

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NUMERİK YÖNTEMLER KULLANARAK
KIZILÖTESİ SENSÖR MESAFE ÖLÇÜM KALİTESİNİN
ARTTIRILMASI

MUSTAFA ÖZCAN
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2021

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NUMERİK YÖNTEMLER
KULLANARAK KIZILÖTESİ SENSÖR
MESAFE ÖLÇÜM KALİTESİNİN
ARTTIRILMASI

MUSTAFA ÖZCAN
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. HALUK GÖRGÜN

GEBZE
2021

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INCREASING INFRARED SENSOR
DISTANCE MEASUREMENT QUALITY
USING NUMERICAL METHODS**

MUSTAFA ÖZCAN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY**
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. HALUK GÖRGÜN

GEBZE
2021



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/06/2021 tarih ve 2021/27 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/06/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mustafa ÖZCAN'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE: Prof. Dr. Haluk GÖRGÜN
(TEZ DANIŞMANI)

ÜYE: Prof. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE : Prof. Dr. Sedat NAZLIBİLEK

ÜYE : Doç.Dr. Fuad ALİEW

ÜYE : Doç. Dr. Korhan Levent ERTÜRK

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu çalışmada, hassasiyet ve doğruluğu düşük, içerisinde yoğun miktarda gürültü ve aykırı değer barındıran kızılötesi sensör verileri kullanılarak, literatürdeki standart metotlar ile elde edilenden daha hassas ve daha doğru mesafe ölçümleri elde edilmiştir. Yapılan çalışma temelinde sensörden elde edilen verilerin daha iyi işlenip, daha iyi anlamlandırılarak, daha doğru ve daha hassas ölçüm elde edilmesi üzerinedir. Çalışma kapsamında yapılan iyileştirmeler altı adımdan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla; aykırı değer tespiti, değişken dönüşümü, regresyon modeli belirleme, dayanıklı modelleme, tahmin edici belirleme yöntemi ve veri tümleştirme. Ayrıca bu adımlar geliştirilerek çıkışı analog olan sensörlerin ölçüm hassasiyetinin artırılmasında kullanılabilecek genel bir prosedür elde edilmiştir.

Ayrıca çalışma kapsamında elde edilen prosedürün adımları detaylandırılmış. Her bir adımın kullanılma nedenleri ile, sensör verilerine ilgili adımın uygulanması ile elde edilen kazanımlar test sonuçları da belirtilerek gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mesafe Ölçümü, Kızılötesi Sensör, Aykırı Değer Tespiti, Regresyon Analiz, Dayanıklı Modelleme.

SUMMARY

In this work, more precise and more accurate distance measurements has been obtained compared to standard methods in the literature by using infrared sensor data with low sensitivity and accuracy, with high amounts of noise and outliers. The research is based on better processing of the data obtained from the sensor to obtain more accurate and more precise distance estimates. The improvements made within the scope of this work consist of six complementary steps. These are outlier detection, variable transformation, regression analysis, robust modeling, estimator selection and data fusion, respectively. In addition, by generalizing the study, a general procedure has been obtained that can be used to increase the sensitivity of sensors with analog output.

In addition, the steps of the procedure were detailed within the scope of the work. The reasons for using each step and the gains obtained by applying the relevant step to the sensor data are expressed by indicating the test results.

Key Words: Distance Estimation, Infrared Sensor, Outlier Detection, Regresion Analysis, Robust Modeling.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde, doktora eğitimimde ve kariyer hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Haluk GÖRGÜN'e,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan tez izleme jürim Fuad ALİEW ve Korhan Levent ERTÜRK'e göstermiş olduğu desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	4
2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN İÇERİĞİ	6
2.1. İlgili Çalışmalar	6
2.1.1. Kızılötesi Sensör ile Mesafe Ölçümünde Yapılan Geçmiş Çalışmalar	6
2.1.2. Mesafe Tahmininde Veri Tümlleştirme ile İlgili Geçmiş Çalışmalar	14
2.1.3. Aykırı Değer Tespiti ile İlgili Geçmiş Çalışmalar	15
2.1.4. Diğer İlgili Geçmiş Çalışmalar	16
2.1.5. Kızılötesi Mesafe Sensörü Çalışma Prensipleri	17
2.2. Tez Çalışmasının Katkısı ve İçeriği	18
3. YÖNTEM VE TEST KURULUMU	21
3.1. Test Kurulumu ve Ekipmanlar	21
3.2. Mesafe Tahmin Prosedürü	24
3.2.1. Aykırı Değer Tespiti	25
3.2.2. Regresyon Modeli Belirleme	36
3.2.3. Değişken Dönüşümü	39
3.2.4. Dayanıklılık Modelleme	42
3.2.5. Tahmin Edici Seçimi	49
3.2.6. Veri Tümlleştirme	51
3.3. Mesafe Ölçüm Performans Karşılaştırılmasında Kullanılan Prosedürler	55

4. TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	57
4.1.Önerilen Prosedür Adımları ve Katkısı	58
4.2.Önerilen Prosedür ile Mesafe Tahmin Performansı	68
4.3.Sınırlandırılmış Sensör Verisi ile Mesafe Ölçüm Performansı	76
4.4.Gerçek Zamanlı Rastgele Test Sonuçları	78
4.5.Sonuç	79
 KAYNAKLAR	 82
ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
d	Mesafe
C	Phong model parametreleri
β	Model ayar parametrelesi
a	Yardımcı parametre
b	Yardımcı parametre
c	Yardımcı parametre
x	Sensor çıkışı
f	Filtre fonksiyonu
σ	Standart sapma
μ	Ortalama
K	Kalman kazancı
p	Olasılık
E	Beklenen değer
ϕ	Kümülatif dağılım fonksiyonunu
Var	Varyans
W^t	Kayar pencereyi
n	Toplam eleman sayısı
α	Güven aralığı
M	Bir sonraki sensor okuması tahmin modeli
x_{tr}	Dönüşüm yapılmış sensör verisi
y	Mesafe tahmini
k	Değişken dönüşüm katsayısı
$S()$	Dayanıklı modelleme hatası
Sp	Dayanıklı modelleme hata belirleme fonksiyonu
π	Pi sayısı
P_f	Filtrelemede kullanılan eleman sayısı
e	Hata
$\wedge$	Tahmin edilen değer

ADC	Analog digital dönüştürücü
AE	Ortalama mutlak hata
DAC	Digital analog dönüştürücü
LMS	En küçük ortanca kareler
LTS	En küçük kırılmış kareler yöntemi
LSM	En küçük kareler Metodu
SSE	Hataların karelerinin toplamı
SAE	Hataların mutlak değerlerinin toplamı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Gauss dağılımı.	14
2.2: Kızılötesi alıcı devresi.	18
3.1: Test kurulumu.	22
3.2: Önerilen prosedür ve test edilen metotlar.	24
3.3: Zamana bağlı sensör çıkışı.	26
3.4: Histogram 1.	27
3.5: Kutu diyagramı.	30
3.6: Saçılım diyagramı 1.	38
3.7: Gerçek mesafeye bağlı sensör çıkışı değişimi .	41
3.8: Saçılım diyagramı 2 .	42
3.9: LSM ile modelleme.	43
3.10: Aykırı değer olması durumunda LSM ile modelleme.	43
3.11: Mesafe tahmin ile gerçek mesafe arası ilişki.	45
3.12: Veri tümleştirme yöntemi 1.	52
3.13: Veri tümleştirme yöntemi 2.	53
3.14: Engel yerleşimi.	54
4.1: Filtreleme sonrası histogram diyagramı.	59
4.2: Filtreleme sonrası saçılım grafiği.	60
4.3: Filtreleme sonrası histogram diyagramı.	62
4.4: Mesafe tahmin prosedürü 1 test sonuçları.	68
4.5: Mesafe tahmin prosedürü 2 test sonuçları.	69
4.6: Referans prosedürler mesafe tahmin hata grafiği.	69
4.7: Mesafe tahmin prosedürü 3 için test sonuçları.	71
4.8: Mesafe tahmin prosedürü 3 için tahmin hatası grafiği.	71
4.9: Mesafe tahmin prosedürü 3 için tekrarlayan testler tahmin hatası grafiği.	72
4.10: Mesafe tahmin prosedürü 4 için tahmin hata grafiği.	73
4.11: Mesafe tahmin prosedürü 4 için tekrarlayan testler tahmin hata grafiği.	74

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Aykırı değer filtreleme Algoritması.	35
4.1: Aykırı değer filtrelerinin performansı.	61
4.2: Değişken dönüşümü test sonuçları karşılaştırması.	63
4.3: Dayanıklı modelleme metotları test sonuçlarının karşılaştırması.	64
4.4: Tahmin edici metotları test sonuçları karşılaştırması.	66
4.5: Veri tümleştirme metotları test sonuçları karşılaştırması.	67
4.6: Mesafe tahmin hata özet tablosu.	74
4.7. Mesafe tahmini hata özet tablosu.	77
4.8. Ölçüm sonuçları.	78

1. GİRİŞ

Sensörler mesafe, sıcaklık, basınç, nem, ivme vb. birçok fiziksel büyüklüğün ölçümünde kullanılan cihazlardır. Günümüzde hemen hemen her alanda ve her cihazda birçok sensör kullanılmaktadır çünkü sensörler cihazların bir nevi duyu organlarıdır ve cihazlar sensörler aracılığı ile dış ortam ile bağlantı kurmaktadır [1-4]. Ayrıca cihaz tarafından gerçekleştirilen eylem, eyleyici tarafından yapılsa da eyleyicinin aldığı aksiyon kontrol sistemi tarafından belirlenmektedir. Kontrol sistemleri ise kararları dış ortamdan alınan bilgiler aracılığı ile vermektedir. Sensörler dış ortamdan bilgi almayı sağladığı için her kontrol sistemi ve cihazın vazgeçilmez bir unsurudur [5]. Özetle, kontrol sistemleri sensörlerden alınan bilgiyle eyleyicinin aksiyonuna karar verdikleri için sensörlerden alınan bilgi kontrol açısından kritik öneme sahiptir.

Sensörler en temelde dış ortam değişikliklerine karşı elektriksel tepki veren cihazlardır. Örneğin ağırlık ölçümünde kullanılan sensör üzerine uygulanan ağırlığa bağlı elektriksel tepki vermektedir [6]. Ağırlık bilgisini elde edebilmek için sensörün verdiği elektriksel tepki anlamlandırılmalıdır. Ancak bazı sensörlerin verdiği elektriksel tepki üzerine uygulanan fiziksel büyüklük ile orantılı ve lineer değişen yapıda olmasına rağmen, bazı sensörlerin elektriksel tepkileri doğrusal değildir. Bu durum ise sensör çıkışını anlamlandırmayı zorlaştırmaktadır. Bu durumun en temel sebebi mesafeye bağlı olarak kızılötesi ışığın gücünün doğrusal olarak değişmemesidir. Ayrıca her sensörün uygulanan fiziksel büyüklüğün değişime verdiği tepkinin hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği aynı değildir. Çok hassas olmayan sensörler üzerine uygulanan fiziksel büyüklük az miktar arttırılmasına rağmen çıkışlarında herhangi bir değişiklik olmaz. Ancak daha hassas ve kalite bir sensör üzerine uygulanan fiziksel büyüklükteki az bir değişiklik, sensör çıkışındaki elektriksel tepki büyüklüğünü değiştirir. Ayrıca sensörün tekrarlanabilirliği doğru ve hassas ölçüm yapmada etkili bir diğer ölçüttür. Tekrarlanabilirlik, sensörün üzerine aynı fiziksel büyüklük uygulandığında aynı elektriksel çıkışı vermesidir [7]. Ancak sensörün kalitesine bağlı olarak, kısa bir zaman diliminde sensöre aynı fiziksel büyüklük uygulanarak yapılan ölçümlerde bile sensör çıkışındaki elektriksel tepki değişkenlik gösterebilmektedir [8]. Kilogram olarak ağırlık ölçen bir tartıyı ele alacak olursak; içindeki sensör gram olarak ağırlık değişimlerine tepki verememektedir veya elektriksel çıkış, ağırlığı gram olarak belirlemeyi mümkün kılmayacak bir aralıkta

dalgalanmaktadır. Bu yüzden kullanılan tartı ile gram hassasiyetinde ölçümler yapılamamaktadır.

Sensörler ile daha hassas, daha doğru ve tekrarlanabilirliği yüksek ölçümler yapmak için daha kaliteli sensör kullanılmalıdır. Ancak bu durum maliyetli olduğundan dolayı literatürde numerik ve yazılımsal yöntemler ile sensörün çıkışını daha iyi anlamlandırarak, kullanılan sensörden daha hassas ve daha doğru ölçümler elde etmek ile ilgili birçok çalışma mevcuttur [9, 10]. Bu çalışmalar en nihayetinde maliyet kaygısının bir sonucu olarak literatürde yer bulmuştur. Bu yüzden uygun maliyetli sensörler kullanılarak daha doğru ve daha hassas ölçümler yapmak özelindeki bir çalışma sanayide de katkı sağlayacaktır. Çünkü günümüz piyasa koşulları göz önünde bulundurulduğunda, üreticiler üretim maliyetlerini mümkün olduğunca düşürerek, daha uygun fiyatlı ve kaliteli ürünler piyasaya sürmek için çaba göstermektedirler. Üretim maliyetlerini azaltacak bir çalışma firmaların daha rekabetçi bir fiyata daha kaliteli ürünler üretmesine katkı sağlayacaktır. Çünkü üretim maliyetlerini etkileyen faktörlerden birisi de ürünlerde kullanılan sensörlerdir. Hem ürünlerde kullanılan sensör sayısı hem de kullanılan sensörün doğru ve hassas ölçüm yapması için ayrılan bütçeler dikkate alındığında, sensör harcamalarındaki azalmanın, firmaların devamlılıklarını sağlamada önemli bir katkısı olacaktır.

Sensörler neredeyse her alanda kullanılmaktadır. Bu kullanıma birkaç örnek vermek gerekirse:

- Mesafe ölçümü; Mesafe bilgisi birçok cihazın görevini yerine getirmesi için kullanılan fiziksel bir büyüklüktür. Özellikle ultrasonik ses, kızılötesi ışık kullanılarak temassız olarak mesafe bilgisi elde edilebilmesi, mesafe ölçüm sensörlerinin çok daha yaygın bir şekilde kullanılmasına katkı sağlamıştır. Temassız mesafe sensörleri otonom araç, endüstriyel robot, insansız hava aracı gibi ileri arge ürünlerinin yanı sıra park sensörü, tanklarda sıvı seviye tespiti gibi günlük hayatta kolaylık sağlayan birçok çalışmada kullanılmaktadır. Mesafe sensörleri ile doğru ve hassas ölçümler yapılabilmesi insan güvenliğinin söz konusu olduğu otonom araç vb. uygulamalarında ise kritik öneme sahiptir. Bu yüzden literatürde hassas ve doğru mesafe ölçümü ile ilgili birçok çalışma mevcuttur [11-14].

- Ağırlık ölçümü; Ağırlık bilgisi, günlük kullanım için üretilmiş ağırlığımızı ölçtüğümüz kilogram hassasiyetli tartılardan, ilaç üretimi gibi çok hassas ağırlık ölçümünün gerekli olduğu birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [15-17]. Özellikle hassas ağırlık ölçümünün gerekli olduğu alanlarda ağırlık bilgisinin doğru ve hassas elde edilebilmesi, istenen sonuca ulaşmada büyük öneme sahiptir. İlaç üretimi gibi insan sağlığını doğrudan etkileyen uygulamalarda ise ağırlık ölçümünün yeteri hassasiyet ve doğrulukta yapılabilmesi kritik öneme sahiptir.
- Sıcaklık ölçümü; Sıcaklık ölçümünün hem günlük kullanımda hem de literatürde önemli bir yeri bulunmaktadır. Özellikle Covid-19 salgın döneminde toplu alan girişlerinde vücut sıcaklığının ölçülmesi zorunluluk halini almıştır. Bunun ile birlikte, salgının yayılma hızının azaltılmasında, özellikle hava alanlarında vücut sıcaklığının hem hızlı hem de doğru olarak ölçülme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ayrıca sağlık sektörü dışında, klima sistemleri, işlemci sıcaklığı ölçümü, batarya sıcaklığı ölçümü, yakıt sıcaklığı ölçümü vb. birçok uygulamada ısı sensörleri kullanılmaktadır. Isı sensörlerine birçok uygulamada ihtiyaç duyulmasından dolayı hassas ve doğru sıcaklık ölçümü ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır [18-23].
- Uydu pozisyon kontrolü; dünya yörüngesinde bulunan uydular hem yeryüzünden veri alışverişi yapmak hem de görüntüleme vb. gibi görevlerini yerine getirmek için pozisyon kontrolüne ihtiyaç duymaktadır. Uydunun yeryüzünden yüksekliğinin onlarca kilometre olduğunu düşündüğümüzde, uydunun pozisyon kontrolü için mesafe ve açının çok hassas ölçülebilmesi ve kontrol edilebilmesi gerekir. Çünkü uydunun pozisyonundaki 1 derece gibi küçük bir kayma yeryüzünde kilometrelerce sapmaya neden olacaktır. Uydunun kontrolörü ne kadar iyi olsa da hassas mesafe ve açı ölçümü olmadan bu kontrolör istenilen sonucu vermeyecektir [24] .

Yukarıda belirtilen örneklerden de anlaşılacağı üzere hem literatürde hem de endüstride birçok alanda fiziksel büyüklüklerin ölçülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İlaç üretimi, otonom araç gibi bazı sektörlerde ise yapılan ölçümün hassas ve doğru olması çok daha büyük önem taşımaktadır. Ölçümün hassaslığı ve doğruluğu, büyük oranda, kullanılan sensörün kalitesi ile bağlantılıdır. Sensör kalitesi arttıkça yapılan ölçümün de hassaslığı ve doğruluğu artacaktır. Yüksek kaliteli, hassas ve doğru ölçüm

yapabilen sensörlerin kullanılması maliyeti ciddi oranda arttıracaktır. Ancak sensörden alınan bilgi daha iyi anlamlandırılarak da, daha doğru ve hassas ölçümler yapılabilmektedir. Literatürde yazılımsal ve nümerik yöntemler ile, sensör çıkışı işlenerek sensörlerden daha hassas ve doğru ölçüm elde etmek ile ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Örneğin, Sehun ve ekibinin [10] gerçekleştirdiği çalışmada, yüksek çözünürlüklü analog-dijital dönüştürücülerin (ADC) testi, düşük çözünürlüklü dijital-analog dönüştürücüler (DAC) kullanılarak yapılmıştır [10]. Yüksek çözünürlüklü ADC'nin düşük çözünürlüklü DAC kullanarak test edilmesindeki amaç yüksek maliyet kaygısından kaynaklanmaktadır. Çalışmada yapılan test, yazılımsal ve nümerik yöntemler kullanılarak düşük maliyetle gerçekleştirilmiştir. Benzer bir çalışma da Hanjun ve ekibi [9] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Sehun ve ekibinin [10] yaptığı çalışmada olduğu gibi yüksek çözünürlüklü ADC testi, düşük çözünürlüklü DAC kullanılarak yapılmıştır.

Zhang ve ekibi de sıcaklık ölçümünde daha hassas ve daha doğru ölçüm yapmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada yonga setlerinde, gerçek zamanlı sıcaklık ölçümünün öneminden bahsetmişler, çeşitli faktörler nedeniyle ve kullanılan sensörün özelliğinden kaynaklı, yeterli hassasiyette sıcaklık ölçümünün yapılamadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, yazılımsal ve nümerik yöntemler kullanarak daha doğru ve hassas sıcaklık ölçümleri elde etmeyi başarmışlardır [19].

Schlegl ve ekibi ise iki farklı mesafe sensörü kullanarak hem yakın, hem de görece uzak mesafelerde, otomotiv sektöründe kullanılacak doğru mesafe ölçümü üzerine çalışma yapmışlardır [25]. Mesafe ölçümü için hem kısa mesafede hem de görece uzak mesafelerde ölçümler yapabilen daha maliyetli sensör seçmek yerine, daha uygun maliyetli iki sensörü yazılımsal yöntemler ile entegre ederek tek bir mesafe ölçümü yapmakta kullanmışlardır. Daha hassas ve daha doğru mesafe ölçümünün yazılımsal ve nümerik yöntemlerle gerçekleştirilmesine dair başka çalışmalar ise Licznarski ve ekibinin [26] ultrasonik sensörler ile yaptığı çalışma ile Novotny ve ekibinin [27] kızılötesi sensör kullanarak yaptığı uygulama örnek verilebilir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tezde, tekrarlanabilirliği ve hassasiyeti düşük bir sensörün çıkışını yazılımsal ve nümerik yöntemler ile daha iyi anlamlandırılarak, literatürde de örnekleri [9, 19, 26, 27] olan sensör ölçüm performansının arttırılmasına yönelik bir çalışma yapılması

amaçlanmıştır. Bu kapsamda; endüstride, sağlık sektöründe, robotik vb. birçok sektörde ihtiyaç duyulan cihazların hayata geçirilmesinde kritik öneme sahip olan mesafe ölçümü özelinde, literatürde uygulanan genel yöntemlerden daha hassas ve daha doğru, tekrarlanabilirliği yüksek ölçümler elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca mesafe sensörleri endüstride de çok yaygın olarak kullanıldığı için firmaların da bir gereksinimi olan daha az maliyetle daha kaliteli ürün üretmesine de katkı sağlayacak bir çalışma yapılmıştır.

Mesafe ölçümünde, pratik ve kolay kullanılabilir oldukları için genel olarak temassız sensörler tercih edilir. Temassız mesafe ölçüm sensörleri arasında da kızılötesi sensörler hem hızlı tepki vermelerinden dolayı hem de sıcaklık, nem gibi dış etkenlerden etkilendikleri için geniş bir kullanım alanı vardır [8]. Engellerden kaçınma sistemleri, engel tespit ve iç mekan konum belirleme sistemleri, izleme sistemleri, endüstriyel robot uygulamaları, mobil robot uygulamaları, sağlık uygulamaları, otomotiv uygulamaları, insansız hava aracı vb. uygulamalarda sıkça kullanılmaktadırlar [11-13, 25, 28-33].

Çalışmanın amacı mesafe ölçüm performansının artırılması olduğu için, geliştirilen prosedür kullanılarak nispeten daha ucuz sensörlerle daha hassas ve doğru mesafe ölçümü yapılabilmesi amaçlanmıştır. Bu yüzden sensör seçiminde, kullanımının yaygın olmasına, piyasada ticari olarak satılan uygun fiyatlı modellerinin olmasına ve düşük çözünürlüğe sahip olmasına dikkat edilmiştir. Tez kapsamında yapılacak testleri gerçekleştirmek için Sharp kızılötesi sensör seçilmiştir. Çalışmada ilk olarak tercih edilen IR sensör ile standart ve literatürde yaygın olan yöntemler kullanılarak mesafe ölçüm hassasiyeti ve doğruluğu belirlenmiştir. Daha sonra çeşitli yazılımsal ve nümerik yöntemler kullanılarak daha hassas ve daha doğru bir mesafe ölçümü yapılmıştır. Böylelikle üretim maliyeti arttırılmadan, daha hassas ve daha doğru mesafe ölçümü gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda IR sensöre uygulanan yazılımsal ve nümerik yöntemler genelleştirilerek, özellikle çıkışı analog olan farklı tip sensörler için de kullanılabilecek genel bir ölçüm iyileştirilme prosedürü önerilmiştir. Böylelikle hem literatürde yer alan hem de başta belirtildiği gibi endüstride de analog sensör kullanan firmaların daha uygun maliyetle, daha kaliteli ölçümler yapmalarına katkı sağlayacak bir çalışma yapılmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR VE TEZİN İÇERİĞİ

2.1. İlgili Çalışmalar

2.1.1. Kızılötesi Sensör ile Mesafe Ölçümünde Yapılan Geçmiş Çalışmalar

Kızılötesi mesafe ölçüm sensörleri mesafeyi çok hızlı ölçtüklerinden dolayı birçok gerçek zamanlı uygulamada yaygın olarak tercih edilirler [28, 34]. Ayrıca sıcaklık, ses ve nem gibi doğal etmenlerden etkilenmemeleri [11, 34] ve ticari olacak uygun fiyatlı modellerinin olması [35-38] kızılötesi mesafe sensörlerinin tercih edilmesini sağlamıştır. Bu yüzden hem endüstriyel uygulamalarda hem de eğitim amaçlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [11-14]. Diğer yandan kızılötesi sensörlerin mesafe ölçümünde kullanılabilmesi için matematiksel olarak gerçek mesafe ile sensör çıkışı arasındaki ilişkinin modellenmesi gerekmektedir, ancak kızılötesi sensörün çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki matematiksel ilişki lineer olmadığından dolayı tam ve doğru modelleme yapmak zordur [29-31, 34]. Üstelik kullanılan kızılötesi sensörlerin çıkışının gürültü içermesi, hassas ve doğru mesafe ölçümü yapmanın önündeki bir diğer engeldir. Ancak, yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı kızılötesi sensörler gerçek zamanlı uygulamalarda, dezavantajlarına rağmen tercih edilmiştir. Literatürde de kızılötesi sensörlerin sağladığı avantajlardan dolayı, dezavantajlarını gidererek hassas ve doğru mesafe ölçümü yapabilmek için birçok çalışma mevcuttur. Aşağıda bu tez çalışması ile doğrudan alakalı olan çalışmalar detaylandırılmış ve kızılötesi sensör ile mesafe ölçümü ile ilgili geçmiş çalışmalarda değinilmeyen ancak tez kapsamında ölçüm performansını arttırmak için gerçekleştirilen yöntemler belirtilmiştir. Bu çalışmada; doğruluk, sensörün gerçek mesafeye ne kadar yakın ölçüm yaptığını, hassaslık ise yapılan ölçümlerin ne kadar küçük değerlerde birbirine yakın olduğu olarak tanımlanmıştır. Ayrıca mesafe ölçümü, sensör çıkışı kullanılarak çeşitli modellemeler, yazılımsal ve numerik yöntemler kullanılarak yapılacağı için elde edilen sonuç, ifade olarak mesafe ölçümü değil, mesafe tahmini olarak kullanılacaktır. Çünkü yapılan çalışma sensör çıkışının, mesafe ölçüm bilgisine hesaplanarak dönüştürülmesinden ziyade sensör çıkışının numerik ve yazılımsal yöntemler ile işlenerek daha iyi anlamlandırılması ile elde edilen daha hassas ve daha doğru mesafe tahminidir.

Novotny ve Ferrier çalışmalarında kızılötesi sensör kullanarak mesafeyi tahmin etmek amacıyla gölgelendirme algoritmasına dayanan Phong aydınlatma modelini kullanmıştır. Bu model mesafenin tahmin edilebilmesi için ölçülmek istenen mesafedeki engelden yansıyan kızılötesi ışık miktarı ile ölçülmek istenen mesafe arasındaki matematiksel ilişkiyi ifade etmektedir. Bu ifade ile yansıyan ışık miktarı kullanılarak mesafe tahmini yapılabilmektedir. Çalışmada phong aydınlatma modeli ve kızılötesi sensör kullanılarak cm doğruluğunda mesafe tahmini yapılabilineceğinden bahsedilmiştir. Ayrıca model parametrelerini tahmin etmek amacıyla en küçük kareler (LSM) metodu kullanılmıştır [27].

Novotny ve Ferrier [27] çalışmasına benzer bir çalışma Mohammad [34] tarafından da gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada da Phong aydınlatma modeli; kızılötesi sensör ile mesafe ölçmek için kullanılmıştır. Farklı olarak ilgili çalışmada mesafe tahmini yapmak için ultrasonik sensörden de faydalanılmıştır. Çalışmada, Phong aydınlatma modeli kullanılarak kızılötesi sensör ile kısa mesafelerde (yaklaşık 20 cm'ye kadar) mesafe tahmini yapılabildiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca 10-14 cm arasındaki ölçümlerde maksimum 0,8 cm hata elde edildiği belirtilmiştir. Analog sensör ile yapılan ölçümlerde daha hassas tahminler yapmak için kullanılan en genel yöntemlerden birisi ardışık sensör ölçümlerinin ortalamasını alarak tahmin yapmaktır [28], ancak ilgili çalışmada ardışık sensör verilerinin ortalaması alınarak mesafe tahmini yapılması ile ilgili bir bilgi bulunamamıştır. Bu yüzden ölçümlerin tek bir sensör verisi kullanarak yapıldığı sonucuna varılmıştır ancak kızılötesi sensör okumalarındaki gürültüler, hassas ve doğru mesafe tahminin önündeki en temel engellerden biridir ve ilgili çalışmada gürültüler dikkate alınmadan mesafe tahmini yapılmıştır. Bu durum ölçüm hassasiyet ve doğruluğunun ciddi oranda azalmasına neden olacaktır. Phong modeli kullanarak mesafe tahmininde

$$P_I = C_0(\mu_s \cdot \mu_r) + C_1(\mu_r \cdot \mu_v)^n + C_2 \quad (2.1)$$

$$P_E = \frac{P_I \cdot A}{2l} \quad (2.2)$$

$$d = \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{P_E}} \quad (2.3)$$

denklem (2.1),(2.2) ve (2.3) kullanılmaktadır. Burada C_0 , C_1 , C_2 yardımcı parametreler, P_I enerji yoğunluğu, μ_s , μ_r , μ_v yayınlan ışığın özellikleri ile ilgili

parametreler, P_E sensör yüzeyine düşen ışık miktarı, d ise mesafeyi, A yüzey alanını belirtmektedir.

Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3)'den de görüleceği ve Benet ile ekibinin [28] yaptığı çalışmada da belirtildiği gibi Phong aydınlatma model parametrelerinin belirlenmesi karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Nitekim mesafe ölçümlerinde aynı sensör ve alıcı kullanılacaktır, bu yüzden Phong aydınlatma modeli ile yapılan mesafe hesaplamalarında kullanılan birçok parametre sabit olacağına dolayı karmaşık hesaplamalar yerine sensör çıkışı ile mesafe arasındaki ilişki belirlenerek mesafe bilgisinin elde edilmesi daha kolay olacaktır. Nitekim kızılötesi sensör ile mesafe belirleme ile ilgili birçok çalışma bu şekilde yapılmıştır [39].

Benet ve ekibi kızılötesi sensör ile mesafe ölçmek amacıyla yeni bir sensör tanıtmışlardır. Bu tanıtılan sensör ile mesafe ölçümü yapabilmek için Fotometri ters yasasını temel alan bir model kullanmışlardır. Bu modelde de Novotny ve Ferrier'in [27] çalışmasında olduğu gibi önerilen model, ölçülmek istenen mesafedeki engelden yansıyan kızılötesi ışık miktarı ile ölçülmek istenen mesafe arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmektedir. İlgili çalışmada ardışık sensör verileri ile yapılan tahminlerin hata toplamının sıfır olduğu, tahmin hatalarının sabit bir standart sapmaya sahip olduğu ve Gauss olarak dağıldığı varsayımı üzerinden mesafe tahmini yapılmıştır. Bu amaçla ardışık 100 sensör çıkışının ortalaması alınarak tahmin edici değer belirlemiş ve model ile yapılan ölçümler bu tahmin edici değer kullanılarak yapılmıştır [28]. Ancak bu varsayımda aykırı değerler ve ölçüm hatalarının Gauss olarak dağılmaması durumu göz ardı edilmiştir. Çünkü ilgili çalışmada yapılan varsayım her zaman doğru değildir. Üstelik tez çalışmasında kızılötesi sensör ile yapılan testlerde de, yapılan varsayımın doğru olmadığı görülmüştür. İlerleyen bölümlerde bu konuya ve yapılan test sonuçlarına yer verilecektir. Benet ve ekibi çalışmasında basit bir denklem kullanılarak kızılötesi sensörün modellediğinden bahsetmiştir[28]. Çalışmada

$$d(x) = \frac{\beta_1}{x^2} + \beta_0 \quad (2.4)$$

denklem (2.4) kullanılmıştır. Burada β_0 ve β_1 , model ayar parametresi, x sensor verisi, d ise mesafedir. Ancak verilen denklem kızılötesi sensörler için kullanılabilecek genel bir ifade değildir. Çünkü denklemde bulunan $1/x^2$ katsayısı kullanılarak sensör

okumaları ile gerçek mesafe arasındaki lineer olmayan ilişkiyi, doğrusallaştırarak basit bir model elde edilmeye çalışılmıştır ancak bu durum her sensör için geçerli değildir. Tezde yapılan çalışmada $1/x^2$ katsayısı, sensör verilerinin doğrusallaştırılmasına katkı sağlamamış, üstüne mesafe tahmin performansının daha da kötüleşmesine neden olmuştur. Ayrıca çalışmada sensör verilerine

$$x_{ir} = \frac{1}{x^2} \quad (2.5)$$

denklem (2.5)'te gösterilen değişken dönüşümünü uygularsak mesafe tahmininde kullanılan formül

$$d(x_{ir}) = \beta_1 x_{ir} + \beta_0 \quad (2.6)$$

denklem (2.6)'daki gibi olacaktır. Denklem (2.6) regresyon modelleme de kullanılan birinci dereceden lineer denklem modelidir. Ancak birçok çalışmada da belirtildiği gibi kızılötesi sensör çıkışı ile mesafe arasındaki ilişki lineer değildir [8]. Tez kapsamında yapılan testlerde de görüldüğü gibi $1/x^2$ dönüşümü her zaman kızılötesi sensör ile mesafe arasındaki ilişkiyi doğrusallaştıramaz.

Mukhopadhyay ve ekibi [39] çalışmalarında çıkışı analog olan pyroelektrik kızılötesi (PIR) sensörü kullanarak kapalı alanda konum belirlemişlerdir. İlgili çalışmada hassaslığı ve doğruluğu arttırmak için kızılötesi sensörden elde edilmiş mesafe bilgisi gerektiren aralık temelli bir teknik kullanılmıştır. Hassas konum belirleme için gerekli olan mesafe bilgisini tahmin edebilmek için iki model önerilmiştir. Bu modellerden birincisi hiperbolik denklem temelli, diğeri ise parçalı lineer denklem temellidir. Çalışmada hiperbolik denklem temelli modelin kızılötesi sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki ilişkiyi yeterince iyi modelleyemediğinden ve mesafe tahminlerinin iyi olmadığından bahsedilmiştir. Ayrıca parçalı lineer fonksiyon kullanılarak elde edilen modelin, hiperbolik fonksiyon temelli modele göre çok daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Mukhopadhyay ve ekibi [39] çalışmalarında kullandığı hiperbolik model

$$x_i = l_1 + (d_i)^\delta \quad (2.7)$$

denklem (2.7) de belirtilmiştir. Burada d_i

$$d_i = l_2(x_i)^\lambda \quad (2.8)$$

denklem (2.8) belirtilmiştir. Denklemde x sensör çıkışı, l_1 , l_2 , δ ve λ , model ayar parametreleridir. Denklem (2.8)'de kullanılan l_2 ve λ

$$l_2 = l_1^{\frac{1}{\delta}} \quad \text{ve} \quad \lambda = \frac{1}{\delta} \quad (2.9)$$

denklem (2.9) yardımıyla bulunabilir.

Tez çalışmasında kızılötesi sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki lineer olmayan ilişki değişken dönüştürme tekniği kullanılarak lineer hale getirilmiştir. Yapılan testlerde görülmüştür ki, lineer olmayan ilişkiyi, parçalı lineer fonksiyon ile ifade etmekten, ilişkiyi doğrusallaştırıp, basit doğrusal fonksiyon ile modellemek çok daha uygundur. Çünkü doğrusallaştırma sonucu aradaki ilişkiyi tek bir lineer denklem ile modellemek mümkün olmaktadır. Parçalı lineer fonksiyon kullanılması durumunda ise çok sayıda lineer denklemin ilişkiyi modellemek için kullanılması gerekecektir. Ayrıca Mukhopadhyay ve ekibi çalışmalarında kızılötesi sensör verilerinde genel olarak rastlanan aykırı sensör okumalarına, etkilerine ve çözüm yollarına değinmemiştir [39].

Malheiros ve ekibi [30] kızılötesi sensör kullanarak mesafe tahmin doğruluğu ve hassasiyetini arttırmak için lineer denklem modeli ve ikinci dereceden polinomik denklem modeli olmak üzere

$$d(x) = \beta_1 x + \beta_0 \quad (2.10)$$

$$d(x) = \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0 \quad (2.11)$$

denklem (2.10) ve (2.11) de belirtilen iki farklı model önermişlerdir. Burada β_0 , β_1 , β_2 modelin ayar parametreleri, x sensör çıkışı ve d mesafedir. Gerekli modelleme ve test çalışmalarını yapabilmek için 80 cm'ye kadar 5 mm aralıklarla gözlem verisi (gözlem:

modelleme, test vb. amaçlarla toplanmış sensör verisi) toplamışlardır. Çalışmada, elde edilen modeller endüstriyel robot kullanılarak test edilmiştir. Kızılötesi sensörün çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki matematiksel ilişkinin lineer olmaması, hassas ve doğru mesafe tahmini önünde bir dezavantaj olduğu belirtilmiş ve bu dezavantaj $1/x$ dönüşümü kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Böylelikle kızılötesi sensör ile gerçek mesafe arasındaki ilişki birinci ve ikinci dereceden denklem ile modellenebilmiştir. Öte yandan ilgili çalışmada da gözlemlerin gauss olarak dağıldığı, sabit bir standart sapması olduğu ve ardışık tahmin hatalarının sıfır ortalamaya sahip olduğu varsayımı ile modelleme yapılmıştır. Ayrıca $1/x$ dönüşümü kullanılarak aradaki ilişki yeterince doğrusallaştırılamamıştır. Bu yüzden aradaki ilişkiyi daha iyi modelleyerek, daha doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla ikinci dereceden denklem de çalışmada test edilmiştir. İlgili çalışmanın bir diğer önemi de bu tezde kullanılan kızılötesi sensörün aynısının, ilgili çalışmada da kullanılmasıdır.

Malheiros ve ekibi [30] kullanılan sensörün 8 cm ile 30 cm arasında daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğunu belirtmiştir. Bunu daha açık ifade edersek, tez çalışmasında yapılan testlerde de görülmüştür ki kızılötesi sensörün çıkışı 8 cm ile 30 cm arasında 2.4 voltluk (3.2V-0.8V) bir değişim gösterirken, sensör çıkışı 30 cm ile 80 cm arasında sadece 0.4 voltluk (0.8 V - 0.4 V) bir değişim göstermektedir. Bu durumda hem mesafeye bağlı değişim oranının algılanması zor olacaktır, hem de mesafe değişimi üzerinde gürültülerin etkisi artacaktır. Başka bir ifade ile anlamlı sinyal gürültü oranı artmaktadır. Sonuç olarak, kullanılan sensörün çözünürlüğü 30 cm mesafeden sonra büyük oranda azalmaktadır.

Bu alanda yapılan diğer bir çalışmada Adarsh ve ekibi [11] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında mobil araç kullanılarak kızılötesi sensör ile ultrasonik sensörün mesafe tahmin performans karşılaştırmasını yapmışlardır. Gageik ve ekibi [12] de çalışmalarında kızılötesi sensör kullanarak mesafe tahmini yapmışlardır ancak kullandıkları metot ve prosedürden bahsetmemişlerdir.

Tez kapsamında, kızılötesi sensör kullanılarak hassas ve doğru mesafe tahmini üzerine yapılan geçmiş çalışmalarda daha önce kullanılmayan ve daha doğru ve hassas ölçümler yapmakta tercih edilen veri tümleştirme tekniği de kullanılmıştır. Bu teknik mesafe ölçüm ve benzeri uygulamalarda pozisyon belirleme, konum belirleme, haritalandırma ve takip uygulamalarında çoklukla tercih edilmektedir [40, 41]. Veri tümleştirme tekniği sensörlerin zayıf kaldığı yönleri gidermek amacıyla da tercih edilmektedir. Daha açık bir ifade ile veri tümleştirme kullanılan bir sensörün belli bir

bölgede düşük hassasiyet ve doğruluğa sahip olduğu ancak kullanılan diğer sensörün o bölgede yüksek hassasiyet ve doğruluğa sahip olduğu durumlarda hassaslığı ve doğruluğu arttırmak için de kullanılmaktadır. Literatürde de veri tümleştirme alanında birçok çalışma mevcuttur. Aşağıda mesafe ölçümü ile ilgili literatürde bulunan veri tümleştirmenin kullanıldığı çalışmalarından bahsedilmiştir.

Gageik ve ekibi [12] insansız hava aracı uygulamalarında çarpışma önleme ve engel belirleme amacıyla kullanılmak üzere daha yenilikçi ve uygun maliyetli bir çözüm sunabilmek için ultrasonik sensörden aldıkları veri ile kızılötesi sensörden aldıkları verileri tümleştirmişlerdir. Gageik ve ekibinin [12] çalışmalarında ağırlıklı filtre ile veri tümleştirilmesi gerçekleştirilerek daha hassas ve doğru mesafe ölçümü yapmışlardır. Bu filtre, kullanılan her bir sensörün, önceden belirlenmiş olan özellik ve hassasiyetlerine göre, ölçülmek istenilen mesafede kullanılacak sensörü belirleyerek daha hassas ve doğru ölçüm yapmayı sağlamıştır. Ayrıca Gageik ve ekibi [12] çalışmalarında veri tümleştirme yöntemlerini bu çalışmada olduğu gibi kızılötesi sensör ile daha hassas ve doğru mesafe ölçümü yapmak için değil, ölçülmek istenen mesafede kullanılacak sensörü belirlemek için kullanmışlardır.

Kızılötesi sensör ile mesafe ölçümü ile ilgili çoğu çalışma sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki lineer olmayan ilişkiyi en doğru şekilde modellemeye çalışarak daha doğru sonuçlar elde etmek üzerinedir [27, 28, 30, 34, 39]. Bazı çalışmalar da ise ardışık yüz sensör çıkışının ortalamasını tahmin edici olarak kullanılması ile daha hassas ve doğru sonuçlar almayı hedeflemektedir [28, 42]. Ardışık yüz sensör verisini tahmin edici kullanarak yapılan tahminler, ardışık tahmin hatalarının gauss olarak dağıldığı ve hata toplamının sıfır olduğu varsayımına dayanmaktadır. Çünkü Gauss dağılımında veriler Şekil 2.1'deki gibi dağılır ve modellenmesi

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (2.12)$$

denklem (2.12)'e göre yapılır. Şekil 2.1'den ve denklemden de görüleceği üzere gauss dağılımında ortalama değer, bulunmak istenen değere çok yakın sonuçlar verecektir. Denklem (2.12)'de σ , değerlerinin standart sapmasını ifade etmektedir ve

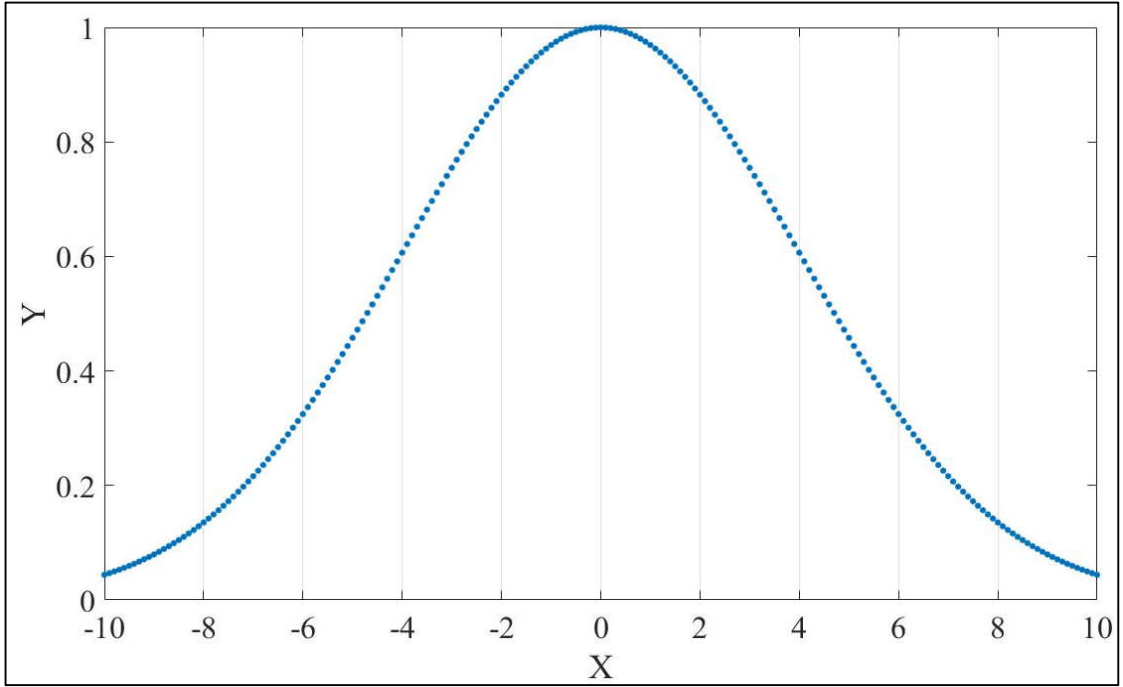
$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (2.12)'de μ x değerlerinin ortalamasını belirtmektedir ve

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (2.12), (2.13) ve (2.14) x sensör çıkışını, N , toplam eleman sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada ise N bir ölçüm için alınan sensör çıkış veri sayını ifade etmektedir.

Geçmiş çalışmalarda varsayıldığı gibi kızılötesi sensör çıkışının dalgalanması Gauss dağılıma göre olduğunda belirli sayıda ardışık sensör çıkışının toplamı istenilen sonucu verecektir. Bir diğer değişle ölçüm hatası gauss olarak dağıldığında, belirli bir sayıda ölçüm hatasının toplamı sıfır olacaktır. Ancak ilerleyen bölümlerde de görüleceği gibi, yapılan testlerde kızılötesi sensör çıkışının gauss olarak dağılmadığı görülmüştür. İlgili çalışmalar [28, 42] gauss olmayan gürültüleri ve aykırı sensör okumalarını göz ardı ederek, bu yöntemi uygulamaktadır ama kızılötesi sensör çıkışının çoğu zaman dış etkenlerden kaynaklı veya insan kaynaklı hataların neden olduğu gauss olmayan gürültü ve aykırı sensör okumaları içermesi kaçınılmaz bir gerçektir [43]. Bu yüzden aykırı değerler (Aykırı değer: ardışık sensör verilerindeki karakteristik olarak sensörden alınan verilerin çoğunluğundan farklı karakter gösteren sensör okumaları olarak tanımlanır [44].) ve gauss olarak dağılmayan hatalar dikkate alınmadan yapılan modelleme, tahmin ve filtreleme yöntemleri ile elde edilen sonuçların yüksek tahmin hatasına neden olacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Öte yandan birçok çalışma model parametrelerinin tahmininde en küçük kareler (LSM) yöntemini kullanmaktadırlar. Ancak LSM metodu en çok bilinen ve devrim niteliğinde bir yöntem olsa da, bu metodun gauss dağılmayan hatalarda ve tahmin edici değerin aykırı değer içermesi durumunda, model parametre tahmin doğruluğu azalmaktadır [45].



Şekil 2.1: Gauss dağılımı.

Özetle geçmiş çalışmalarda kızılötesi sensör ile mesafe tahmininin sadece belli noktalarına değinilmiş ve derinlemesine bir analiz yapılmamıştır. Bu yüzden bu tez çalışmasında literatürde kızılötesi mesafe tahmininde pek kullanılmayan dayanıklı model parametre tahmini, aykırı değer filtreleme, veri tümleştirme yöntemleri de dahil edilmiştir.

2.1.2. Mesafe Tahmininde Veri Tümleştirme ile İlgili Geçmiş Çalışmalar

Schlegl ve ekibi [25] daha hassas ve doğru mesafe ölçümü yapabilmek amacıyla ultrasonik sensör ve kapasitif sensörün birlikte kullanıldığı bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada kapasitif sensör yakın mesafelerin ölçümünde kullanılırken, ultrasonik sensör uzak mesafelerin ölçümünde kullanılarak daha kaliteli ölçümler yapılmaya çalışılmıştır. Çünkü yapılan testlerde kapasitif sensörün yakın mesafelerde daha doğru ve hassas sonuçlar verdiği, ultrasonik sensörün ise uzak mesafelerde daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Veri tümlestimesi, Kalman filtresi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve araç park sisteminde test edilmiştir [25]. Bu tez kapsamında da ilk aşamada tek bir sensör kullanılarak daha hassas ve doğru ölçümler yapabilmek için

çalışmalar yapılmıştır. İkinci aşamada ise doğruluk ve hassasiyeti arttırmak için aynı tip iki kızılötesi sensörden alınan veriler tümleştirilerek çalışmalar yapılmıştır. 3 farklı veri tümleştirme metodu test edilmiş ve yeni bir veri tümleştirme yöntemi önerilmiştir. Ayrıca sensör yerleşiminin veri tümleştirme üzerine etkisi de incelenmiştir.

2.1.3. Aykırı Değer Tespiti ile İlgili Geçmiş Çalışmalar

Aykırı değer içeren sensör verileri ile daha doğru modelleme yapabilmek için dirençli model parametre tahmin etme yöntemleri olsa da, tahmin doğruluğunu etkileyen en önemli etmenlerden birisi de sensörden alınan verinin kalitesidir. Bu yüzden literatürde sensörden alınan verilerin kalitesini arttırmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır çünkü zamana bağlı seri olarak alınan ardışık veriler için gürültü önlemede çeşitli filtreler kullanılsa da bu filtreler aykırı değerlerin temizlenmesinde çok da etkili olamazlar. Basu ve ekibi uçuş verilerindeki aykırı değerleri gidermek için bir algoritma önermiştir. Önerilen algoritmada ardışık haldeki sensör uçuş verilerindeki anormallikleri tespit etmek amacıyla sırayla her bir veri için, test edilen verinin en yakın komşularından bir test grubu oluşturulmaktadır ve sırayla oluşturulan her bir grup verinin ortancası tespit edilmekte ve ortanca veriden daha önceden belirlenmiş bir sınır veri kadarından daha fazla veya az olan değerler, aykırı değer olarak kabul edilip, elenmektedir [43]. Hill ve ekibi de çevresel değerlerin okunmasında kullanılan sensörlerde oluşabilecek aykırı değerlerin giderilmesi için bir aykırı değer filtreleme algoritması önermiştir. Çalışmada bir sonraki sensör okuması tahmininin (Geçmiş sensör verilerini kullanarak, sensörden okunması olası yeni değer tahmin edilmesi) ve tahmin aralığının (tahmin edilen verinin olası hata aralığı) kullanıldığı algoritmanın çeşitli versiyonları test edilmiştir. Önerilen algoritmalar, rüzgâr hız verilerindeki aykırı değerlerin temizlenmesi için kullanılmış ve aykırı değerler büyük oranda giderilmiştir [46]. Bir diğer çalışmada da Hill ve ekibi çevresel değerlerin okunmasında kullanılan sensörler de oluşabilecek aykırı değerlerin giderilmesi için Bayesian aykırı değer temizleme algoritmasını önermişlerdir. Algoritma dinamik bayesian ağı ve güven aralığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [47]. Tez kapsamında da literatürdeki çalışmalarda kullanılan 4 farklı aykırı değer tespit algoritması [43, 46, 47] test edilmiştir. Çünkü yapılan testlerde görülmüştür ki, ardışık kızılötesi sensör okumaları aykırı değer içermektedir. Bu durum yapılan tahminlerin doğruluğunu ve hassasiyetini açık bir şekilde olumsuz etkilemektedir. Ayrıca aykırı

değerlerin temizlenmesi içinde daha uygun yeni bir algoritma önerilmiştir. Çünkü bilindiği üzere aykırı değerler matematiksel olarak belirli bir kalıpları yoktur [44]. Bu yüzden farklı tip sensörler, veriler ve yapılan ölçümlerin özelliğine uygun aykırı değer algoritması belirlenmesi gerekir.

2.1.4. Diğer İlgili Geçmiş Çalışmalar

Tez çalışmasında kızılötesi sensör tercih edilmesine rağmen, literatürde ultrasonik sensör kullanarak daha hassas ve doğru mesafe ölçümü ile ilgili yapılmış birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar incelendiğinde kızılötesi sensör ile yapılan çalışmalardan farklı olarak, ultrasonik sensör ile yapılan çalışmalarda numerik ve yazılımsal algoritmalar mesafe tahmin hassasiyetinin artırılmasında kullanılmaktadır. Örneğin Khoenkaw ve Pramokchon [48] ile Majchrzak ve ekibi [42] çalışmalarında yazılımsal ve numerik yöntemler kullanarak ultrasonik sensörün mesafe ölçüm doğruluğunu ve hassasiyetini arttırmışlardır. İlgili çalışmalarda hassaslığı ve doğruluğu arttırmak için sadece yazılımsal yöntemler kullanıldığı için, yapılan iyileştirmeler üretim maliyetini arttırmamıştır. Ancak literatürde kızılötesi sensör ile yapılan çalışmalarda hassaslığı ve doğruluğu arttırmak için numerik ve yazılımsal yöntemler çok yüzeysel incelenmiştir. Genel olarak kızılötesi sensör ile yapılan geçmiş çalışmalar, gerçek mesafe ile sensör çıkışı arasındaki lineer olmayan ilişkiyi doğru modelleme üzerine kurulmuştur. Bu yüzden tez kapsamında yazılımsal olarak doğruluğu ve hassaslığı arttırmaya yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Böylelikle yapılan iyileştirmelerde, donanımsal ihtiyaçlara gerek duymadan maliyet mümkün olduğunca kısıtlı düzeyde tutulmaya çalışılmıştır.

Regresyon modellemeye iki temel değişken vardır. Birincisi tahmin edici değişken, ikincisi tepki değişkenidir. Bu tez çalışmasında sensör okumaları kullanılarak tahmin edici değişken elde edilmektedir. Tepki değişkeni ise gerçek mesafedir. Bu iki grup değişken kullanılarak kızılötesi sensör ile mesafe ölçmek için gerekli olan modelin parametreleri hesaplanmaktadır. LSM model parametrelerinin tahmininde kullanılan en temel ve yaygın yöntemdir [27, 29, 45, 49]. Ancak LSM metodu tahmin edicilerde bulunan aykırı değerlere aşırı duyarlıdır. Çünkü LSM yönteminde değişkenlerin gauss dağıldığı varsayımı üzerinden model parametreleri tahmin edilmektedir. Ancak değişkenlerin gauss dağılmaması ve aykırı değer içermesi durumunda elde edilen model parametrelerinin doğruluğu azalmaktadır. Bu durum

mesafe tahmin doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle tezde dayanıklı model parametre tahmin yöntemleri de test edilmiştir. Dayanıklı model parametre tahmin yöntemleri aykırı değerlerden LSM kadar aşırı etkilenmemektedir. Aynı zamanda değişkenlerin aykırı değer içermemesi durumunda da LSM metoduna yakın doğrulukta tahmin yapılabilir.

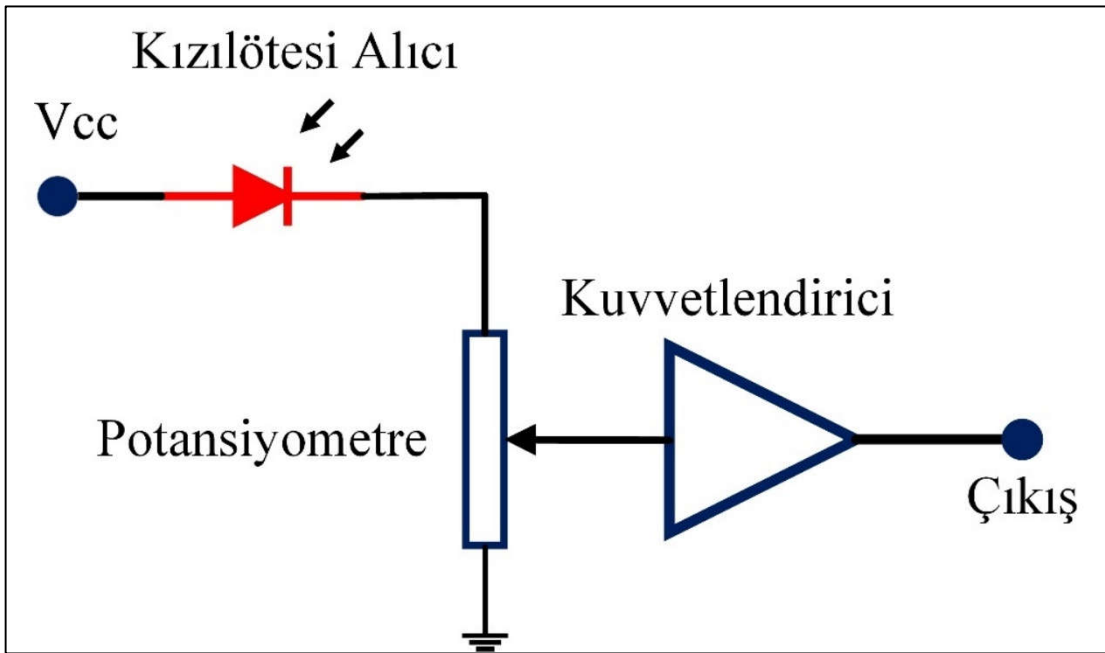
2.1.5. Kızılötesi Mesafe Sensörü Çalışma Prensibi

Kızılötesi mesafe sensörleri en temelde çevrelerine ışık yayarak ve yaydığı ışığı algılayarak mesafe ölçümü yaparlar. Işık ise kısa dalga boyuna ve yüksek frekansa sahip elektromanyetik radyasyondur. Dalga boyuna bağlı olarak kızılötesi ışık, görülür ışık, ultraviyole ışık ve X-ray olarak gruplandırılır. İnsan gözü 400 nm ile 700 nm dalga boyu aralığındaki (430-750 THz) ışıkları algılayabildiği için bu aralıktaki dalga boyuna sahip elektromanyetik radyasyon görülür ışık olarak adlandırılmıştır. Kızılötesi ışık ise insan gözünün algılayamadığı 1 mm ile 750 nm arasında dalga boyuna(300 GHz - 400 THz) sahip elektromanyetik radyasyondur. Kızılötesi ışık insan gözü ile görülmediğinden mesafe algılamada kullanılmaktadır.

Kızılötesi sensör modülünün içerisinde belirli bir kızılötesi dalga boyunda ışık yayan kaynak bulunmaktadır. Kaynakta üretilen ışık, dar bir açı ile mesafesi ölçülmek istenen yüzeye yönlendirilir. Yüzeyden yansıyan ışık sensör modülünün alıcı kısmına ulaşır. Alıcı tarafında ise gönderilen kızılötesi ışık frekansına duyarlı foto direnç, foto iletken veya foto diyot yapısı bulunmaktadır. Engelden yansıyan kızılötesi ışık alıcıya ulaştığında, gelen ışık şiddetine bağlı olarak foto direnç, foto iletken veya foto diyot yapısının direnci değişerek üzerinden geçen akım değeri ve üzerinde oluşan gerilim değeri değişir. Bu değişime bağlı olarak sensör çıkışında genellikle 0-4 V aralığında gerilim oluşturulur. Şekil 2.2’de örnek bir kızılötesi alıcı devre şeması görülmektedir.

Sensör çıkışında oluşan gerilim bilgisi yardımıyla sensör modülü ile engel aradaki mesafe belirlenmeye çalışılır. Burada yararlanılan temel prensip kaynaktan yayılan ışığın yüzeyi aydınlatma miktarının (lux) mesafeye bağlı olarak azalmasıdır. Kaynaktan gönderilen ışığın gücü sabit olduğunda belirli bir mesafe kat ederek alıcı üzerine ulaşan ışık miktarı sabit olacaktır. Alıcının içerisindeki direnç değeri üzerine ulaşan ışık miktarına bağlı olarak değişeceğinden dolayı gönderilen sabit ışık altında devre üzerinden geçen akım miktarı mesafeye bağlı olarak değişecektir. Algılayıcı sensör elemanı kaliteli ve stabil çalışıyorsa her zaman aynı lux altında aynı direnç

değerine sahip olacak ve üzerinden geçen akım miktarı aynı olacaktır. Bu bilgi yardımıyla sensör çıkışı ile mesafe arasındaki ilişki belirlenerek mesafe ölçümü yapılabilir. Ancak alıcı, sensörün hassasiyetinin düşük olması, alıcının direncinin üzerine düşen ışık miktarının mesafe bağlı doğrusal değişmemesi ve mesafeye bağlı ışığın gücünün azalmasının doğrusal olmama nedenlerinden dolayı, sensör çıkışı ile mesafe arasındaki ilişkiyi modellemek ve hassas ölçümler yapmak zorlaşmaktadır. Diğer yandan bilindiği gibi ışık hızı 3×10^8 m/sn olduğu için kızılötesi sensörün tepki süresi çok hızlıdır. Bu yüzden kızılötesi sensörün modellenmesi ve hassas ölçüm yapması zor olmasına rağmen birçok uygulama da tercih edilmektedir.



Şekil 2.2: Kızılötesi alıcı devresi.

2.2. Tez Çalışmasının Katkısı ve İçeriği

Nümerik ve yazılımsal yöntemler çeşitli çalışmalarda kalite iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Literatür taramasında da bu çalışmaların bir kısmı belirtilmiştir. Bu çalışmada da kızılötesi sensör ile mesafe ölçümü özelinde, nümerik ve yazılımsal yöntemler kullanılarak kalite artırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çünkü literatür taramasında görülmüştür ki kızılötesi sensör ile mesafe ölçümü üzerine yapılan geçmiş çalışmalar [27, 28, 30, 34, 39] derinlemesine yapılmamış, konu belirli yönleri ele alınarak yüzeysel incelenmiştir. Bazı çalışmalarda [11, 50, 51] ise kızılötesi

sensor ile mesafe ölçüldüğü belirtilmiş ancak detay verilmemiştir. Tez kapsamında ise kızılötesi sensor kullanılarak hassas ve doğru mesafe ölçülmesi birçok yönden ele alınarak daha detaylı bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca yapılan çalışma çıkışı analog olan birçok sensor içinde uygulanabilecek bir prosedür haline getirilmiştir. Önerilen prosedür 6 başlıktan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla; aykırı değer tespiti, değişken dönüşümü, regresyon modeli belirleme, dayanıklı modelleme, tahmin edici belirleme yöntemi ve veri tümleştirme. Belirtilen başlıkların hepsi hassas ve doğru ölçüm yapabilmek için gerekli adımlardır ve her bir adım tez çalışmasının başarıya ulaşması için gereklidir. Bu çalışmada başarı; hassasiyeti ve doğruluğu düşük, okumalarında gürültü, aykırı değer barındıran, ticari olarak yaygın ve ekonomik bir kızılötesi sensor ile daha hassas ve doğru ölçümler yapmaktır. Bu çalışmanın literatüre katkısını özetlersek,

- Ekonomik ve çıkışı gürültü içeren kızılötesi sensorün ölçüm hassasiyet ve doğruluğunu arttırmak için bir prosedür önerilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu prosedür kızılötesi sensor ile mesafe ölçümünü birçok yönden ele almaktadır.
- Önerilen prosedür geliştirilerek çıkışı analog ve ölçülen fiziksel büyüklüğe oranla sensor çıkışı doğrusal olarak değişmeyen sensorlerin daha iyi anlamlandırılarak daha hassas ölçümler yapılmasına katkı sağlayabilecek bir prosedür oluşturulmuştur.
- Prosedürün uygulama aşamasında birçok metod ve yöntem test edilmiş, sonuçları analiz edilmiş ve konu ile alakalı birçok kaynak bir araya toplanmıştır.
- Literatürde olan 4 adet aykırı değer tespit algoritması test edilmiş ve kızılötesi sensor ile mesafe ölçümünde kullanılabilecek daha uygun yeni bir aykırı değer filtreleme algoritma önerilmiştir
- Üç farklı veri tümleştirme algoritması test edilmiş ve kızılötesi sensor ile mesafe ölçümünde kullanılabilecek daha uygun bir veri tümleştirme algoritma önerilmiştir
- Önerilen prosedür hem kızılötesi sensor ile mesafe ölçümünde kullanılabilecek, hem de çıkışı analog olan birçok sensor ile yapılan ölçümlerin kalitesini arttırabilecek genel bir prosedürdür.

Ayrıca bu çalışma literatürde bilimsel çalışmalara olan katkısının yanında endüstriye de katkı sağlayacaktır. Çünkü sensörler sanayide sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışma daha uygun maliyetli sensörler kullanarak, endüstrinin yeterli kalitede ölçüm yapabilmesine olanak sağlayacaktır. Üstelik bu katkı sadece kızılötesi sensör ile mesafe ölçümünde değil, önerilen prosedürün birçok sensöre uygulanabilir olması ile farklı farklı alanlarda kullanılan sensörlerin ölçüm doğruluğunun ve hassasiyetinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu tez kapsamında ikinci bölümde kızılötesi sensör kullanarak gerçekleştirilen testlerin yapıldığı test düzeneğinin detayları, önerilen prosedürün detayları, her adımda uygulanan metotlar, her adımın katkısı ve karşılaştırma için kullanılan referans testlerden belirtilmiştir. Üçüncü bölümde ise önerilen prosedür kullanılarak elde edilen mesafe ölçüm sonuçları, simülasyon ve gerçek zamanlı test sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların katkılarından bahsedilmiştir.

3. YÖNTEM VE TEST KURULUMU

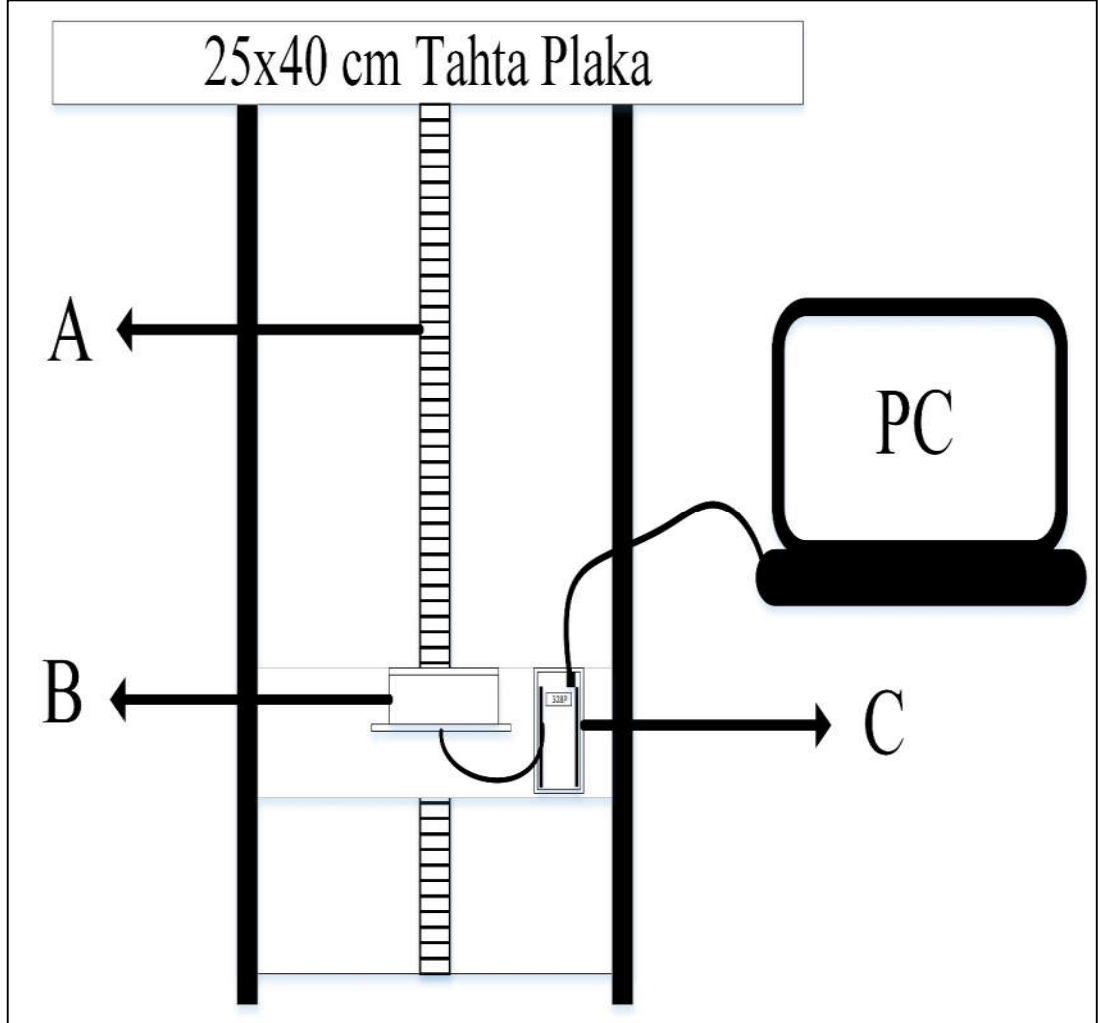
3.1. Test Kurulumu ve Ekipmanlar

Tez kapsamında yapılacak çalışma, kızılötesi sensör kullanılarak mesafe tahmin doğruluğunun ve hassasiyetinin mümkün olduğunca artırılmasına yöneliktir. Bu yüzden yapılan testlerin ve ölçümlerin; doğru, tekrarlanabilir ve hassas olarak yapılabilmesi çalışmanın güvenilirliği açısından önem arz ettiğinden dolayı, testler ve ölçümler laboratuvar ortamında özel test düzeneği kurularak gerçekleştirilmiştir.

Özel olarak bu çalışma için hazırlanan test düzeneğinde bir kızılötesi alıcı ünitesi ve bir kızılötesi yayıcı ünitesinin yan yana olduğu sensör modülü kullanılmıştır. Sensör modülünün teknik dokümantasyonunda çalışma aralığı 10 cm ile 80 cm arası olarak belirtilmiştir. Ancak hem tez çalışmasında yapılan testlerde, hem de Malheiros ve ekibinin yaptığı testlerde sensör modülünün 40 cm’den sonra hassaslığının ve çözünürlüğünün önemli oranda düştüğü görülmüştür [30]. Bu yüzden yapılan analiz, test ve iyileştirme çalışmaları 40 cm’ye kadar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca toplanan verilerin kısa aralıklarla ve tüm test bölgesini kapsayacak şekilde olması yapılacak çalışmanın başarısı açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle 10 cm ile 40 cm arasında 1 cm aralıklarla Şekil 3.1’te görülen test düzeneği kullanılarak her bir mesafe için 300 adet sensör verisi (gözlem) elde edilmiş ve toplamda çalışmayı gerçekleştirmek için 9300 adet gözlem verisi toplanmıştır.

Kızılötesi sensör ile hassas mesafe ölçümü yapabilmek için, kızılötesi ışık yayıcının gücü sabit olmalıdır. Kızılötesi yayıcının gücünün sabit olması içinde sensör modülünün giriş geriliminin sabit olması gerekmektedir. Bu yüzden sensör beslemesinde oluşacak dalgalanmaları engellemek için sensör modülünün enerjilendirilmesi LM2596 üzerinden yapılmıştır. Ayrıca modülün kontrol edilmesi, sensör çıkışındaki verilerin okunması ve bilgisayara aktarılması için mikroişlemci gerekmektedir. Bu amaçla SAM3X8E mikroişlemcisi tercih edilmiştir. Çünkü kızılötesi sensörün çıkışı analogdur ve ATMEL’in mikroişlemcisi dahili 12 bit analog dijital dönüştürücü içermektedir. Üstelik mikroişlemci 12 bitlik analog okumayı 0 V ile 3.3 V gibi dar bir aralıkta yapmaktadır. ADC’nin bu dar aralıkta 12 bit çözünürlükte veri okuyabilmesi; yapılacak analiz ve testler için önemlidir. Çünkü kızılötesi sensör modülü, ölçülmek istenen mesafedeki engelden yansıyan kızılötesi ışık miktarına

bağlı olarak, çıkışında gerilim üretmektedir ve sensör çıkışının hassas ölçülebilmesi için ADC'nin yeterli çözünürlüğe sahip olması gerekmektedir. Böylelikle gelen verinin karakteristiğinin daha net bir şekilde bilgisayara aktararak analiz edilmesi sağlanmıştır. Çünkü çalışmanın başlarında sensörden veriler 8-bit ADC'ye sahip mikro denetleyici ile alınmıştır ancak okunan veriler yeterli çözünürlükte olmadığı için gerekli çıkarımlar yapılamamış, belli bir süre çalışma duraksamıştır.



Şekil 3.1: Test kurulumu. ¹

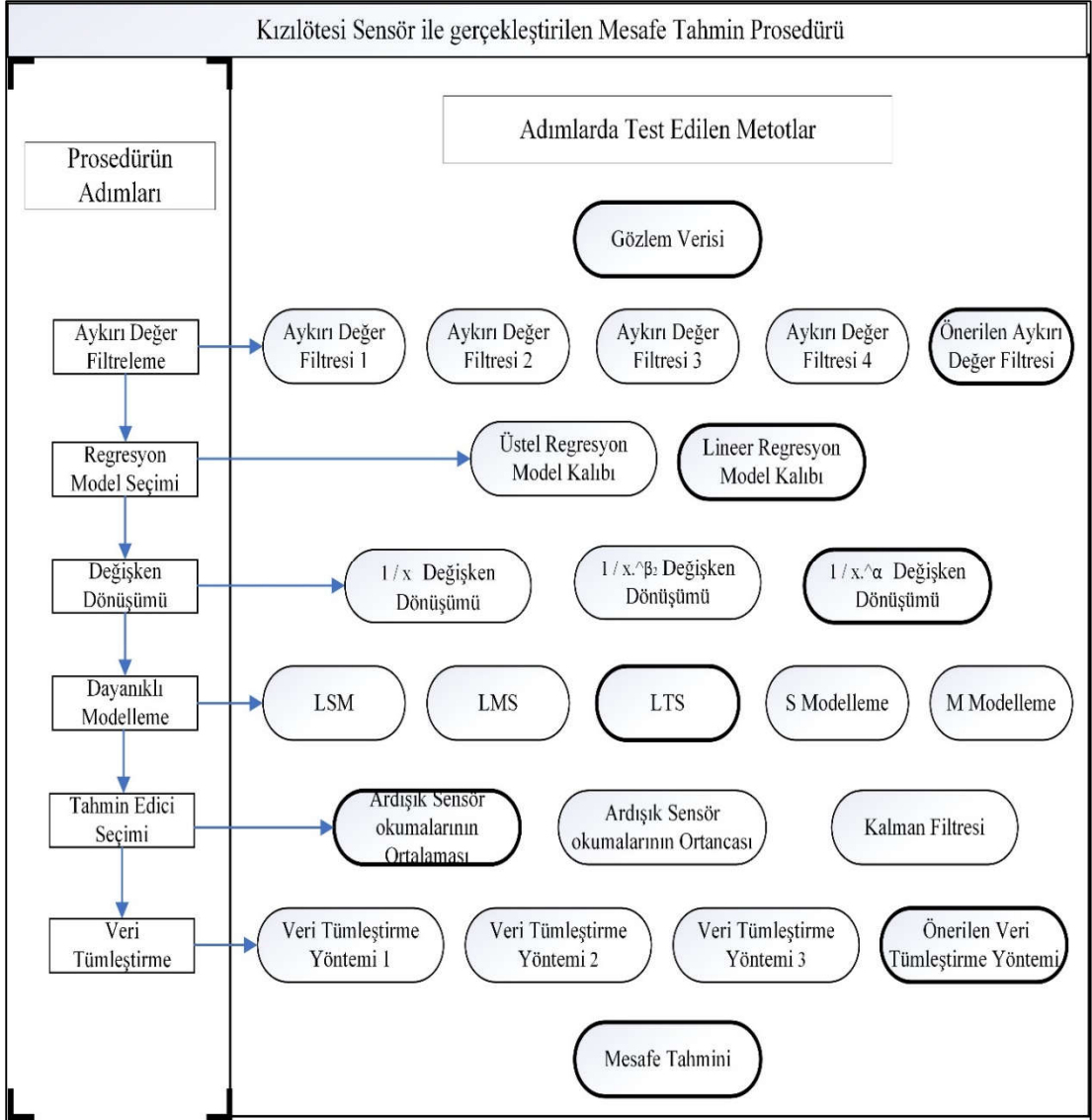
Ayrıca tüm sistemin kontrolü laptop üzerinden Matlab kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aradaki bağlantı USB portu üzerinden sağlanmıştır.

¹ (A: Cetvel, B: Kızılötesi Sensör Modülü, C: Mikroişlemci)

Test kurulumunda engel olarak 25 cm'ye 40 cm boyutlarında tahta plaka kullanılmıştır. Referans ölçümler 50 cm uzunluğunda ve ± 0.5 mm çözünürlüğe sahip metal cetvel ile gerçekleştirilmiştir. Metal cetvel test düzeneğindeki ray sisteminin zeminine yapıştırılarak sabitlenmiş, böylece ölçümlerin tekrarlanabilirliği sağlanmıştır. Ayrıca sensör ve mikroişlemci yüzeyden ve cetvelden ortalama 10 cm yüksekliğe yerleştirilmiştir.

3.2. Mesafe Tahmin Prosedürü

Bu bölümde kızılötesi sensör ile daha hassas ve doğru mesafe ölçmek için önerilen prosedür açıklanacaktır. Önerilen prosedür, tez çalışmasının amacına ulaşmak amacıyla gerekli 6 adımdan oluşmaktadır.



Şekil 3.2: Önerilen prosedür ve test edilen metotlar. ²

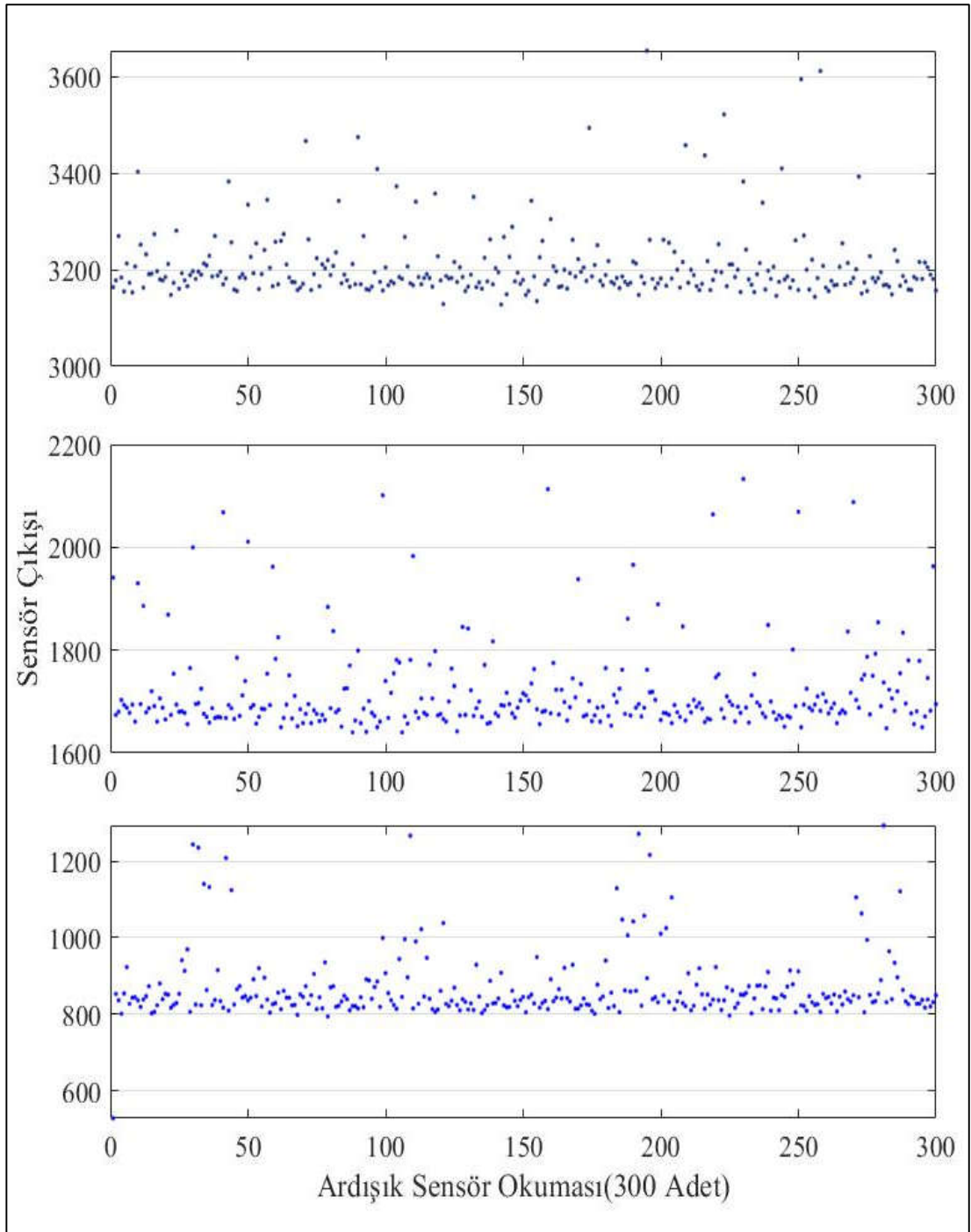
² Aykırı değer tespitinde kullanılan yöntemler bölüm 3.2.1’de, değişken dönüşümü uygulanan dönüşümler bölüm 3.2.3’de, Veri Tümlleştirmede kullanılan metotların detayları bölüm 3.2.6’da, gösterilmiştir. Ayrıca her adımda kalın olarak belirtilen metot, bu çalışmada seçilen metodu göstermektedir

Önerilen prosedür'ün adımları sırasıyla aykırı değer tespiti, regresyon modeli belirleme, değişken dönüşümü, dayanıklı model parametre tahmini, tahmin edici yöntemi belirleme ve veri tümleştirmedir. Prosedürün her bir adımında daha hassas ve doğru mesafe ölçebilmek için çeşitli metotlar test edilmiş ve en iyi sonuç gösteren metot o adım için seçilmiştir. Seçilen metot Şekil 3.2'de kalın çerçeveli olarak belirtilmiştir.

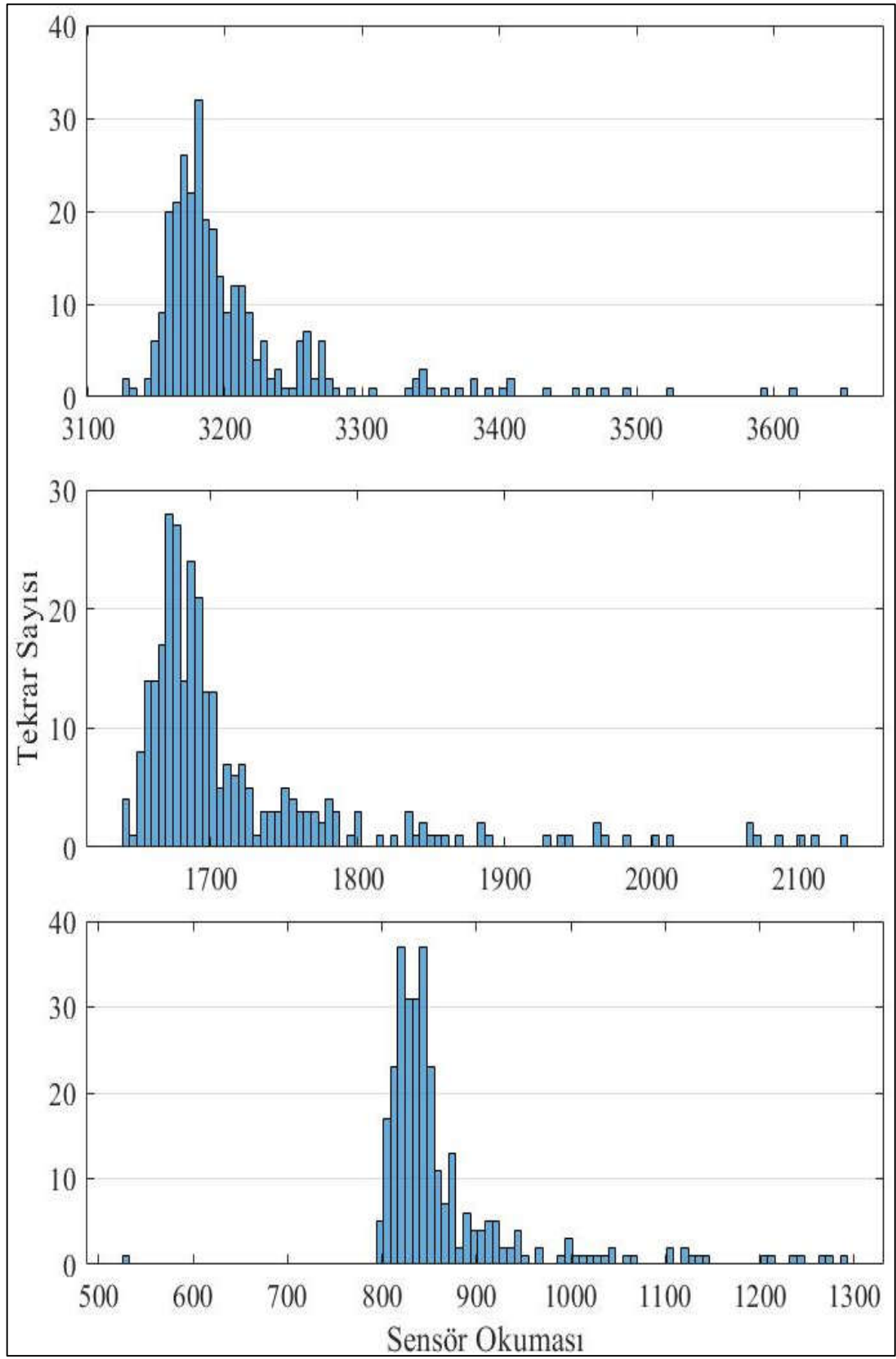
Ayrıca önerilen prosedür ile ilgili belirtilmesi gereken önemli bir noktada; prosedür hassas ve doğru mesafe ölçümü için gerekli adımları belirtmektedir. Ancak o adımda uygulanan metot farklı tip sensörler ve uygulamalar için farklı olabilir. Bu da doğal bir durumdur. Çünkü prosedürde önemli olan metot değil, uygulanan adımdır. Başka bir deyişle, prosedürün bir adımı olan aykırı değer tespiti için bu çalışmada en iyi sonuç veren ve tercih edilen metot, başka bir sensör için iyi bir aykırı değer temizlemesi sağlamayabilir ancak aykırı değer dikkate alınması ve uygun yöntemin tespiti her uygulamada hassas ve doğru ölçüm yapılması için gerekli bir adımdır. Önerilen prosedürün tüm adımları ve tezde her adımda test edilen metotlar Şekil 3.2 de gösterilmiştir.

3.2.1. Aykırı Değer Tespiti

Aykırı değerler literatürde “Kümedeki diğer veri noktalarından önemli ölçüde farklı olan veya diğer veri noktalarından beklenen tipik davranışı göstermeyen veri noktaları.” olarak tanımlanmaktadır [52]. Kızılötesi sensör model parametreleri ardışık üç yüz sensör çıkışının ortalaması alınarak elde edilen tahmin edici yardımıyla hesaplanmıştır. Ancak üç yüz adet sensör çıkışının içerisindeki aykırı değerler dikkate alınmaz ve filtrelenmez ise tahmin edici değer hassaslığı ve doğruluğu azalacaktır. Şekil 3.3'te 3 farklı mesafe için üç yüz ardışık sensör çıkışı gösterilmiştir ve şekilden de açıkça görüleceği gibi sensör verilerinde aykırı değerler bulunmaktadır.



Şekil 3.3: Zamana bağlı sensör çıkışı.



Şekil 3.4: Histogram 1.

Ardışık kızılötesi sensör okumalarının çoğu, sensör verilerinin ortalama değeri çevresinde toplanmışken, azımsanmayacak bir kısım sensör okumaları da ortalama değerden uzaktadır. Ayrıca Şekil 3.3'den de görülebileceği gibi aykırı değerler rasgele, tahmin edilemez bir yapıdadır ve matematiksel bir kalıba uydurulması güçtür. Şekil 3.4'te de 3 farklı mesafe için ardışık üç yüz sensör verisinin histogram diyagramı gösterilmektedir. Histogram diyagramından da görülebileceği üzere aykırı değerler temizlenirse, sensör verilerinin dağılımı Gauss dağılıma yaklaşacaktır. Ayrıca histogramdan da görüleceği üzere aykırı değerler yanlıdır. Bu yanlılık tahmin edici değerlerde sapmalara neden olacaktır. Çünkü ortalama değer kullanımı sensör verilerinin gauss dağıldığı varsayımına göre yapılmaktadır. Ancak aykırı değerler bir yönde sapmaya neden olacaktır.

Ayrıca hem Şekil 3.3'teki grafikten hem de Şekil 3.4'deki histogramdan görülebileceği gibi hareketli ortalama filtresi, ortalama filtresi, Kalman filtresi gibi filtreler aykırı değerlerin temizlenmesinde pek etkili olamazlar çünkü belirtilen filtreler verilerin gauss dağıldığı varsayımı üzerine çalışmaktadır ancak aykırı değerler içeren sensör verileri gauss dağılmamıştır. Dağılım bir yönlüdür. Bu yüzden belirtilen filtreler aykırı değerlerin etkisini sadece azaltırlar. Hareketli ortalama değer filtresi

$$f_t = \frac{1}{p_f} (x_{t+i} + \dots + x_t + \dots + x_{t-i}) \quad (3.1)$$

denklem (3.1)'de gösterilmiştir. Denklemde f filtrenin çıkışını, p_f bir filtreleme kullanılacak eleman sayısıdır ve genelde tek sayı seçilir. Bu durumda

$$i = \frac{p_f - 1}{2} \quad (3.2)$$

olur. n 'i toplam eleman sayısı ile ifade edersen ortalama filtresi,

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.3)$$

olur. Kalman filtresi

$$f_n = K_n \cdot x_n + (1 + K_n) \times f_{n-1} \quad (3.4)$$

denklem (3.4)'de gösterilir. Denklem de K_n Kalman kazancını, f_{n-1} bir önceki Kalman filtresi çıkışı belirmektedir. Denklemlerden de görüleceği üzere, belirtilen filtreler aykırı değerleri de çıkışa dahil etmektedir. Bu yüzden filtreleme sonucu aykırı değerlerin sadece etkisi azalmaktadır. Daha iyi sonuçlar elde etmek için aykırı değerlerin elenip çıkışa dahil edilmediği filtreleme yöntemlerine ihtiyaç vardır.

Özetle, daha hassas ve doğru ölçümler yapabilmek için aykırı değerleri temizleyerek, elimine eden filtrelere ihtiyaç vardır. Bu amaçla tasarlanmış özel amaçlı filtreler bulunmaktadır. Tez çalışmasında literatürde bulunan 4 adet aykırı değer filtresi ve bu çalışmadaki sensör çıkışındaki aykırı değerleri daha iyi temizleyecek yeni bir aykırı değer filtresi önerilmiştir. Bunlar;

3.2.1.1. Aykırı Değer Filtresi 1:

Bu filtre literatürde kutu ve Whisker diyagramı olarak bilinmektedir. Sadece kutu grafiği olarak da ifade edilmektedir. İlk olarak John Tukey tarafından veri analizinde kullanılmak amacıyla önerilmiştir. Daha sonraları aykırı değer tespitinde kullanılmıştır. Kutu grafiği yönteminde veriler 5 farklı grupta toplanmaktadır. Şekil 3.5'de kutu diyagramı gösterilmiştir. Üst ekstrem ve alt ekstrem olarak adlandırılan gruptaki veriler aykırı değer olarak filtrelenmektedir [44]. Üst Ekstrem ve alt Ekstrem değerleri

$$\text{Üst Ekstrem} > \text{Ortanca} + 1.5 \times (\text{Ortanca} - Q3) \quad (3.5)$$

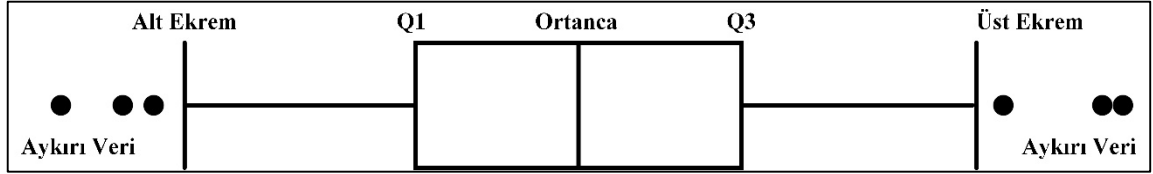
$$\text{Alt Ekstrem} > \text{Ortanca} - 1.5 \times |\text{Ortanca} - Q1| \quad (3.6)$$

denklem (3.5) ve (3.6) ile bulunur. $Q1$ ve $Q3$ sırasıyla aykırı değeri tespiti yaptığımız elemanların üst çeyrek ve alt çeyrek elemanıdır ve

$$Q_1 = x_i, \quad i \in N \quad \text{ve} \quad i \approx \frac{(n+1)}{4} \quad (3.7)$$

$$Q_3 = x_i, \quad i \in N \quad \text{ve} \quad i \approx \frac{3(n+1)}{4} \quad (3.8)$$

denklem (3.7) ve (3.8) yardımıyla hesaplanır. Burada n toplam eleman sayısını ifade etmektedir.



Şekil 3.5: Kutu diyagramı.

3.2.1.2. Aykırı Değer Filtresi 2

Hill ve ekibi çalışmalarında Bayesian Anomali Belirleme filtresini önermişlerdir. Bu filtre Dinamik Bayesian ağı ve güven aralığı metotları kullanılarak tasarlanmıştır. Sensör okumaları güven aralığında kalıyorsa veriler, normal sensör verisi olarak kabul edilir, bu aralıkta kalmıyorsa aykırı değer olarak kabul edilip, filtrelenir [47]. Dinamik Bayesian ağı

$$p(X_0) \rightarrow p(X_1|X_0) \rightarrow p(X_t|X_{t-1}) \quad (3.9)$$

Denklem(3.9)'da grafik olarak gösterilmektedir. $P(X_0)$ başlangıç olasılığını belirtmektedir. Bu olasılık okunan sensör verilerinin aykırı değer olmama olasılığını belirtmektedir. Bayesian güven aralığı ise

$$P(a \leq x \leq b | Y = x_i) = 1 - \alpha \quad (3.10)$$

denklem (3.10) yardımıyla hesaplanabilir. Denklemde α belirlenen güven aralığı yüzdesini, a ve b ise güven aralığını vermektedir ve güven aralığı

$$[a, b] = [E(X|Y = x_i) - c, E(X|Y = x_i) + c] \quad (3.11)$$

denklem (3.11)'deki ifade ile elde edilir. Denklem (3.11) kullanılarak güven aralığının bulunabilmesi için

$$E(X|Y=x_i) \text{ ve } c \quad (3.12)$$

Parametrelerinin hesaplanması gereklidir. Bu parametreler

$$E[X|Y=x_i] = \mu_x + p \cdot \sigma_x \frac{x_i + \mu_y}{\sigma_y} \quad (3.13)$$

$$c = \sqrt{\text{Var}(X|Y=x_i)} \Phi^{-1}\left(\frac{1+(1-\alpha)}{2}\right) \quad (3.14)$$

formülleriyle hesaplanır. Denklem (3.14)'de Φ kümülatif dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir. c parametresinin hesaplamasında gerekli $\text{Var}(X|Y=x_i)$ ve Φ parametreleri

$$\Phi(x) \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i x^{(2i+1)}}{2^i i! (2i+1)} \quad (3.15)$$

$$\text{Var}(X|Y=x_i) = (1-p^2) \sigma_x^2 \quad (3.16)$$

denklem (3.15) ve (3.16) kullanılarak bulunabilir. Burada p ise sensör verilerindeki, aykırı değer olmayan sensör okumalarının olasılığını belirtmektedir. Denklemlerdeki σ ve μ değerleri

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (3.18)$$

denklem (3.17) ve (3.18) kullanılarak bulunabilir. Burada x sensör çıkışı, n toplam eleman sayısını ifade etmektedir.

3.2.1.3. Aykırı Değer Filtresi 3

Hill ve ekibi bir diğer çalışmada da, veri güdüm yaklaşımı temelli aykırı değer filtresini önermişlerdir. İlgili çalışmada, veri güdüm yaklaşımı temelli birkaç farklı aykırı değer filtreleme algoritması açıklanmıştır. Bu tez çalışmasında, Hill ve ekinin önerdiği bir sonraki sensör okumasının, tek katmanlı lineer ağ tahmin edicisi ile belirlendiği ve tahmin aralığının kullanıldığı aykırı değer filtresi test edilmiştir. Algoritmada sensör okuması, geçmiş veriler kullanılarak tek katmanlı lineer ağ tahmin edicisi ile bulunan değer, tahmin değer aralığı kadar azından büyük veya fazlasından küçük olan sensör okumaları normal olarak kabul edilir. Aksi durumda sensör okumaları aykırı değer olarak belirlenip filtrelenir [46]. Filtrenin çalışmasını daha açık ifade edecek olursak:

Tek katmanlı lineer ağ tahmin edicisi

$$\hat{x}_{i+1} = M(W^t) + \varepsilon \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'da belirtilmektedir. Burada M modeli, W kayar pencereyi, t ise kayan pencerenin eleman sayısını ifade etmektedir. Kayar pencere

$$W^t = \{x_i, x_{i-1}, x_{i-2}, x_{i-t}\} \quad (3.20)$$

denklem (3.20) ile ifade edilir. Model gelen sensör okuması x_{i+1} eğer tahmin aralığını içerisinde kalıyorsa

$$\hat{x}_{i+1} = x_{i+1} \quad (3.21)$$

denklem (3.21) kullanılır. Filtre, gelen sensör okuması x_{i+1} eğer tahmin aralığı içerisinde kalmıyor ise çıkışta hiçbir veri vermez veya kayar pencerenin elemanlarını belirli bir ağırlık katsayısı ile birleştirerek gelen veri yerine yeni bir değer verir. Tez kapsamında yapılan çalışma da tüm verilerin özellikleri aynı olduğundan her bir verinin ağırlık katsayısı

$$\frac{1}{t} \quad (3.22)$$

olarak seçildi, ancak bu durumda hareketli ortalama filtresi ile benzer sonucu vereceğinden dolayı kayar penceredeki elemanlar büyükten küçüğe sıralanıp, tahmin edicinin çıkışı

$$\hat{x}_{t+1} = x_{\frac{(t+1)}{2}} \quad (3.23)$$

olarak seçilmiştir. tahmin aralığının bulunması Hill ve ekibinin [46] yaptığı çalışmada belirtildiği gibi

$$[a,b]=[E(X)-Z\sigma_x,E(X)+Z\sigma_x] \quad (3.24)$$

denklem (3.24) kullanılarak hesaplanmıştır. Tahmin aralığı belirlemek için kullanılan Z değeri

$$Z = \Phi^{-1}\left(\frac{1+(1-\alpha)}{2}\right) \quad (3.25)$$

denklem (3.25)'de ifade edilmiştir. Tahmin aralığı ve Bayesian güven aralığının bulunması temelde benzerlikler göstermesine rağmen hesaplamalarında küçük farklılıklar vardır. Tahmin aralığında beklenen değer $E(X)$ kullanılırken Bayesian güven aralığında beklenen değer $E(X|Y=x_i)$ 'dir. Aynı şekilde varyans, tahmin aralığı hesaplanırken $Var(X)$ şeklinde Bayesian güven aralığında hesaplanırken ise $Var(X|Y=x_i)$ şeklinde bulunur.

3.2.1.4. Aykırı Değer Filtresi 4

Basu ve ekibi çalışmalarında uçuş yükseklik verilerinin filtrelenmesinde kullanılması amacıyla otomatik aykırı değer filtresi önermişleridir. Önerilen filtre ilk olarak ardışık sensör verileriyle önceden belirlenmiş büyüklükte denklem (3.20)'de gösterildiği gibi bir kayar pencere oluşturmaktadır. Oluşturulan kayar pencerenin

ortancası referans değeri olarak belirlenir. Eğer sensörden okunan bir sonraki değeri, ortanca değeri önceden belirlenmiş bir değeri kadar fazlasından küçük veya azından büyük ise sensör verisi normal olarak kabul edilir. Aksi durumda aykırı değeri olarak belirlenir, filtrelendir. Bu filtrede de aykırı değeri filtresi 2 ve 3 te olduğu gibi bir $[a, b]$ aralığında belirlenmektedir [43]. Ancak bu aralığın belirlenmesi denklem (3.26)'e göre yapılır.

$$[a, b] = [M(X) - c, M(X) + c] \quad (3.26)$$

denklem (3.26)'e göre yapılır. Burada c değeri geçmiş sensör verileri görselleştirilerek deneyime dayalı belirlenir. Ayrıca burada $M(X)$ bulunurken de kayar pencere içindeki elemanlar büyüktürden küçüğe sıralanır ve

$$M(X) = x_{(t+1)/2} \quad (3.27)$$

denklem (3.27) yardımıyla hesaplanır. t kayar pencerenin eleman sayısını ifade eder.

3.2.1.5.Yeni Önerilen Aykırı değeri Filtresi

Tez çalışmasında literatürde çeşitli uygulamalarda kullanılmış dört adet aykırı değeri filtresi, ardışık kızılötesi sensör okumalarındaki aykırı değeri değerlerin tespiti için test edilmiştir. Bu filtreler arasından aykırı değeri filtresi 4 en iyi performansı göstermiştir. Ancak buradan en iyi aykırı değeri filtresinin dört numaralı filtre olduğu anlaşılmamalıdır. Daha önce de belirtildiği gibi aykırı değeri değerlerin herhangi bir matematiksel modeli yoktur. Bu yüzden verinin ve aykırı değeri değeri karakteristiğine bağlı olarak filtreler farklı farklı performans gösterirler. Bu çalışmada dört numaralı filtre kullanılan kızılötesi sensör için en iyi performansı gösterirken, başka bir sensör veya veri için 1 numaralı filtre en iyi performansı gösterebilir. Bu yüzden her çalışma ve sensör için uygun olan aykırı değeri değeri filtresi seçilmez.

Tablo 3.1. Aykırı değer filtreleme Algoritması.

Giriş: Ardışık Kızılötesi Sensör Okumaları

Çıkış: Aykırı Değerleri Filtrelenmiş Sensor Verileri

Tolerans Aralığı: Deneysel ve Tecrübeye Dayalı Belirlenmiş Aralık

Kabul Aralığı: Aykırı Değer Kabul Edilmeyen Sensör Verileri, Normal Okumalar

Adım 1: Önceden Belirlenmiş Büyüklükte Komşu Grubu Belirlenir

Adım2: Grubun Ortanca Elemanı Belirlenir.

Aykırı Değer Belirleme Aralığı:

Ortanca + Tolerans Aralığı > Kabul Aralığı > **Ortanca + Tolerans Aralığı**

Adım3:

Eğer Sensor Okumaları **Aykırı Değer Belirleme Aralığında** ise,

Sensör Verisi Normal Veri Olarak Belirlenir

Öyle Olmazsa

Sensör Verisi Aykırı Değer Olarak Belirlenir ve filtrelenir.

Filtrelenen Sensör Verisi Yerine Ortanca kullanılır

Son

Tez çalışmasında yapılan testlerde en iyi performans dört numaralı filtre tarafından gösterilmesine rağmen bu filtre çok fazla işlem gücüne ihtiyaç duymaktadır. Ardışık üç yüz sensör verisinin filtrelenmesi yaklaşık 76 saniye

sürmüştür. Gerçek zamanlı ölçümlerde sadece bir mesafe için gerekli verilerin filtrelenmesinin 76 saniyelik işlem gücüne ihtiyaç duyması pek de makul değildir. Bu yüzden tez çalışmasında aykırı değer filtresi 4 temelli yeni bir filtre algoritması önerilmiştir. Yapılan değişikliklerle daha az işlem gücüne dayalı bir algoritma tasarlanması planlanmıştır. Öte yandan aykırı değer filtresi 4'te tolerans aralığı geçmiş değerlere bakılarak, tecrübe ile belirlenmiştir. Bu çalışmada tolerans aralığı ilk olarak güven aralığı vb. bir formülasyon kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak yapılan testlerde görülmüştür ki güven aralığı vb. değerlerin hesaplanmasında kullanılan standart sapma katsayısı, aykırı değerlerden aşırı etkilenmektedir. Bu etki bazen doğru sensör verilerinin filtrelenmesine, bazen de aykırı değerlerin tespit edilememesine neden olduğu için tolerans aralığı bu çalışmada da geçmiş veriler kullanılarak test ve tecrübelerle dayalı belirlenmiştir.

3.2.2. Regresyon Modeli Belirleme

Kızılötesi sensör ile mesafe ölçümü, sensörden yayılan kızılötesi ışığın bir engele çarpıp yansması sonucu geri dönen ışık miktarının ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Ancak yansıyan ışık miktarının mesafeye göre lineer olmayan bir şekilde değişmesi mesafe ölçümünü zorlaştırmaktadır. Üstelik yansıyan ışık miktarı yüzey özelliklerine göre de değişmesi mesafe ölçümünü daha da karmaşık hale getirmektedir. Özetle, kızılötesi sensör ile mesafe ölçülebilmesi için gerçek mesafe ile engelden yansıyan kızılötesi ışık miktarı arasındaki lineer olmayan ilişkinin matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Regresyon analiz yöntemleri, aradaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemede kullanılabilen istatistik temelli yöntemlerdir[53]. Ancak regresyon modelleme ile aradaki ilişkiyi matematiksel olarak modelleyebilmek için fazla sayıda gözlem verisi gerekmektedir. Bu yüzden sağlıklı gözlem verileri toplayabilmek için test düzeneği hazırlanmıştır. Çünkü modellemenin doğruluğunu arttırmak için gözlem verilenin kontrollü ortamlarda doğru olarak alınması gerekmektedir. Hazırlanan test düzeneği ile 10 cm ile 40 cm arasında 1'er cm'lik aralıklar ile ölçüm verisi toplanmıştır. Her mesafe için ardışık üç yüz ölçüm alınmıştır. Böylelikle modelleme yapabilmek için toplamda 9300 adet sensör verisi toplanmıştır.

Regresyon modelleme yapmakta en temel faktörlerden birisi tahmin edici değerler ile tepki değişkenleri arasındaki ilişkiyi modelleyebilecek uygun bir denklem

modelini bulmaktır. Bu denklem modeli aradaki ilişkiye bağlı olarak, lineer, n'inci dereceden polinom vb. denklem modeli olabilir. n'inci dereceden polinom denklem modeli

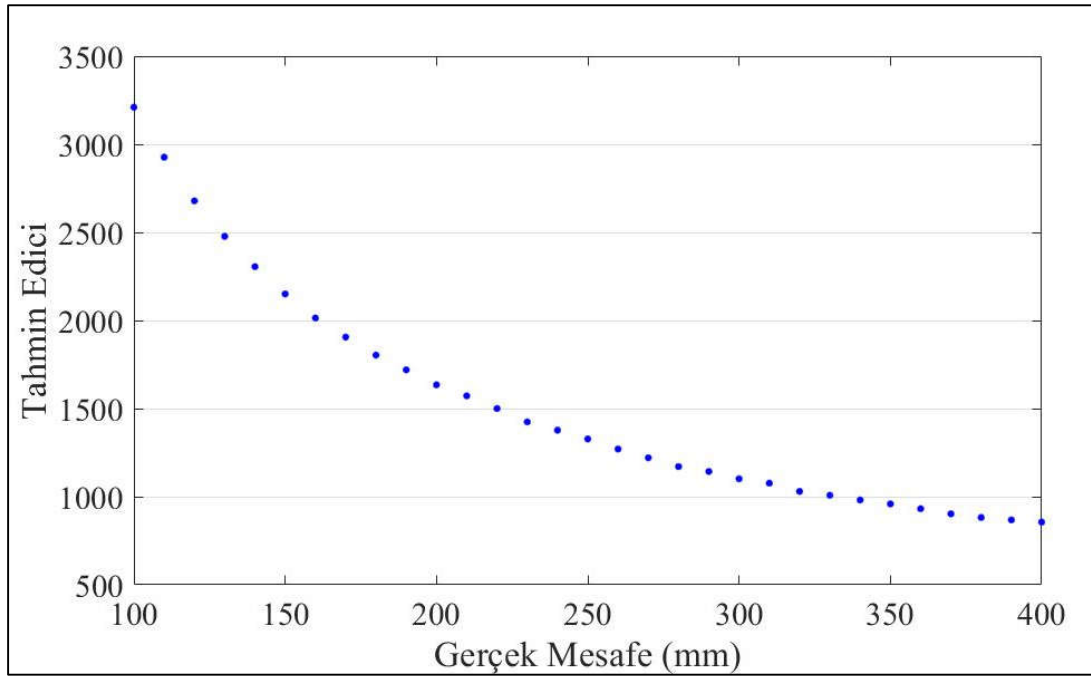
$$y^n(x) = \sum_{n=1}^n \beta_n x^n + \beta_0 \quad (3.28)$$

denklem (3.28)'de, lineer denklem modeli

$$y(x) = \beta_1 x + \beta_0 \quad (3.29)$$

denklem (3.29) gösterilmektedir. Lineer denklem modeli, polinom denklem modelinde $n=1$ seçilmesi ile elde edilir.

Sensör verileri ile ölçülmek istenen büyüklük arasındaki ilişki uygun denklem modeli seçimi ile gerekli parametreler tahmin edilerek kolaylıkla modellenebilir. Örneğin aradaki ilişki Şekil 3.6'de görüleceği gibi bir eğri şeklinde ise, burada lineer denklem modeli kullanıldığında model parametreleri hesaplanarak, Şekil 3.5'de görülen eğriye uydurulması mümkün değildir. Ancak ikinci veya üçüncü dereceden bir polinom ile şekilde görülen eğri şeklindeki ilişki denklem parametreleri hesaplanarak modellenebilir.



Şekil 3.6: Saçılım diyagramı 1.

Tez çalışmasında kızılötesi sensör verisi ile gerçek mesafe arasındaki ilişki en doğru şekilde modellenmeye çalışılacaktır. Test düzeneği yardımıyla elde edilen verilere uygun denklem modelinin bulunabilmesi için öncelikle görselleştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle uygun denklem modeli daha kolay bulunabilecektir. Uygun denklem modelini bulmakta kullanılan en genel görselleştirme metodu saçılım diyagramı çizmektir. Şekil 3.6’da sensör çıkışlarının ortalaması kullanılarak elde edilen tahmin edici ve gerçek mesafe arasındaki ilişkinin görselleştirildiği saçılım diyagramı 1 gösterilmektedir. 1 nolu saçılım diagramına baktığımızda aradaki ilişki denklem (3.30)’de gösterilen üstel denklem modeli veya n’inci dereceden polinom ile modellenebilir. Modelleme yaparken amaç eğriyi en az hata ile verilere uydurmak ve gelecek verileri de kapsayacak şekilde genel bir model elde etmektir. Eğriyi modellerken hata miktarını azaltmak önemlidir ancak hata miktarını azaltırken, elde edilen modeli, genel bir model olmaktan çıkarmamakta gerekmektedir. Aradaki ilişkiyi modellemek bazı kaynaklarda eğriye aradaki ilişkiyi öğretmek olarak da geçmektedir. Ancak eğriye verileri öğretirken, hata miktarı normalden fazla azaltılarak elde edilen model, gelecek veriler için aşırı hatalara neden olabilmektedir. Literatürde aşırı öğrenme olarak geçen bir durumda, aslında eğri aradaki ilişkiyi öğrenmiş olmuyor, ezberlemiş oluyor. Modelleme yaparken de bu durumdan kaçınılması gerekmektedir. Tez de yapılan çalışmada aşırı öğrenmeden kaçınmak ve

daha genel bir model elde etmek için lineer denklem modeli kullanılmıştır. Aslında basit, mümkün olan en az dereceden denklem modeli kullanılması aşırı öğrenmenin önüne geçmede kullanılan en temel yöntemlerden birisidir. Bu amaçla da tez çalışmasında hem gözlem verileri ile bilgisayarda yapılan testlerde, hem de gerçek zamanlı testlerde elde edilen hata miktarını azaltmak ve modelin verileri ezberlemesinin önüne geçmek için lineer denklem modeli tercih edilmiştir. Ancak 1 nolu saçılım diyagramında görülen ilişkiyi lineer denklem ile modellemek pek de mümkün görünmemektedir. Bu yüzden aradaki ilişkiyi lineer denklem modeli ile modellenen hale getirmek için değişken dönüştürme yöntemi kullanılmıştır. Değişken değiştirme yöntemi bir sonraki bölümde detaylandırılacaktır. Üstel denklem modeli

$$y = \beta_3 x^{\beta_4} \quad (3.30)$$

denklem (3.30)'da gösterilmiştir [53].

3.2.3. Değişken Dönüşümü

Kızılötesi sensör ile mesafe ölçümü yapılabilmesi için, sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki ilişkinin matematiksel olarak ifade edilmesi, yani modellenmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Sadece kızılötesi sensör için mesafe ölçülmesinde değil, farklı alanlarda da gerekli ölçümlerin veya hesaplamaların yapılabilmesi için benzer modellemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak her zaman kolaylıkla aradaki ilişkiyi matematiksel modellemek mümkün olmamaktadır. Bazen de aradaki ilişki modellenemeyecek kadar karmaşıktır. Bu tip durumların üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunların başında da değişken dönüşümü gelmektedir. Bu çalışmada da değişken dönüşümü kızılötesi sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki lineer olmayan ilişkiyi lineerleştirmek için kullanılmıştır. Şekil 3.7' da kızılötesi sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasında lineer olmayan ilişki gösterilmektedir. Tahmin edici değişkenler dönüştürülerek, aradaki ilişki lineer hale getirilmiştir. Şekil 3.8'de dönüşüm sonrası sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki ilişkinin saçılım diyagramı gösterilmektedir. Şekil 3.8'den de görülebileceği gibi aradaki ilişki lineerleştirilmiştir. Değişken dönüşümü için

$$x_{tr} = x^k \quad (3.31)$$

denklem (3.31) kullanılmıştır. Bunun yanı sıra değişken dönüşümü birçok farklı şekilde yapılmaktadır. Amaç aradaki ilişkiyi modellenenebilir hale getirmek olduğu için kullanılacak dönüşüm modellenecek verilerin yapısına göre değişmektedir. logaritmik, trigonometrik (Sinus için) dönüşüm formulleri

$$x_{tr} = \log(x) \quad (3.32)$$

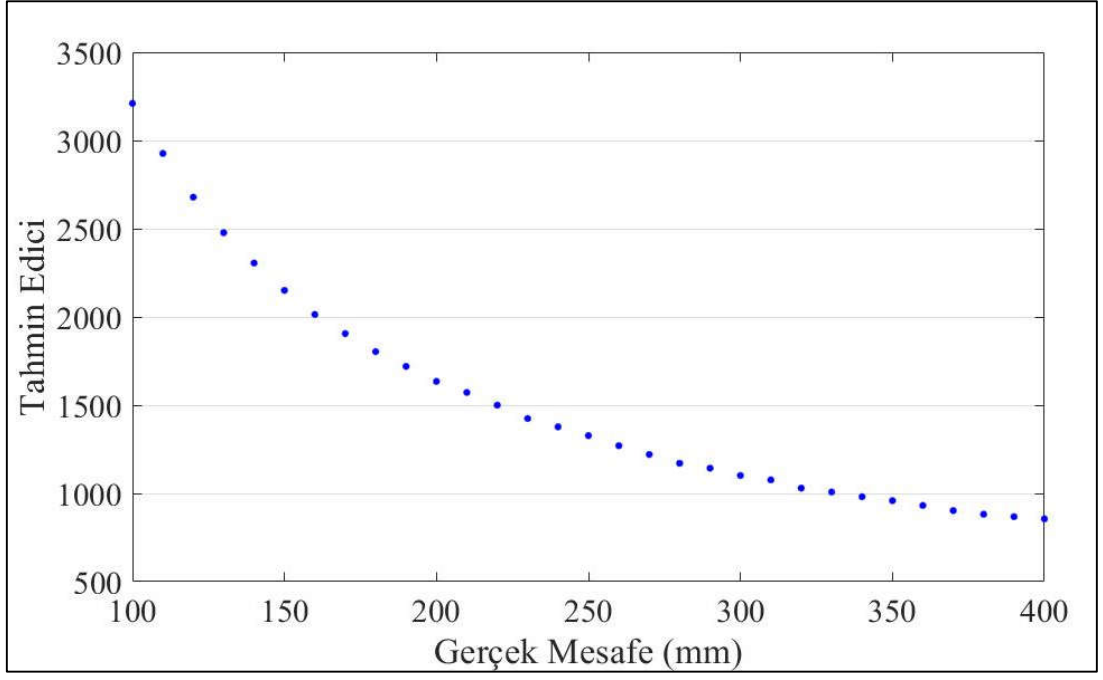
$$x_{tr} = \sin(x) \quad (3.33)$$

Denklem (3.32) ve (3.33)'de örnek olarak verilmiştir. Verinin yapısına göre gerçekleştirilecek çalışmada tercih edilebilir. Tez çalışmasında $k=1$ dönüşümünün yanında iki farklı k değeri daha test edilmiştir. Birinci k değeri üstel modellemede kullanılan β_4 değeridir. İkinci k değeri ise deneysel olarak belirlenen, lineer denklem ile modelle yaparken hataların karelerinin toplamını (SSE) en az veren değerdir. SSE

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2 \quad (3.34)$$

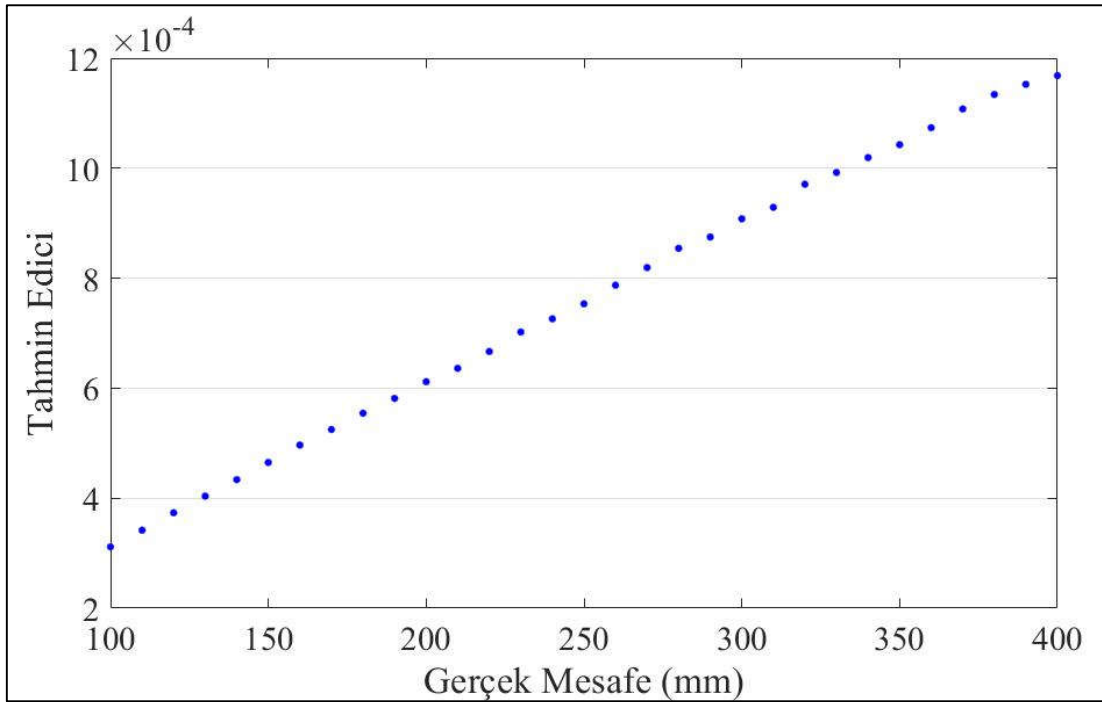
denklem (3.34) kullanılarak bulunabilir. Burada y seçilen denklem modeli ile yapılan mesafe tahmin sonucunu, d ise referans ölçü aleti ile yapılan ölçümü ifade etmektedir.

Değişken dönüşümü için kullanılan ikinci k değerinin belirlenmesi için çok sayıda modelleme yapılması ve SSE değerinin hesaplanması gerekmektedir. MATLAB'in egri uydurma aracı kullanılarak bu işlem hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca SSE hatasının en küçük değerinin elde edildiği dönüşüm değerine yaklaşırken SSE azaldığı ve uzaklaşırken SSE arttığından dolayı k değerini bulmak için yapılan denemeler sistematik olarak yapılabilmektedir.



Şekil 3.7: Gerçek mesafeye bağlı sensör çıkışı değişimi ³.

³ X eksenini referans cetveli ile ölçülen gerçek mesafeyi ifade etmektedir. Y eksenini ardışık kızılötesi sensör çıkışının ortalaması alınarak elde edilen tahmin edici değişkeni göstermektedir. Kızılötesi sensörün analog çıkış gerilimi 0-3.3 V arasında 12 bit (0-4096) çözünürlükte ölçüm yapabilen ADC'nin çıkışında görülen değerdir.



Şekil 3.8: Saçılım diyagramı 2 ⁴.

3.2.4. Dayanıklı Modelleme

Bilindiği gibi LSM en eski, en bilindik ve en yaygın kullanılan model parametre belirleme metodudur. Bu metotta, her bir tahmin edici için elde edilen tahmin hatasının karesinin toplamını minimum yapacak model parametreleri elde edilir. LSM yönteminde hata belirleme fonksiyonu

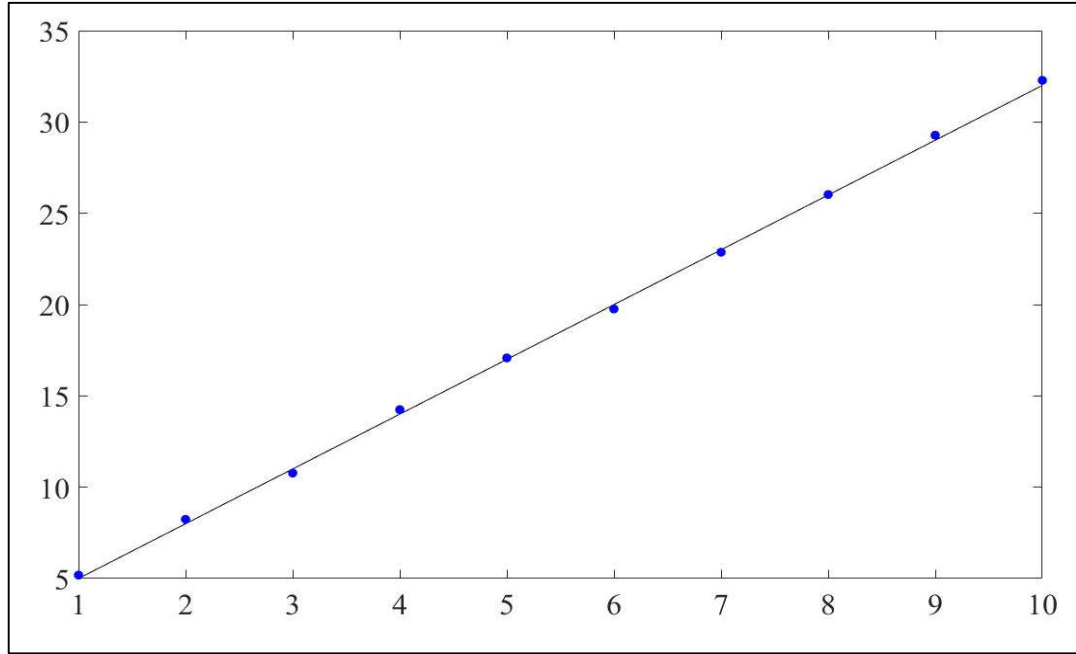
$$S() = \text{Minimum} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3.35)$$

$$r = y_i - d_i \quad (3.36)$$

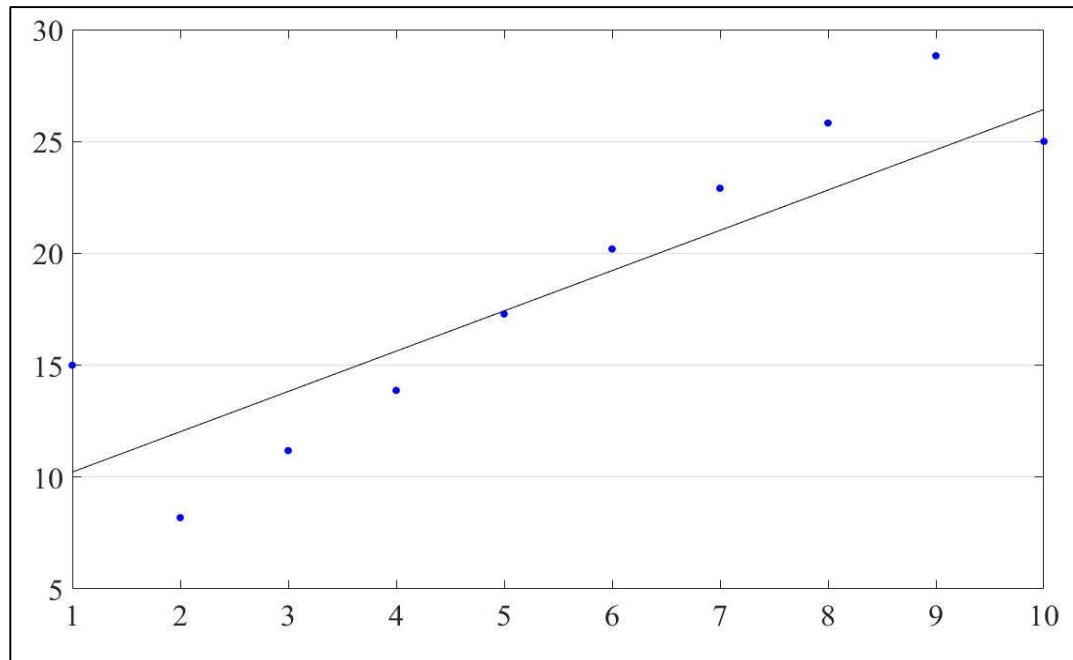
Denklem (3.35) ve (3.36) gösterilmiştir. Burada d_i gerçek mesafeyi, y_i ise mesafe tahminini ifade etmektedir. Ancak LSM yönteminde hataların kareleri alındığı için hata oranı büyük olan değerler, parametrelerin belirlenmesinde daha etkili olurlar. Tahmin edicilerde bulunan aykırı değerlerin de hata miktarı yüksektir. LSM'ye göre

⁴ X eksenini Referans cetveli ile ölçülen gerçek mesafeyi ifade etmektedir. Y eksenini ardışık kızılötesi sensör çıkışının ortalaması alınarak elde edilen tahmin edici değişkene $1/x$ dönüşümü uygulandıktan sonraki değerlerdir.

model parametre hesaplamada yüksek hatanın da karesi alınacağı için aykırı değerler model parametrelerinde büyük sapmalara neden olabilir. Şekil 3.9 ve 3.10’de aykırı değerlerin LSM ile modellemeye olan etkisi görülmektedir.



Şekil 3.9: LSM ile modelleme.

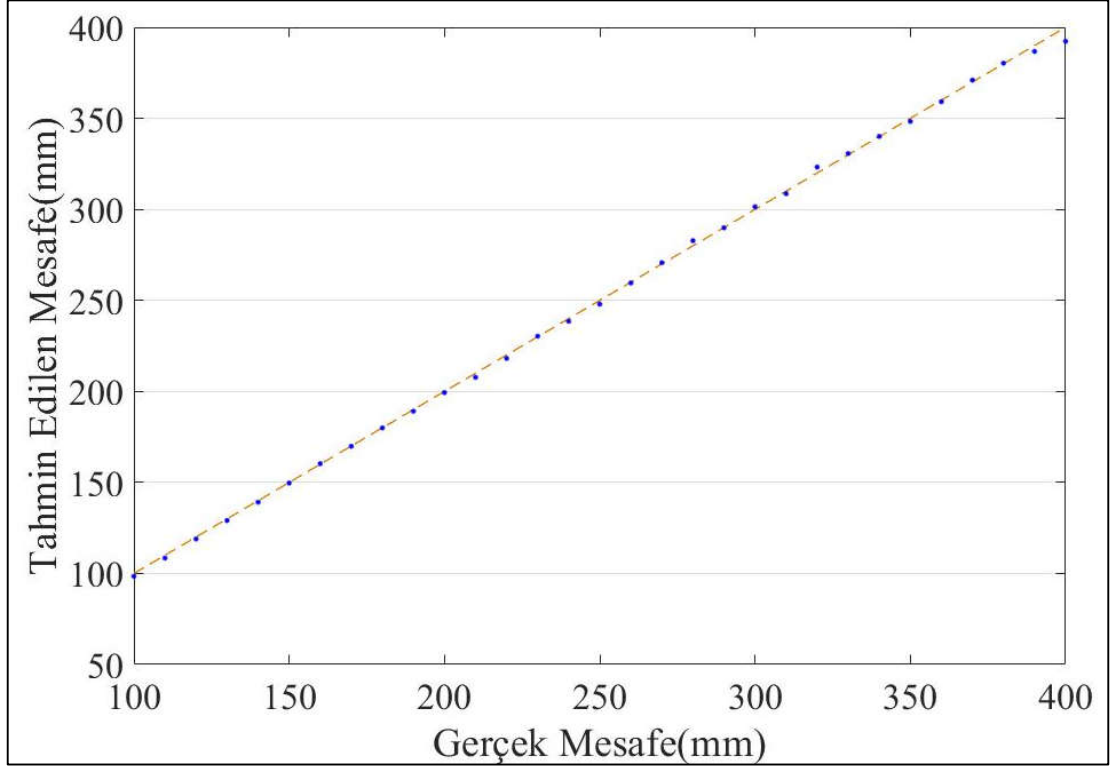


Şekil 3.10: Aykırı değer olması durumunda LSM ile modelleme.

Şekil 3.9’de verilerde aykırı değer olmadığı durumda LSM yöntemi ile elde edilen eğri, Şekil 3.10’de ise 10 adet modelleme verisinden ikisi aykırı değer ile değiştirilmesinden sonra elde edilen modelin eğrisi görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere aykırı değerlerin model parametrelerine etkisi büyüktür ve elde edilmesi gereken eğrinin eğimini ciddi oranda değiştirmiştir. Sonuç olarak LSM yöntemi çok yaygın ve kullanışlı bir yöntem olmasına rağmen, tahmin edici değerlerde bulunan aykırı değerlerden aşırı etkilenmekte ve elde edilen modelin doğruluğu azalmaktadır. Kızılötesi sensör ile mesafe ölçümünü düşündüğümüzde, LSM ile model parametre tahmininde mesafe ölçüm doğruluğunu azalacaktır. Çünkü mesafe ölçümünde kullanılan kızılötesi sensör verileri ciddi oranda aykırı değer, gürültü vb. bozucu etkileri içermektedir. Her ne kadar sensör verileri filtre yardımı ile aykırı değerlerden temizlenmiş olsa, yoğun gürültü, aykırı değer içeren ekonomik bir sensör seçildiği için, gelen verilerin sağlıklı olabileceği ihtimalide düşünülerek model parametre belirlenmesi yapılmalıdır. Ayrıca sensör verileri kullanılarak elde edilen tahmin edicilerde aykırı değerler olup olmadığını belirlemek amacıyla, veriler görselleştirilmiştir. Şekil 3.11’de ideal ölçüm eğrisi ve sensör verilerinin bu eğriye yerleşimi görülmektedir. Görüldüğü üzere birçok tahmin edici sensör verisi bu eğri üzerinde ve yakınında olmasına rağmen, özellikle 390 mm ve 400 mm deki tahmin hataları diğer verilere göre daha fazladır. 390 mm ve 400 mm deki tahmin hatalarının etkisinin çok olmadığı düşünülebilir ancak, bu tez çalışmasının amacı olan mümkün olan en iyi iyileştirme düzeyine ulaşabilmek olduğu için, ölçüm tahmin doğruluğu ve hassasiyetini arttırmaya az veya çok katkısı olacak her adım dikkate alınmıştır. Ayrıca önerilen prosedürün farklı sensör ve çalışmalar için de etkili olabilmesi için dayanıklı modelleme adımı gereklidir.

Özetle gürültü ve çeşitli bozucu sebeplerden kaynaklı sensör verilerinde anormallikler oluşmaktadır. Bu anormalliklerden kaynaklı bozucu etkili en aza indirmek için dayanıklı modelleme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerin en temel çalışma prensibi belirlenen bir tolerans aralığı dışındaki aykırı değerlerin etkisini azaltmak veya tamamen göz ardı etmek üzerine kuruludur. Böylelikle aykırı değerlerin etkileri en aza indirilmiş olur. Diğer yandan eğer verilerde aykırı değerler yoksa ve veriler gauss olarak dağılmış ise, dayanıklı model tahmin etme yöntemleri, LSM’ye yakın performansta model parametre tahmini yapabilmektedir. Tez de dayanıklı modelleme yöntemlerinden en küçük kırılmış

kareler yöntemi (LTS), en küçük ortanca kareler (LMS), S Modelleme, MM Modelleme yöntemleri test edilmiş ve LSM ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.11: Mesafe tahmin ile gerçek mesafe arası ilişki.

LTS yönteminde aykırı değerlerden daha az etkilenen bir model tahmini yapabilmek için

$$S(\) = \text{Minimum} \sum_{i=1}^h r_i^2 \quad (3.37)$$

denklem (3.37) yardımıyla model parametreleri belirlenir. LTS, denklem (3.35) 'de belirtilen LSM ile karşılaştırıldığında denklemde n parametresi yerine h parametresinin kullanılmasıdır. Bilindiği gibi n parametresi sensörden alınan tüm veri sayısını ifade etmektedir. h ise n adet veri içerisinde modelleme için kullanılacak veri sayısını ifade etmektedir. Burada amaç h parametresi yardımıyla aykırı değerlerin elimine edilmesidir. Aykırı değerleri belirlemek için hataların karesi alınır ve en küçük h tanesi model parametresi hesaplamada kullanılır. h parametresi

$$\frac{n}{2} < h < n \quad (3.38)$$

denklem (3.38)'de gösterilen aralıkta belirlenir. Denklemde $h = n$ seçilirse LSM metodu ile aynı değerler elde edilir. Bu yüzden aykırı değerlerin yoğunluğuna bağlı olarak uygun bir h değeri seçilmelidir [54].

LMS yönteminde ise hataların karelerinin toplamı minimize edilmek yerine ortanca hata değerinin karesi minimize edilir. Böylelikle hesaplama tahmin hatalarının en yüksek olduğu değerlerin etkileri azaltılmış olur. LMS yöntemiyle model parametre tahmini

$$S(\) = \text{Minimum}(\text{Ortanca } r_i^2), \quad i = 1 \dots h \quad (3.39)$$

denklem (3.39)'de gösterilmiştir. LMS ile parametre tahmininde de LTS'de kullanılan h parametresi seçilir. Ancak h parametre yardımıyla hataların karesinin toplamını minimum yapacak h adet sensör verisi yerine hataların karesinin ortancasının minimum yapacak h adet sensör verisi seçilir.

S modelleme ise hatanın tespiti için Tukey, Hampel ve Huber vb. fonksiyonları kullanır. Bu fonksiyonlar yardımıyla elde edilen değerleri minimize edecek parametreler hesaplanır. S modelleme ile parametre hesaplaması

$$S() = \min S_p(r) \quad (3.40)$$

$$r = \sum_{i=1}^n S_p \left(\frac{d_i - y_i}{\sigma_s} \right) \quad (3.41)$$

denklem (3.40)'de gösterilmiştir. S modelleme tekrarlı bir model parametre hesaplama yöntemidir ve denklem (3.41)' belirlen σ_s parametresi bulunması başlangıç koşullarında

$$\hat{\sigma}_s = \frac{\text{ortanca}(e_i - \text{ortanca}(e))}{0.6745} \quad (3.42)$$

denklem (3.42)'de gösterildiği gibi, tekrarlar da ise

$$\hat{\sigma}_s = \sqrt{\frac{1}{nL} \sum_{i=1}^n w_i e_i^2} \quad (3.43)$$

denklem (3.43)'de gösterildiği gibi bulunur. Burada e_i 'nin r_i 'ye eşit olmadığına dikkat edilmelidir. Denklem (3.43)'de $L=0.199$ 'dir. e 'nin hesaplanması

$$e_i = d_i - y_i = r_i \sigma_s \quad (3.44)$$

denklem (3.44)'de gösterilmiştir. w_i parametresinin bulunması denklem (3.46)'de belirtilmiştir. S_p 'yi

$$S_p(r_i) = \begin{cases} \frac{r_i^2}{2} - \frac{r_i^4}{2c^2} + \frac{r_i^6}{6c^4}, & |r_i| \leq c \\ \frac{c^2}{6} & |r_i| > c \end{cases} \quad (3.45)$$

denklem (3.45)'te gösterilen Tukey fonksiyonu seçersek, bu durumda denklem (3.43)'de belirtilen w_i 'yi hesaplamak için kullanılan ağırlık matrisi

$$w_i = \begin{cases} [1 - (\frac{r_i}{1.547})^2]^2, & |r_i| \leq 1.547 \\ 0, & |r_i| > 1.547 \end{cases} \quad (3.46)$$

denklem (3.46)'daki gibi olur. β model parametrelerini bulmak için $S()$ 'in türevini alıp sıfıra eşitlersek

$$\sum_{i=1}^n x_i S_p(r_i) = 0 \quad (3.47)$$

bulunur. Denklem(3.47)'in çözümü için Drapper and Smith önerdiği w_i 'yi kullanır ve denklem (3.47)'i yeniden düzenlersek,

$$\sum_{i=0}^n x_i w_i (d_i - x_i \beta) = 0 \quad (3.48)$$

elde edilir. Denklem (3.48)' tekrarlı ağırlıklı en küçük kareler metodu ile çözülebilir. Ancak bu metodun kullanılabilmesi için başlangıç parametreleri β_0 ve σ_s gereklidir. β_0 başlangıç koşulu için denklemin en küçük kareler metodu ile çözülmesi ile, σ_s ise denklem (3.42) kullanılarak bulunabilir. Başlangıç parametreleri bulup, denklem (3.48)'da yerine koyar ve β 'yı çekersek matris formda

$$\beta = (XW_i X)^{-1} (XW_i D) \quad (3.49)$$

denklem (3.49) elde edilir. Ayrıca önceden de bahsedildiği gibi S modelleme tekrarlı bir metottur, bu yüzden β parametreleri, bir önceki değeri ile arasında fark belirli bir değere ulaşana kadar hesaplanır [55].

MM modelleme ile parametre tahmini, S modelleme ve M modellemenin birleşimidir. MM Modellemede S modellemede olduğu gibi ilk başta,

- LSM method ile başlangıç parametreleri hesaplanır.
- e_i , σ_i ve r_i S modellemede belirtildiği gibi hesaplanır.
- Bu adımdan sonraki hesaplamalar M modellemeye göre devam edilir.
- w_i ağırlık matrisi denklem (3.50)' göre bulunur.

$$w_i = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{r_i}{4.685} \right)^2 \right]^2, & |r_i| \leq 4.685 \\ 0, & |r_i| > 4.685 \end{cases} \quad (3.50)$$

- Denklem (3.49) kullanılarak β parametreleri belirlenir.
- MM modellemede S modelleme ve M modelleme gibi tekrarlı bir metottur. Bu yüzden MM modellemede de adımlar β parametreleri, bir önceki değeri ile arasında fark belirli bir değere ulaşana kadar hesaplanır. [55].

3.2.5. Tahmin Edici Seçimi

Yanıt değişkeninin, yani tahmin edilen değerin bulunabilmesi için gözlemler kullanılarak hesaplanmış yeni bir değerin (tahmin edici) modele verilmesi gerekir. Bu çalışmada da kızılötesi sensör verisi ile mesafe tahmini yapabilmek için, sensörden alınan veri kullanılarak elde edilen tahmin edicinin modelde işlenmesi gerekmektedir. Tahmin edici değer, geçmiş çalışmalarda tek bir sensör verisi kullanılarak elde edildiği gibi, yüz ardışık sensör verisinin ortalaması alınarak da bulunmuştur. Ayrıca yapılacak analizin, sensörün özelliklerine göre ardışık bir grup verinin ortancası, en yüksek değeri, en düşük değeri vb. değerlerde tahmin edici olarak kullanılabilir. Burada amaç elde edilen tahminin, bulunmak istenilen değere en yakın değer olmasıdır. Tez çalışmasında da geçmiş çalışmalar dikkate alınarak 3 farklı tahmin edici test edilmiştir. Ancak tek bir sensör verisinin tahmin edici olarak kullanılması test dahi edilmemiştir. Çünkü Şekil 3.3'ten de görülebileceği gibi ardışık sensör verilerindeki dalgalanma çok fazladır, bu yüzden tek bir sensör verisinin, istenilen amaca ulaşmak için gerekli sonucu vermeyeceği aşikârdır. Tez çalışmasında ilk test edilen yöntem ardışık sensör verilerinin ortalama değerin tahmin edici olarak kullanmaktır. Çünkü aykırı değerler filtrelendikten sonra kızılötesi sensörün ardışık okumaları yaklaşık gauss dağılmaktadır ve verilerin gauss olarak dağıldığı varsayımı ile belli bir sayıda ardışık sensör verisinin ortalamasının tahmin edici olarak kullanımı tercih edilen bir yöntemdir [42]. İkinci test edilen tahmin edici hesaplama yöntemi ise denklem (3.52)'de gösterilen sensör verisinin ortancasının kullanılmasıdır. Bilindiği gibi aykırı değerlerin, ortalama üzerinde etkisi fazladır. Ancak ortanca değerin aykırı değere daha dayanıklı olduğu bilinmektedir [56]. Bu yüzden tez çalışmasında ikinci olarak, ortanca değer tahmin edici seçilmiştir. Üçüncü olarak, Kalman filtresi tahmin edici olarak kullanılmıştır. Çünkü Kalman filtresi gürültülü verilerle dahi iyi sonuçlar verdiği kanıtlamış tahmin edici bir filtredir. Çalışma kapsamında kullanılan tahmin edici değerlerin bulunması aşağıda gösterilmiştir. Ortanca tahmin edici

$$\hat{x}_{ortalama} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.51)$$

denklem (3.51) yardımıyla hesaplanabilir. Burada n toplam eleman sayısı, x_i ise ardışık sensör okumalarıdır. ortanca değerin bulunabilmesi için ilk olarak veriler büyükten küçüğe sıralanmalıdır, daha sonra

$$\hat{x}_{ortanca} = x_i, \quad i \in N \text{ ve } i \approx \frac{(n+1)}{2} \quad (3.52)$$

Denklem (3.52) kullanılarak ortanca tahmin edici bulunur. Kalman tahmin edici ise

$$x_{kalman} = K_k \cdot x_k + (1 - K_k) \cdot x_{kalman(k-1)} \quad (3.53)$$

Denklem (3.53) ile hesaplanır. Denklemde K_k Kalman kazancı, x_{k-1} tahmin edilen bir önceki değerdir. Denklem (3.53)'i kullanarak Kalman filtresi ile tahmin ediciyi hesaplamak için

$$K_k = P_k \cdot (P_k + R)^{-1} \quad (3.54)$$

$$P_k = (1 - K_k) \cdot P_{k-1} \quad (3.55)$$

K_k değeri denklem (3.54) ile bulunur. Burada R değeri sensör verilerinin standart sapmasıdır. Denklem (3.53) ve (3.55)'dan ilk başta hesaplanabilmesi için $x_{Kalman(0)}$ ve P_0 değerlerin ihtiyaç vardır. Bu değerler kullanıcı tarafında belirlenir ve genellikle

$$P_0 = 1 \text{ ve } x_{Kalman(0)} = 0 \quad (3.56)$$

seçilir. Kalman filtresinde k tekrar sayısını belirtmektedir. Kalman filtresi tahmin edicisinde ortanca ve ortalama tahmin edicide olduğu gibi tüm değerlerin kullanılmasına gerek yoktur. k değeri, $k < n$ olmak üzere önceden belirlenebilir veya denklem (3.57)'de belirtilen koşul sağlanana kadar iterasyon devam ettirilir.

$$e > x_{Kalman} - x_{Kalman(k-1)} \quad (3.57)$$

e tasarımcı tarafında önceden belirlenen hata değeridir.

Ayrıca, önceki bölümlerde bahsedildiği gibi doğru bir modelleme yapabilmek için gözlemler, aykırı değerlerden filtrelendikten sonra model parametreleri tahmin edilmiştir. Bir diğer değişle model parametreleri hesaplanırken aykırı değerleri filtrelenmiş veriler ile hesaplanan tahmin ediciler kullanılmıştır. Aynı şekilde gerçek zamanlı testler de yapılırken, veriler önce filtrelenmeli, daha sonra tahmin ediciler hesaplanmalıdır.

3.2.6. Veri Tümleştirme

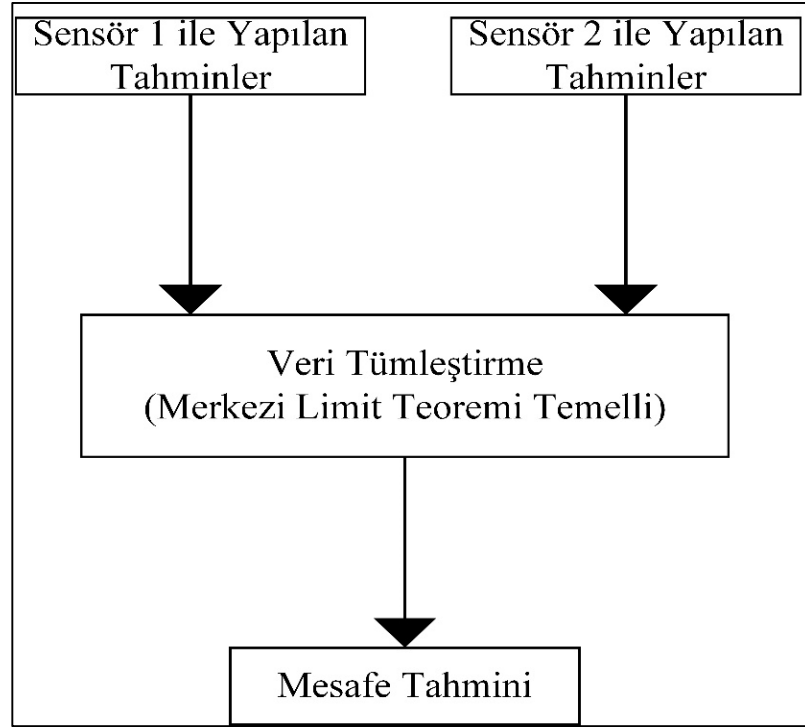
Tek bir sensör kullanılarak yapılan doğruluk ve hassasiyet artırımına yönelik çalışmalar ile elde edilen performans her uygulama için yeterli olmayabilir. Ancak birden fazla sensör kullanılarak, veri sayısı iki katına çıkacağı için, bir sensörle yapılandan daha doğru, daha hassas ve tekrarlanabilirliği daha yüksek tahminler elde edilebilir. Ayrıca bozucu etkilerin tahminler üzerindeki etkisi de azaltılabilir. Örneğin kullanılan sensörün biri çevresel kaynaklı bir gürültüden etkilenirken, diğer sensör bu bozucu etkiye maruz kalmıyorsa, genel tahmin doğruluğu artacaktır. Öte yandan hız kaygıları da birden fazla sensör kullanımı ile çözülebilir. Örneğin bu çalışmada da kullanılan bir yöntem olan tahmin ediciyi ortalama değer ile hesaplama ihtiyacına karşın veri tümleştirme hızlandırıcı bir rol üstlenebilir. Yeterli hassasiyette bir ölçüm yapmak için gerekli sensör verisini almak için geçen süre fazla ise, aynı sayıda sensör verisi, paralel sensörlerden birlikte alınıp, ölçüm için gerekli süre sensör sayısı kadar azaltılabilir. Ayrıca veri tümleştirme sensörlerin zayıf yönlerinin de elimine edilmesinde kullanılabilir. Yakın mesafe ölçüm performansı kötü, ancak uzun mesafelerde daha iyi ölçümler yapan bir sensörün kısa mesafe ölçümlerindeki dezavantajı, kısa mesafelerde daha iyi ölçüm yapabilen bir sensör ile birlikte kullanılarak hem kısa ve uzun mesafelerde iyi ölçümler yapabilen bir sistem elde edilebilir.

Özetle veri tümleştirme, sensör sınırlamaları, dolaylı ölçüm, dağıtılmış sensör gerekliliği, hassasiyet ve doğruluk endişesi için kullanılan yaygın bir yaklaşımdır. Veri tümleştirme yaklaşımının farklı varyasyonları literatürde mevcuttur [25, 40, 57]. Tez kapsamında bir boyutlu mesafe ölçümünde daha hassas ve doğru ölçümler elde etmek için kullanılacaktır. Bu amaçla iki adet aynı özellikte kızılötesi sensör kullanılmıştır. 3 farklı veri tümleştirme yöntemi test edilmiştir. İlk test edilen yöntem merkezi limit teoremini

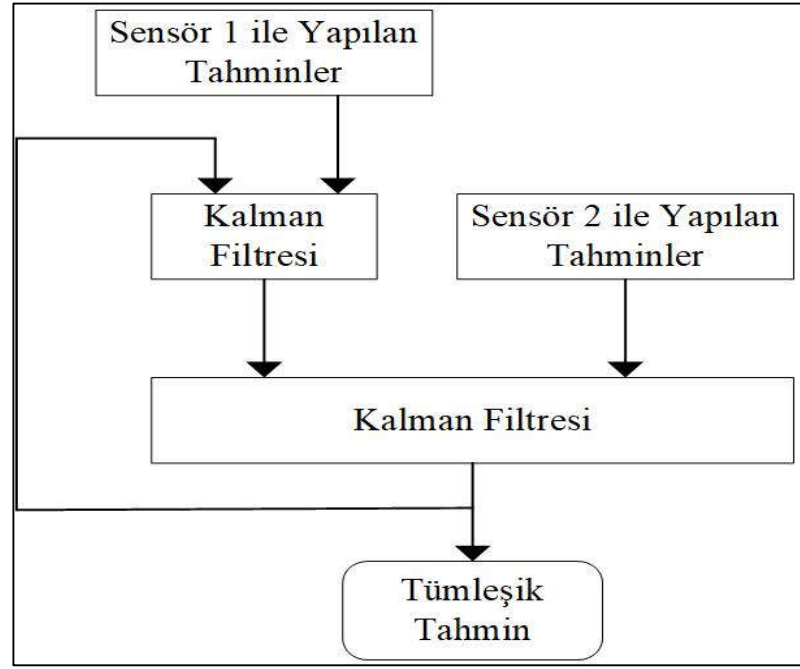
“ortalamanın örnekleme dağılımının, örneklem büyüklüğü arttıkça normal bir dağılıma yaklaştığını belirtir.”

temel almaktadır [58]. Bu teorem özellikle 30 ve üzeri veri için geçerlidir. Bu yöntemde her bir sensör mesafeyi ayrı ayrı ölçmekte ve bu ölçümler daha sonra merkezi limit teoremine göre Şekil 3.12’de gösterildiği gibi tümleştirilmektedir.

İkinci kullanılan yöntem ise sensör verilerinin Kalman filtresiyle birleştirilmesidir. Kalman filtresi, tümleştirilen her yeni sensör verisinin sonuçlarının görülebileceği tekrarlı bir metottur. Şekil 3.13’de bu çalışmada kullanılan Kalman filtresi ile veri tümleştirme akışı gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Veri tümleştirme yöntemi 1.



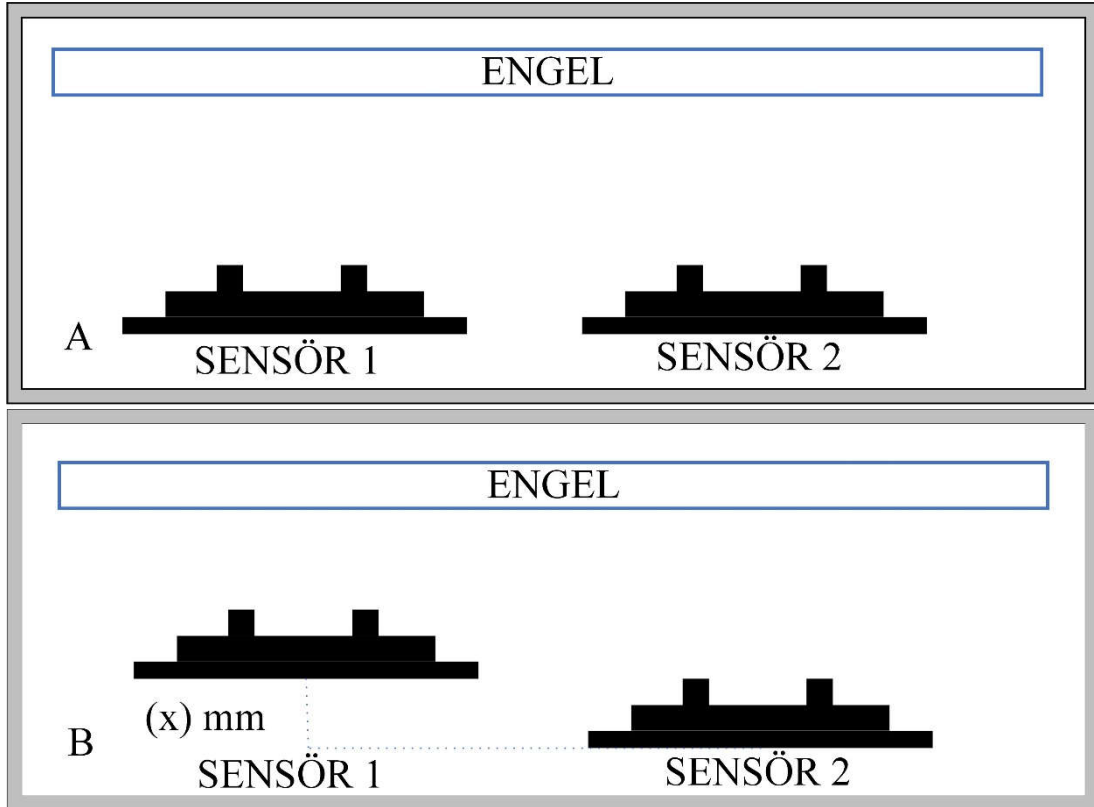
Şekil 3.13: Veri tümleştirme yöntemi 2.

Tez kapsamında kullanılan son yöntem ise sensör verilerinin çoklu parametrelili regresyon modelleme ile birleştirilmesidir. Bu yöntemde, her bir sensör verisi ayrı bir değişken gibi düşünülerek, her mesafe bölgesi için uygun ağırlık verilerek parametrelerin elde edilmesine imkân sağlayan bir yöntemdir. İki sensör için kullanılan çoklu parametrelili regresyon modeli

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (3.58)$$

denklem (3.58)'de gösterilmiştir. Bu çalışmada son olarak da yeni önerilen veri tümleştirme yöntemi test edilmiştir. Önerilen yöntem, Gageik ve ekibinin çalışmalarında kullandıkları ağırlık filtresini temel alınarak tasarlanmıştır. İlgili çalışmada ağırlıklı filtre mesafe ölçümünde kullanılan çeşitli sensörlerden hangisinin ölçülmek istenen mesafede kullanılması gerektiğini belirlemektedir. Örneğin yakın mesafede hassas ve doğru ölçen bir sensör (sensör 1) ile uzak mesafeleri hassas ve doğru ölçebilen bir sensör (sensör 2) verileri, ağırlıklı filtre ile tümleştirildiğinde, yakın mesafelerde bir ölçüm yapıldığında, sensör 1'in verilerinin kullanılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada ise ağırlıklı filtre her bir cm'lik mesafede hangi sensör

verisinin ne kadar katkı sağlayacağı bilgisini barındırmaktadır. Ölçülmek istenen mesafe içinde sensörleri ağırlıkları oranında tümleştirmektedir. Çünkü yapılan testlerde görülmüştür ki, kızılötesi sensörün belirli mesafelerde ölçüm doğruluğu azalmaktadır. Bunu her zaman yakın veya uzak mesafe olarak da ayırmak mümkün değildir. Kullandığımız sensör modülünün, kızılötesi ışığın doğasından, kullanılan sensör ve alıcının yapısından, modülünün devre yapısından kaynaklı bir hata paterni vardır. Bu yüzden testi yapılan her bir mesafe için sensörün genel hata oranı hesaplanmıştır. Bu oranla ters orantılı olarak da sensör verileri tümleştirilmiştir. Daha açık ifade ile testlerde ölçülmek istenen mesafede hata oranı çok olan sensör az etkili olurken, hata oranı az olan sensör çok etkili olmaktadır. Ayrıca aynı özelliklere sahip iki sensör kullanıldığında, her ikisinin de hata miktarının az veya fazla olduğu mesafelerin benzer olması beklenir. Bu çalışmada da beklenildiği gibi oldu ancak bu durum sensörlerin Şekil 3.14B’de gösterildiği gibi yerleştirilmesi ile çözüldü. Mesafeye bağlı olarak kullanılan sensörün hata paterninin çıkarılması ve bu paterne bağlı elde edilen ağırlık matrisi ile Şekil 3.14B’deki yerleşim yardımıyla sensör verileri mesafe ölçüm performansını arttıracak şekilde tümleştirilmiştir.



Şekil 3.14: Engel yerleşimi.

3.3. Mesafe Ölçüm Performans Karşılaştırılmasında Kullanılan Prosedürler

Kızılötesi sensör ölçümü ile ilgili genel kabul görmüş bir ölçüm prosedürü veya hesaplamalarda kullanılacak standart bir formülasyon yoktur. Bunun en temel sebebi kızılötesi sensörler ile yapılan ölçümlerde engelden yansıyan kızılötesi ışık miktarının kullanılması ve yansıyan ışık miktarının engelin rengine ve kullanılan materyale bağlı olarak değişmesidir. Aynı zamanda gönderilen kızılötesi ışık miktarı ve alıcı sensörün kalitesi de sensörden alınan ışık miktarını etkilemektedir. Dolayısıyla her bir çalışma ve sensör için ayrı bir model oluşturulması gerektiğinden dolayı, her ölçümün kendine has bir formülasyonu vardır. Bu yüzden referans mesafe tahmin sonuçları, literatürde kızılötesi sensörler ile yapılmış çalışmalardaki prosedürlerin, bu çalışmada kullanılan sensör ve deney düzeneği ile tekrarlanması ile sağlanmıştır. Bu amaçla literatürdeki iki çalışmada kullanılan prosedürler [30, 39] baz alınarak, çalışmalarda gerçekleştirilen prosedürler ile tez çalışmasında kullanılan kızılötesi sensör modülünün mesafe ölçüm performansı belirlenmiştir. İlk baz alınan çalışmada;

- Kızılötesi sensör verilerine herhangi bir dönüşüm uygulanmamıştır,
- Sensör verileri ile mesafe arasındaki ilişki uygun bir model seçilerek modellenmeye çalışılmıştır.
- 5 adet sensör verisinin ortalaması alınarak tahmin yapılmıştır.

Yukarıdaki iki maddeye göre yapılan modelleme bundan sonra mesafe tahmin prosedürü 1 olarak anılacaktır. Karşılaştırılmalı teste kullanılan ikinci çalışma da ise;

- Kızılötesi sensör verileri dönüşüm uygulanarak aradaki ilişki duygusallaştırılmaya çalışılmıştır.
- Sensör verileri ile mesafe arasındaki ilişki uygun bir model seçilerek modellenmeye çalışılmıştır.
- 5 adet sensör verisinin ortalaması alınarak tahmin yapılmıştır.

Bu prosedür de bundan sonra tez çalışmasında mesafe tahmin prosedürü 2 olarak anılacaktır.

Bahsi geçen iki çalışmada da tahmin edici değerin nasıl hesaplandığı belirtilmemiştir. Bu yüzden tek bir sensör verisinin tahmin edici olarak kullanıldığı varsayılmaktadır. Ancak Şekil 3.3'den de görülebileceği üzere ardışık sensör verilerinin kararlılığı düşüktür. Bu yüzden karşılaştırılmalı testlerde tek bir sensör verisi kullanıldığında, testlerdeki ölçüm doğruluğu ve hassasiyeti çok düşük olacağından 5 adet sensör verisinin ortalaması kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan karşılaştırmada kullanılan çalışmalarda tek bir sensör verisinin kullanılıyor olmasından dolayı, ilgili çalışmada kullanılan sensörün hassasiyetinin yüksek olduğu düşünülebilir ancak mesafe tahmin prosedürü 2'de tez çalışmasında kullanılan sensörün aynısı kullanılmıştır. Yani karşılaştırmalı testlerde kullanılan sensör hassasiyetinin, tezde kullanılan sensörden yüksek değildir [30, 39].

Mesafe Tahmin Prosedürü 1'de sensör verileri ile gerçek mesafe arasındaki ilişki, değişken dönüşümü yapılmadan modellediği için aradaki ilişki denklem (3.30)'da görülen üstel denklem modeli ile modellenenir. Mesafe ölçüm prosedürü 2'de $1/x$ değişken dönüşümü kullanıldığı için aradaki ilişki denklem (3.29)'de görülen lineer denklem modeli ile modellenenir. Ayrıca model parametrelerinin hesaplanmasında, literatürde en yaygın kullanılan LSM yöntemi tercih edilmiştir.

4. TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde tez kapsamında yapılanlar 5 alt başlık altında incelenmiştir. Birinci alt başlıkta önerilen prosedürdeki her bir adımda elde edilen sonuçlar belirtilmiş ve prosedürdeki ayrı ayrı her adımın katkısı sonuçlar üzerinden değerlendirilerek açıklanmıştır. İkinci alt başlıkta önerilen prosedürün tüm adımları kullanıldığında elde edilen sonuçlar belirtilmiş ve referans testlerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Üçüncü alt başlıkta ise sınırlı sayıda sensör verisi olması durumunda önerilen prosedür ile elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Dördüncü alt başlıkta farklı mesafelerde gerçek zamanlı ölçümler yapıp sonuçları belirtilmiştir. Son olarak ise çalışma özetlenerek elde edilen çıktılar belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen testlerde elde edilen sonuçların doğruluk ve hassasiyetinin belirlenmesinde mesafe tahmin sonuçları ve mesafe tahmin hata miktarının yanı sıra çeşitli başka kriterle kullanılmıştır. İlk kriter genel olarak hata miktarını ve modelleme eğrisinin aradaki ilişkiyi ne kadar iyi ifade ettiğinin tespitinde yaygın olarak kullanılan hataların karelerinin toplamı (SSE)'dir. SSE'nin yanı sıra, bu çalışmanın karakteristiğine uygun mesafe tahmin performansının tespiti için kriterler belirlenmiştir. Bunlar hataların mutlak değerlerinin toplamı (SAE) ve ortalama mutlak hata (AE) kriterleridir.

Mesafe tahmin performansının belirlenmesinde SAE ve AE kriterlerine de ihtiyaç duyulmuştur çünkü herhangi bir ölçümdeki hata miktarı bir miktar fazla olduğunda, SSE'de hatanın karesi alındığı için toplam hatayı çok yüksek gösterecektir. Buda önerilen yöntem veya metodun performansının tam doğru bir şekilde ifade edilememesine neden olacaktır. SAE ve AE kriterlerin

$$SAE = \sum_{n=1}^{N=31} |e_n| \quad (4.1)$$

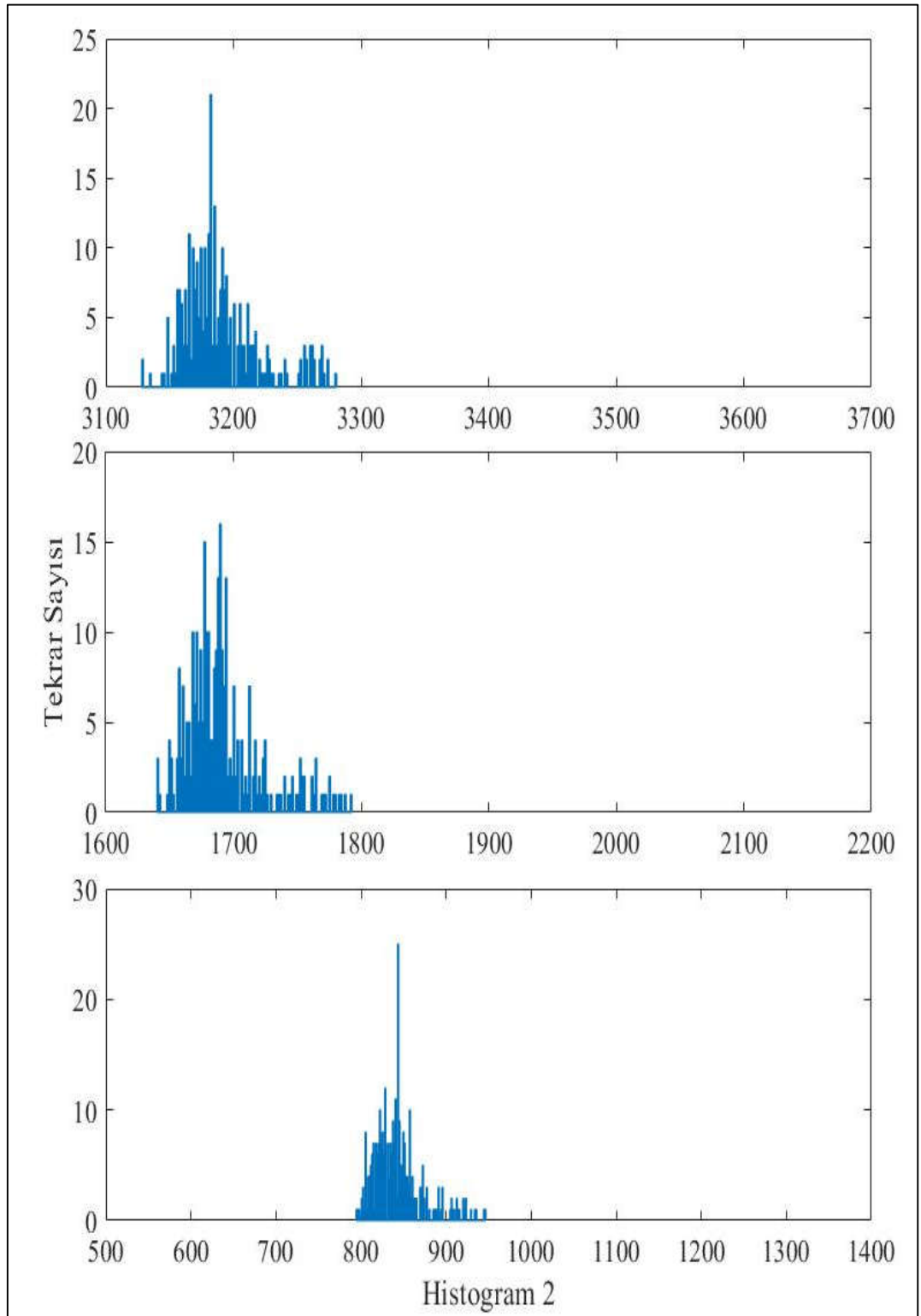
$$AE = \frac{SAE}{N} \quad (4.2)$$

hesaplanması denklem (4.1) ve (4.2)'de belirtilmiştir. Denklem (4.1)'de e_n 10 cm ile 40 cm arasında her bir cm'lik mesafelerdeki ölçüm hatalarıdır.

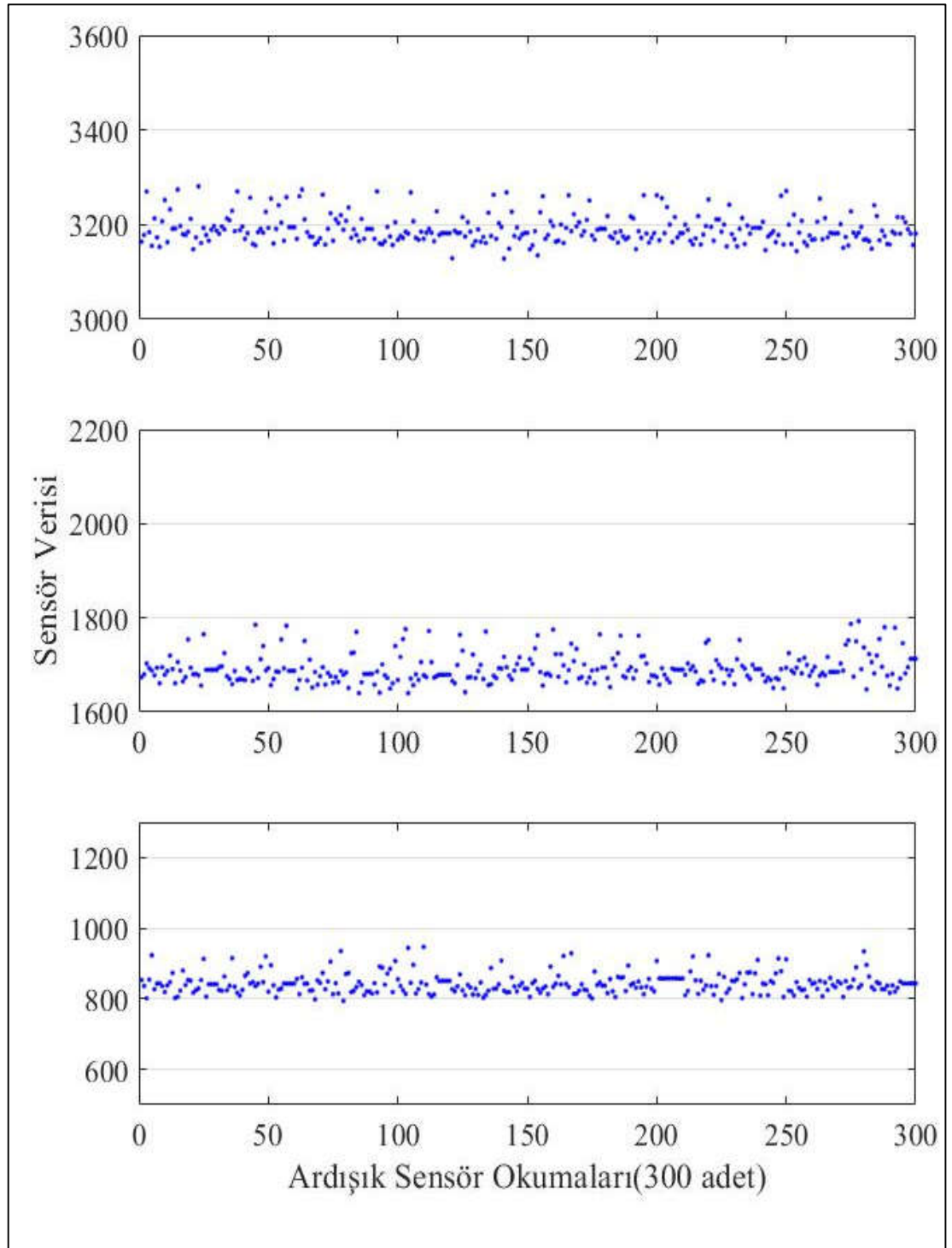
4.1. Önerilen Prosedür Adımları ve Katkısı

Önerilen prosedürdeki ilk adım aykırı değerlerin filtrelenmesidir. Bu bölümde 5 adet aykırı değer filtresi analiz edilmiştir. Test edilen aykırı değer filtrelerinin detayı bölüm 3.2.1’de belirtilmiştir. Test edilen dört aykırı değer filtresi geçmiş çalışmalarda uygulanmış ve aykırı değer tespiti konusunda kendi uygulamalarında başarılı sonuçlar elde etmiştir. Tez kapsamında test edilen beşinci aykırı değer filtresi ise geçmiş çalışmalardan yola çıkılarak bu çalışma için yeni tasarlanmıştır. Çünkü aykırı değer tespitinde önemli olan, geçerli uygulamada filtrenin performansdır ve geçmiş çalışmalarda kullanılmış 4 filtre de bu çalışma için yeterli performansı gösterememiştir.

Aykırı değer filtre performansının belirlenmesi her uygulama için farklılıklar barındırabilmektedir. Literatürde aykırı değer filtreleri için performans belirlenmede kullanılan ROC eğri metodu vb. kriterler mevcuttur. Ancak bu metotlar ile filtre performansının tespit edilebilmesi için hangi değerlerin aykırı değer olduğunun net bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca bildiğimiz kadarıyla literatürde, aykırı değerler net bir şekilde bilinmeden filtrenin performansını belirleyen bir kriter bulunmamaktadır. Ardışık kızılötesi sensör verilerini incelediğimizde, Şekil 3.3 ve 2.4’ten de görülebileceği gibi ardışık sensör verilerinin aykırı değer içerdiği açıktır ancak sensör verilerinin hangisinin aykırı değer olduğunun net bir şekilde tespiti mümkün değildir. Bu yüzden tez çalışmasında aykırı değerlerin performansı tespit edilirken SAE kriteri kullanılmıştır. Yani ilgili filtre kullanılırken en doğru ve hassas mesafe tahmini gerçekleştiren filtre, en iyi performans gösteren filtre olarak seçilmiştir. Çünkü aykırı değerlerin tahmin performansını olumsuz etkilediği bilinen bir gerçektir ve aykırı değer içeren verilerde en iyi performansı sağlayan filtreyi aslında en doğru filtrelemeyi yapmış olarak kabul edebiliriz. Bu amaçla aykırı değer filtrelerinin seçiminde kullanılan veriler Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere aykırı değer filtresi 4 en iyi mesafe tahmin performansını vermiştir. Ancak bu filtrenin üçyüz gözlem verilerini filtrelemesi 76 saniye sürmektedir. Bu süre sadece bir mesafe tahmini için kabul edilebilir bir değer değildir. Diğer yandan bu çalışmada önerilen beşinci filtre, aykırı değer filtresi 4 ile benzer bir performans göstermiştir ve üçyüz sensör verisinin filtrelenmesi sadece 2 saniye sürmektedir.



Şekil 4.1: Filtreleme sonrası histogram diyagramı.



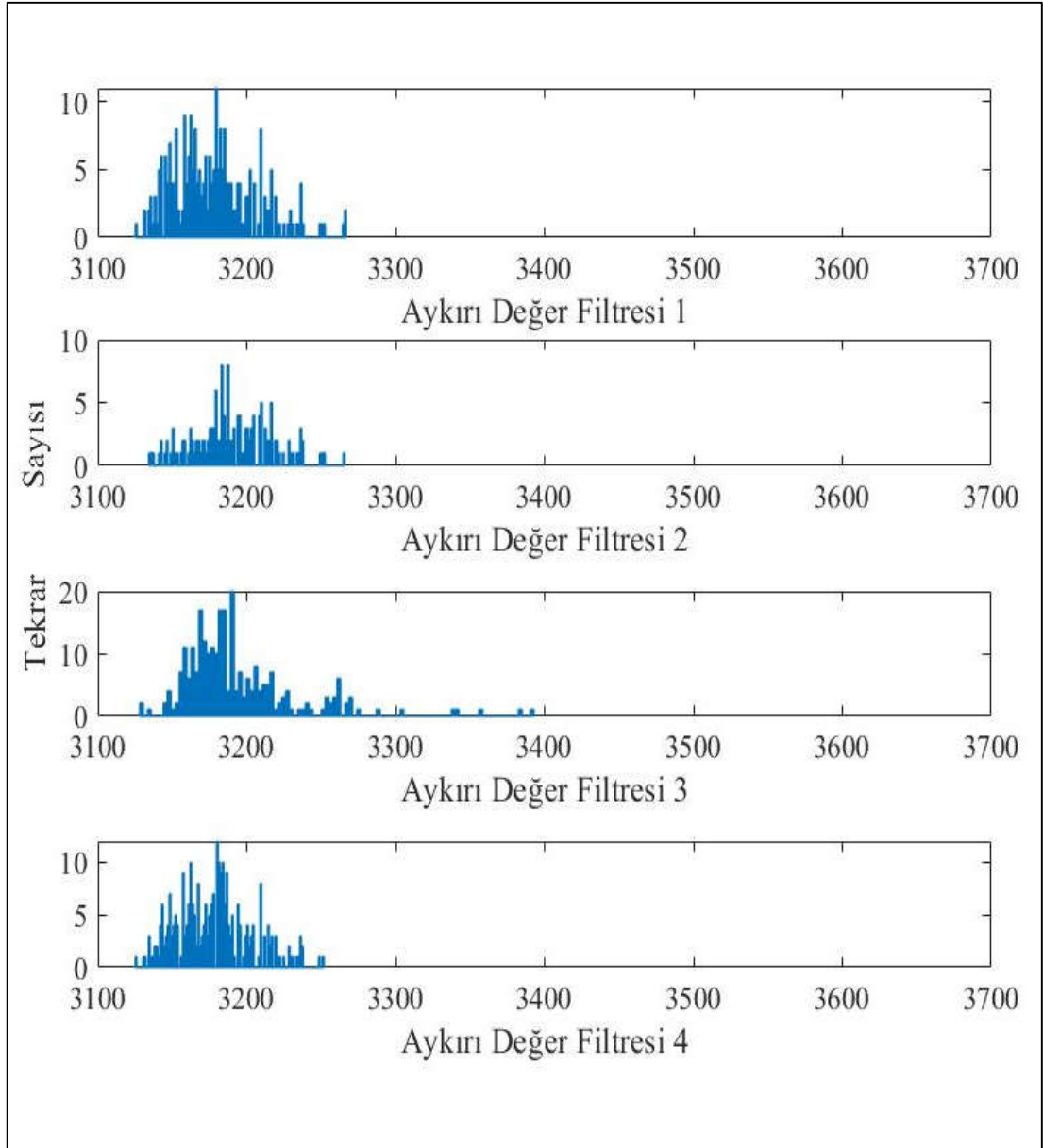
Şekil 4.2: Filtreleme sonrası saçılım grafiği.

Filtreleme sonucu içerisindeki aykırı değerleri temizlenen ardışık sensör verilerinin yaklaşık Gauss olarak dağılması beklenir. Şekil 4.1 ve 4.2’de Şekil 4.3 ve 2.4’te ham hali görülen ardışık sensör verilerinin filtreleme sonrası dağılımı görülmektedir.

Tablo 4.1: Aykırı değer filtrelerinin performansı.

	Test 1 SAE	Test 2 SAE	Test 3 SAE	Ortalama SAE
Aykırı Değer Filtresi 1:	34	41	37	37.3±3.5
Aykırı Değer Filtresi 2	40	48	48	45±4.6
Aykırı Değer Filtresi 3	37	41	38	38.6±2.1
Aykırı Değer Filtresi 4	33	39	36	36±3
Önerilen Aykırı Değer Filtresi	34	38	38	36.6±2.3

Şekil 4.3’de bu çalışmada test edilen 4 aykırı değer filtresi için, filtreleme sonrası histogram diyagramı görülmektedir. Şekil 4.3’de görülebileceği gibi ilgili mesafede üç aykırı değer filtresinin, filtreleme sonucu verilerin yaklaşık gauss olarak dağıldığı görülmektedir. Yani bu filtrelerin aykırı değerleri filtreleme performansının genel olarak iyi olduğu ancak histogramda görülen dağılım da aykırı değer filtresi 3 ile elde edilen veriler gauss dağılıma çokta yakın olmadığı için, ilgili mesafede aykırı değer filtresi 3 için filtrelemenin biraz zayıf kaldığı düşünülebilir. Ancak filtrelerin aykırı değer filtreleme performansı hakkında Şekil 4.3’de bakarak karar vermek tam doğru değildir çünkü filtrenin performansının iyi olduğunu söyleyebilmek için aykırı değerlerin doğru filtrelemesi kadar, aykırı değer olmayan normal verilerin de filtrelenmemesi gerekmektedir. Kullanılan filtrenin anlamlı bilgileri filtrelemesi istenmeyen bir sonuçtur ve nerdeyse her filtre az veya çok anlamlı bilgileri filtreleyebilmektedir. Ancak sağladığı avantajlardan dolayı tercih edilmiştir ve en iyi aykırı değer filtresi performansını, tüm mesafeler dikkate alınarak elde edilen SAE kriteri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden aykırı değer filtrelerinin performansı Tablo 3.1’e bakılarak belirlenmiş ve en iyisi seçilmiştir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 ve 4.3 göz önüne alındığında önerilen filtrenin bu çalışma için uygun olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.3: Filtreleme sonrası histogram diyagramı.

Kızılötesi sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki ilişkinin lineer olmaması modellenmenin daha zor olmasına neden olmaktadır. Öte yandan kızılötesi sensör çıkışı ile gerçek mesafe arasındaki lineer olmayan ilişki üstel denklem modeli kullanılarak modellenebilmektedir. Ancak aradaki ilişki lineerleştirilebiliyorsa, değişken dönüşümü uygulayarak, ilişkiyi lineer denklem modeli ile modellemek, hem görsel olarak verilerin daha iyi değerlendirilebilmesi için, hem de daha genel bir model elde etmek için daha uygundur. Bu yüzden, değişken dönüşümü ile aradaki ilişkiyi lineerleştirmek daha tercih edilen bir yöntemdir. Malheiros ve ekibi [1] ile Benet ve

ekibide [2], çalışmalarında kızılötesi sensör ile gerçek mesafe arasındaki ilişkiyi lineerleştirmek için değişken dönüşümü kullanmışlardır. Değişken dönüşümü denklem (3.31)'e göre yapılmıştır. Ancak k değerleri farklı seçilmiştir. Malheiros ve ekibi tezde kullanılan kızılötesi sensörün aynısını çalışmalarında kullanmışlar ve değişken dönüşümü için $k=1$ değerinin kullanıldığını belirtmişlerdir. Benet ve ekibi ise kızılötesi sensör ile modelleme yapmak için kullandıkları denklem modeline 2 katsayısını eklemişlerdir. Bu çalışmada $k=1$ ve $k=2$ değerleri test edilmiş ancak yeterli performans elde edilememiştir. Üstelik $k=2$ kullanılarak yapılan mesafe tahminleri, iyileştirme yerine daha kötü sonuçlara neden olmuştur. Bu yüzden iki farklı k değeri daha, lineerleştirme yapabilmek için test edilmiştir. Bu değerlerin ilki üstel denklem modeli ile modelleme yapılırken hesaplanan β_4 parametresidir. İkincisi ise, lineer regresyon ile modellemede en küçük SSE değerinin elde edildiği α değeridir. α değeri, yapılan çoklu denemeler ile bulunmuştur. Birçok k değeri için değişken dönüşümü yapılmış ve bir noktada lineer regresyon için en küçük SSE hatası elde edilmiştir.

Tablo 4.2: Değişken dönüşümü test sonuçları karşılaştırması.

	Test 1 SAE	Test 2 SAE	Test 3 SAE	Ortalama SAE	SSE
1/x Değişken Dönüşümü	34	39	38	37 ±2.6	149
1/β₄ Değişken Dönüşümü	28	36.5	32.5	32.3±4.3	120
1/α Değişken Dönüşümü	27.5	36	32	31.8±4.3	110

Tablo 3.2'de farklı k katsayıları ile değişken dönüşümü için lineer denklem kullanımındaki SAE değerleri görülmektedir. Değerler birbirlerine çok yakın olduğu için grafiksel yöntemler ile dönüştürme oranları arasında bir tercih yapmak zordur. Ancak SAE değerleri incelendiğinde $1/\beta_4$ ve $1/\alpha$ dönüşümlerinin hata oranlarının $1/x$ 'e göre belirgin bir şekilde iyi olduğu görülmektedir. $1/\beta_4$ ve $1/\alpha$ dönüşümleri de birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiş olmasına rağmen $1/\alpha$ dönüşümünün daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca verilerin eğriye uygunluğunun belirlenmesinde

kullanılan SSE değeri için de en iyi sonucun $1/\alpha$ ile elde edildiği Tablo 3.2' den görülmektedir.

Önerilen prosedürün bir diğer adımı da model parametre hesaplama yönteminin belirlenmesidir. LSM, parametre hesaplamada kullanılan en yaygın ve kabul görmüş yöntem olmasına rağmen, tez çalışmasında üzerinde çalıştığımız veriler gauss olmayan gürültü ve aykırı değerler içerdiği için en doğru model parametrelerini hesaplayabilmek için 4 farklı model parametre tespit yöntemi daha test edilmiştir. Bu yöntemler LSM'ye göre aykırı değer ve gauss olmayan tahmin edici dağılımında çok daha iyi model parametre tahmini yapabilen metotlardır. Üstelik sensör verilerinin aykırı değer içermemesi durumunda da LSM metoduna yakın model parametre tahmin performansı göstermektedir. 5 farklı metotta da yapılan testlerde birbirlerine yakın mesafe tahmin performansı göstermiştir. Çünkü gerek gözlem verilerinin toplanması gerekse de yapılan testlerin kontrollü laboratuvar ortamında ve mümkün olduğunca aynı koşullar altında yapılması, aykırı değer ve gauss olmayan hataları en aza indirmiştir. Ayrıca prosedürün ilk aşamasında uygulanan filtre de sensör verilerindeki gauss olmayan durumları minimize etmiştir. Test sonuçlarındaki veriler birbirine yakındır ancak uygulanan metotların amacı en iyi mesafe tahmin sonucunu elde etmek olduğu için SAE kriteri baz alınarak seçim yapılmış. Birbirine yakın sonuçlar arasında en iyi performansı LTS göstermiştir.

Tablo 4.3: Dayanıklı modelleme metotları test sonuçlarının karşılaştırması.

	Test 1 SAE	Test 2 SAE	Test 3 SAE	Ortalama SAE	AE
LSM	27.5	36	32.5	32±4.3	1.03
LMS	27	36	32.5	31.8±4.6	1.03
LTS	26.5	35.5	32.5	31.5±4.6	1.02
S Modelleme	27.5	38	32.5	32.7±5.3	1.05
MM Modelleme	27	36	33	32±4.6	1.03

Tablo 3.3 incelendiğinde, daha önceden de belirtildiği gibi farklı modelleme yöntemleri ile yapılan testlerde birbirine çok yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Ancak LTS metodu ile elde edilen sonuçlar diğerlerine göre daha

iyidir. Ayrıca sonuçlara bakıldığında küçük gibi görünen iyileşme ihmal edilebilir gibi görünebilir. Ancak burada amaç elde edilecek en iyi sonuçları elde etmektir. Ayrıca prosedürün önceki adımlarıyla yapılan iyileştirmelerden dolayı Ortalama Hata (AE) değeri 1 mm civarına kadar düşmüştür. Bu seviyelerde AE değerinde ciddi düşüşler beklenmemelidir. Öte yandan tez çalışmasının bir amacı da daha hassas ve doğru ölçüm yapmak için genel bir prosedür elde etmektir. Bu çalışmada her ne kadar prosedürün önceki adımlarında AE değeri ciddi oranda düşürülmüş ve aykırı değerler ciddi oranda filtrelenmiş olsa da her sensör ve uygulama için bu durum mümkün olmayabilir. Böyle bir durumda dayanıklı modelleme daha etkin rol üstlenecektir.

Tahmin edici yöntemi belirleme bu çalışmanın bir diğer adımıdır. Bölüm 3.5’de bahsedildiği gibi bu çalışmada 3 farklı tahmin edici hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Tablo 3.4’te tahmin edicilerin test sonuçları görülmektedir. Diğer adımlarda olduğu gibi, bu adımda da performans değerlendirmesi SAE kriteri kullanılarak yapılmıştır. Tablodan da görüleceği üzere en kötü performans ortanca değer tahmin edici olarak kullanılması ile elde edilmiştir. Ayrıca ortanca değer tahmin edicinin diğer iki tahmin ediciye göre de ciddi oranda performansı düşüktür. Bu aslında beklenmeyen bir durumdur. Çünkü ortanca değer, gürültü, aykırı değer vb. anormalliklerden etkilenmediği bilinen bir gerçektir [3]. Ancak gösterdiği performans bunun tam aksi yöndedir. Diğer iki tahmin edici daha iyi sonuçlar göstermiştir. Kalman filtresi ile ortama değer birbirine çok yakın performans gösterdiği için aralarında seçim yapabilmek zordur. Ancak gerek çok az bir farklı daha iyi değerlere sahip olması ve uygulama kolaylığından dolayı ortama değer, prosedürün bu adımında tercih edilen yöntem olmuştur.

Tablo 4.4: Tahmin edici metotları test sonuçları karşılaştırması.

	Test 1 SAE	Test 2 SAE	Test 3 SAE	Ortalama SAE	AE
Ortalama ile Tahmin Edici	27	35.5	32.5	31.67	4.3
Ortanca ile Tahmin Edici	38	40	37	38.5	1.5
Kalman fitresi ile Tahmin Edici	27	35.5	34	32.2	4.54

Tez çalışmasında mesafe ölçüm hassaslığı ve doğruluğuna en büyük katkıyı aykırı değer filtrelenmesi sağlamıştır. İkinci en büyük katkı ise veri tümleştirme ile elde edilmiştir. Her bir sensörün her ne kadar matematiksel metot ve algoritmalar ile yaptığı ölçümün doğruluğu ve hassaslığı arttırılsa da belirli bir limitin üstüne çıkılamaz. O yüzden mesafe tahmininde iki sensör kullanımı ile daha doğru ve hassas tahminler elde edilmiştir. Uygulanan veri tümleştirme yöntemleri arasında en büyük katkıyı, bu çalışmada önerilen veri tümleştirme yöntemi sağlamıştır. Ayrıca veri tümleştirmede sensörlerin Şekil 3.14 B’de gösterildiği gibi engele farklı mesafelerde yerleştirilmesi bu katkıyı daha da artmıştır. Çünkü yapılan testlerde görülmüştür ki, kullanılan kızılötesi sensör belirli mesafelerde performansı ve doğruluğu azalmakta, belirli mesafelerde ise performansı ve doğruluğu artmaktadır. Örneğin 12 cm ile 15 cm aralığında hassasiyet düşüken, 20 cm ile 25 cm aralığında yüksek doğruluk ve hassasiyete sahip veriler gelmektedir. Yapılan yerleşim ile sensörlerin iyi ve kötü performans gösterdiği bölgeler birleştirilmiştir. Ayrıca önerilen algoritma ile de çapraz yerleşimin faydası maksimize edilmiştir.

Sensörler ile yapılan veri tümleştirme çalışmaları genelde farklı tip sensörler ile yapılmaktadır. Ancak bu çalışmada hem maliyet kaygısından hem de doğruluk ve hassasiyetin uygulanan yazılımsal yöntemler ile daha fazla arttırılması planlandığı için aynı tip sensörler kullanılmıştır. Daha açık ifade ile kullanılan kızılötesi sensör piyasa koşullarında gayet rekabetçi bir fiyat politikasına sahiptir. Düşük maliyetle, hassas ve doğru mesafe tahmini yapma amacına katkı sağlamaktadır. Öte yandan veri tümleştirme de mesafe tahmin performansı kötü olan kızılötesi sensörün yanında

mesafe tahmin performansı daha yüksek bir sensör kullanılıyorsa, tez çalışmasında kullanılan algoritma ve metotların sağladığı katkı tam olarak belirlenemeyecektir.

Tablo 4.5: Veri tümleştirme metotları test sonuçları karşılaştırması.

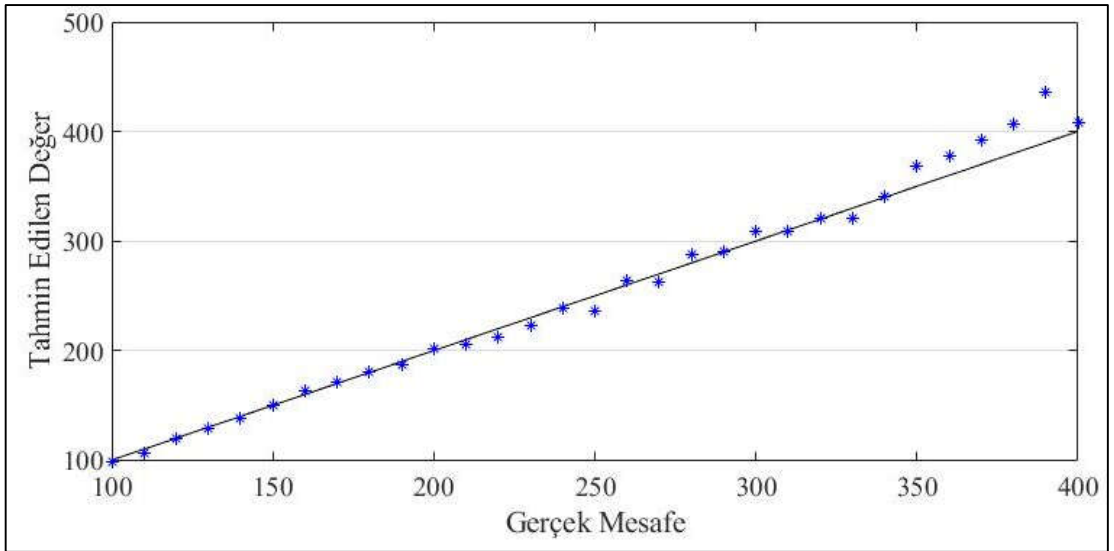
	Test 1 SAE	Test 2 SAE	Test 3 SAE	Ortalama SAE	AE
Ortalama ile Tahmin Edici(Tek Sensör Verisi)	27	35.5	32.5	31.67	4.3
Veri Tümleştirme/ Merkezi Limit Teoresi/ Paralel Yerleşim	32.5	38	35.6	35.5	2.9
Kalman fitresi ile Veri Tümleştirme/ Paralel Yerleşim	33.5	40.5	36.5	36.5	3.5
Çoklu Değişken ile Veri Tümleştirme/ Paralel Yerleşim	28.5	31	32	30.5	2
Veri Tümleştirme/ Merkezi Limit Teoresi/ Çapraz Yerleşim	19.5	23	24	22	2.4
Kalman fitresi ile Veri Tümleştirme/ Çapraz Yerleşim	20	22	24	22	2
Çoklu Değişken ile Veri Tümleştirme/ Çapraz Yerleşim	32	31	31	31.5	0.5
Önerilen Yöntem ile Veri Tümleştirme/ Çapraz Yerleşim	11	14.50	18.5	14.5	3.8

Özetle aynı tip iki sensör kullanılarak yapılan veri tümleştirme, mesafe tahmin performansının iyileştirilmesine katkı sağlamıştır. Konumlamada yapılan çapraz yerleşim ile de sensörler birbirlerinin zayıf performans gösterdiği bölgelerde hassasiyet ve doğruluk artışı sağlanmıştır. Tablo 3.5’te veri tümleştirmesinin sağladığı katkı görülebilmektedir. Öte yandan sonuçlardan da görüleceği üzere paralel yerleşim

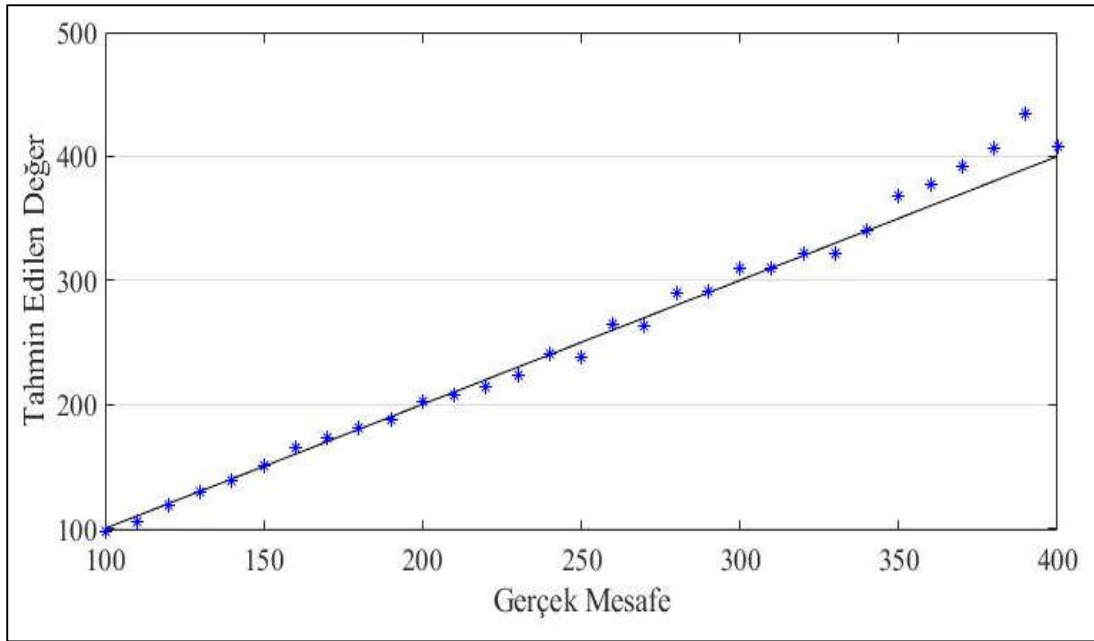
ile veri tümleştirme ile mesafe tahmin performansına katkı sağlanamamıştır. Bunun en temel nedeni aynı tip iki sensörün aynı bölgelerde performansının zayıf olması ve bu yüzden tümleştirilen verilerin birbirinin zayıflıklarını elimine edememesidir. Ancak çapraz yerleşimde mesafe tahmin performansının bariz bir şekilde iyileştiği görülmektedir. En iyi performans önerilen veri tümleştirme yöntemi ile elde edilmiştir.

4.2. Önerilen Prosedür ile Mesafe Tahmin Performansı

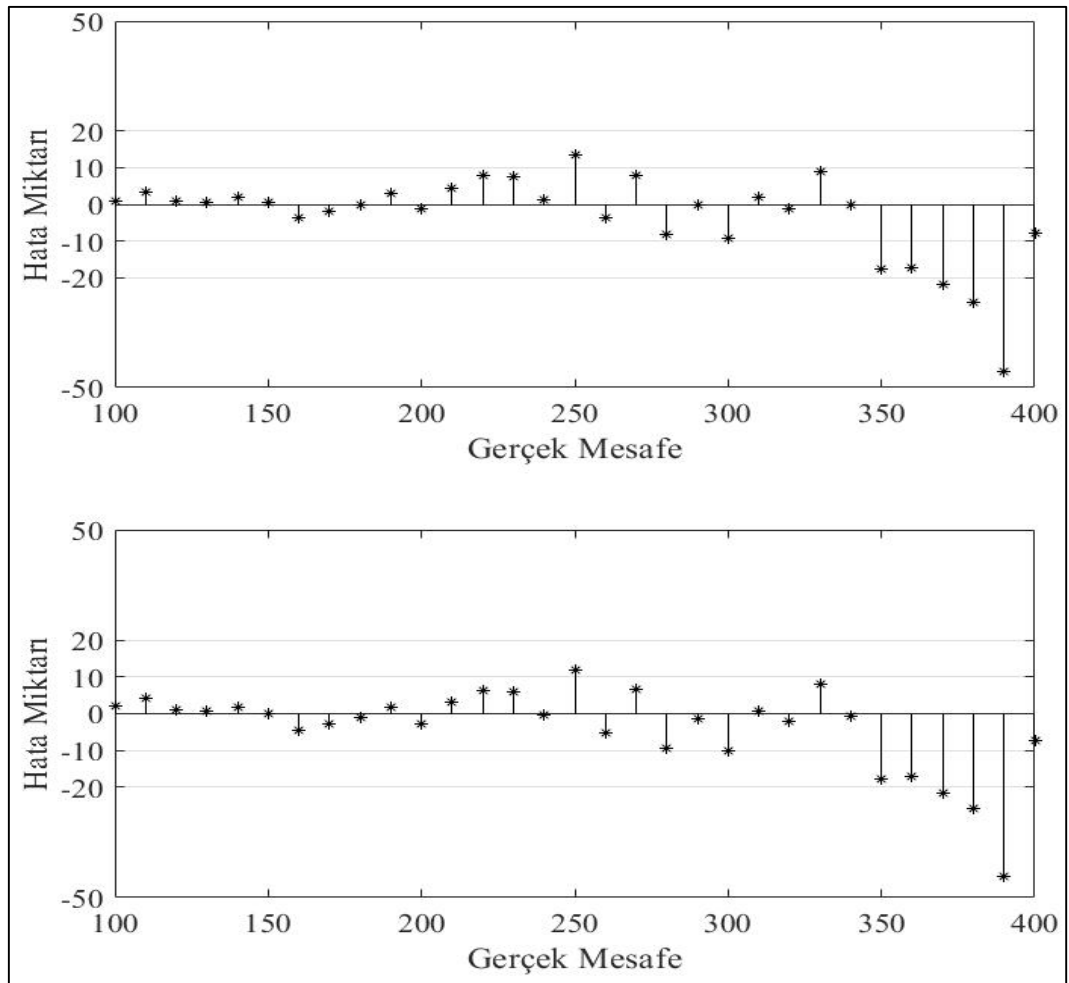
Bu bölümde önerilen prosedür ile mesafe tahmininde elde edilen sonuçlar belirtilecek ve analizi yapılacaktır. Bir önceki bölümde prosedürdeki her bir adımın ayrı ayrı katkısı ve analizi yapılmıştır. Bu bölümde prosedürdeki ayrı ayrı adımlarının sonuçları değil nihai sonuçlar belirtilecek ve analizi yapılacaktır. Bu kapsamda doğruluk ve hassasiyet artışını gözlemleyebilmek için bölüm 3.3 de belirtilen prosedürler tekrarlanacak ve sonuçları önerilen prosedür ile karşılaştırılacaktır. Referans amaçlı karşılaştırmada kullanılan prosedürler; mesafe tahmin prosedürü 1 ve mesafe tahmin prosedürü 2'dir. Referans prosedür ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.4 ve 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Mesafe tahmin prosedürü 1 test sonuçları.



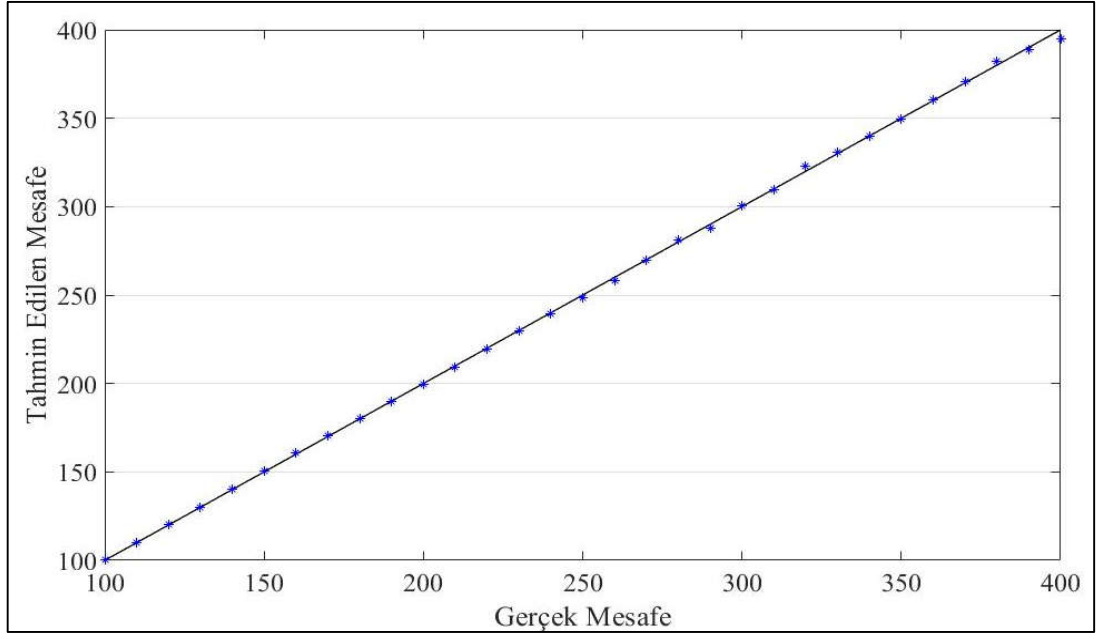
Şekil 4.5: Mesafe tahmin prosedürü 2 test sonuçları.



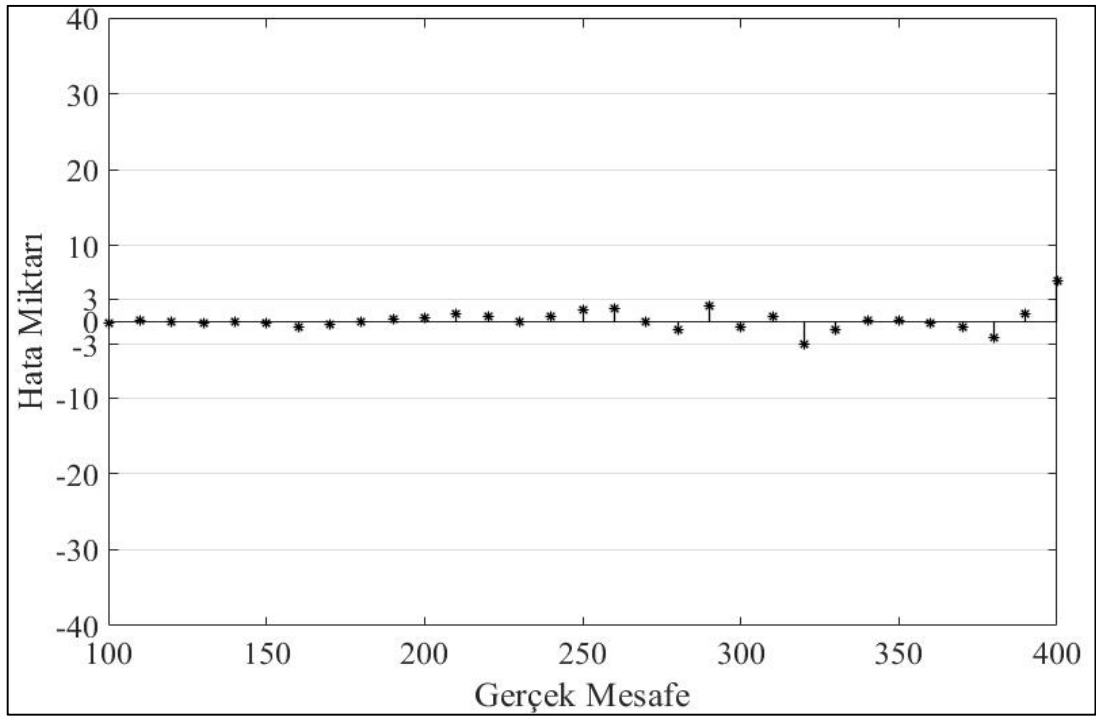
Şekil 4.6: Referans prosedürler mesafe tahmin hata grafiği.

Şekil 4.4 ve 4.5’den görüleceği gibi mesafe tahmin prosedürü 1 ve 2 ile elde edilen sonuçlarda tahmin doğruluğu düşüktür. Tahminlerdeki hata miktarı tüm ölçümler boyunca 5 mm’den fazladır. Özellikle 25 cm sonra tahmin hata miktarı daha da artmaktadır. 35 cm’den sonra ise kabul edilemez boyutlara ulaşmaktadır. Şekil 4.6’dan da görülebileceği gibi 35 cm’den sonra hata miktarı 45 mm’ye kadar çıkmıştır. Aykırı değerlerin filtrelenmemiş olması hataların bu kadar yüksek olmasında en büyük etmendir. Çünkü aykırı değerler yanlış olduğundan dolayı hatalı ölçümlerin bir tarafta oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda hata miktarının artmasına neden olmaktadır. Referans prosedürler ile yapılan ölçümlerde Mesafe tahmin prosedürü 1 için SAE 229, mesafe tahmin prosedürü 2 içinse 230 mm’dir. AE ise mesafe tahmin prosedürü 1 ve 2 içinse 7,4 mm çıkmıştır.

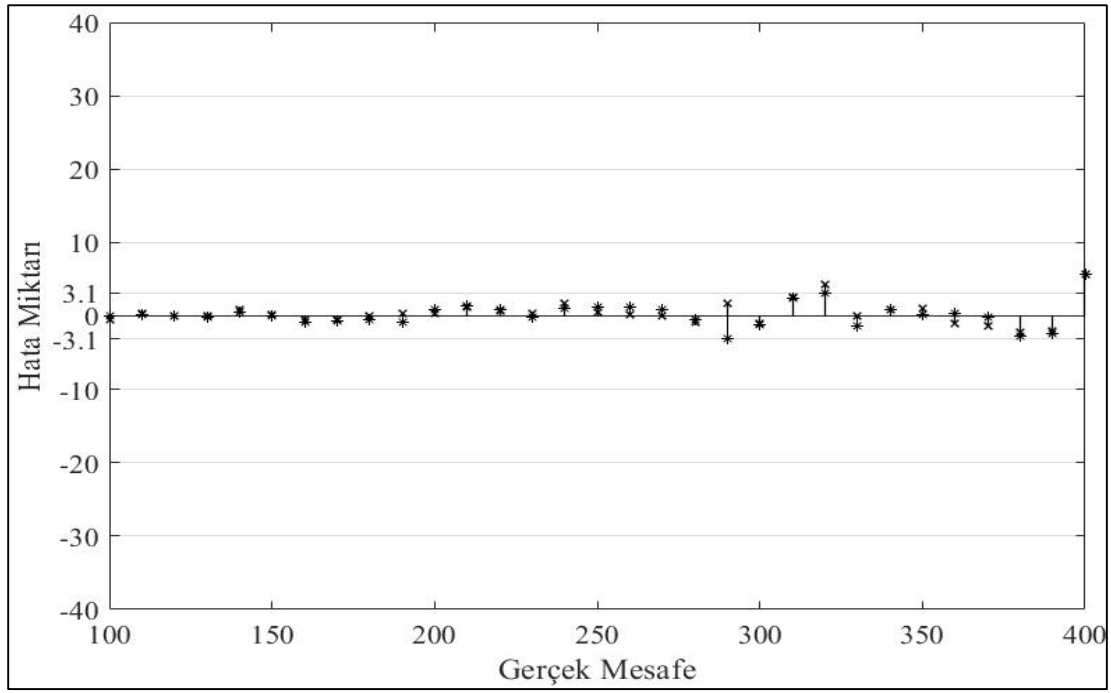
Öte yandan önerilen prosedür yardımıyla gerçekleştirilen modelleme ve tahminlerde mesafe tahmin doğruluğu ve hassasiyetinde büyük bir artış söz konusudur. Önerilen prosedür yardımıyla tek bir sensör kullanılarak gerçekleştirilen mesafe tahmin prosedürü 3’te bu durum açıkça görülebilmektedir. Referans prosedürler için 230 mm civarında olan SAE değeri, uygulanan prosedür ile yapılan tahminlerle 27 mm’ye kadar düşmüş ve ortalama mesafe ölçüm hatası ise 7.4 mm’den 1.1 mm’ye düşmüştür. Ayrıca uygulanan prosedürün kullanılabilir olması için sadece gözlem verileri ile değil, tekrarlanan testlerde de hassas ve doğru sonuçlar elde edilmesi gerekmektedir. Mesafe tahmin prosedürü 3 ile yapılan ikinci ve üçüncü testlerde ise SAE değeri 33 ve 36 mm olmuştur. Böylelikle uygulanan prosedürün hassaslığı ve doğruluğu arttırmada etkili olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca mesafe tahmin hatası yapılan testlerde 40 cm haricinde 3.1 mm’yi geçmemiştir. Şekil 4.7 ve 3.8’de mesafe tahmin prosedürü 3 ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 4.7’den görülebileceği gibi mesafe tahminleri genel olarak ideal tahmin eğrisinin üzerindedir. Az bir kısmı ise eğrinin yakınlarındadır. Şekil 4.6 ile 4.8’u karşılaştırdığımızda, iki prosedür arasındaki doğruluk farklı açıkça görülebilmektedir. Şekil 4.5’de elde edilen tahminlerin ideal eğrinin uzağında olduğu açık bir şekilde görülebilirken, mesafe tahmin prosedürü 3’te ise Şekil 4.7’den görüleceği gibi nerdeyse tüm tahminler ideal eğrinin üzerindedir. Bu yüzden hassaslık ve doğruluk artışını daha iyi gözlemleyebilmek için Şekil 4.8 de görülen hata grafiği baz alınacaktır. Mesafe tahmin prosedürü 3 için hataların gösterildiği hata eğrisine bakıldığında hataların genel olarak 2 mm’nin, hatta çoğunun 1 mm’nin altında olduğu, maksimum hatanın da 3 mm’yi geçmediği görülmektedir.



Şekil 4.7: Mesafe tahmin prosedürü 3 için test sonuçları.



Şekil 4.8: Mesafe tahmin prosedürü 3 için tahmin hatası grafiği.

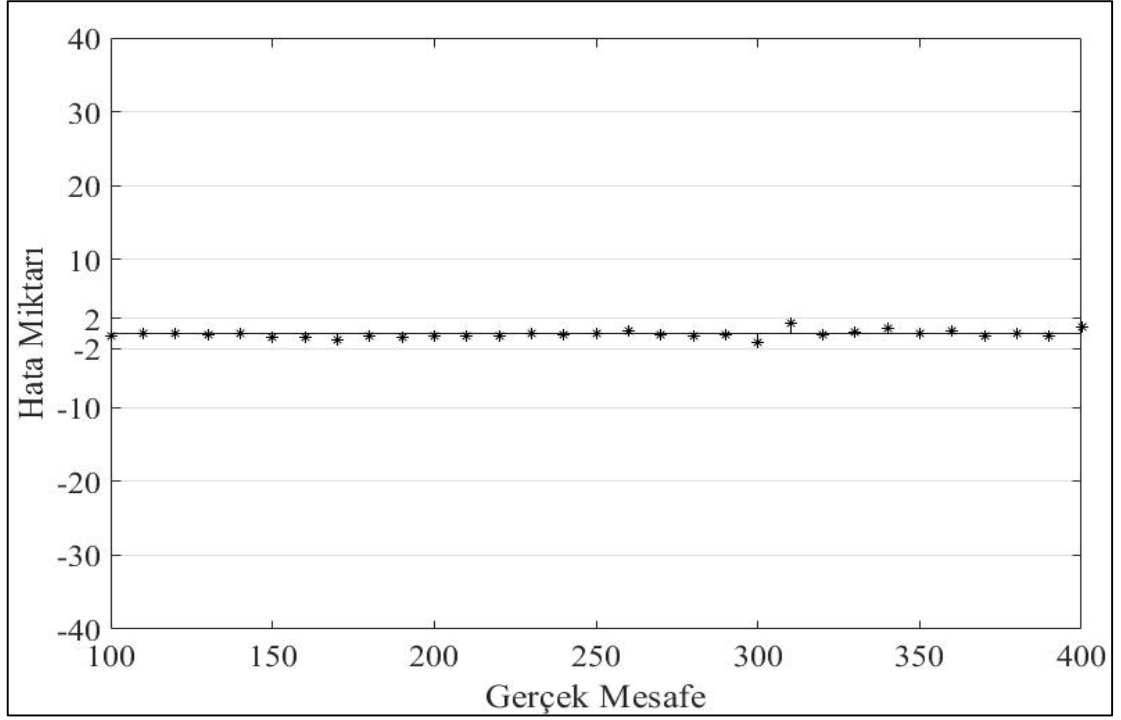


Şekil 4.9: Mesafe tahmin prosedürü 3 için tekrarlayan testler tahmin hatası grafiği.

Şekil 4.9’ de de mesafe tahmin prosedürü 3’ün tekrarlanan testlerdeki mesafe tahmin hata grafiği gösterilmektedir. Görüldüğü gibi tekrarlanan testlerde de istikrar sürmektedir. Ayrıca tekrarlanan testlerde mesafe tahmin hatası 40 cm haricinde 3.1 mm’yi geçmemektedir.

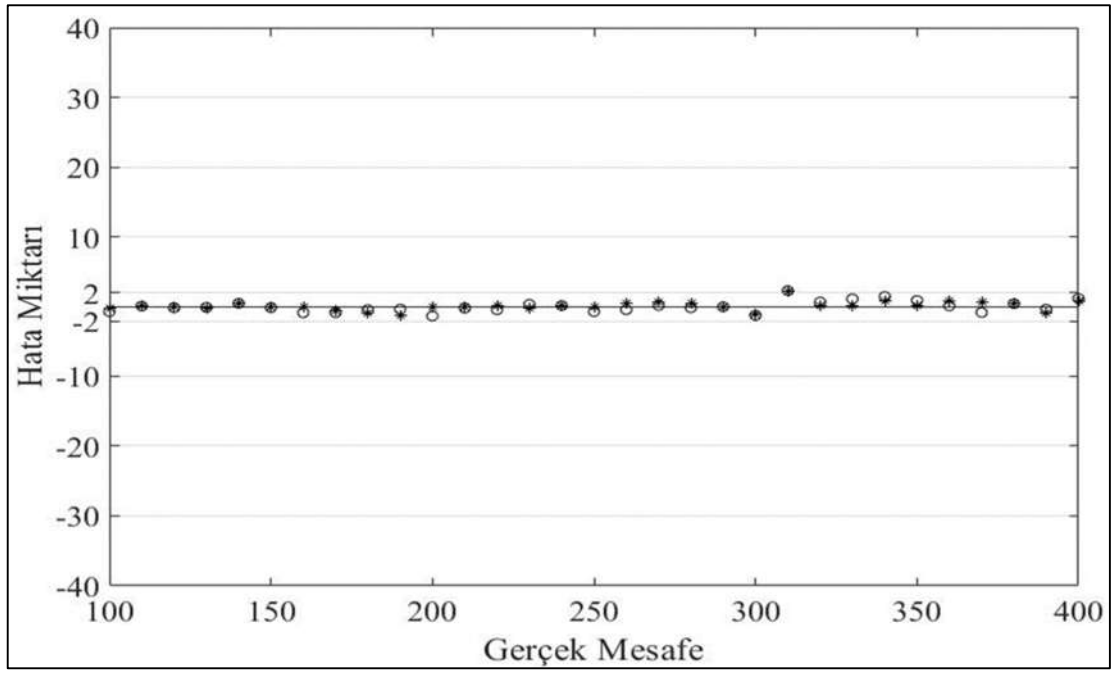
Bu çalışmada en iyi performans prosedürün tüm adımlarının uygulandığı mesafe tahmin prosedürü 4 ile elde edilmiştir. Mesafe tahmin prosedürü 3’ten farklı olarak iki sensör ile gerçekleştirilen mesafe tahmin prosedürü 4’te veri tümleştirme adımı da kullanılmıştır. Gözlem verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.10’de, tekrarlayan testler ise Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Şekil 4.10 ve 4.11’den görülebileceği üzere hata miktarı tüm testlerde 2 mm’yi geçmemiştir. SAE gözlem verileri ile yapılan testte 11 mm’ye kadar düşmüş, tekrarlayan testlerde ise 14 ve 19 mm olmuştur. AE verileri de 0.4, 0.5 ve 0.6 millimetre olmuştur. Mesafe tahmin prosedürü 1 ve 2 ile elde edilen 7,4 mm AE değeri ile karşılaştırıldığında elde edilen hassasiyet artışı yüksektir. Ayrıca iki sensör kullanılarak tek bir sensör ile elde edilenden daha iyi performans elde edilmiştir. Tek bir sensör ile elde edilen AE değerinin 0.9 ve 1.1 mm olduğu göze alındığında ortalama hata miktarında azalma bariz olarak görülmektedir. Şekil 4.10 ve 4.11’ de mesafe tahmin prosedürü 4

kullanılarak gözlem verilerini ve tekrarlayan testlerde elde edilen mesafe tahmin hata grafiği görülmektedir.



Şekil 4.10: Mesafe tahmin prosedürü 4 için tahmin hata grafiği.

Ayrıca çalışmada elde edilen performans artışının daha iyi gözlemlenebilmesi için 4 mesafe tahmin prosedürünün sonuçları Tablo haline getirilmiştir. Tablo 4.6’da da görülebileceği gibi maksimum hata miktarı 44 mm seviyelerinden tek bir sensör için 5,5 mm civarına, iki sensör kullanıldığında ise 2 mm’nin altına düşmüştür. Ayrıca ölçümlerde 1 mm’nin altındaki hata sayısı mesafe tahmin prosedürü 1 ve 2 de yüzde 20 civarında iken, önerilen prosedür ile tek bir sensör kullanıldığında yüzde 70 civarına, iki sensör kullanımında ise yüzde 80 civarındadır.



Şekil 4.11: Mesafe tahmin prosedürü 4 için tekrarlayan testler tahmin hata grafiği.

Tablo 4.6: Mesafe tahmin hata özet tablosu.

	SAE	AE	Maksimum Hata	1mm>e>0mm (%)	2mm>e (%)	5mm>e (%)	e>5mm (%)
Mesafe Tahmin Prosedürü 1	229	7.4	44.3	16.13	35.48	54.84	45.16
Mesafe Tahmin Prosedürü 2	230	7.4	45.6	22.58	38.71	58.06	41.94
Mesafe Tahmin Prosedürü 3	27	0.9	5.4	74.19	96.77	96.77	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 3 Tekrarlayan Test 1.	35	1.1	5.7	61.29	80.65	96.77	3.23

Tablo 4.6: -Devam.⁵

	SAE	AE	Maksimum Hata	1mm>e>0mm	2mm>e	5mm>e	e>5mm
Mesafe Tahmin Prosedürü 3 Tekrarlayan Test 2	33	1.1	5.7	67.74	83.87	12.90	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 4	11	0.4	1.4	96.77	100.00	0.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 4 Tekrarlayan Test 1	14	0.5	1.9	80.65	100.00	0.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 4 Tekrarlayan Test 2	19	0.6	1.9	70.97	100.00	0.00	0.00

Özetle, mesafe tahmin prosedürünün her adımı hassas ve doğru ölçümler yapma amacına ulaşmaya katkı sağlamaktadır. Ancak en büyük katkıyı aykırı değer filtresi

⁵ **Mesafe Tahmin Prosedürü 1:** Regresyon Modeli: *Lineer Regresyon Modeli*, Değişken Dönüşü: $1/x$, Model Parametre Tahmini: *LSM*, Mesafe Tahmin Yöntemi: *Ardışık 5 sensör verisinin ortalaması*

Mesafe Tahmin Prosedürü 2: Regresyon Modeli: *Üstel Regresyon Modeli*, Model Parametre Tahmini: *LSM*, Mesafe Tahmin Yöntemi: *Ardışık 5 sensör verisinin ortalaması*

Mesafe Tahmin Prosedürü 3: Regresyon Modeli: *Lineer Regresyon Modeli*, Aykırı Değer Filtresi: *Önerilen Aykırı Değer Filtresi*, Değişken Dönüşü: $1/x^\alpha$, Model Parametre Tahmini: *LTS*, Mesafe Tahmin Yöntemi: *Ardışık 300 sensör verisinin ortalaması*

Mesafe Tahmin Prosedürü 4: Regresyon Modeli *Lineer Regresyon Modeli*, Aykırı Değer Filtresi: *Önerilen Aykırı Değer Filtresi*, Değişken Dönüşü: $1/x^\alpha$, Parametre Tahmin Yöntemi: *LTS*, Mesafe Tahmin Yöntemi: *Ardışık 300 sensör verisinin ortalaması*, Veri Tümlleştirme: *Önerilen Veri Tümlleştirme Yöntemi*

sağlamaktadır. Çünkü aykırı değerler sensör verilerini aşırı kararsız yaptığından dolayı, bunların filtrelenmesi sensör verilerini daha kararlı hale getirmektedir. Ayrıca lineer olmayan sensör verilerinin uygun değişken dönüşümü bulunarak lineer hale getirilmesi, genel bir model yapılabilmesine ve tekrarlayan testlerin daha kararlı olmasını sağlamıştır. Bu çalışmada dayanıklı modelleme yöntemlerinin mesafe tahmin performansına katkısı az olmuştur. Bunun nedenleri, sensör verilerinin laboratuvar ortamında kontrollü toplanması ve önerilen aykırı değer filtresinin başarılı olmasından kaynaklanmaktadır. Performans artışına en büyük ikinci katkı veri tümleştirme ile sağlanmıştır. Önerilen yöntem ile veri tümleştirmenin kullanıldığı mesafe tahmin prosedürü 4'teki hassaslık ve doğruluktaki artış Tablo 4.6 yardımıyla görülebilmektedir.

4.3. Sınırlandırılmış Sensör Verisi ile Mesafe Ölçüm Performansı

Bölüm 4.2'de elde edilen sonuçlar ardışık üç yüz sensör verisi kullanılarak elde edilmiştir. Her ne kadar kızılötesi sensörlerin en büyük avantajı hızlı ölçüm yapması olsa da, üçyüz adet ardışık sensör verisinin alınması kısa da olsa bir süre alacaktır. Bazı çalışmalarda hassaslık ve doğruluk kaygısı olsa da hızlı ölçümler yapmaya da ihtiyaç duyulabilir. Bu kapsamda, tek sensör kullanarak en iyi mesafe tahmin performansı elde edilen mesafe tahmin prosedürü 3 ile iki sensör kullanılarak en iyi mesafe tahmin performansı elde edilen mesafe tahmin prosedürü 4 sınırlandırılmış ardışık sensör verileri ile de test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere yüz ardışık sensör okuması ile elde edilen mesafe tahmin performansı ile üçyüz sensör okuması ile elde edilen mesafe tahmin performansı birbirine çok yakındır. Ayrıca sınırlandırılmış sayıda sensör verisi ile yapılan tahminlere mesafe tahmin prosedürü 4 daha dayanıklıdır. Tablo 4'den da görüleceği üzere mesafe tahmin prosedürü 4'de 50 sensör okuması ile elde edilen tahminlerde maksimum tahmin hatası 2.4 mm'yi geçmemektedir. Ayrıca yapılan testlerde mesafe tahminlerinin yüzde 95'i 2 mm'nin altındadır ve hataların büyük bir bölümü de 1 mm'nin altındadır.

Tablo 4.7. Mesafe tahmini hata özet tablosu^{5,6}.

	SAE	AE	Maksimum Hata	1mm>e	2mm>e	5mm>e	e>5mm
Mesafe Tahmin Prosedürü 3*	28	0.90	3.6	64.52	87.10	100.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 3 Tekrarlanan Test 1*	39	1.26	5	58.06	77.42	96.77	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 3 Tekrarlanan Test 2*	34	1.09	5.6	61.29	83.87	96.77	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 4*	13	0.42	1.4	96.77	100.00	100.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 4 Tekrarlanan Test 1	21	0.68	2	80.65	100.00	100.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 4 Tekrarlanan Test 2*	21	0.68	2	70.97	100.00	100.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 3**	26	0.84	4.6	70.97	90.32	96.77	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 3 Tekrarlanan Test 1**	43	1.39	6	58.06	77.42	96.77	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 3 Tekrarlanan Test 2**	35	1.13	6	74.19	80.65	96.77	3.23
Mesafe Tahmin Prosedürü 4***#	13	0.42	1.3	96.77	100.00	100.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü Tekrarlanan Test 1**	26	0.84	2.4	61.29	93.55	100.00	0.00
Mesafe Tahmin Prosedürü 4 Tekrarlanan Test 1**	20	0.65	2.2	77.42	96.77	100.00	0.00

4.4. Gerçek Zamanlı Rastgele Test Sonuçları

Bu bölümde bu çalışmada en iyi mesafe ölçüm sonuçlarının elde edildiği Mesafe tahmin prosedürü 4 kullanılarak gerçek zamanda elde edilen test sonuçlar ve hata miktarı incelenecektir.

Tablo 4.8 Ölçüm sonuçları.

	Gerçek Mesafe	Mesafe Ölçüm Prosedürü 4 ile yapılan Ölçüm	Hata
1	254mm	254.2 mm	0.2mm
2	311mm	313.4mm	2.4mm
3	190mm	189.5mm	0.5mm
4	123mm	122.8mm	0.2mm
5	362mm	360.6mm	1.4mm
6	389mm	390.5mm	1.5mm
7	398mm	398.3mm	0.3mm
8	373mm	374.5mm	1.5mm
9	341mm	340.4mm	0.6mm
10	104mm	103.9mm	0.1mm
11	133mm	133.1mm	0.1mm
12	352mm	350.4mm	1.6mm
13	400mm	401.7mm	1.7mm
14	375mm	378.4mm	3.4mm
15	166mm	165.7mm	0.3mm
16	142mm	141.6mm	0.4mm
17	116mm	115.3	0.7mm
18	204mm	205.3mm	1.3mm
19	238mm	238.9mm	0.9mm
20	205mm	206.4mm	1.4mm

Mesafe ölçüm prosedürü 4 ile yapılan gerçek zamanlı ölçümler Tablo 4.8’de gösterilmektedir. Farklı mesafelerde yapılan ölçümler de görülmüştürki ölçüm hatalarının çoğu özellikle 20 cm’den az mesafelerde hata 1 mm’nin altındadır. Yapılan testlerde özellikle 30 cm’nin üzerinde hata 3 mm’yi bulabilmektedir. Ancak testi yapılan sensörün 1 cm hassasiyette mesafe ölçümünde kullanıldığı ve literatürdeki daha önceden uygulanan yöntemler ile mesafe tahmin hatasının 40 mm’leri bulduğu göz önünde bulundurulduğunda elde edilen sonuçlarda ciddi bir iyileşme söz konusudur. Ayrıca farklı mesafelerde yapılan testlerde yapılan 20 ölçümden sadece 1 tanesi 3 mm’nin üstünde hataya sahiptir. 11 tanesi yani %55’inde hata 1 mm’nin altındadır. Gerçek zamanlı testlerde elde edilen bu sonuçlar önerilen prosedürün mesafe ölçüm performansını arttırmada ne denli başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.5. Sonuç

Tez çalışması kapsamında cihazların dış dünya ile iletişim kurmasını sağlayan kızılötesi mesafe sensörleri ile daha hassas, daha doğru ve tekrarlanabilirliği yüksek mesafe tahminleri yapmak üzerine bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma temelinde kızılötesi sensörün çıkışındaki gerilim değerini daha iyi anlamlandırmak üzerinedir. Bilindiği gibi sensörler, çıkışında istenilen fiziksel büyüklüğün değerini vermez. Bunun yerine sensörden ölçülmek istenen fiziksel büyüğe bağlı akım veya gelirim bilgisi elde edilir. Bu bilgiyi anlamlandırılarak istenen fiziksel büyüklüğün elde edilmesi sağlanır.

Kızılötesi mesafe sensörleri de çıkışında ölçülmek istenen mesafeye bağlı gerilim üretmektedir. Ancak üretilen bu gerilim aşırı miktarda dalgalanmaktadır. Bu dalgalanma gürültü ve aykırı değerlerinde etkisi ile mesafe ve sensör arasındaki ilişkiyi doğru ve hassas olarak anlamlandırmayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca sensörün karakteristiğinden dolayı mesafe ile sensör çıkışındaki gerilimin lineer olarak değişmemesi, kızılötesi sensör ile mesafe ölçümünü daha da zorlaştırmaktadır. Çalışma kapsamında numerik ve yazılımsal yöntemler ile kızılötesi sensör çıkışını daha iyi anlamlandırılarak daha hassas, daha doğru ve tekrarlanabilirliği yüksek mesafe tahminler elde edilmiştir.

Bu amaçla ticari olarak yaygın kullanılan ve makul fiyatlı bir kızılötesi sensör modülü seçilmiştir. Seçilen makul fiyatlı sensör gerek dış bozuculardan etkilenmesi

gerek de kullanılan sensör ve yapısı gereği çıkışında ciddi oranda gürültü ve aykırı değer barındırmasından dolayı sensör çıkışını anlamlandırarak hassas ve doğru mesafe tahmini yapmayı zorlaştıracak birçok unsur barındırmasına rağmen, tezin amacı için ideal sensördür.

Literatürde yapılan incelemede seçilen sensör ile ilgili doğru ve hassas mesafe ölçüm çalışmaları bulunmaktadır. Ancak çalışmalarda cm çözünürlüğünde doğruluk elde edildiği belirtilmektedir. Ayrıca ilgili çalışmaların genel olarak derinlemesine yapılmadığı, sadece uygun regresyon modelleme ile hassas ve doğru mesafe ölçümünün elde edilmeye çalışıldığı ve birkaç çalışmada da regresyon modelleme ile değişken dönüşümü kullanılarak mesafe ölçüm performansının artırılmasına yönelik çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Öte yandan yapılan iyileştirmeler, sadece ilgili çalışmada kullanılan sensöre yönelik prosedürler içermektedir. Ancak kızılötesi sensör kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada hem kullanılan sensörün performansının artırılması amaçlanmış hem de çıkışı analog olan sensörler için performans iyileştirilmesi sağlayacak genel bir prosedür oluşturulmuştur.

Seçilen sensör hassas ve doğru mesafe tahmini için birçok aşılması gereken engeli barındırsa da ölçüm performansının artırılmasını farklı açılardan test edilip genel bir prosedür oluşturulmasına olumlu yönde katkı sağlamıştır. Önerilen prosedürün ilk adımı ayrı değer tespittir. Yapılan çalışmada sensör çıkışının aşırı gürültü ve aykırı değer içerdiği görülmektedir. Kızılötesi sensör ile yapılan geçmiş çalışmalarda aykırı değer tespitine değinilmemiştir olsa, genel olarak sensörlerin çıkışında aykırı değer bulunmaktadır. Bu yüzden literatürde de aykırı değer tespiti üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan testlerde sensör çıkışı aykırı değerlerden temizlenmiştir. Böylelikle yapılan ölçümlerin hassaslığının ve doğruluğun arttığı görülmüştür. Prosedürün ikinci adımı değişken dönüşümüdür. Literatürde kızılötesi sensör ile yapılan ölçümlerde değişken dönüşümü ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Tez kapsamındaki çalışmada da değişken dönüşümü uygulanarak daha genel ve anlamlandırılması kolay sensör verisi elde edilmiştir. Prosedürün üçüncü adımı ise regresyon modeli belirlenmesidir. Bu adım literatürde birçok çalışmada uygulanmıştır. Çalışma kapsamında ise hem en uygun model elde edilmeye çalışılmış, hem de farklı tip sensörler için modellemede dikkat edilecek hususlar da belirtilmiştir. Prosedürdeki bir sonraki adım dayanıklı modellemedir. Bu konuda kızılötesi ötesi sensör ile yapılan çalışmalarda daha önce kullanılmamıştır. Ancak literatürde sensör gürültüsü ve aykırı değerlerin etkilerinden kurtulmak için

dayanıklı modelle tercih edilen bir yöntemdir ve bu çalışmada da kızılötesi sensör verileri aykırı değer içerdiği için kullanılmıştır. Ancak hem sensör verileri laboratuvar ortamında toplandığından hem de modelleme öncesi aykırı değer tespiti yapıldığı için prosedürdeki bu adımın çalışmaya katkısı az olmuştur ancak yapılan çalışmanın, çıkışı analog olan sensörler için kullanılabilecek genel bir çalışma olması amaçlandığından dolayı dayanıklı modelleme adımı da prosedüre dahil edilmiştir. Ayrıca yapılan testlerde görülmüştür ki, az bir farkla da olsa en iyi sonuçlar dayanıklı modelleme ile elde edilmiştir. Prosedürün son adımı ise veri tümleştirmedir ve daha hassas ve doğru mesafe tahmininde aykırı değer tespitinden sonra en büyük katkıyı sağlayan adımdır.

Özetle, prosedürdeki her bir adım hassas ve doğru tahmin yapmaya farklı açılardan katkı sağlamaktadır. Ayrıca çalışmada konuya farklı açılardan bakıldığı için geçmiş çalışmalarda olduğu gibi tek yönlü değil, konu derinlemesine analiz edilmiştir. Böylelikle çıkışı analog olan birçok sensörün ölçüm performansının artırılmasına katkı sağlayacak bir prosedür önerilmiştir. Sonuç olarak, tez çalışması kızılötesi sensör için mesafe tahmin performansının uygun maliyetle artırımı özelinde literatürde bulunandan daha derin bir analiz ve daha fazla performans artırılmasına yönelik bir çalışma olmuştur. Aynı zamanda önerilen prosedürün genelleştirilmesi endüstride çeşitli analog sensörler içinde uygulanabilecek maliyet azaltıcı bir çalışma ortaya çıkmasını sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Gageik N., Müller T., Montenegro S., (2012), "Obstacle detection and collision avoidance using ultrasonic distance sensors for an autonomous quadrocopter", University of Wurzburg, Aerospace Information Technology (Germany) Wurzburg, 3-23.
- [2] Mansor H., Shukor M. H. A., Meskam S. S., Rusli N. Q. A. M., Zamery N. S., (2013) "Body temperature measurement for remote health monitoring system", IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and applications (ICSIMA), 1-5,11/2013, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [3] Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F. G., (2014), "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing", Sensors, 14 (7), 12305-12348.
- [4] Wernecke R., Wernecke J., (2013), "Industrial Moisture and Humidity Measurement: A Practical Guide", Edition, John Wiley & Sons.
- [5] Nise N. S., (2020), "Control Systems Engineering", Seventh Edition, John Wiley & Sons.
- [6] Luo M., Martinez A. W., Song C., Herrault F., Allen M. G., (2013), "A microfabricated wireless RF pressure sensor made completely of biodegradable materials", Journal of Microelectromechanical Systems, 23 (1), 4-13.
- [7] Fraden J., (2010), "Handbook of Modern Sensors", 4th Edition, Springer.
- [8] Özcan M., Aliew F., Görgün H., (2020), "Accurate and precise distance estimation for noisy IR sensor readings contaminated by outliers", Measurement, 156, 107633.
- [9] Jiang H., Olleta B., Chen D., Geiger R. L., (2007), "Testing high-resolution ADCs with low-resolution/accuracy deterministic dynamic element matched DACs", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 56 (5), 1753-1762.
- [10] Kook S., Natarajan V., Chatterjee A., Goyal S., Jin L., (2009) "Testing of high resolution adcs using lower resolution dacs via iterative transfer function estimation", 14th IEEE European Test Symposium, 3-8.

- [11] Adarsh S., Kaleemuddin S. M., Bose D., Ramachandran K., (2016) "Performance comparison of Infrared and Ultrasonic sensors for obstacles of different materials in vehicle/robot navigation applications", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012141,7/2016, Bangalore, Hindistan
- [12] Gageik N., Benz P., Montenegro S., (2015), "Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors", IEEE Access, 3, 599-609.
- [13] Ismail R., Omar Z., Suaibun S., (2016). "Obstacle-avoiding robot with IR and PIR motion sensors", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012064, 7/2016, Bangalore, Hindistan
- [14] Sabatini A. M., Genovese V., Guglielmelli E., Mantuano A., Ratti G., Dario P., (1995). "A low-cost, composite sensor array combining ultrasonic and infrared proximity sensors", Intelligent Robots and Systems 95.'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on, 120-126, 8/2002, Pittsburgh, PA, USA
- [15] Liao L., Fox D., Hightower J., Kautz H., Schulz D., (2003). "Voronoi tracking: Location estimation using sparse and noisy sensor data", Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453), 723-728,10/2003, Las Vegas, NV, USA
- [16] Yadav D., Azad P., (2018), "Low-cost triboelectric sensor for speed measurement and weight estimation of vehicles", IET Intelligent Transport Systems, 12 (8), 958-964.
- [17] Magnusson B., Ellison S. L., (2008), "Treatment of uncorrected measurement bias in uncertainty estimation for chemical measurements", Analytical and Bioanalytical Chemistry, 390 (1), 201-213.
- [18] Zhang Y., Srivastava A., (2009), "Accurate temperature estimation using noisy thermal sensors", 46th ACM/IEEE Design Automation Conference, 472-477, 07/2009, San Francisco , CA , USA
- [19] Zhang Y., Srivastava A., (2010), "Accurate temperature estimation using noisy thermal sensors for Gaussian and non-Gaussian cases", IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 19 (9), 1617-1626.
- [20] Chen H., Ji B., Pickert V., Cao W., (2013), "Real-time temperature estimation for power MOSFETs considering thermal aging effects", IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 14 (1), 220-228.
- [21] Stefan H. G., Preud'homme E. B., (1993), "Stream temperature estimation from air temperature 1", JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 29 (1), 27-45.

- [22] Richardson R. R., Ireland P. T., Howey D. A., (2014), "Battery internal temperature estimation by combined impedance and surface temperature measurement", *Journal of Power Sources*, 265, 254-261.
- [23] Gu" lder O. L., (1986), "Flame temperature estimation of conventional and future jet fuels", *Journal of Engineering Gas Turbines Power*.
- [24] De Ruiter A. H., Damaren C., Forbes J. R., (2012), "Spacecraft Dynamics and Control: An Introduction", John Wiley & Sons.
- [25] Schlegl T., Bretterklieber T., Neumayer M., Zangl H., (2010). "A novel sensor fusion concept for distance measurement in automotive applications", *Sensors*, IEEE, 775-778.
- [26] Licznarski T. J., Jaroński J., Kosz D., (2011), "Ultrasonic system for accurate distance measurement in the air", *Ultrasonics*, 51 (8), 960-965.
- [27] Novotny P. M., Ferrier N. J., (1999) "Using infrared sensors and the Phong illumination model to measure distances", *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)*, 1644-1649, 05/1999, Detroit, MI, USA
- [28] Benet G., Blanes F., Simó J. E., Pérez P., (2002), "Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots", *Robotics and Autonomous Systems*, 40 (4), 255-266.
- [29] Hepeng D., Donglin S., (2008). "Indoor location system using RFID and ultrasonic sensors", *Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2008. 8th International Symposium on*, 1179-1181, 10/2008, Kunming, China
- [30] Malheiros P., Gonçalves J., Costa P., (2009), "Towards a More Accurate Infrared Distance Sensor Model", *Diss. U of Porto*.
- [31] Gorostiza E. M., Galilea L., Luis J., Meca Meca F. J., Salido Monzú D., Espinosa Zapata F., Pallarés Puerto L., (2011), "Infrared sensor system for mobile-robot positioning in intelligent spaces", *Sensors*, 11 (5), 5416-5438.
- [32] Almasri M. M., Alajlan A. M., Elleithy K. M., (2016), "Trajectory planning and collision avoidance algorithm for mobile robotics system", *IEEE Sensors Journal*, 16 (12), 5021-5028.
- [33] Lu J., Zhang T., Hu F., Hao Q., (2016), "Preprocessing design in pyroelectric infrared sensor-based human-tracking system: On sensor selection and calibration", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47 (2), 263-275.
- [34] Mohammad T., (2009), "Using ultrasonic and infrared sensors for distance measurement", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 51, 293-299.

- [35] Korba L., Elgazzar S., Welch T., (1994), "Active infrared sensors for mobile robots", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 43 (2), 283-287.
- [36] Odat E., Shamma J. S., Claudel C., (2017), "Vehicle classification and speed estimation using combined passive infrared/ultrasonic sensors", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19 (5), 1593-1606.
- [37] Zappi P., Farella E., Benini L., (2008). "Pyroelectric Infrared Sensors Based Distance Estimation", *Sensors*, IEEE, 716-719.
- [38] Wahl F., Milenkovic M., Amft O., (2012). "A distributed PIR-based approach for estimating people count in office environments", 2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering, 640-647, 12/2012, Paphos, Cyprus
- [39] Mukhopadhyay B., Sarangi S., Srirangarajan S., Kar S., (2018). "Indoor localization using analog output of pyroelectric infrared sensors", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1-6, 04/2018, Barcelona, Spain
- [40] Varshney P. K., (1997), "Multisensor data fusion", *Electronics & Communication Engineering Journal*, 9 (6), 245-253.
- [41] Hall D. L., Llinas J., (1997), "An introduction to multisensor data fusion", *Proceedings of the IEEE*, 85 (1), 6-23.
- [42] Majchrzak J., Michalski M., Wiczynski G., (2009), "Distance estimation with a long-range ultrasonic sensor system", *IEEE Sensors Journal*, 9 (7), 767-773.
- [43] Basu S., Meckesheimer M., (2007), "Automatic outlier detection for time series: an application to sensor data", *Knowledge and Information Systems*, 11 (2), 137-154.
- [44] Suri N. M. R., Athithan G., (2019), "Outlier Detection: Techniques and Applications", Springer.
- [45] Rousseeuw P. J., Leroy A. M., (2005), "Robust Regression and Outlier Detection", John wiley & sons.
- [46] Hill D. J., Minsker B. S., (2010), "Anomaly detection in streaming environmental sensor data: A data-driven modeling approach", *Environmental Modelling & Software*, 25 (9), 1014-1022.
- [47] Hill D. J., Minsker B. S., Amir E., (2009), "Real-time Bayesian anomaly detection in streaming environmental data", *Water Resources Research*, 45 (4).
- [48] Khoenkaw P., Pramokchon P., (2017). "A software based method for improving accuracy of ultrasonic range finder module", 2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT), 10-13.

- [49] Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G., (2012), "Introduction to Linear Regression Analysis", Fifth Edition, John Wiley & Sons.
- [50] Nada A. A., Fakhr M. A., Seddik A. F., (2015). "Assistive infrared sensor based smart stick for blind people", Science and Information Conference (SAI), 1149-1154.
- [51] Shi K., Chen H., Lin Y., (2015), "Probabilistic coverage based sensor scheduling for target tracking sensor networks", Information Sciences, 292, 95-110.
- [52] Wang H., Bah M. J., Hammad M., (2019), "Progress in outlier detection techniques: A survey", IEEE Access, 7, 107964-108000.
- [53] Weisberg S., (2005), "Applied Linear Regression", Third Edition, John Wiley & Sons.
- [54] Giloni A., Padberg M., (2002), "Least trimmed squares regression, least median squares regression, and mathematical programming", Mathematical and Computer Modelling, 35 (9-10), 1043-1060.
- [55] Susanti Y., Pratiwi H., (2014), "M estimation, S estimation, and MM estimation in robust regression", International Journal of Pure and Applied Mathematics, 91 (3), 349-360.
- [56] Carling K., (2000), "Resistant outlier rules and the non-Gaussian case", Computational Statistics & Data Analysis, 33 (3), 249-258.
- [57] Mau S., (2005), "What is the Kalman filter and how can it be used for Data Fusion", Robotics Math, 16-811.
- [58] Ibe O., (2014), "Fundamentals of Applied Probability and Random Processes", Second Edition, Academic Press.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ÖZCAN 1987 yılında Balıkesir’de doğdu. 2005 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü 2010 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalında başladı ve 2013 yılında yüksek lisans eğitimini başarıyla tamamlayarak mezun olmuştur. 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2017-2021 yılları arasında Gebze Teknik Üniversitesinde Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır.