

**IMU SENSÖRLERİNDE OLASI HATALARIN  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**EVALUATING POSSIBLE ERRORS IN IMU SENSORS**

**ÇAĞIN AĞIRDEMİR**

**DR. ÖĞRETİM ÜYESİ SERDAR ARITAN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Bilgisayar Grafîği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2022

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

\_\_\_ / \_\_\_ / 2022

ÇAĞIN AĞIRDEMİR

## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

..... / ..... /.....

ÇAĞIN AĞIRDEMİR

# ÖZET

## IMU SENSÖRLERİNDE OLASI HATALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çağın AĞIRDEMİR

Yüksek Lisans, Bilgisayar Animasyonu ve Oyun Teknolojileri Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Serdar ARITAN

Eylül 2022, 63 sayfa

Ataletsel çalışma prensibine sahip sensörler insan modelleme ve navigasyon uygulamaları başta olmak üzere birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Ataletsel sensörlerin ana bileşenleri olan ivmeölçer ve jiroskop sensörleri günümüzde mikromekanik sistem teknolojisiyle üretilmektedir. Düşük maliyet ve yüksek miktarda üretilmesiyle birlikte performanslarında düşüş gözlemlenmektedir. Bu nedenle ataletsel sensör performanslarının iyileştirilmesi için çeşitli hata telafi algoritmaları önerilmiştir. Deterministik ve olasılıksal ataletsel sensör hataları ve bu hataları oluşturan parametrelerle arasındaki ilişkiler, hata telafi algoritmalarının temelini oluşturmaktadır. Hata telafi algoritmalarının, yüksek doğrulukta hata telafisini gerçekleştirebilmesi için sensör hataları ve hata kaynakları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan hata modellemesinin oluşturulması kritik önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, ataletsel sensör hatalarının modellenmesi için insan kol ve bacak hareket benzeşimini 2 boyutlu olarak yapabilme kapasitesine sahip bir test cihazı üretildi. İki farklı açısal hızda ataletsel sensörünün üç farklı eksenine ayrı ayrı insan hareket benzeşimi test cihazıyla uygulandı ve Gaussian dağıtım modeli kullanılarak sensör ölçüm dağılımları incelendi. Uygulanan insan kol ve bacak açısal hareketlerine ait fiziksel etkilerin ve sensör sıcaklık stabilitesinin, ataletsel sensör hata dağılımları üzerindeki etkisini araştırıldı.

**Anahtar Kelimeler:** IMU, Modelleme, Hareket yakalama sistemleri, MEMS

# **ABSTRACT**

## **EVALUATING POSSIBLE ERRORS IN IMU SENSORS**

**Çağın AĞIRDEMİR**

**Master , Department of Computer Animation and Game Technologies**

**Supervisor: Dr. Serdar ARITAN**

**September 2022, 63 pages**

Sensors with inertial working principle are used in many different fields, especially in human modeling and navigation applications. Accelerometer and gyroscope sensors, which are the main components of inertial sensors, can be produced with micromechanical system technology today. A decrease is observed in their performance as well as low cost and high production amount facts. Therefore, various error compensation algorithms have been proposed to improve inertial sensor performances. Deterministic and probabilistic inertial sensor errors and their relationships with the parameters that cause these errors from the basis of error compensation algorithms. In order for error compensation algorithms to perform high accuracy error compensation, it is critical to establish error modeling that reveals the relationship between sensor errors and error sources. In this thesis, a test device capable of simulating human arm and leg movements was produced in order to model inertial sensor errors. Three different axes of inertial sensors at two different angular velocities were applied separately with a human motion simulation test device, and sensor error distributions were calculated using the Gaussian distribution model. The effect of angular motion physical effects and stability of sensor temperature on inertial sensor error distributions was investigated using the test device.

**Keywords:** IMU, Modelling, Motion Capture Systems, MEMS

## TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Serdar Arıtan'a tez araştırmam boyunca değerli yol göstericiliği için teşekkür ederim. Bana daha iyi bir araştırma ve bilim perspektifi kazandırdı.

Ayrıca Arş. Gör. Nihat Özgören'e araştırmamla ilgili değerli geri bildirimleri için teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman olduğu gibi bu yoğun dönemde de desteklerini esirgemeyen sevgili aileme minnettarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ .....	ixi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xx
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Ataletsel Sensörlerle İnsan Hareket Modellemesi için Ön Çalışmalar .....	4
2.2. Ataletsel Sensör Hatalarıyla İlgili Akademik Çalışmalar .....	6
3. YÖNTEM.....	9
3.1. Doğru Akım Elektrik Motorlar .....	9
3.1.1. Motorun Belirlenmesi .....	9
3.2. Ataletsel Sensörün Belirlenmesi .....	11
3.3. Deney Düzeneği Tasarımı .....	13
3.3.1. Elektro-mekanik Elemanlar .....	13
3.3.1.1. Step Motor ve Bağlantı Elemanı.....	13
3.3.1.2. Tasarlanan Mekanik Bağlantı Elemanları .....	15
3.3.1.2.1. Elemanların Üretilmesiyle İlgili Ön Çalışmalar.....	15
3.3.1.2.2. Deney Tablası .....	16
3.3.1.2.3. Güç Bataryası Sabitleme Bağlantı Elemanları .....	17
3.3.1.2.4. Sabitlenebilir İşaretçi .....	17
3.3.1.2.5. İşaretçi Sabitleme Elemanı.....	17
3.3.1.2.6. Sensör Sabitleme Elemanı.....	18
3.3.1.3. Sürücü Kontrol Kartı .....	19

3.3.1.4. Elektronik Motor Kontrol Sistemi .....	20
3.4. Test Cihazı Kontrol Yazılımı .....	21
3.5. Referans Sistemin (Optik) Hassasiyetinin Belirlenmesi .....	22
3.6. Referans Sistem ile Deney Düzeneği Kalibrasyonu .....	23
3.7. Veri Toplama Sistemi .....	24
3.7.1. Raspberry Pi Konfügrasyonu .....	25
3.7.2. IMU Konfigürasyonu .....	26
3.7.3. Veri Toplama Yazılımı .....	26
3.8. IMU Test Prosedürü .....	28
3.8.1. Deterministik Hataların Düzeltilmesi .....	28
3.8.1.1. İvmeölçer ve Jiroskop Ön Yargı Hataları .....	29
3.8.1.2. İvmeölçer Ölçek Faktörü ve Yanlış Hizalama Hatası .....	30
3.8.2. Sıcaklık Sensörü Deneyi .....	30
3.8.3. Açısal Hareket Deneyleri .....	31
3.9 Ölçüm Analiz Yöntemleri .....	32
4. BULGULAR.....	33
4.1. Test Cihazı Kalibrasyon Deneyi Bulguları .....	33
4.2. Sıcaklık Deneyi Bulguları .....	35
4.3. 45 Derece/Saniye Açısal Hız Deneyi Bulguları .....	36
4.3.1. X Ekseni Bulguları .....	36
4.3.2. Y Ekseni Bulguları .....	39
4.3.3. Z Ekseni Bulguları .....	42
4.4. 180 Derece/Saniye Açısal Hız Deneyi Bulguları .....	45
4.4.1. X Ekseni Bulguları .....	45
4.4.2. Y Ekseni Bulguları .....	48
4.4.3. Z Ekseni Bulguları .....	51
5. TARTIŞMA.....	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	56
7. KAYNAKLAR.....	57



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Doğru akım motorlu test cihazının genel görünümü. ....	10
Şekil 3.2. Test cihazı için deney ortamı. ....	10
Şekil 3.3. BMX160 IMU Sensörü. ....	12
Şekil 3.4. Sensörün iç yapısı. ....	12
Şekil 3.5. Gravity V1.0 modülü. ....	13
Şekil 3.6. Nema 23 Step Motor. ....	13
Şekil 3.7. Motorun alüminyum malzemeyle kaplanması ....	14
Şekil 3.8. Şaft bağlantı elemanı. ....	14
Şekil 3.9. Arçelik 3B Yazıcı. ....	15
Şekil 3.10. Tabla elemanı. ....	16
Şekil 3.11. Table elemanının montajı. ....	16
Şekil 3.12. Güç bataryası sabitleme bağlantı elemanları ....	17
Şekil 3.13. İşaretçi sabitleme elemanı. ....	18
Şekil 3.14. Sensör sabitleme elemanı. ....	18
Şekil 3.15. TB6600 Sürücü kontrol kartı. ....	20
Şekil 3.16. ATMEGA328 Mikrodenetleyici iç yapısı. ....	20
Şekil 3.17. Motor kontrol devresi. ....	21
Şekil 3.18. Motor kontrol yazılımı akış şeması. ....	21
Şekil 3.19. İşaretçili test çubuğu. ....	22
Şekil 3.20. Taranan alan ve deney alanı. ....	22
Şekil 3.21. 0.4 milimetre ve daha yüksek hata yaptığı noktalar. ....	23
Şekil 3.22. 0.4 milimetreden daha düşük hata yaptığı noktalar ....	23
Şekil 3.23. Raspberry pi bilgisayar. ....	24
Şekil 3.24. Sensör ile Raspberry pi bilgisayar bağlantısı. ....	24
Şekil 3.25. Veri toplama yazılımı akış şeması. ....	26
Şekil 3.26. Veri toplama yazılımı fonksiyonlarının çalışma yapısı. ....	27
Şekil 3.27. 6 Pozisyon deneyi konumları. ....	28
Şekil 3.28. Zemin kontrolü. ....	28
Şekil 3.29. Ölçek faktörü hatası. ....	30
Şekil 3.30. Açısal hareket deneyi test cihazının görünümü. ....	31
Şekil 3.31. Sensörün farklı eksenlerine açısal hareketin uygulanması ....	31

Şekil 4.1. Kalibrasyon deneyi 3 boyutlu gösterimi .....	33
Şekil 4.2. Test cihazının Z eksenindeki değişiminin dağılımları.....	33
Şekil 4.3. Kalibrasyon yapılan açısal hızlarda motor hataları. ....	34
Şekil 4.4. Sıcaklık bulguları.....	35
Şekil 4.5. Sıcaklık bulgularının dağılımları. ....	35
Şekil 4.6. 45 derece/saniye deneyi X ekseni ham bulguları. ....	36
Şekil 4.7. 45 derece/saniye deneyi X ekseni incelenen açısal hız verileri.....	36
Şekil 4.8. 45 derece/saniye deneyi X ekseni ölçüm dağılımları .....	37
Şekil 4.9. 45 derece/saniye deneyi X ekseni olasılıksal yoğunluk fonksiyonları. ....	38
Şekil 4.10. 45 derece/saniye deneyi X ekseni analiz bulguları.....	38
Şekil 4.11. 45 derece/saniye deneyi Y ekseni ham bulguları. ....	39
Şekil 4.12. 45 derece/saniye deneyi Y ekseni incelenen açısal hız verileri.....	39
Şekil 4.13. 45 derece/saniye deneyi Y ekseni ölçüm dağılımları .....	40
Şekil 4.14. 45 derece/saniye deneyi Y ekseni olasılıksal yoğunluk fonksiyonları. ....	41
Şekil 4.15. 45 derece/saniye deneyi Y ekseni analiz bulguları.....	41
Şekil 4.16. 45 derece/saniye deneyi Z ekseni ham bulguları.....	42
Şekil 4.17. 45 derece/saniye deneyi Z ekseni incelenen açısal hız verileri. ....	42
Şekil 4.18. 45 derece/saniye deneyi Z ekseni ölçüm dağılımları.....	43
Şekil 4.19. 45 derece/saniye deneyi Z ekseni olasılıksal yoğunluk fonksiyonları. ....	44
Şekil 4.20. 45 derece/saniye deneyi Z ekseni analiz bulguları. ....	44
Şekil 4.21. 180 derece/saniye deneyi X ekseni ham bulguları. ....	45
Şekil 4.22. 180 derece/saniye deneyi X ekseni incelenen açısal hız verileri.....	45
Şekil 4.23. 180 derece/saniye deneyi X ekseni ölçüm dağılımları .....	46
Şekil 4.24. 180 derece/saniye deneyi X ekseni olasılıksal yoğunluk fonksiyonları. ....	47
Şekil 4.25. 180 derece/saniye deneyi X ekseni analiz bulguları.....	47
Şekil 4.26. 180 derece/saniye deneyi Y ekseni ham bulguları. ....	48
Şekil 4.27. 180 derece/saniye deneyi Y ekseni incelenen açısal hız verileri.....	48
Şekil 4.28. 180 derece/saniye deneyi Y ekseni ölçüm dağılımları .....	49
Şekil 4.29. 180 derece/saniye deneyi Y ekseni olasılıksal yoğunluk fonksiyonları. ....	50
Şekil 4.30. 180 derece/saniye deneyi Y ekseni analiz bulguları.....	50
Şekil 4.31. 180 derece/saniye deneyi Z ekseni ham bulguları.....	51
Şekil 4.32. 180 derece/saniye deneyi Z ekseni incelenen açısal hız verileri. ....	51
Şekil 4.33. 180 derece/saniye deneyi Z ekseni ölçüm dağılımları.....	52

Şekil 4.34. 180 derece/saniye deneyi Z eksenli olasılıksal yoğunluk fonksiyonları. ....	53
Şekil 4.35. 180 derece/saniye deneyi Z eksenli analiz bulguları. ....	53

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. TB6600 Özellikleri.....	19
Tablo 3.2. Test cihazının kalibre edildiği açısız hızlar.....	24
Tablo 3.3. Sensör ayarlamaları.....	26
Tablo 3.4. Sensör kılavuzunda belirtilen hata aralıkları.....	29
Tablo 3.5. 6 Pozisyon testi ölçümleri.....	29
Tablo 3.6. Önyargı hataları.....	29
Tablo 3.7. İvmeölçer deterministik hataları.....	30
Tablo 4.1. Test cihazının kalibre edildiği açısız hızlar.....	34

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\sigma$	Standart sapma
$^{\circ}$	Açı
$\omega$	Açısal hız
$\emptyset$	Çap
g	g kuvveti
s	Saniye
$g_1$	Lokal g kuvveti

### Kısaltmalar

IMU	Inertial Measurement Unit
MEMS	Micromechanical Systems
ODR	Output Data Rate
DoF	Degree of Freedom
PMU	Power Management Unit
ARM	Advanced RISC Machines
GPL	General Public License
GCC	GNU Compiler Collection
I2C	Inter-Integrated Circuit
SSH	Secure Shell
IP	Internet Protocol
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
RAM	Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

DIP	Dual In-line Package
PLA	Polylactic Acid
STL	Standard Triangle Language
CAD	Computer Adided Design
FIFO	First In First Out

# 1. GİRİŞ

İnsan hareket modellemesi, insan hareketlerinin bilgisayar ortamına aktarılmasıdır. Hareketleri modellenecek kişinin ölçüm için gerekli donanımların kişinin üzerine yerleştirmesiyle modelleme işlemi yapılabilir. Amaç, insan uzuv veya yüz hareketlerinin, ölçüm uzayındaki konumlarını hareket yakalama donanımlarıyla takip edebilmek ve ölçümleri bilgisayar ortamına aktarmaktır. Modellenen veriler birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi insansı robot çalışmalarıdır. İnsan hareket modelini kullanan insansı robotlar çalışmalarına animatronik robotları örnek olarak gösterilebilir. Animatronik robotları mekanik robot kuklaları olup otomatların değişik bir çeşididir. Genellikle filmler, tema parkları ve cazibe merkezlerinde çizgi film veya oyun karakterlerinin tasviri için kullanılırlar.

İnsansı robot çalışmalarındaki önemli problemlerden biri robot hareketlerinin insansı olmasını sağlamaktır. Bu problemin çözümü olarak insan doğal hareketini modellemek ve modellenen hareket bilgilerinin robotlara aktarılması denmektedir [2]. İnsan hareket modelini kullanan diğer bir alan ise medikal çalışmalarıdır. Örneğin, yürüyüş bozukluğu tedavisi gören hastalara uygulanan tedavi yöntemlerinin hasta yürüyüşünü ne derece etkilediği hasta hareketlerinin modellenmesi ile ölçülebilir. Fakat bu medikal uygulama her klinikte olması mümkün olmayan hareket izleme sistemi ekipmanlarıyla gerçekleştirilmektedir [3]. İnsansı robot ve medikal çalışmalardan farklı olarak spor, askeri ve bilgisayar oyunları ve animasyon çalışma alanlarında insan hareket modellemesi kullanılmaktadır. Farklı bilim dallarında kullanılmak üzere insan hareket modellenin oluşturulabilmesi için insan uzuv/eklem hızları, açıları ve yönelim gibi bilgileri yüksek doğrulukta ölçebilen, ekonomik olan ve kolay ulaşılabilir bir sistem ile ölçülmesi ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır.

İnsan hareketlerini modellemek için gerekli olan hareket yakalama sistem donanımları temelde 3 farklı çalışma prensibine dayanmaktadır. Bu çalışma prensipleri, optik, elektromanyetik ve ataletsel olarak belirtilebilir [1]. Farklı çalışma prensiplerine sahip ölçüm sistemlerinin birbirlerine göre ölçüm hassasiyeti, ölçüm alanı kısıtı, donanım maliyeti gibi avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Ataletsel çalışma prensibine sahip MEMS (Microelektromechanical Systems) tabanlı IMU (Inertial Measurement Unit)

sensörler erişilebilirlik, maliyet ve kolay taşınabilir ve hızlı uygulanabilir olması sebebiyle farklı çalışma prensibine sahip ölçüm sistemlerinde öne çıkmaktadır.

MEMS tabanlı IMU sensörlerin yapıları gereği birçok hataya sahiptir. Sensör hataları deterministik ve olasılıksal olmak üzere iki farklı kaynaktan meydana gelir[10]. Deterministik hatalar sensör kullanımından önce yapılan testler ile tespit ve telafi edilebilir. Fakat olasılıksal hatalar sensörün çalışma zamanında meydana geldiğinden dolayı önceden tespit edilemezler. Sensörler hatayı biriktirerek ölçüm yaptıkları için hatanın düzeltilmemesinin bir sonucu olarak ölçümler hızla daha güvenilir hale gelmektedir. Olasılıksal hatalar mükemmel bir şekilde telafi edilseler bile IMU sensörler yapıları gereği beyaz gürültü oluşturur [10] ve sürekli olarak doğrulanmaya ihtiyaç duyarlar.

Ulusal ve uluslararası akademik veri tabanları incelendiğinde MEMS tabanlı IMU sensör algoritmaları üzerine çalışmaların az sayıda olduğu görülmektedir. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) akademik arama motorunda “MEMS IMU” ve “algoritma” anahtar kelimeler kullanılarak yapılan arama sorgusunda işlem yükü düşük, yönelim veya düşük hassasiyetli konum hesaplama algoritmaları üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı, yüksek doğruluklu konum hesaplama algoritmaları üzerine çok az çalışmanın yayınlandığı görüldü [4]. YÖK (Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı) Tez Merkezi akademik arama motorunda “IMU” anahtar kelimesi kullanılarak yapılan aramada son 5 yılda sadece 5 çalışmanın yayınlandığı ve bu çalışmalarda bilgisayar ortamında oluşturulan IMU matematiksel modeli ya da IMU tabanlı ticari veri toplama sistemlerinin kullanıldığı görülmüştür [5]. Buna karşın ticari alanda uygulamalarda çok büyük geliştirmelerin olduğu görülmektedir. Fortune Business Insights araştırma şirketinin yapmış olduğu market araştırma raporuna göre 2019 yılında IMU sensör ölçüm sistemlerine ait pazar büyüklüğünün 17,34 milyar Amerikan doları olduğu ve 2027 yılında 24,91 milyar Amerikan doları seviyesine ulaşacağı öngörülmüştür [6]. Mevcut durumda insan hareketi ölçümlerinde MEMS tabanlı IMU sensörlerin kullanılmasında akademik ve açık kaynaklı çalışmaların az olması çalışmanın motivasyon kaynağıdır.

Tez kapsamında yapılan çalışmanın amacı, MEMS çalışma prensibine sahip ataletsel sensörün insan kol ve bacak hareketi açısal hızlarındaki olası hatalarını modellemek ve hata modelini hata telafi edici algoritmalara uygulayarak sensör ölçümlerinde iyileştirme



sağlamak ve ataletsel sensörleri hareket yakalama sistemlerinde kullanılması için daha güvenilir hale getirmektir.

Bu amaca ulaşmak için öncelikle statik 6 pozisyon testi kullanılarak deterministik hatalar tespit edildi. Sensörün hareket anındaki hatalarının tespit edilebilmesi ve insan bacak, kol açısal hareket benzeşiminin 2 boyutlu olarak sensöre uygulanabilmesi için bir test cihazı ihtiyacı ortaya çıktı. Ticari test cihazları ve alternatif olarak uçuş hareket simülatörü ve endüstriyel robot kol ürünleri incelendi. Bu inceleme sonucunda, düşük maliyetli ve insan bacak ve kol açısal hareket benzeşimini yapabilecek kontrol kabiliyetine sahip bir test cihazı üretilmesine karar verildi. Üretilen cihaz yüksek hassasiyetli optik tabanlı bir referans sistem kullanılarak 6 farklı açısal hız için kalibre edildi. Kalibre edilen test cihazında IMU sensör; 2 farklı açısal hızda, 3 farklı ekseninde ve 2 farklı sensör sıcaklık stabilite koşulu altında toplamda 120 dinamik test ile denendi.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Ataletsel Sensörlerle İnsan Hareket Modellemesi için Ön Çalışmalar

Hareket yakalama sistemlerinden biri olan MEMS ataletsel ölçüm birimleri, küçük boyutları ve pil ömrü dışında herhangi bir bağımlılığının olmamasından dolayı insan hareket yakalama sistemi olarak tercih edilmektedir. Ataletsel ölçüm birimini oluşturan jiroskop ve ivmeölçer sensör üretim maliyetleri düşmesiyle birlikte üretim miktarlarında artış meydana gelmiştir. MEMS olarak üretilen sensörlerin yüksek sayıda ve düşük maliyetler ile üretilmesiyle birlikte sensör performanslarında azalma gözlenmektedir. MEMS ataletsel sensörlerin, doğrulayıcı sensör veya sensörler ve hata telafi algoritmaları ile birlikte kullanılması, güvenilir bir navigasyon sonucu elde etmek için zorunluluk haline gelmektedir. Doğrulayıcı bir sensör ile MEMS ataletsel bir sensörü entegre etmek, devamlı ve güvenilir bir navigasyon çözümü sağlamak için farklı hata kaynaklarının karakteristiği ve bu hataların stokastik varyasyonunun anlaşılması büyük önem taşımaktadır [20]. Ataletsel sensörler deterministik hatalar ve rastgele hatalar olarak 2 tip hataya sahiptir [18]. Rastgele hatalar, önyargı kaymalarını veya ölçek faktörü kaymalarını [21] ve bu hataların zamanla değişme hızını içerir. Rastgele hatalar stokastik olarak modellenmek zorundadır. Deterministik hata kaynakları, bir laboratuvar ortamında belirli kalibrasyon prosedürleriyle ortadan kaldırılabilen önyargı ve ölçek faktörü hatalarını içerir [8]. Deterministik hatalar IMU hatalarının önemli bir parçasını oluşturur. Bu nedenle, deterministik hata tahmini ve telafi algoritmaları tasarımı, stokastik hata telafi algoritmalarından daha önemlidir ancak önyargı kararsızlığı hata telafisi uzun süreli navigasyon uygulamalarında çok kritik hale gelmektedir bu nedenle deterministik ve stokastik hata telafisi birlikte değerlendirilmelidir [19]. Deterministik ve stokastik modelleme arasındaki temel fark, deterministik modellemede bir veya daha fazla girdi ile bir veya daha fazla çıktı arasında ilişki kurulması gerektiğidir, oysa stokastik modellemede girdi ve çıktı arasında doğrudan bir ilişki olmayabilir [25]. Bununla birlikte, MEMS sensörleri gibi düşük maliyetli sensörler için, önyargı ve ölçek faktörü hataları oldukça büyüktür ve sık kalibrasyonu bir gereklilik haline getiren çevresel faktörlere özellikle sıcaklığa bağımlılık nedeniyle tekrarlanabilirlikleri tipik olarak zayıftır [22]. Daha açık olarak, önyargı ve ölçek faktör hata değerleri kalibrasyon işleminde ve çalışma sırasında çalışma sıcaklığından kaynaklı farklılık gösterir [23]. Bu nedenle, çalışma zamanı ve gerçek zamanlı olmayan uygulamalar için kullanılacak doğru, güvenilir ve verimli termal modellerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu hatalar zamanla

biriktiğinden, hem ivmeölçer hem de jiroskop önyargı hatası için termal varyasyonlar ve ölçek faktörleri modellenmez ve telafi edilmezse konum doğruluğu düşer [24].

Deterministik kalibrasyon mükemmel bir şekilde yapılsa bile, tekrarlanabilirlik sorunları nedeniyle pratikte pek olası olmayan atalet sensörlerinin bağımsız kullanımıyla doğru navigasyon performansı elde edilemez [26]. Atalet sensörleri tipik olarak bu nedenle GPS (Global Position System) [27, 28], lazer[29], odometri[30] gibi doğrulayıcı sensörlerle birlikte kullanılır . Doğrulayıcı sensörler arasında GPS sensörleri en yaygın kullanılan sensördür [31]. GPS sensörü daha doğru navigasyon bilgisi sağlayabilir ancak gerçek zamanlı navigasyon gerektiren sistemlerde düşük güncelleme hızı ve kırılğan/hassas yapısı (uydu sinyallerinin ulaşamadığı durum gibi) nedeniyle tek başına yeterli değildir [32]. Özellikle iç mekanlarda GPS sensörü çalışamaz hale gelebilir. Bu nedenle, ataletsel sensörün gerçek zamanlı navigasyon kapasitesinin avantajını ve düşük frekanslı GPS sensör navigasyon doğruluğunu birleştiren yerleştirme sistemleri kullanılmaktadır.

Kalman filtresi ve onun varyasyonları ataletsel navigasyon ve GPS sensörünü entegre eden sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır [33]. Kalman filtresi, karesi alınmış hatanın ortalamasını en aza indirecek şekilde bir sürecin durumunu tahmin etmek için yinelemeli bir dizi matematiksel denklemlerdir [16]. Kalman filtresinin sistem modeli, ölçüm modeli, durum vektörü, ölçüm vektörü ve hata kovaryansı olarak tanımlanan 5 önemli elemanı vardır [17]. Durum vektörü Kalman filtresi tarafından hesaplanan ve doğrudan ölçülemeyen parametredir. Sistem modeli, Kalman filtresi durumlarının ve hata kovaryans matrisinin zamanla nasıl değiştiğini açıklar. Ölçüm modeli, sistem durumu ile ölçümlerin arasındaki matematiksel ilişkiyi belirtir. Ölçüm vektörü, ölçüm modeline göre anlık ölçüm değerleri içerir. Hata kovaryans matrisi durum tahmininde ve ölçümlerindeki belirsizlikleri belirtir. Kalman filtresinin düzgün çalışmasını sağlamak için hataların ölçülmesi ve işlenerek hata modeli oluşturulması gerekmektedir [12]. GPS sensörü ve ataletsel navigasyon sistemini entegre etmek için kullanılan Kalman filtre tasarımının ilk adımı stokastik hata modelin oluşturulması ile Q matris tasarımıdır ve farklı sıcaklıklarda stokastik değişimi karakterize etme süreci güvenilir ve düşük maliyetli bir entegre navigasyon sistemi geliştirmede en önemli adımlardan biridir [8]. Önyargı ve ölçek faktörü hatasının değeri, çalışma zamanı sensör sıcaklığı ve kalibrasyon esnasındaki sensör sıcaklığı arasındaki fark nedeniyle dinamik çalışma anında kalibrasyon işlemi (altı pozisyon testi) yoluyla elde edilen değerden farklıdır [23].

Güvenilir bir ataletsel navigasyon için ataletsel sensörün çeşitli açısal hızlarda dinamik durum anındaki hatalarının, test ortamının sıcaklığı kontrol edilerek tüm muhtemel çalışma sıcaklıkları ile ilişkilendirilmesi ve modellenmesi gerekir. Öncelikle dinamik testlerin gerçekleştirilebilmesi için insan bacak ve kol açısal hareket benzeşimini yapabilecek kontrol kabiliyetine, yüksek hassasiyete ve tepki süresine sahip bir elektro-mekanik test cihazına ihtiyaç duyuldu.

Bu tez çalışmasında insan kol ve bacak açısal hareket benzeşimini mekanik olarak üretebilen bir test cihazı üretildi. Optik referans sistemiyle belirli açısal hızlarda cihaz kalibre edildi. IMU sensörü için mobil bir veri toplama sistemi geliştirildi. Sensöre 6 pozisyon testi uygulandı ve deterministik hata telafisi gerçekleştirildi. Test cihazı kullanılarak simüle edilen insan kol ve bacak açısal hareketlerinin doğası gereği oluşan fiziksel etkilerin ve deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ile dengeye gelen sensör sıcaklığının stabilitesinin, ataletsel sensör hata dağılımları üzerindeki etkisi incelendi.

## **2.2 Ataletsel Sensör Hatalarıyla İlgili Akademik Çalışmalar**

Mikromekanik tabanlı ataletsel sensörlerde standart test ve kalibrasyon prosedürü oluşturmayı amaçlayan bir çalışmada, 3 eksenli ADXL105 ivmeölçer ve 3 eksenli ADXRS150 jiroskop kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sensöre, 6 pozisyon testi, açısal hız testi, olasılıksal modelleme ve termal test aşamaları uygulanarak sensör ölçümleri sıcaklık parametresiyle ilişkilendirilerek termal hata modeli yapılmıştır. Çalışmada oluşturulan hata modeli genişletilmiş kalman filtresine uygulanmıştır. Modelin uygulandığı filtre sonuçlarını doğrulamak için referans sistem olarak daha yüksek hassasiyete sahip GPS (Global Positioning System) destekli başka bir IMU sensör kullanılmış ve araştırmanın gerçekleştiği üniversite kampüsündeki bir park alanında dolaşarak test edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, kabul edilebilir navigasyon sonuçları elde etmek için deterministik hataların kalibre edilmesi ve telafi edilmesi gerektiği, yanlışlık hatasının en baskın hata olduğunu ve ölçek faktörü ile yanlış hizalama hatasının yanlışlık hatası kadar önemli olmadığı, oluşturulan termal modelin uygulandığında sensör navigasyon hatalarında azalma görüldüğü belirtilmiştir. Bu çalışmada termal varyasyonların yanlışlık ve ölçek faktörü hataları üzerindeki etkilerinin mikromekanik tabanlı ataletsel sensörler için önemli olduğunu ve hassas bir şekilde modellenmesi gerektiğini ancak termal model kullanılarak elde edilen iyileştirmenin, ham verilerdeki toplam sıcaklık değişimine bağlı olduğunu vurgulamıştır [8].

Ataletsel sensörlerde deterministik ve olasılıksal hata parametrelerinin tespit edilmesini amaçlayan başka bir çalışmada 3 eksenli Colibrys MS9000 D serisi ivmölçer ve 3 eksenli ADIS16100 jiroskop sensörü uçuş hareket simülatörüne bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. En uygun deterministik kalibrasyon yöntemini tespit etmek amacıyla sensöre 6 pozisyon testi ile çoklu döndürme ve pozisyon testi uygulanmış ve deterministik modelleme için optimum test yönteminin çoklu döndürme ve pozisyon testi olduğunu belirtilmiştir. Deterministik hataların telafisinden sonra geri kalan hatalar, olasılıksal hatalar rastgele gürültü hataları ve jiroskop/ivmeölçer yanlılık hataları olarak iki gruba bölünmüştür. Olasılıksal yanlılık hataları Gauss-Markov denklemleri kullanılarak modellenmiş ve oluşturulan model Kalman filtre algoritmasına uygulanarak sensör ölçümlerinde iyileştirme yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, deterministik hatalar ataletsel sensörlerin en önemli parçası olduğu bu nedenle deterministik hataların tahmin ve telafi eden algoritmaların olasılıksal hataları tahmin ve telafi eden algoritmalarından daha kritik olduğu, ancak olasılıksal yanlılık hatalarının telafi edilmesinin uzun süren ölçümlerde çok önemli hale geldiğini ve bu nedenle deterministik ve olasılıksal hataların birlikte incelenmesi gerektiği belirtilmiştir. Gelecek çalışmalar için, deterministik ve olasılıksal hata telafi algoritmalarının mikroişlemeçiler üzerinde çalışma zamanında hesaplanmaya hazır olmadığını ve bu algoritmaların gömülü kodlara mutlaka çevrilmesini ve mikromekanik tabanlı sensörler için sıcaklık etkisinin modellenmesini önermiştir [19].

Ataletsel sensör ve manyetometrelerin deterministik ve olasılıksal hatalarını modellemeyi amaçlayan diğer bir çalışmada orta performanslı ve düşük maliyetli olarak belirtilen 9 serbestlik derecesine sahip MicroStrain 3DM-GX2 ve Xsens MTx sensör modülleri kullanılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde belirtilen sensör modülleri bir uçuş hareket simülatörü üzerinde kontrollü deneyler sonucunda deterministik hata modellemesi ve kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Jiroskop deterministik hata modellemesi için kullanılan açısal hız kontrol cihazlarına olan gereksinimi ortadan kaldıran yeni bir yöntem önerilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, mikromekanik tabanlı ataletsel sensörlerin olasılıksal hatalarının modellenmesi amaçlanmıştır. Sensör ölçümlerinin içerdiği baskın gürültü tipleri belirlendikten sonra, bu gürültülere ilişkin model parametrelerinin kestirimi için evrimsel ve gradian-tabanlı eniyileme algoritmaları kullanılmış ve sonuçlar Allan varyansı yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, çalışmada önerilen jiroskop sensörünü açısal hız kontrol cihazına ihtiyaç duymadan sahada kalibre

edilebilecek yöntemin yeterli doğrulukta modelleme yapabildiği, üreticiler tarafından dikkate alınan sıcaklığın yanlışlık kararlılığı üzerinde kötüleştirici bir etkisinin olabileceği fakat çalışmada farklı ortam sıcaklıklarında deneylerin tekrarlama şansı olmadığı için yanlışlık kararlılığının sıcaklıkla değişimi hakkında herhangi bir gözlem oluşturulmadığı, Xsens sensör dökümanında belirtilen yanlış hizalama hatasının tüm sensörler için 0.1 derece olduğu fakat yapılan testlerde bu hatanın üzerine çıktığı ve jiroskop için farkın 0.05 derece iken ivmeölçer için bu farkın üç katı daha fazla olduğu belirtilmiştir [12].

Mikromekanik sistem çalışma prensibine sahip jiroskop sensör çipinin içerisine doldurulan termal gaz ile sıcaklık değişimini sabitleyerek ölçek faktörü ve sıcaklık bağımlı önyargı hatalarını düşürmeyi amaçlayan bir çalışmada, uygulanan yöntemin diğer algoritma tabanlı sıcaklık telafi yöntemlerine göre daha performanslı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada sıcaklık tabanlı hataların jiroskop performansına büyük ölçüde zarar verdiği bu nedenle sensör doğruluğunu sağlamak için sıcaklık telafisi yöntemini araştırmanın çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada, çalışma sıcaklığı ile ortam sıcaklık farkını korumak için sabit voltaj devresi yerine sıcaklık farkını koruyan bir voltaj devresi kullanılarak bir termal sürüş teknolojisi önerilmiştir. Önerilen yöntemde, sensör çalışma düzleminde oluşturulmuş ve içerisine termal gaz doldurulmuş sızdırmaz mikro oda ve oda üzerinde asılı duran 3 ısıtıcı tel ile 4 termistör (sıcaklıkla değişen direnç) devre elemanı bulunmaktadır. Termistörler sıcaklık farkını koruyan elektronik devrenin operasyonel yükselteci (Op-Amp) ayar bacalarına bağlıdır ve ısıtıcı tele bağlı olan çıkış gerilimini değiştirmektedir. Çalışmada 15 °C ile 55 °C sıcaklık aralığındaki 5 farklı ortam sıcaklığında test edilmiş, ölçek faktörü hatası 4903ppm/°C değerinden 960 ppm/°C değerine ve sıcaklık bağımlı önyargı hatası 5.4 °/s/°C değerinden 1.4 °/s/°C değerine düştüğü belirtilmiştir[35].

## 3. YÖNTEM

### 3.1. Doğru Akım Elektrik Motorları

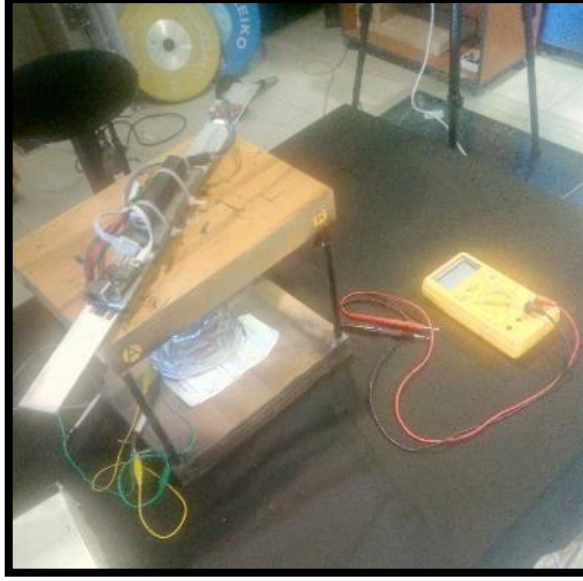
Doğru akım motorları, doğru akım elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Bir iletken doğru akım verildiğinde iletken etrafında sabit bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alanın bir mıknatıs gibi kuzey ve güney kutupları vardır. Bu kutuplar, birbirini ittiği ya da zıt kutupların birbirini çektiği bir mıknatıs etkisi gösterir. Doğru akım motorları bu prensibi kullanarak, statorunda oluşturulan sabit manyetik alan ile rotorunda oluşturulan sabit manyetik alanın birbirini itmesi ve çekmesi ile mekanik enerji üretir. Sürekli olarak stator ekseninde belirli bir açıda manyetik alan oluşturan sargıya sıralı olarak enerji verildiğinde açısal hareket sürekli olarak devam eder. Rotorda oluşan açısal hareket rotora bütünleşik olan motor şaftına aktarılır ve motor şarfinda oluşan mekanik enerji motorun dışına aktarılır.

Doğru akım motorları, motorun stator sargılarına uygulanan gerilim genliği kullanılarak kontrol edilir. Uygulanan gerilim genliğinin değişmesiyle motorun açısal hızı azalır veya yükselir. Sadece besleme uçlarına uygulanan gerilim genliğinin değişmesi ile kontrol edilebilen bu motor tipinde oluşan açısal hareket analog ve sürekli dir. Fakat doğru akım elektrik motorlarında açısal hız kontrol hassasiyeti düşüktür. Doğru akım motorunun tepki süresi hızlıdır.

Step motor, tam bir dönüşü daha küçük açılarda dönüşlere bölebilen fırçasız bir doğru akım motordur. Step motorlar tork ve hız açısından uygulamaya doğru şekilde boyutlandırıldığı sürece, adımlardan birinde hareket etme ve tutma komutu verilebilir. Step motorlarının kontrolü için sayısal sinyalizasyon yöntemleri kullanılır bu nedenle mikrodenetleyicilerle doğrudan sürülebilir. Bu nedenle açısal hız kontrol hassasiyeti yüksek motorlardır fakat buna karşı yaptıkları açısal hareket sayısal ve kesiklidir.

#### 3.1.1. Motorun Belirlenmesi

Tasarımın ilk aşamasında açısal hareketi gerçekleştirebilmek için analog sürülen bir doğru akım elektrik motoru (Robert Bosch BSX 04 372, Almanya) kullanıldı. Doğru akım motoruna ahşap bir yataklama yapıldı (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Doğru akım motorlu test cihazının genel görünümü

Dönüş hareketi 8 kameralı (Vicon Bonito, Birleşik Krallıklar) 3–boyutlu hareket yakalama sistemi (Vicon Blade yazılım versiyon 2.6.1, Birleşik Krallıklar) kullanılarak (Şekil 3.2) motor üzerinde performans testleri gerçekleştirildi.



Şekil 3.2: Test cihazı için deney ortamı

Gerçekleştirilen denemelerde analog kontrollü doğru akım motorunun, fren ve kalkış kontrolünün insan kol ve bacak hareket benzişimi açısız hareket yapabilecek kabiliyetinde olmadığı görüldü.



İnsan kol ve bacak hareket benzeşimlerinin sensöre uygunlanması için analog kontrollü doğru akım motorunun uygun olmadığına karar verildi. Açık kontrollü olduğu için kontrol kalibreyi ve tepki süresi daha gelişmiş olan ve sayısal olarak kontrol edilebilen bir step motor kullanılmasına karar verildi.

### **3.2. Ataletsel Sensörün Belirlenmesi**

Çalışma için farklı IMU sensörlerin ölçüm hızı, hassasiyeti ve fiyatları karşılaştırıldı. Öncelikle içerisinde 9 serbestlik derecesine sahip MPU9250 (TDK InvenSense, Amerika Birleşik Devletleri) sensörü incelendi. Bu sensör modül (Sparkfun Razor M0, Amerika Birleşik Devletleri) olarak satın alındı.

Sensörün seçilmesinde iyi bir belgelendirmeye sahip olması ve bu alanda daha önce yayınlanan birçok akademik çalışmalarda kullanılmış olması bu sensörün öncelikle incelenmesinde etkili oldu. MPU9250 ataletsel sensörü; ivmeölçer ve jiroskop sensöründen oluşan MPU6050 çipi ve manyetometre sensörü olan AK8963 çipinin birleşiminden oluşur. Çip I2C protokolü ile Hızlı Mod 400kHz frekansında iletişim kurar. Jiroskop ve ivmeölçer çıkışlarında 16 bitlik analog sayısal çevirici donanım bulunur. İvmeölçer ve jiroskop sensörleri 1kHz frekansına kadar veri toplayabilir ve çip içerisinde dahili 20kHz frekans osilatör bulunur. Çip içerisinde 512 bayt büyüklüğünde FIFO (First In First Out) yapısında bellek bulunur.

Sensör özellikleri göz önüne alındığında MPU9250 sensörü günümüzdeki teknolojinin gerisinde kaldığı ve sensörü üreten şirketin web sayfasında da bu sensörün yeni tasarımlar için kullanılmamasının önerildiği görüldü. Çalışmanın daha güncel bir IMU (Inertial Measurement Unit) sensörü ile yapılmasına karar verildi.

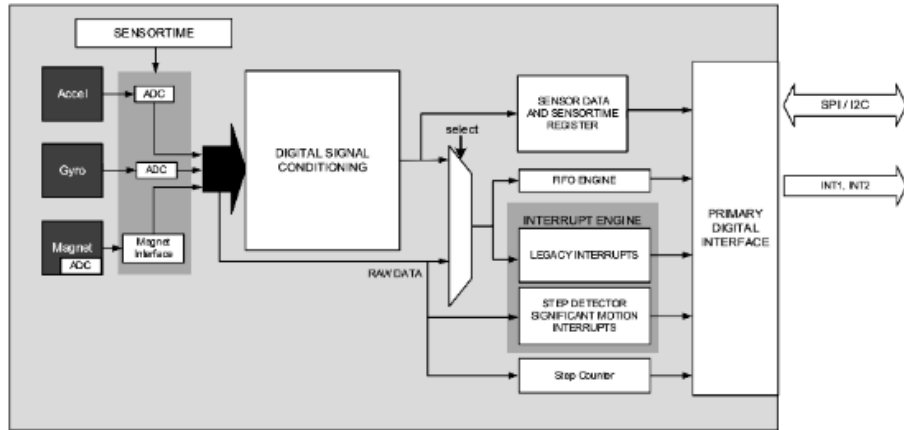
İkinci olarak 2018 yılında piyasaya sürülen daha güncel bir sensör (Bosch Sensortec BMX160, Almanya) incelendi (Şekil 3.3). BMX160 sensörü ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinden oluşan BMI160 çipi ve manyetometre sensöründen oluşan BMM150 çipinin birleşiminden oluşur. BMX160 sensörü 3 sensörün birleşimiyle 9 serbestlik derecesine sahiptir.



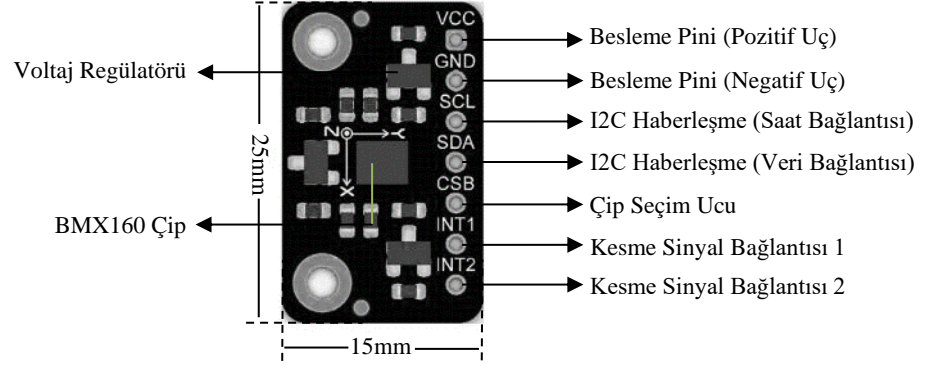
Şekil 3.3: BMX160 IMU Sensörü

Sensörün seçilmesinde iyi belgelendirilmiş olması, ölçüm hassasiyetinin yüksek olması ve hazır modül şeklinde satın alınabilmesi etkili oldu. I2C iletişim protokolünü destekler ve 1 MHz frekans hızına çıkabilir. Jiroskop ve ivmeölçer çıkışlarında 16 bitlik analog sayısal çevirici donanım bulunur. Sensör içerisinde yer alan jiroskop sensörü 6400 Hz frekans hızında ve ivmeölçer sensörü 1600 Hz frekans hızına kadar desteklemektedir.

Doğrulamayı sensör olarak kullanılabilen manyetometre sensörü, diğer sensörlerden farklı olarak sensör içerisinde ayrı bir çip olarak konumlanmıştır (Şekil 3.4). İvmeölçer ve jiroskop sensörünü oluşturan BMI160 çipi manyetometre sensörünü barındıran BMM150 çipi ile sensör içi dahili bağlantı hattı sayesinde haberleşir. Dahili bağlantı hattı üretici tarafından varsayılan olarak I2C haberleşme protokolüne ayarlıdır.



Şekil 3.4: Sensörün iç yapısı



Şekil 3.5: Gravity V1.0 modülü

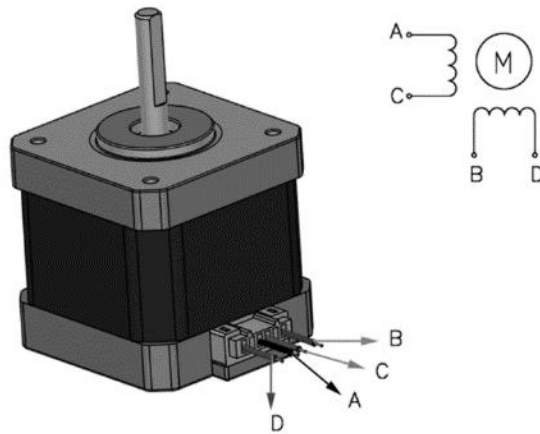
BMX160 sensörü modül (DFRobot Gravity V1.0, Çin) şeklinde satın alındı. Modül üzerinde I2C haberleşme protokolü bağlantıları, kesme sinyal bağlantıları, adres ayarlama bağlantıları bulunmaktadır (Şekil 3.5).

### 3.3 Deney Düzeneği Tasarımı

#### 3.3.1 Elektro-mekanik Elemanlar

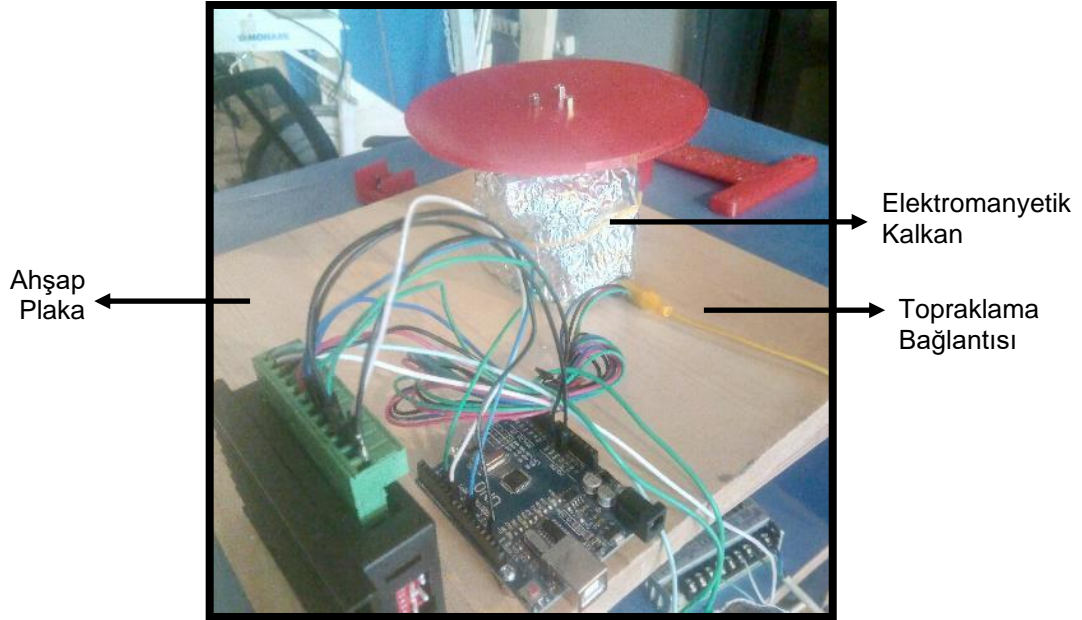
##### 3.3.1.1 Step Motor ve Bağlantı Elemanı

Tasarlanan elektro-mekanik test cihazında döndürme hareketini sağlamak için 2 kutuplu 1.8 derece adım açısına sahip Nema 23 modeli step motorun kullanılmasına karar verildi (Şekil 3.6).



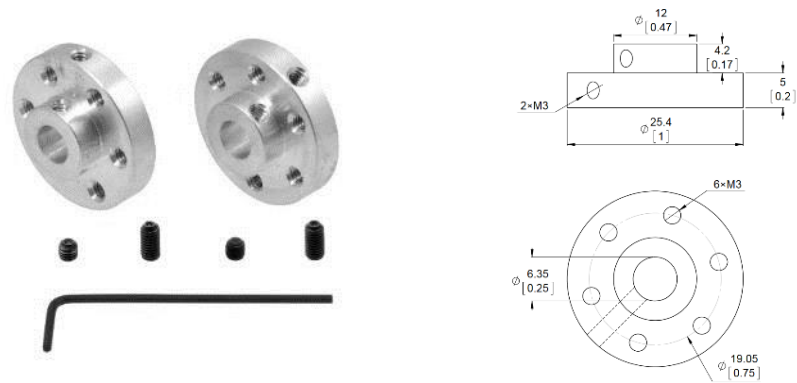
Şekil 3.6: Nema 23 Step Motor

Step motor titreşimlerini en aza indirmek için bir ahşap plakaya vidalandı. Motorun çalışma zamanında ürettiği manyetik alan etkilerinin en aza indirilmesi ve sensörü etkilememesi için step motorun gövde kısmı alüminyum malzeme ile çerçvelendi ve çerçeveleme için kullanılan malzeme topraklandı (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Motorun alüminyum malzemeyle kaplanması

Motorda üretilen açıl hareketin tasarlanan tabla parçasına iletecek bağlantı elemanına ihtiyaç duyuldu. Bağlantı elemanı olarak motorun 6.35 milimetre şaft çapına uyumlu bir motor bağlantı elemanı (Polulu, Amerika Birleşik Devletleri) kullanıldı (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Şaft bağlantı elemanı [11]

### 3.3.1.2 Tasarlanan Mekanik Bağlantı Elemanları

#### 3.3.1.2.1 Elemanların Üretilmesiyle İlgili Ön Çalışmalar

3 boyutlu baskı veya diğer bir adıyla eklemeli üretim, bir CAD (Computer-aided design) modelinden 3 boyutlu bir nesnenin oluşturulmasıdır [9]. 3 boyutlu baskı için kullanılan 3 boyutlu yazıcılar malzemenin bir araya eklendiği (plastikler, sıvılar veya toz tanecikler gibi), tipik olarak katman katman, bilgisayar kontrolü altında malzemenin biriktirildiği, birleştirildiği veya katılaştırıldığı çeşitli işlemlerde yapılabilir.

Üç boyutlu yazdırma işlemini gerçekleştirmek için üretilecek parça veya parçaların 3 boyutlu tasarım programı yardımıyla bilgisayar ortamında model verileri oluşturulur. Model verileri çoğunlukla STL (Standard Triangle Language) formatında dosyalardan oluşur ve 3 boyutlu yazıcı tarafından bu dosya format okunabilir. 3 boyutlu yazıcıya gönderilen model verileri dilimlerin “G kodu” adı verilen ve her katmana ait baskı yapan uca ait yön ve hız bilgilerini barındıran dosyalara dönüştürülür. 3 boyutlu yazıcılar dilimlere işleminden sonra kullanılan baskı malzemenin eriyeceği sıcaklığa ulaşır ve baskı kafası malzemeyi eritme sıcaklığına ulaştığında baskı işlemi başlar.

Deney tablası ve mekanik bağlantı elemanları (Blender Vakfı Blender Yazılımı versiyon 3.2, Hollanda) kullanılarak tasarlandı. Tasarımlar 3 boyutlu (Arçelik PT1000, Türkiye) yazıcısı ile üretildi (Şekil 3.9). Yazıcı 38 santimetre derinliğinde 38.8 santimetre genişliğinde ve 40.5 santimetre yüksekliğinde 3 boyutlu bir parça üretebilecek kapasiteye sahiptir.

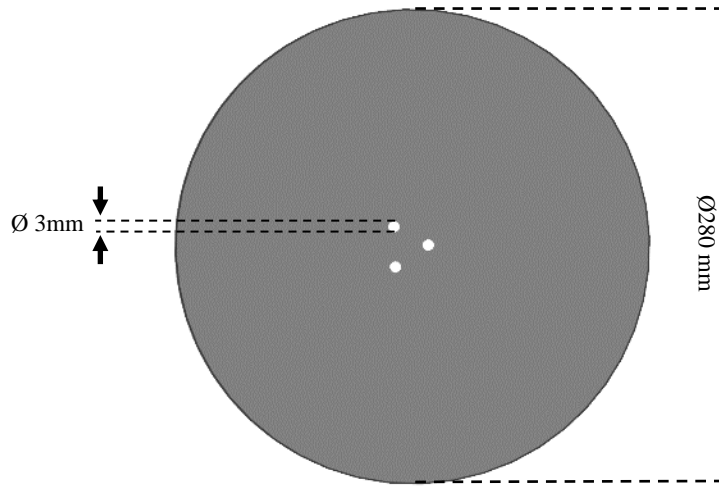


Şekil 3.9: Arçelik 3B Yazıcı

Tasarlanan elemanlar Arçelik 3B yazıcı kullanılarak PLA tipi malzeme türüyle üretildi. Katman kalınlığı 0.3 milimetre ve baskı hassasiyeti 0.20 milimetre olarak ayarlandı.

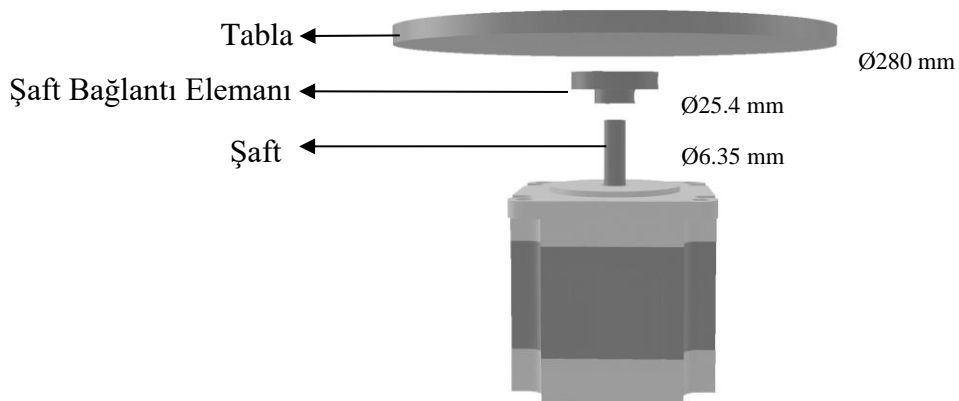
### 3.3.1.2.2 Deney Tablası

Step motordan üretilen kontrollü açısal hareketin sensöre uygulanması ve dönüş ekseninden belirli bir mesafede sensörü sabitleme amacıyla tabla parçası üretildi. Deney tablası dayanımının yüksek olması amacıyla %80 doluluk oranı ile üretildi (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Tabla elemanı

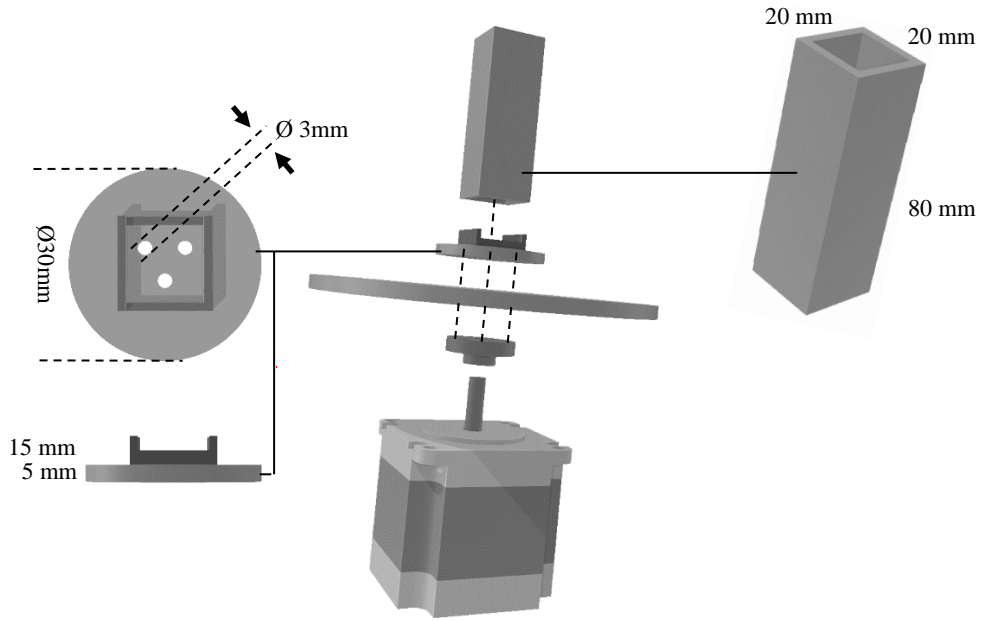
Tablanın ortasında yer alan sabitleme delikleri Bölüm 3.3.1.1’de belirtilen bağlantı elemanına uygun olarak açıldı. Sabitleme delikleriyle şaft bağlantı elemanına sabitlendi (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Tabla elemanının montajı

### 3.3.1.2.3 Güç Bataryası Sabitleme Bağlantı Elemanları

Tabla üzerindeki en ağır parça olan güç bataryasının tam olarak motor dönüş ekseninin üzerine dik olarak sabitlenmesi için bataryanın yerleşeceği 2 parçalı bir tasarım yapıldı (Şekil 3.12). Bu parçalar sayesinde güç bataryasının ağırlığı tam olarak motor şaftı üzerine yüklenerek deney tablasının dönüşünü etkilemesi en aza indirildi.



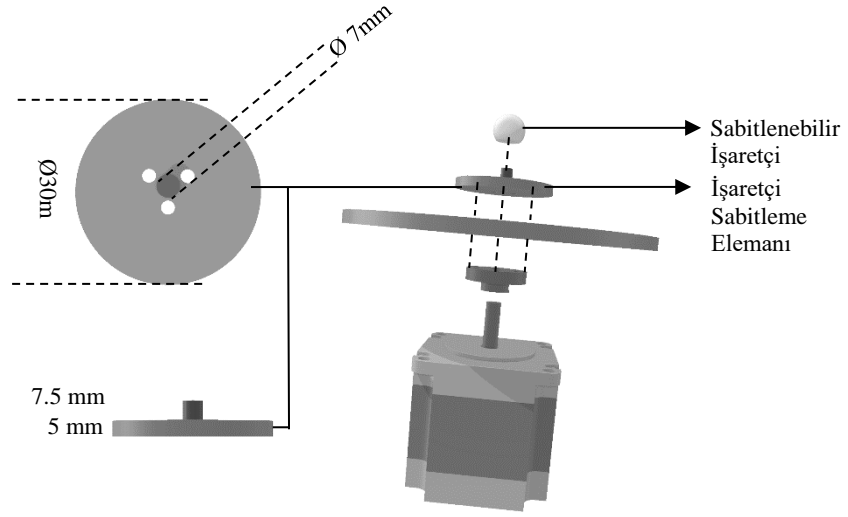
Şekil 3.12: Güç bataryası sabitleme bağlantı elemanları

### 3.3.1.2.4 Sabitlenebilir İşaretçi

Deney tablasının orta noktasının referans sistem kameraları tarafından tespit edilebilmesi için tasarlanarak üretildi. İşaretçi 10 milimetre çapında tasarlanarak işaretçinin üzeri yansıtıcı yüzey kâğıdı (3M Scotchlite 8940, Amerika Birleşik Devletleri) ile kaplandı. İşaretçi; sabitleme parçasına yerleştirilebilir olması için işaretçinin tabanında 5 milimetre çapında ve 7 milimetre çapında yuva boşluğu tasarlandı.

### 3.3.1.2.5 İşaretçi Sabitleme Elemanı

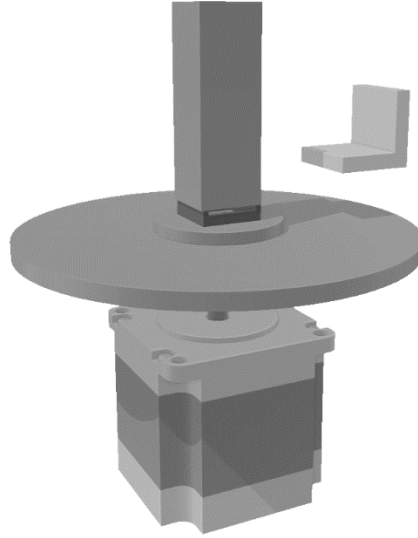
Deney düzeneğinin kalibrasyonu için işaretçinin tam olarak dönüş ekseninde sabitlenmesini sağlamak amacıyla üretildi (Şekil 3.13). Eleman 30 milimetre çapında tasarlandı. Elemanın ortasında yer alan sabitleme delikleri Bölüm 3.3.1.1’de belirtilen bağlantı elemanına uygun olarak açıldı. Elemanın orta noktasına 7 milimetre çapında yuva tasarlandı. Tasarlanan yuva üretilen sabitlenebilir işaretçinde tasarlanan yuva boşluğuyla uyumlu üretildi.



Şekil 3.13: İşaretçi sabitleme elemanı

### 3.3.1.2.6 Sensör Sabitleme Elemanı

Sensörün deney tablası üzerine yaw, pitch ve roll açısız eksenlerinde sabitlenebilmesi amacıyla üretildi (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Sensör sabitleme elemanı



### 3.3.1.3 Sürücü Kontrol Kartı

Step motor sürücü entegresi, bir geri besleme sistemi olmadan bile hassas konum kontrolü ile sürekli dönüş yapabilen step motorları sürmek için özel olarak tasarlanmış entegrelerdir. Step motor sürücü kontrol kartı, darbe genişlik modülasyon sinyalini açısız yer değiştirme sinyaline dönüştürebilen bir devre kartıdır.

Step motorun sürülebilmesi için sürücü kontrol kartı (Toshiba TB6600, Japonya) kullanıldı (Şekil 3.15). İki kutuplu ve dört kutuplu step motorları sürmek için tasarlanmış olan TB6600 step motor sürücü kontrol kartı çalışma özellikleri Tablo 3.1’da gösterildi.

Tablo 3.1: TB6600 Özellikleri

Özellik	Değer
Çalışma Voltajı	9 – 40 Volt
Çıkış Akımı	0.7 – 4.0 Amper
Maksimum Frekans	20kHz
Devir Başına Darbe	200 - 6400
Giriş Sinyal Seviyesi	5 Volt TTL

Step motor sürücü kontrol kartının Tablo 3.1’da belirtilen özelliklerine ek olarak yüksek akım koruması, yüksek sıcaklık koruması vardır. Step motor sürücü kontrol kartı üzerinde 2 set şeklinde 6 adet DIP anahtar bulunur. Bu anahtarlar ile ikili sayı sistemine göre çalışır.

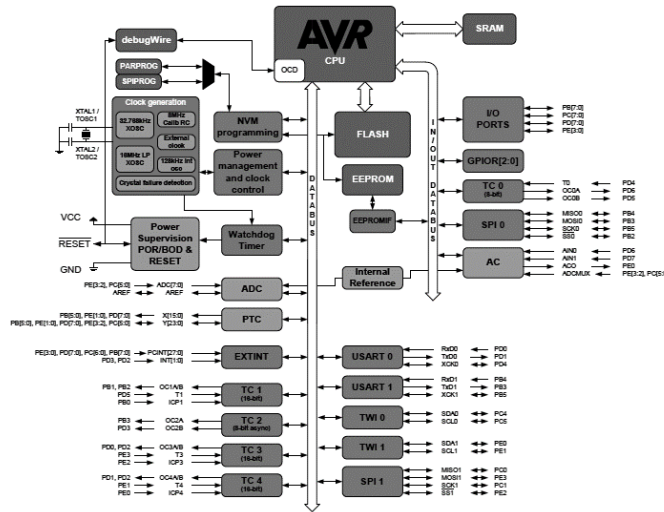
Anahtarlar kullanılarak akım koruma seviyesi ve adım bölücü değeri ayarlandı. Anahtarlar ile akım korumasına ait amper seviyesi 3.2 amper olarak belirlendi. Anahtarlar ile step motorun adım sayısı 32 değerine bölünerek 0.1125 derece değerine indirildi. Adım açısının indirgenmesiyle step motor kontrol hassasiyeti artırıldı.



Şekil 3.15: TB6600 Sürücü kontrol kartı

### 3.3.1.4 Elektronik Motor Kontrol Sistemi

Motor sürücü kart kontrolünün sağlanması için sayısal bir mikrodenetleyici (ATMEL, Amerika Birleşik Devletleri) kullanıldı (Şekil 3.16). Kullanılan mikrodenetleyicinin darbe genişlik modülü üretebilen donanıma sahiptir. Darbe genişlik modülü üreten mikrodenetleyicinin alt donanımı kullanılarak motor sürücü kartı kontrol edildi.



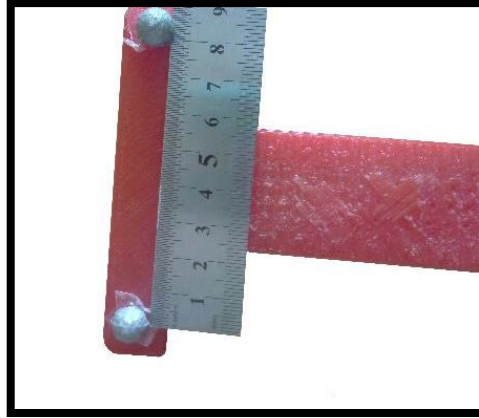
Şekil 3.16: ATMEGA328 Mikrodenetleyici iç yapısı

ATMEGA328 mikrodenetleyicisine sahip geliştirme kart modülü (Arduino UNO, İtalya) kullanıldı. Kullanılan modül ile kontrol bilgisayarı arasındaki iletişimde UART haberleşme protokolü kullanıldı ve haberleşme protokolü üzerinden gönderilen komutlar ile motor sürücü kontrol kartına deney komutları, açılma hız bilgileri ve kalkış ivmesi bilgileri gönderildi.



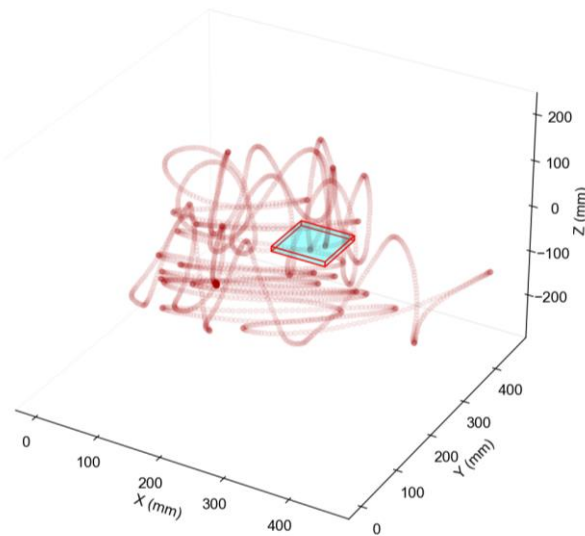
### 3.5 Referans Sistemin (Optik) Hassasiyetinin Belirlenmesi

Test cihazının kalibrasyonunda referans sistem olan optik yakalamam sisteminin hassasiyetinin tespit edilebilmesi için hassasiyet testi uygulandı. Öncelikle referans sistem üzerinde 5 adet işaretçi bulunan T şeklinde kalibrasyon çubuğu kullanılarak kalibrasyonu gerçekleştirildi. Her bir kamera kalibrasyonu için 3000 örnek ve üzerinde veri toplandı. Toplanan veriler optik sistem yazılımı (Vicon Blade yazılım versiyon 2.6.1, Birleşik Krallıklar) kullanılarak kalibrasyonu işlemi gerçekleştirdi. Referans sistemin hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla 2 işaretçili bir test çubuğu üretildi (Şekil 3.19).



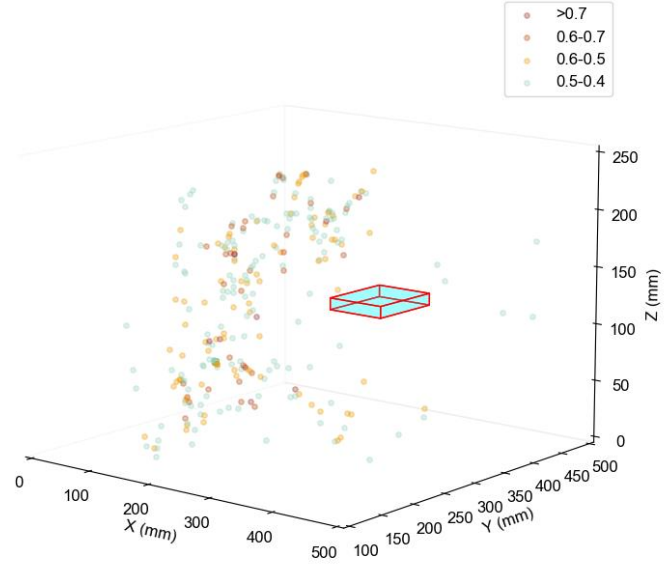
Şekil 3.19: 2 İşaretçili test çubuğu

Çubuğun üzerine iki adet 10 milimetre işaretçi sabitlendi ve çubuk ile test cihazının yerleştirileceği alan tarandı (Şekil 3.20).

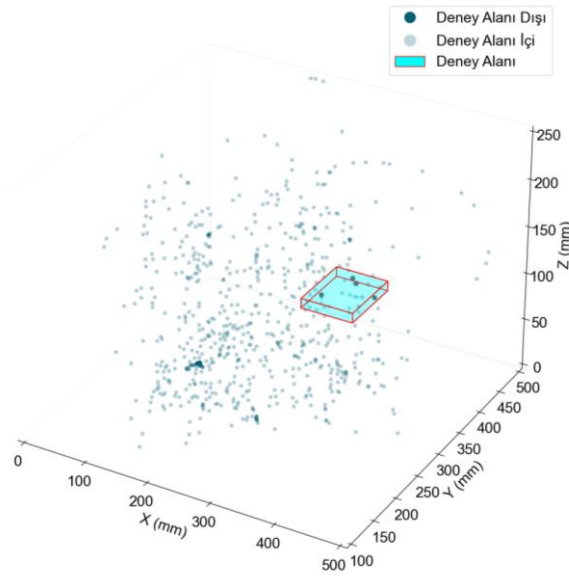


Şekil 3.20: Taranan alan ve deney alanı

Tarama işleminde optik sistem ile 240 Hz yakalama frekansında 320 saniye süresince veri toplandı. İki işaretin arasındaki mesafe olan çubuk uzunluğu ile çubuğun gerçek uzunluğundan çıkartılarak hata hesaplandı.



Şekil 3.21: 0.4 milimetre ve daha yüksek hata yaptığı noktalar



Şekil 3.22: 0.4 milimetreden daha düşük hata hesaplanan noktalar

### 3.6 Referans Sistem ile Deney Düzenegi Kalibrasyonu

Kalibrasyonu yapılacak açisal hız değerleri belirlenirken insan hareketler limitleri ve İzokinetik dinometre cihazı ile yapılan test hızları baz alındı. Kalibrasyonu yapılan açisal hızlar Tablo 3.2’da gösterildi. Bulgular bölümünde sensör ölçüm hatalarının hesaplamasında referans sistem ile kalibre edilen açisal hızlar dikkate alındı.

Tablo 3.2: Test cihazının kalibre edildiği açisal hızlar

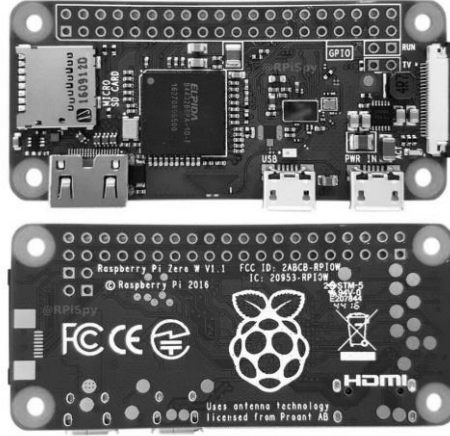
Hız	Açisal Hız (°/s)	Alınan Yol (mm)
1	36	22.6188
2	45	28.2735
3	90	56.547
4	126	79.1658
5	144	90.4752
6	180	113.094

### 3.7 Veri Toplama Sistemi

Sensörün yüksek hassasiyette ölçüm yapabilmesi ve çalışmanın güvenilirliğinin artırması amacıyla veri toplama sisteminin sensörden mümkün olan en yüksek frekansta veri toplanması amaçlandı. Ölçümlere IMU sensördeki dahili 24 - bitlik zamanlayıcı donanım bilgiside eklenerek tam ölçüm anına ait zaman bilgisi elde edildi.

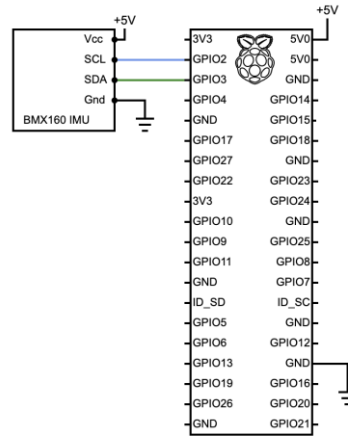
#### 3.7.1 Raspberry Pi Konfügrasyonu

Sensöründen veri toplamak tek kart yapısında olan bir bilgisayar (Raspberry Pi Derneği Raspberry Pi Zero 2, Birleşik Krallıklar) kullanıldı. Şekil 3.23’de Raspberry Pi Zero 2 bilgisayarına ait pin çıkışları gösterildi.



Şekil 3.23: Raspberry pi bilgisayarı

Bilgisayara Unix tabanlı (Raspberry Pi Derneği Raspbian İşletim Sistemi Yazılımı 64-bit versiyon 5.15, Birleşik Krallıklar) kuruldu. İşletim sistemi tarafından varsayılan olarak 700MHz frekansına ayarlı olan osilatör frekansı 900MHz frekansına yükseltildi. Ayrıca işletim sistemi ile varsayılan olarak 100MHz frekansına ayarlı olan I2C iletişim frekansı 400MHz frekansına yükseltildi.



Şekil 3.24: Sensör ile Raspberry pi bilgisayar bağlantısı

### 3.7.2 IMU Konfigürasyonu

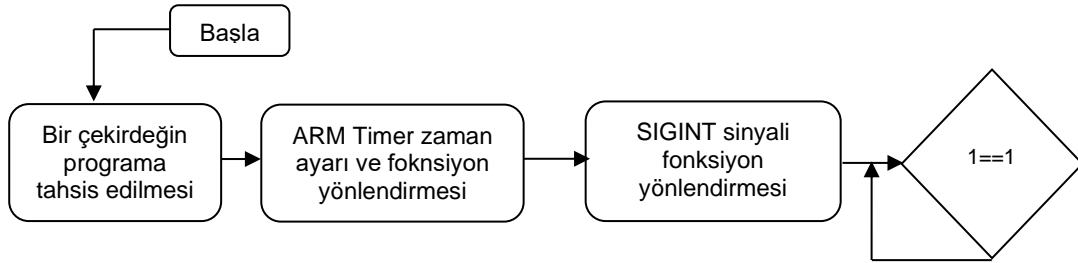
İvmeölçer, Jiroskop sensörlerine ait ölçüm aralığı (RANGE), veri çıkış hızı (Output Data Range – ODR) değerleri ayarlandı. Ayarlanan güç, ölçüm aralığı ve frekans değerleri Tablo 3.3’da gösterildi.

Tablo 3.3: Sensör ayarlamaları

Parametre	Kaydedici	Varsayılan	Yeni Değer
İvmeölçer PMU	0x03	Askıda (b00)	Normal (b01)
Jiroskop PMU	0x03	Askıda (b00)	Normal (b01)
İvmeölçer ODR	0x40	100Hz (b1000)	800Hz (b1011)
İvmeölçer RANGE	0x41	±2G (b0011)	±4G (b0101)
Jiroskop ODR	0x42	100Hz (b1000)	800Hz (b1011)
Jiroskop RANGE	0x43	±2000°/s (b000)	±500°/s (b010)

### 3.7.3 Veri Toplama Yazılımı

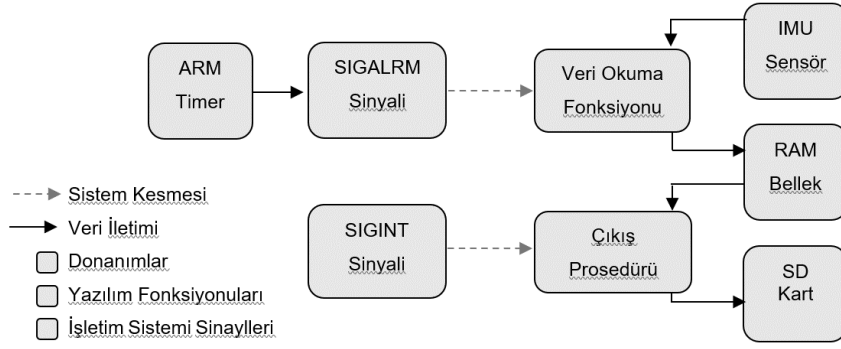
Veri toplama yazılımında veri toplama zamanlamasının hassas olması amacıyla sistem osilatörüne bağlı ARM Timer donanımı kullanıldı. Veri toplama yazılımının çıkış prosedürünün işletilebilmesi için bir çıkış sinyali çağrısı olan SIGINT sinyali kullanıldı. Gerçekleştirilen ayarlamalardan sonra sonsuz döngü tanımlandı. Veri toplama yazılımına ait genel akış şeması Şekil 3.25’de gösterildi.



Şekil 3.25: Veri toplama yazılımı akış şeması

ARM zamanlayıcı donanımı deneylerin tümü için 380 Hz (2.8 milisaniye) frekansına ayarlandı. ARM zamanlayıcı tarafından kontrol edilen SIGALRM sinyali veri okuma fonksiyonuna bağlandı. Veri okuma fonksiyonu ile 0x0C sensör kaydedici adresinden itibaren 15 baytlık veri okunması sağlandı.





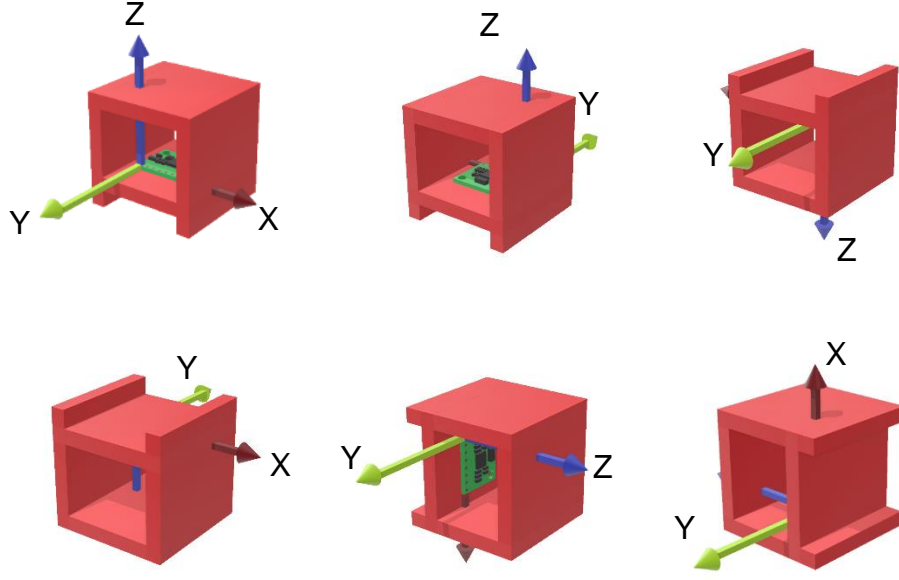
Şekil 3.26: Veri toplama yazılımı fonksiyonlarının çalışma yapısı

Veri toplama işlemini bitirmek için kullanıcı tarafından kontrol edilen SIGINT sinyali çıkış prosedürü fonksiyonuna yönlendirildi. Çıkış prosedürü fonksiyonu, veri toplama yazılımını kapatmadan önce tampon bellekteki tüm veriyi onaltılık sayı sisteminde bir yazı dosyasına kaydetmesi sağlandı. Veri toplama yazılımındaki fonksiyonların çalışma yapıları Şekil 3.26’da gösterildi.

### 3.8 IMU Test Prosedürü

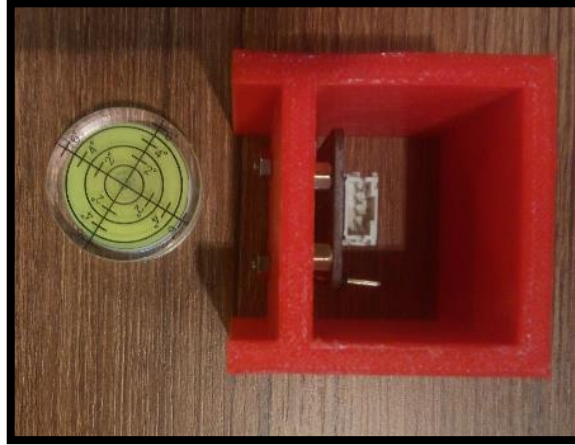
#### 3.8.1 Deterministik Hataların Düzeltilmesi

Kalibrasyon, cihaz çıktılarını bilinen referans bilgilerle karşılaştırma ve çıktıyı bir dizi çıktı değeri üzerinden referans bilgileriyle uyuşturmaya zorlayan katsayıları belirleme işlemidir. Hareketli platformların ataletsel navigasyondan üretilen konum, hız, yön ve tutumlarındaki hataları azaltmak için atalet aletlerinin kalibrasyonu gereklidir. Ataletsel navigasyondaki ilk adım ataletsel sensörün deterministik önyargı, ölçek faktörü ve yanlış hizalama hatalarını kalibre etmektir [8]. IMU’ları kalibre etmek için kullanılan yaygın yöntemler, öncelikle laboratuvar içi testler ve taktik dereceli IMU’lar gibi yüksek kaliteli sensörler için tasarlanmıştır. Bu testler genellikle belirli bir çerçeveye veya özel ekipmana hizalama gibi özel referansların kullanılmasını gerektirir. Altı konumlu statik test en yaygın olarak kullanılanlar arasındadır [34]. Altı pozisyon testi, ataletsel sistemin her ölçüm eksenini için dönüşümlü olarak yukarı ve aşağı bakacak şekilde düzeltilmiş bir masaya monte edilmesini gerektirir. Bir ortogonal sensör üçlüsü için toplam altı konum bulunur. Altı konumlu kalibrasyon doğruluğu, eksenlerin yerel seviye çerçevesinin dikey eksenleriyle ne kadar iyi hizalandığına bağlıdır. Doğru sonuçlar için mükemmel bir küp şeklinde montaj çerçevesi gereklidir.



Şekil 3.27: 6 Pozisyon deneyi konumları

Sensörün her pozisyonda sabit ve düz bir şekilde durabilmesi için Bölüm 3.3.1.2’de belirtilen 3 boyutlu yazıcı kullanılarak eleman üretildi (Şekil 3.28). Sensörün düz bir zeminde ölçüm yapıldığının kontrolü için su terazisi kullanıldı.



Şekil 3.28: Zemin kontrolü

Jiroskop ölçek faktörü ve yanlış hizalama hatalarının ölçülebilmesi için 3 ekseninde hareket kalibreyetine sahip açısal hızı hassas bir şekilde sabitlenebilir bir test cihazının olmaması sebebiyle bu hatalar ölçülemedi. Jiroskop ön yargı hatalarının hesaplanmasında, yüksek hassasiyete sahip optik referans bir IMU sensör olmadığından durağan haldeki dünya açısal hareketinin ölçülemedi ve ihmal edildi.

Sensör kılavuzunda [14] önyargı hataları ve yanlış hizalama hataları için belirtilen değerler gösterildi (Tablo 3.5).







Tablo 3.4: Sensör kılavuzunda belirtilen deterministik hata aralıkları

Sensör	Hata	Tüm eksenlerde
İvmeölçer (Lehimlenmiş çipler için)	Önyargı	$\pm 40$ mg
Jiroskop	Önyargı	$\pm 3$ °/saat
İvmeölçer	Yanlış Hizalama	$\pm 0.5$ °

### 3.8.1.1 İvmeölçer ve Jiroskop Ön Yargı Hataları

İvmeölçer önyargı hatalarının hesaplanmasında kullanılan altı pozisyon deney sonuçları (Tablo 3.6) ve hesaplanan önyargı hataları (Tablo 3.7) gösterildi.

Tablo 3.5: 6 pozisyon testi ölçümleri

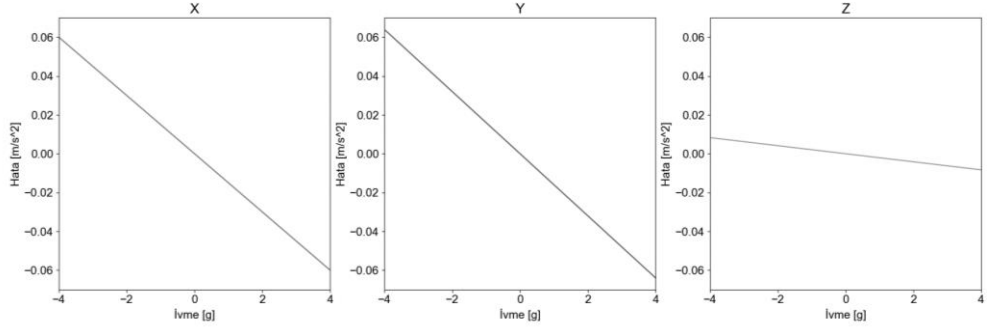
Pozisyon						
$a_x$	0.997g	0.006g	-0.002g	-0.999g	-0.007g	-0.000g
$a_y$	-0.009g	0.998g	0.001g	-0.009g	-0.998g	0.000g
$a_z$	0.004g	-0.01g	0.008g	0.005g	0.010g	-0.990g

Tablo 3.6: Önyargı hataları

Sensör	X Eksen	Y Eksen	Z Eksen
İvmeölçer	-1.247 mg	-0.222 mg	6.671 mg
Jiroskop	1.825 °/saat	1.712 °/saat	2.791 °/saat

### 3.8.1.2 İvmeölçer Ölçek Faktörü ve Yanlış Hizalama Hatası

Ölçek faktörü hatası sensör ölçüm aralıklarına göre oranlanmış olarak Şekil 3.29'da gösterildi. İvmeölçer önyargı hata hesaplamalarında, yerel yerçekimi sabiti [13] ( $g_1 = 9.77561$  m/s<sup>2</sup>) kullanıldı. Hesaplanan ivmeölçer ölçek faktörü hatası ve yanlış hizalama hatası Tablo 3.8'de gösterildi.



Şekil 3.29: Ölçek faktörü hatası

Tablo 3.7: İvmeölçer deterministik hataları

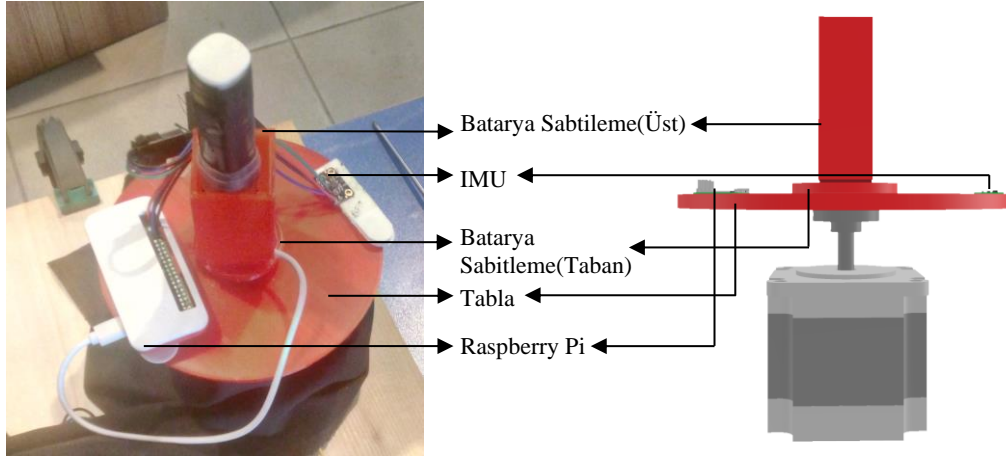
Sensör	Ölçek Faktörü Hatası (ppm)	Yanlış Hizalama Hatası (derece)
İvmeölçer	$\begin{bmatrix} 1.55 & 0 & 0 \\ 0 & 1.63 & 0 \\ 0 & 0 & 213 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0.460 & -0.02 \\ -0.460 & 0 & 0.048 \\ 0.024 & -0.048 & 0 \end{bmatrix}$

### 3.8.2 Sıcaklık Sensörü Deneyi

IMU Sensörü 16-bit çözünürlüğe sahip dahili sıcaklık sensörüyle sıcaklık parametresi ölçüldü. Sıcaklık kontrolü sağlayan donanım imkanı bulunmadığından deney yaklaşık oda sıcaklığında olan bir deney ortamında 100 Hz frekansında 2 saat süreyle gerçekleştirildi. Deney ile sensör sıcaklığının stabil duruma gelmesi için gereken süre anlaşıldı. Bu sıcaklık adaptasyon süresi dikkatte alınarak açısal hız deneyleri sensör sıcaklığının stabil olduğu ve olmadığı durumlar için tekrarlandı.

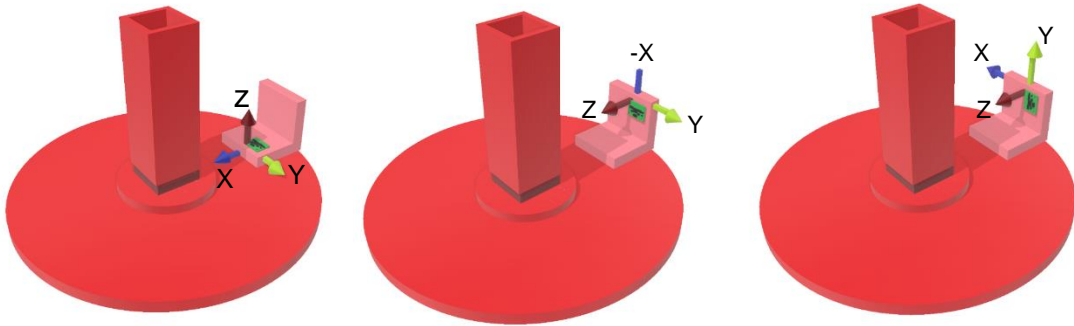
### 3.8.3 Açısal Hareket Deneyleri

Test cihazı (Şekil 3.30) kullanılarak sensöre 45 ve 180 derece/saniye açısal hızlarında insan kol ve bacak açısal hareket benzeşimi uygulandı.



Şekil 3.30: Açısal hareket deneyi test cihazının görünümü

Test cihazı tek eksende hareket edilebildiğinden sensör sabitleme elemanı yardımıyla sensör, 3 eksenine açısal hareket uygulanabilecek şekilde yerleştirildi (Şekil 3.31).



Şekil 3.31: Sensörün farklı eksenlerine açısal hareketin uygulanması

Sensöre uygulanan açısal hareketin, bir insanın yürüyüşü sırasında kol ve bacakların açısal hareketlerinin benzeşimi olması amaçlandı. Uygulanan açısal hareket sensör sıcaklığının stabil sensörün sıcaklığının stabil olduğu ve stabil olmadığı iki durum için tekrarlandı.

### 3.9 Ölçüm Analiz Yöntemleri

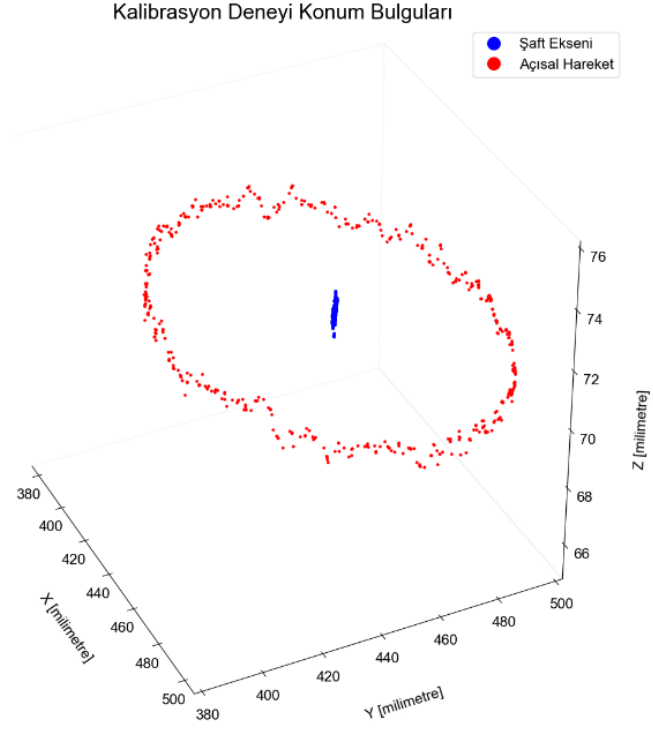
Standart sapma, bir dizi değer in varyasyon veya dağılımının bir ölçüsüdür. Standart sapma, verilerin aritmetik ortalamadan farklarının toplamının karelerinin aritmetik ortalamasının kare kökü alınarak hesaplanır. Düşük bir standart sapma, değerlerin kümenin ortalamasına yakın olma eğiliminde olduğunu gösterirken, yüksek bir standart sapma, değerlerin daha geniş bir aralığa yayıldığını gösterir.

Normal dağılım, aynı zamanda Gauss dağılımı veya Gauss tipi dağılım olarak isimlendirilen, birçok alanda pratik uygulaması olan, çok önemli bir sürekli olasılık dağılım ailesidir. Standart normal dağılım, ortalama değeri 0 ve varyans değeri 1 olan normal dağılım ailesinin tek bir elemanıdır. Bu olasılık fonksiyonunun grafiği, bir çana benzediği için çoğu kez çan eğrisi olarak da anılmaktadır. Standart dağılıma gösteren verilerde verilerin %68.27'e denk gelen kısmı  $+1\sigma$  ve  $-1\sigma$  arasında yer alır.

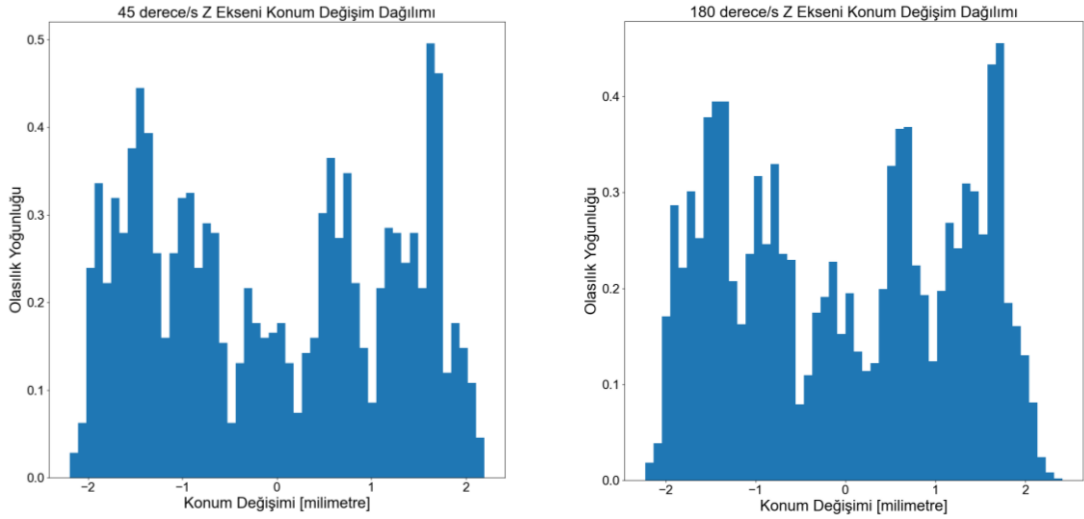
Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu, belirli bir değer aralığı arasında uzanan sürekli bir rastgele değişkenin yoğunluğunu temsil eden olasılık fonksiyonunu tanımlar. Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu, uygulandığı verilerin hangi dağılım ailesine ait olduğunu ve olasılık dağılımının herhangi bir yöneliminin olup olmadığını gösterir.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Test Cihazı Kalibrasyon Deneyi Bulguları



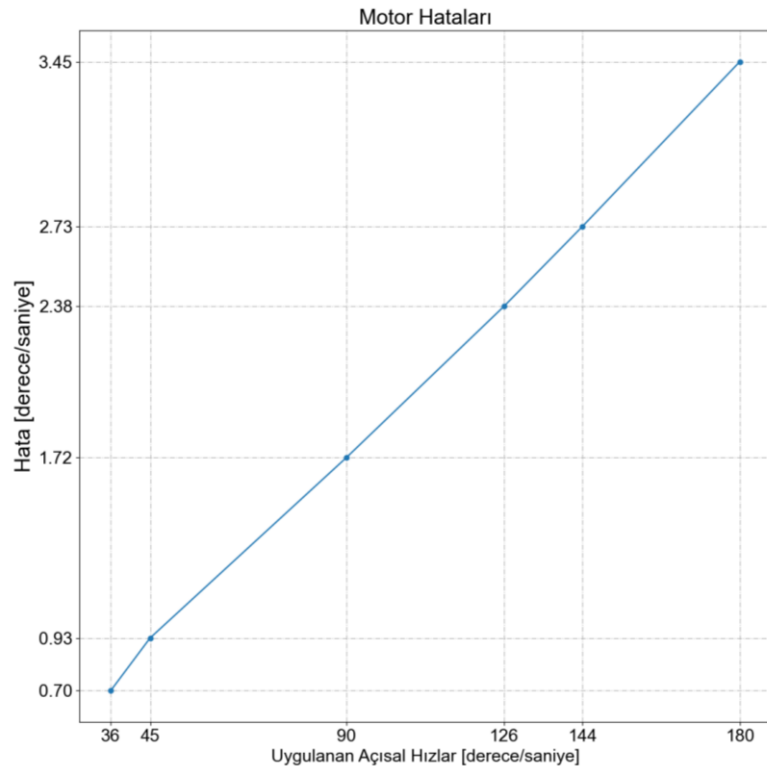
Şekil 4.1: Kalibrasyon deneyi 3 boyutlu gösterimi



Şekil 4.2: Test cihazının Z eksenindeki değişiminin dağılımları

Tablo 4.1: Test cihazının kalibre edildiği açısal hızlar

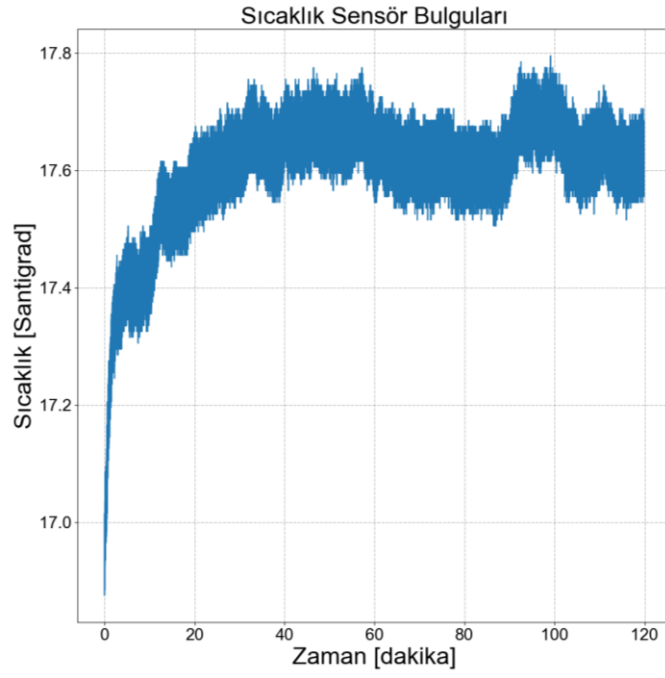
Hız	Açısal Hız (°/s)	Alınan Yol (mm)	Fark (°/s)
1	36.70	23.05	0.70
2	45.93	28.85	0.93
3	91.72	57.56	1.72
4	128.38	80.66	2.38
5	146.73	92.19	2.73
6	183.45	115.26	3.45



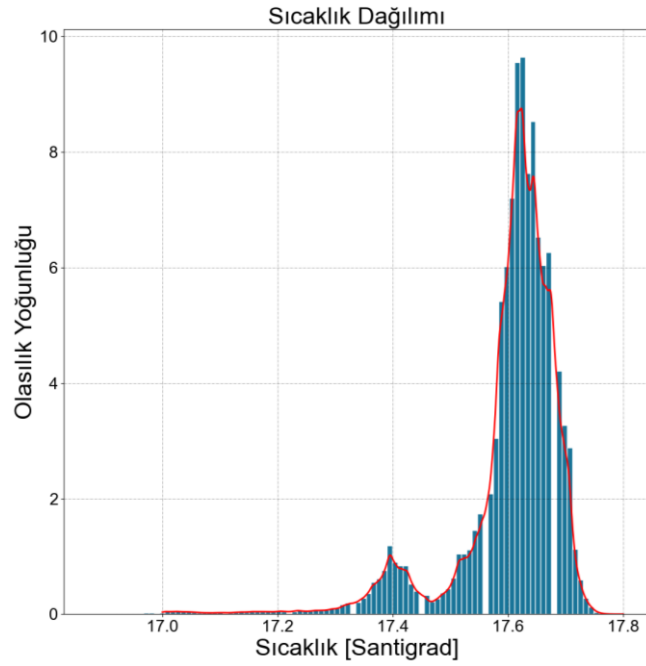
Şekil 4.3: Kalibrasyon yapılan açısal hızlarda motor hataları



## 4.2 Sıcaklık Deneyi Bulguları



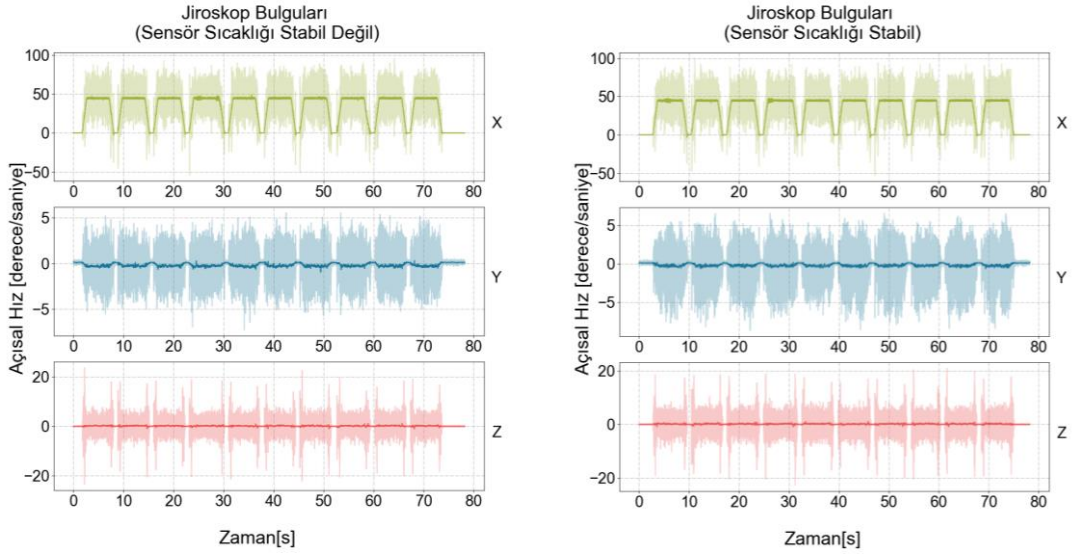
Şekil 4.4: Sıcaklık bulguları



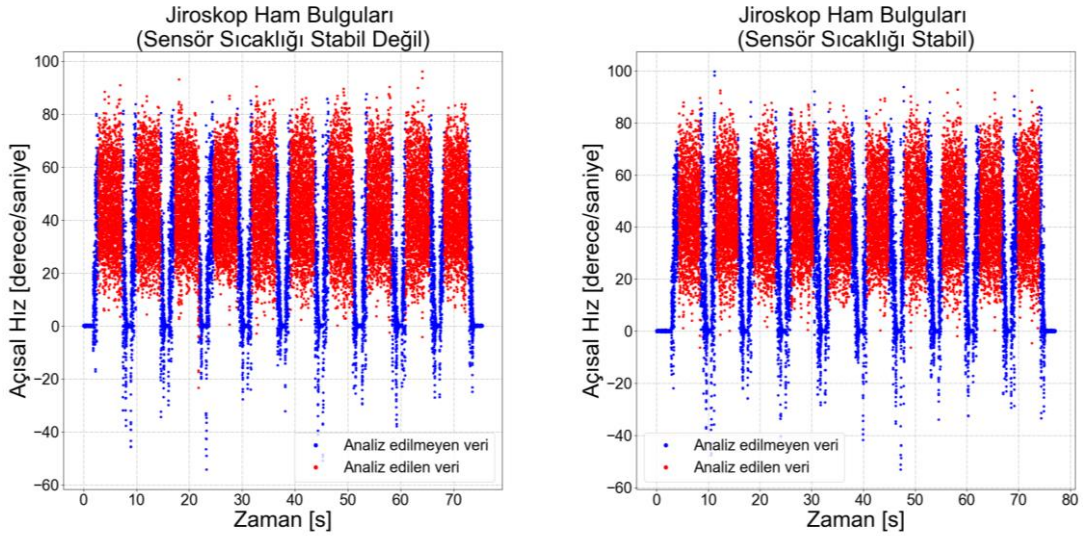
Şekil 4.5: Sıcaklık bulgularının dağılımları

## 4.3 45 Derece/Saniye Açısal Hız Deneyi Bulguları

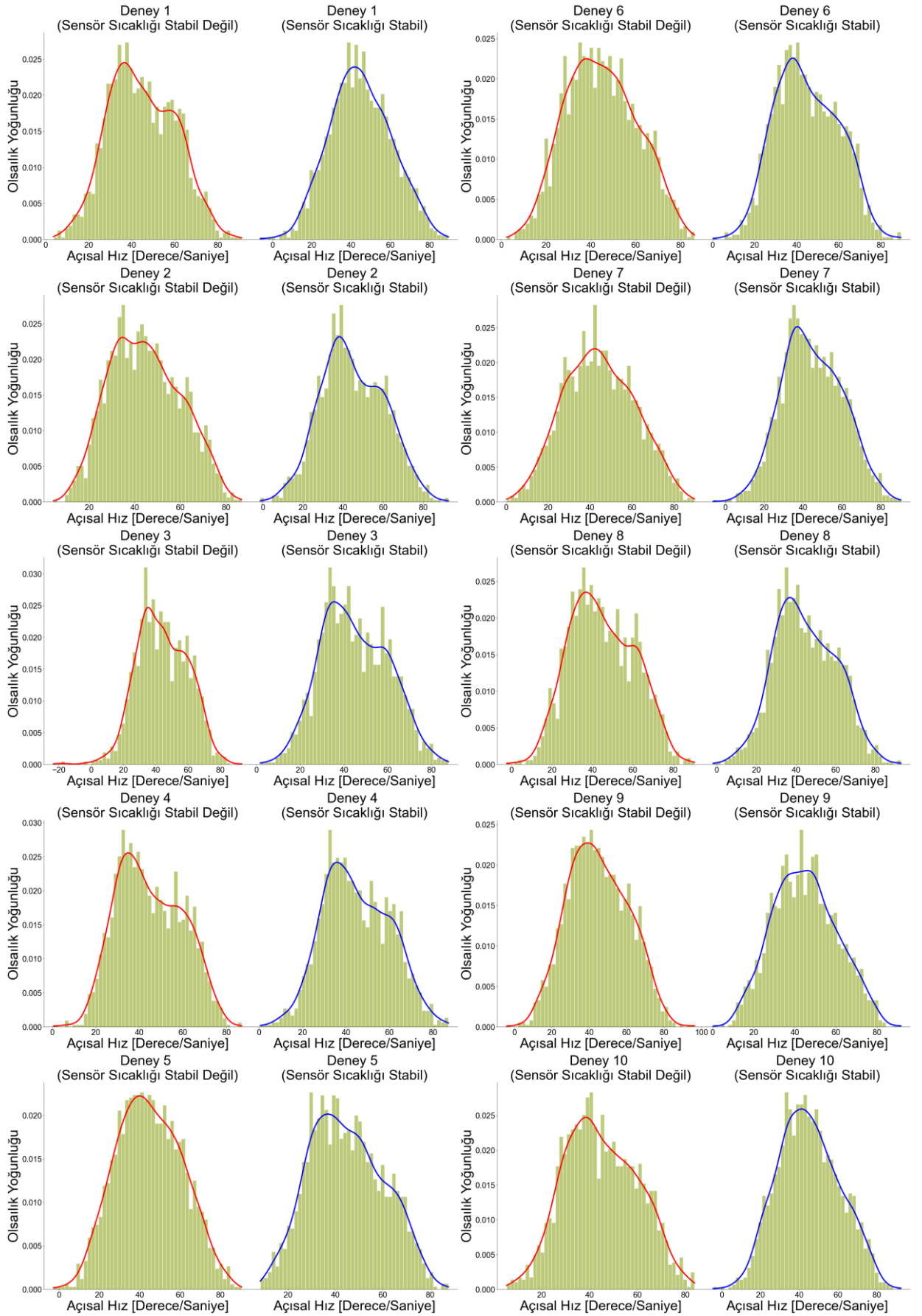
### 4.3.1 X Ekseni Bulguları



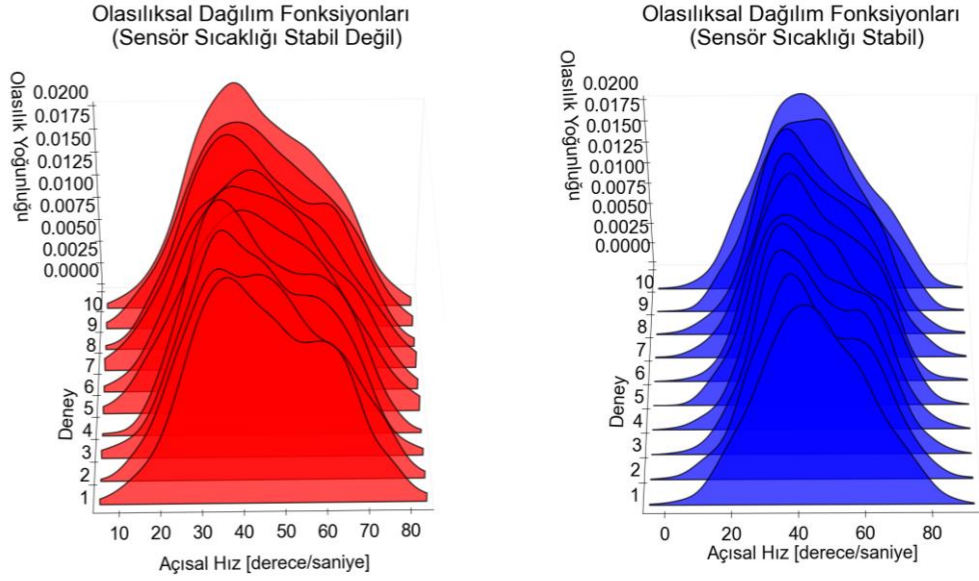
Şekil 4.6: 45 derece/saniye deneyi X ekseni ham bulguları



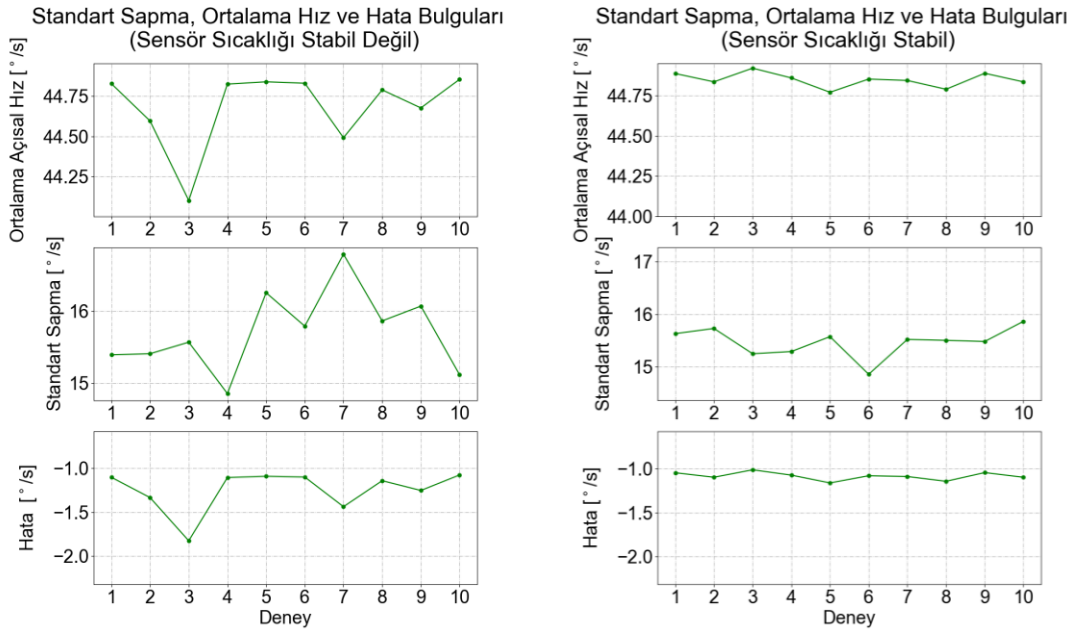
Şekil 4.7: 45 derece/saniye deneyi X ekseni incelenen açısal hız verileri



Şekil 4.8: 45 derece/saniye deneyi X eksenli ölçüm dağılımları

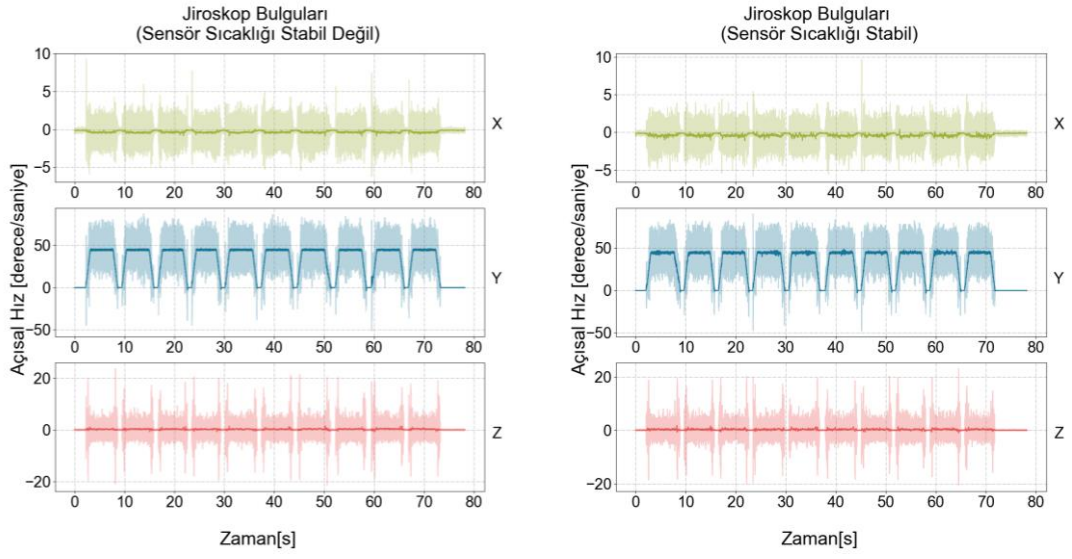


Şekil 4.9: 45 derece/saniye deneyi X eksenli olasılıksal yoğunluk fonksiyonları

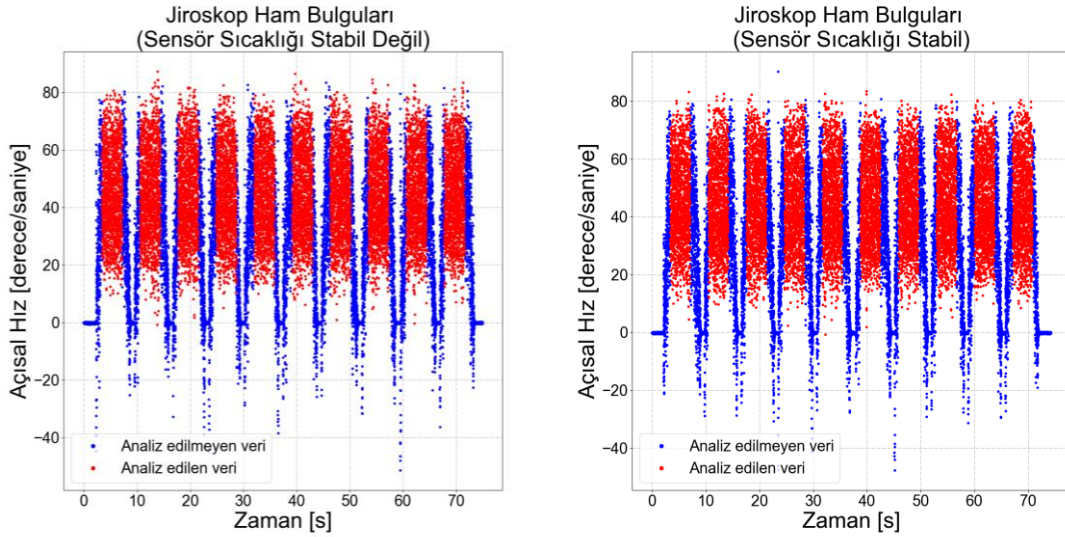


Şekil 4.10: 45 derece/saniye deneyi X eksenli analiz bulguları

### 4.3.2 Y Ekseni Bulguları

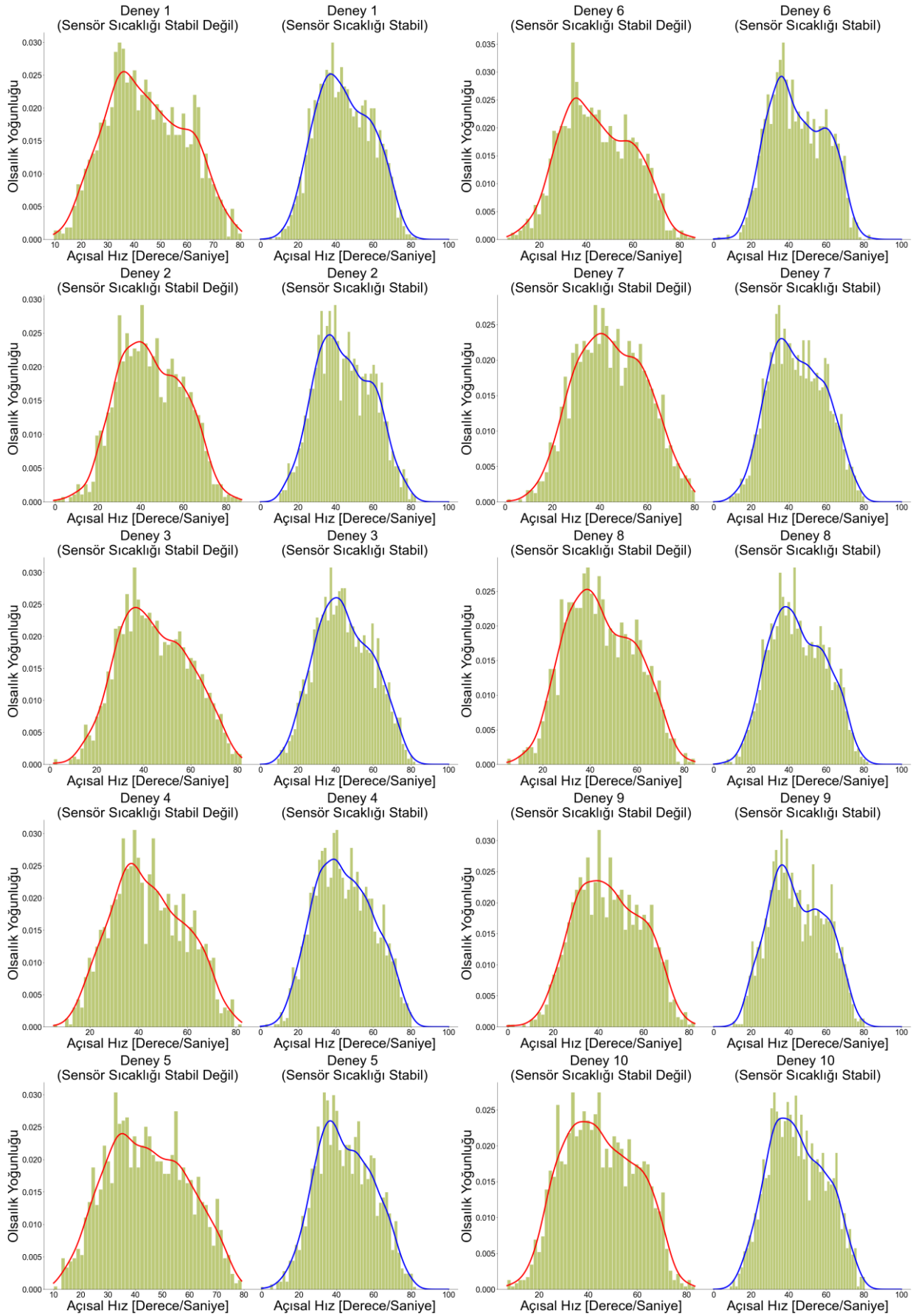


Şekil 4.11: 45 derece/saniye deneyi Y ekseni ham bulgular

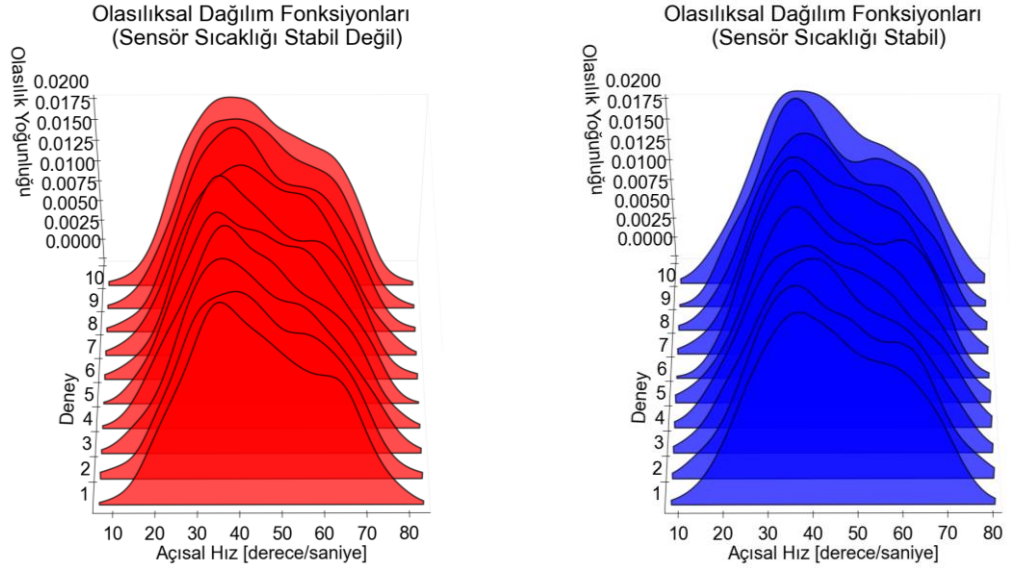


Şekil 4.12: 45 derece/saniye deneyi Y ekseni incelenen açısal hız verileri

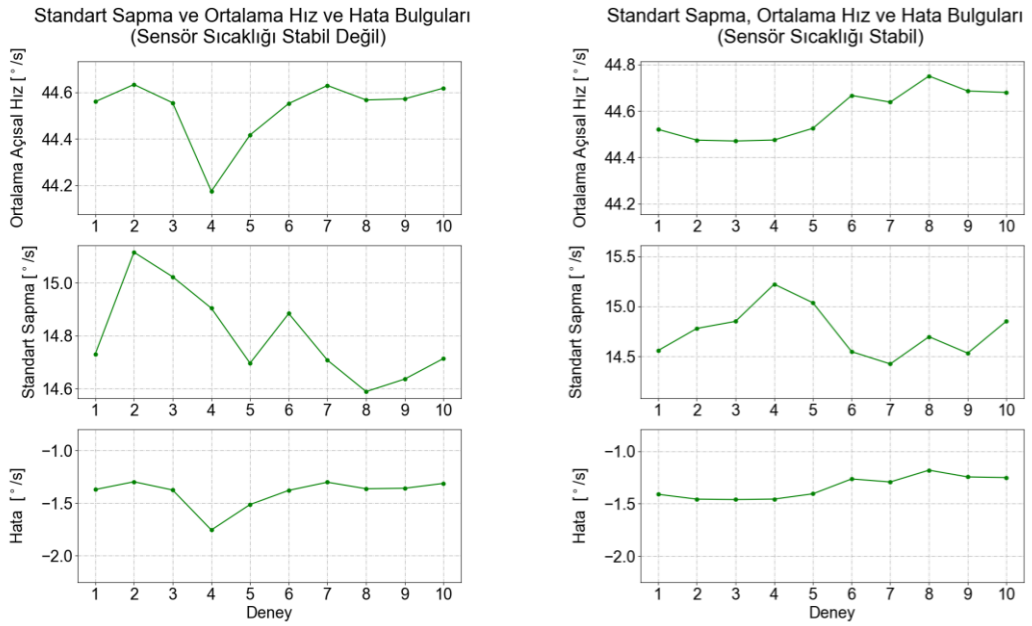




Şekil 4.13: 45 derece/saniye deneyi Y eksenli ölçüm dağılımları

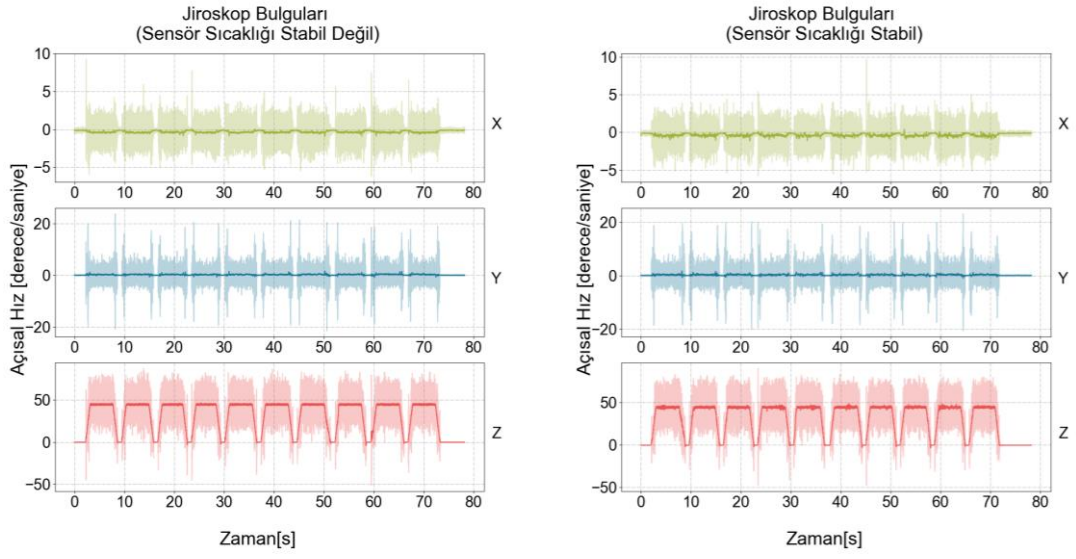


Şekil 4.14: 45 derece/saniye deneyi Y eksenli olasılıksal yoğunluk fonksiyonları

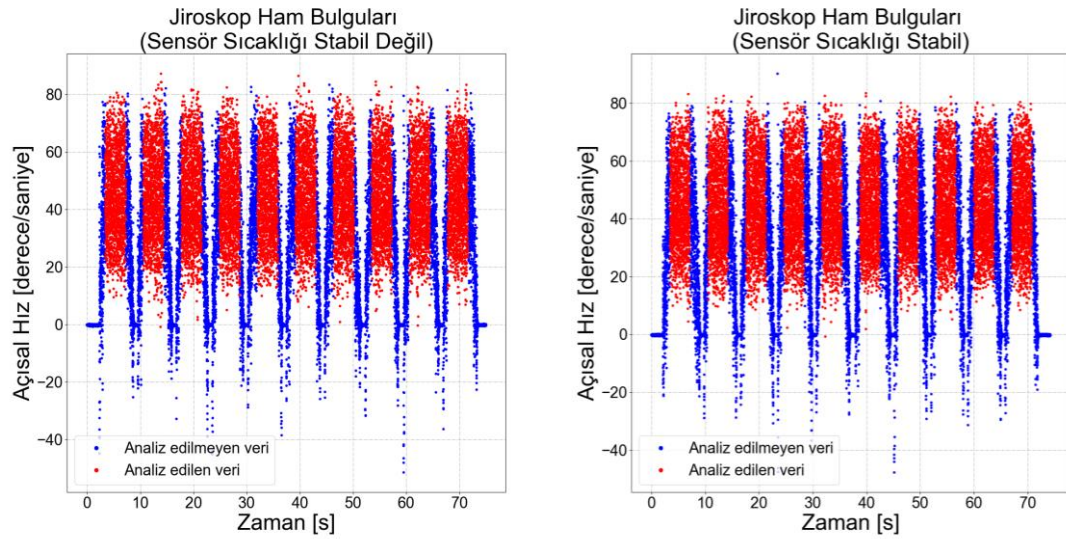


Şekil 4.15: 45 derece/saniye deneyi Y eksenli analiz bulguları

### 4.3.3 Z Ekseni Bulguları

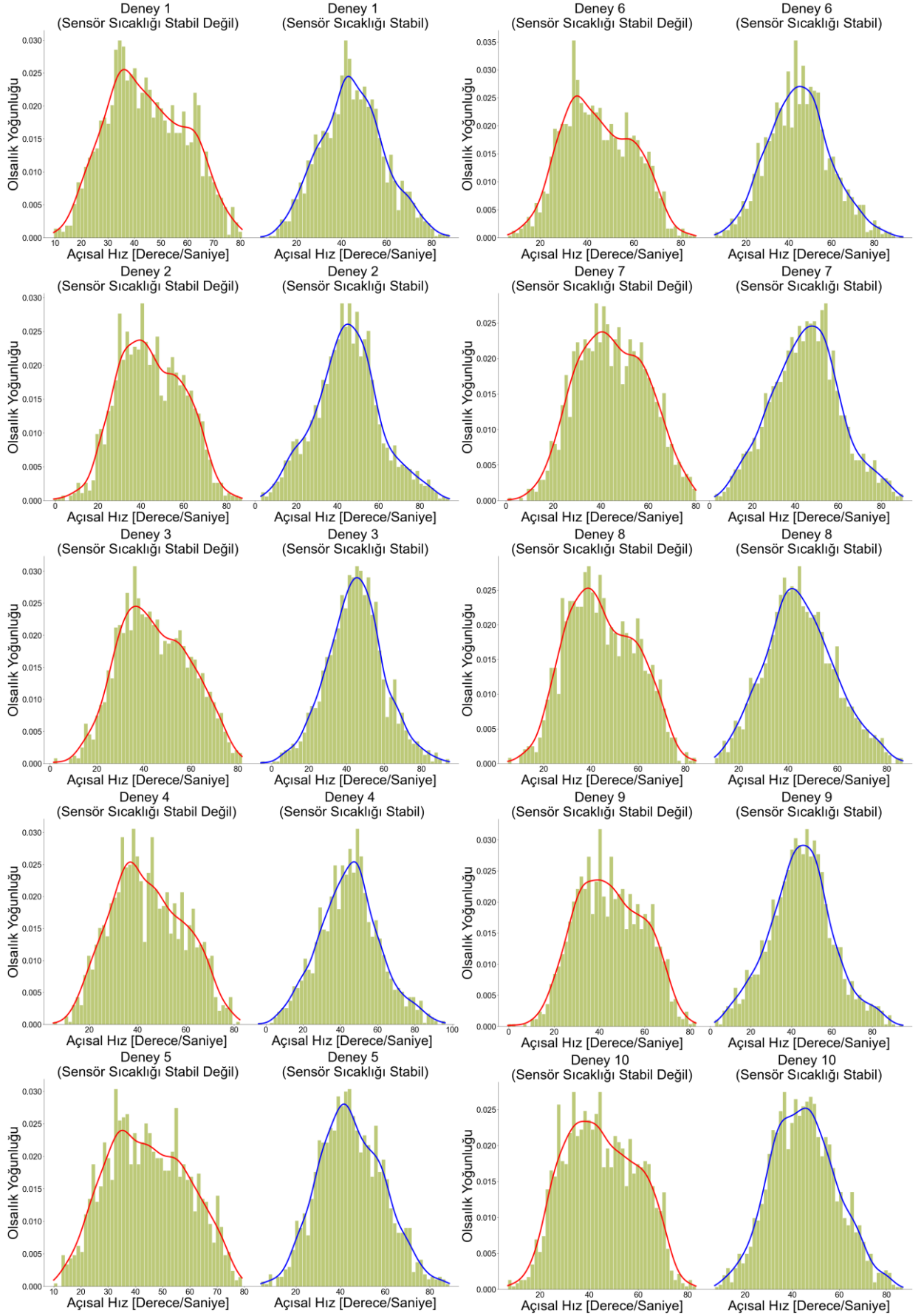


Şekil 4.16: 45 derece/saniye deneyi Z eksenli ham bulgular

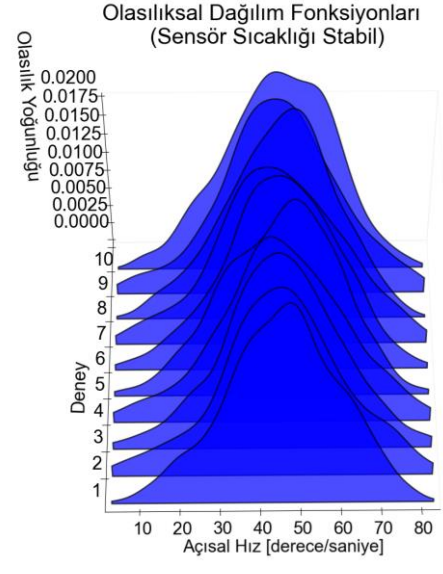
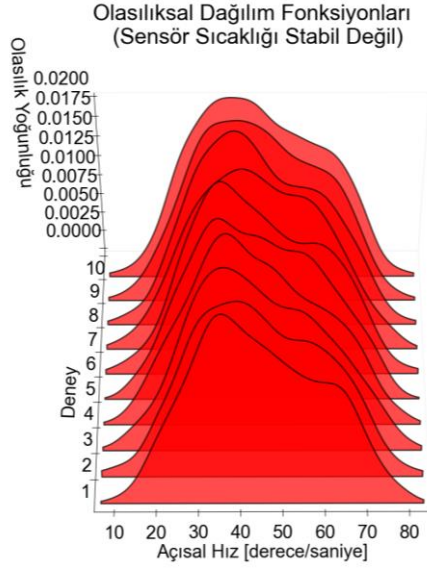


Şekil 4.17: 45 derece/saniye deneyi Z eksenli incelenen açısal hız verileri

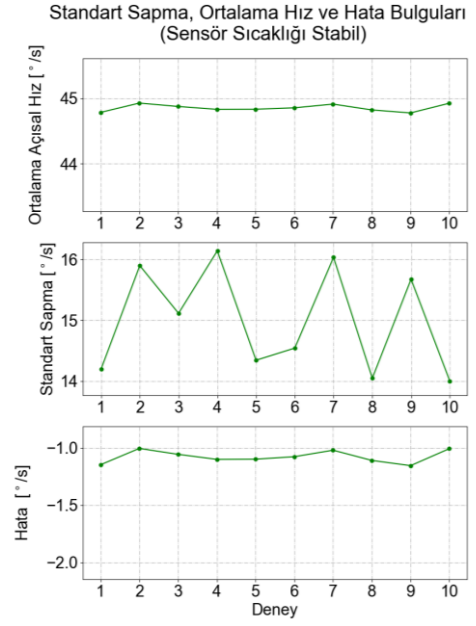
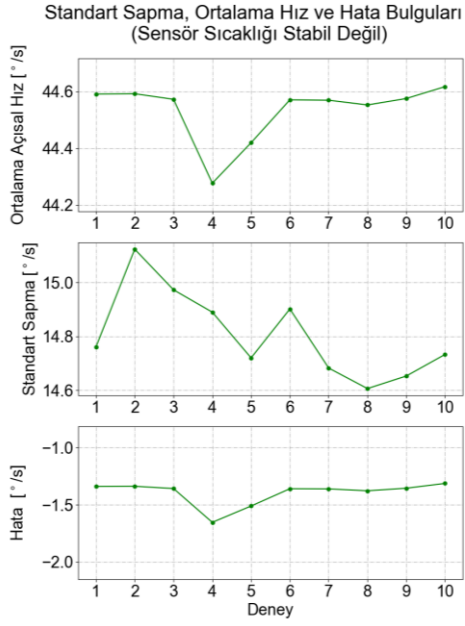




Şekil 4.18: 45 derece/saniye deneyi Z eksenli ölçüm dağılımları



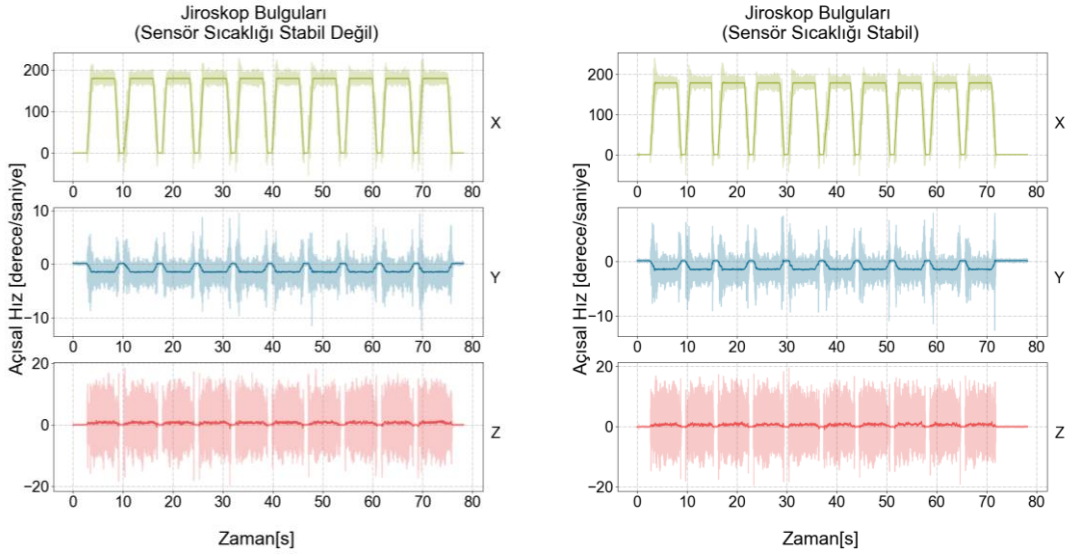
Şekil 4.19: 45 derece/saniye deneyi Z eksenli olasılıksal yoğunluk fonksiyonları



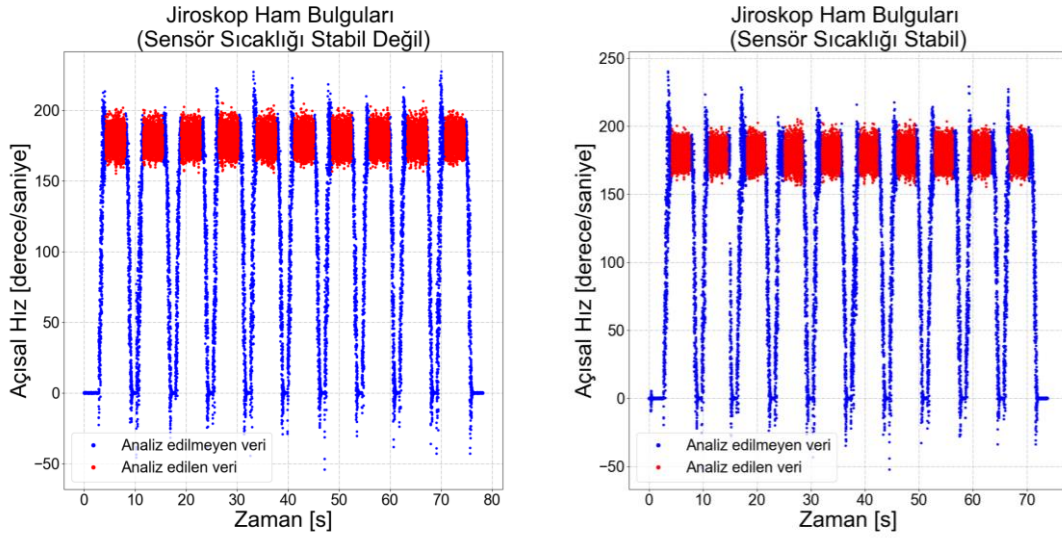
Şekil 4.20: 45 derece/saniye deneyi Z eksenli analiz bulguları

## 4.4 180 Derece/Saniye Açısal Hız Deneyi Bulguları

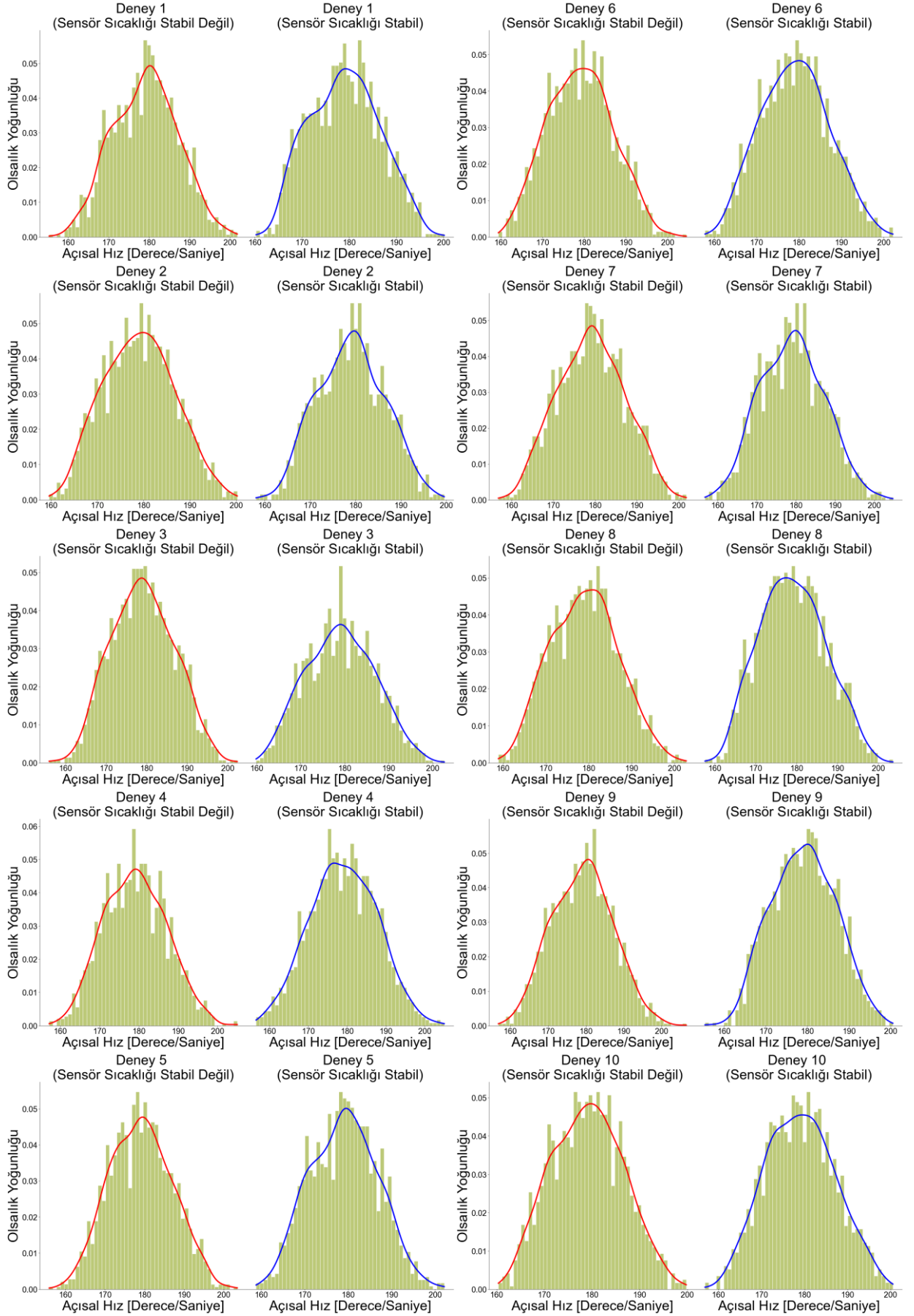
### 4.4.1 X Eksenine Bulguları



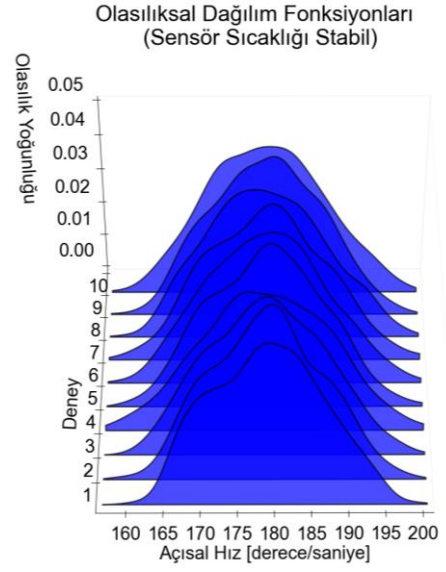
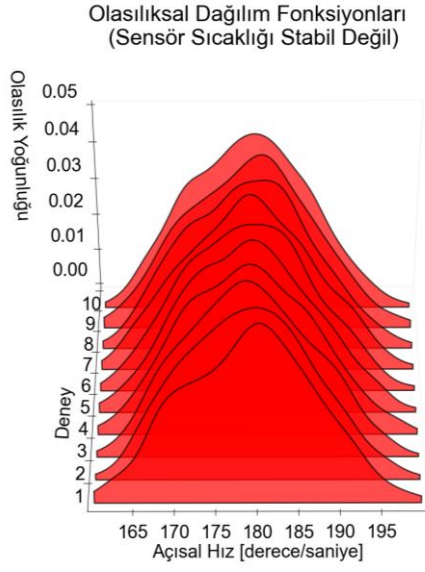
Şekil 4.21: 180 derece/saniye deneyi X eksenine ham bulgular



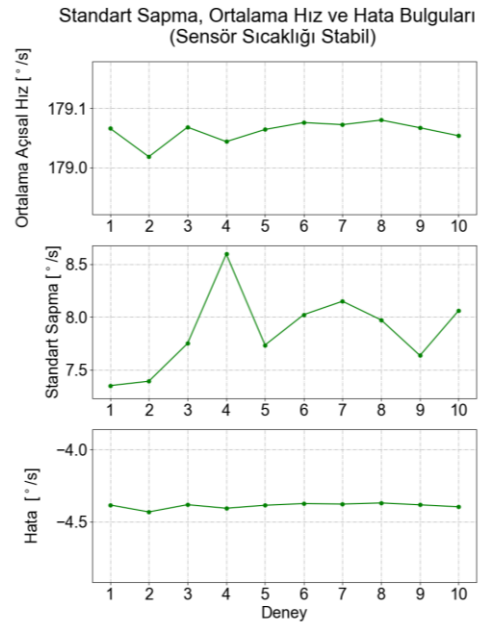
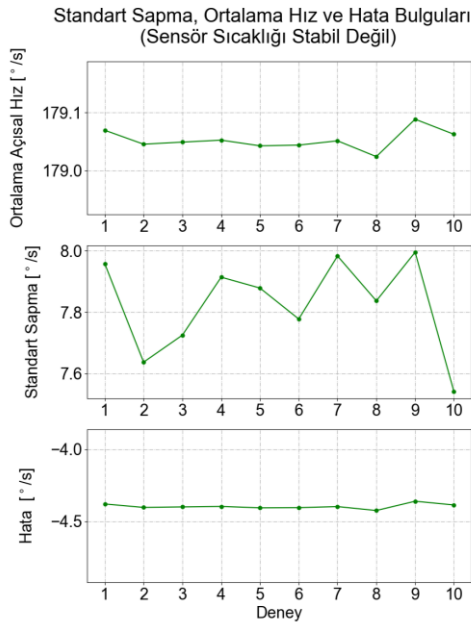
Şekil 4.22: 180 derece/saniye deneyi X eksenine incelenen açısal hız verileri



Şekil 4.23: 180 derece/saniye deneyi X eksen ölçüm dağılımları



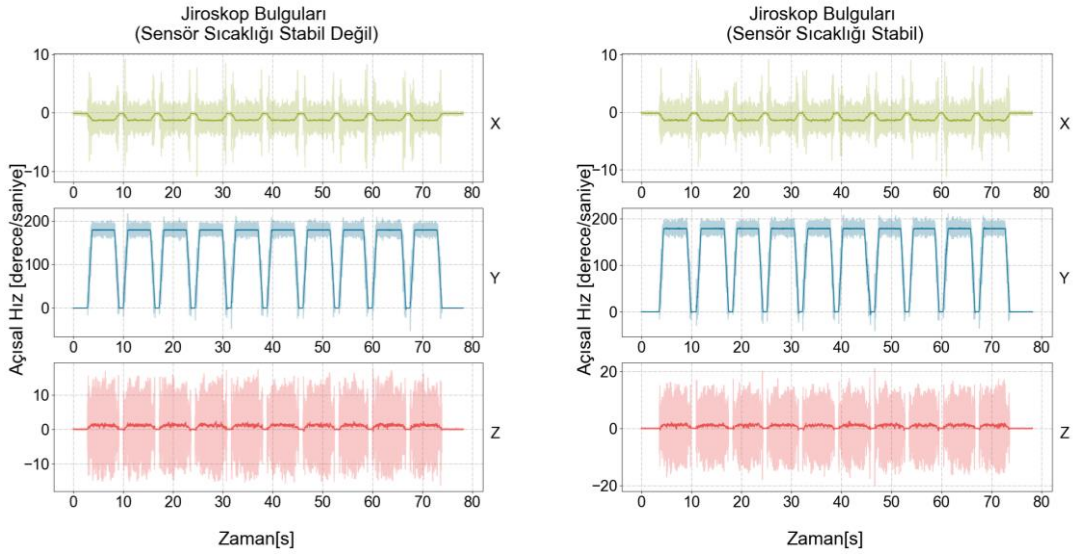
Şekil 4.24: 180 derece/saniye deneyi X eksenli olasılıksal yoğunluk fonksiyonları



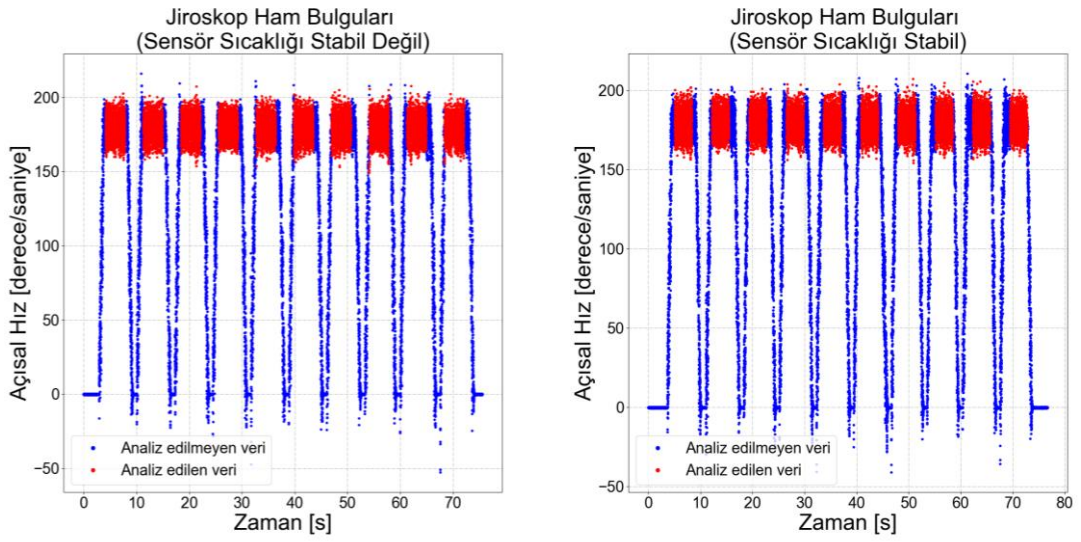
Şekil 4.25: 180 derece/saniye deneyi X eksenli analiz bulguları



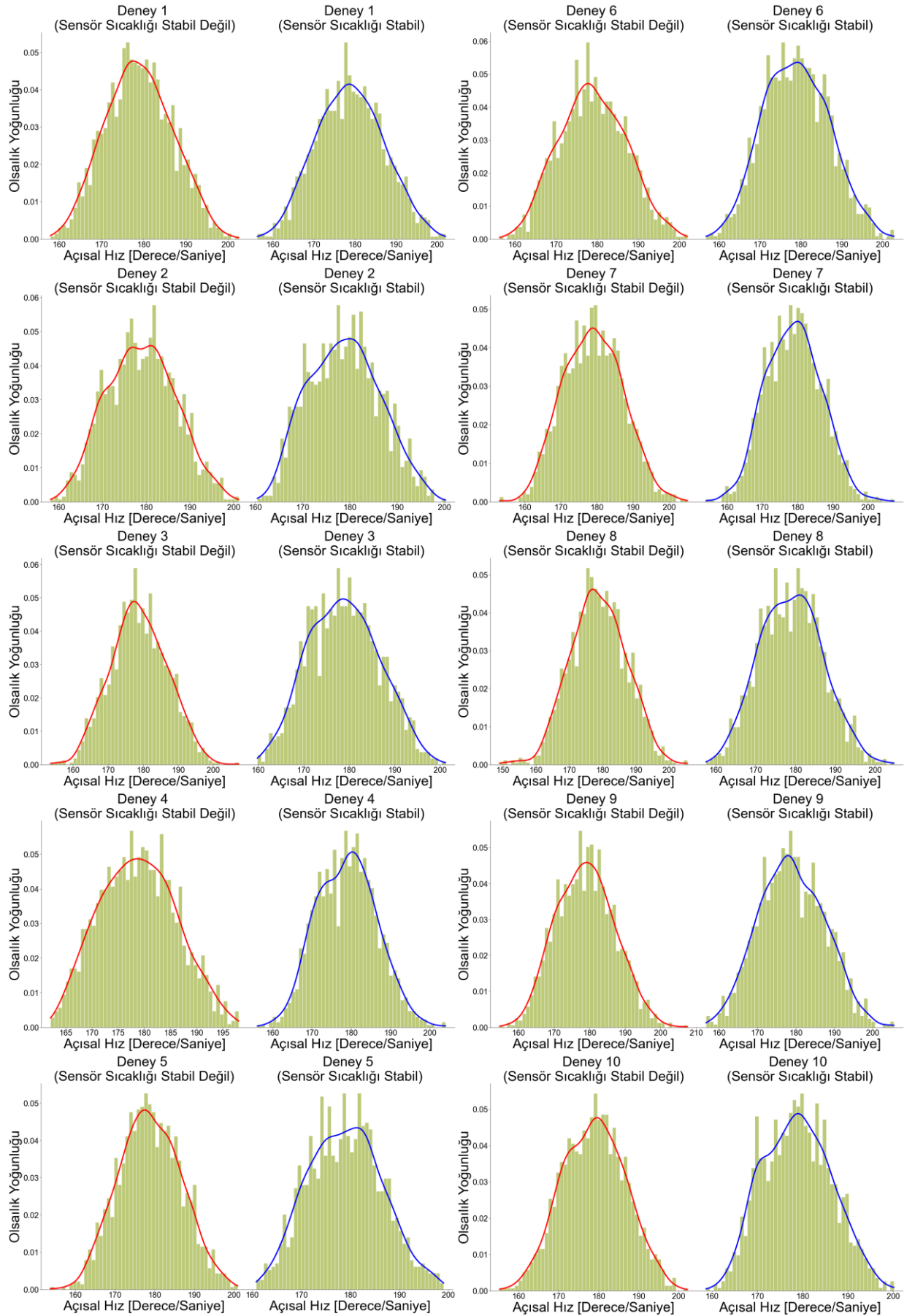
#### 4.4.2 Y Eksenli Bulguları



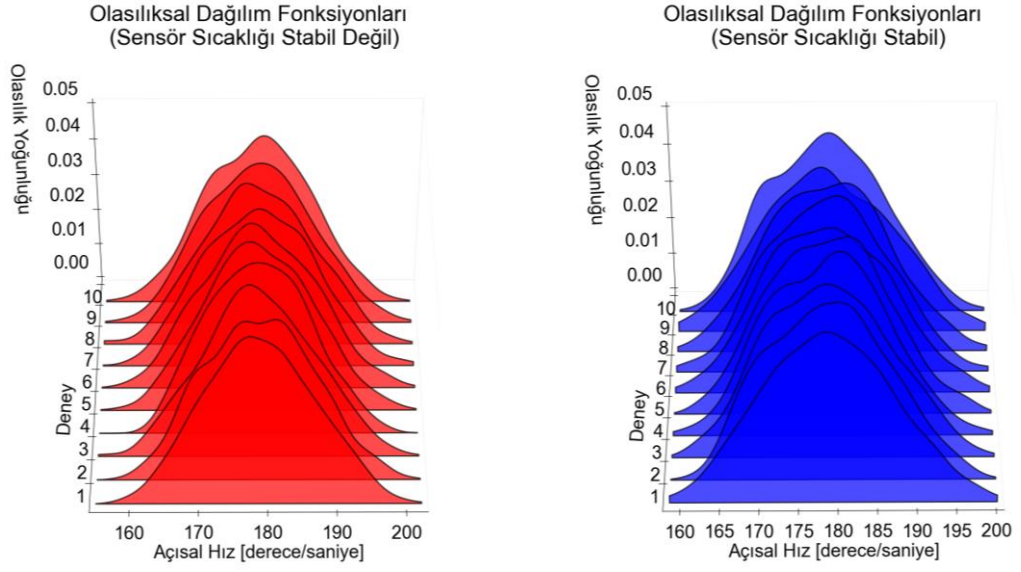
Şekil 4.26: 180 derece/saniye deneyi Y eksenli ham bulgular



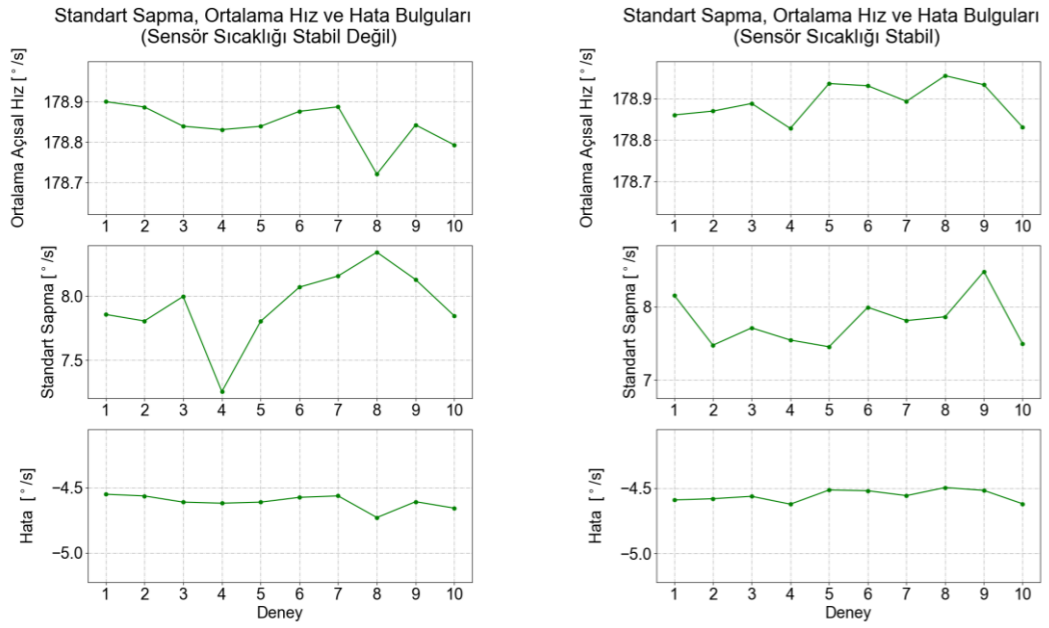
Şekil 4.27: 180 derece/saniye deneyi Y eksenli incelenen açısal hız verileri



Şekil 4.28: 180 derece/saniye deneyi Y eksenı ölçüm dağılımları



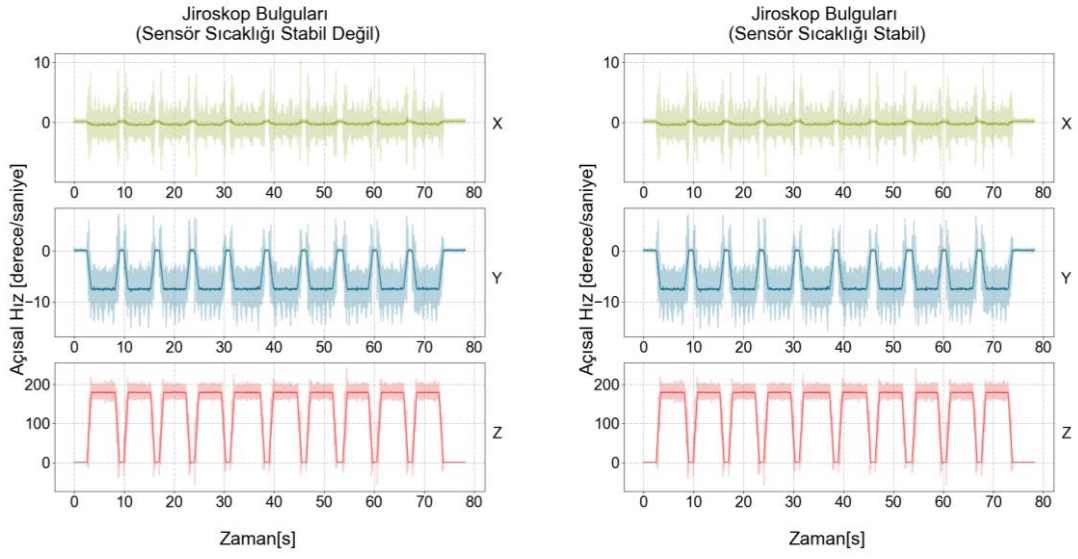
Şekil 4.29: 180 derece/saniye deneyi Y eksenli olasılıksal yoğunluk fonksiyonları



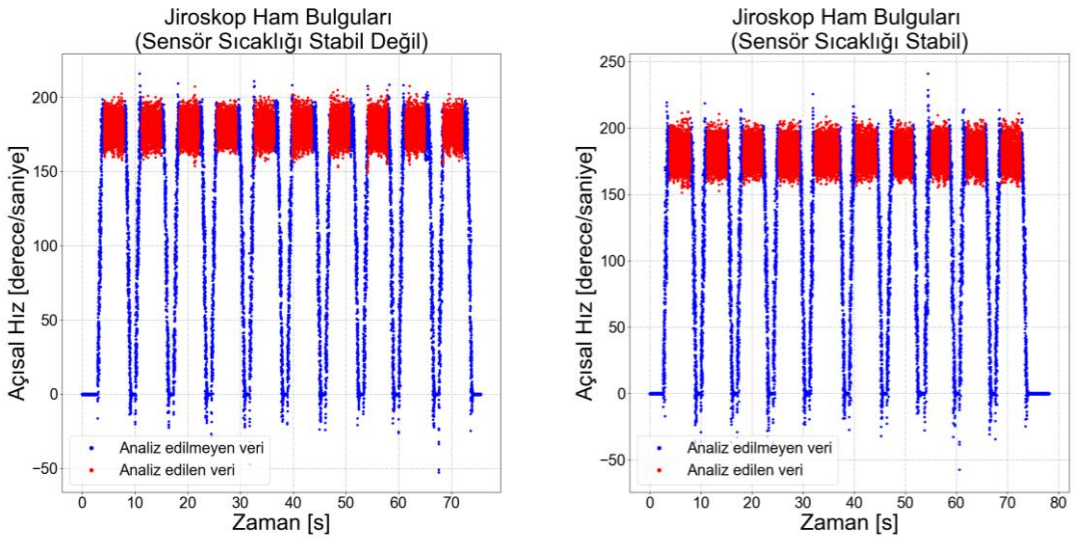
Şekil 4.30: 180 derece/saniye deneyi Y eksenli analiz bulguları



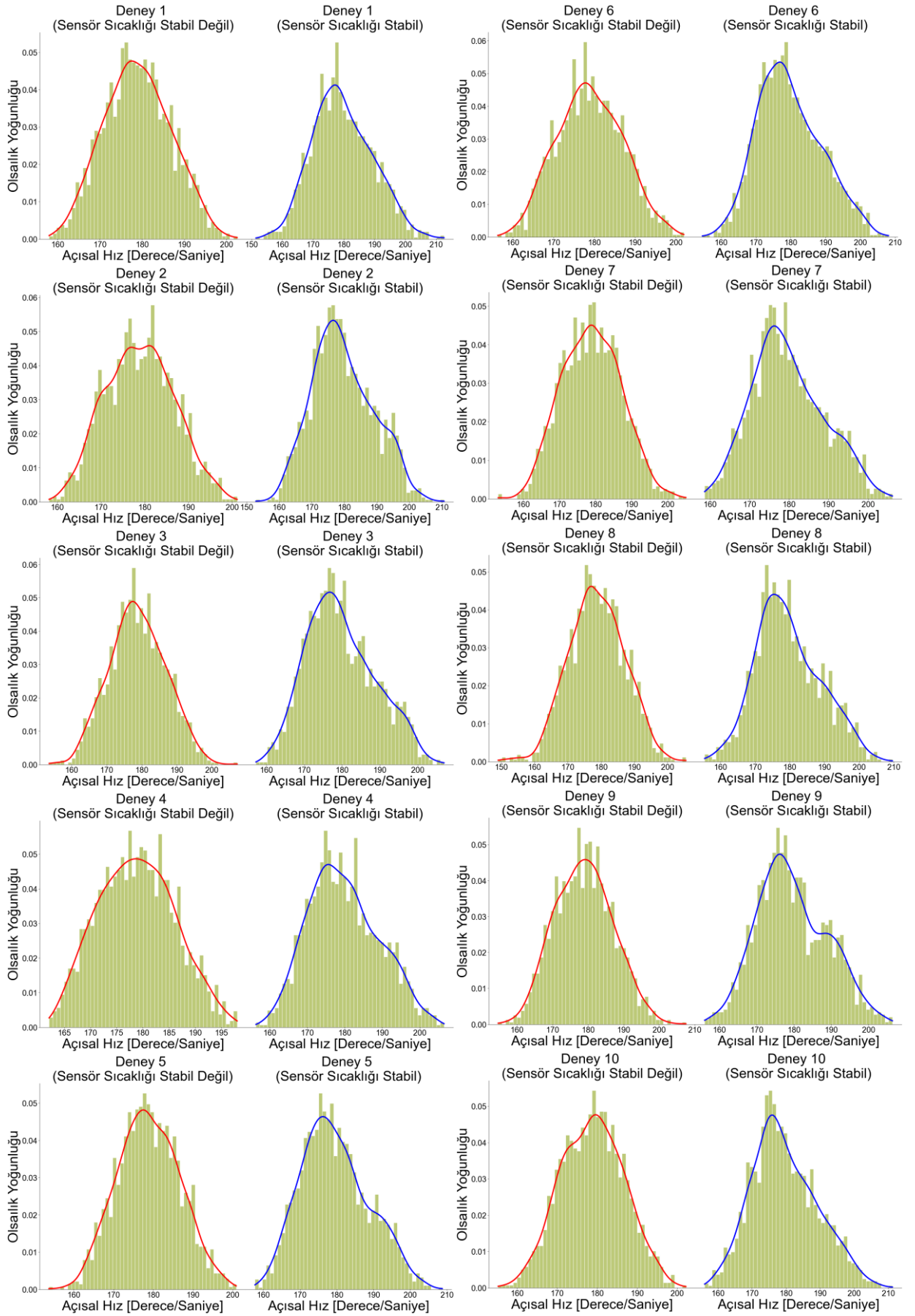
### 4.4.3 Z Ekseni Bulguları



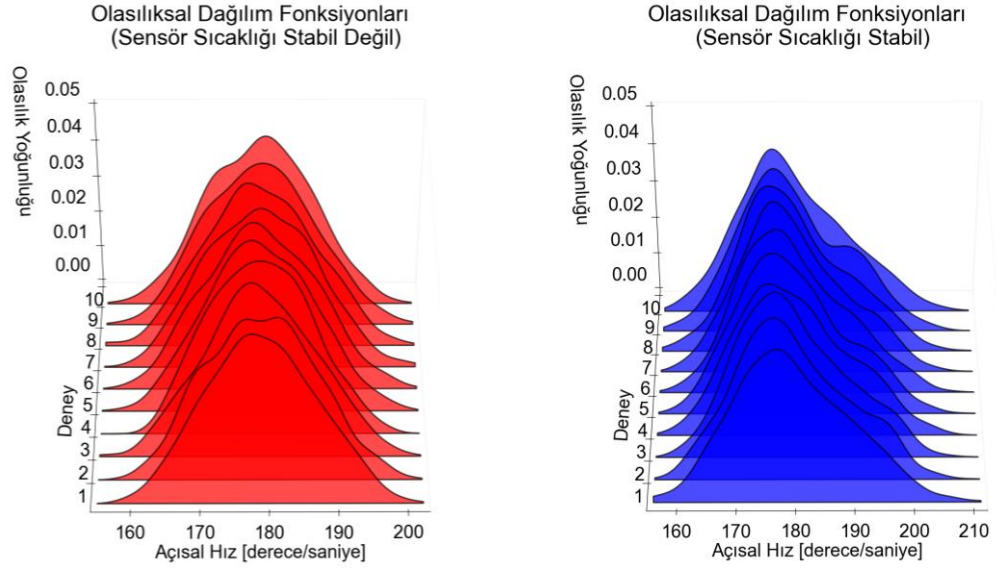
Şekil 4.31: 180 derece/saniye deneyi Z ekseni ham bulguları



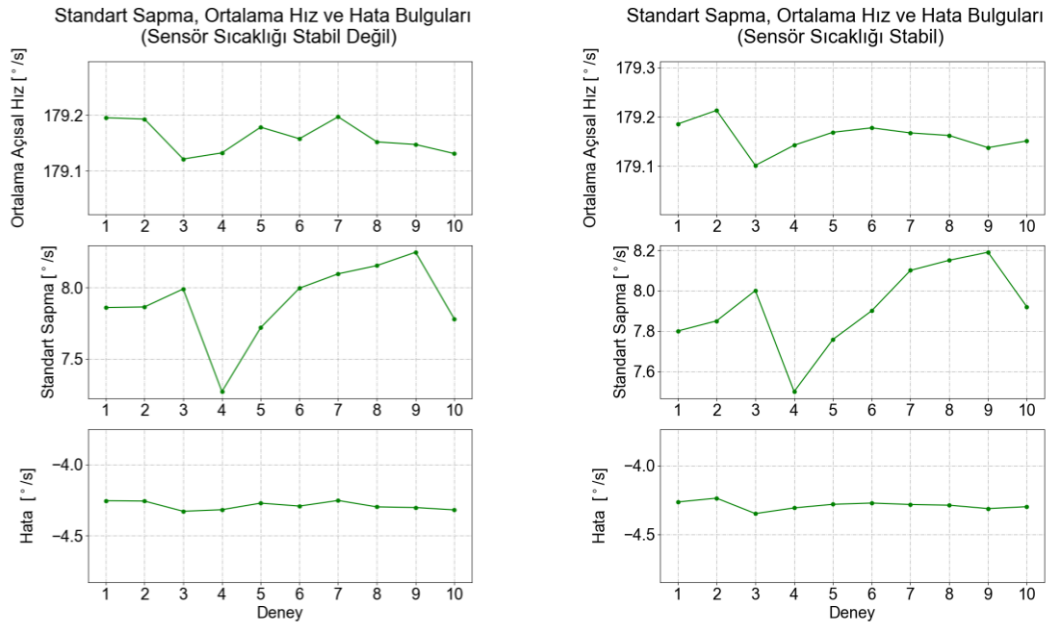
Şekil 4.32: 180 derece/saniye deneyi Z ekseni incelenen açısal hız verileri



Şekil 4.33: 180 derece/saniye deneyi Z eksenı ölçüm dağılımları



Şekil 4.34: 180 derece/saniye deneyi Z eksenli olasılık yoğunluk fonksiyonları



Şekil 4.35: 180 derece/saniye deneyi Z eksenli analiz bulguları

## 5. TARTIŞMA

Referans olarak kullanılan optik sistemin hassasiyetinin 0.4 milimetreden daha az olduğu ve test cihazının tüm kameraların görüş açısına göre ortada bir yere konumlandırıldığı referans sistemin yeterince güvenilir olduğu tespit edildi (Şekil 3.21). Kameraların görüş açısından çıktığı durumda referans sistemin hataları 1 milimetreye kadar çıktığı görüldü (Şekil 3.22).

İnsan kol ve bacak açısal hareketlerinin benzeşimini 2 boyutlu ekseninde gerçekleştirebilecek kararlı ve sabit bir hızda hareket üretebilen bir test cihazı yapılması amaçlandı ve referans optik sistem kullanılarak kalibrasyon testi yapıldı. Yapılan kalibrasyon testinde test cihazının Z ekseninde 2 milimetreye kadar titreşim ürettiği ve istenilen 2 boyutlu açısal hareketi üretmediği görüldü (Şekil 4.2). Step motorlar bir darbe sinyali aldıklarında bir sonraki durma konumuna doğru hızlanırlar. Hızlandırılmış motor, adım açısını aşar ve geri doğru çekilir. Motor, bir sönümlenme salınımının ardından ayarlanan durma konumunda durur [7]. Motorun bu tip davranışı step motor titreşim karakteristiğini oluşturur. Deneyde oluşan titreşimin, motor titreşim karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir ve Bölüm 6'da titreşim izolatörü kullanılması önerilmiştir. Ayrıca test cihazına uygulanan açısal hız ile doğrusal olarak motorun ürettiği açısal hız ve motora komut olarak gönderilen açısal hız arasındaki farkın arttığı tespit edildi (Şekil 4.3). Motora komut olarak gönderilen açısal hızın artmasıyla motor adımlarının daha hızlı atılmasına sebep olur. Bu nedenle motor ayarlanan durma noktasına ulaşmak için yapması gereken salınımı tamamlamadan yeni adım komutunu algılar. Bu nedenle motor pozisyon hatasını düzeltmeden yeni adım komutu algıladığı için sürekli olarak belirli bir hata payı ile hareketine devam eder. Kullanılan step motordaki kutup sayısının artırılmasıyla adım açılarının kontrol hassasiyeti artar. Bölüm 6'da öneri olarak kutup sayısı daha yüksek step motor kullanılması önerilmiştir.

Sensör olasılıksal hata kaynaklarından biri olan sıcaklık parametresi, IMU sensöre dahili olan sıcaklık sensörüyle 2 saat süreyle ölçüldü (Şekil 4.4). Ölçüm dağılımları incelendiğinde (Şekil 4.5) geçici bir sıcaklık durumu olduğu ve daha sonrasında stabil hale geldiği ve görülmüştür. Elde edilen ölçümler Bölüm 2'de incelenen çalışmayla [12] uyumlu olduğu görüldü. Sensörün kılavuz dökümanında, sensör çipinin LGA bacak yapısına sahip bir paket içerisinde konumlandığı belirtilmiş ve kullanılan paket materyali hakkında bir bilgi verilmemiştir [14]. Dünyanın önde gelen LGA paket üreticilerinin

(NXP, Texas Instruments) dökümanları incelendiğinde, LGA bacak yapısında farklı materyaller ile üretilmiş çeşitli entegre paketlerinin olduğu anlaşıldı. Materyallerin termal karakteristikleri incelendiğinde, lehimleme sırasında oluşan yüksek sıcaklıktan paket içerisindeki devre yapısını korumak amacıyla materyallerin ısı geçirgenlik kat sayısının düşük olduğu görüldü. Ayrıca sensör üretici dökümanında lehimleme kılavuz bölümünde sensörün IPC/JEDEC Seviye 1 (Joint Industry Standard) standartına uygun olduğu ve lehimleme pik sıcaklık değeri olan 260 °C sıcaklığında sensörü 20 ile 40 saniye boyunca koruyabildiği belirtilmiştir [14]. Deneyde sensörün çalışmasından kaynaklı olarak ısınması ve ortam ısıyla birlikte dengeye gelmesiyle oluşan belirgin geçici durumun, sensörün dış ortamdan ayıran paket materyaline ait ısı geçirgenliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sensöre uygulanan 45 derece/saniye açısal hız deneyinin ham verileri incelendiğinde oluşan açısal hareketin diğer eksenlere anlamlı etkileri olduğu görülmüştür (Şekil 4.6, 4.11 ve 4.16). Bu anlamlı etkilerin merkez kaç kuvvetinden ve açısal hareketin doğasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Açısal hızın sabitlendiği zaman aralıklarında jiroskop ölçümlerinin geniş bir aralıkta değiştiği ve istenilen şekilde kararlı olmadığı görülmüştür (Şekil 4.7, 4.12 ve 4.17). Oluşan geniş aralığın, step motorun ayrık çalışması ve adım frekansının sensör ölçüm frekansının çok üstünde olmasından kaynaklandığı anlaşıldı. Sensör sıcaklığının stabilize duruma göre ölçüm dağılımları incelendiğinde (Şekil 4.8) sensör sıcaklığı stabil olduğunda jiroskop hatalarının daha az değişime sahip olduğu ve daha kararlı olduğu görülmüştür (Şekil 4.10).

İkinci açısal hız olarak uygulanan 180 derece/saniye açısal hız deneyinde sensör ölçüm hataları yaklaşık 4 kat artmıştır. Bu yüksek hata artışının deneydeki yüksek hızda gerçekleşen savrulmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Hatanın bu kadar büyümesinden dolayı sıcaklığın stabil olduğu durum ile olmadığı durum arasındaki hata farkının yakın olduğu ve savrulmanın bu durumu gölgelediği görülmüştür. Sensör verileri incelendiğinde hareket anında ölçümlerin 45 derece/saniye açısal hızında gerçekleşen deneye göre daha dar bir aralıkta değişim görülmüştür (Şekil 2.22, 4.27, 4.32). Bu aralığın 45 derece/saniye açısal hızda gerçekleşen deneye göre daha küçük bir değişim aralığında olmasının, motora daha yüksek açısal hız uygulandığından dolayı hareket adımlarının sıklaşmasıyla hareketi daha analog hale getirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen deney bulgularının doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Step motorlar, gerekli koşullar sağlandıktan sonra kontrol kabiliyeti açısından insan kol ve bacak açısal hareket benzeşimlerini gerçekleştirebilecek ve düşük bütçeli bir test cihazı için uygun bir motor türüdür.

2. Açısal hareketi oluşturması için kullanılan motor adımlarının sürücü yardımıyla azaltılmasına rağmen sensör ölçüm kalibreyetine göre büyük kalması nedeniyle sensör ölçümlerinde gürültüye sebep olmuş ve istenilen kararlı açısal hızda hareket üretilmemiştir.

3. Sensör 17 °C sıcaklıkta ortalama 30 dakika içerisinde sensör ısısı stabil olmakta ve sıcaklık kaynaklı oluşan hatalar açısından daha kararlı hale gelmektedir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde step motor ile sensörün konumlandığı mekanik elemanlar arasında titreşim izolasyonu sağlayan donanım kullanılması önerilir. Step motorun adım açısının sensörün ölçüm hassasiyetinin altına indirilmesi için motor şaftına vites kutusu (redüktör) bağlanması ve kutup sayısı daha yüksek olan step motorların tercih edilmesi hareketi daha analog hale getireceği için tavsiye edilir. Sensör ölçümlerinin analog olarak okunabileceği bir sensör çipi seçilmeli ve daha yüksek çözünürlüklü bir analog sayısal çeviri kullanılarak sayısallaştırma hataları azaltılmalıdır. Motor için belirtilen öneriler dikkate alınarak oluşturulacak yeni test cihazı ve sıcaklık kontrol ünitesi kullanılarak deney düzeneği oluşturulmalıdır ve sıcaklık bağımlı bir hata modeli oluşturulmalıdır.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] W. Herzog, Measurement Techniques (Biomechanics), Encyclopedia of Neuroscience, Springer Berlin Heidelberg, **2008**
- [2] A. Dasgupta and Y. Nakamura, Making feasible walking motion of humanoid robots from human motion capture data, IEEE International Conference on Robotics and Automation (**1999**)
- [3] P. Aggarwal, Z. Syed, X. Niu, N. El-Sheimy, A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units, Journal of Navigation. 61 (**2008**) 323–336.
- [4] IEEE Xplore Login, <https://ieeexplore.ieee.org/search>, (Erişim Tarihi: **Temmuz 2022**).
- [5] Ulusal Tez Merkezi, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>, (Erişim Tarihi : **Temmuz 2022**).
- [6] Inertial Measurement Unit (IMU) Market Size Global Report 2027, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/inertial-measurement-unit-market-101827>, (Erişim tarihi: **Temmuz 2022**).
- [7] S. J. Chapman, Electric machinery fundamentals, fifth edition, New York Mcgraw Hill Cop, **2012**.
- [8] P. Aggarwal, Z. Syed, X. Niu, N. El-Sheimy, A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units, Journal of Navigation. 61 (**2008**) p. 323–336.
- [9] The Economist 3D printing scales up, [www.economist.com/technology-quarterly/2013/09/05/3d-printing-scales-up](http://www.economist.com/technology-quarterly/2013/09/05/3d-printing-scales-up) (Erişim Tarihi: **Haziran 2022**).
- [10] T. Tan, D.P. Chiasson, H. Hu, P.B. Shull, Influence of IMU position and orientation placement errors on ground reaction force estimation, J Biomech. 97 (**2019**)
- [11] Pololu Universal Aluminum Mounting Hub for 1/4" (6.35mm) Shaft, M3 Holes (2-Pack), <https://www.pololu.com/product/1994/resources>, (Erişim Tarihi: **Temmuz 2022**).

- [12] G. Secer, Eylemsizlik Duyucularının ve Manyetometrelerin Deterministik ve Stokastik Hata Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2012**
- [13] A. Ates, P. Kearey, S. Tufan, New gravity and magnetic anomaly maps of Turkey, *Geophys J Int.* 136 (**1999**) 499–502.
- [14] BMX160 Sensör Kılavuzu, <https://www.mouser.com/pdfdocs/BST-BMX160-DS000-11.pdf>, (Erişim Tarihi : **Temmuz 2022**).
- [15] AccelStepper library for Arduino, <http://airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper>, (Erişim Tarihi: **Temmuz 2022**).
- [16] G. Welch and G. Bishop, An Introduction to the Kalman Filter, University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, **2016**.
- [17] P. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition, **2013**.
- [18] S. Nassar, Improving the Inertial Navigation System (INS) Error Model for INS and INS/DGPS Applications, **2013**.
- [19] D. Ünsal, AÖB (ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ) Deterministik ve Olasılıksal Hata Parametrelerinin Kesitirimi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2012**.
- [20] Park, M., Error Analysis and Stochastic Modeling of MEMS based Inertial Sensors for Land Vehicle Navigation Applications, Yüksek Lisans Tezi, Calgary Üniversitesi, Kanada, **2004**.
- [21] Nassar, S., Niu, X., Aggarwal, P. and El-Sheimy, N., INS/GPS Sensitivity Analysis Using Different Kalman Filter Approaches, The Institute of Navigation National Technical Meeting, California, A.B.D., **2006**.
- [22] El-Diasty, M., El-Rabbany A. and Pagiatakis S., Stochastic Characteristics of Temperature-Dependent MEMS-Based Inertial Sensor Error, The Institute of Navigation National Technical Meeting, California, A.B.D., **2006**.
- [23] Walid, A. H., Accuracy Enhancement of Integrated MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications, Doktora Tezi, Calgary Üniversitesi, Kanada, **2005**.



- [24] Shcheglov, K., Evans, C., Gutierrez, R. and Tang, T. K., Temperature dependent characteristics of the JPL silicon MEMS gyroscope. IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol 1, **2000**.
- [25] Hou, H., Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance, Yüksek Lisans Tezi, Calgary Üniversitesi, Kanada, **2004**.
- [26] A. Kourepenis, Performance of MEMS inertial sensors, IEEE Position Location and Navigation Symposium, California, A.B.D., **1998**, p 1-8.
- [27] K. P. Schwarz, M. A. Chapman, M. W. Cannon and P. Gong, An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data, Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 59, no .1, **1993**.
- [28] P. S. Maybeck, Stochastic Models, Estimation and Control, New York, ABD, Academic Press, **1979**.
- [29] S. Alban, D. M. Akos, S. M. Rock, and D. Gebre-Egziabher, Performance analysis and architectures for INS-aided GPS tracking loops, **2003**.
- [30] M. D. Cecco, Sensor fusion of inertial-odometric navigation as a function of the actual manoeuvres of autonomous guided vehicles, **2003**.
- [31] S. Alban, D. M. Akos, S. M. Rock, and D. Gebre-Egziabher, Performance analysis and architectures for INS-aided GPS tracking loops, **2003**.
- [32] B. M. Scherzinger, Precise robust positioning with inertial/GPS RTK,” in Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Virginia, A.B.D., **2000**, p. 155–162.
- [33] S. Sukkarieh, E. M. Nebot and H. F. Durrant-Whyte, A high integrity IMU/GPS navigation loop for autonomous land vehicle applications, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 3, **1999**, p. 572-578.
- [34] Titterton, D. H. and Weston, J. L, Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd, **1997**.
- [35] Shi Qiang Liu, Rong Zhu, and Heng Gao Ding, A temperature compensation method for micromachined thermal gas gyroscope, IEEE SENSORS Conference, **2015**.