Road roughness measurement using a cost-effective sensor-based monitoring system. *Automation in Construction*, 104: 140-152, ISSN 0926-5805, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.007.

Bridgelall, R., Hough, J., Tolliver, D. (2019). Characterising pavement roughness at non-uniform speeds using connected vehicles. *International Journal of Pavement Engineering, 20(*8), 958-964, DOI: 10.1080/10298436.2017.1366768.

Cantisani, G., & Loprencipe, G. (2010). Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits. Journal of Transportation Engineering-asce, 136, 818-826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000143.

Chandra, S., Sekhar, C.R., Bharti, A.K., Kangadurai, B. (2012). Relationship between pavement roughness and distress parameters for Indian highways. *Journal of Transportation Engineering 139*(5), 467-475.

Chandra, S., Chalumuri, R. S., Bharti, A. K., Kangadurai, B. (2013). Relationship between Pavement Roughness and Distress Parameters for Indian Highways. *Journal of Transportation Engineering, 139*(5), 467-475. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000512.

Choi, J. H., Adams, T. M., & Bahia, H. U. (2004). Pavement roughness modeling using back-propagation neural networks. *Codataster-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *19*, 295–303. https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2004.00356.x

Choi, Seunghyun, and Myungsik Do. (2020). Development of the Road Pavement Deterioration Model Based on the Deep Learning Method. *Electronics 9*, 1: 3. https://doi.org/10.3390/electronics9010003.

Chou, S. F., & Pellinen, T. K. (2005). Assessment of construction smoothness specification pay factor limits using artificial neural network modeling. *Journal of Transportation Engineering*, *131*: 563–570. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:7(563).

Daidzic, N. E. (2017). Long and short-range air navigation on spherical Earth. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 4(1). https://doi.org/10.15394/ijaaa.2017.1160

De-Luca, M. (2020). Evaluation of Runway Bearing Capacity using International Roughness Index. *Transportation Research Procedia, 45*, 119-126. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.096.

Dell'Acqua, G.; Russo, F. (2011). Road performance evaluation using geometric consistency and pavement distress data, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board, 2203*, 194–202. https://doi.org/10.3141/2203-24

Douangphachanh, V.; Oneyama, H. (2014). A Model for the Estimation of Road Roughness Condition from Sensor Data Collected by Android Smartphones. *JJSCE SerD3 Infrastructure Plan. Manag*. 70, doi:10.2208/JSCEJIPM.70.I 103

Douangphachanh, V., Oneyama, H. (2014). A study on the use of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition. *J Wireless Com Network 2014, 114* (2014). https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-114

Duarte, M.L.; Melo, M.G.C. (2018). Influence of pavement type and speed on whole body vibration (WBV) levelsmeasured on passenger vehicles. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, 40*, 3–12.

Erdogan G, Alexander L, Rajamani R. (2011). Estimation of tireroad friction coefficient using a novel wireless piezoelectric tire sensor. *IEEE Sensors Journal, 11*(2), 267–279. 10.1109/JSEN.2010.2053198.

Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S. (2008). Balakrishnan, H. The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. *Paper presented at the sixth international conference on mobile system, applications and services, Breckenridge, Colorado, United States*.

Eshkabilov, E., Yunusov, A. (2018). Measuring and Assessing Road Profile by Employing Accelerometers and IRI Assessment Tools. *Amercan journal of Traffic and Transportation Engineerin,. 3*(2), 24-40. https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20180302.12.

Georgiou, P., Plati, C., & Loizos, A. (2018). Soft computing models to predict pavement roughness: A comparative study. *Advances in Civil Engineering*. https://doi.org/10.1155/2018/5939806.

Ghasemlou, K.; Aydın, M. M.; Yıldırım, M. S. (2016). An investigation on lane blockage effects at signalized intersections, *Internatıonal Journal for Traffic and Transport Engıneerıng* 6(3): 289–302. https://doi.org/10.7708/ijtte.2016.6(3).05

Ghosh, L. E., Lu, L., Ozer, H., Ouyang, Y., & Al-Qadi, I. L. (2015). Effects of Pavement Surface Roughness and Congestion on Expected Freeway Traffic Energy Consumption. Transportation Research Record, 2503(1), 10–19. https://doi.org/10.3141/2503-02.

Gondal, Farrukh M. (2007). Embedded Wireless Sensor Network for Aircraft/Automobile Tire Structural Health Monitoring. *Master's thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA*. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1717261>.

Gong, H., Sun, Y., Shu, X., & Huang, B. (2018). Use of random forests regression for predicting IRI of asphalt pavements. *Construction and Building Materials, 189*, 890-897.

Gong, H., Sun, Y., Hu, W., Polaczyk, P., & Huang, B. (2019). Investigating impacts of asphalt mixture properties on pavement performance using LTPP data through random forests. *Construction and Building Materials 204*, 203-212. doi:10.1016/j.conbuıldmat.2019.01.198.

González, O.D. (2016). Quantification of the impact of roadway condition on gas emissions. The 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.

Gu, H., Zhao, Y., Wang, M L. (2005). Wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring. Struct. Control Health Monit.12 (3–4), 329–343. ISSN: 1545-2255. doi: http://dx.doi.org/10.1002/stc.61.

Haas, R., Hudson, W. R., Zaniewski, J. P. (1994). Modern Pavement Management, Malabar, Florida, Usa, Krieger Pub. Co

Hall J. W, Smith, K L, Glover, L. T. (2009). Guide for Pavement Friction. *National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.* doi: https://doi.org/10.17226/23038

Harris, N. K., Gonzalez, A., OBrien, E.J., McGetrick. P. (2010). Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique, Journal of Sound and Vibration, 329(5), 2010, Pages 497-508, ISSN 0022-460X, https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.09.035.

Hossain, M., Gopisetti, L. S. P., & Miah, M. S. (2020). Artificial neural network modelling to predict international roughness index of rigid pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *13*, 229–239. https://doi.org/10.1007/s42947-020-0178-x.

Hua, Gu, Yang, Zhao, Ming, L., Wang, A. (2005). Wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring. *Struct. Control Health Monit, 12*(3–4), 329–343. ISSN: 1545-2255. doi:http://dx.doi.org/10.1002/stc.61.

ISO 13473-2. (2002). Characterization of Pavement Texture by use of Surface Profiles-Part 2: Terminology and Basic Requirements Realted to Pavement Texture Profile Analysis. Geneva, Switzerland: *International Organization for Standardization.*
J. J. Pont and A. Scott. (1999). Beyond Road Roughness - InterpretingRoad Profile Data. *Road and Transport Research, 8*(1), 12-28.

Kaloop M. R., El-Badawy S, M. Ahn J., Sim H. B., Hu J. W., & Abd El-Hakim R. T. (2022). A hybrid wavelet-optimally-pruned extreme learning machine model for the estimation of international roughness index of rigid pavements. *International Journal of Pavement Engineering,* 23(3), 862-876, DOI: 10.1080/10298436.2020.1776281

Karaman E. (2018). Otomobil motor sesinden modelinin tanınması. *Akdeniz Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.*

Karballaeezadeh, N., S. Mohammadzadeh, D. Moazemi, D. Band, S. S. Mosavi, and U. Reuter. (2020). Smart structural health monitoring of flexible pavements using machine learning methods. *Coatings 10* (11): 1100. https://doi.org/10.3390/coatings10111100.

Kargah-Ostadi, N. (2014). Comparison of machine learning techniques for developing performance prediction models. *In Computing in civil and building engineering,* 1222–1229. Reston, VA: ASCE. https://doi.org/10.1061/9780784413616.152.

Kargah-Ostadi, N., S. M. Stoffels, and N. Tabatabaee. (2010). Networklevel pavement roughness prediction model for rehabilitation recommendations. *Transp. Res. Rec. 2155* (1), 124–133. https://doi.org/10.3141/2155-14.

Kırbaş, U. (2018). Konforlu Sürüş için Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi Sınır Değerlerinin Belirlenmesi. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 301-309. https://doi.org/10.21923/jesd.416037.

Kobayashi, K., K. Kaito, and N. Lethanh. (2012). A Bayesian Estimation Method to Improve Deterioration Prediction for Infrastructure System with Markov Chain Model. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction, Vol. 1*(1), 1–13.

L. Gabrielli, L. Ambrosini, F. Vesperini, V. Bruschi, S. Squartini and L. Cattani. (2019). Processing Acoustic Data with Siamese Neural Networks for Enhanced Road Roughness Classification. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN),* 1-7, doi: 10.1109/IJCNN.2019.8852108.

Lee, J., Nam, A.B., ve Abdel-Aty, M. (2015). Effects of pavement surface conditions of traffic crash severity. ASCE, *Journal of transportation engineering* 2015, DOI: 10.1061/ (ASCE)TE.1943-5436.0000785.

Lewis, C.D. (1982) International and Business Forecasting Methods. Butterworths, London.

Li, H., Harvey, J., Wu, R., Thigpen, C., Louw, S., Chen, Z., Lea, J., Jones, D., & Rezaie, A. (2013). Measurement of Macrotexture on Surface Treatments and Survey of Bicyclist Ride Quality on Mon-198 and SLO-1 Test Sections. *530*, 126p. http://www.its.ucdavis.edu/research/publications/publication-detail/?pub_id=1999;%5Cnhttp://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/UCPRC-TM-2013-07.pdf

Lin, J.-D., Yau, J.-T., & Hsiao, L.-H. (2003). Correlation analysis between international roughness index (IRI) and pavement distress by neural network. *In 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. 12–16,* Transportation Research Board, İshington, D.C.

Loprencipe, G., & Cantisani, G. (2013). Unified Analysis of Road Pavement Profiles for Evaluation of Surface Characteristics. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 7, 1-14. http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n8p1.

Loprencipe, G., Zoccali, P. (2019). Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness. *International Journal of Pavement Engineering, 20*(7), 782-791, DOI: 10.1080/10298436.2017.1345554.

Lubis, M. Z., Manik, H. M., Wulandri, P. D. (2016). Signal Processing and Fourier Trransform. *Signal processing for marine acoustic and dolphin using matlab. Chapter: 1Publisher: LAP LAMBERT Academic Publishing is a trademark of OmniScriptum GmbH & Co. KG.*

M220 Series Capsule Slip Ring. senring.com/pdf/Senring-M220-Series-SlipRing-Catalog.pdf (Erişim Tarihi: 08.10.2022)

Mactutis, J. A., S. H. Alavi, and W. C. Ott. (2000). Investigation of relationship between roughness and pavement surface distress based on WesTrack project. *Transp. Res. Rec. 1699* (1): 107–113. https://doi.org/10.3141/1699-15.

Marcelino, P., M. D. Lurdes Antunes, E. Fortunato, and M. Castilho Gomes. (2019). Machine learning approach for pavement performance prediction. *Int. J. Pavement Eng. 22* (3): 341–354. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1609673.

Mazari M., Daniel D. Rodriguez, D. D. (2016). Prediction of pavement roughness using a hybrid gene expression programming-neural network technique. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *3*(5), 448-455, ISSN 2095-7564. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.007.

Measurement Specialties, Piezo Film Sensors Technical Manual. Erişim Tarihi: 08.10.2022. https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MSI-techman.pdf

A. Meitzler. (1988). IEEE standard on piezoelectricity. Society, USA.

Mia, M., Dhar, N.R. (2019). Prediction and optimization by using SVR, RSM and GA in hard turning of tempered AISI 1060 steel under effective cooling condition. *Neural Comput & Applic 31, 2349–2370*. https://doi.org/10.1007/s00521-017-3192-4

Mishra, A., Gondal, F. M., Afrashteh, A. A., Wilson, R. R., Moffitt, R. D., Kapania, R. K., & Bland, S. (2006). Embedded wireless sensors for aircraft/automobile tire structural sealth monitoring. 2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks, WiMESH 2006, 163–165. https://doi.org/10.1109/WIMESH.2006.288637

Mohan P, Padmanabhan VN, Ramjee R: Nericell. (2008). Rich monitoring of road and traffic condition using mobile smartphones. *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems* 2008, 323-336.

Moon, K.S., Liang, H., Yi, J., & Mika, B. (2007). Tire tread deformation sensor and energy harvester development for smart-tire applications Proc. *SPIE 6529, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 65290K.* https://doi.org/10.1117/12.721009.

MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, Revision 3.4. https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf

Mubaraki, M. (2009). Predicting pavement condition deterioration for the Saudi inter-urban road network. In Proc., Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: *Selected Papers from the 2009 GeoHunan, 56–61. Reston, VA: ASCE.* https://doi.org/10.1061/41045(352)9.

Mubaraki, M. (2016). Highway subsurface assessment using pavement surface distress and roughness data. *Int. J. Pavement Res. Technol. 9* (5): 393–402. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.10.001.

Nakashima, S., Aramaki, S., Kitazono, Y., Mu, S., Tanaka, K., Serikava, S. (2016). Aplication of Ultrasonic Sensor in Road Surface Condition Distinction Methods. *Sensors 16, 1678*; doi:10.3390/s16101678.

N. M. Newmark. (1959). "A Method of Computation for Structural Dynamics," *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 85*, 1959, pp. 67-94.

NEO-6, u-blox 6 GPS Modules, Datasheet. https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf

Okuda, T., K. Suzuki, and N. Kohtake. (2018). Non-Parametric Prediction Interval Estimate for Uncertainty 10 Transportation Research Record 00(0) Quantification of the Prediction of Road Pavement Deterioration. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, 2018. IEEE*, 824–830.

Perera, R.W.; Kohn, S.D.; Rada, G.R. (2008). LTPP Manual for Profile Measurements and Processing; FHWA: McLean, VA, USA, 2008.

Perttunen, M. et al. (2011). Distributed Road Surface Condition Monitoring Using Mobile Phones. In: Hsu, CH., Yang, L.T., Ma, J., Zhu, C. (eds) Ubiquitous Intelligence and Computing. UIC 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6905. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23641-9_8

PIARC, (1987). World Road Association: report of the committee on surface characteristics. Brussels: Belgium, s.n.

Pooja, M. (2015). Upgradation of low cost roughness measuring equipment and development of performance model. *International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol:04* (01), 335-344. https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0401051

Prentkovskis, O.; Tretjakovas, J.; Švedas, A.; Bieliatynskyi, A.; Daniūnas, A.; Krayushkina, K. (2012). The analysis of the deformation state of the double-wave guardrail mounted on bridges and viaducts of the motor roads in Lithuania and Ukraine. *Journal of Civil Engineering and Management* 18(5): 761–771. https://doi.org/10.3846/13923730.2012.731252

Purdue University, (2012). Introduction to Transportation Engineering, https://engineering.purdue.edu/~ce361/LECTURE/Lrigid_pms.html.

Q. Liu, L. Sun, A. Kornhauser, J. Sun, and N. Sangwa. (2019). Road roughness acquisition and classification using improved restricted Boltzmann machine deep learning algorithm. *Sensor Review, 39*(6), 733–742.

Qian, X., Moore, J. K., & Niemeier, D. (2020). Predicting Bicycle Pavement Ride Quality: Sensor-Based Statistical Model. *Journal of Infrastructure Systems*, *26*(3), 1–10. https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.00005721.

R. Hesami and K. J. McManus. (2009). Signal processing approach to road roughness analysis and measurement. *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/TENCON.2009.5396085.

Roberts C.A., ve Okkine N.O. (1998). A Comparative Analysis of Two Artificial Neural Networks Using Pavement Performance Prediction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,* 13(5), 339-348.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., Queiroz, C. A. V. (1986). The International Road Roughness Experiment: *Establishing Correlation and A Calibration Standard For Measurements, Washington, D.C., U.S.A., The World Bank.*

Sayers, M.W. (1995). On the Calculation of International Roughness Index From longitudinal Road Profile. *Transportation Research Record 1501, transportation Research Board, 1995, pp. 1-12*

Sayers, M. W., Karamihas, S. M. (1996). Interpretation of Road Roughness Profile Data. *UMTRI 96-19, Final Report, Federal Highway Administration.*

Sayers, M.W.; Karamihas, S.M. (1998). The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles; *University of Michigan Transportation Research Institute:* Ann Arbor, MI, USA, 1998.

Selimoğlu, E. (2014). Trafik Kazalarının Nedenleri, Sonuçlar ve Kazaların incelenmesine ilşkin öneriler [#680871]-946523. 51–54. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/946523

Shahin, M. Y. (2002). Pavement management for airports, roads and parking lots. Kluwer academic publishers, Boston, London, U.K.

Sirohi, Jayant, Chorpa, Inderjit. (2000). Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors. J. Intell. *Mater. Syst. Struct, 11*(4), 246–257. http://dx.doi.org/10.1106/8BFB-GC8P-XQ47-YCQ0

Smith, K.; Ram, P. (2016). Measures and Specifying Pavement Smoothness; *FHWA: Washington, DC, USA.*

Sollazzo, G., T. F. Fwa, and G. Bosurgi. (2017). An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements. *Constr. Build. Mater. 134* (Jan): 684–693. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.186.

Strazdins, G., Zviedris, R., Mednis, A., Kanonirs, G., & Selavo, L. (2011). Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring Super capacitor usage for powering embedded devices. *Second International Workshop on Networks of Cooperating Objects (CONET)*, *April*, 4. https://bit.ly/3orbf6T

Stevenson, J. (2021). Non-Destructive Evaluation of Pavement Structural Properties. http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/non_destruct_eval_p_struct_prop.htm. (Erişim Tarihi: 08.10.2022)

Surblys, V., Zuraulis, V., Sokolovskıj, E. (2017). Estimation of road rouhness from data of on-vehicle mounted sensors. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 19* (3), 369-374. http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.3.7

Terzi, S. (2013). Modeling for pavement roughness using the ANFIS approach. *Adv. Eng. Software 57* (Mar): 59–64. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.11.013.

Teomete, E., Bayrak, M. B., & Agarwal, M. (2004). Use of artificial neural networks for predicting rigid pavement roughness. *Transportation Scholars Conference*, Iowa State University, Ames, USA.

Torre, F. La, Domenichini, L., Darter, M., & Darter, M. I. (1998). Roughness Prediction Model Based on the Artificial Neural Nerwork Approach. *International Conference on Managing Pavements*, *January*. https://www.researchgate.net/publication/266071075

Vapnik, V., Golowich, S.E. and Smola, A.J. (1997). Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation and Signal. In: Mozer, M.C., Jordan, M. and Petsche, T., Eds., *Advances in Neural Information Processing Systems 9*, MIT Press, Cambridge, 281-287.

Wang, F., & Easa, S. (2016). Analytical evaluation of ride comfort on asphalt concrete pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, *44*(4), 1671–1682. https://doi.org/10.1520/JTE20140339

Wang, X., J. Zhao, Q. Li, N. Fang, P. Wang, L. Ding, and S. Li. (2020). A hybrid model for prediction in asphalt pavement performance based on support vector machine and

grey relation analysis. *J. Adv. Transp. 2020* (Feb): 1–14. https://doi.org/10.1155/2020/7534970.

Wang, G., Zhang, J., Kong, X. (2020). Study on Passenger Comfort Based on Human-Bys-Road Coupled Vibration. *Applied Science, 10*(9), 3254, https://doi.org/10.3390/app10093254

Wigan, M. R., & Cairney, P. C. (1985). Road and track roughness factors for bicycle usage. *Transportation Research Record, 1059,* 87–103. http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=277111.

Yi, J.G. (2008). A piezo-sensor-based "smart tire" system for mobile robots and vehicles. *IEEE-ASME T. Mech. 13*, 95-103.

Yi, Jingang, Liang, Hong, (2008). A PVDF-based deformation and motion sensor: modeling and experiments. *IEEE Sensors J. 8*(4), 384–391. http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2008.917483.

Yu, J. (2005). Pavement Service Life Estimation and Condition Prediction, A Dissertation of Doctorate of Philosophy in Engineering, The University of Toledo. United States.

Zang, K., Shen, J., Huang, H., Wan, M., & Shi, J. (2018). Assessing and mapping of road surface roughness based on GPS and accelerometer sensors on bicycle-mounted smartphones. *Sensors (Switzerland)*, *18*(3), 1–17. https://doi.org/10.3390/s18030914

Zhang, M., Gong, H., Jia, X., Xiao, R., Jiang, X., Ma, Y., & Huang, B. (2020). Analysis of critical factors to asphalt overlay performance using gradient boosted models. *Construction and Building Materials*, *262*, 120083. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120083

Zeiada, W., Dabous, S.A., Hamad, K., Ruzouq, R. A., Khalil, M. A. (2020). Machine Learning for Pavement Performance Modelling in Warm Climate Regions. *Arab J Sci Eng 45,* 4091–4109. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04398-6

Zeiada,W., K. Hamad, M. Omar, B. S. Underwood, M. A. Khalil, and A. S. Karzad. (2017). Investigation and modelling of asphalt pavement performance in cold regions. *Int. J. Pavement Eng, 20* (8), 986–997. https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1373391.

Zhao, Y. (2015). Road condition and road roughness assessment by tire/road interaction using microphone, dynamic tire pressure sensor with an axle accelerometer. *September*, 159. http://hdl.handle.net/2047/D20200552

Ziari, H., J. Sobhani, J. Ayoubinejad, and T. Hartmann. (2015). Analyzing the accuracy of pavement performance models in the short and long terms: GMDH and ANFIS methods. *Road Mater. Pavement Des, 17*(3), 619–637. https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1108218.

Ziari, H., Sobhani, J., Ayoubinejad, J., & Hartmann, T. (2016). Prediction of IRI in short and long terms for flexible pavements: ANN and GMDH methods. *International Journal*

of Pavement Engineering, 17(9), 776–788. https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019498

Ziari, H., Maghrebi, M., Ayoubinejad, S., Waller, S. T. (2016). Prediction of Pavement Performance: Application of Support Vector Regression with Different Kernels. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board, 2589(*1), 135-145. https://doi.org/10.3141/2589-15

Žuraulis, V., Levulyte, L., & Sokolovskij, E. (2014). The impact of road roughness on the duration of contact between a vehicle wheel and road surface. *Transport*, *29*(4), 431–439. https://doi.org/10.3846/16484142.2014.984330

3M 9088. https://multimedia.3m.com/mws/media/388702O/3mtm-double-coated-tapes-9086-9087-9088-and-9088fl.pdf. Erişim tarihi: 08.10.2022.