

**ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ HATALARININ  
BELİRLENMESİ VE DÜZELTİLMESİ**

**DETECTION AND COMPENSATION OF INERTIAL  
MEASUREMENT UNIT ERROR**

**YEŞİM GÜNHAN**

**Yrd. Doç. Dr. MEHMET DEMİRER**  
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

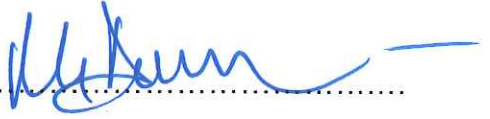
2014

**YEŞİM GÜNHAN'** ın hazırladığı "**Ataletsel Ölçüm Birimi Hatalarının Belirlenmesi ve Düzeltilmesi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selçuk GEÇİM  
BaŐkan



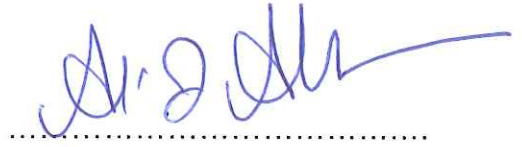
Yrd. Doç. Dr. MEHMET DEMİRER  
DanıŐman



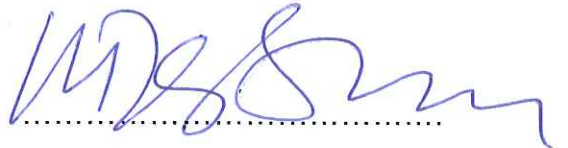
Doç. Dr. Mustafa DOĞAN  
Üye



Doç. Dr. Ali Ziya ALKAR  
Üye



Yrd. Doç. Dr. Derya ALTUNAY  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

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

- tez içerisindeki 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 tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversiteye veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27/06/2014

YEŞİM GÜNHAN

## ÖZET

# ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ HATALARININ BELİRLENMESİ VE DÜZELTİLMESİ

**Yeşim GÜNHAN**

**Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. MEHMET DEMİRER**

**Haziran 2014, 122 sayfa**

Ataletsel navigasyon sistemi, navigasyon denklemleri ve ataletsel ölçüm birimi çıktılarından konum, hız ve yönelim belirlemektedir. Uzun süren navigasyon uygulamalarında, tümlev olarak biriktirilen ataletsel ölçüm birimi sensör hataları kritik önem taşımaktadır.

Ataletsel ölçüm birimi hataları deterministik hatalar ve olasılıksal hatalar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, geliştirilen hata telafi algoritmaları ile ataletsel ölçüm birimi hatalarının telafi edilerek sistem performansının artırılmasıdır. Deterministik hataların belirlenmesi için 100 pozisyonlu statik test ve 120 dönümlü dinamik test geliştirilmiştir. Belirlenen bu hatalar deterministik hata telafi modeli içerisinde kullanılmıştır. İvmeölçer hatalarının tespit edilmesinde ortalama %99.2 ve dönümlü ölçer hatalarının tespit edilmesinde ortalama %99.3 başarımlar sağlanmıştır. Olasılık hataların belirlenmesi için dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanıldığı yeni bir yöntem önerilmiştir.

Bunlara ek olarak, önerilen diğer metod ataletsel sensör hatalarının sıcaklığa bağlı değişimini azaltarak sistemin doğruluğunu arttırmaktadır.

Bu tez kapsamında önerilen teori ve elde edilen iyileştirilmiş sonuçlar, geliştirilen benzetim yazılımı kullanılarak sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** ataletsel ölçüm birimi, deterministik hatalar, olasılıksal hatalar, dalgacık dönüşümü, Kalman süzgeci, sıcaklık kalibrasyonu.

## **ABSTRACT**

### **DETECTION OF INERTIAL MEASUREMENT UNIT ERROR BY VARIOUS METHODS AND COMPARISON OF USED METHODS**

**Yeşim GÜNHAN**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics  
Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. MEHMET DEMİRER**

**June 2014, 122 pages**

Inertial navigation system determines position, velocity and attitude by using navigation equations and inertial measurement unit outputs. Accumulation of sensor errors propagated by integration becomes very crucial in long-term navigation applications.

Inertial measurement unit errors are divided into two main groups; deterministic errors and stochastic errors. The purpose of this thesis is to improve the performance of an IMU by developing error compensation algorithms. 100 position static tests and 120 rate dynamic tests are performed to determine the deterministic errors. These identified errors are used in deterministic error compensation model. Implementation of the proposed theory results in 99.2% improvement in accelerometer errors and 99.3% improvement in gyroscope errors. A new hybrid wavelet transform-Kalman filter method for the determination stochastic errors is suggested.

In addition, proposed method further improves system accuracy through reducing the temperature dependent inertial sensor errors.

The whole proposed theory and improved results are reflected by developed simulation software.

**Keywords:** inertial measurement unit, deterministic errors, stochastic errors, wavelet transform, Kalman filter, temperature calibration.

## TEŐEKKÜR

Tez çalıőmamın baőından sonuna kadar çok yardımını gördüğüm bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Mehmet DEMİRER'e tez çalıőmam süresince göstermiő olduğu anlayıő ve yardımlarından dolayı teőekkür ederim.

Çalıőmalarım sırasında desteğini esirgemeyen bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım aynı zamanda değerli jüri üyelerinden biri olan Doç. Dr. Mustafa DOĞAN'a yardımlarından dolayı teőekkür ederim.

Bu tezin oluőmasına kaynaklık eden ve tezin kapsamında kullanılan verileri sağlayan ROKETSAN A.Ő'ye, çalışma arkadaőlarım Derya ÜNSAL'a, Baėıő ALTINÖZ'e ve Dr. Uğur KAYASAL'a teőekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen, her zaman yanımda olan babam Ergün GÜNHAN'a, annem Sevim GÜNHAN'a ve kardeőim Yeliz GÜNHAN'a teőekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ .....	1
2. ATALETSEL NAVİGASYON HAKKINDA TEMEL BİLGİ.....	3
2.1. Ataletsel Navigasyon Sistemleri .....	3
2.2. Ataletsel Ölçüm Birimi .....	7
2.3. Ataletsel Sensörler .....	7
2.4. İvmeölçerler.....	8
2.4.1. MEMS İvmeölçerler .....	11
2.5. Dönüölçer.....	13
2.5.1. Optik Dönüölçerler.....	14
2.5.2. MEMS Dönüölçerler .....	16
3. ATALETSEL SENSÖR HATA PARAMETRELERİ VE HATA MODELLERİ... 19	
3.1. İvmeölçer Deterministik ve Olasılıksal Hata Parametreleri.....	21
3.1.1. İvmeölçer Sabit Kayma Hatası .....	21
3.1.2. İvmeölçer Sabit Kayma Kararsızlığı .....	22
3.1.3. İvmeölçer Orantı Katsayısı Hatası.....	22
3.1.4. İvmeölçer Orantı Katsayısı Kararsızlığı .....	23
3.1.5. İvmeölçer Eksenel Kaçıklık Hatası .....	23
3.1.6. Rastgele Sensör Gürültüsü .....	24
3.2. Dönüölçer Deterministik ve Olasılıksal Hata Parametreleri .....	24
3.2.1. Dönüölçer Sabit Kayma Hatası .....	25
3.2.2. Dönüölçer Sabit Kayma Kararsızlığı.....	26
3.2.3. Dönüölçer Orantı Katsayısı Hatası .....	27
3.2.4. Dönüölçer Orantı Katsayısı Kararsızlığı .....	28
3.2.5. Dönüölçer Eksenel Kaçıklık Hatası .....	28
3.2.6. İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası .....	29

3.2.7.	Rastgele Sensör Gürültüsü .....	30
3.3.	Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Modelleri .....	30
3.3.1.	İvmeölçer Hata Modeli.....	30
3.3.2.	Dönüölçer Hata Modeli.....	31
3.3.3.	Sabit Kayma Kararsızlığı Hata Modeli.....	32
3.3.3.1.	Gauss-Markov Model .....	33
3.3.3.2.	Özbağlanımlı Model .....	34
3.3.3.3.	Yule-Walker Yönetimi.....	35
3.3.3.4.	Özbağlanımlı Model Tabanlı Gauss-Markov Model.....	35
4.	ATALETSEL SENSÖR HATA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	37
4.1.	Deterministik Hataların Belirlenmesi.....	37
4.1.1.	Çok Pozisyonlu Statik Test.....	38
4.1.2.	Çok Dönülü Dinamik Test.....	41
4.1.3.	Test Verilerinin İşlenmesi (Least Squares Fitting Metodu) .....	44
4.1.4.	Ataletsel Ölçüm Birimi Deterministik Hata Telafi Modeli.....	45
4.2.	Olasılıksal Hataların Belirlenmesi.....	47
4.2.1.	Dalgacık Dönüşümü .....	47
4.2.1.1.	Ayrık Dalgacık Dönüşümü .....	48
4.2.1.2.	Ters Ayrık Dalgacık Dönüşümü.....	50
4.2.2.	Kalman Süzgeci .....	51
4.2.2.1.	Ayrık Kalman Süzgeci .....	51
4.2.2.1.1.	Ayrık Kalman Süzgeci Algoritması .....	53
5.	BENZETİM SONUÇLARI.....	56
5.1.	Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Modeli Benzetim Sonuçları .....	56
5.2.	Ataletsel Ölçüm Birimi Deterministik Hata Telafi Modeli Benzetim Sonuçları .....	62
5.3.	Ataletsel Ölçüm Birimi Olasılıksal Hata Telafi Modeli Benzetim Sonuçları .. .....	69



5.4.	Gerçek Ataletsel Ölçüm Birimi Hatalarının Telafi Edilmesi .....	76
6.	SICAKLIĞA BAĞLI ATALETSEL SENSÖR HATALARININ TELAFİSİ .....	85
6.1.	Sıcaklığa Bağlı Hataların Telafi Algoritması .....	85
6.2.	Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar .....	86
7.	SONUÇLAR.....	93

# ŞEKİLLER

## Sayfa

Şekil 2.1 Ataletsel navigasyon sisteminin bileşenleri [4].....	3
Şekil 2.2 (a) Stabilize platform AÖB bileşenleri (b) Analitik platform AÖB bileşenleri [3] .....	5
Şekil 2.3 Stabilize platform blok diyagramı [1] .....	5
Şekil 2.4 Analitik platform blok diyagramı [1] .....	6
Şekil 2.5 Ataletsel Ölçüm Birimi Bileşenleri [3] .....	7
Şekil 2.6 Basit ivmeölçer yapısı .....	9
Şekil 2.7 İvmeölçer Teknolojisi Uygulamaları [10] .....	10
Şekil 2.8 Kapasitif ivmeölçer [13].....	11
Şekil 2.9 Piezorezistif ivmeölçer [13] .....	12
Şekil 2.10 Piezoelektrik ivmeölçer [13] .....	12
Şekil 2.11 Dönüölçer Teknolojisi Uygulamaları [10] .....	14
Şekil 2.12 Dairesel dönen (Sagnac) girişimölçer [1] .....	15
Şekil 2.13 RLG ve FOG [6].....	16
Şekil 2.14 Coriolis kuvvetinin oluşumu [1] .....	16
Şekil 2.15 MEMS diyapazon dönüölçerin dayanıklı kütleinin hareketi [1] .....	17
Şekil 2.16 Titreşimli tekerlek dönüölçer [11] .....	18
Şekil 3.1 Sabit kayma hatası gösterimi [20].....	19
Şekil 3.2 Orantı katsayısı hatası gösterimi [20] .....	20
Şekil 3.3 Eksenel kaçıklık hatası gösterimi [20].....	20
Şekil 3.4 Sabit kayma hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş ivmeölçer verisi..	22
Şekil 3.5 Eksenel kaçıklık hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş ivmeölçer verisi .....	24
Şekil 3.6 Sabit kayma hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş dönüölçer verisi .	26
Şekil 3.7 Orantı katsayısı hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş dönüölçer verisi .....	27
Şekil 3.8 Eksenel kaçıklık hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş dönüölçer verisi .....	29
Şekil 3.9 İvmeölçer Hata Modeli .....	31
Şekil 3.10 Dönüölçer Hata Modeli .....	32
Şekil 3.11 Birinci dereceden GM sürecin özilinti fonksiyonu.....	33

Şekil 3.12 Özbağlanımlı model yapısı .....	34
Şekil 3.13 Özbağlanımlı tabanlı GM modelleme basamakları .....	36
Şekil 4.1 Çok pozisyonlu statik ve dinamik test ekipmanları.....	37
Şekil 4.2 Statik test adımları dizilimi .....	38
Şekil 4.3 Çok pozisyonlu statik test x eksenini test basamakları .....	39
Şekil 4.4 Çok pozisyonlu statik test y eksenini test basamakları .....	39
Şekil 4.5 Çok pozisyonlu statik test z eksenini test basamakları .....	40
Şekil 4.6 Statik test basamakları (mavi renk x eksenini, yeşil renk y eksenini ve kırmızı renk z eksenini).....	40
Şekil 4.7 Dinamik test adımları dizilimi .....	41
Şekil 4.8 Çok dönümlü dinamik test x eksenini test basamakları .....	42
Şekil 4.9 Çok dönümlü dinamik test y eksenini test basamakları .....	42
Şekil 4.10 Çok dönümlü dinamik test z eksenini test basamakları .....	43
Şekil 4.11 Dinamik test basamakları (mavi renk x eksenini, yeşil renk y eksenini ve kırmızı renk z eksenini) .....	43
Şekil 4.12 Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Telafi Modeli.....	46
Şekil 4.13 Zaman – Frekans Diyagramı .....	48
Şekil 4.14 Sinyalin yaklaşım ve ayrıntı bileşenleri .....	48
Şekil 4.15 Sinyalin bir seviye bileşenlerine ayrıştırılması .....	49
Şekil 4.16 Sinyalin çok seviyeli bileşenlerine ayrıştırılması [35] .....	50
Şekil 4.17 Sinyalin yeniden elde edilmesi.....	51
Şekil 4.18 Kalman süzgeci algoritması.....	54
Şekil 5.1 x eksenini AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı) 58	
Şekil 5.2 y eksenini AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı) 59	
Şekil 5.3 z eksenini AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı) 59	
Şekil 5.4 x eksenini AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı) 60	
Şekil 5.5 y eksenini AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı) 61	
Şekil 5.6 z eksenini AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı) 61	
Şekil 5.7 x eksenini AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri) .....	64
Şekil 5.8 y eksenini AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri) .....	65
Şekil 5.9 z eksenini AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri) .....	65

Şekil 5.10 Deterministik hataları telafi edilmiş çok pozisyonlu statik test verisi ....	66
Şekil 5.11 x eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri).....	67
Şekil 5.12 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri).....	67
Şekil 5.13 z eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri).....	68
Şekil 5.14 Deterministik hataları telafi edilmiş çok dönümlü dinamik test verisi.....	69
Şekil 5.15 x eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	70
Şekil 5.16 x eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	70
Şekil 5.17 y eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	71
Şekil 5.18 y eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	71
Şekil 5.19 z eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	72
Şekil 5.20 z eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	72
Şekil 5.21 x eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	73
Şekil 5.22 x eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	74
Şekil 5.23 y eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	74
Şekil 5.24 y eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	75
Şekil 5.25 z eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	75
Şekil 5.26 z eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	76
Şekil 5.27 x eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri).....	78

Şekil 5.28 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hata telafi edilmiş veri).....	79
Şekil 5.29 z eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hata telafi edilmiş veri).....	79
Şekil 5.30 x eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hata telafi edilmiş veri).....	80
Şekil 5.31 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hata telafi edilmiş veri).....	80
Şekil 5.32 z eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hata telafi edilmiş veri).....	81
Şekil 5.33 x eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	82
Şekil 5.34 y eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	82
Şekil 5.35 z eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	83
Şekil 5.36 x eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	83
Şekil 5.37 y eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	84
Şekil 5.38 z eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi .....	84
Şekil 6.1 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın birinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	86
Şekil 6.2 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın ikinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	87
Şekil 6.3 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın üçüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	87
Şekil 6.4 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın dördüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	88
Şekil 6.5 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın beşinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	88
Şekil 6.6 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın birinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	89

Şekil 6.7 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın ikinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	90
Şekil 6.8 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın üçüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	90
Şekil 6.9 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın dördüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	91
Şekil 6.10 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın beşinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi .....	91

# ÇİZELGELER

## Sayfa

Çizelge 2.1 ANS ve KKS karşılaştırma çizelgesi [3] .....	4
Çizelge 2.2 Stabilize platform ve analitik platform navigasyon sistemlerinin karşılaştırılması [1,3] .....	6
Çizelge 2.3 Ataletsel Sensör Uygulama Sınıfları [9] .....	8
Çizelge 2.4 MEMS diyaazon dönüölçer performans çizelgesi [1] .....	18
Çizelge 5.1 AÖB Hata Modeli İvmeölçer Hata Parametreleri Girdileri .....	56
Çizelge 5.2 AÖB Hata Modeli Dönüölçer Hata Parametreleri Girdileri .....	57
Çizelge 5.3 AÖB Hata Telafi Modeli İvmeölçer Hata Parametreleri Girdileri .....	62
Çizelge 5.4 AÖB Hata Telafi Modeli Dönüölçer Hata Parametreleri Girdileri .....	63
Çizelge 5.5 AÖB Hata Telafi Modeli İvmeölçer Hata Parametreleri Girdileri .....	77
Çizelge 5.6 AÖB Hata Telafi Modeli Dönüölçer Hata Parametreleri Girdileri .....	77
Çizelge 6.1 Polinom Derecesine Göre Kalan Hata .....	89
Çizelge 6.2 Polinom Derecesine Göre Kalan Hata .....	92

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

<b>A</b>	:	Durum Geçiş Matrisi
<b>B</b>	:	Kontrol Girişi İçin Geçiş Matrisi
$B_{Gx}, B_{Gy}, B_{Gz}$	:	İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası
$B_x, B_y, B_z$	:	Sabit Kayma Hatası
$E[.]$	:	Beklenen Değer
$K_k$	:	Kalman Kazancı
$M_{xy}, M_{xz}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}, M_{zy}$	:	Eksenel Kaçıklık Hataları
$n_x, n_y, n_z$	:	Rasgele Sensör Gürültüsü
$P_k^-$	:	Öncül Hata Ortak Değişintisi
$P_k$	:	Sonsal Hata Ortak Değişintisi
$R_{xx}$	:	Özilinti
$S_x, S_y, S_z$	:	Orantı Katsayısı Hatası
$u_k$	:	Kontrol Girişi
$\hat{x}_k^-$	:	Öncül Durum Kestirimi
$\hat{x}_k$	:	Sonsal Durum Kestirimi
$\delta B_x, \delta B_y, \delta B_z$	:	Sabit Kayma Kararsızlığı
$\delta S_x, \delta S_y, \delta S_z$	:	Orantı Katsayısı Kararsızlığı

### Kısaltmalar

AHRS	:	Attitude and Heading Reference System
ANS	:	Ataletsel Naviyasyon Sistemi (Inertial Navigation System)



AÖB	: Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
DTG	: Dry Tuned Gyroscope
FOG	: Fiber Optik Gyroscope
GM	: Gauss-Markov
IFOG	: Interferometric Fiber Optik Gyroscope
KF	: Kalman Filter
KKS	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
KZFD	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (Short Time Fourier Transform)
LSF	: Least Squares Fitting
MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems
RLG	: Ring Laser Gyroscope
RMS	: Root Mean Square
USBL	: Ultra-Short Base Line

## SÖZLÜK DİZİNİ

Açısal Hız Rasgele Yürüme	: Rate Random Walk
Açısal Rasgele Yürüme	: Angular Random Walk
Allan Varyans	: Allan Variance
Alt Katman	: Substrate
Analitik	: Strapdown
Bağlaşım	: Coupling
Çerçeve	: Frame
Dalgacık Dönüşümü	: Wavelet Transform
Dayanıklı Kütle	: Proof Mass
Değişinti, Varyans	: Variance
Diyapozon	: Tuning fork
Doğrusal	: Linear
Doğrusal Hareket	: Linear Motion
Dönüölçer	: Gyroscope
Dönü Tablası	: Rate Table
Durağan	: Stationary
Durağan Olmayan	: Non-stationary
Durağan Olmayan Rasgele Süreç	: Non-stationary Random Process
Durum Geçiş Matrisi	: State Transition Matrix
Eksenel Kaçıklık	: Misalignment
Girişimölçer	: Interferometer
Gürültü	: Noise
Hız Rasgele Yürüme	Velocity Random Walk

İlinti	: Correlation
İlk Konumdan Türetilen Hesaplama	: Dead Reckoning
İvmeölçer	: Accelerometer
Kardan	: Gimbal
Kestirim	: Estimation
Kuvars	: Quartz
Nicemleme Gürültüsü	: Quantization Noise
Orantı Katsayısı	: Scale Factor
Ortalama Kareysel Hata	: Root Mean Square Error
Ortak Değişinti	: Covariance
Ortalama Mutlak Yüzde Hata	: Mean Absolute Percentage Error
Ödünleşim	: Trade-off
Önsel	: Prior
Özbağlanımlı	: Autoregressive
Özilinti	: Autocorrelation
Öz Ortak Değişinti	: Autocovariance
Özyineli	: Recursive
Rasgele Süreç	: Random Process
Sabit Kayma	: Bias
Sabit Kayma Hatası Kararsızlığı	: Bias Instability
Sabit Terim	: Fixed Term
Sapma	: Deflection
Serbestlik Derecesi	: Degree of Freedom
Sıcaklıkla Uyarılan Değişimler	: Temperature Induced Variation

Sonsal	: Posteriori
Standart Sapma	: Standard Deviation
Titreşimli Tekerlek Dönüölçer	: Vibrating Wheel Gyroscope
Tümlev	: Integration
Yapılanış, Düzenleşim	: Configuration
Yerçekimi	: Gravity
Yönelim, Duruş	: Attitude

# 1. GİRİŞ

Navigasyon, fiziksel bir nesnenin referans koordinat çerçevesine bağılı olarak pozisyonunun, hızının ve yöneliminin belirlenmesidir. Navigasyon, tarihte ağırlıklı olarak denizlerde seyahat gemileri ile yapıldı. Günümüzde ise konum tabanlı hizmetler, arama ve kurtarma, kara ve hava araçları, uzay araçları, balistik roketler, otomatik tarım, inşaat araçları ve robotik gibi alanlarda askeri ve sivil amaçlar için kullanılmaktadır.

Entegre devrelerin mikroelektronik ve minyatürleştirme alanlarındaki gelişmeleri, ucuz ataletsel sensörlerin, KKS alıcılarının ve güçlü bilgisayarların üretimini kolaylaştırmıştır. Bu düşük maliyetli uygulamalar navigasyon sistemlerini de geliştirmiştir [3]. İvmeölçer ve dönüölçer gibi ataletsel sensörlerin kullanımı ile ataletsel ölçüm birimleri oluşturulmuştur. ANS, navigasyon denklemleriyle AÖB çıktılarından konum, hız ve yönelim belirlemektedir.

ANS otonom bir sistemdir ve dışarıdan bir sinyale bağılı değildir. Bu özelliğı ile uydudan gelecek sinyalleri işleyerek konum, hız ve yönelim gibi navigasyon parametrelerini hesaplayan KKS'ye göre tercih edilebilir.

Geçmişten günümüze teknolojik gelişmeler her zaman daha iyi ve daha düşük maliyetli üretime doğru olmuştur. Bu açıdan MEMS tabanlı sensörlerin gelişmesi yeni teknolojik yapılandırmalara olanak sağlamıştır.

ANS, bir aracın hızını ve konumunu bir dış referansa bağılı kalmadan sensör ölçümleri ile belirleyen bir sistemdir. ANS'lerde ivmeölçerler doğrusal ivme ölçümleri yaparken dönüölçerler açısal hız ölçümlerinden sorumludurlar.

Uzun süren navigasyon süreçlerinde, ataletsel sensörler tarafından tümlev alarak biriktirilen hatalar konum ve hız takibini imkânsız hale getirecektir. Bu durum da ataletsel sensörlere destek olacak başka bir sistemin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada önerilen çözüm, ataletsel ölüm birimi hatalarını belirlemek için çeşitli yöntemlerin geliştirmesidir. Böylece düşük maliyetli ataletsel sensörler ile yüksek performanslı ataletsel ölüm birimi oluşturulacaktır.

Bu tez çalışması birinci bölümü giriş olmak üzere toplam yedi bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde, ataletsel navigasyon sistemleri, ataletsel ölüm birimi, ataletsel sensör eşitleri hakkında genel bilgi verilmiştir.

nc bölümde, ataletsel sensörlerin deterministik ve olasılıksal hata eşitleri, hata modelleri açıklanmıştır. Sabit kayma kararsızlığı hatasını modellemek için geliştirilen model detaylı olarak verilmiştir.

Dördüncü bölümde, deterministik ve olasılıksal sensör hatalarını belirlemek için kullanılan yöntemler ayrı ayrı anlatılmıştır. Deterministik hataların belirlenmesi için geliştirilen çok pozisyonlu statik test ve çok dönülü dinamik teste yer verilmiştir. Olasılıksal hataların belirlenmesi amacıyla dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanıldığı yeni bir yöntem anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, benzetim sonuçları verilmiştir. Değişik test verileri kullanılarak algoritmanın başarısı test edilmiştir.

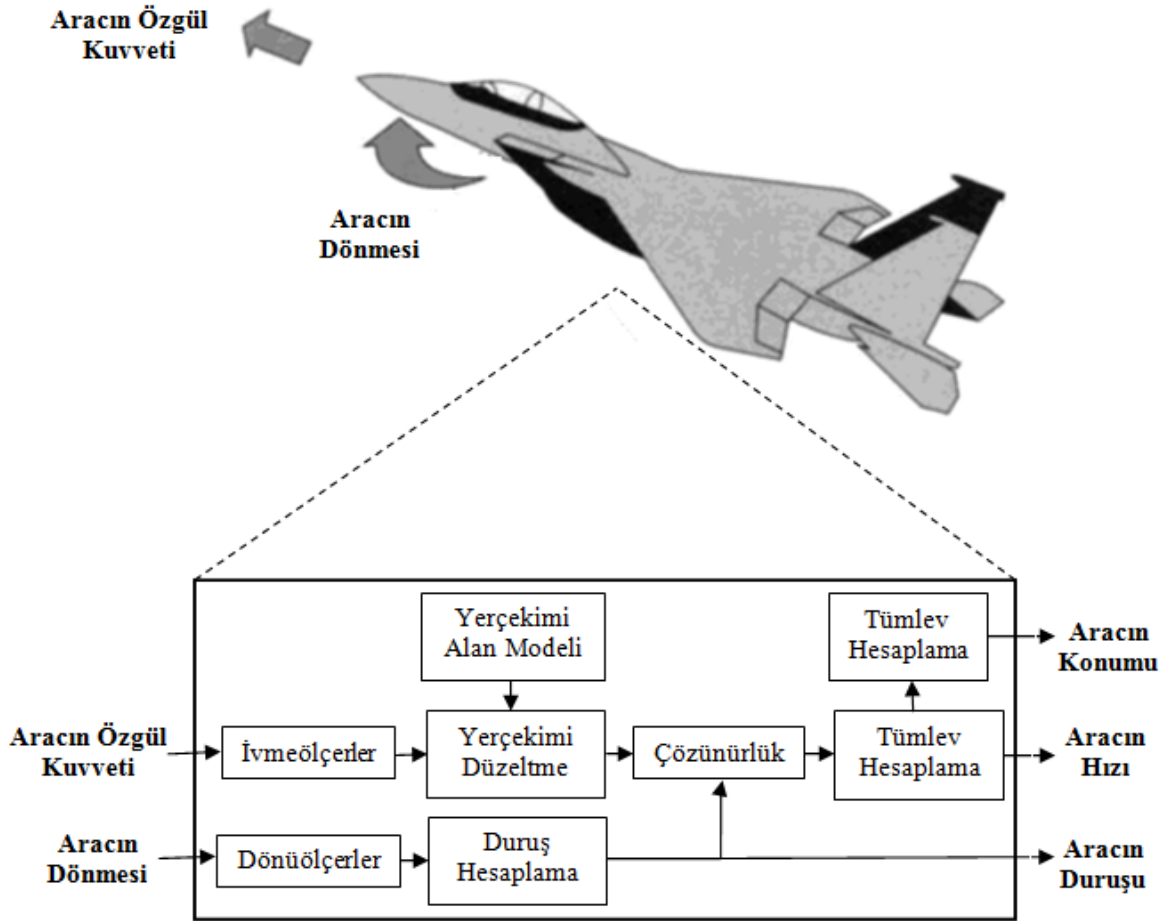
Altıncı bölümde, sıcaklık değişiminin deterministik hataya olan etkileri belirlenmiştir. Ataletsel sensörlerin sıcaklığa bağlı hatalarını azaltmaya yönelik sıcaklık kalibrasyonu yapılmıştır.

Son bölüm olan yedinci bölümde ise, bu tez çalışmasının sonucunda elde edilenler ve gelecek çalışmalar ile yapılması hedeflenenler anlatılmıştır.

## 2. ATALETSEL NAVİGASYON HAKKINDA TEMEL BİLGİ

### 2.1. Ataletsel Navigasyon Sistemleri

Ataletsel navigasyon sistemleri, araç üzerinde yerleşik çalışarak, harici sensörlere gerek duymadan gelişmiş seyir yetenekleri vaat eden sistemlerdir. Günümüzde gemi, uçak, uzay araçları, taktik ve stratejik füzelerin navigasyonunu da sağlayan çok geniş bir alanda ANS kullanılmaktadır. Temel olarak üç eksene yerleştirilmiş ivmeölçer hız ve konum bilgisini ve üç eksene yerleştirilmiş dönüölçer ise duruş (yönelim) bilgisini sağlar. Hız ve konum bilgisine dönüşmesi esnasında navigasyon bilgisayarları tarafından tümlev alma işlemi uygulanmaktadır. Şekil 2.1’de ataletsel navigasyon sisteminin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Ataletsel navigasyon sisteminin bileşenleri [4]

Ataletsel navigasyon otonom bir navigasyon tekniğidir. Ataletsel sensörlerden alınan verilere ilk konumdan türetilen hesaplama yöntemini uygulayarak konum, hız ve yönelim bilgilerinin sağlar. İlk konumdan türetilen hesaplama ile bir aracın

önceki pozisyonu ve ivmeölçer-dönüölçer ölçümleri kullanılarak mevcut pozisyon belirlenmektedir. Ancak çalışma prensipleri, sensör kaynaklı hata ve gürültülerin zamanla artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple ataletsel ölçüm sistemleri uzun süreli kullanımlarda tatmin edici sonuçlara ulaşmak amacıyla diğer seyir enstrümanlarıyla (USBL, KKS vb.) birlikte kullanılırlar.

Uygulamaların çoğunda ANS(ataletsel navigasyon) ile KKS(uydu navigasyonu) birbirlerinin eksiklerini dengeleyecek bir tümleşik sistem oluşturmaktadır. Ataletsel navigasyon sisteminde yer alan ataletsel sensörlerin sabit kayma vb. hataları nedeniyle hesaplanan konum bilgisinin zamanla doğruluğunun azalması bu sistemin en büyük dezavantajıdır. Diferansiyel navigasyon denklemlerinde ilk konum değer bilgisinin gerekli olması bu sistemin diğer dezavantajıdır. Uydu navigasyonunda ise görüş hattı problemi mevcuttur. Yayının bozulması veya kandırılma gibi eylemlerden de etkilenmektedir.

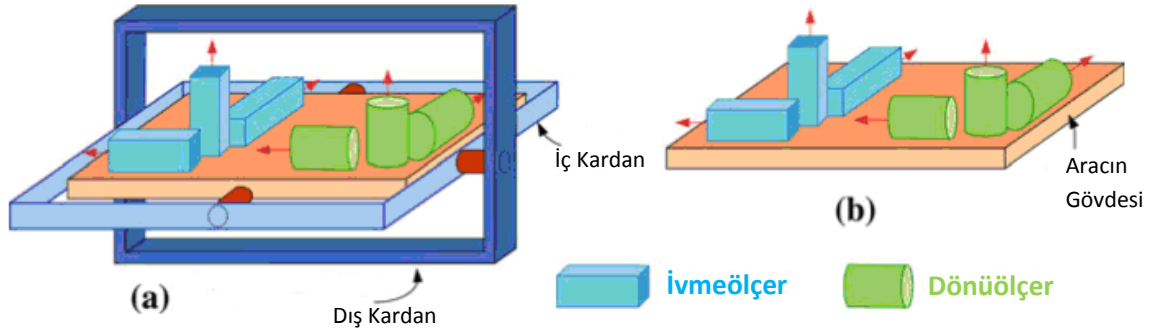
ANS, yüksek veri hızı (50Hz ve üstü) ile sürekli ve gerçek zamanlı olarak çalışabilir [5]. Uydu navigasyonunun aksine hava koşullarından etkilenmez. Kısa vadeli uygulamalarda yüksek kararlılık sağlar. ANS ve KKS'nin özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1 ile verilmektedir.

Çizelge 2.1 ANS ve KKS karşılaştırma çizelgesi [3]

Özellikler	ANS	KKS
Doğruluk	Kısa süreli olarak iyidir. Zamanla doğruluk bozulur.	Uzun süreli olarak iyidir.
İlk konum	Gerekli	Gerekli değil
Yönelim bilgisi	Mevcut	Tipik olarak mevcut değil
Yerçekimine duyarlılık	Evet	Hayır
Otonom	Evet	Hayır
Yayının bozulmasına karşı dayanıklılık	Evet	Hayır
Çıkışın veri hızı	Yüksek	Düşük

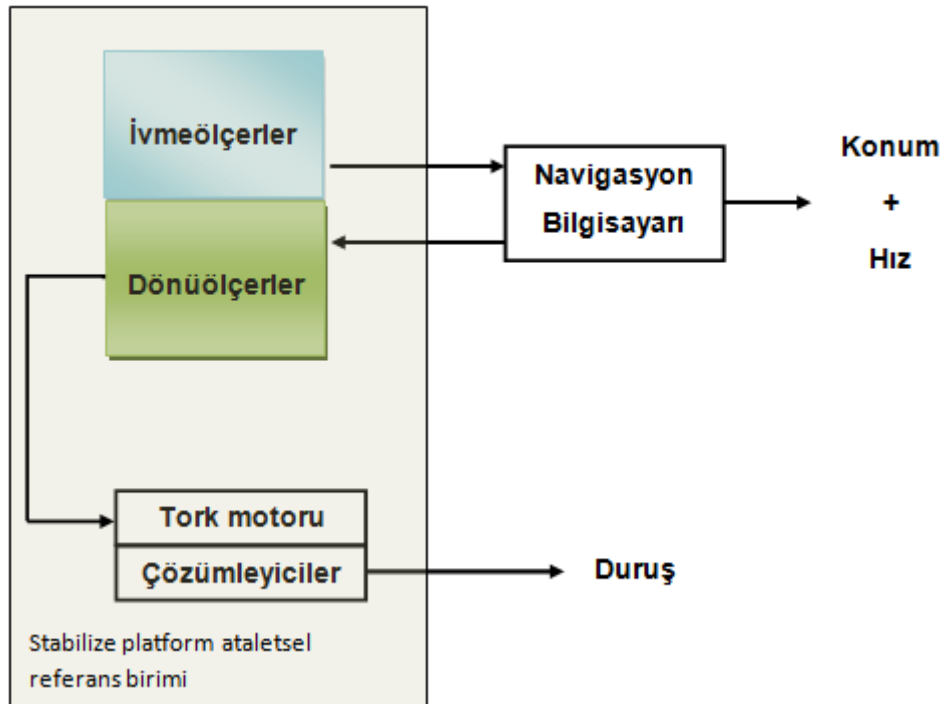
Ataletsel navigasyon sistemleri yapılanış açısından analitik platform ve stabilize platform olmak üzere iki temel kategoriden birine girer.





Şekil 2.2 (a) Stabilize platform AÖB bileşenleri (b) Analitik platform AÖB bileşenleri [3]

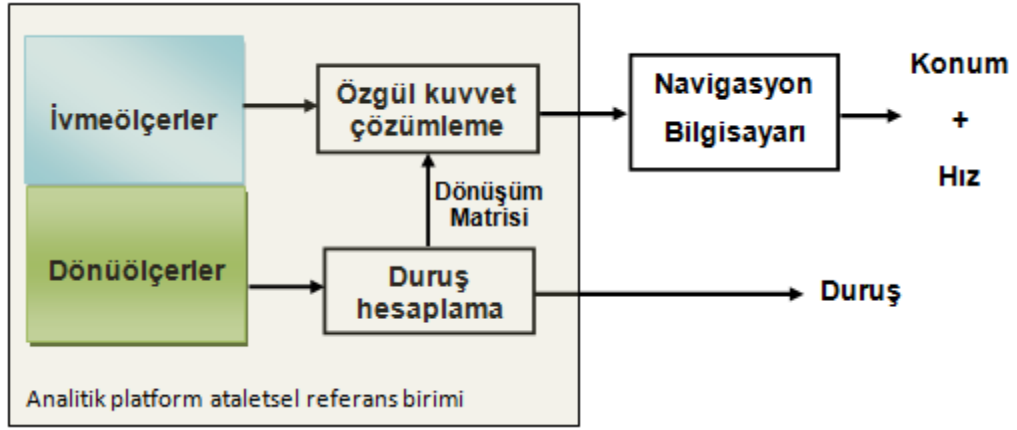
Stabilize platform, dönme serbestlik derecesi en az üç olacak şekilde düzenlenmiş bir dizi kardan (gimbal) kullanılarak aracın dönme hareketinden izole oluşan ve araç ile platform arasındaki açısal bağlaşımı en aza indiren platformdur [1]. Stabilize platformda, ataletsel sensörler daima navigasyon çerçevesi ile hizalanmış olacakları bir kadrana yerleştirilirler. Bu hizalama işlemi, tork motoru setinin dönüölçerlerden algıladığı dönüş tepkisine göre platformu döndürmesiyle gerçekleştirilir [3]. Böylece ivmeölçer ölçümlerinin tümlev alınmasıyla doğrudan navigasyon çerçevesindeki hız ve konum bilgileri elde edilir. Şekil 2.3'te stabilize platform işlevsel blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Stabilize platform blok diyagramı [1]

Stabilize platform, çok hassas navigasyon çözümü sağlamaktadır, ancak karmaşık mekanik yapısı ve yüksek maliyeti yüzünden kullanımı sınırlıdır.

Elektronikteki ilerlemeler analitik platform sistemlerin gelişmesine yol açmıştır. Analitik platformda, ataletsel sensörler hareketli platformun gövdesi üzerine sıkı bir şekilde monte edilir. Dönüölçer aracılığıyla ölçülen açısız hız navigasyon çerçevesi ile platformun çerçevesi arasında dönüşümü sürekli olarak günceller. İvmeölçer ölçümleri de bu dönüşümden geçerek navigasyon çerçevesinde ivme elde edilir. Şekil 2.4'te analitik platform işlevsel blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Analitik platform blok diyagramı [1]

Maliyetinin göreceli olarak daha düşük olması, boyutlarının küçük olması, basit mekanik yapıya sahip olması, güç kullanımının az olması, hafif olması, güvenilirliğinin yüksek olması ve stabilize platformlardan daha ucuz olması nedenleriyle analitik platform AÖB yapısı günümüzde tercih edilmektedir.

Stabilize platform ve analitik platform navigasyon sistemlerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2 ile verilmektedir.

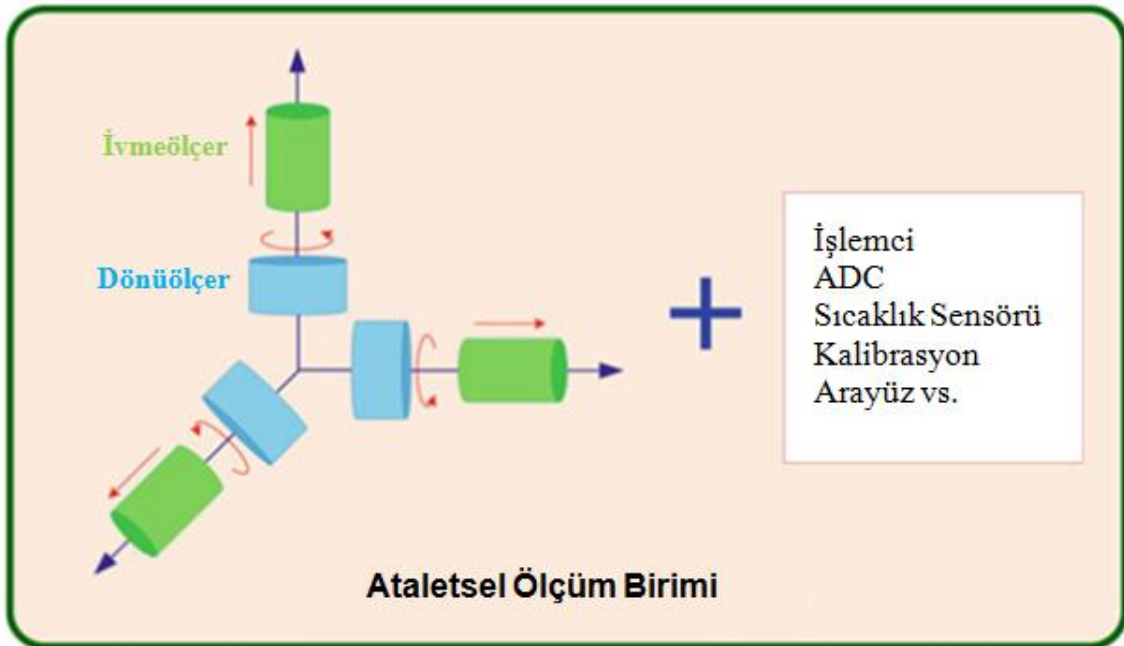
Çizelge 2.2 Stabilize platform ve analitik platform navigasyon sistemlerinin karşılaştırılması [1,3]

Özellikler	Stabilize platform	Analitik platform
Boyut	Daha büyük	Daha küçük
Ağırlık	Ağır	Daha hafif
Performans	Yüksek performans	Yüksek doğruluk
Dayanıklılık	Yüksek güvenilirlik, şok ve titreşime karşı düşük bağışıklık	Yüksek güvenilirlik, şok ve titreşime karşı dayanıklılık

## 2.2. Ataletsel Ölçüm Birimi

Ataletsel ölçüm birimi, açısal hız ve doğrusal ivmeyi ölçen bir sistemdir. AÖB 3 adet ivmeölçer ve 3 adet dönüölçerin oluşturduğu bütünü ifade etmek için kullanılmaktadır. İvmeölçerlerin ve dönüölçerlerin bileşimi ile oluşan bu sistem cismin nasıl hareket ettiğini ve nereye gittiğini belirlemektedir. 3 eksendeki ivmeyi ve açısal hızı ölçmek amacıyla sensörler ölçüm eksenleri birbirlerine dik olacak şekilde yerleştirilirler. AÖB başlangıç konumu bilindiği durumda, 3 eksende anlık doğrusal ivmeyi, yuvarlanma, yunuslama ve sapmadaki açısal değişimleri belirler ve tümlev olarak mevcut konum, hız ve yönelimin belirlenmesini sağlar. Bu hesaplamalarda ataletsel sensör verilerinin tümlevi alındığından AÖB hataları eklenerek artan hatalara yol açar. Yüksek kalite ataletsel sensörler daha az hataya sebep olduklarından daha kararlı navigasyon sağlarlar.

Şekil 2.5'te ataletsel ölçüm birimi bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.5 Ataletsel Ölçüm Birimi Bileşenleri [3]

## 2.3. Ataletsel Sensörler

İvmeölçer ve dönüölçerler ataletsel sensörler kapsamında değerlendirilmektedir. İvmeölçerlerin çoğu tek eksende özgül kuvvet ölçümü yapar. Aynı şekilde, dönüölçerlerin çoğu tek eksen etrafındaki açısal hızı ölçer. Genellikle her birinden

3 tane olmak üzere çoklu ivmeölçer ve dönüölçerin birleşmesiyle ataletsel ölçüm birimi (AÖB) oluşur. Ataletsel ölçüm birimleri 3 ekseninde özgül kuvvet ve açısal hız ölçme olanağı sağlayan sistemlerdir.

Makine mühendisliği, elektronik mühendisliği, elektro-optik ve atom fiziği gibi bilimin çeşitli dalları ataletsel sensörleri geliştirmek için çalışmaktadır. Sensörleri sabit kayma, orantı katsayısı, tekrarlanabilirlik, gürültü gibi sensör performansını etkileyen faktörlerle karşılaştırabiliriz. Uygulamaların çoğunda sensör performansının yanında sensör fiyatı ve boyutları da etkili rol oynamaktadır [9].

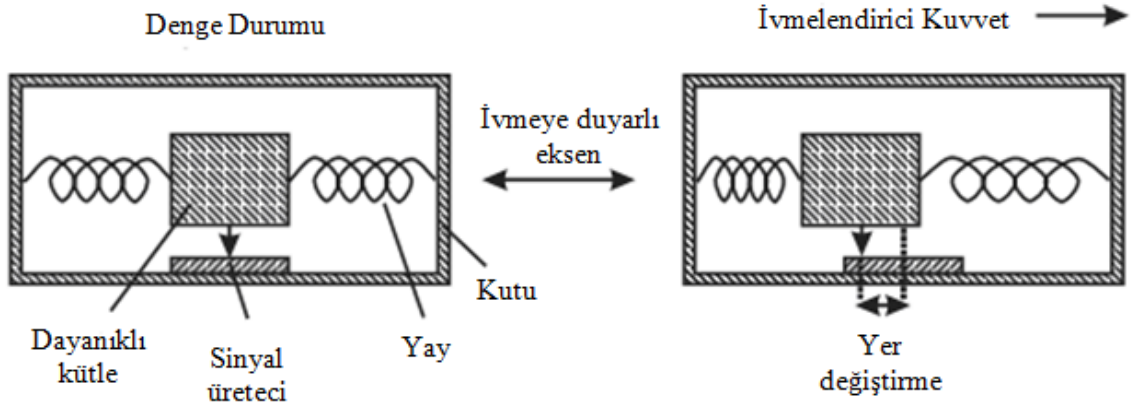
Ataletsel sensörlerin performans aralığı çok geniştir. Sensörün ölçüm doğruluğuna göre uygulama sınıfları Çizelge 2.3 ile verilmektedir.

Çizelge 2.3 Ataletsel Sensör Uygulama Sınıfları [9]

Uygulama Sınıfları	Dönüölçer Performansı	İvmeölçer Performansı
Ticari	>1 %/sa	>50 mg
Taktik	~1 %/sa	~1 mg
Navigasyon	0.01 %/sa	25 µg
Stratejik	~0.001 %/sa	~1 µg

#### 2.4. İvmeölçerler

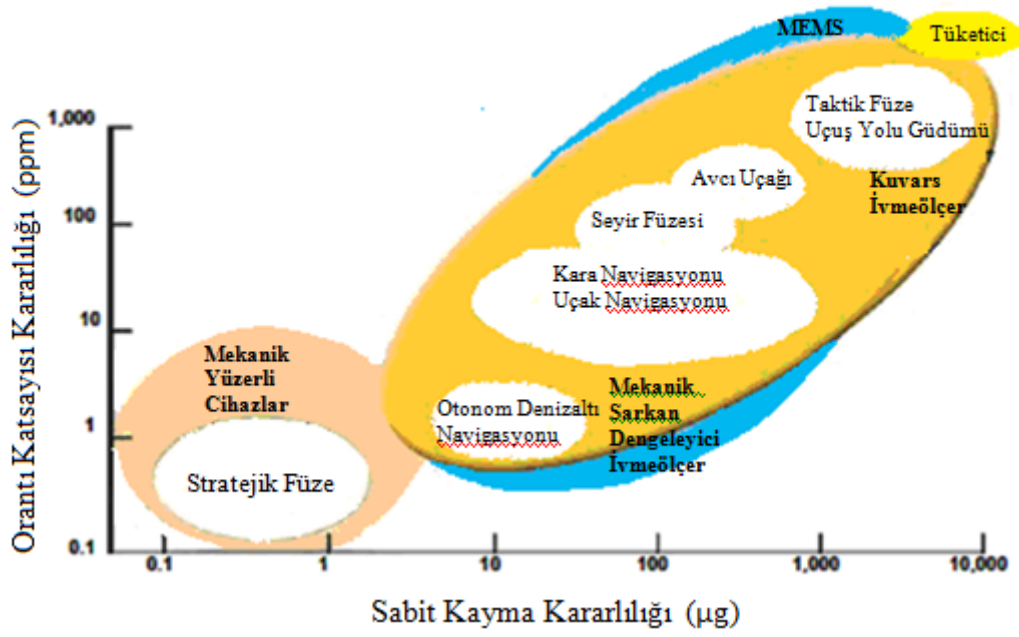
Ataletsel navigasyon sisteminin temel bileşenlerinden biridir. İvmeye duyarlı eksen boyunca uygulanan ivmeyi algılar ve ivmeyle orantılı elektriksel çıkış sağlar. İvmeölçerin çalışma prensibi Newton'un birinci hareket kanununu temel almaktadır. Bu kanuna göre hareketsiz cisimler hareketsiz kalma, hareketli cisimler ise harekete devam etme eğilimindedir.



Şekil 2.6 Basit ivmeölçer yapısı [4]

Bütün ivmeölçerler Şekil 2.6'te ifade edilen basit tasarımı yapılarında kullanılmaktadır. Basit ivmeölçer yapısında dayanıklı kütle, sinyal üretici, yay ve kutu bulundurulur. Dayanıklı kütle ivmeye duyarlı eksen boyunca hareket etmekte özgürdür. Sinyal üretici, dayanıklı kütle pozisyonundaki değişimi ölçer. İvmeölçer kutusuna duyarlı eksen boyunca ivmelendirici bir kuvvet uygulandığında, başlangıçta dayanıklı kütle hızını koruyacaktır. Bunun sonucunda kutu dayanıklı kütleyle göre hareket etmiş olacak ve yaylardan biri gerilirken diğeri sıkışacaktır. Gerilen ve sıkışan yaylar kutudan dayanıklı kütleyle doğru kuvveti iletir ve sonucunda yaylar tarafından dayanıklı kütleyle uygulanan kuvvetin oluşturduğu ivme ile dışarıdan uygulanan kuvvet ile kutu üzerinde oluşan ivme eşitlenene kadar kutu kütleyle göre hareket edecektir. Kütle kutuya göre son konumu kutuya uygulanan ivme ile orantılı olacaktır [4]. Yerçekimi ivmeölçerdeki tüm bileşenleri etkilediğinden kutu ile kütle arasında yerçekimine bağlı olarak bir hareket oluşurmaz. Bunun sonucunda tüm ivmeölçerler sadece özgül kuvveti başka bir deyişle yerçekimi olmayan ivmeyi algılamaktadır.

İvmeölçerler 3 ana grupta incelenir. Bu grupların içerisinde mekanik ivmeölçerler, kuvars ivmeölçerler ve MEMS ivmeölçerler bulunmaktadır. Her grup sensör farklı hata karakteristiklerine ve dolayısıyla farklı uygulama alanlarına sahiptir [6]. Şekil 2.7'te ivmeölçer teknolojilerinin uygulama alanlarına göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.7 İvmeölçer Teknolojisi Uygulamaları [10]

MEMS günümüzde kullanılan mekanik ve elektrik sistemlerin mikron boyutlarında tasarımı yapılmış türevleridir. Boyutları 1 ile 100 mikrometre arasında değişim gösteren mikro elektro mekanik sistemlerde evrensel fizik kanunları geçerliliğini kaybetmektedir. Çünkü MEMS yapılarında hacimin yüzey alanına oranı oldukça düşüktür ve bunun sonucunda yüzey etkileri (elektrostatik kuvvetler) hacim etkilerine (eylemsizlik, ısı kütlesi) baskın gelmektedir [14].

MEMS sensörlerin küçük boyut, düşük fiyat ve yüksek güvenilirlik gibi birçok avantajı bulunmaktadır.

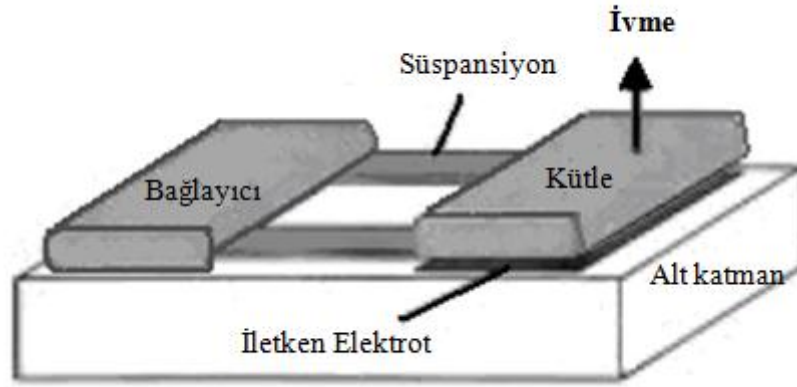
Günümüzde MEMS teknolojileri ile üretilmiş 0,5-1g ivme seviyelerinden birkaç bin ivme seviyelerine kadar ölçüm yapabilen ivmeölçerler piyasada ticari olarak bulunabilmektedirler.

Bu tez kapsamında MEMS ivmeölçerler kullanılmaktadır. İvmeölçer hata modeli Bölüm-3'te detaylı olarak açıklanmaktadır.

### 2.4.1. MEMS İvmeölçerler

MEMS ivmeölçerler kapasitif, optik, piezoresistif, piezoelektrik, termal, tünel akımı(tunneling current), rezonans (resonant), manyetik olmak üzere algılama mekanizmalarına göre sekiz grupta incelenebilir.

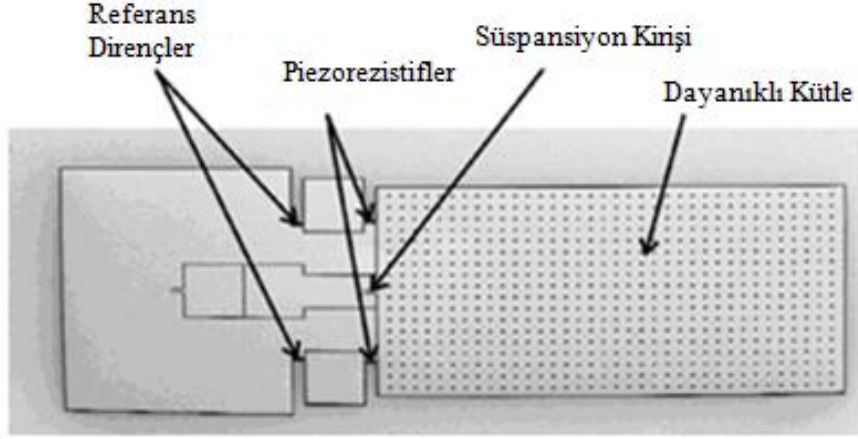
Kapasitif ivmeölçerlere dışarıdan uygulanan ivme, sensörün her iki tarafına yerleştirilmiş olan kapasitif parmaklar arasındaki kapasitans değişikliği ile saptanır. Kapasitif ivmeölçerlerin düşük üretim maliyeti, yüksek hassasiyeti, yüksek güvenilirliğe sahip olması ve sıcaklığa bağımlılığının az olması tercih edilmesini sağlayan birkaç özelliğidir.



Şekil 2.8 Kapasitif ivmeölçer [13]

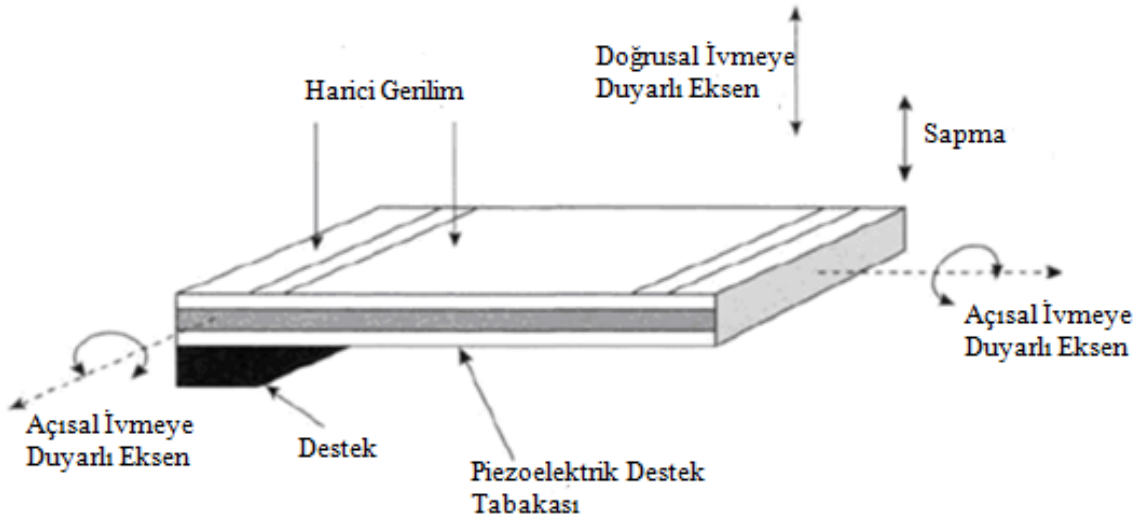
Optik sensörlerin üretimi daha zordur. Elektromanyetik girişime karşı duyarsız olması, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi ve yüksek performans göstermesi optik sensörlerin avantajlarıdır.

Piezoresistif malzemeler kullanılarak üretilen ivmeölçerlerin hassasiyeti düşük, sıcaklık bağımlılığı kapasitif sensörlere göre yüksektir. Üretimleri kolay olmasına karşın yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmemektedir.



Şekil 2.9 Piezorezistif ivmeölçer [13]

Piezoelektrik sensörler, harici gerilim ile orantılı olarak kendi üzerinde yükünü saklayan sensörlerdir. Bu sensörlerin üretimi piezorezistif sensörleri kadar kolaydır. Piezoelektrik sensörlerin dezavantajı, piezoelektrik malzeme üzerinde biriktirilmiş olan yük sabit bir gerilme altında sızdığından DC bir yanıtın olmamasıdır. Bu durum da düşük frekanslı ivmeölçer çalışmaları mümkün olmamaktadır. İvmeölçerler genellikle düşük frekanslı ivmeleri algılamak için kullanıldığından piezoelektrik sensörler uygulamalarda tercih edilmemektedir [15].



Şekil 2.10 Piezoelektrik ivmeölçer [13]

Termal ivmeölçerlerin dayanıklı kütlesi 2 adet elektrot arasında yerleştirilmiş sıcak hava baloncudur. Herhangi bir ivme girişi olmadığı zaman, elektrotlar arasındaki sıcaklık farkı sabit kalır. Harici bir ivme uygulandığında ise sıcak hava kabarcığı



hareket eder ve elektrotlar arasındaki sıcaklık farkı değişir. Bu tip sensörlerde ivme sıcaklık farkına dönüştürülür.

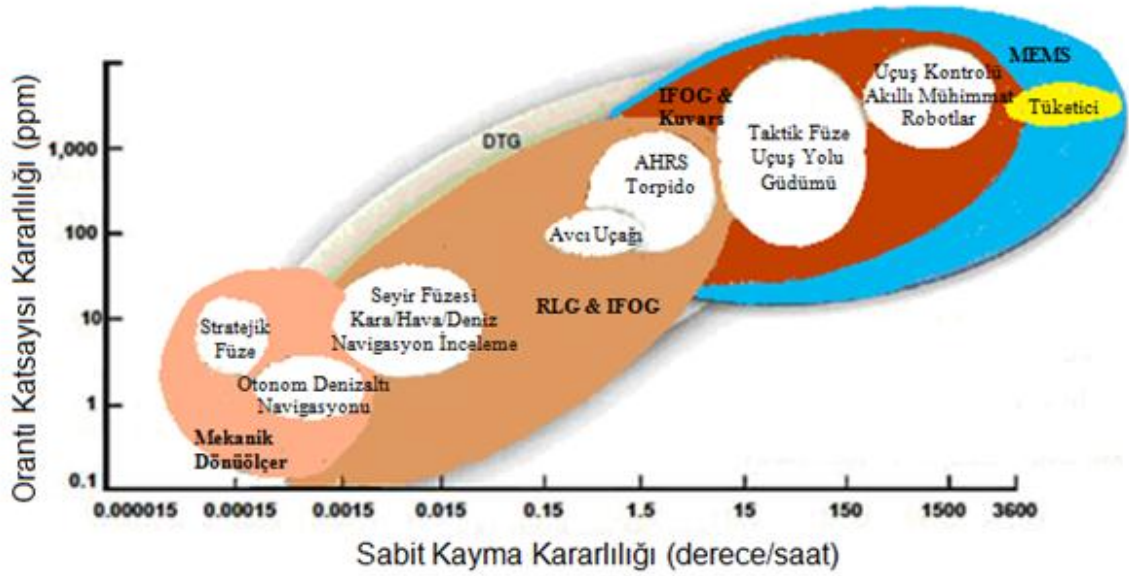
Rezonans ivmeölçerlerin dayanıklı kütlesi doğal rezonans frekansında titreştirilir. Harici ivme uygulandığında kazanılan ataletsel kuvvet sistemin rezonans frekansını değiştirir. Rezonans frekansındaki değişimi bularak, ivmenin büyüklüğü elde edilebilir [16]. Rezonans ivmeölçerlerin hassasiyeti piezorezistif ivmeölçerlere göre yüksektir. Doğrusal olmaması bu sensörün en ciddi sakıncalarındandır.

Tünel akımı tipi ivmeölçer, birbirlerine çok yakın yerleştirilmiş iki iletken tabaka arasında oluşan tünel akımını kullanır. Harici bir ivme uygulandığında iletken tabakalardan biri hareket eder ve tünel akımı değişir. Tünel akım ivmeölçerler çok düşük gürültü seviyesine sahip olmalarına rağmen imalat karmaşıklığı ve yüksek maliyeti bu sensörlerin endüstride yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir.

## **2.5. Dönüölçer**

Dönüölçer, eksen etrafındaki hareketi tanımlamak için açısal hızı ölçen bir sensördür. Yön ölçümü veya ayarlamasında kullanılan, açısal dengenin korunması ilkesiyle çalışan bir alettir. Günlük hayatta, uçak ve gemilerde yön bulmak, uzay teleskoplarında yörünge kararlılığını sağlayabilmek için yaygın olarak dönüölçerlerden yararlanılmaktadır.

Gelişen teknoloji ile birlikte farklı dönüölçer çeşitleri üretilmiştir. Mekanik dönüölçerler, optik dönüölçerler ve MEMS dönüölçerleri örnek olarak verebiliriz.



Şekil 2.11 Dönüölçer Teknolojisi Uygulamaları [10]

FOG ve RLG gibi optik dönüölçerlerin orantı katsayısı kararlılığı ve sabit kayma kararlılığı MEMS dönüölçerlerden daha yüksek olduğu Şekil 2.11'de görülmektedir. Optik dönüölçerler, güdümlü nükleer füze, hava/kara/deniz navigasyon incelemeleri gibi uzun süreli navigasyon uygulamalarında kullanılır.

Sensör boyutlarının küçük olması, hafif olması ve fiyat açısından daha ucuz olması açısından MEMS dönüölçerler kısa süreli navigasyon uygulamalarında açısal yer değıştirme sensörü olarak tercih edilmektedir. Taktik dereceli AÖBler, robotlar, akıllı mühimmat MEMS dönüölçerinin kullanıldığı bazı uygulamalardır.

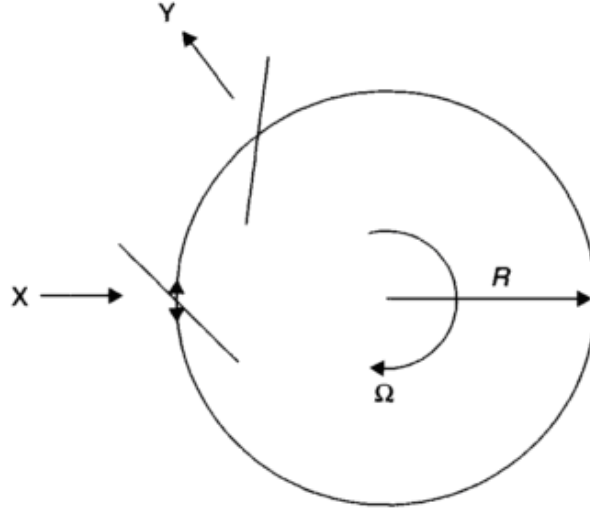
Stratejik derece AÖBler, otomatik hizalamalı füzeler gibi kararlılık gereksiniminin yüksek olduğu sistemlerde mekanik dönüölçerler kullanılır [6].

MEMS dönüölçerler, bu tez kapsamında kullanılmaktadır. Dönüölçer hata modeli Bölüm-3'te detaylı olarak açıklanmaktadır.

### 2.5.1. Optik Dönüölçerler

Optik dönüölçerlerin temel çalışma prensibi Sagnac etkisine dayanmaktadır. Sagnac etkisi, kapalı döngü etrafında birbirlerine zıt olarak ilerleyen iki ışın demetinin açısal hareket sırasında bir faz farkı oluşturacağını göstermektedir.

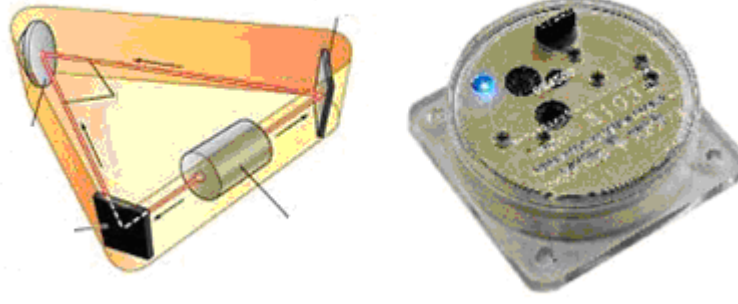
Açısal hız ölçümünde optik dönüölçerlerin kullanılmasının bazı avantajları vardır. Geniş dinamik aralık, sayısal çıkış, uzun çalışma ömrü, ivme, titreşim ve şok gibi bazı çevresel koşullardan bağımsız olması, yüksek dönme kapasitesi optik dönüölçerlerin avantajlarındandır [1].



Şekil 2.12 Dairesel dönen (Sagnac) girişimölçer [1]

Şekil 2.12’de gösterilen R yarıçaplı halkaya ışık X noktasından girer ve ışın ayırıcı ile biri saat yönü diğeri saatin ters yönü olmak üzere iki ışına ayrılır. Hareketsiz durumda iki ışın halka etrafında geçişini eşit sürede tamamlar. Girişimölçer  $\Omega$  açısal hızıyla saat yönünde hareket ettiğinde ışın ayırıcı Y pozisyonuna doğru hareket etmektedir. Bunun sonucunda saat yönünde ilerleyen ışın hareketsiz konumuna göre daha fazla yol almak durumunda kalmaktadır. Saatin ters yönünde ilerleyen ışın ise hareketsiz konumuna göre daha az yol alacaktır. Işık hızıyla ilerleyen bu ışınların geçiş süreleri de aldıkları yolla doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir. Açısal hıza bağılı olarak iki ışın giriş noktasına  $\Delta t = 4\pi R^2 \Omega / c^2$ ’lik zaman farkıyla ulaşacaktır [1].

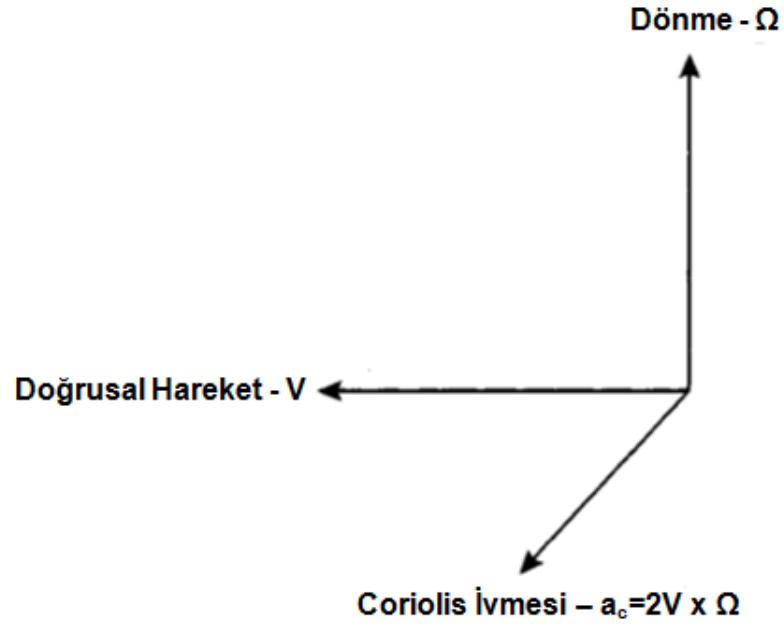
Işığı üretme yöntemine ve açısal hıza bağılı oluşan yol farkını belirleme yöntemine bağılı olarak farklı optik sensör çeşitleri bulunmaktadır. RLG ve FOG en çok bilinen optik dönüölçerlerdir.



Şekil 2.13 RLG ve FOG [6]

### 2.5.2. MEMS Dönüölçerler

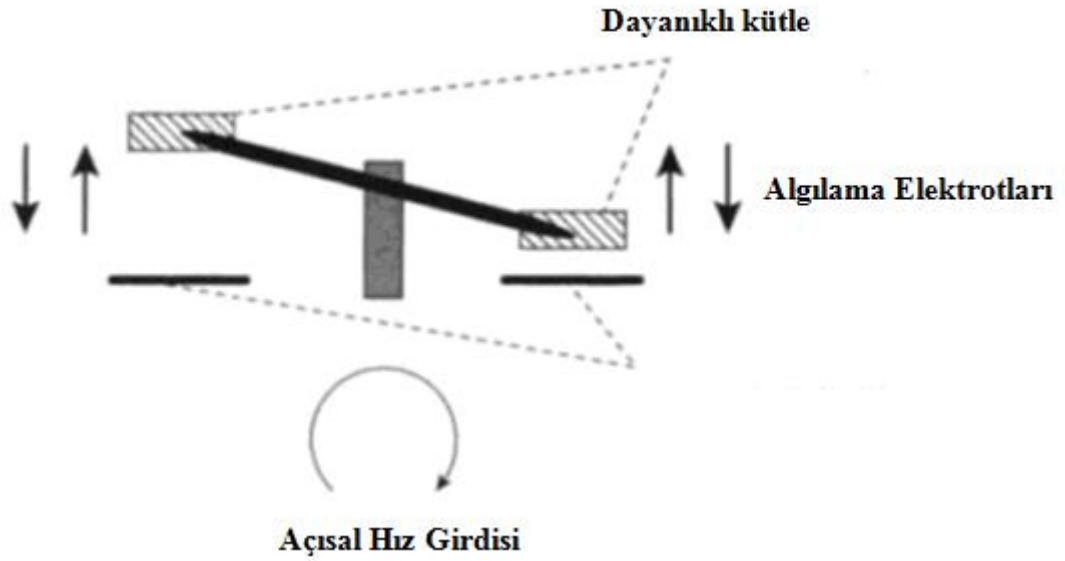
MEMS dönüölçerler ataletsel açısal dönüşü tespit etmek için titreyen dayanıklı kütle üzerindeki Coriolis ivme etkisini kullanırlar.



Şekil 2.14 Coriolis kuvvetinin oluşumu [1]

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere bir sensörün Coriolis ivme ölçümü, doğrusal hareket eksenine dik bir eksen etrafında dönen referans çerçevesindeki doğrusal titreşen kütle üzerine etki eden kuvveti belirlemeye dayanmaktadır. Coriolis ivmesini yönü hem doğrusal hareket eksenine hem de dönme eksenine diktir.

Şekil 2.15'te diyapozon (tuning fork) dönüölçerin çalışma prensibi görölmektedir. Hız vektörüne dik olan eksene uygulanan açısai hız Coriolis kuvvetinin artırır ve bu kuvvet kütleleri salınım düzleminin içine ve dışına doğru iter. Kütlelere uygulanan anlık hız vektörü zıt yönlü ve eşit büyüklüktedir. İki kütlelin aşağı ve yukarı doğru hareketi kapasitör plakaları tarafından ölçölür ve uygulanan açısai hız ile orantılı bir sinyal sağlar [1].



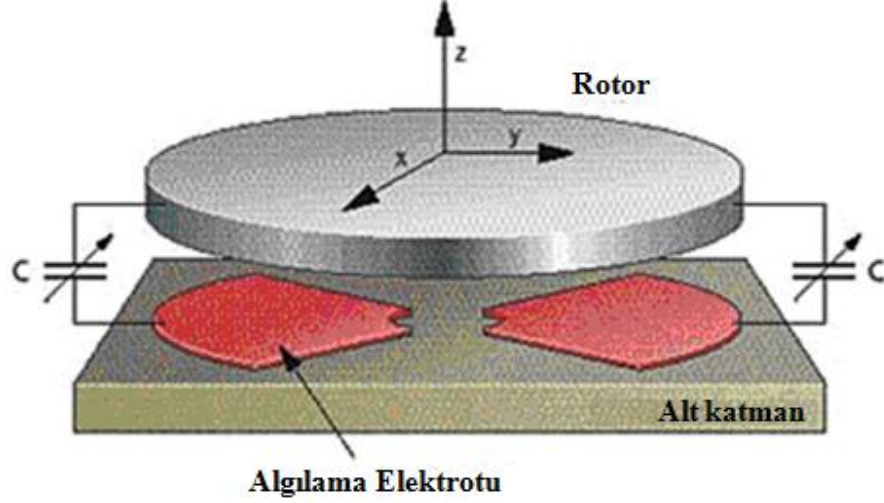
Şekil 2.15 MEMS diyapozon dönüölçerin dayanıklı kütlelinin hareketi [1]

Gelişmekte olan bu teknolojinin performans rakamları

Çizelge 2.4'te verilmektedir. Daha kalın, daha geniş elemanlar kullanıldığında ve silikon kütlelinin kalınlığı artırıldığında performans hedeflerinin sağlanması beklenmektedir.

MEMS sensörlerin performansını arttırmak için sensörün tekrarlanabilirlik (açılış) hatalarının kalibre edilerek azaltılması yöntemi de kullanılmaktadır.

Titreşimli tekerlek dönüölçer, simetri ekseni etrafında titreyen bir tekerlekten oluşur. Şekil 2.16'da göröldüğü üzere duruştaki değişimi saptamak için kapasitif sensörler kullanır. Simetri ekseni etrafında tekerleğin dönüşü tekerleğin eğilmesine neden olur. Oluşan eğim ile ölçölen açısai hız değişir [11].



Şekil 2.16 Titreşimli tekerlek dönüölçer [11]

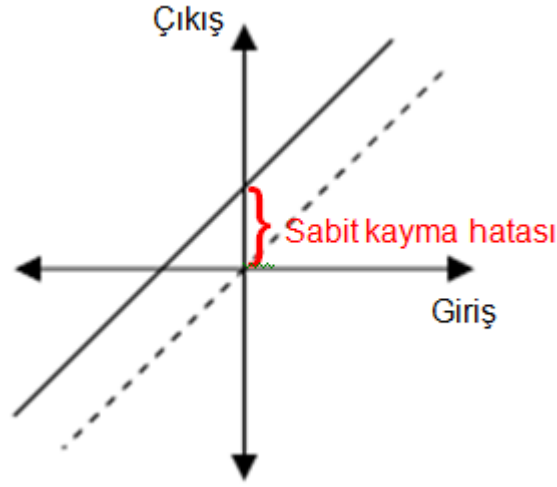
Çizelge 2.4 MEMS diyapazon dönüölçer performans çizelgesi [1]

	<b>Mevcut Sensörler</b>	<b>Performans Hedefi</b>	<b>Açıklama</b>
Çalışma Aralığı (°/s)	100-6000	100-6000	Seçilebilir
Sabit kayma hatası tekrarlanabilirliği (°/sa)	10-150	<1	Tüm ortamlarda
Sabit kayma hatası kararlılığı (°/sa)	3-30	<1	-40 to 85°C sıcaklık aralığında
Orantı katsayısı hatası tekrarlanabilirliği (ppm)	500-1500	<100	Tüm ortamlarda
Orantı katsayısı hatası kararlılığı (ppm)	300-1500	<100	-40 to 85°C sıcaklık aralığında
Açısal rassal yürüyüş (°/√sa)	0.01-0.3	0.01-0.03	
İvmeye bağlı sabit kayma (°/sa/g)	10	0.5	

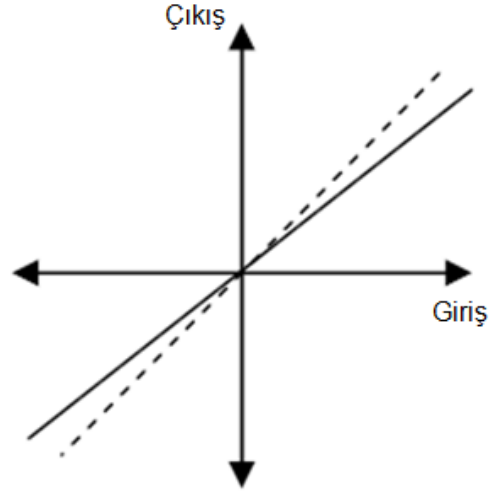
### 3. ATALETSEL SENSÖR HATA PARAMETRELERİ VE HATA MODELLERİ

Ataletsel sensörler, fiziksel yapıları gereği çeşitli hata kaynaklarına sahiptir. Bu hataları deterministik (sistemik) hatalar ve olasılıksal (rasgele) hatalar olmak üzere iki ana gruba ayırabiliriz. Deterministik hataların belirlenmesi ve düzeltilmesi olasılıksal hatalara göre daha kolaydır. Deterministik hatalar, laboratuvarında gerçekleştirilen kalibrasyon testleri sonucu belirlenir. Kullanıldığı süre boyunca sensör çıktılarında deterministik hatalar kalibrasyon ile telafi edilir. Ancak sensör çıktılarında telafi edilebilen, kendini tekrarlayan hataların dışında rasgele bir yapıya sahip olan hata kaynakları da mevcuttur.

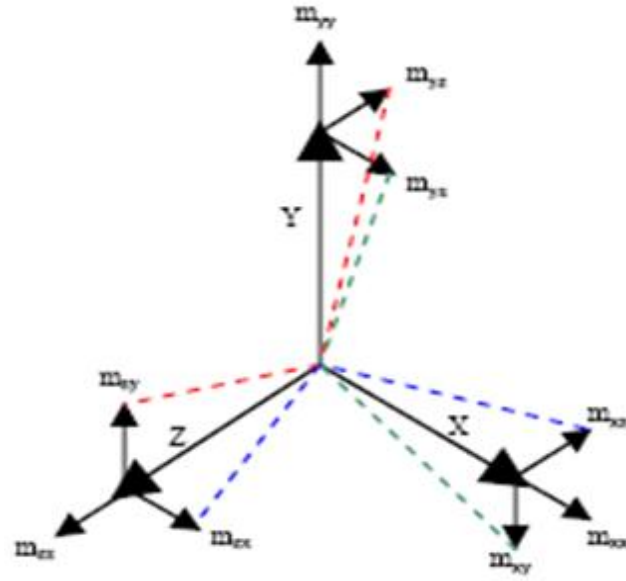
Sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası ve eksenel kaçıklık hatası deterministik hataların temel kaynaklarıdır. Bu hataları belirlemek için ataletsel sensörlere bilinen giriş değerleri uygulanır ve karşılık gelen sensör çıktıları incelenir [17].



Şekil 3.1 Sabit kayma hatası gösterimi [20]



Şekil 3.2 Orantı katsayısı hatası gösterimi [20]



Şekil 3.3 Eksenel kaçıklık hatası gösterimi [20]

Yapılacak olan tanımlar, dönüölçerler ve ivmeölçerler için paralellik göstermektedir.



### **3.1. İvmeölçer Deterministik ve Olasılıksal Hata Parametreleri**

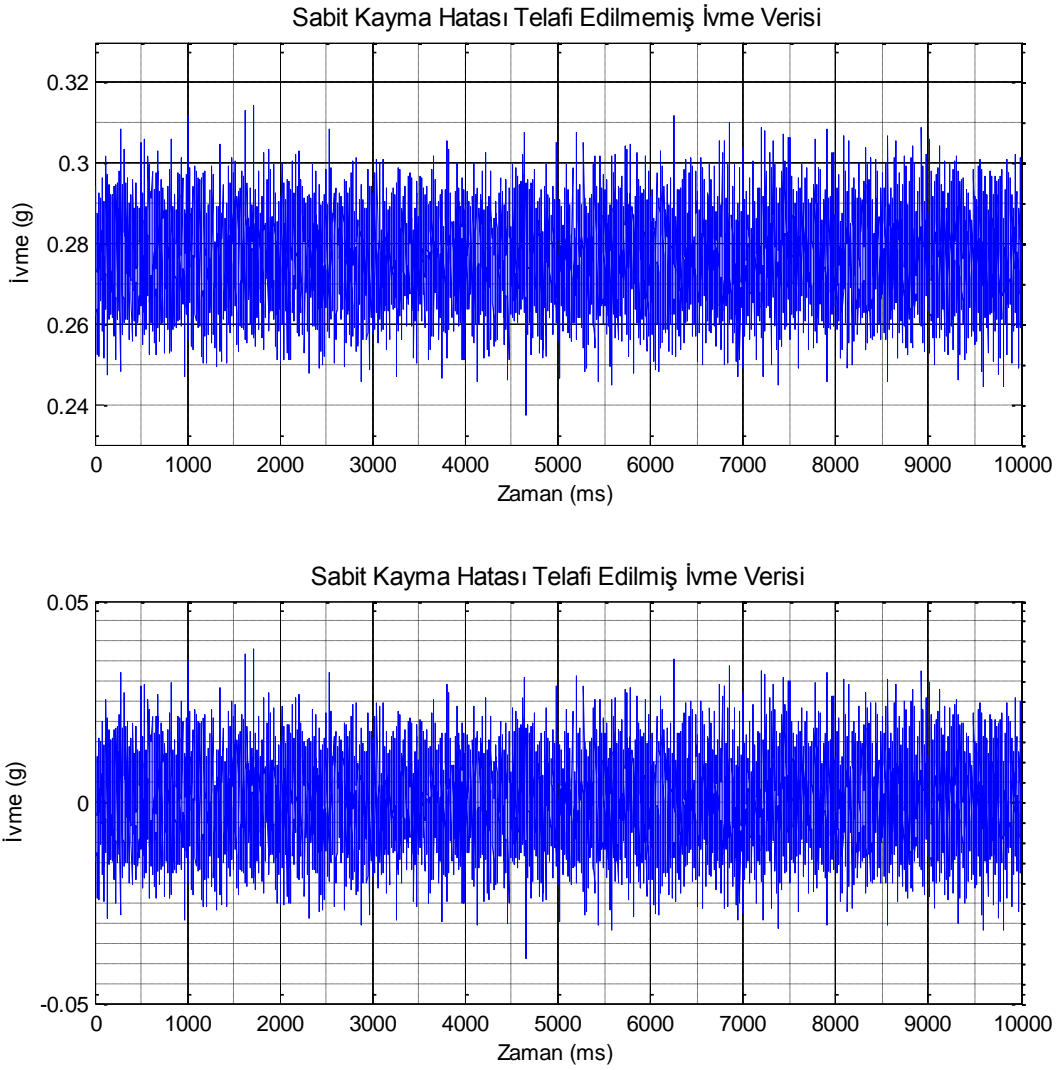
Sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası ve eksenel kaçıklık hatası ivmeölçerlerin başlıca deterministik hata kaynaklarıdır. Sabit kayma kararsızlığı, orantı katsayı kararsızlığı ve rasgele sensör gürültüsü ivmeölçerin olasılıksal hata kaynaklarıdır.

#### **3.1.1. İvmeölçer Sabit Kayma Hatası**

İvmeölçer sabit kayma hatası, sensöre herhangi bir ivme uygulanmadığı durumda ölçülen değerdir. Bu hata sabit terim, sıcaklıkla uyarılan değişimler, tekrarlanabilirlik olmak üzere çeşitli bileşenleri içerir. İvmeölçerin etkin olduğu her an hatanın sabit terimi mevcuttur. Hatanın sabit terimi ve sıcaklıkla uyarılan değişimler uygun statik kalibrasyon testleri ile önceden kestirilip düzeltilebilir. Açmaktan açmaya geçişmelerden kaynaklı hatalar ivmeölçeri her açtığımızda değişir ama sensörü açtığımız andan itibaren sabit kalır [19].

İvmeölçer sabit kayma hatası g veya mg (mili g) olarak ifade edilir.

Şekil 3.4'te üstte sabit kayma hatası yaklaşık olarak 0.28g olan ivmeölçer verisi, altta sabit kayma hatası telafi edilmiş ivmeölçer verisi gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Sabit kayma hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş ivmeölçer verisi

### 3.1.2. İvmeölçer Sabit Kayma Kararsızlığı

İvmeölçer sabit kayma kararsızlığı, ivmeölçerin çalışma sırasındaki değişiminden kaynaklı hataları içerir. İvmeölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de değişir.

İvmeölçer sabit kayma kararsızlığı  $g/\sqrt{Hz}$  olarak ifade edilir.

### 3.1.3. İvmeölçer Orantı Katsayısı Hatası

Orantı katsayısı, sensörün çıkışındaki değişim ile girişindeki değişim arasındaki orandır. İvmeölçer orantı katsayısı hatası, sensörün ideal orantı katsayısı değeri

olan 1 ile sensörün ölçtüğü orantı katsayısı arasındaki farktır [6]. Bu hata sabit terim, sıcaklıkla uyarılan değişimler, asimetri, doğrusal olmama hatası gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Statik kalibrasyon testleri ile orantı katsayısı hatasının sabit terim bileşeni ve sıcaklıkla uyarılan değişim bileşeni tahmin edilebilir.

Orantı katsayısı hatası ppm (part per million) olarak ifade edilir.

#### **3.1.4. İvmeölçer Orantı Katsayısı Kararsızlığı**

İvmeölçer orantı katsayısı kararsızlığı, orantı katsayısındaki zamanla değişimi ifade eder. İvmeölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de değiştirir. Bu hatanın belirlenmesi için çok uzun süreli testlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

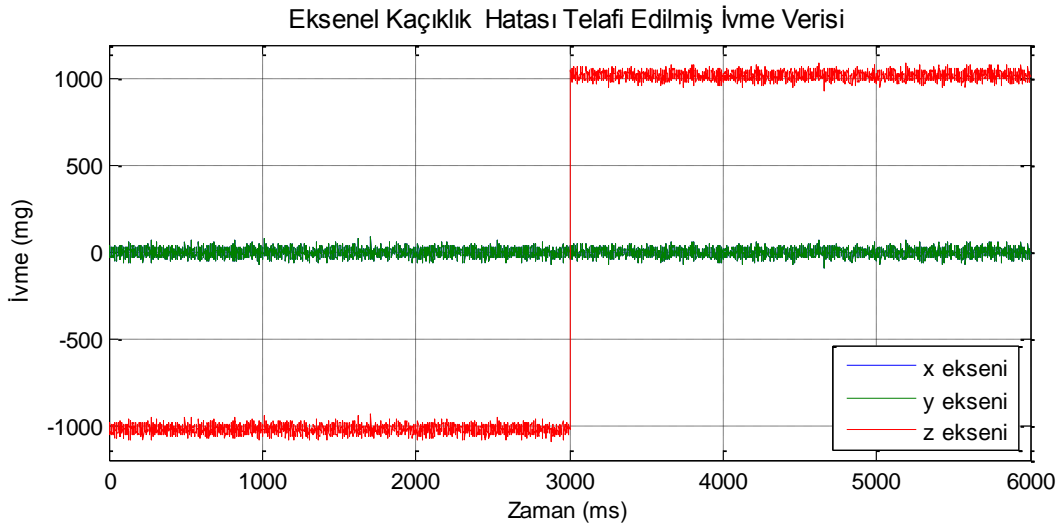
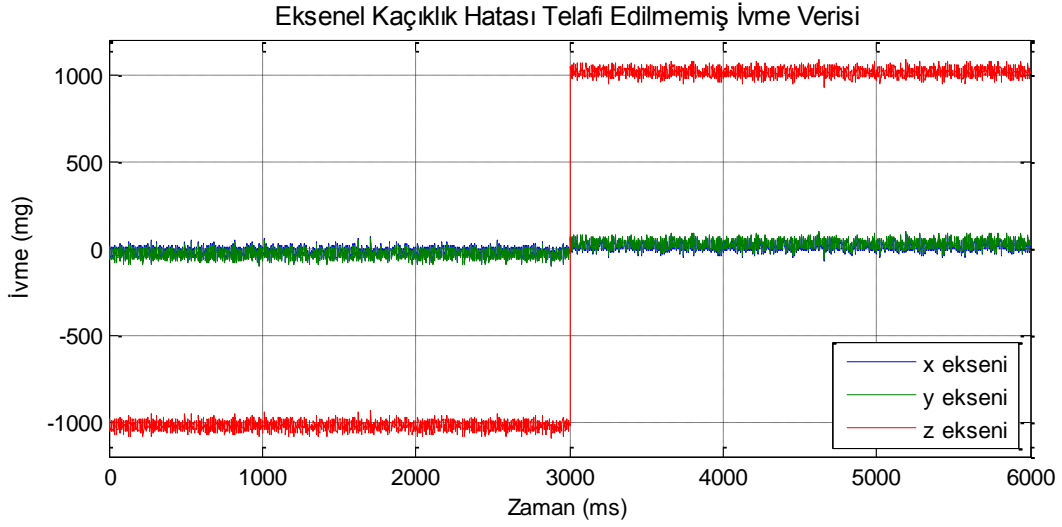
#### **3.1.5. İvmeölçer Eksenel Kaçıklık Hatası**

Eksenel kaçıklık problemi dahili ve harici olmak üzere iki grupta incelenebilir [12]. AÖB'yi oluşturmak için 3 adet MEMS ivmeölçer kullanılır ve bu 3 adet ivmeölçerlerin birbirlerine dik monte edilememesi sonucunda harici eksenel kaçıklık oluşur. İvmeölçerin üretimi sırasındaki oluşan eksenel kaçıklık ise dahili eksenel kaçıklık olarak adlandırılır.

Harici eksenel kaçıklık hatalarını belirlemek kolaydır. İvmeölçer üzerindeki eksenel kaçıklık hatasını belirlemek için her eksen etrafında pozitif ve negatif yönde olmak üzere statik kalibrasyon testi gerçekleştirilir.

Şekil 3.5'te üstte z eksenindeki hareketten etkilenen ve kayan x eksenini ve y eksenini gösterilmektedir. Şekil 3.5'te altta görüldüğü üzere eksenel kaçıklık hatasının olmadığı durumda z ekseninin -1000g'den +1000g'ye hareketi esnasında y ve z eksenlerinde değişim olmamaktadır.

Eksenel kaçıklık mrad (mili-radyan) olarak ifade edilir.



Şekil 3.5 Eksenel kaçıklık hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş ivmeölçer verisi

### 3.1.6. Rasgele Sensör Gürültüsü

Yüksek frekanslı gürültü terimleri (nicemleme gürültüsü, hız rasgele yürüme ve Gauss-Markov gürültüsü) rasgele sensör gürültüsünü oluşturmaktadır.

Rasgele sensör gürültüsü  $g/\sqrt{Hz}$  olarak ifade edilir.

### 3.2. Dönüölçer Deterministik ve Olasılıksal Hata Parametreleri

Sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası, eksenel kaçıklık hatası ve ivmeye bağlı sabit kayma hatası dönüölçerlerin başlıca deterministik hata kaynaklarıdır.

Sabit kayma kararsızlığı, orantı katsayı kararsızlığı ve rasgele sensör gürültüsü dönüölçerin olasılıksal hata kaynaklarıdır.

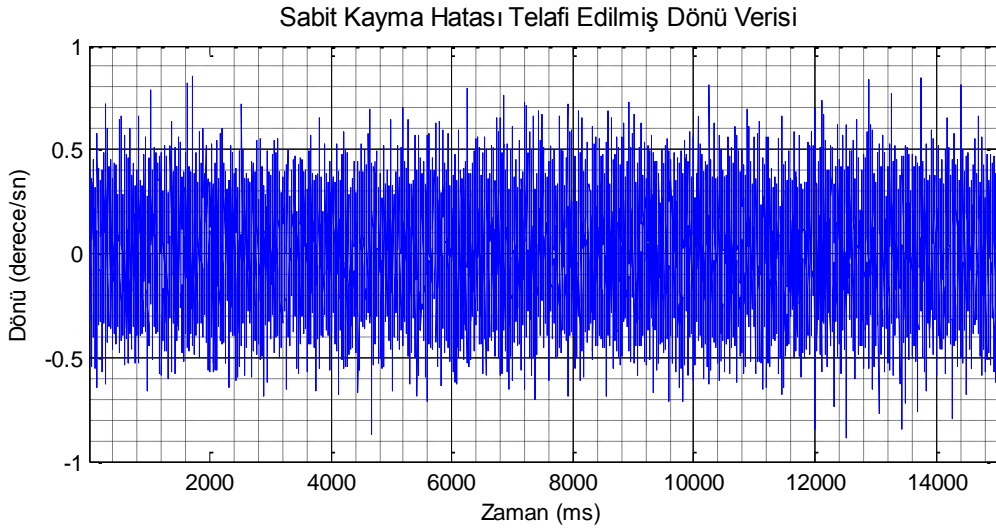
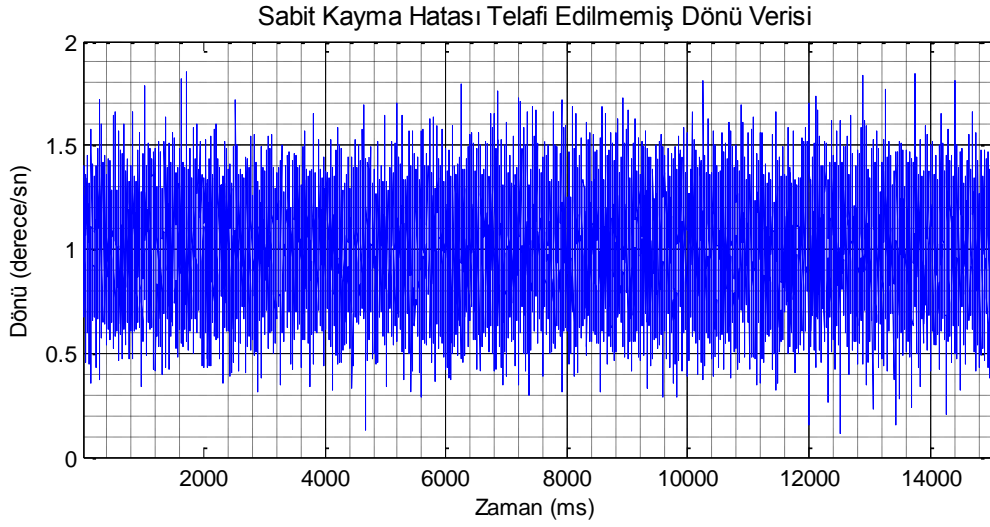
### **3.2.1. Dönüölçer Sabit Kayma Hatası**

Dönüölçere herhangi bir giriş uygulanmadığı koşulda belirli bir süre ölçülen dönü değerlerinin ortalaması alınarak dönüölçer sabit kayma hatası elde edilir.

Bu hata sabit terim, sıcaklıkla uyarılan değişimler ve tekrarlanabilirlik olmak üzere çeşitli bileşenleri içerir. Hatanın sabit terimi ve sıcaklıkla uyarılan değişimler statik kalibrasyon testleri ile önceden tahmin edilebilir.

Şekil 3.6'da üstte sabit kayma hatası yaklaşık olarak 1 derece/saniye olan dönüölçer verisi, altta sabit kayma hatası telafi edilmiş dönüölçer verisi gösterilmektedir.

Dönüölçer sabit kayma hatası derece/saniye veya derece/saat olarak ifade edilir.



Şekil 3.6 Sabit kayma hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş dönüölçer verisi

### 3.2.2. Dönüölçer Sabit Kayma Kararsızlığı

Dönüölçer sabit kayma kararsızlığı, çalışma sırasındaki değişiminden kaynaklı hataları içerir. Dönüölçerin çalıştığı her an hatanın bu bileşeni değişir.

Dönüölçer sabit kayma kararsızlığı  $\text{derece/saniye}/\sqrt{\text{Hz}}$  veya  $\text{derece/saat}/\sqrt{\text{Hz}}$  olarak ifade edilir.

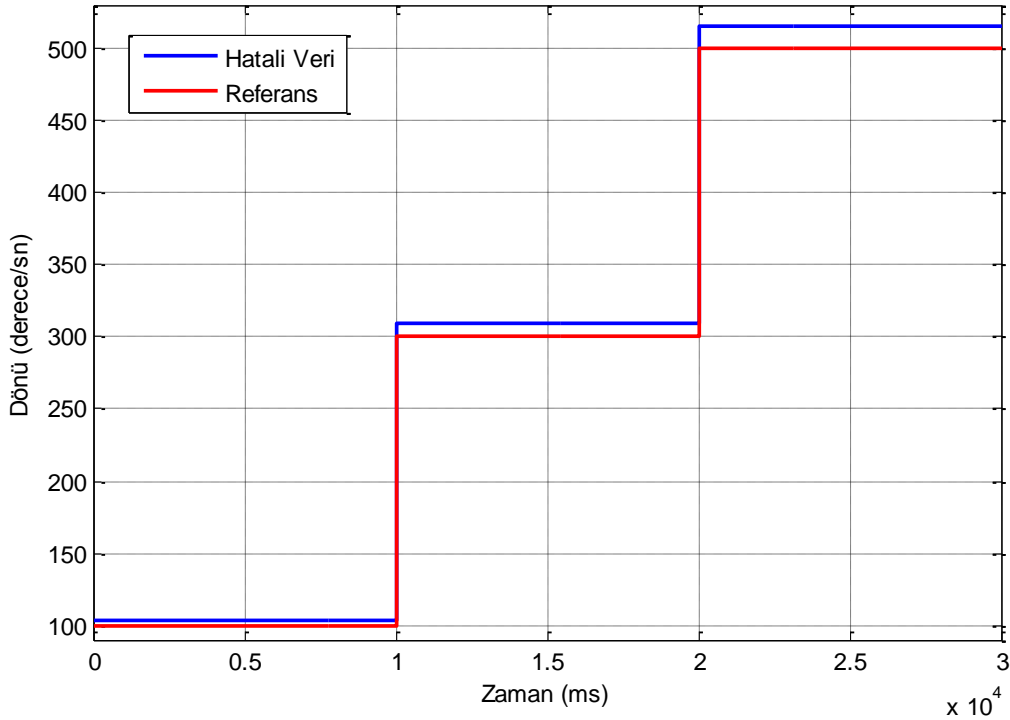
### 3.2.3. Dönüölçer Orantı Katsayısı Hatası

Dönüölçer orantı katsayısı, açısız hız girişı uygulanan eksen boyunca dönüölçer hassasiyetini oluşturur.

Bu hata sabit terim, sıcaklıkla uyarılan değışimler, asimetri, doğrusal olmama hatası gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Dinamik kalibrasyon testleri ile orantı katsayısı hatasının en baskın bileşenleri olan sabit terim bileşeni ve sıcaklıkla uyarılan değışim bileşeni belirlenebilir.

Orantı katsayısı ppm (part per million) olarak ifade edilir.

Şekil 3.7’de 100, 300 ve 500 °/s referans dönü girdileri ve sadece dönüölçer orantı katsayısı hatası eklenerek elde edilen hatalı dönüölçer verisi görülmektedir. 100 °/s referans dönü girdisi uygulandığında orantı katsayısı kaynaklı hata değeri 3 °/s iken 500 °/s referans dönü girdisi uygulandığında orantı katsayısı kaynaklı hatanın 15 °/s olduğu gözlenmektedir. Bu durum, yüksek dönü girişleri uygulandığında sensörün orantı katsayısı hatasının toplam hataya etkisinin daha fazla olduğunu gösterir.



Şekil 3.7 Orantı katsayısı hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş dönüölçer verisi

### **3.2.4. Dönüölçer Orantı Katsayısı Kararsızlığı**

Dönüölçer orantı katsayısı kararsızlığı, orantı katsayısındaki zamanla değişimi ifade eder. Dönüölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de değişir. Bu hatanın belirlenmesi için çok uzun süreli dinamik testlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

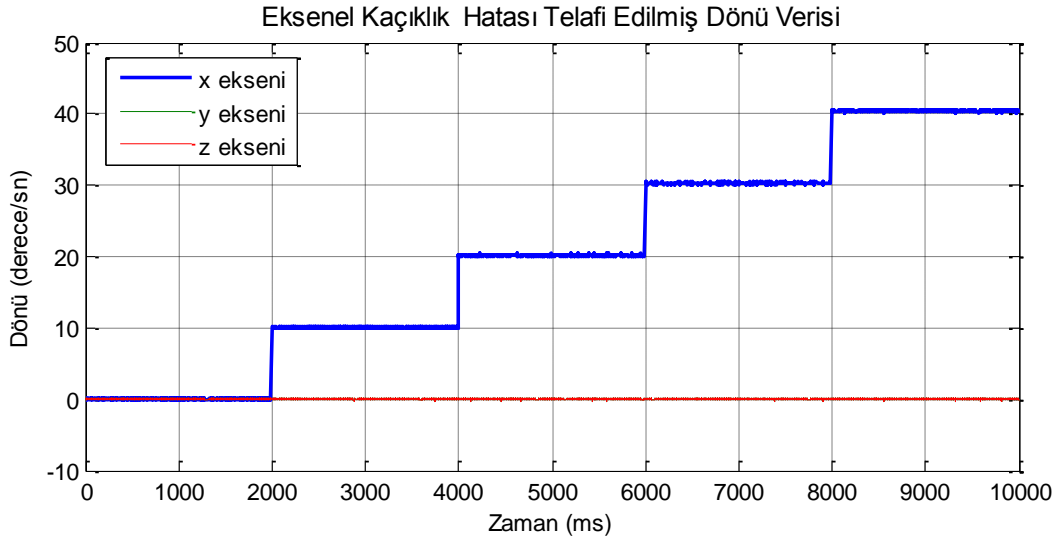
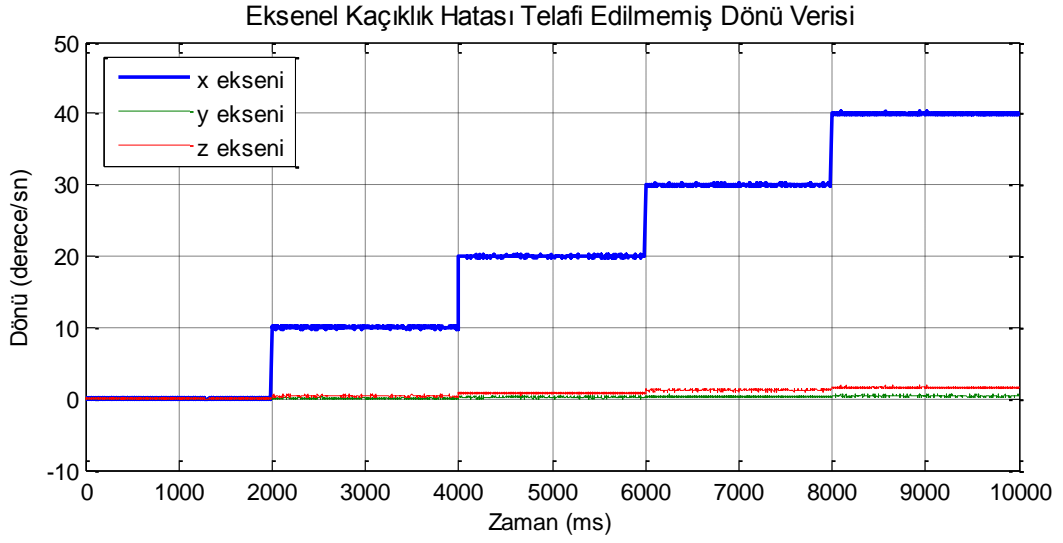
### **3.2.5. Dönüölçer Eksenel Kaçıklık Hatası**

Dönüölçerlerin yanlış hizalanmasından kaynaklanarak her dönüölçer diğer dönüölçerlere tam dik olmayabilir. Bunun sonucunda her eksenin diğer iki eksen etrafındaki dönüye karşı hassasiyeti oluşur. Dönüölçer üzerindeki eksenel kaçıklık hatasını belirlemek için her eksen etrafında pozitif ve negatif yönde olmak üzere dinamik kalibrasyon testi gerçekleştirilir.

Şekil 3.8'de üstte x eksenindeki hareketten etkilenen ve kayan y eksenini ve z eksenini gösterilmektedir. Z ekseninin y eksenine göre daha fazla kaydığı görülmektedir. Bunun sebebi x eksenini ile z eksenini arasındaki eksenel kaçıklığın x eksenini ve y eksenini arasındaki eksenel kaçıklığa göre daha fazla olmasıdır. Şekil 3.8'de altta görüldüğü üzere eksenel kaçıklık hatasının olmadığı durumda x eksenini dönüölçerinin 0, 10, 20, 30, 40 derece/saniye dönülerindeki hareketinden diğer iki ekseninde yer alan dönüölçerler etkilenmemektedir.

Eksenel kaçıklık mrad (mili-radyan) olarak ifade edilir.





Şekil 3.8 Eksenel kaçıklık hatası telafi edilememiş ve telafi edilmiş dönüölçer verisi

### 3.2.6. İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası

MEMS dönüölçer yapısı doğrusal ivmeye karşı duyarlılık gösterir. Bu etki sensörün çıkışında bir kaymaya neden olur. Kayma miktarı eksene uygulanan ivmenin büyüklüğü ile orantılıdır. Statik kalibrasyon testi ile dönüölçerin ivmeye bağlılık katsayısı belirlenir ve bu bağlılık ortadan kaldırılır.

Dönüölçerin ivmeye bağlı sabit kayma hatası derece/saniye/g ile ifade edilir.

### 3.2.7. Rasgele Sensör Gürültüsü

Yüksek frekanslı gürültü terimleri (nicemleme gürültüsü, açısal rasgele yürüme ve Gauss-Markov gürültüsü) rasgele sensör gürültüsünü oluşturmaktadır. Rasgele sensör gürültüsü derece/saniye/ $\sqrt{Hz}$  veya derece/saat/ $\sqrt{Hz}$  olarak ifade edilir.

### 3.3. Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Modelleri

#### 3.3.1. İvmeölçer Hata Modeli

Tek ekseninde ivmeölçer hata modeli (1) nolu denklemde gösterildiği gibidir.

$$\widetilde{a}_x = (1 + S_x + \delta S_x) a_x + B_x + \delta B_x + n_x \quad (1)$$

$\widetilde{a}_x$  = İvmeölçer Çıkışı

$a_x$  = Gerçek İvme

$S_x$  = Orantı Katsayısı Hatası

$\delta S_x$  = Orantı Katsayısı Kararsızlığı

$B_x$  = Sabit Kayma Hatası

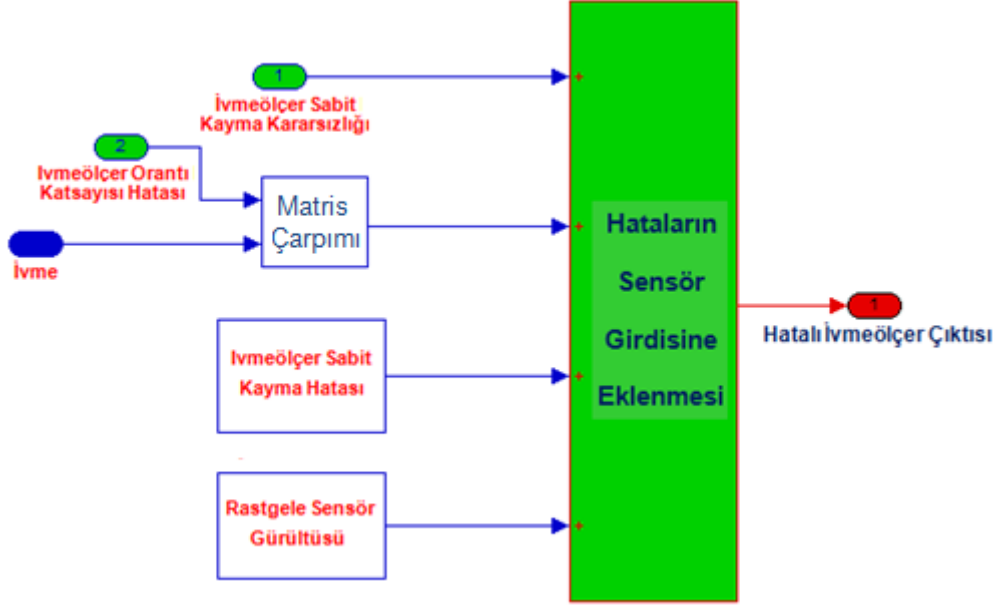
$\delta B_x$  = Sabit Kayma Kararsızlığı

$n_x$  = Rasgele Sensör Gürültüsü

Ataletsel ölçüm biriminde x, y ve z eksenlerinde ivmeölçer bulunduğu düşünüldüğünde hata modelini (2) numaralı denklem ile ifade edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{a}_x \\ \widetilde{a}_y \\ \widetilde{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x + \delta S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y + \delta S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z + \delta S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x + \delta B_x \\ B_y + \delta B_y \\ B_z + \delta B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$M_{xy}, M_{xz}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}, M_{zy}$  = İvmeölçer Eksenel Kaçıklık Hataları



Şekil 3.9 İvmeölçer Hata Modeli

### 3.3.2. Dönüölçer Hata Modeli

Tek ekseninde dönüölçer hata modeli (3) nolu denklemde gösterildiği gibidir.

$$\widetilde{w}_x = (1 + S_x + \delta S_x) w_x + B_x + \delta B_x + B_{Gx} a_x + n_x \quad (3)$$

$\widetilde{w}_x$  = Dönüölçer Çıktısı

$w_x$  = Gerçek Dönü

$a_x$  = Gerçek İvme

$S_x$  = Orantı Katsayısı Hatası

$\delta S_x$  = Orantı Katsayısı Kararsızlığı

$B_x$  = Sabit Kayma Hatası

$\delta B_x$  = Sabit Kayma Kararsızlığı

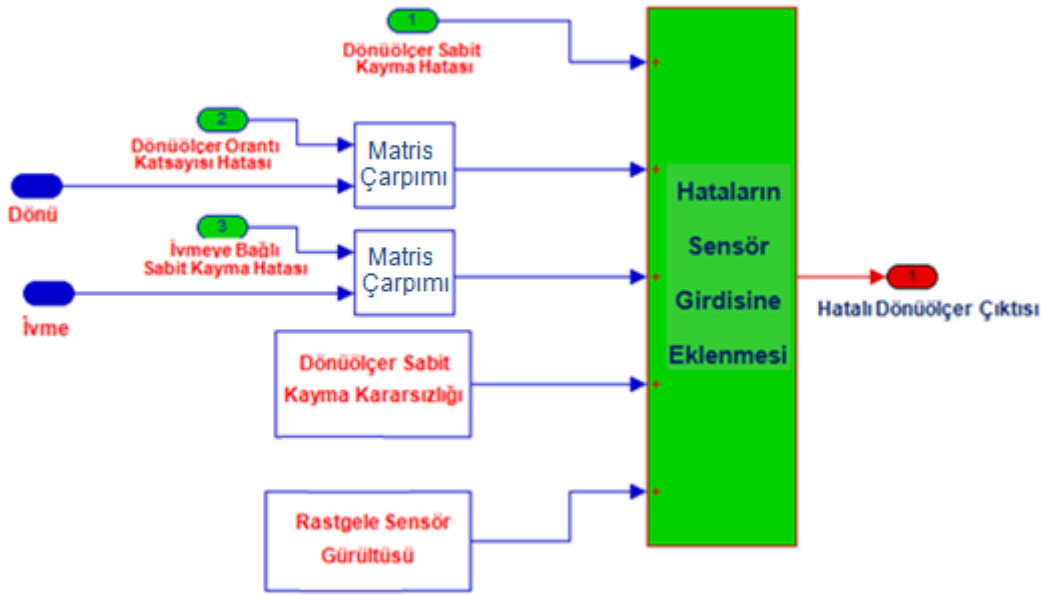
$B_{Gx}$  = İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası

$n_x$  = Rasgele Sensör Gürültüsü

Ataletsel ölçüm biriminde x, y ve z eksenlerinde dönüölçer bulunduğu düşünöldüğünde hata modelini (4) numaralı denklem ile ifade edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{w}_x \\ \widetilde{w}_y \\ \widetilde{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x + \delta S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y + \delta S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z + \delta S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x + \delta B_x \\ B_y + \delta B_y \\ B_z + \delta B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{Gx} & 0 & 0 \\ 0 & B_{Gy} & 0 \\ 0 & 0 & B_{Gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$M_{xy}, M_{xz}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}, M_{zy} =$  Dönüölçer Eksenel Kaçıklık Hataları



Şekil 3.10 Dönüölçer Hata Modeli

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da orantı katsayısı hatası olarak görünen hata parametresinin köşegen değerleri orantı katsayısı hatalarını ve diğer matris elemanları eksenel kaçıklık hatalarını içermektedir. Bu durum, (2) ve (4) numaralı denklemler ile ifade edilmektedir.

### 3.3.3. Sabit Kayma Kararsızlığı Hata Modeli

Sabit kayma kararsızlığı hatası, Random Walk, Gauss-Markov, Random Constant, Autoregressive (Özbağlanımlı) yöntemleri kullanılarak modellenebilir. Tez çalışması kapsamında, Gauss-Markov ve özbağlanımlı modelin üstün yanları

birleştirilerek oluşturulan model sabit kayma kararsızlığı hatasını modellemekte kullanılmaktadır.

### 3.3.3.1. Gauss-Markov Model

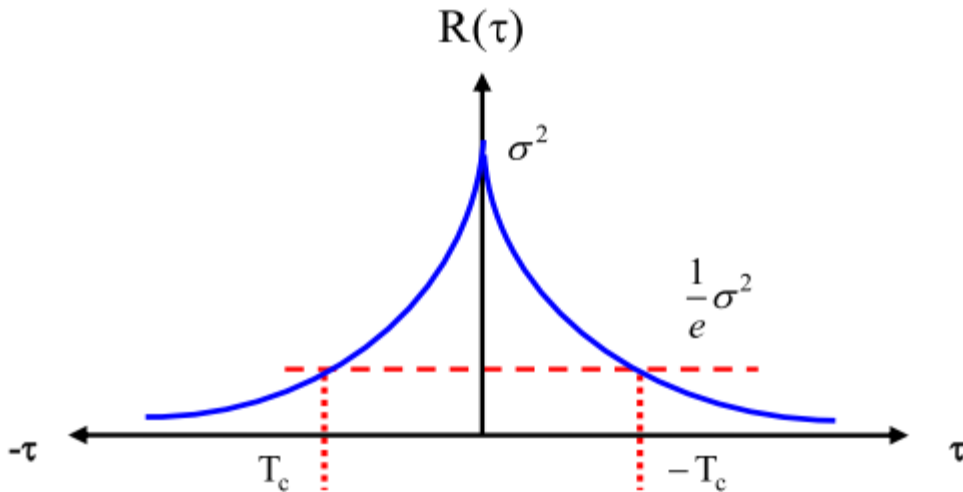
Gauss-Markov (GM) süreci durağan bir süreçtir. GM süreci, geçmiş değerlerin ölçeklendirilmesi ve rasgele bir girişle toplanması sonucu gelecekteki tüm değerleri temsil edebilen olasılıksal bir süreçtir. GM süreci üstel özilinti fonksiyonuna sahiptir. Fiziksel süreçlerin çoğunu yeterli doğrulukta temsil edebilmesi ve basit matematiksel formüle sahip olması GM sürecin üstün yanıdır [24].

Üstel olarak sönümlenen bir özilintiye sahip durağan Gaussian bir süreç birinci dereceden GM sürecidir.

Sıfır ortalamalı,  $\sigma_w^2$  ortalama karesel hatalı,  $T_c$  ilinti sürelili bir rasgele sürecin sürekli zaman modeli, birinci dereceden fark denklemi ile (5) nolu denklemde gösterildiği gibidir.

$$\dot{x} = -\frac{1}{T_c} x + w \quad (5)$$

Şekil 3.11’de birinci dereceden GM sürecin özilinti fonksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Birinci dereceden GM sürecin özilinti fonksiyonu

GM sürecin ayrık zaman modeli (6) ve (7) numaralı denklemlerde gösterildiği gibidir.

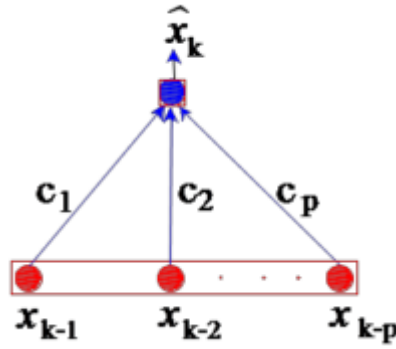
$$x_k = e^{-\Delta t/T_c} x_{k-1} + w_k \quad (6)$$

$$\sigma_{w_k}^2 = \sigma_{x_k}^2 \left(1 - e^{-\Delta t_k/T_c}\right) \quad (7)$$

Birinci dereceden GM süreçler ataletsel navigasyon filtrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü sınırlı belirsizlik karakteristiği sabit kayma hatası ve orantı katsayısı hatası gibi yavaş değişen sensör hatalarını modellemekte oldukça başarılıdır.

### 3.3.3.2. Özbağlanımlı Model

Sadece bir parametreye bağlı olan GM sürecinin aksine özbağlanımlı süreç modelleme esnekliğine sağlar [31]. Birçok uygulamanın olasılıksal kısmının modellenmesinde özbağlanımlı model kullanılır.  $x_{k-1}$ ,  $x_{k-2}$ , ...  $x_{k-p}$  önceki sistem durumları (giriş),  $\hat{x}_k$  süreç çıktısı ve  $c_1, c_2, \dots, c_p$  özbağlanımlı model parametreleri olmak üzere özbağlanımlı süreç yapısı Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 Özbağlanımlı model yapısı

p. dereceden özbağlanımlı süreç (8) numaralı denklem ile ifade edilmektedir.

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^p c_i x_{k-i} + w_k \quad (8)$$

Birinci derece özbağlanımlı sürecin ayrık zaman modeli (9) numaralı denklem ile gösterilmektedir

$$x_k = c_1 x_{k-1} + w_k \quad (9)$$

Özbağlanımlı model parametreleri Yule-Walker, Least Squares, Burg's, Markov chain Monte Carlo ve ortak değişinti yöntemlerini kullanarak belirlenebilir.

Özbağlanımlı model örnekleme aralığı bilgisini içermediğinden yüksek örnekleme hızlarındaki ataletsel sensörleri modellemekte yetersiz kalabilir.

### 3.3.3.3. Yule-Walker Yönetimi

Tez çalışmasında Yule-Walker yönetimi özbağlanımlı model parametrelerinin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Yule-Walker yöntemi özilinti yöntemi olarak da bilinir.  $R_{bb}(m)$  özilinti değeri gerçek ataletsel sensör sinyalinde elde edilir.

$$R_{bb}c = -r_{bb} \leftrightarrow c = -R_{bb}^{-1} r_{bb} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} R_{bb}(0) & R_{bb}(1) & R_{bb}(2) & \dots & R_{bb}(p-1) \\ R_{bb}(1) & R_{bb}(0) & R_{bb}(1) & \dots & R_{bb}(p-2) \\ R_{bb}(2) & R_{bb}(1) & R_{bb}(0) & \dots & R_{bb}(p-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ R_{bb}(p-1) & R_{bb}(p-2) & R_{bb}(p-3) & \dots & R_{bb}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{bb}(1) \\ R_{bb}(2) \\ R_{bb}(3) \\ \vdots \\ R_{bb}(p) \end{bmatrix} \quad (11)$$

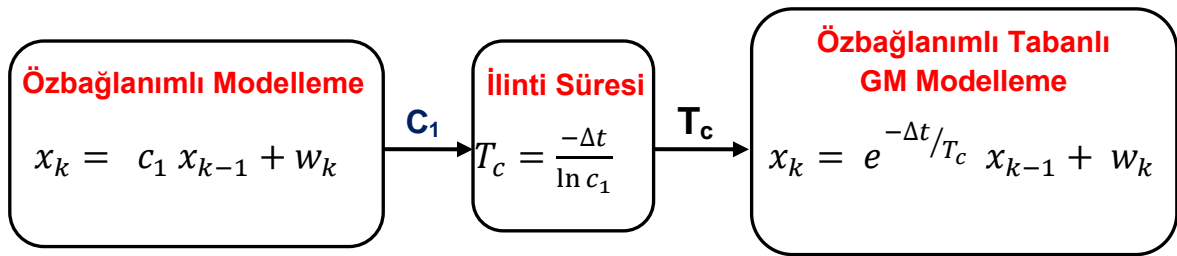
(11) numaralı Yule-Walker eşitliğinde sol tarafta bulunan  $N \times N$ 'lik matris, Toeplitz yapısına sahiptir. Bu matrisin özelliği köşegene paralel doğrultudaki tüm elemanların aynı değere sahip olmasıdır. Doğrusal normal denklem çözme yöntemleriyle özbağlanımlı model parametreleri hesaplanır.

### 3.3.3.4. Özbağlanımlı Model Tabanlı Gauss-Markov Model

Gauss-Markov modelin ve özbağlanımlı modelin üstün özelliklerinden faydalanmak amacıyla modeller birleştirilerek özbağlanımlı model tabanlı Gauss-Markov model elde edilmektedir. Böylece özbağlanımlı modelin sağlayamadığı örnekleme aralığı bilgisi GM model ile elde edilir.

(6) ve (9) numaralı birinci derece GM model denklemi ile birinci derece özbağlanımlı model birleştirilerek ilinti süresi  $T_c$ , örnekleme süresi ve özbağlanımlı model parametresi cinsinden bulunur.

$$\begin{array}{l}
 x_k = e^{-\Delta t/T_c} x_{k-1} + w_k \\
 x_k = c_1 x_{k-1} + w_k
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 e^{-\Delta t/T_c} = c_1 \\
 \frac{-\Delta t}{T_c} = \ln c_1 \\
 T_c = \frac{-\Delta t}{\ln c_1}
 \end{array}
 \right.$$



Şekil 3.13 Özbağlanımlı tabanlı GM modelleme basamakları



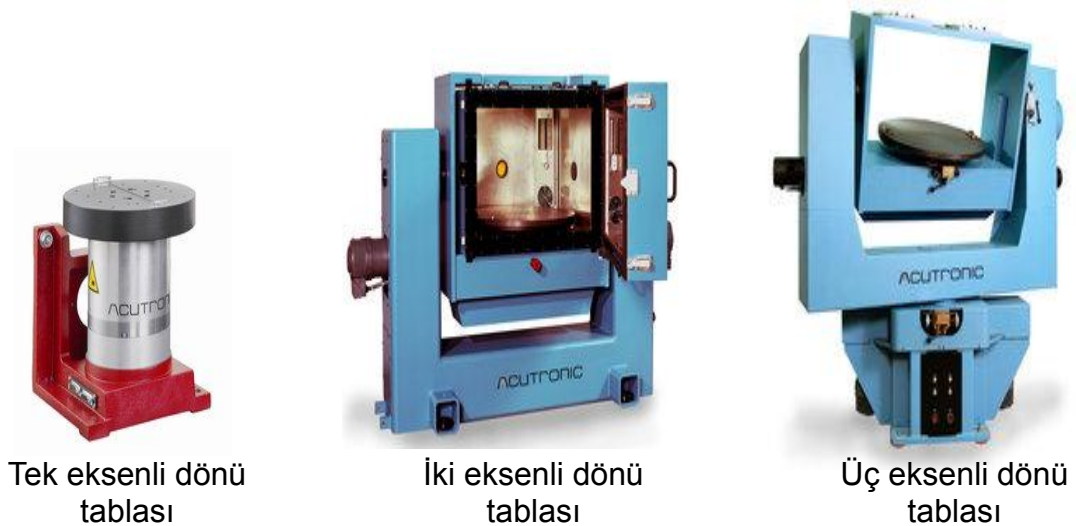
## 4. ATALETSEL SENSÖR HATA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde, deterministik ve olasılıksal sensör hatalarını belirlemek için kullanılan yöntemler anlatılmaktadır.

### 4.1. Deterministik Hataların Belirlenmesi

Deterministik hatalar, laboratuvarında gerçekleştirilen kalibrasyon testleri sonucu belirlenir. Ataletsel sensör hatalarının belirlenmesi ve kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi statik ve dinamik testler ile gerçekleştirilir. Literatürde 4 nokta testi [33], 6 pozisyonlu statik test [6,21,26], çok pozisyonlu statik test ve çok dönümlü dinamik test [1,6,25,33] kalibrasyon testleri olarak yer almaktadır. Tez çalışması kapsamında çok pozisyonlu statik test ve çok dönümlü dinamik test geliştirilerek deterministik hataların belirlenmesinde kullanılmaktadır.

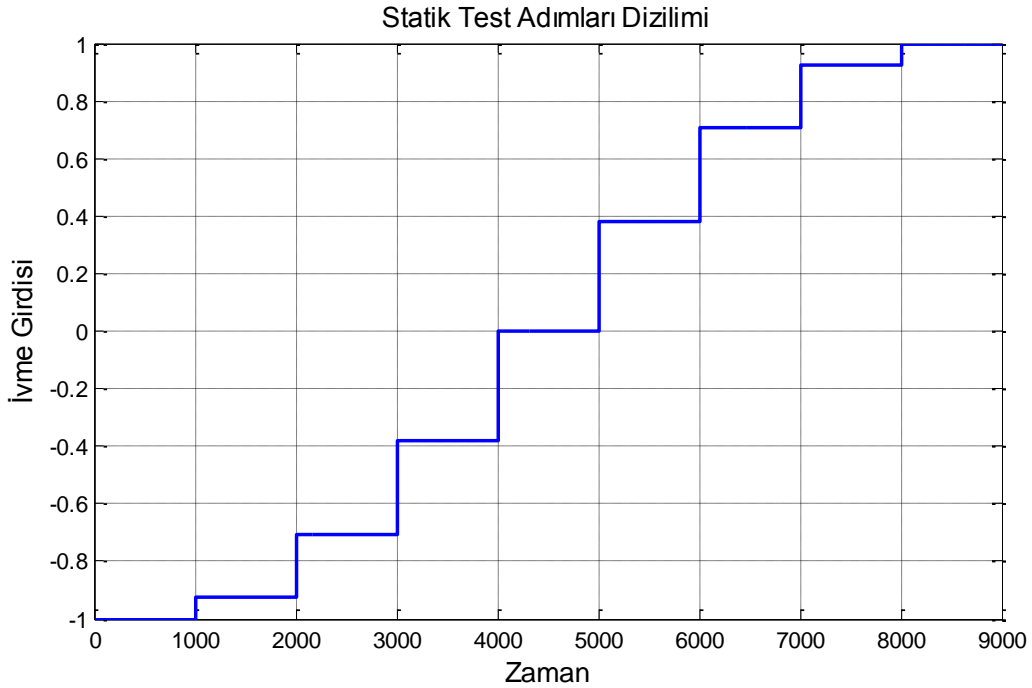
Çok pozisyonlu statik ve çok dönümlü dinamik testlerde kullanılan özel test ekipmanları Şekil 4.1'de gösterilmektedir. 3 adet ivmeölçer ve 3 adet dönümlerinin oluşturduğu ataletsel ölçüm birimlerinin kalibrasyon testlerinde genellikle iki eksenli ve üç eksenli dönümler kullanılmaktadır. Kalibrasyon testlerinde dönümler kullanılarak AÖB'ye yüksek hassasiyetli ivme ve dönümler uygulanabilir.



Şekil 4.1 Çok pozisyonlu statik ve dinamik test ekipmanları

#### 4.1.1. Çok Pozisyonlu Statik Test

Çok pozisyonlu statik testler sırasında çeşitli konfigürasyonlarda sabit duran sensörden veri toplanır. -1g ve +1g arasında belirli açılarda konumlandırılan sensörden veri toplanır. Testin basamak boyu  $22.5^\circ$  olarak seçilerek -1g ile +1g arasındaki  $180^\circ$ lik açı 9 basamakta taranmaktadır. Şekil 4.2'de statik test adımları dizilimi gösterilmektedir.



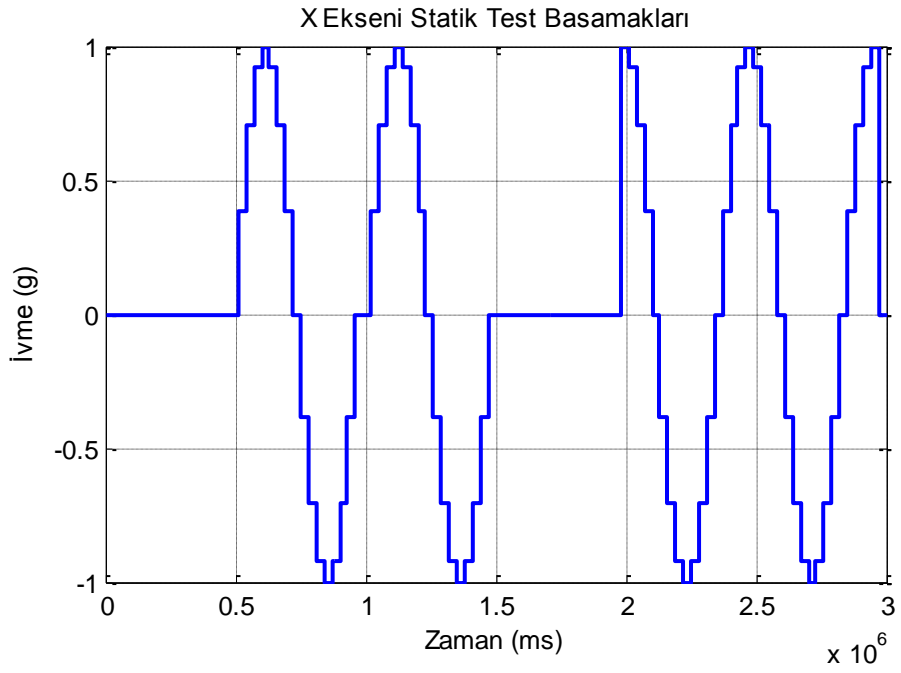
Şekil 4.2 Statik test adımları dizilimi

Dönü tablasının konumlandırıldığı açılar ile hesaplanan ivme değerleri ile statik test sırasında ivmeölçerden toplanan test verileri karşılaştırılarak analiz edilir.

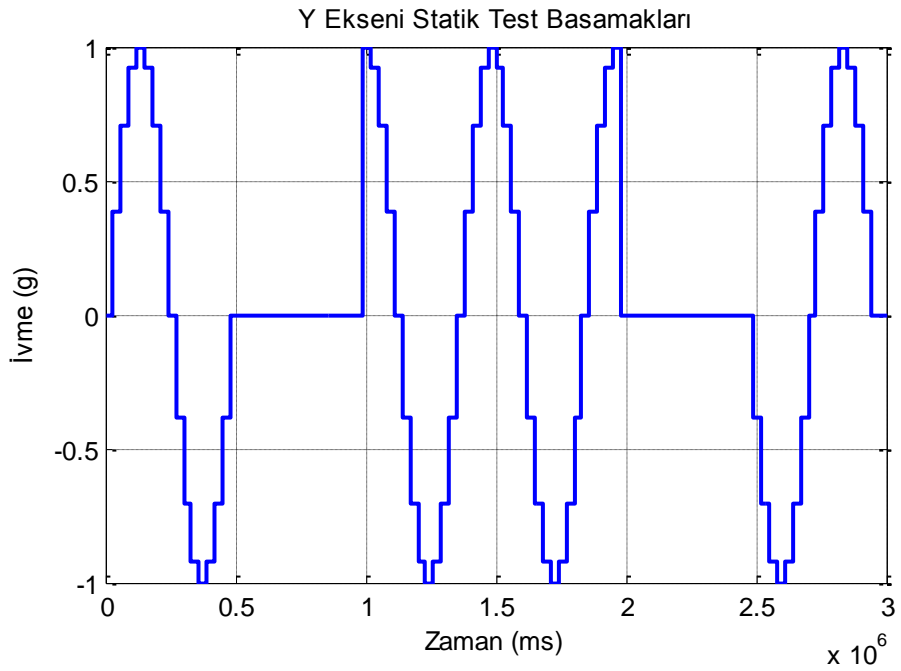
Statik testler sonucunda ivmeölçer sabit kayma, orantı katsayısı, eksenel kaçıklık ve dönüölçer sabit kayma, ivmeye bağlı sabit kayma değerleri ve hataları hesaplanır.

Tez çalışması kapsamında, geliştirilen çok pozisyonlu statik test basamakları Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmektedir. Bu test basamakları geliştirilirken sensörlerin birbirlerine göre konumları dikkate alınmıştır. x eksenini ivmeölçerinin -1g ile +1g arasındaki hareketinde y ve z ekseninin aldığı pozisyonlar değerlendirilmiştir. Benzer test pozisyonları y ekseninin -1g ile +1g arasındaki hareketinde x ve z eksenini için ve z ekseninin -1g ile +1g arasındaki hareketinde x ve

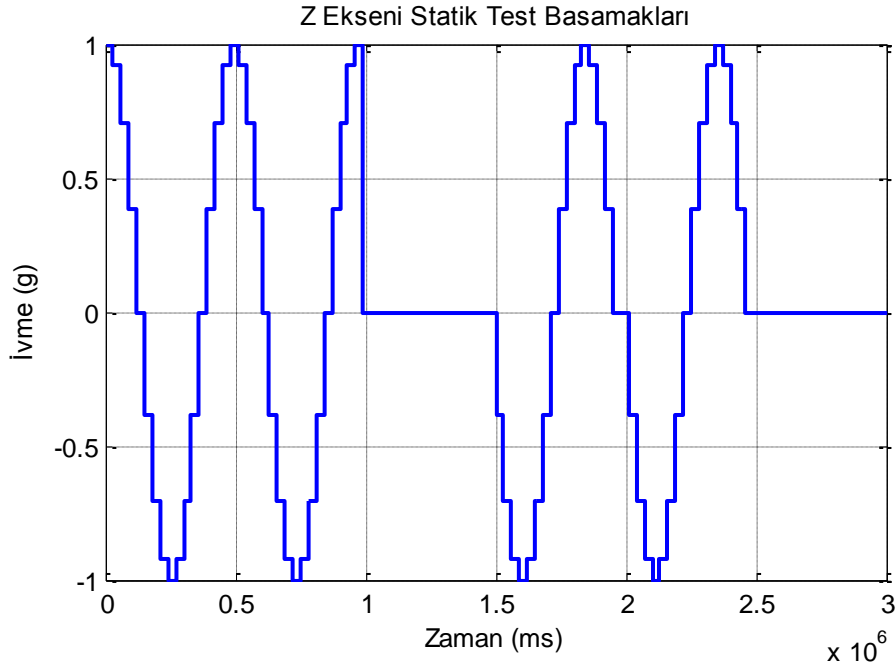
y eksenini için tekrarlanmıştır. Her basamakta 30 saniye olacak şekilde toplam 100 basamakta çok pozisyonlu statik test gerçekleştirilmiştir.



şekil 4.3 çok pozisyonlu statik test x eksenini test basamakları

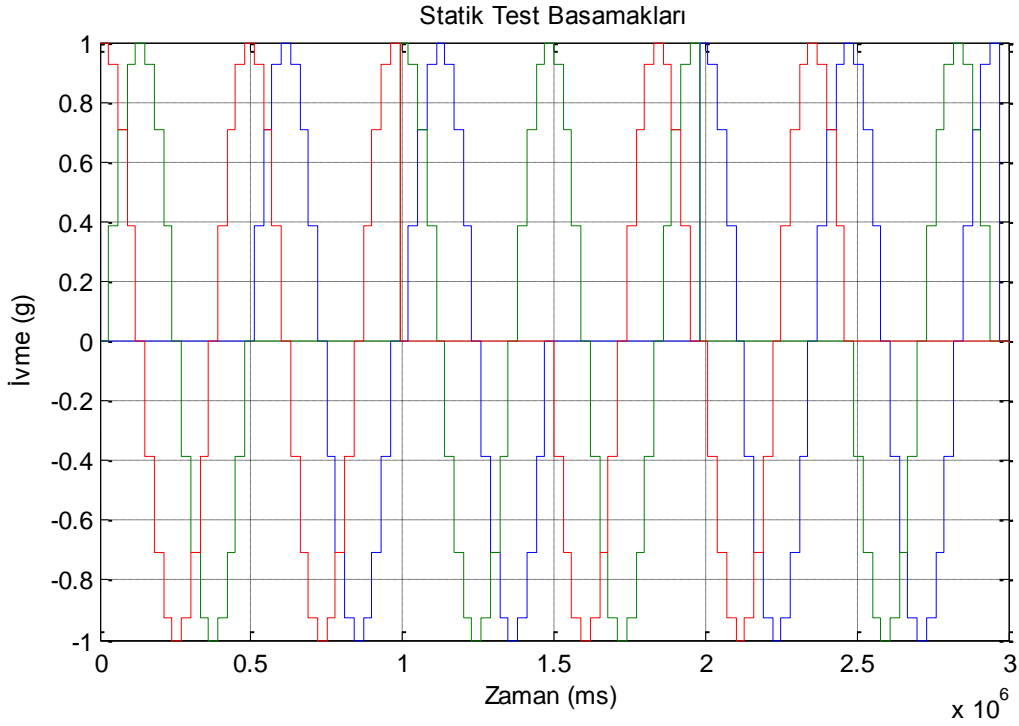


şekil 4.4 çok pozisyonlu statik test y eksenini test basamakları



Şekil 4.5 Çok pozisyonlu statik test z eksenli test basamakları

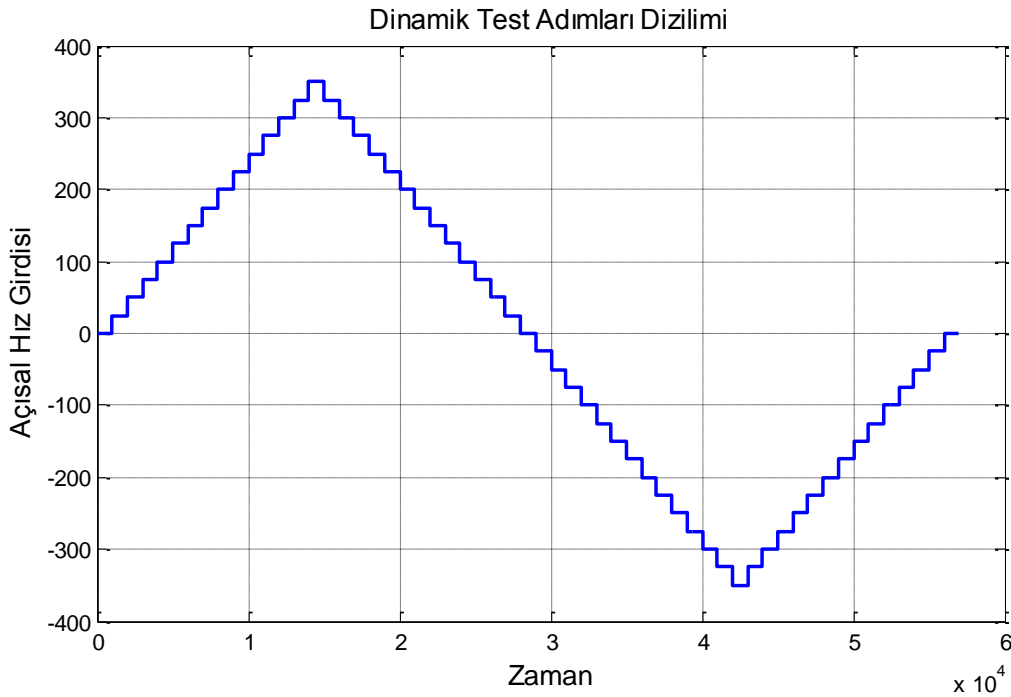
x, y ve z eksenlerinde uygulanan toplam 100 basamak statik test profili Şekil 4.6'da verilmektedir. Bu test basamakları dönü tablasının konumlandırıldığı açılar ile ataletsel ölçüm birimine uygulanmaktadır.



Şekil 4.6 Statik test basamakları (mavi renk x eksenli, yeşil renk y eksenli ve kırmızı renk z eksenli)

#### 4.1.2. Çok Dönümlü Dinamik Test

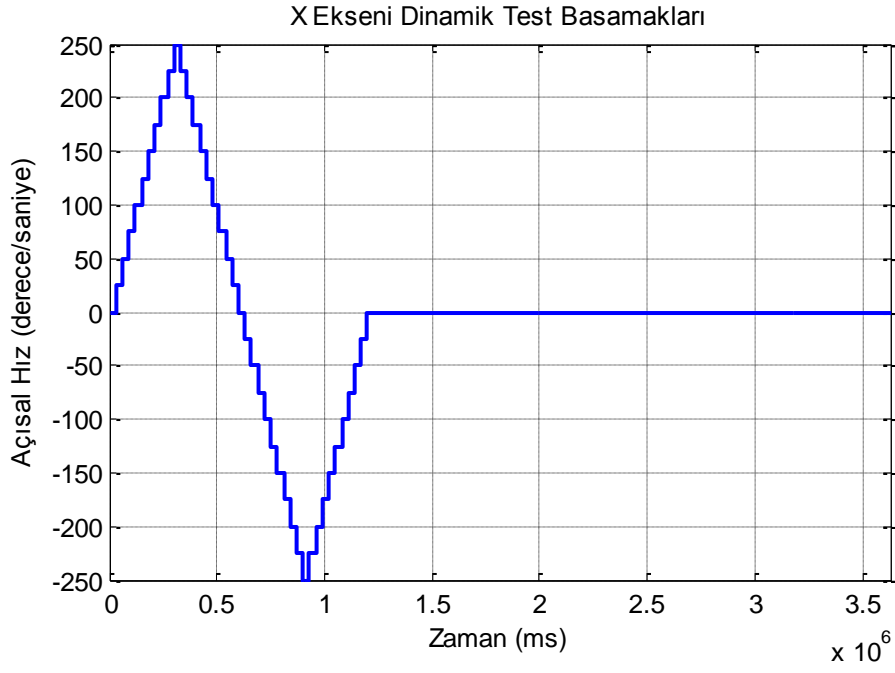
Dönüölçer ölçüm aralığı dikkate alınarak dinamik test dönme hızı aralığı belirlenir. Testin basamak boyu  $25^{\circ}/s$  olarak seçilerek belirlenen minimum ve maksimum aralıktaki yüksek hassasiyetli açısal dönme hızı girdileri dönüölçere uygulanır. Şekil 4.7'te görüldüğü gibi açısal hız durağan halden maksimum dönme hızına kademeli olarak artırılır ve daha sonra durağan hale gelene kadar kademeli olarak yavaşlatılır. Aynı işlem ters yönde maksimum dönme hızına getirilmesi ve daha sonra durağan konuma getirilmesi şeklinde tekrarlanır [1].



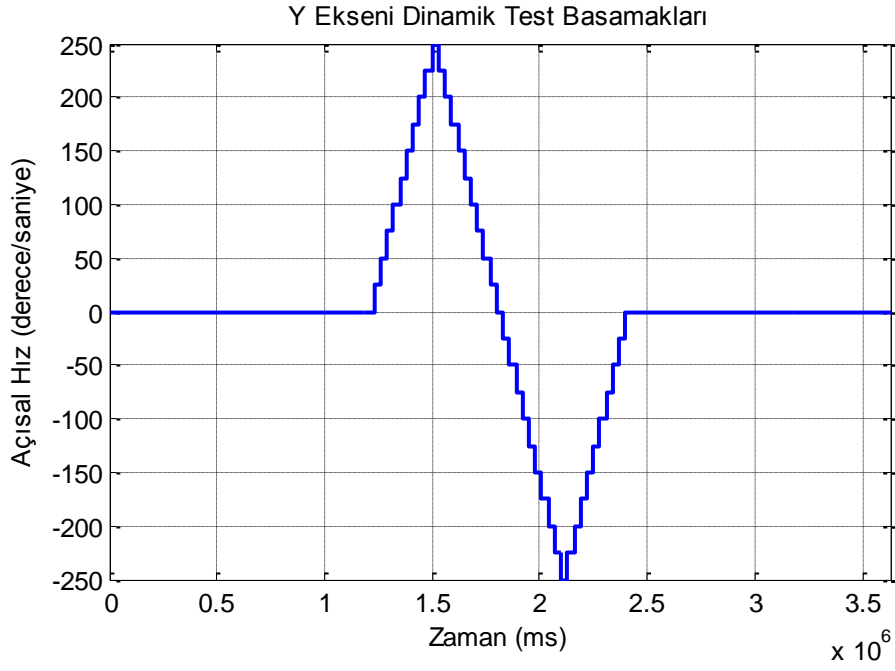
Şekil 4.7 Dinamik test adımları dizilimi

Dinamik test sırasında dönüölçerden toplanan test verileri ile dönü tablasının açısal hız değerleri karşılaştırılarak analiz edilir. Dinamik testler sonucunda dönüölçerler orantı katsayısı, aksenal kaçıklık değerleri ve hataları hesaplanır.

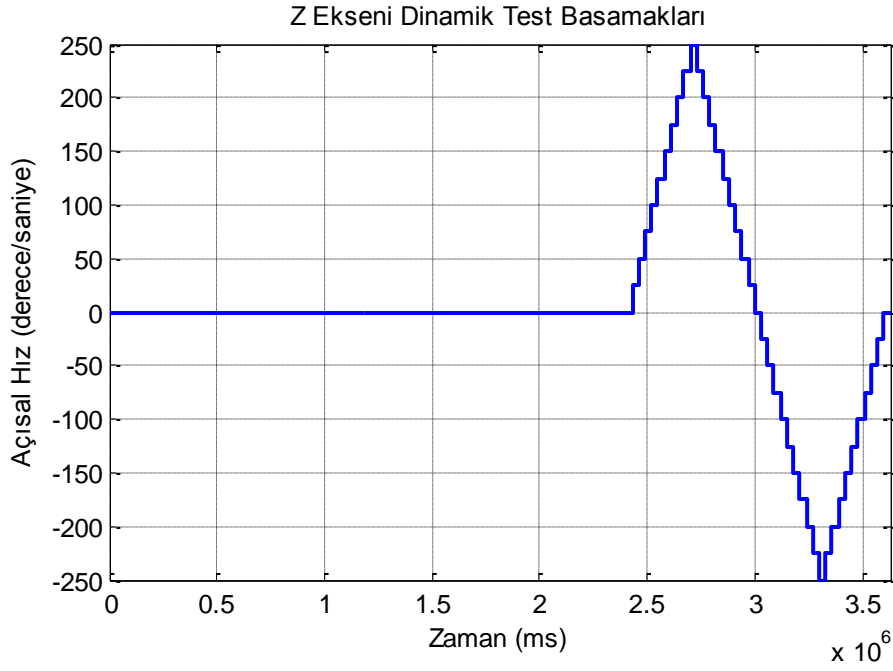
Tez çalışması kapsamında, geliştirilen çok dönümlü dinamik test basamakları Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmektedir. Dinamik test sırasında,  $-250^{\circ}/s$  ve  $+250^{\circ}/s$  arası dönme hızları  $25^{\circ}/s$  basamak boyu ile taranmaktadır. Her basamakta 30 saniye olacak şekilde toplam 120 basamakta çok dönümlü dinamik test gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 Çok dönülü dinamik test x eksenli test basamakları

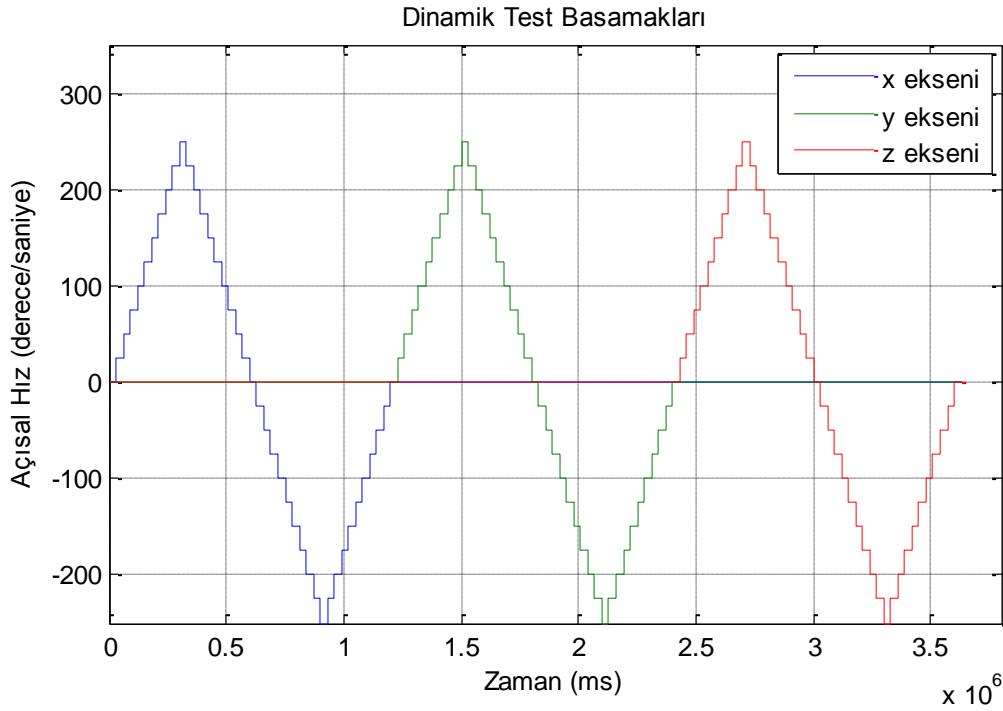


Şekil 4.9 Çok dönülü dinamik test y eksenli test basamakları



Şekil 4.10 Çok dönülü dinamik test z eksen test basamakları

x, y ve z eksenlerinde uygulanan toplam 120 basamak dinamik test profili Şekil 4.11’de verilmektedir. Bu test basamakları dönü tablasının ilgili eksenler etrafında pozitif-negatif yönde ataletsel ölçüm birimine uygulanan açısal dönme hızları ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.11 Dinamik test basamakları (mavi renk x eksen, yeşil renk y eksen ve kırmızı renk z eksen)

### 4.1.3. Test Verilerinin İşlenmesi (Least Squares Fitting Metodu)

Least Squares Fitting yöntemi bilinmeyenler daha fazla olan denklem setini çözmek için kullanılır.

(12) numaralı denklemde  $\tilde{\mathbf{y}}$  ölçülen sensör çıktısı,  $\mathbf{x}$  doğru sensör değeri,  $\mathbf{H}$  ölçümler ile gerçek değer arasındaki dönüşüm matrisi ve  $\mathbf{e}$  ölçüm hatasını temsil etmektedir.

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (12)$$

Standart Least Squares Fitting yönteminde amaç hatayı minimum yaparak  $\mathbf{x}$  doğru sensör değerini elde etmektedir. Hata vektörünün karelerinin toplamını en aza indirerek bu denklem seti çözülebilir.

$\mathbf{e} = \tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{H}\mathbf{x}$  ve  $J = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e}$  denklemleri beraber çözümlenerek (13) numaralı denklem elde edilir.

$$J = \frac{1}{2} (\tilde{\mathbf{y}}^T \tilde{\mathbf{y}} - 2\tilde{\mathbf{y}}^T \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{x}^T \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{H}\mathbf{x}) \quad (13)$$

Hataların kareleri toplamını en aza indirmek için zorunlu koşulu (14) ve yeterli koşulu (15) numaralı denklemler ile ifade edebiliriz.

$$\nabla_{\mathbf{x}} J = \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial J}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \mathbf{H}^T \mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{y}} = 0 \quad (14)$$

$$\nabla_{\mathbf{x}}^2 = \frac{\partial^2 J}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}^T} = \mathbf{H}^T \mathbf{H} \quad (15)$$

Zorunlu koşuldan elde ettiğimiz  $\mathbf{x}$  doğru değerinin açık çözümü (16) numaralı denklem ile verilmektedir.

$$\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{y}} \quad (16)$$

Statik ve dinamik test verilerinin işlenip deterministik hata parametrelerinin bulunması için kullanılan bu yöntemde  $\mathbf{x}$  doğru sensör değeri ve  $\tilde{\mathbf{y}}$  ölçülen sensör çıktısı bilinmektedir. Deterministik hata parametrelerini içeren  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisi ise bilinmemektedir. (16) numaralı standart Least Squares Fitting denklemini düzenlediğimizde  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisini elde edebiliriz. (17) numaralı denklem hata



parametrelerini belirlemekte kullanacağımız Least Squares Fitting eşitliği ifade etmektedir.

$$\mathbf{H} = \tilde{\mathbf{y}} \mathbf{x}^T (\mathbf{x} \mathbf{x}^T)^{-1} \quad (17)$$

İvmeölçer hatalarının belirlenmesi için bu yöntemin uygulaması aşağıda verilmektedir. İvmeölçer sabit kayma, orantı katsayısı, aksenal kaçıklık hata parametrelerini içeren  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisi (18) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} & B_x \\ M_{yz} & 1 + S_y & M_{yz} & B_y \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z & B_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

Dönüölçer hatalarının belirlenmesi için bu yöntemi iki kere uygulamamız gerekmektedir. Statik test sonrası dönüölçer sabit kayma hatası ve ivmeye bağlı sabit kayma hataları hesaplanır. Bu parametreleri içeren  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisi (19) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} B_{Gx} & 0 & 0 & B_x \\ 0 & B_{Gy} & 0 & B_y \\ 0 & 0 & B_{Gz} & B_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

(19) numaralı denklem ile bulunan hatalar dinamik test sırasında toplanan dönüölçer verilerinden çıkarıldıktan sonra dönüölçer orantı katsayısı hatası ve aksenal kaçıklık hataları hesaplanır. Bu parametreleri içeren  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisi (20) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yz} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

#### 4.1.4. Ataletsel Ölçüm Birimi Deterministik Hata Telafi Modeli

Test verilerinin işlenmesiyle belirlenen ivmeölçer deterministik hata değerlerini düzeltmek için uygulanan algoritma (21) numaralı denklem ile ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \widehat{a}_x \\ \widehat{a}_y \\ \widehat{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yz} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} \widetilde{a}_x \\ \widetilde{a}_y \\ \widetilde{a}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \right) \quad (21)$$

$\tilde{a}$  = Hatalı İvmeölçer Verisi

$\hat{a}$  = Hatası Telafi Edilmiş İvmeölçer Verisi

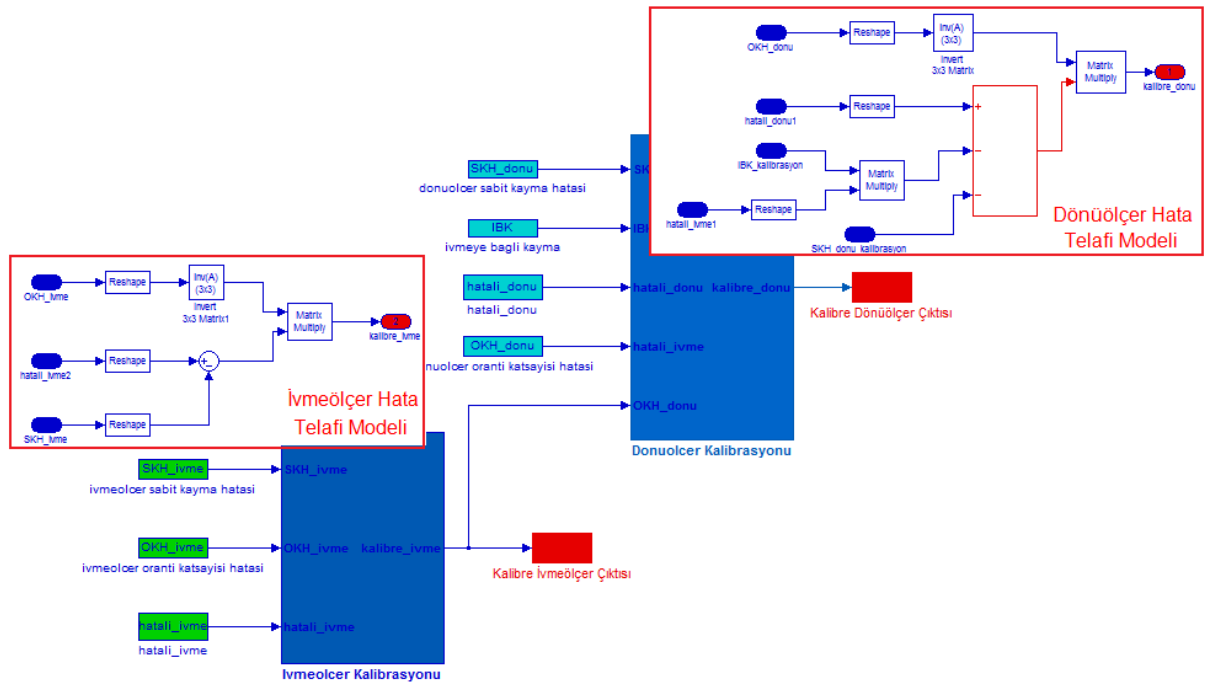
Test verilerinin işlenmesiyle belirlenen dönüölçer deterministik hata değerlerini düzeltmek için uygulanan algoritma (22) numaralı denklem ile ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \widehat{w}_x \\ \widehat{w}_y \\ \widehat{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} \widetilde{w}_x \\ \widetilde{w}_y \\ \widetilde{w}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & B_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & B_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{a}_x \\ \widehat{a}_y \\ \widehat{a}_z \end{bmatrix} \right) \quad (22)$$

$\widetilde{w}$  = Hatalı Dönüölçer Verisi

$\widehat{w}$  = Hatası Telafi Edilmiş Dönüölçer Verisi

Matlab Simulink yazılımı ile geliştirilen deterministik hata telafi modeli Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Telafi Modeli

Şekil 4.12'de ivmeölçer/dönüölçer oranı katsayısı hatası olarak görünen model girdisi, köşegen değerleri oranı katsayısı hatalarını ve diğer matris elemanları aksenal kaçıklık hatalarını içeren 3x3'lük bir matristir. Bu durum, (21) ve (22) numaralı denklemler ile ifade edilmiştir.

## 4.2. Olasılıksal Hataların Belirlenmesi

Olasılıksal hataların belirlenmesi, dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanılması ile gerçekleştirilecektir.

### 4.2.1. Dalgacık Dönüşümü

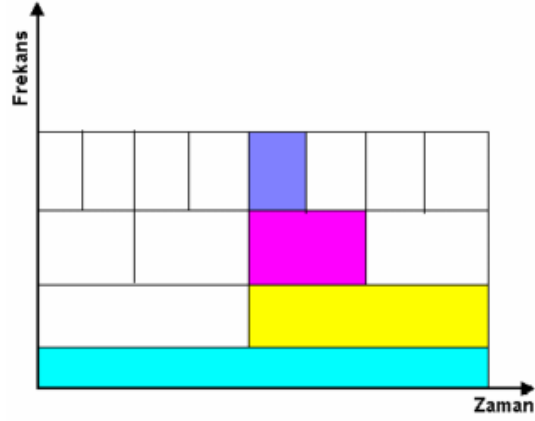
Dalgacık dönüşümü, Fourier dönüşümü ve Kısa Zaman Fourier dönüşümünün yeterli olmadığı durumlar göz önüne bulundurulmuş ve geliştirilmiştir. Sinyalin frekans-genlik gösteriminin sağlayan Fourier dönüşümü ile elde edilen frekans düzlemi bilgisi çoğu sinyal işleme uygulamaları için yeterli olmamaktadır. Sinyalin zaman-frekans gösterimini sağlayan Kısa Zaman Fourier Dönüşümü de yeterli performansı gösterememektedir. Çünkü bu dönüşüm ile sadece sabit pencere boyuna sahip zaman-frekans çözünürlüğü elde edilebilmektedir. Bu durum alçak frekans bileşenleri için büyük pencere gereksinimini ve yüksek frekans bileşenleri için küçük pencere gereksinimini karşılayamamaktadır.

Dalgacık dönüşümü, sinyali farklı frekans bileşenlerine ayıran ve her bir bileşeni o ölçekteki çözünürlüğüyle inceleyen bir dönüşüm tekniğidir. Sinyallerin zaman-frekans gösteriminin elde edilmesi için kullanılan spektrum analiz yöntemidir.

Kuantum fiziğini, jeofizik, elektrik-elektronik mühendisliği, biyomedikal, sayısal imge işleme, deprem tahmini, astronomi, ses bilimi, nükleer mühendisliği, sinyal işleme, görüntü işleme, müzik, optik dalgacıkların kullanıldığı alanlardır.

Fourier teorisinden sinyaller, sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının sonsuz toplamında ifade edilebilirler. Fakat bu fonksiyonlar sivri uçları yaklaşık olarak temsil etme konusunda çok yetersiz kalırlar. Dalgacıklar ise sinyalin sivri süreksizliklere sahip olduğu fiziksel durumlarda, sinyali gerçeğe en yakın şekilde temsil etmektedirler. Sinüs dalgası ve dalgacık arasındaki fark konumlanma özellikleriyle tanımlanabilir. Sinüs dalgası frekans ekseninde konumlanırken, dalgacık hem frekans hem de zaman ekseninde konumlanır.

Dalgacık dönüşümü, alçak frekans bileşenleri için zaman ekseninde büyük pencere ve yüksek frekans bileşenleri için zaman ekseninde küçük pencere gereksinimini karşılamaktadır.



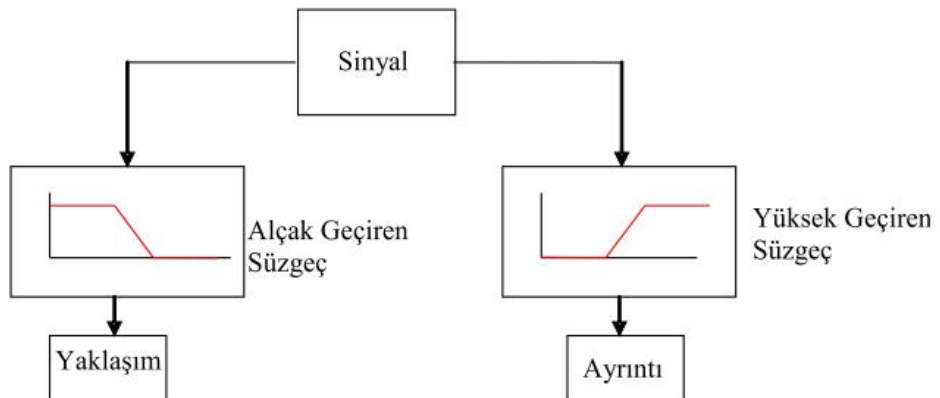
Şekil 4.13 Zaman – Frekans Diyagramı

Şekil 4.13'te verilen zaman–frekans diyagramı yardımıyla bir sinyalin yüksek ve alçak frekans bileşenleri elde edilebilir.

#### 4.2.1.1. Ayırık Dalgacık Dönüşümü

Her bir ölçek için dalgacık katsayılarını hesaplamak probleme neden olmaktadır. Ölçek ve pozisyonun belli bir basamağa göre seçilmesi çözümlerin daha verimli ve doğru sonuçlar vermesini sağlar. Bu şekilde yapılan çözümlenme ayırık dalgacık dönüşümü ile elde edilir. Bunu oluşturmanın bir yolu alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeçler kullanmaktır. Çoğu sinyal için alçak frekans bileşenleri o sinyalin önemli kısmını oluşturur. Yüksek frekans bileşenleri ise sinyalin ayrıntı kısmıdır.

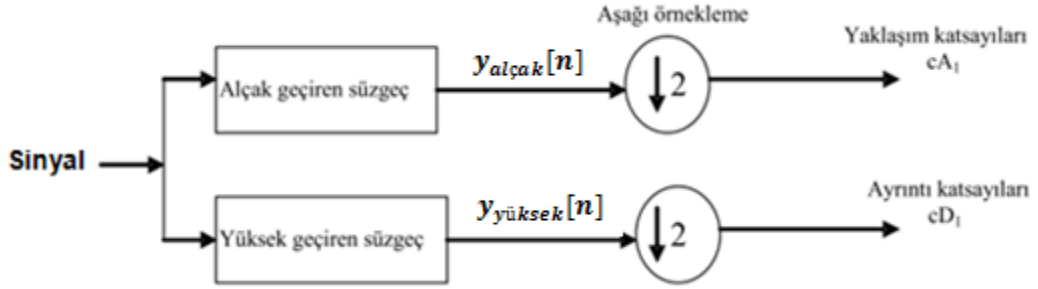
Sinyaller Şekil 4.14'te gösterildiği gibi yaklaşım ve ayrıntı bileşenlerine ayrıştırılabilirler.



Şekil 4.14 Sinyalin yaklaşım ve ayrıntı bileşenleri

Dalgacık dönüşümünde genellikle yaklaşımlardan ve ayrıntılardan söz edilir. Yaklaşımlar, sinyalin alçak frekans bileşenleri yani büyük ölçeklerdir. Ayrıntılar, sinyalin yüksek frekans bileşenleri yani küçük ölçeklerdir.

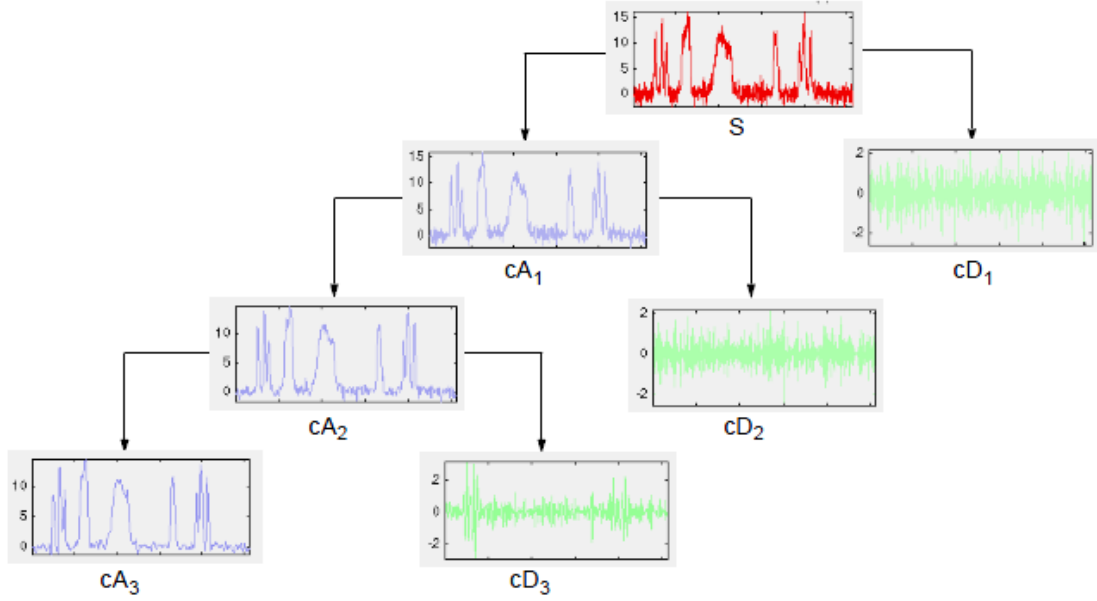
Şekil 4.15'te bir sinyalin bir seviye bileşenlerine ayrıştırılması gösterilmektedir.



Şekil 4.15 Sinyalin bir seviye bileşenlerine ayrıştırılması

Sinyalin alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeçlerle katlaması alınarak çıkışlar  $cA1$  ve  $cD1$  elde edilir.  $cA1$  yaklaşım katsayıları, sinyalin büyük ölçekli alçak frekans bileşenlerini göstermektedir.  $cD1$  ayrıntı katsayıları, sinyalin küçük ölçekli yüksek frekans bileşenlerini göstermektedir. Orijinal sinyalin örnek sayısının 1000 olduğu düşünüldüğünde, süzgeçlerle katlama sonucunda 1000 yaklaşım bileşeni ve 1000 ayrıntı bileşenleri elde edilir. Böylece toplam örnek sayısı 2000 olur. Bu durumu ortadan kaldırmak için Şekil 4.15'te verildiği gibi iki ile aşağı örnekleme yapılır ve 500 örnekli  $cA1$  ve  $cD1$  katsayıları elde edilir. Ayrıntı katsayıları olan  $cD1$ , yüksek frekans bileşenli gürültü içermektedir. Yaklaşım katsayıları olan  $cA1$  ise orijinal sinyalden daha az gürültü içermektedir.

Şekil 4.16'da sinyalin çok seviyeli bileşenlerine ayrıştırılması gösterilmektedir



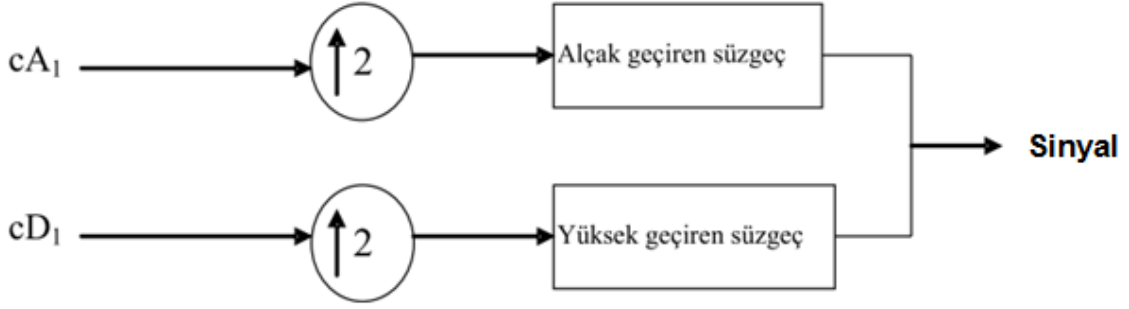
Şekil 4.16 Sinyalin çok seviyeli bileşenlerine ayrıştırılması [35]

Sinyalin çok seviyeli bileşenlerine ayrıştırılması önce alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeçlerden geçirilip sonra iki ile aşağı örneklenmesi ile sinyalin yaklaşım (cA1) ve ayrıntı (cD1) sinyalleri elde edilir. Yaklaşım sinyali, ayrıntı sinyaline göre daha fazla bilgi içermektedir. Yaklaşım sinyali (cA1), alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeçlerden tekrar geçirildiğinde yeni yaklaşım (cA2) ve ayrıntı (cD2) sinyalleri elde edilir. Yaklaşım sinyali (cA2), alçak geçiren ve yüksek geçiren süzgeçlerden tekrar geçirildiğinde yeni yaklaşım (cA3) ve ayrıntı (cD3) sinyalleri elde edilir. Yaklaşım sinyalleri bu şekilde belli bir seviyeye kadar süzgeçlerden geçirilerek kodlanır.

Sabit pozisyondaki ataletsel sensör verileri Dünya'nın yerçekimi bileşenini ve uzun süreli hataları içerir. Bu sinyaller, çok düşük frekansa sahiptir ve bu nedenle, dalgacık çok seviyeli ayrıştırma yöntemi ile sensör verisi yüksek frekanslı gürültü bileşenlerinden kolayca ayrılabilir.

#### 4.2.1.2. Ters Ayırık Dalgacık Dönüşümü

Bilgi kaybı olmadan orijinal sinyalin yeniden elde edilmesi için ters ayırık dalgacık dönüşümü kullanılır. Bu işleme sentez veya geriçatma adı verilir. Şekil 4.17'de bir seviye ayrıştırılmış sinyalin yaklaşım (cA1) ve ayrıntı (cD1) katsayılarından, orijinal sinyalin yeniden oluşturulduğu görülmektedir.



Şekil 4.17 Sinyalin yeniden elde edilmesi

#### 4.2.2. Kalman Süzgeci

Kalman süzgeci, dinamik bir sistemin durum kestirimini gerçekleştirmek amacıyla gürültülü ölçümden faydalanan bir veri işleme algoritmasıdır. Bu süzgeç gürültülü ölçümlerden gerçek durumu veya bilgiyi elde edebilecek yeteneğe sahiptir. Geleneksel tahmin yöntemlerinde olduğu gibi filtreleme özelliğine rağmen, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin etmede de çok güçlü ve yeteneklidir. Özellikle hedef izleme ve navigasyon uygulamalarında olmak üzere dinamik sistemlerin kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.

Özyineli bir yapıya sahip olduğu için daha önceki durum kestirimlerini ve ölçümleri depolamayı gerektirmez. Bu nedenle, Kalman süzgecinin işlemci üzerindeki yükü oldukça azdır.

##### 4.2.2.1. Ayrık Kalman Süzgeci

Sistem modeli ve ölçüm modeli (23) ve (24) numaralı denklemler ile verilmiştir.

Sistem Modeli:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}$$

$$p(\mathbf{w}) \sim N(0, \mathbf{Q}) \quad (23)$$

Ölçüm Modeli:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

$$p(\mathbf{v}) \sim N(0, \mathbf{R}) \quad (24)$$

$w_k$  işlem gürültüsünü ve  $v_k$  ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir.  $w_k$  ve  $v_k$  birbirinden bağımsız, beyaz ve normal olasılık dağılımına sahip (Gauss) gürültülerdir.

İşlem ve ölçüm gürültülerinin ortalama değerlerinin sıfıra eşit olduğundan beklenen değerleri sıfırdır.

$$E[\mathbf{w}(n)] = 0$$

$$E[\mathbf{v}(n)] = 0$$

İşlem ve ölçüm gürültüleri birbirinden bağımsız rasgele değişkenler olduklarından (25) numaralı denklemle ifade edildiği üzere hata ortak değişimleri sıfırdır.

$$E[\mathbf{w}(n)\mathbf{v}^T(k)] = E[\mathbf{w}(n)]E[\mathbf{v}^T(k)] = 0 \quad \forall n, k \quad (25)$$

İşlem gürültüsünün ortak değişinti matrisi  $\mathbf{Q}$  ve ölçüm gürültüsünün ortak değişinti matrisi  $\mathbf{R}$  olarak tanımlanır.

$$\mathbf{Q} = E[\mathbf{w}(n)\mathbf{w}^T(n)]$$

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{v}(n)\mathbf{v}^T(n)]$$

(23) numaralı sistem denkleminde yer alan  $\mathbf{A}$  durum geçiş matrisi, sistemin bir önceki (k-1) adımındaki durumunu şu anki (k) durumuyla ilişkilendirmektedir. Kontrol girişi için geçiş matrisi  $\mathbf{B}$ , isteğe bağlı giriş vektörünü durum vektörüyle ilişkilendirmektedir.

(24) numaralı ölçüm denkleminde yer alan  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisi, sistem durum vektörü  $x_k$  ile çıkış vektörü  $y_k$  arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Bu bölümde  $\mathbf{H}$  dönüşüm matrisinin her adımda sabit olduğu kabul edilmiştir.

$\hat{x}_k^-$  öncül durum kestirimi sistemin k anına kadarki bilgisini kullanarak gerçekleştirilir ve öncül adını alır.  $\hat{x}_k$  sonsal durum kestirimi k anındaki ölçümünden de faydalanır ve sonsal adını alır.



#### 4.2.2.1.1. Ayrık Kalman Süzgeci Algoritması

Kalman süzgeci zaman güncelleme (öngörü) ve ölçüm güncelleme (düzeltme) yapısının özyineli olarak işletilmesi ile durum kestirimini gerçekleştirir.

Zaman güncelleme kısmında sistem durumunun bir süre sonraki durumunun kestirimi yapılmaktadır. Bu kestirimin yapılması sırasında bir süre sonraki ölçümler değerlendirmeye alınmadan sistemin bir süre sonraki durumu öngörülür. Bu kısımda yalnızca sistem modelinden yararlanır.

Zaman Güncellemesi Denklemleri:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = A\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + B\mathbf{u}_{k-1} \quad (26)$$

$$\mathbf{P}_k^- = A\mathbf{P}_{k-1}A^T + Q \quad (27)$$

Zaman güncellemesi denklemleri, mevcut durumu ve hata ortak değişimini zamanda bir adım ileri taşıyarak bir sonraki adım için öncül durum kestirimi ve öncül hata ortak değişimi elde etmektedir.

Ölçüm güncellemesi kısmında yeni ölçümleri öncül durum kestirimine geri besleyerek, daha gelişmiş sonsal durum kestirimi elde edilir.

Ölçüm Güncellemesi Denklemleri:

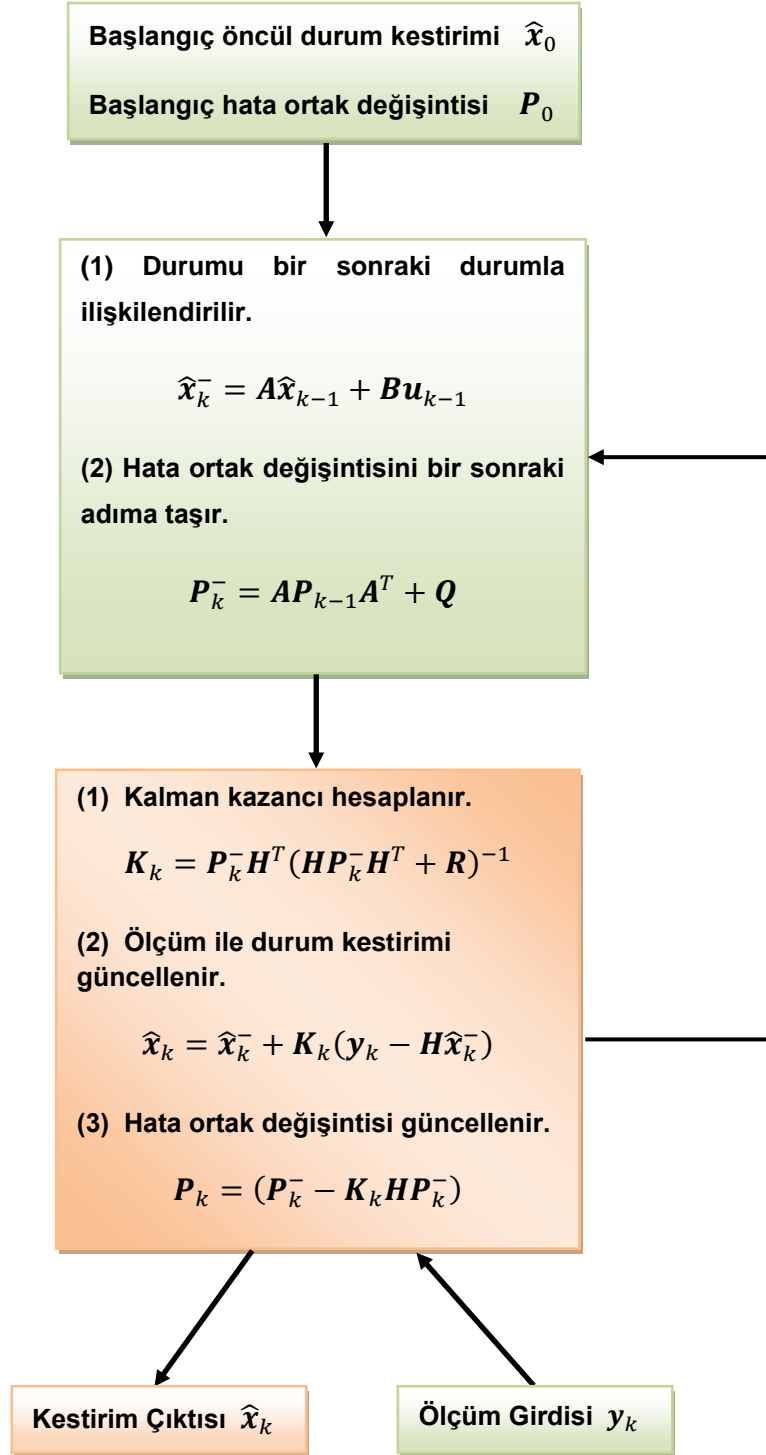
$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (29)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H} \mathbf{P}_k^-) \quad (30)$$

Ölçüm güncellemesi denklemleri kullanılarak öncelikle (28) numaralı denklem ile  $\mathbf{K}_k$  kalman kazancının hesaplanır. Bir sonraki adım, ölçümlerin gerçekleştirilerek  $\mathbf{y}_k$ 'nin elde edilmesi ile (29) numaralı denklem kullanılarak sonsal durum kestiriminin bulunmasıdır. Son adım (30) numaralı denklem kullanılarak sonsal hata ortak değişiminin bulunmasıdır.

Kalman süzgeci algoritması Şekil 4.18 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.18 Kalman süzgeci algoritması

Her bir zaman güncelleme ve ölüm güncellemesi adımından sonra, algoritma yinelenir ve bir önceki sonsal durum kestirimi ve sonsal hata ortak değişintisi kullanılarak yeni bir öncül durum kestirimi ve öncül hata ortak değişintisi elde edilir. Kalman kazancı ve hata ortak değişintisinin normu sıfıra yakın bir sayıya yakınsayana kadar algoritma devam eder. zyineli yapıya sahip olması Kalman süzgecinin yaygın kullanılmasının başlıca sebeplerindedir.

## 5. BENZETİM SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları dört bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler, geliştirilen AÖB hata modeli ve AÖB hata telafi modellerinin benzetim sonuçlarından oluşmaktadır.

### 5.1. Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Modeli Benzetim Sonuçları

İvmeölçer orantı katsayısı hatası, ivmeölçer sabit kayma hatası, ivmeölçer sabit kayma kararsızlığı, ivmeölçer eksenel kaçıklık hataları, ivmeölçer rasgele sensör gürültüsü hata parametreleri Bölüm 3'te anlatılan ve Şekil 3.9'da verilen ivmeölçer hata modelinin girdileri olarak benzetime beslenmektedir. Çizelge 5.1 ile benzetim çalışmasında kullanılan ivmeölçer hata parametreleri verilmektedir.

Çizelge 5.1 AÖB Hata Modeli İvmeölçer Hata Parametreleri Girdileri

İvmeölçer Deterministik Hata Parametreleri		
$S_x$	X Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	21283 ppm
$S_y$	Y Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	17592 ppm
$S_z$	Z Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	18409 ppm
$B_x$	X Eksenli Sabit Kayma Hatası	0.3945 g
$B_y$	Y Eksenli Sabit Kayma Hatası	0.2899 g
$B_z$	Z Eksenli Sabit Kayma Hatası	-0.3371 g
$M_{xy}$	X Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	7.8824 mrad
$M_{xz}$	X Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	4.1317 mrad
$M_{yx}$	Y Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	5.5272 mrad
$M_{yz}$	Y Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	4.8791 mrad
$M_{zx}$	Z Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	6.2235 mrad
$M_{zy}$	Z Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	8.9376 mrad
İvmeölçer Olasılıksal Hata Parametreleri		
$\delta B_x$	X Eksenli Sabit Kayma Kararsızlığı	0.001 g
$\delta B_y$	Y Eksenli Sabit Kayma Kararsızlığı	0.001 g
$\delta B_z$	Z Eksenli Sabit Kayma Kararsızlığı	0.001 g
$n_x$	X Eksenli Gürültü Yoğunluğu	0.00043 g/ $\sqrt{Hz}$

$n_y$	Y Eksenine Gürültü Yoğunluğu	0.00043 g/ $\sqrt{Hz}$
$n_z$	Z Eksenine Gürültü Yoğunluğu	0.00043 g/ $\sqrt{Hz}$

Benzer şekilde, dönüölçer orantı katsayısı hatası, dönüölçer sabit kayma hatası, dönüölçer sabit kayma kararsızlığı, dönüölçer ivmeye bağlı sabit kayma hatası, dönüölçer eksenel kaçıklık hataları, dönüölçer rasgele sensör gürültüsü hata parametreleri Bölüm 3'te anlatılan ve Şekil 3.10'da verilen dönüölçer hata modelinin girdileri olarak benzetime beslenmektedir. Çizelge 5.2 ile benzetim çalışmasında kullanılan dönüölçer hata parametreleri verilmektedir.

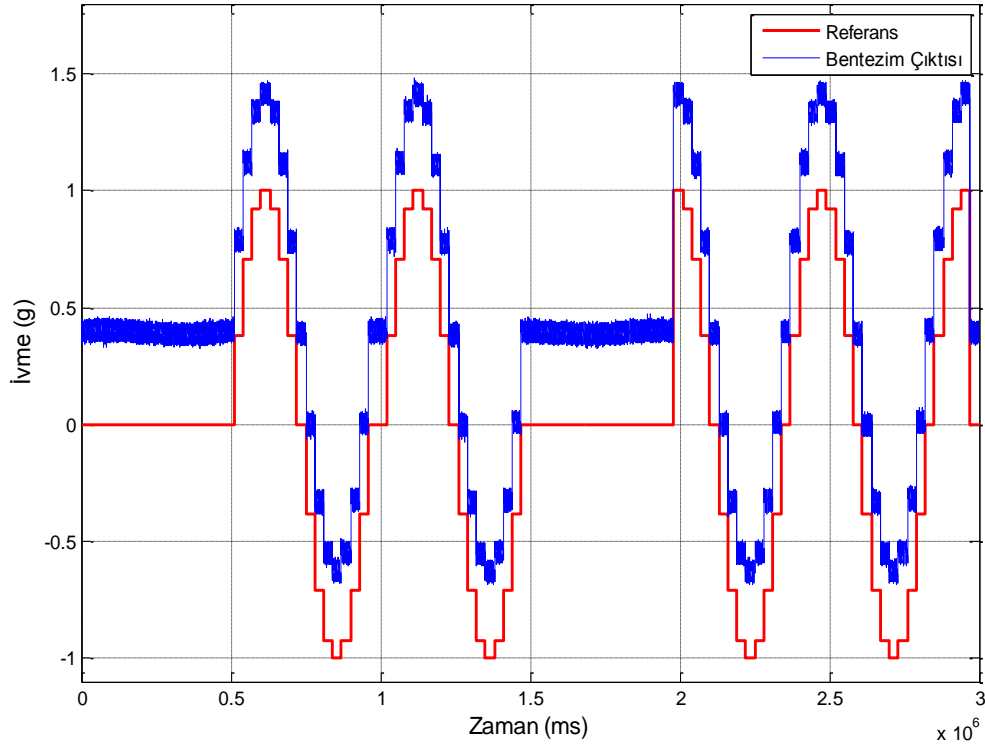
Çizelge 5.2 AÖB Hata Modeli Dönüölçer Hata Parametreleri Girdileri

Dönüölçer Deterministik Hata Parametreleri		
$S_x$	X Eksenine Orantı Katsayısı Hatası	19872 ppm
$S_y$	Y Eksenine Orantı Katsayısı Hatası	32650 ppm
$S_z$	Z Eksenine Orantı Katsayısı Hatası	14883 ppm
$B_x$	X Eksenine Sabit Kayma Hatası	1.4402 °/s
$B_y$	Y Eksenine Sabit Kayma Hatası	-0.7611 °/s
$B_z$	Z Eksenine Sabit Kayma Hatası	1.5269 °/s
$B_{Gx}$	X Eksenine İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası	0.0485 °/s/g
$B_{Gy}$	Y Eksenine İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası	0.0617 °/s/g
$B_{Gz}$	Z Eksenine İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası	0.0432 °/s/g
$M_{xy}$	X Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	8.4814 mrad
$M_{xz}$	X Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	3.9864 mrad
$M_{yx}$	Y Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	5.1457 mrad
$M_{yz}$	Y Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	6.5572 mrad
$M_{zx}$	Z Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	6.1988 mrad
$M_{zy}$	Z Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	7.3812 mrad
Dönüölçer Olasılıksal Hata Parametreleri		
$\delta B_x$	X Eksenine Sabit Kayma Kararsızlığı	0.01 °/s
$\delta B_y$	Y Eksenine Sabit Kayma Kararsızlığı	0.01 °/s
$\delta B_z$	Z Eksenine Sabit Kayma Kararsızlığı	0.01 °/s

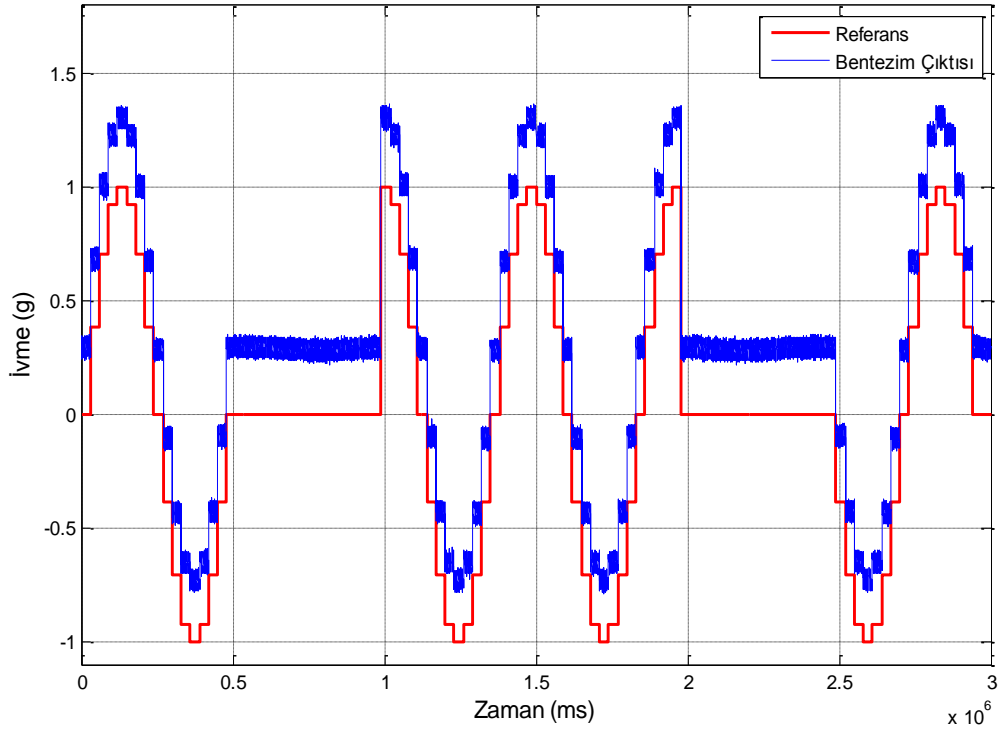
$n_x$	X Eksenli Gürültü Yoğunluğu	$0.0057 \text{ } \%/s/\sqrt{Hz}$
$n_y$	Y Eksenli Gürültü Yoğunluğu	$0.0057 \text{ } \%/s/\sqrt{Hz}$
$n_z$	Z Eksenli Gürültü Yoğunluğu	$0.0057 \text{ } \%/s/\sqrt{Hz}$

Bölüm 4'te açıklanan çok pozisyonlu statik test ve çok pozisyonlu dinamik test değerleri hata modelinin girişine referans girdi olarak uygulanmıştır.

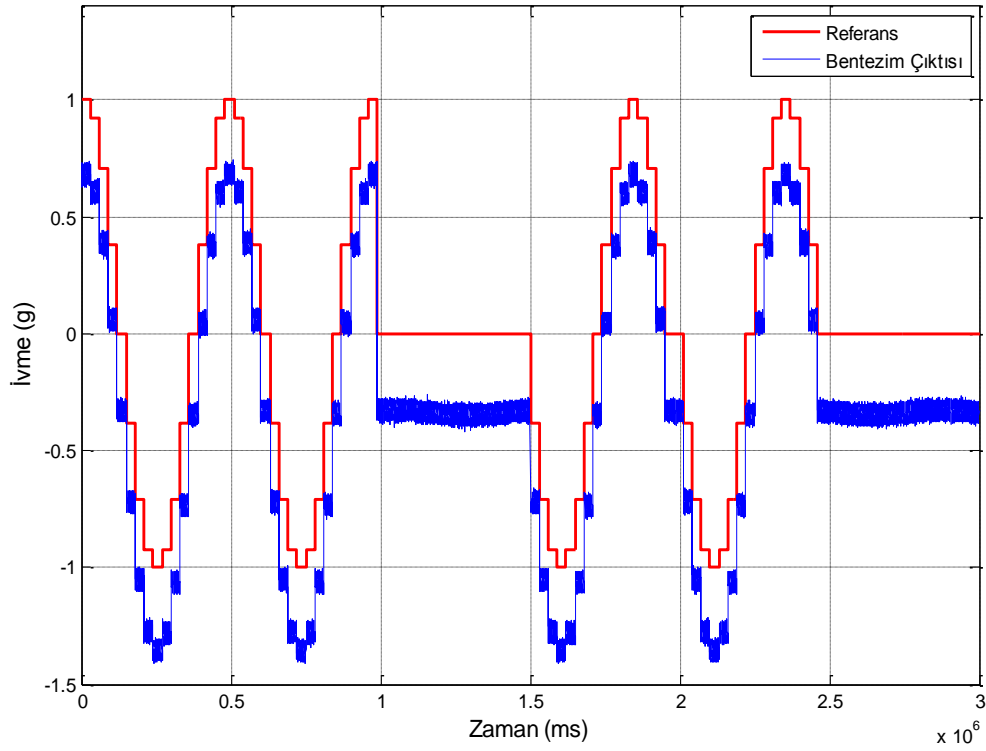
Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 ile sırasıyla x, y, z eksenleri çok pozisyonlu statik test verisinin AÖB hata modeliyle benzetimi kurulmuştur.



Şekil 5.1 x eksenli AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı)

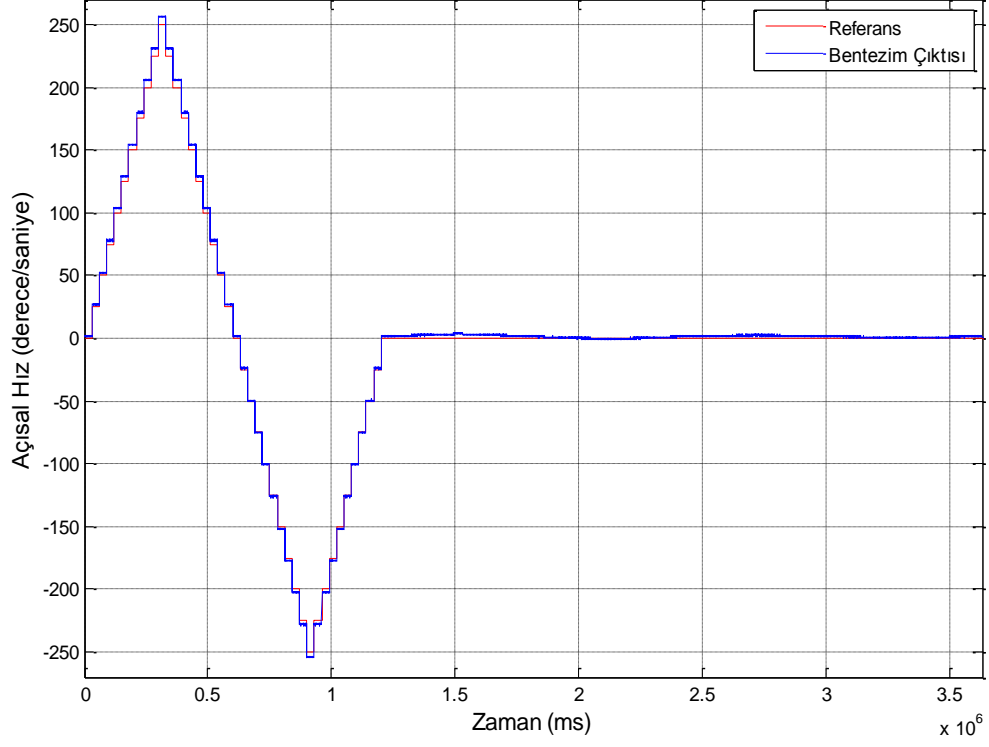


Şekil 5.2 y eksenli AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı)



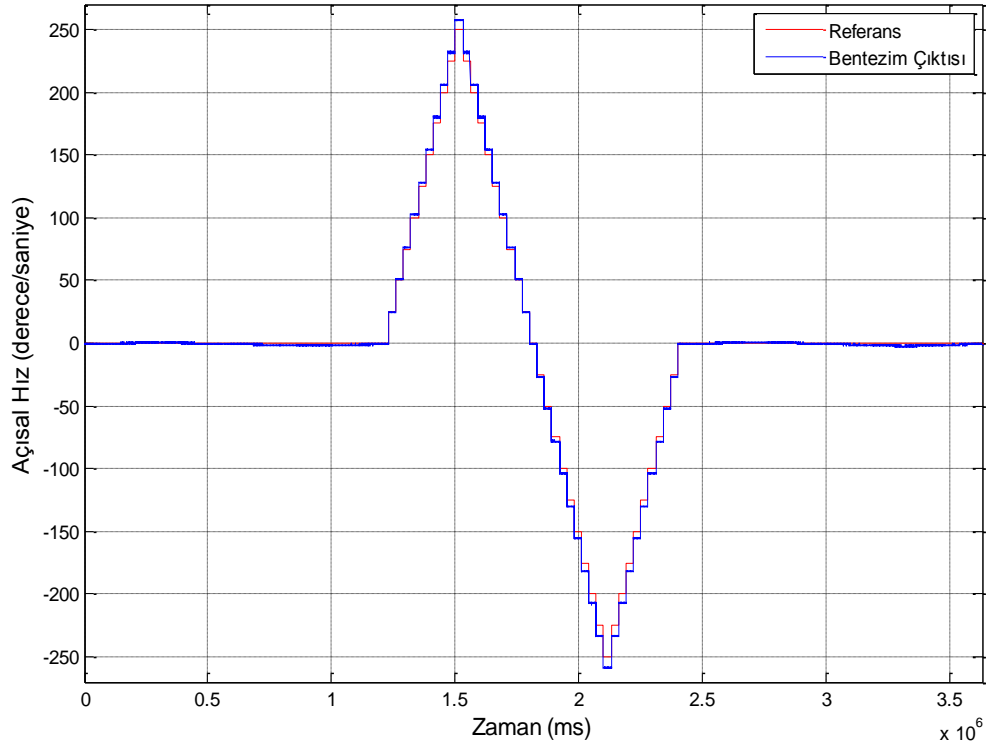
Şekil 5.3 z eksenli AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı)

Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 ile sırasıyla x, y, z eksenleri çok dönümlü dinamik test verisinin AÖB hata modeliyle benzetimi kurulmuştur.

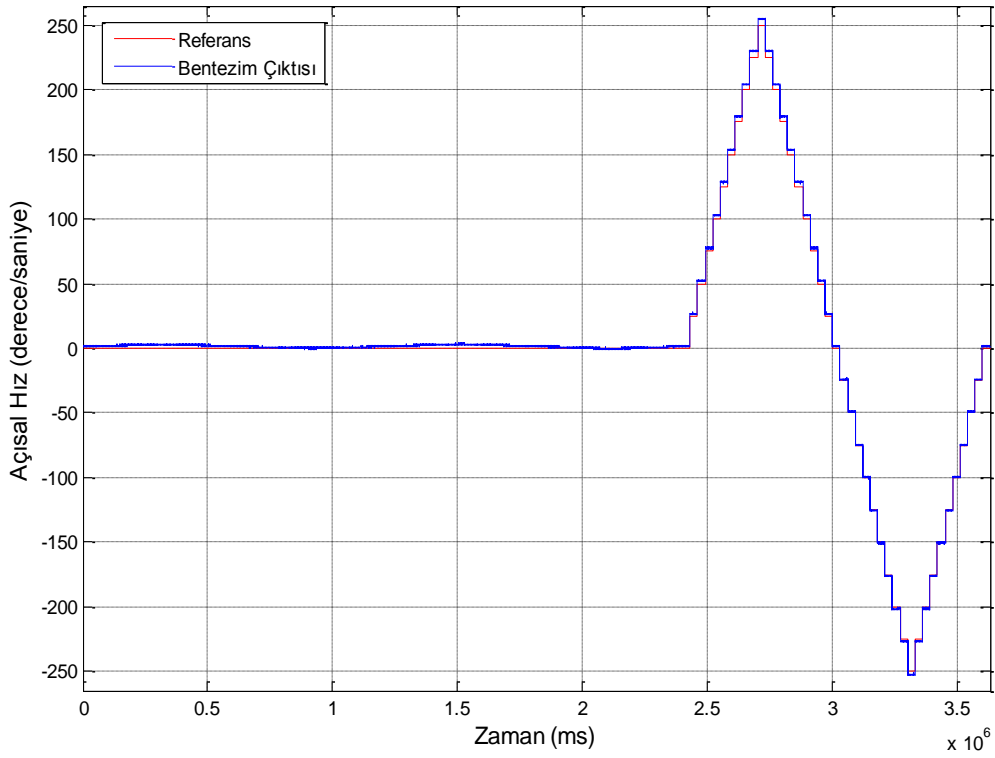


Şekil 5.4 x eksenli AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı)





Şekil 5.5 y eksenli AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı)



Şekil 5.6 z eksenli AÖB hata modeli girdisi (referans) ve çıktısı (benzetim çıktısı)

## 5.2. Ataletsel Ölçüm Birimi Deterministik Hata Telafi Modeli Benzetim Sonuçları

Bölüm 4.1’de anlatılan yöntem ile çok pozisyonlu statik test ve çok dönülü dinamik test verileri işlenmiş ve deterministik hata parametreleri belirlenmiştir. AÖB’ye eklenen hata değerleri ile belirlenen hata değerlerinin karşılaştırılması ve başarı yüzdesi Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’te verilmiştir. Belirlenen hata parametreleri, AÖB hata telafi modelinin girdisi olarak kullanılarak hataların telafisi sağlanmıştır.

Çizelge 5.3 AÖB Hata Telafi Modeli İvmeölçer Hata Parametreleri Girdileri

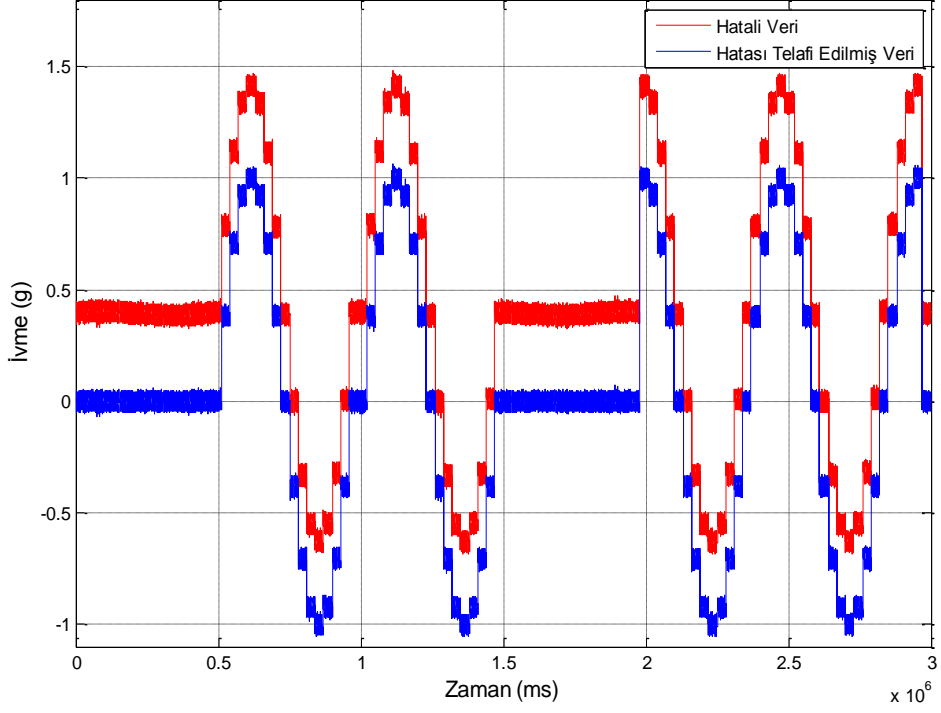
İvmeölçer Deterministik Hata Parametreleri				
Simge	Açıklama	Hata	Telafi Edilen	Başarı Yüzdesi
$S_x$	X Eksenli Orantı Katsayısı Hatası (ppm)	21283	21387	99.5113
$S_y$	Y Eksenli Orantı Katsayısı Hatası (ppm)	17592	17597	99.9715
$S_z$	Z Eksenli Orantı Katsayısı Hatası (ppm)	18409	18297	99.3916
$B_x$	X Eksenli Sabit Kayma Hatası (g)	0.3945	0.3944	99.9746
$B_y$	Y Eksenli Sabit Kayma Hatası (g)	0.2899	0.2898	99.9655
$B_z$	Z Eksenli Sabit Kayma Hatası (g)	-0.3371	-0.3372	99.9703
$M_{xy}$	X Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	7.8824	7.8863	99.9505
$M_{xz}$	X Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	4.1317	4.0169	97.2214
$M_{yx}$	Y Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	5.5272	5.6352	98.0460
$M_{yz}$	Y Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	4.8791	4.7568	97.4933
$M_{zx}$	Z Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	6.2235	6.3260	98.3530
$M_{zy}$	Z Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	8.9376	8.9409	99.9630

Çizelge 5.4 AÖB Hata Telafi Modeli Dönüölçer Hata Parametreleri Girdileri

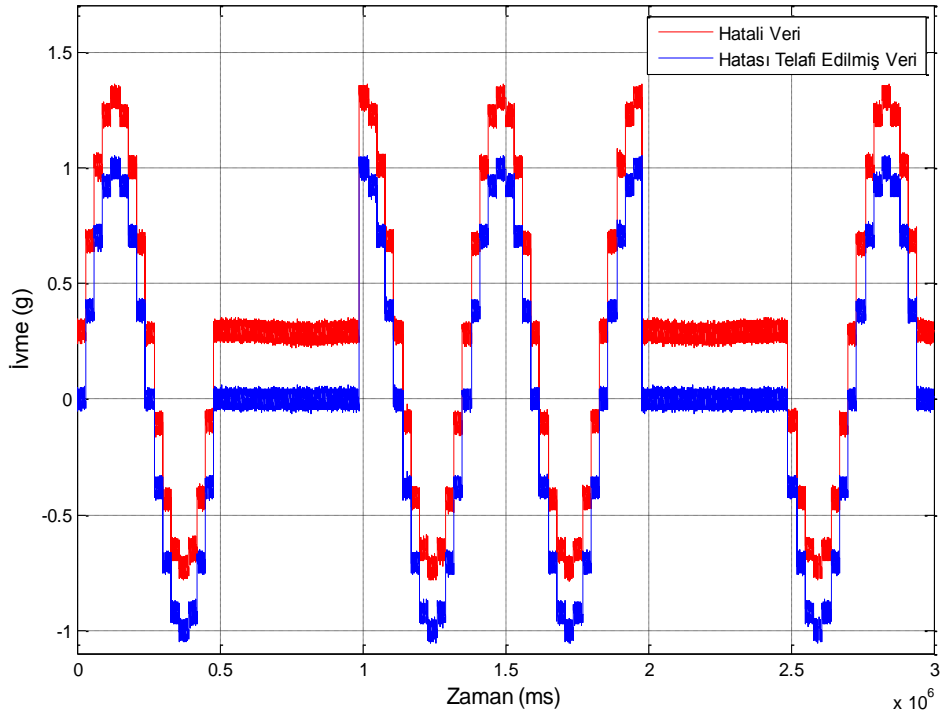
Dönüölçer Deterministik Hata Parametreleri				
Simge	Açıklama	Hata	Telafi Edilen	Başarı Yüzdesi
$S_x$	X Eksenini Orantı Katsayısı Hatası (ppm)	19872	19857	99.9245
$S_y$	Y Eksenini Orantı Katsayısı Hatası (ppm)	32650	32671	99.9356
$S_z$	Z Eksenini Orantı Katsayısı Hatası (ppm)	14883	14872	99.9260
$B_x$	X Eksenini Sabit Kayma Hatası (°/s)	1.4402	1.4380	99.8472
$B_y$	Y Eksenini Sabit Kayma Hatası (°/s)	-0.7611	-0.7633	99.7109
$B_z$	Z Eksenini Sabit Kayma Hatası (°/s)	1.5269	1.5247	99.8559
$B_{Gx}$	X Eksenini İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası (°/s/g)	0.0485	0.0498	97.3195
$B_{Gy}$	Y Eksenini İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası (°/s/g)	0.0617	0.0620	99.5137
$B_{Gz}$	Z Eksenini İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası (°/s/g)	0.0432	0.0406	93.9814
$M_{xy}$	X Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	8.4814	8.5025	99.7512
$M_{xz}$	X Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	3.9864	3.9764	99.7491
$M_{yx}$	Y Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	5.1457	5.1310	99.7143
$M_{yz}$	Y Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	6.5572	6.5472	99.8475
$M_{zx}$	Z Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	6.1988	6.1841	99.7628
$M_{zy}$	Z Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası (mrad)	7.3812	7.4023	99.7141

Bölüm 5.1’de bilinen hata parametreleri ve AÖB hata modeli ile oluşturulan hatalı ivmeölçer-dönüölçer verileri, AÖB hata telafi modelinin girdisi olarak kullanılarak hataların telafisi sağlanmıştır.

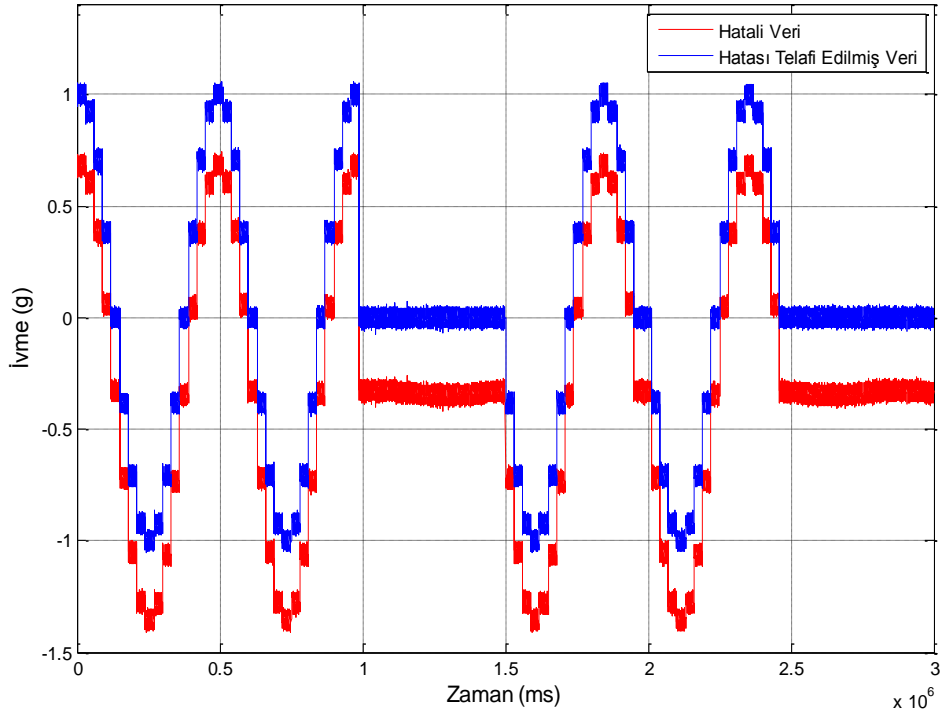
Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da sırasıyla x, y, z eksenleri AÖB hata telafi modeli benzetimi sonuçları verilmektedir. İvmeölçer deterministik hatalarının büyük ölçüde azaldığı görülebilmektedir.



Şekil 5.7 x eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

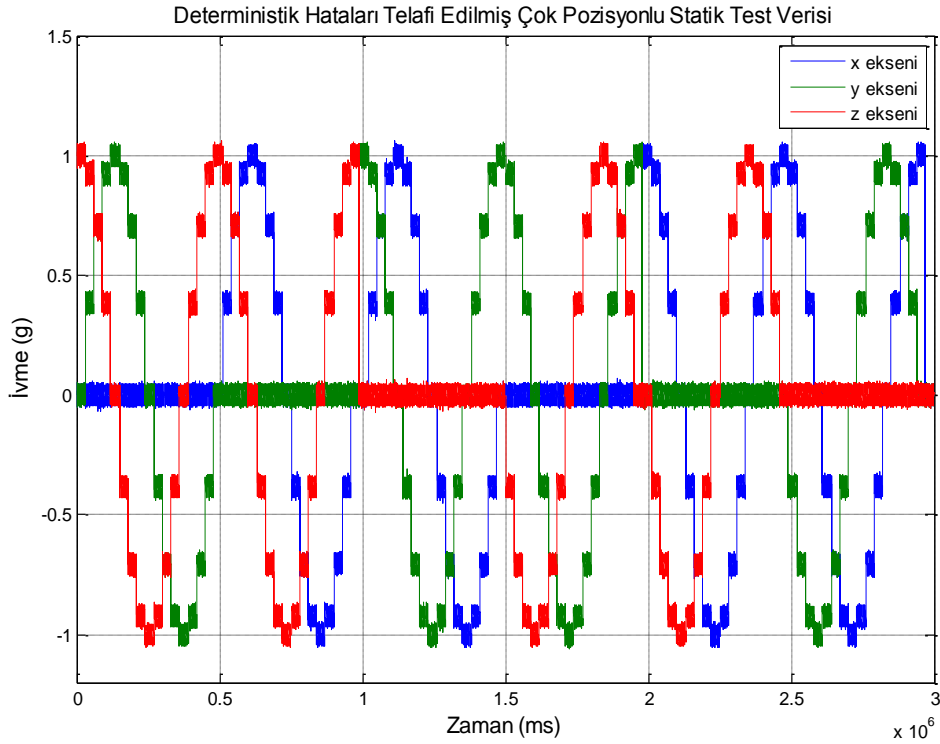


Şekil 5.8 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)



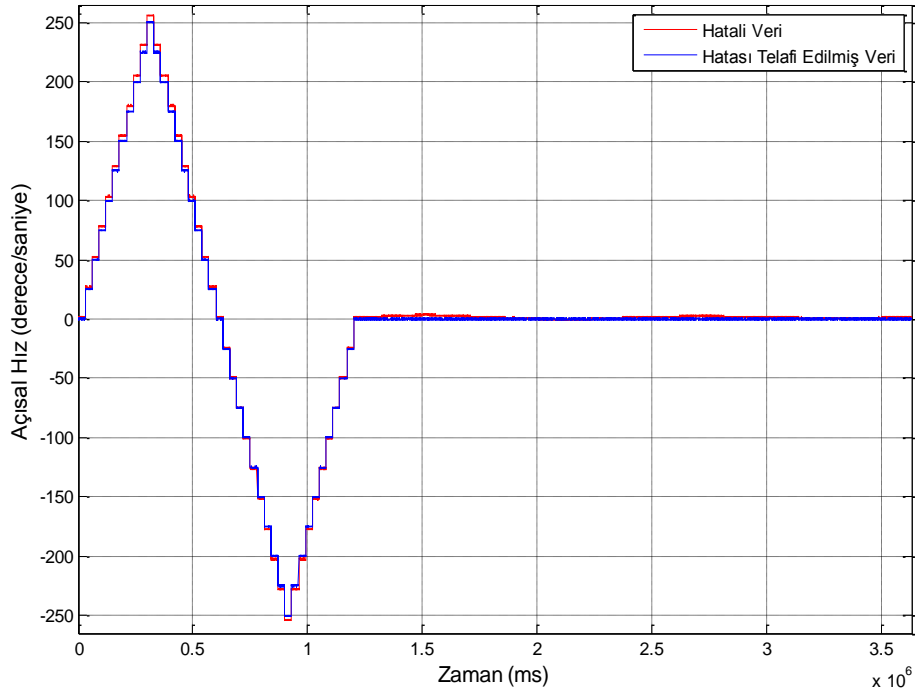
Şekil 5.9 z eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

x, y ve z eksenlerinde deterministik hataların telafi edilmesi sonucunda elde edilen kalibre veriler Şekil 5.10'da verilmektedir.

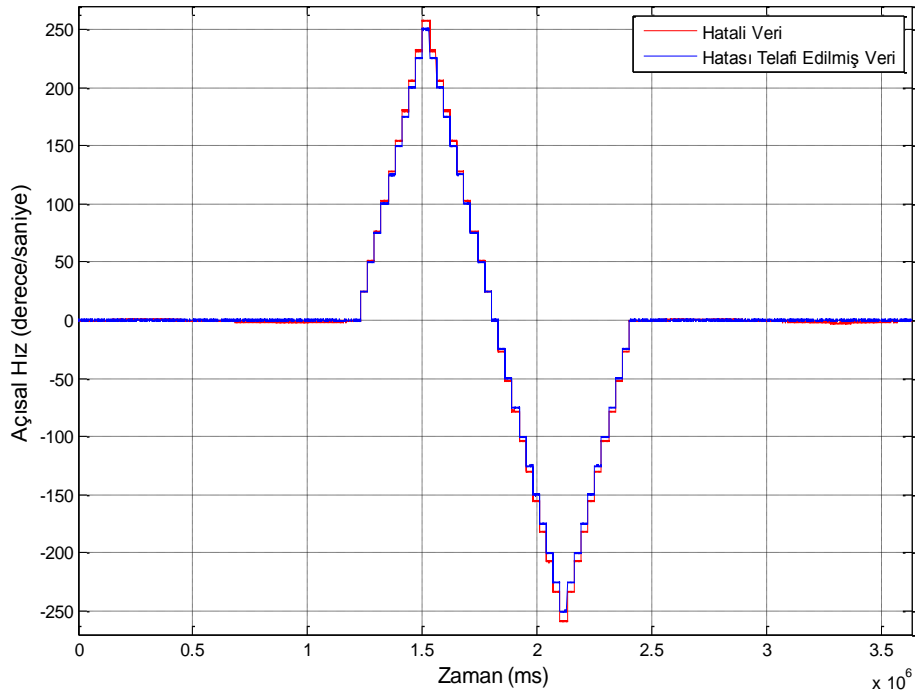


Şekil 5.10 Deterministik hataları telafi edilmiş çok pozisyonlu statik test verisi

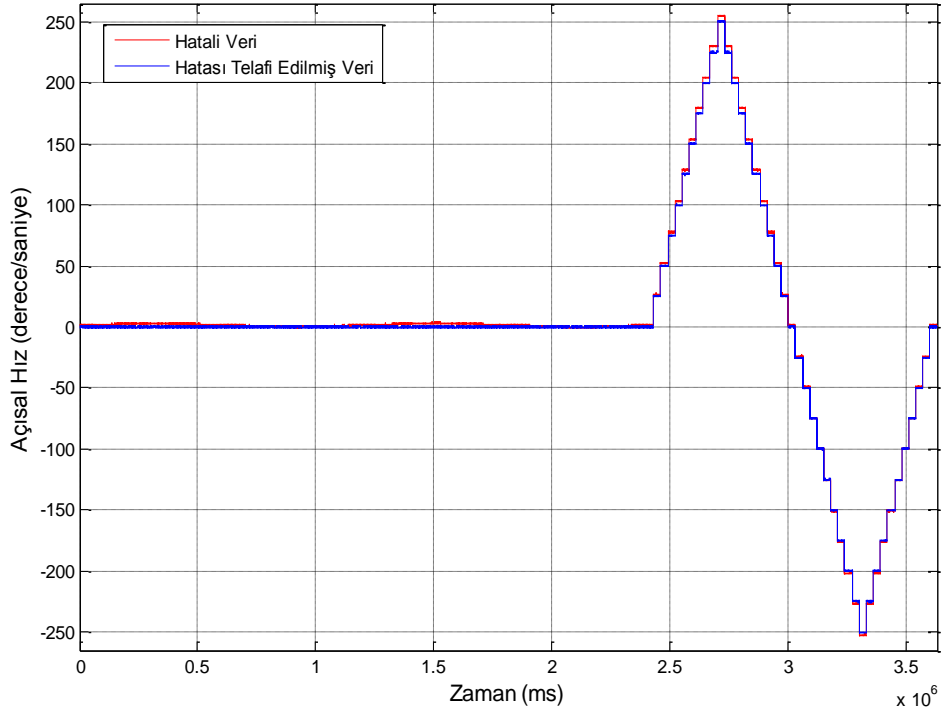
Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te sırasıyla x, y, z eksenleri AÖB hata telafi modeli benzetimi sonuçları verilmektedir. Dönüölçer deterministik hatalarının büyük ölçüde azaldığı görülebilmektedir.



Şekil 5.11 x eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)



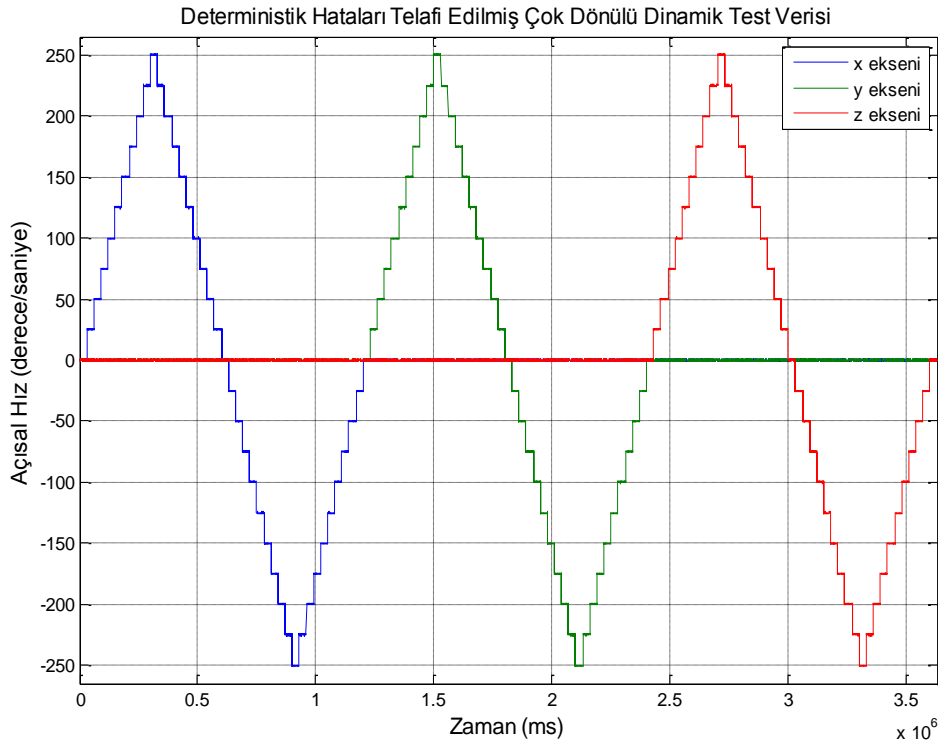
Şekil 5.12 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)



Şekil 5.13 z eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)



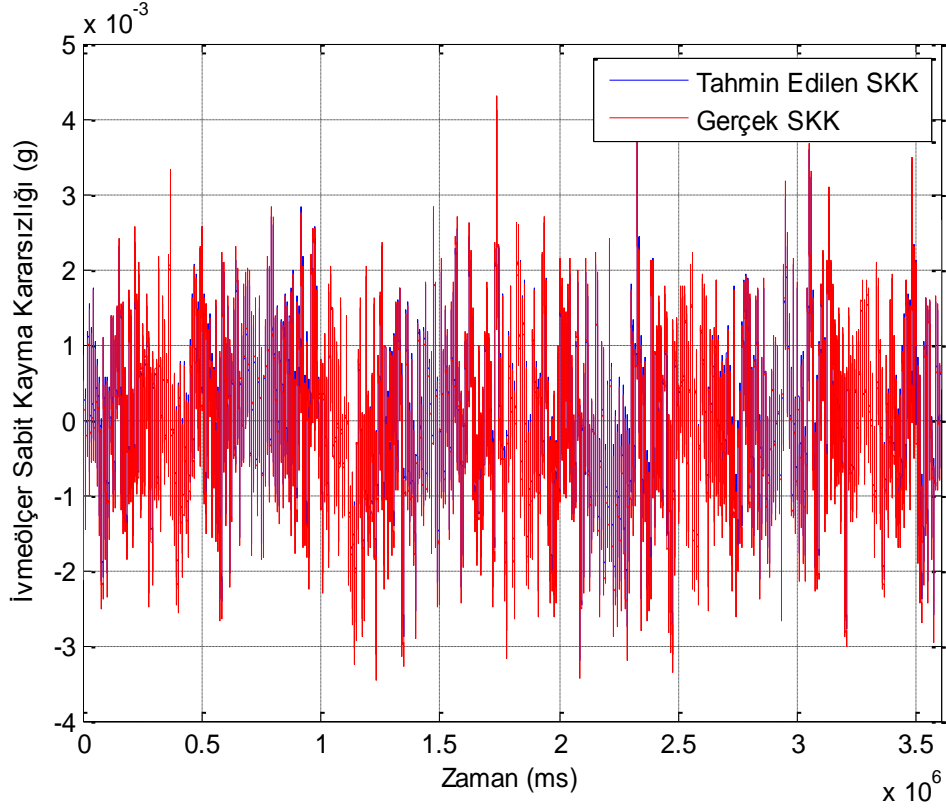
x, y ve z eksenlerinde deterministik hataların telafi edilmesi sonucunda elde edilen kalibre veriler Şekil 5.10'te verilmektedir.



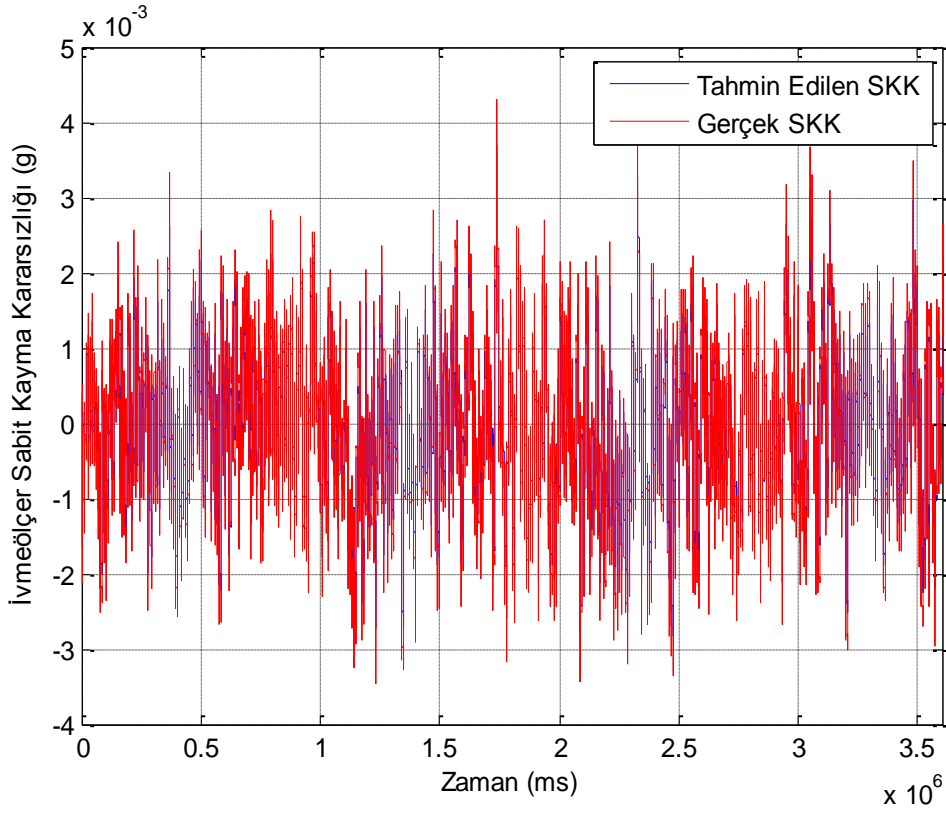
Şekil 5.14 Deterministik hataları telafi edilmiş çok dönümlü dinamik test verisi

### 5.3. Ataletsel Ölçüm Birimi Olasılıksal Hata Telafi Modeli Benzetim Sonuçları

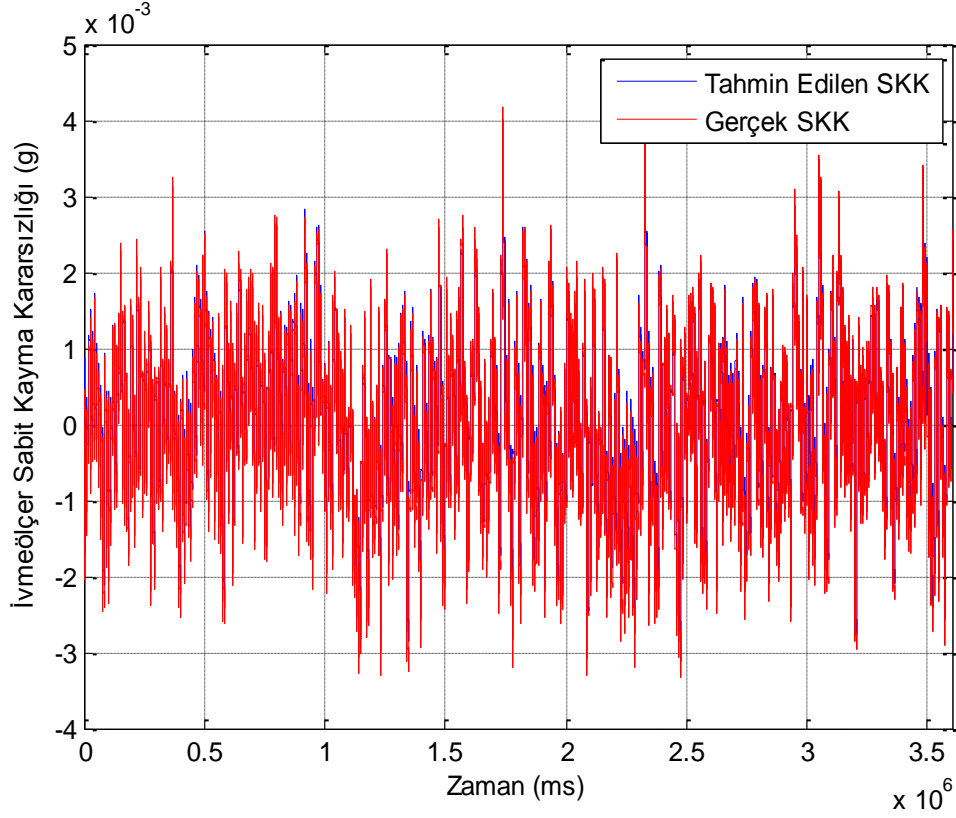
Bölüm 4.2'de anlatılan yöntem ile AÖB olasılıksal hataları belirlenmiştir. İvmeölçer sabit kayma kararsızlığı Şekil 5.15, Şekil 5.17 ve Şekil 5.19'da doğrudan Kalman süzgeci ile belirlenmiştir. Şekil 5.16, Şekil 5.18 ve Şekil 5.20'de ise dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanılması ile ivmeölçer sabit kayma kararsızlığı belirlenmiştir.



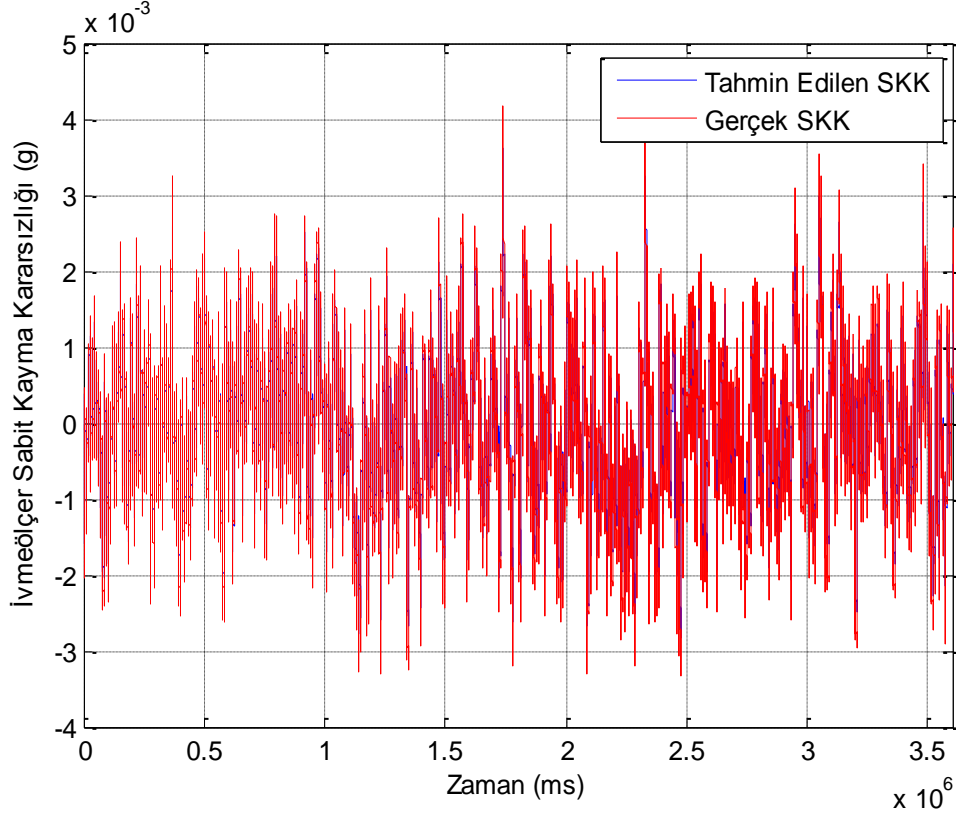
Şekil 5.15 x eksen i vmeölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi



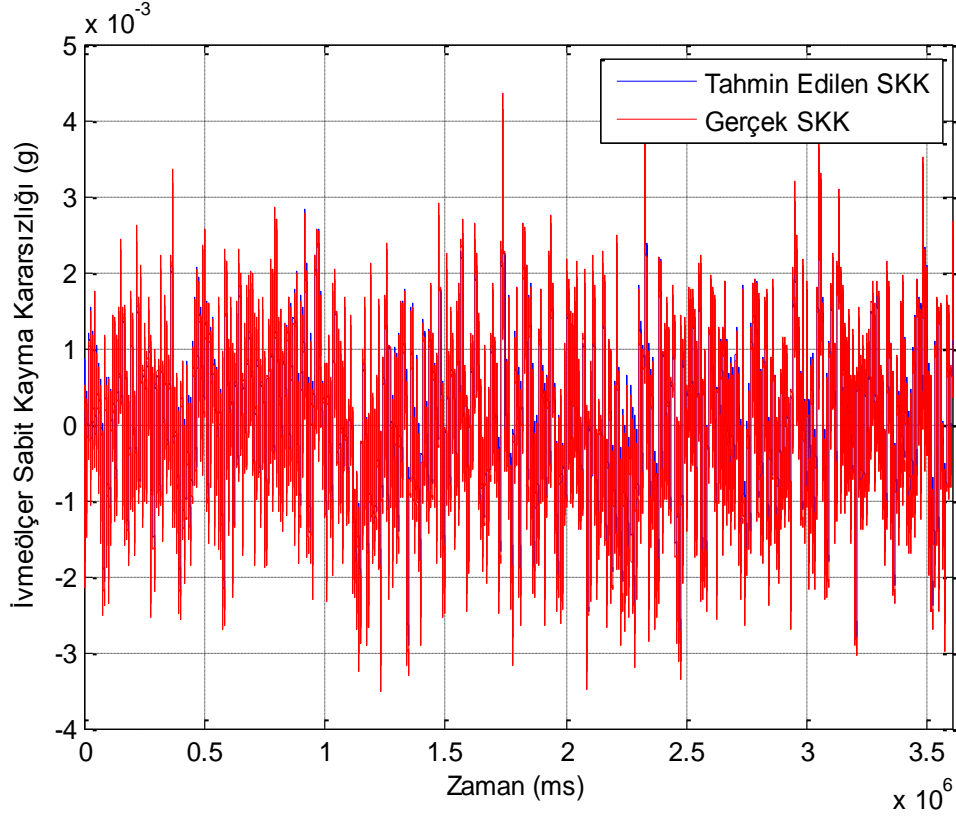
Şekil 5.16 x eksen i vmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



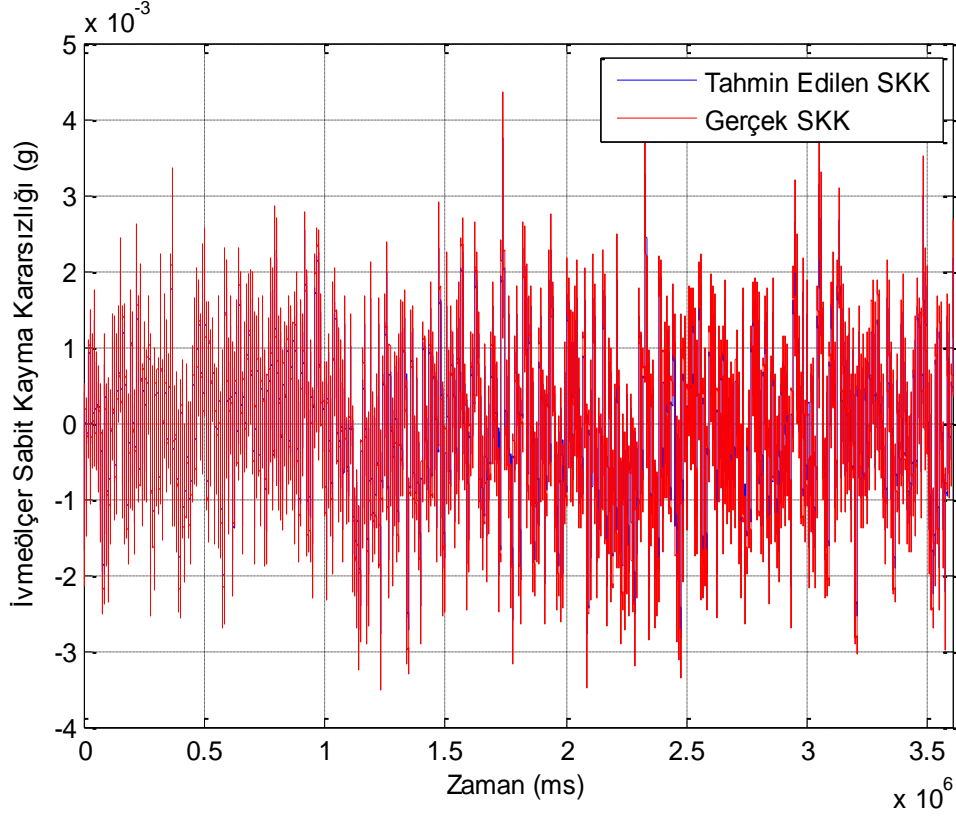
Şekil 5.17 y eksenini ivmeölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.18 y eksenini ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi

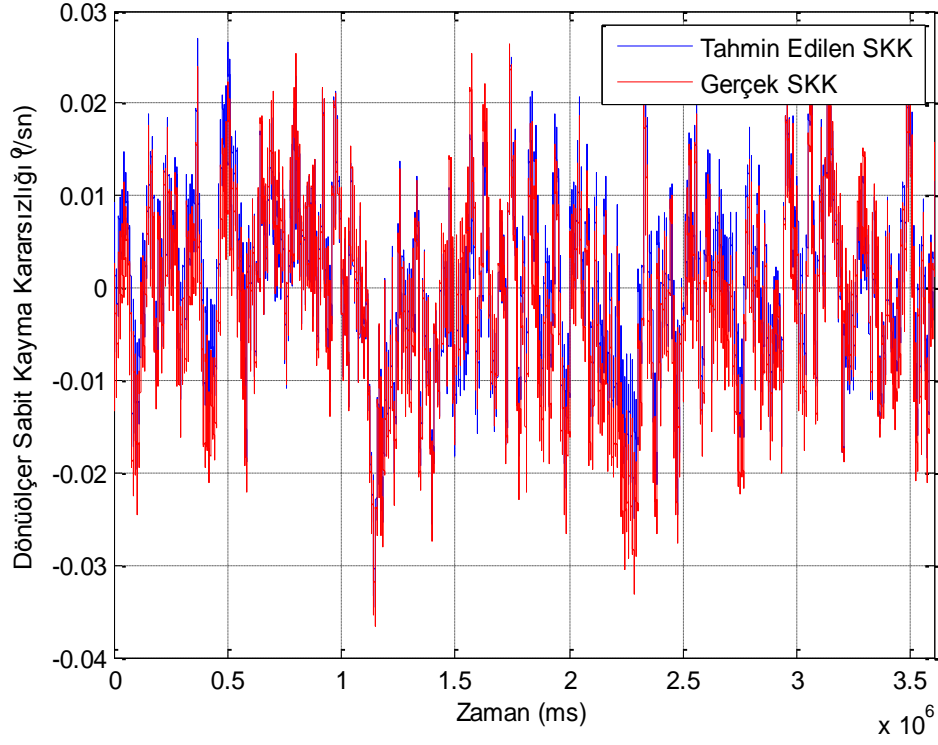


Şekil 5.19 z ekseni ivmeölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi

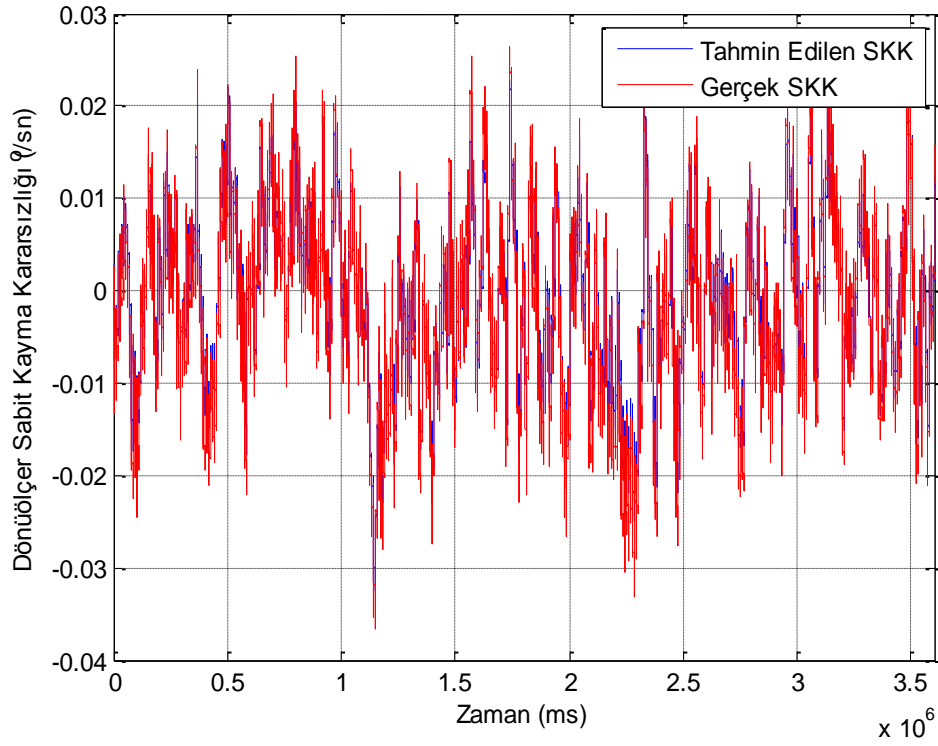


Şekil 5.20 z ekseni ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi

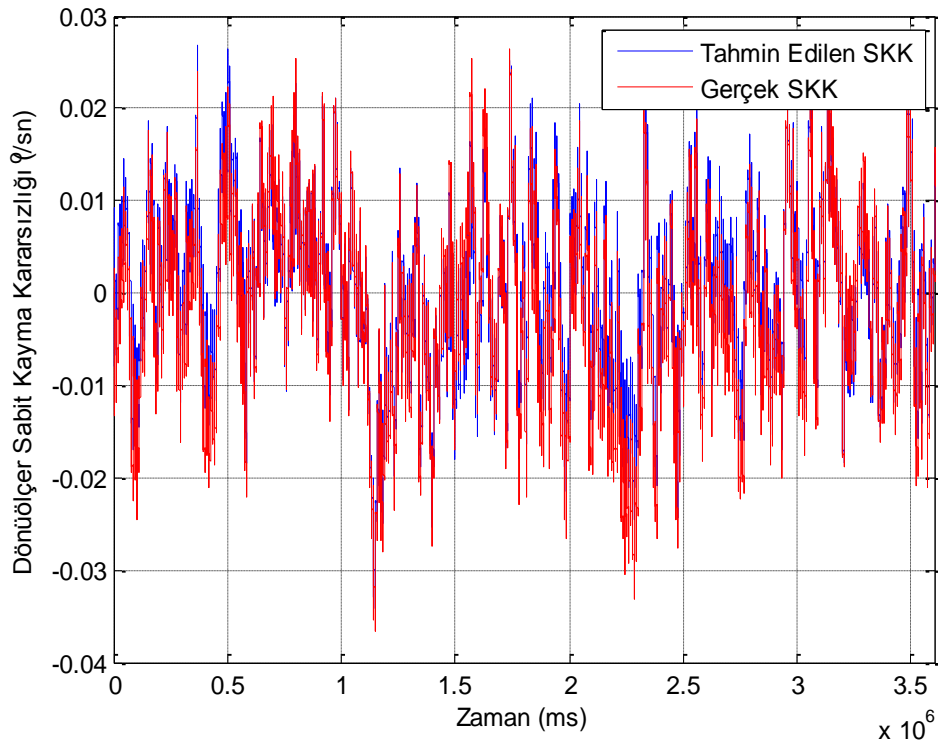
Bölüm 4.2’de anlatılan yöntem ile AÖB olasılıksal hataları belirlenmiştir. Dönüölçer sabit kayma kararsızlığı Şekil 5.21, Şekil 5.23 ve Şekil 5.25’te doğrudan Kalman süzgeci ile belirlenmiştir. Şekil 5.22, Şekil 5.24 ve Şekil 5.26’da ise dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanılması ile dönüölçer sabit kayma kararsızlığı belirlenmiştir.



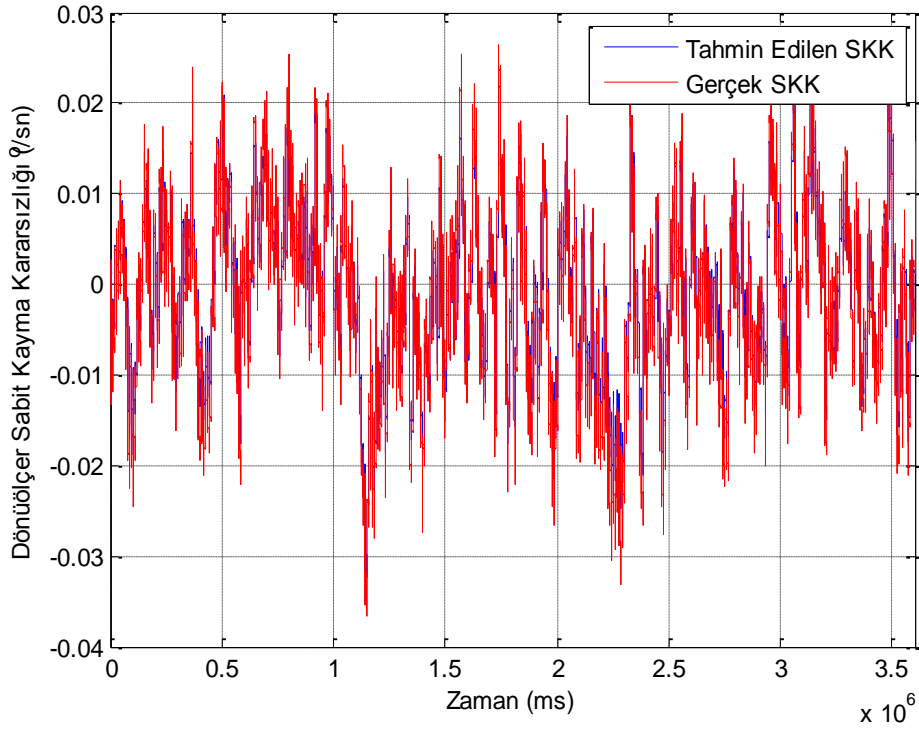
Şekil 5.21 x eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi



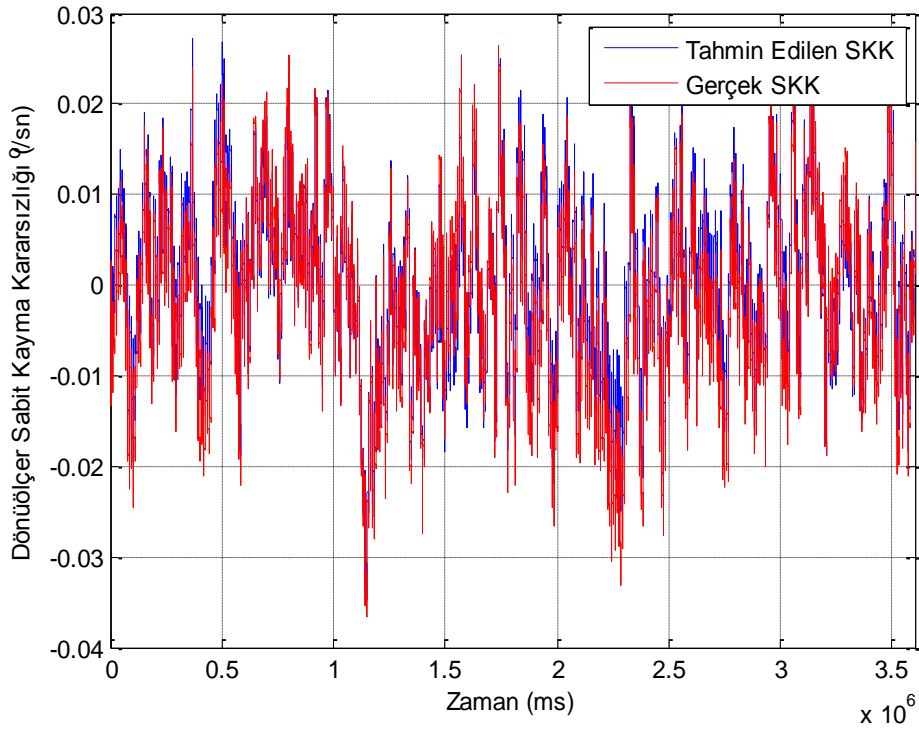
Şekil 5.22 x eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



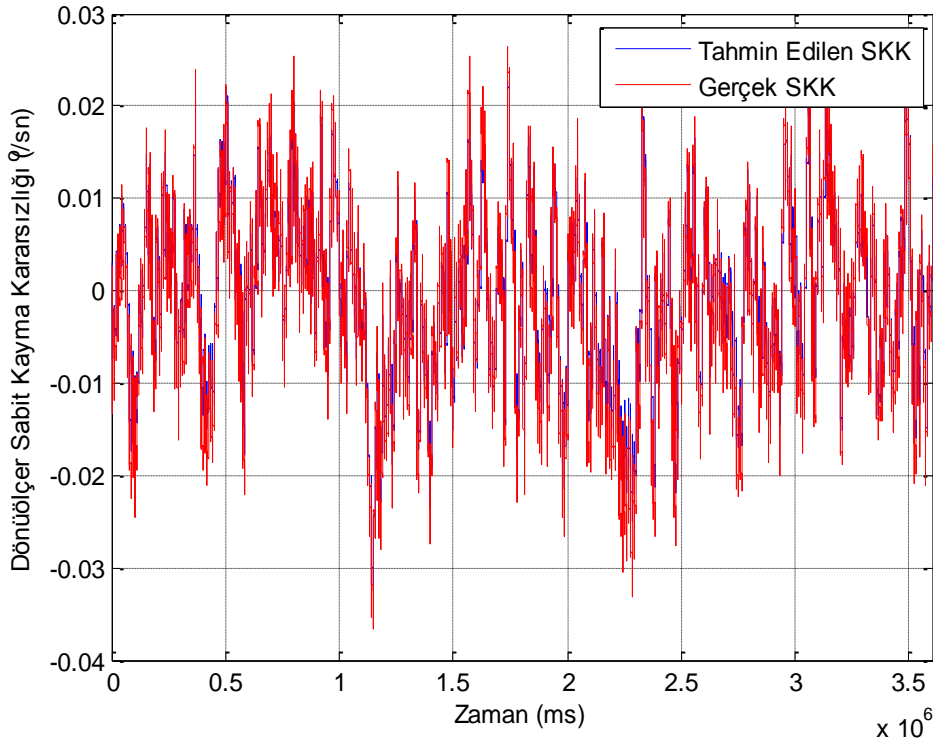
Şekil 5.23 y eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.24 y eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.25 z eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.26 z eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi

Dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanıldığı karma model ile doğrudan Kalman süzgeci modeli karşılaştırılmış ve karma modelin olasılıksal hataları belirlemekte daha belirgin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

#### 5.4. Gerçek Ataletsel Ölçüm Birimi Hatalarının Telafi Edilmesi

Ataletsel ölçüm biriminin deterministik hatalarını belirlemek amacıyla iki eksenli dönü tablasıyla çok pozisyonlu statik ve çok dönülü dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Least squares fitting metodu ile veriler işlenmiş ve hata parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen hata parametreleri AÖB hata telafi modelinin girişine referans girdi olarak uygulanmış ve hatalı verilerin kalibrasyonu sağlanmıştır.

Testler sonrası belirlenen AÖB hata parametreleri Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6'da verilmiştir.



Çizelge 5.5 AÖB Hata Telafi Modeli İvmeölçer Hata Parametreleri Girdileri

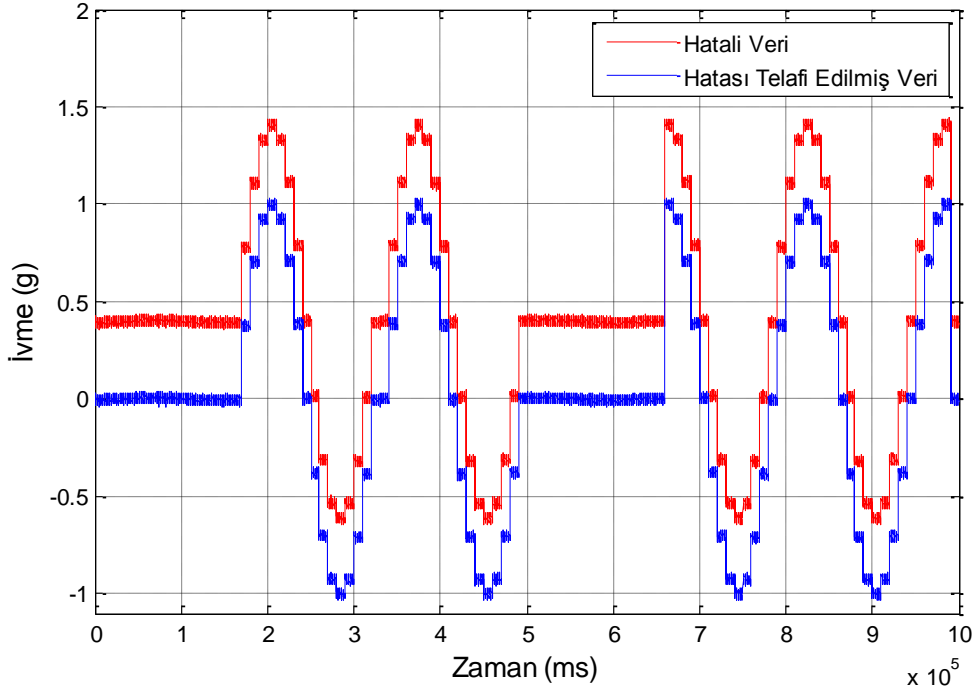
İvmeölçer Deterministik Hata Parametreleri		
$S_x$	X Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	9624 ppm
$S_y$	Y Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	9693 ppm
$S_z$	Z Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	7872 ppm
$B_x$	X Eksenli Sabit Kayma Hatası	0.3981 g
$B_y$	Y Eksenli Sabit Kayma Hatası	-0.2721 g
$B_z$	Z Eksenli Sabit Kayma Hatası	0.3722 g
$M_{xy}$	X Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	3.3159 mrad
$M_{xz}$	X Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-4.8127 mrad
$M_{yx}$	Y Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-1.0245 mrad
$M_{yz}$	Y Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	1.2740 mrad
$M_{zx}$	Z Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-6.5332 mrad
$M_{zy}$	Z Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	4.7081 mrad

Çizelge 5.6 AÖB Hata Telafi Modeli Dönüölçer Hata Parametreleri Girdileri

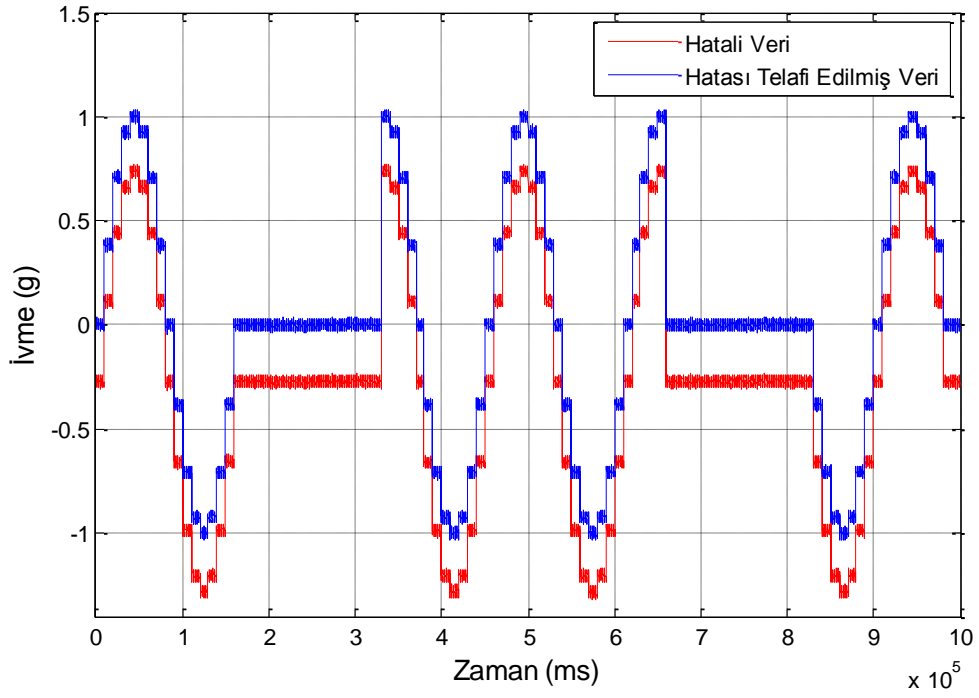
Dönüölçer Deterministik Hata Parametreleri		
$S_x$	X Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	20960 ppm
$S_y$	Y Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	7644 ppm
$S_z$	Z Eksenli Orantı Katsayısı Hatası	11215 ppm
$B_x$	X Eksenli Sabit Kayma Hatası	-1.5944 %/s
$B_y$	Y Eksenli Sabit Kayma Hatası	1.9133 %/s
$B_z$	Z Eksenli Sabit Kayma Hatası	-2.7419 %/s
$B_{Gx}$	X Eksenli İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası	0.0201 %/s/g
$B_{Gy}$	Y Eksenli İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası	-0.0211 %/s/g
$B_{Gz}$	Z Eksenli İvmeye Bağlı Sabit Kayma Hatası	0.0284 %/s/g
$M_{xy}$	X Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	1.5155 mrad
$M_{xz}$	X Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-4.0800 mrad
$M_{yx}$	Y Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-3.6967 mrad

$M_{yz}$	Y Ekseninden Z Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	0.8310 mrad
$M_{zx}$	Z Ekseninden X Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-4.4969 mrad
$M_{zy}$	Z Ekseninden Y Eksenine Eksenel Kaçıklık Hatası	-0.9269 mrad

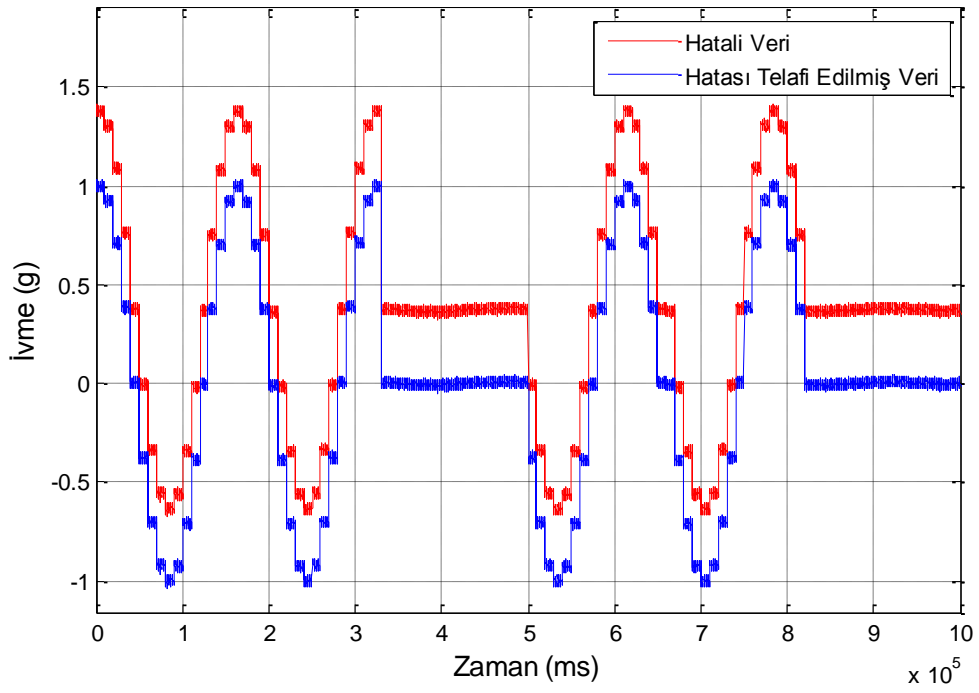
x, y ve z eksenlerinde deterministik hataların telafi edilmesi sonucunda elde edilen kalibre ivmeölçer verileri Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.27 x eksenini AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

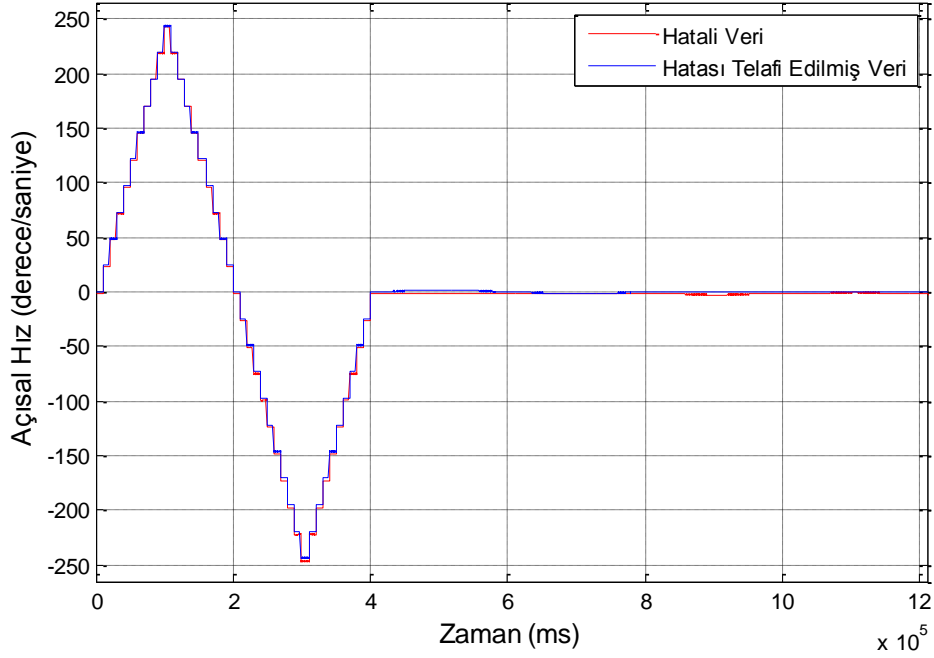


Şekil 5.28 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

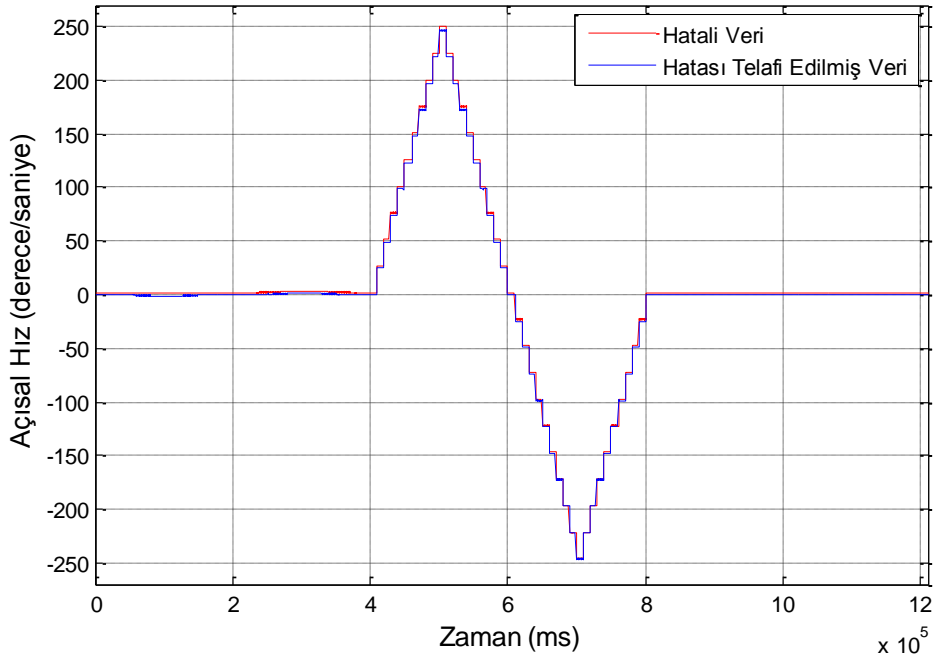


Şekil 5.29 z eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

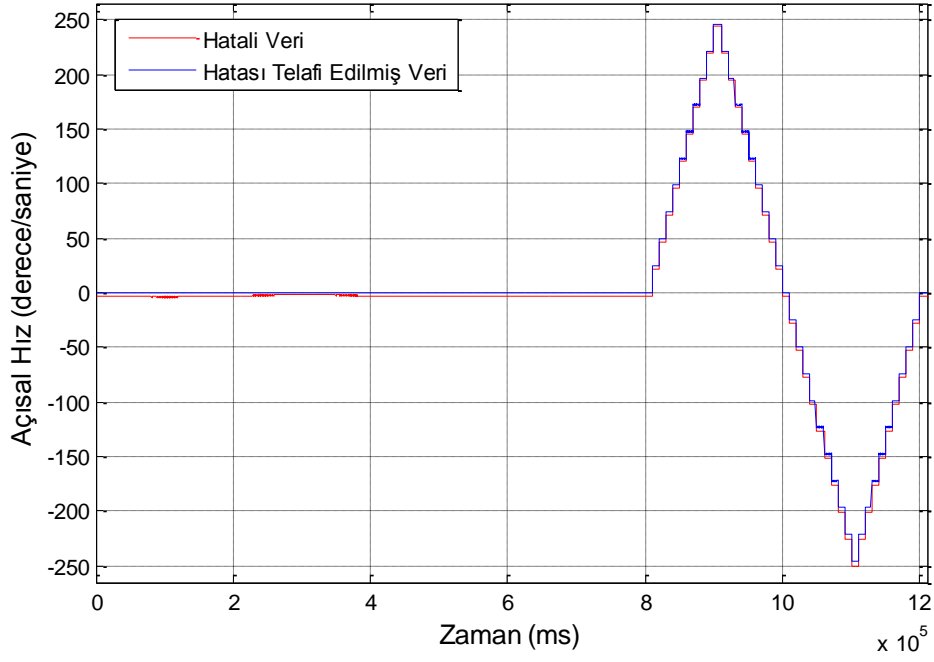
x, y ve z eksenlerinde deterministik hataların telafi edilmesi sonucunda elde edilen kalibre dönölçer verileri Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.30 x eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

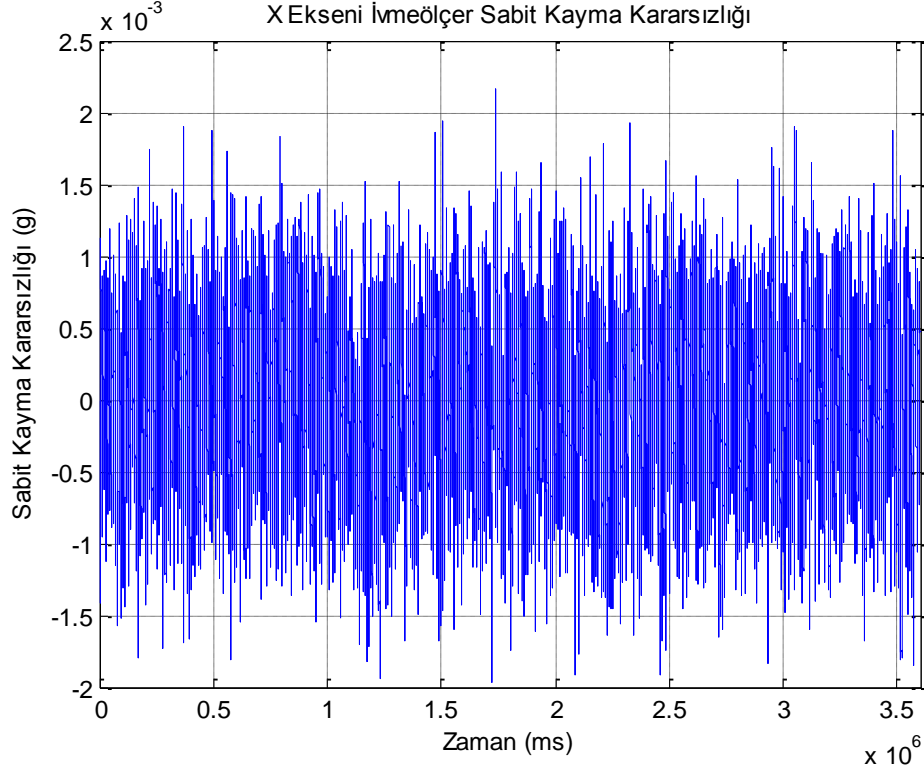


Şekil 5.31 y eksenli AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

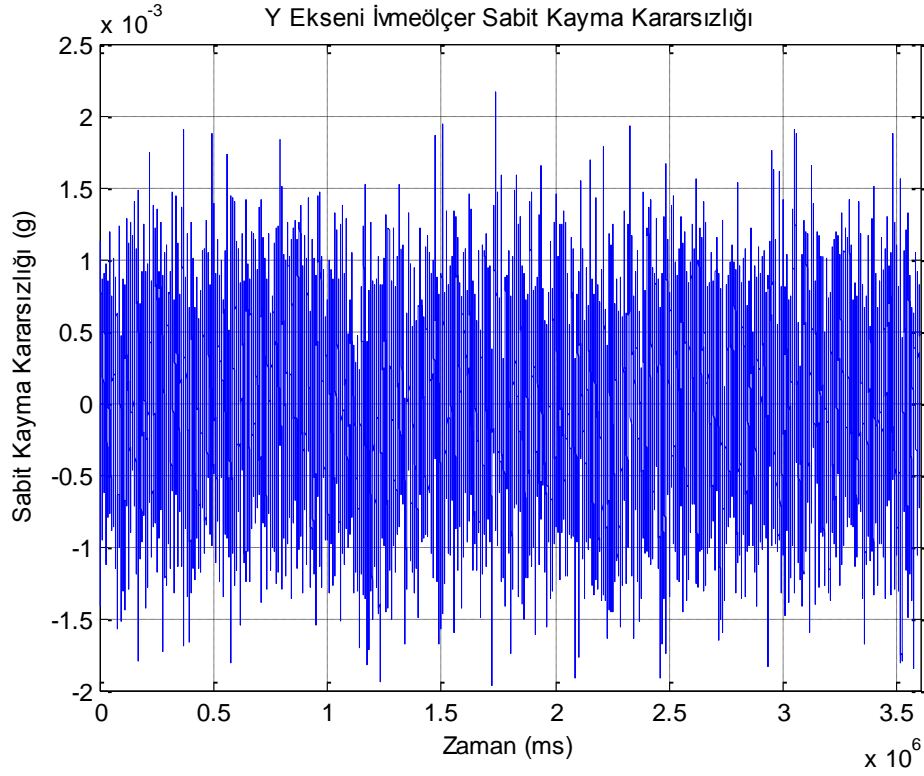


Şekil 5.32 z eksenini AÖB hata telafi modeli girdisi (hatalı veri) ve çıktısı (hatası telafi edilmiş veri)

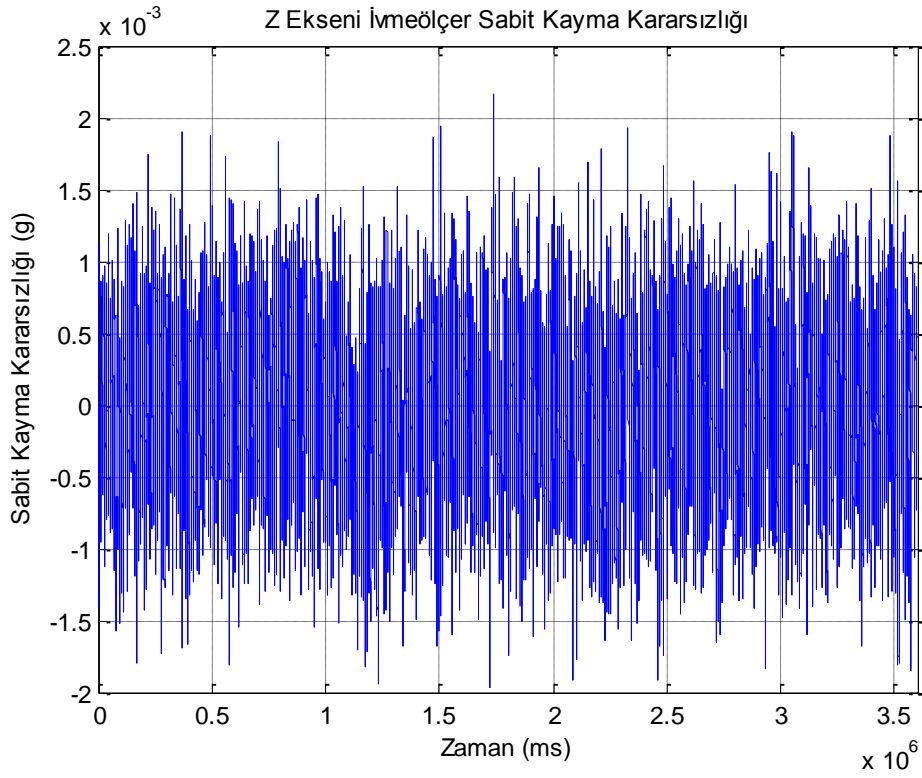
Deterministik hataları telafi edilmiş ataletsel ölçüm biriminden 1 kHz sıklığında 1 saat boyunca sabit pozisyonda toplanan veriler kullanılarak ivmeölçer ve dönüölçer sabit kayma kararsızlığı belirlenmiştir. Dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanılması ile elde edilen ivmeölçer sonuçları Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35'te ve dönüölçer sonuçları Şekil 5.36, Şekil 5.37, Şekil 5.38'de verilmiştir.



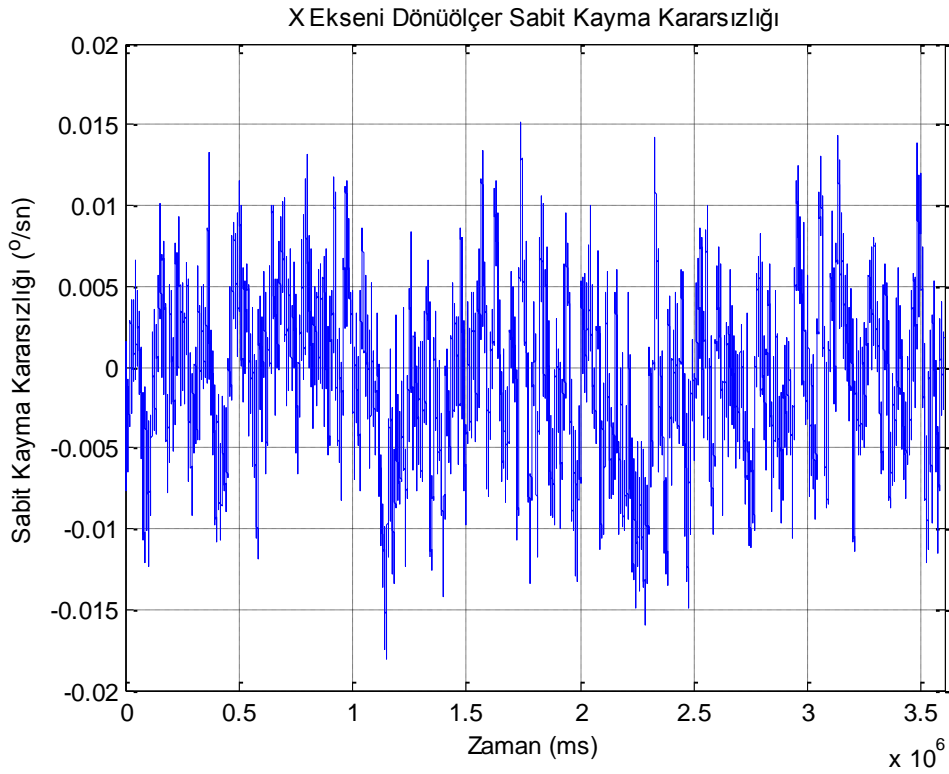
Şekil 5.33 x eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



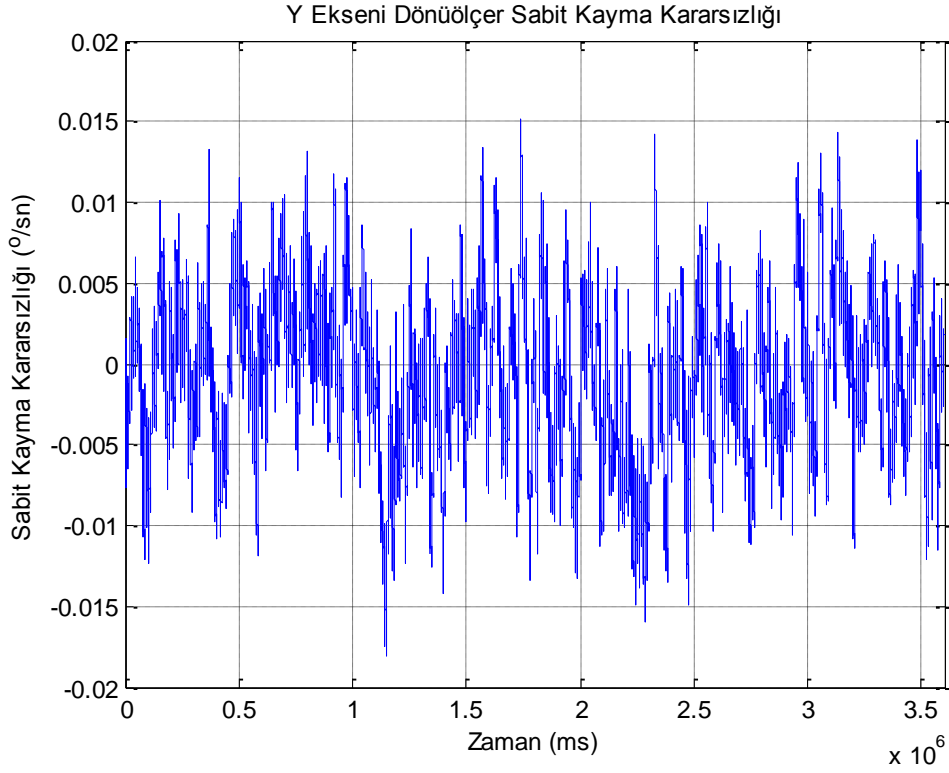
Şekil 5.34 y eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



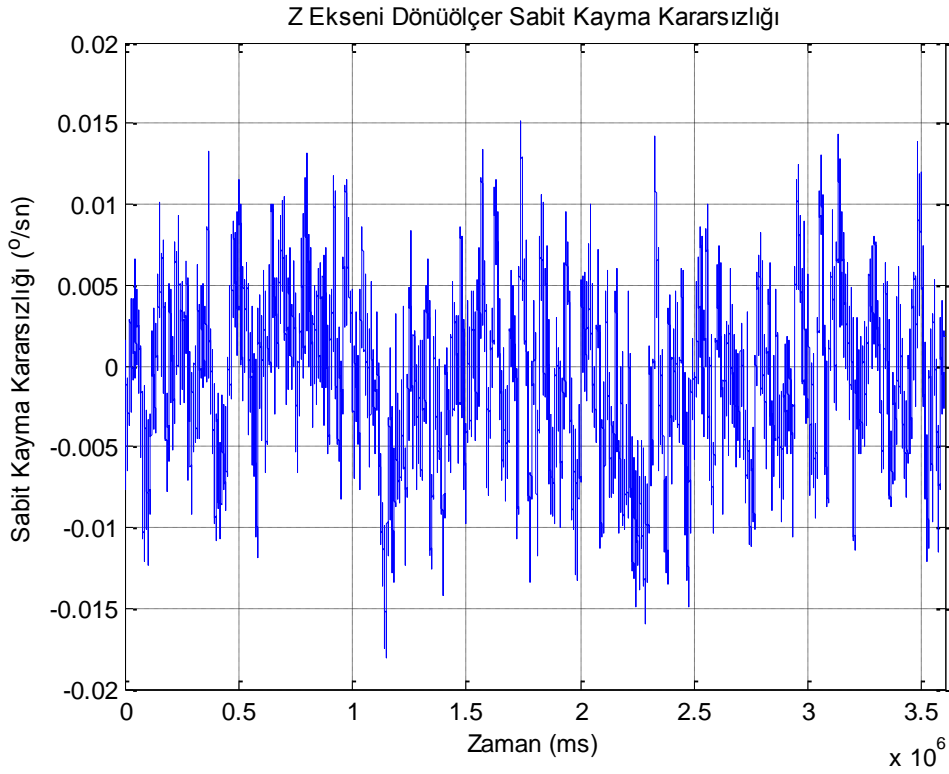
Şekil 5.35 z eksenli ivmeölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.36 x eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.37 y eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



Şekil 5.38 z eksenli dönüölçer sabit kayma hatasının dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgeci ile belirlenmesi



## 6. SICAKLIĞA BAĞLI ATALETSEL SENSÖR HATALARININ TELAFİSİ

Navigasyon sistemlerinin performansı MEMS tabanlı ataletsel ölçüm birimlerinin sabit kayma hatası orantı katsayısı hatası gibi deterministik hatalarının kaldırılmasına bağlıdır. Farklı sıcaklık noktalarında bu hataların değiştiğinin göz önüne alınması ataletsel ölçüm birimi ve dolayısıyla navigasyon sistemi performansının iyileşmesi için önemli bir adımdır. Tez çalışması kapsamında MEMS ataletsel sensörlerin sıcaklığa bağlı hatalarını azaltmaya yönelik sıcaklık kalibrasyonu yapılmaktadır.

### 6.1. Sıcaklığa Bağlı Hataların Telafi Algoritması

MEMS tabanlı ataletsel sensör hataları sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle, hataların sıcaklığa bağlı davranışını tespit etmek amacıyla farklı sıcaklıklarda testler gerçekleştirilir. Sıcaklık testleri sıcaklık kabinine sahip iki veya üç eksenli dönü tablaları ile gerçekleştirilmektedir.

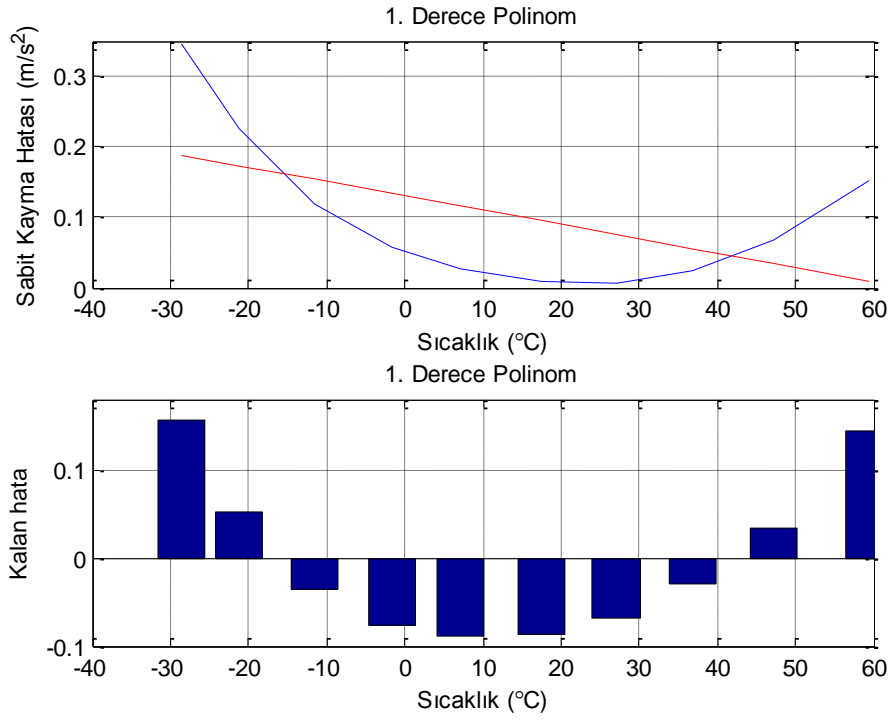
Bu çalışma kapsamında, çok pozisyonlu statik test ve çok dönü dinamik test - 30°C ile 50°C arasında değişen on farklı sıcaklık noktasında tekrarlanır. Ataletsel sensör ve sıcaklık veri setleri bu test adımların da toplanır. Mümkün olduğu kadar fazla sıcaklık noktasında veri toplamak sıcaklık değişimine bağlı hataların daha güvenilir tespit edilmesini sağlar. Çünkü ataletsel sensörlerin sıcaklığa bağlı davranışı doğrusal değildir.

Sıcaklığa bağlı sabit kayma hatası ve orantı katsayısı hatası ataletsel ölçüm biriminin işlemcisinde oluşturulan hata telafi algoritmasına eklenen sıcaklık değişim polinomları ile telafi edilebilir. Çeşitli polinom dereceleri hata telafi algoritmasında kullanılabilir. Hata telafi algoritmasının girdisi olan sıcaklık kalibrasyon katsayılarını hesaplanırken farklı derecede polinomlar ile eğrilerin oturtulması çalışması yapılmıştır. Polinomların farklı derecede sonuçları karşılaştırılarak en iyi derece belirlenmiştir.

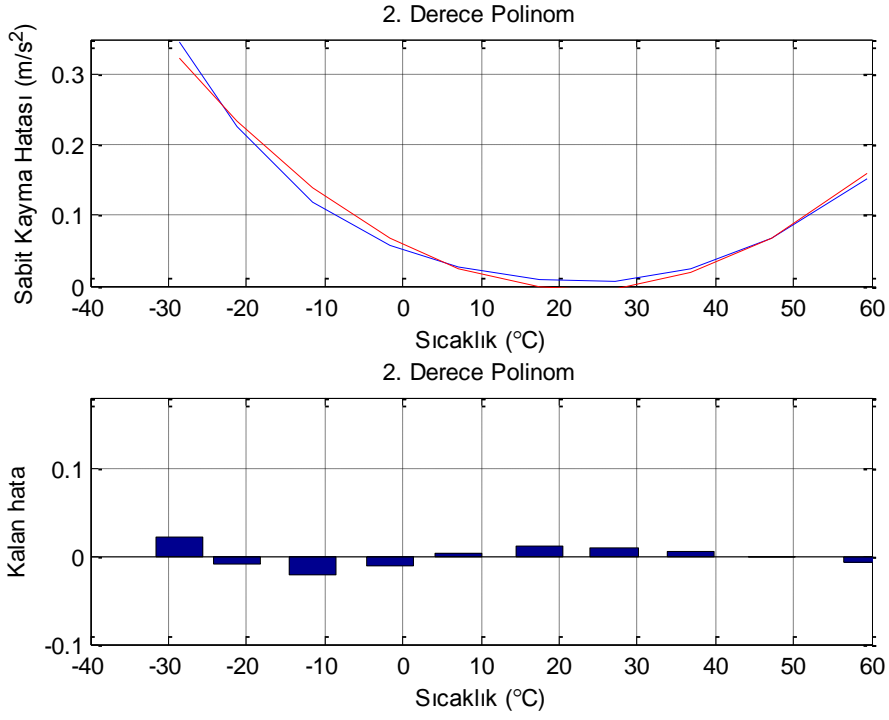
## 6.2. Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar

Sabit kayma ve orantı katsayısı hataları farklı sıcaklıklar altında gerçekleştirilmiş kalibrasyon testleri ile hesaplanmıştır.

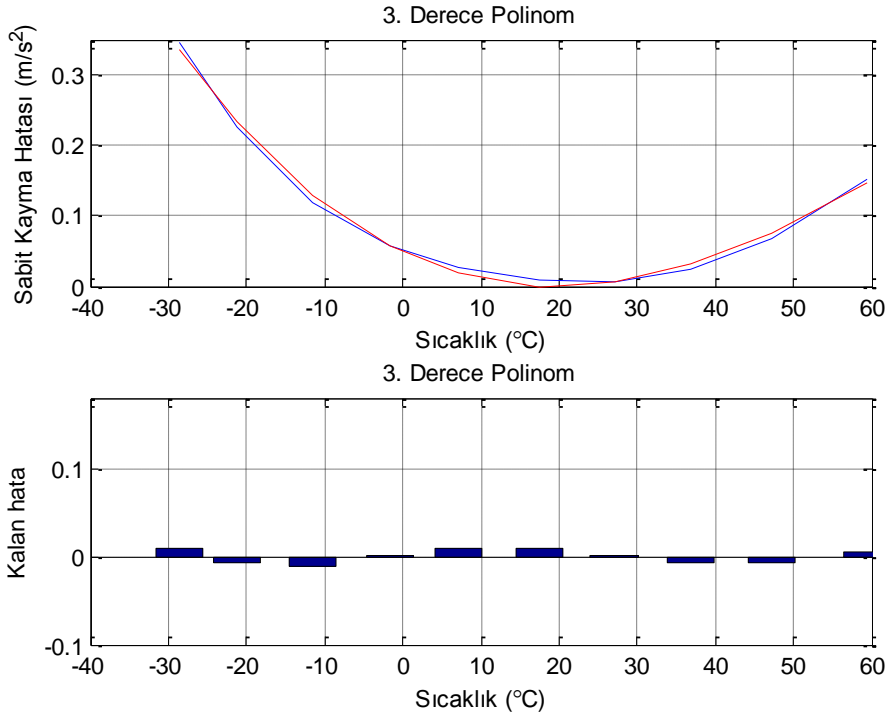
Polinom derecelerine göre ivmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hata değerleri Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilmektedir. Mavi renk ile gösterilen grafik farklı sıcaklık koşullarında elde edilen sabit kayma hatası değerlerini ifade ederken, kırmızı ile gösterilen grafik polinom derecesine göre hesaplanan sıcaklık katsayıları ile elde edilen eğriyi ifade etmektedir. Kalan hata, ivmeölçer sabit kayma hatasının gerçek değeri ile polinom derecesine göre hesaplanan sıcaklık katsayıları eğrisinin değerleri arasındaki farktır.



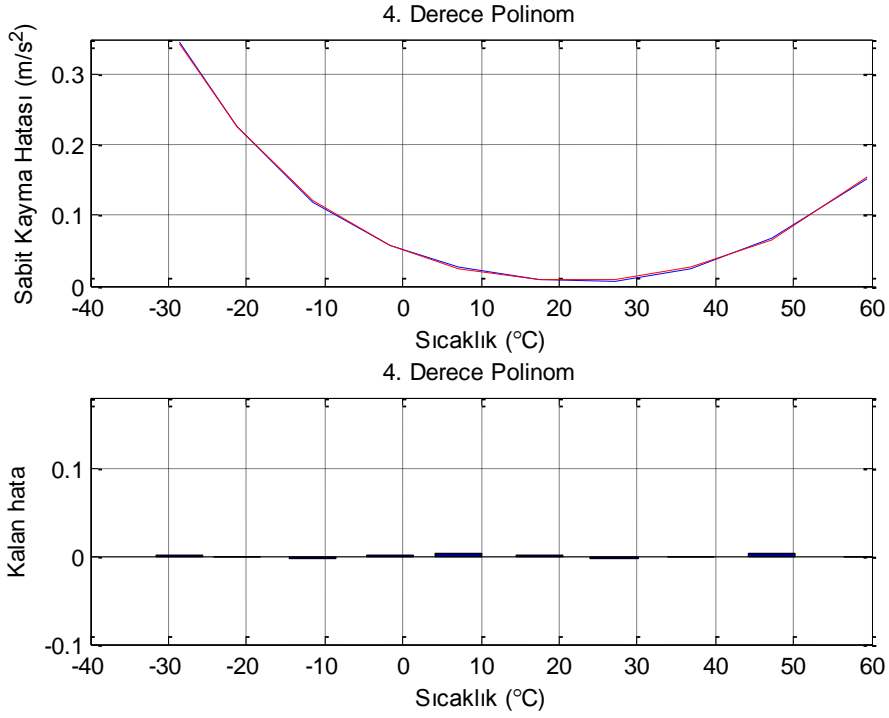
Şekil 6.1 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın birinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



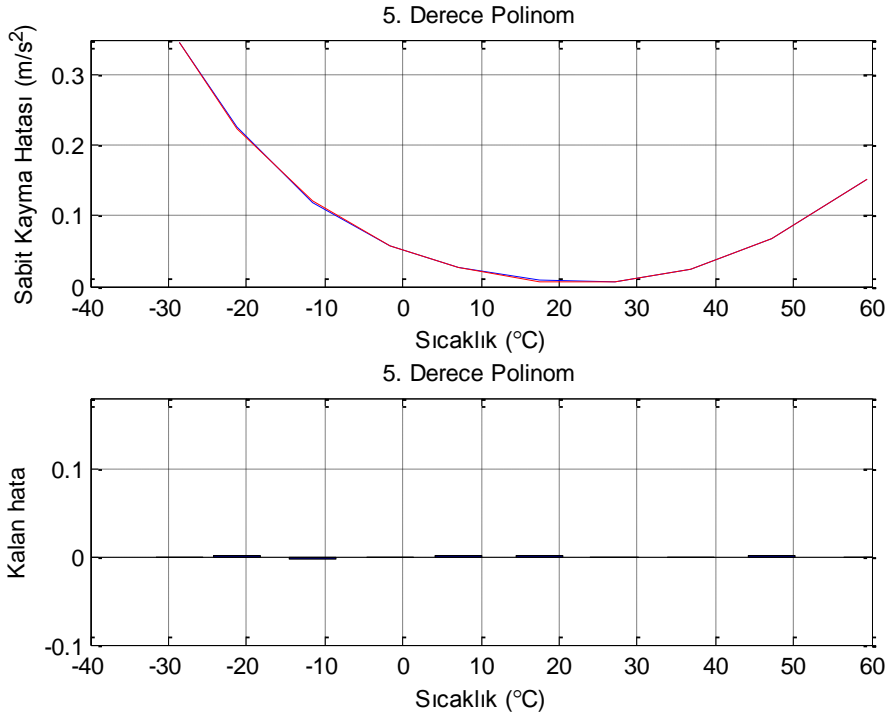
Şekil 6.2 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın ikinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



Şekil 6.3 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın üçüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



Şekil 6.4 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın dördüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



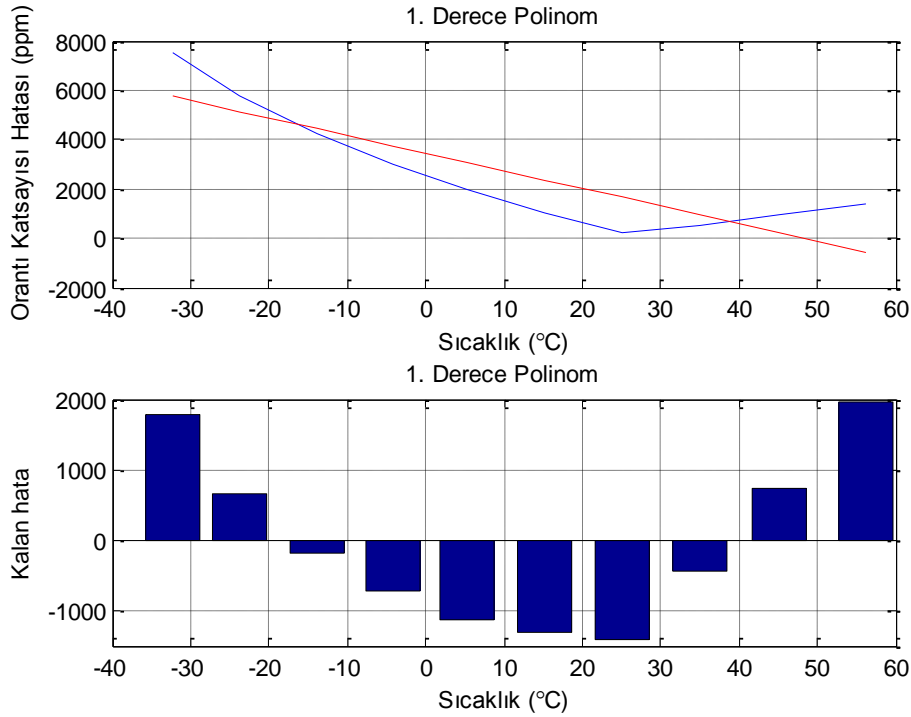
Şekil 6.5 İvmeölçer sabit kayma hatası ve kalan hatanın beşinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi

Çizelge 6.1 ile polinom derecelerine göre kalan hatanın ortalama karesel hatası, mutlak maksimum hatası ve mutlak minimum hatası verilmektedir.

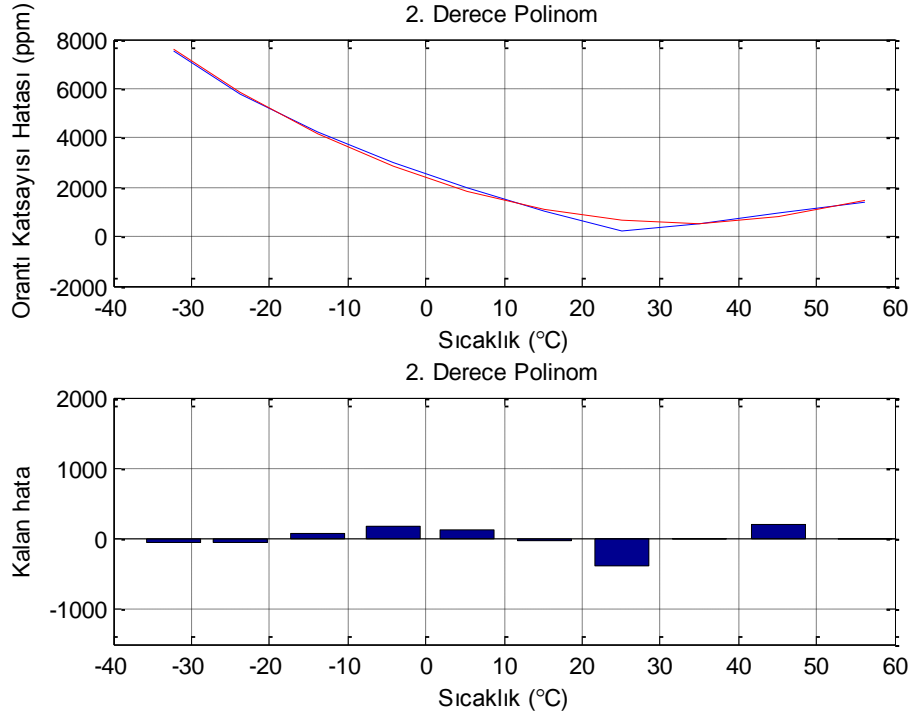
Çizelge 6.1 Polinom Derecesine Göre Kalan Hata

Kalan Hata	Polinom Derecesine Göre Test Sonuçları				
	Birinci	İkinci	Üçüncü	Dördüncü	Beşinci
Ortalama Karesel Hata (mg)	79.9967	1.4987	0.5520	0.0363	0.0153
Mutlak Maksimum Hata (mg)	15.9158	2.2302	0.8897	0.3170	0.2187
Mutlak Minimum Hata (mg)	9.0430	2.2062	1.1127	0.3080	0.1973

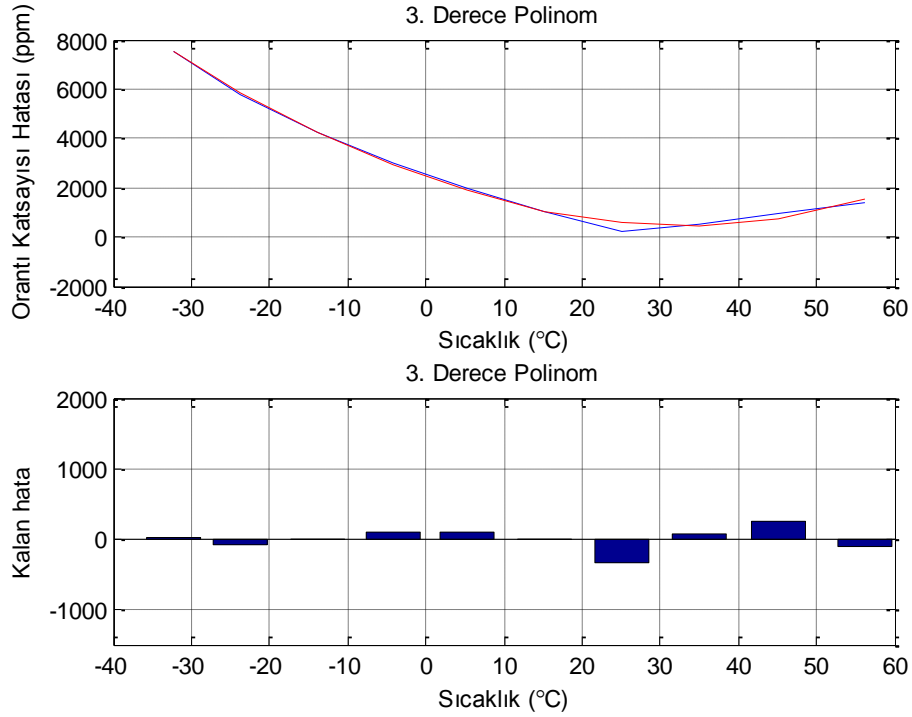
Polinom derecelerine göre ivmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hata değerleri Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da verilmektedir. Mavi renk ile gösterilen grafik farklı sıcaklık koşullarında elde edilen orantı katsayısı hatası değerlerini ifade ederken, kırmızı ile gösterilen grafik polinom derecesine göre hesaplanan sıcaklık katsayıları ile elde edilen eğriyi ifade etmektedir. Kalan hata, ivmeölçer orantı katsayısı hatasının gerçek değeri ile polinom derecesine göre hesaplanan sıcaklık katsayıları eğrisinin değerleri arasındaki farktır.



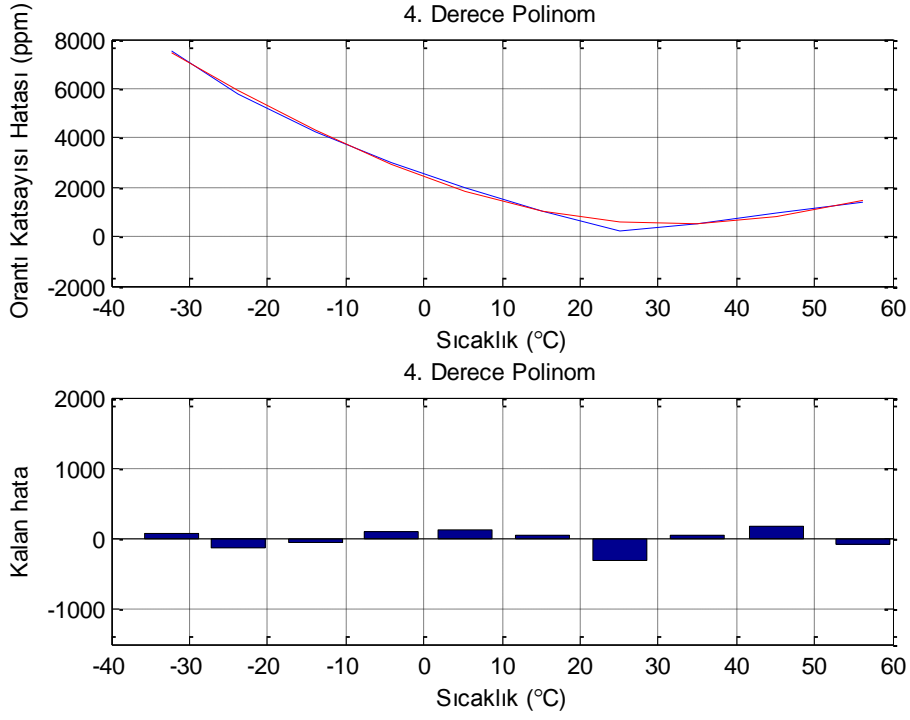
Şekil 6.6 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın birinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



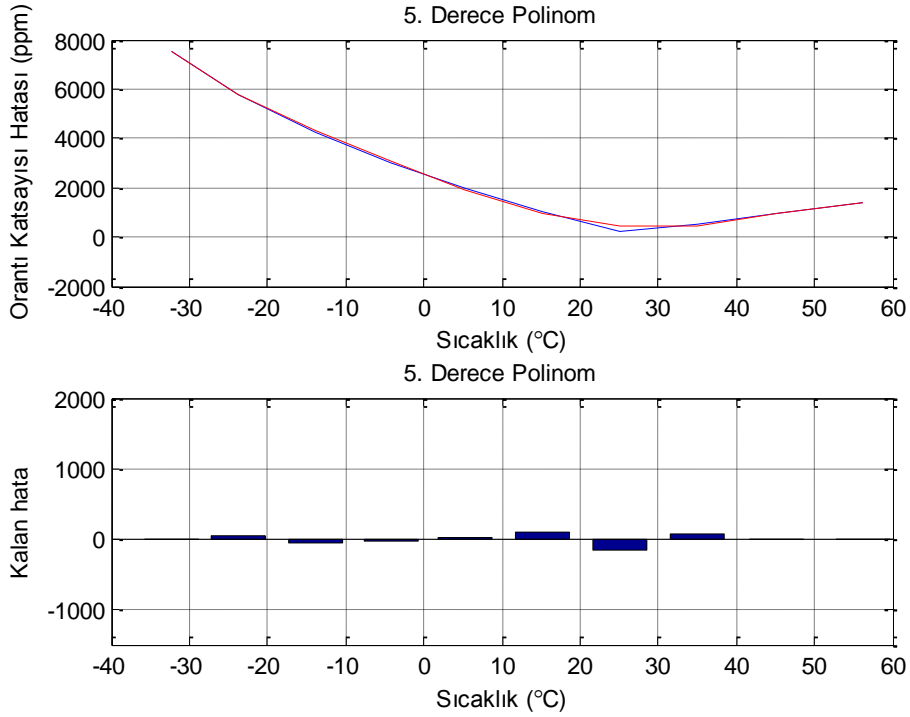
Şekil 6.7 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın ikinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



Şekil 6.8 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın üçüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



Şekil 6.9 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın dördüncü derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi



Şekil 6.10 İvmeölçer orantı katsayısı hatası ve kalan hatanın beşinci derece sıcaklık polinomu ile elde edilmesi

Çizelge 6.2 ile polinom derecelerine göre kalan hatanın ortalama karesel hatası, mutlak maksimum hatası ve mutlak minimum hatası verilmektedir.

Çizelge 6.2 Polinom Derecesine Göre Kalan Hata

Kalan Hata	Polinom Derecesine Göre Test Sonuçları				
	Birinci	İkinci	Üçüncü	Dördüncü	Beşinci
Ortalama Karesel Hata (ppm)	1379687	25866	20850	19263	4946
Mutlak Maksimum Hata (ppm)	1969	194	239	182	104
Mutlak Minimum Hata (ppm)	1410	394	324	310	158

İvmeölçer ve dönüölçer değişen sıcaklık karşısında benzer davranış göstermektedir. Bu nedenle sadece ivmeölçer sabit kayma hatasının ve orantı katsayısı hatasının sıcaklık ile değişim grafikleri verilmiştir.

Bu bölümde, hata telafi algoritmalarına eklenen değişik derecelerde polinomlar ile ataletsel ölçüm birimini oluşturan sensörlerin performansının sıcaklığa bağlılığı azaltılmıştır. Birinci derece polinom sonucu yeterli değildir. Birinci derece polinom eklenmesi sonucu gerçek sabit kayma/orantı katsayısı hataları ile polinom derecesine göre oturtulmuş sabit kayma/orantı katsayısı hataları arasında fark büyüktür. İkinci, üçüncü ve dördüncü derece polinom sonucu gerçek sabit kayma/orantı katsayısı hataları ile polinom derecesine göre oturtulmuş sabit kayma/orantı katsayısı hataları yakındır. Beşinci derece polinom eklenmesi sonucu en iyi sonuca ulaşılmıştır.

Sistemde kalan hataların etkisi ile işlem yükü arasında bir ödünleşim vardır. Yüksek derecede polinom fazla işlem yükünü neden olur. Ancak polinom derecesi arttıkça kalan hata azalmasıyla beraber sistem performansı iyileşmektedir. Uçuş süresi, maksimum ivme, maksimum açısal hız ve işlemci kapasitesi değerlendirilerek polinom derecesi belirlenebilir.



## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, ataletsel navigasyon sistemleri, ataletsel ölçüm birimi, ataletsel sensör çeşitleri ve ataletsel sensörlerin hata çeşitlerine dair bilgiler paylaşılmıştır.

Deterministik hataları belirlemek amacıyla iki eksenli veya üç eksenli dönü tablaları gibi özel test ekipmanlarıyla çok pozisyonlu statik ve çok dönülü dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5.1'de çok pozisyonlu statik ve çok dönülü dinamik test basamakları benzetim ortamında hata modelinin girişine referans girdi olarak uygulanmış ve testler benzetim yöntemleri ile elde edilmiştir. Bölüm 5.4'te ise gerçek ataletsel ölçüm birimi ve özel test ekipmanları kullanılarak aynı testler tekrarlanmıştır.

Deterministik hatalar, AÖB hatalarının büyük bölümünü oluşturduğundan AÖB hata telafi algoritması tasarımı kritik önem taşımaktadır. İlk olarak, deterministik hata parametrelerinin bulunması amacıyla statik ve dinamik test verileri, least squares fitting metodu ile işlenmiştir. Verilerin işlenmesi sonucunda; ivmeölçer sabit kayma hatası, ivmeölçer orantı katsayısı hatası, ivmeölçer eksenel kaçıklık hatası, dönüölçer sabit kayma hatası, dönüölçer ivmeye bağlı sabit kayma hatası, dönüölçer orantı katsayısı hatası ve dönüölçer eksenel kaçıklık hatası hesaplanmıştır. AÖB'ye eklenen hata değerleri ile belirlenen hata değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. İvmeölçer hata parametreleri ortalama %99.2 oranında, dönüölçer hata parametreleri ortalama %99.3 oranında başarı ile tahmin edilebilmiştir. Ayrıca hesaplanan bu hata parametreleri AÖB hata telafi modelinin girdisi olarak kullanılarak deterministik hatalar düzeltilmiştir. Hataların büyük çoğunluğu düzeltilmiş olmasına rağmen %100 başarının sağlanamamasının olasılıksal hatalar kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

Olasılıksal hatalardan sabit kayma kararsızlığı hatasını modellemek için özbağlanımlı model tabanlı Gauss-Markov model geliştirilmiştir. Sensör hatalarını modellemekte oldukça başarılı olan GM modelin yetersiz kaldığı özilinti fonksiyonu

belirlenmesi aşamasında özbağlanımlı modelden faydalanılmıştır. Özbağlanımlı modelin sağlayamadığı örnekleme aralığı bilgisi ise GM model ile elde edilmiştir. Olasılık hataların belirlenmesi amacıyla dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanıldığı yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümü ile orijinal sinyal çok seviyeli bileşenlerine ayrıştırılarak yaklaşım ve ayrıntı sinyalleri elde edilmiştir. Ayrıntı katsayıları, yüksek frekans bileşenli gürültüleri içerdiğinden sinyalin bu kısmı gürültüden arındırılmıştır. Ters ayrık dalgacık dönüşümü ile sinyalin yaklaşım ve ayrıntı katsayılarından, gürültüden arındırılmış orijinal sinyal yeniden oluşturulmuş ve Kalman süzgeci uygulanmıştır. Test sonuçları ortalama karesel hata ve ortalama mutlak yüzde hata terimlerine göre karşılaştırıldığında dalgacık dönüşümü ve Kalman süzgecinin beraber kullanıldığı karma modelin doğrudan Kalman süzgeci modelinden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Böylece olasılıksal hataların tahmin doğruluğu artmıştır.

Deterministik hataların farklı sıcaklık noktalarında değiştiğinin gözlemlenmesi üzerine sıcaklığa bağlı hataları azaltmaya yönelik sıcaklık kalibrasyonu yapılmıştır. Geliştirilen çok pozisyonlu statik test ve çok dönümlü dinamik test  $-30^{\circ}\text{C}$  ile  $50^{\circ}\text{C}$  arasında değişen on farklı sıcaklık noktasında tekrarlanarak her sıcaklıkta deterministik hata parametreleri (özellikle sabit kayma hatası ve orantı katsayısı hatası) belirlenmiştir. Hata telafi algoritmasının girdisi olan sıcaklık kalibrasyon katsayılarını hesaplanırken farklı derecede polinomlar ile eğrilerin oturtulması çalışması yapılmıştır. Hata telafi algoritmalarına eklenen değişik derecelerde polinomlar ile ataletsel ölçüm birimini oluşturan sensörlerin performansının sıcaklığa bağlılığı azaltılmıştır. Yüksek derece polinomların kullanılması daha iyi performans sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Titterton, D. H., and Weston, J. L., *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed., The Institution of Electrical Engineers, **2004**
- [2] Kenneth R. Britting, *Inertial Navigation Systems Analysis*,**1971**
- [3] Noureldin A., Karamat T. B., Georgy J.,*Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*, **2013**
- [4] Groves, P. D., *Principles of GNSS Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, **2008**
- [5] B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat, M. Wieser, *Navigation Principles of Positioning and Guidance*, **2003**
- [6] Unsal, D., *Estimation Of Deterministic And Stochastic Imu Error Parameters*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, **2012**
- [7] Lawrence, A., *Modern Inertial Technology - Navigation, Guidance, and Control*, Springer-Verlag, Second Edition, **1998**
- [8] Bekir E., *Introduction to Modern Navigation Systems*, **2007**
- [9] Barbour N. M., *Inertial Navigation Sensors*, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, NATO RTO Lecture Series-232, London, U.K., **2003**
- [10] George T. Schmidt, *INS/GPS Technology Trends*, NATO RTO-SET-116 Panel, **2010**
- [11] Ruben, E., *Gyroscopes, Mechatronics Literature Survey*, Utah State University, **2009**
- [12] Tsang, C. C., *Error Reduction Techniques for a MEMS Accelerometer-based Digital Input Device*, The Chinese University of Hong Kong, **2008**
- [13] Barbour, N., *Micromachined Inertial Sensors for Vehicles*, IEEE Conference on Intelligent Transportation System,**1997**
- [14] Aydeniz D., *MEMS İvme Sensörlü Ataletsel Seyrüsefer Sistemi İçin Arayüz Tasarımı*, **2011**
- [15] Yazıcıoğlu R. F., *Surface Micromachined Capacitive Accelerometers Using MEMS Technology*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, **2003**
- [16] Seshia A. A., Palaniapan M., Roessing T. A., Howe R. T., Gooch R. W., Schimert T. R., Montague S., *A Vacuum Packaged Surface Micromachined Resonant Accelerometer*, **2002**

- [17] Ünver, A., *Determination Of Stochastic Model Parameters of Inertial Sensors*, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, **2013**
- [18] Bose, S.C., *GPS-INS Integrated Navigation Systems: Lecture Notes*, Technalytics Inc., **2006**
- [19] Kayasal, U., *Modeling and Simulation of a Navigation System with an IMU and a Magnetometer*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, **2007**
- [20] Flenniken, W., Wall J., Bevely D.M., *Characterization of Various IMU Error Sources and Effect on Navigation Performance*, Proceedings of ION GNSS, **2005**
- [21] El-Diasty, M. and Pagiatakis, S., *Calibration and Stochastic Modelling of Inertial Navigation Sensor Errors*, **2008**
- [22] Richard Lee Needham, Jr., *Calibration of Strapdown System Accelerometer Dynamic Errors*, , M.S. Thesis in Aeronautics and Astronautics, **1994**
- [23] Ocak, I. E., *A Tactical Grade MEMS Accelerometer*, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, **2010**
- [24] El-Diasty, M. and Pagiatakis, S., *A Rigorous Temperature-Dependent Stochastic Modelling and Testing for MEMS-Based Inertial Sensor Errors*, **2009**
- [25] Aslan, G., Saranlı, A., *Characterization and Calibration of MEMS Inertial Measurement Units*
- [26] Aggarwal, A., Syed, Z., Noureldin, A. and El-Sheimy, N., *MEMS-Based Integrated Navigation*, **2010**
- [27] Ford, J. J., Evans, M. E., *On-line Estimation of Allan Variance Parameters*, Journal of Guidance, Control and Dynamics Vol.23, No.6, **2000**
- [28] Nassar, S., *Improving the Inertial Navigation System (INS) Error Model for INS and INS/DGPS Applications*, Ph.D. Thesis, The University of Calgary ,**2003**
- [29] Gibbs, B. P., *Advanced Kalman Filtering, Least-Squares and Modeling*, **2011**
- [30] Chui, C. K., Chen, G., *Kalman Filtering with Real-Time Applications*, Fourth Edition, **2009**
- [31] Nassar, S., *Accurate INS/DGPS Positioning Using INS Data De-Noising and Autoregressive (AR) Modeling of Inertial Sensor Errors*, Geomatica, **2005**

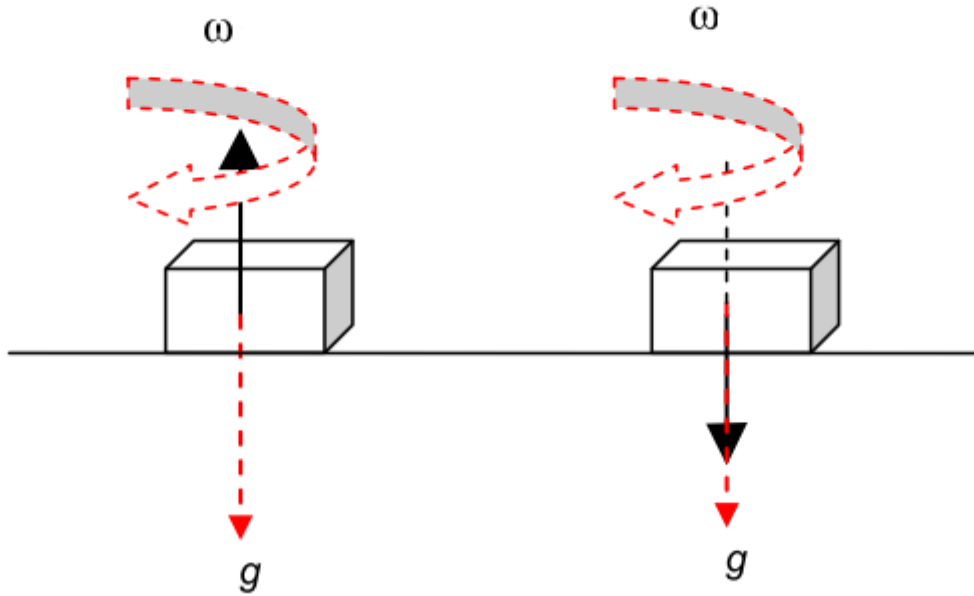
- [32] Panahandeh, G., Skog, I., Jansson, M., *Calibration of the Accelerometer Triad of an Inertial Measurement Unit, Maximum Likelihood Estimation and Cramer-Rao Bound*, IPIN, **2010**
- [33] Philip, C. M., *Practical Accelerometer Testing*, Royal Aircraft Establishment Technical Report, **1978**
- [34] Kovačević J., Goyal, V. K., Vetterli, M., *Fourier and Wavelet Signal Processing*, **2013**
- [35] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. M., *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*, **2001**
- [36] Günhan, Y., Ünsal, D., *Polynomial Degree Determination for Temperature Dependent Error Compensation of Inertial Sensors*, Proceedings of the 2014 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, **2014**
- [37] Erdem, M. C., *Benek Gürültülü Görüntülerin Onarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, **2013**

## EKLER

### EK.A - Altı Pozisyonlu Statik Test

Literatürde yer alan altı pozisyonlu statik test, ataletsel sensör hatalarının belirlenmesini ve kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Yerçekimi ve Dünya'nın dönme hızı referans girişi olarak kullanılarak ivmeölçer sabit kayma hatası ve orantı katsayısı hatası elde edilir. Yüksek kaliteli, hassas dönüölçerlerin hata parametreleri de bu test ile belirlenebilir [6].

Şekil A.1'de AÖB'nin bir ekseninin yukarı - aşağı konumları ve noktalı oklar ile gerçek referans sinyalleri verilmektedir.



**Şekil A.1** AÖB kalibrasyon eksenlerinden birinin yukarı ve aşağı doğru konumu (Sol yukarı doğru ve sağ aşağı doğru) [21]

Test adımları ve veri işleme yöntemi aşağıda verilmektedir.

Birinci adım: x eksenini yukarı doğru bakarken ivmeölçer ve dönüölçerden veri toplanır.  $(a_x^{yukar}, w_x^{yukar})$

İkinci adım: x eksenini aşağı doğru bakarken ivmeölçer ve dönüölçerden veri toplanır.  $(a_x^{aşağ}, w_x^{aşağ})$

Üçüncü adım: y eksenini yukarı doğru bakarken ivmeölçer ve dönüölçerden veri toplanır.  $(a_y^{yukar}, w_y^{yukar})$

Dördüncü adım: y eksenini aşağı doğru bakarken ivmeölçer ve dönüölçerden veri toplanır.  $(a_y^{aşağı}, w_y^{aşağı})$

Beşinci adım: z eksenini yukarı doğru bakarken ivmeölçer ve dönüölçerden veri toplanır.  $(a_z^{yukarı}, w_z^{yukarı})$

Altıncı adım: z eksenini aşağı doğru bakarken ivmeölçer ve dönüölçerden veri toplanır.  $(a_z^{aşağı}, w_z^{aşağı})$

İvmeölçer hatalarını aşağıdaki denklemler ile belirleyebiliriz. g yerçekimi ivmesini temsil etmektedir.

$$\text{x-ekseni ivmeölçer sabit kayma değeri; } B_x = \frac{Av(a_x^{yukarı}) + Av(a_x^{aşağı})}{2} \quad (31)$$

$$\text{x-ekseni ivmeölçer orantı katsayısı değeri; } S_x = \frac{Av(a_x^{yukarı}) - Av(a_x^{aşağı}) - 2.g}{2.g} \quad (32)$$

$$\text{y-ekseni ivmeölçer sabit kayma değeri; } B_y = \frac{Av(a_y^{yukarı}) + Av(a_y^{aşağı})}{2} \quad (33)$$

$$\text{y-ekseni ivmeölçer orantı katsayısı değeri; } S_y = \frac{Av(a_y^{yukarı}) - Av(a_y^{aşağı}) - 2.g}{2.g} \quad (34)$$

$$\text{z-ekseni ivmeölçer sabit kayma değeri; } B_z = \frac{Av(a_z^{yukarı}) + Av(a_z^{aşağı})}{2} \quad (35)$$

$$\text{z-ekseni ivmeölçer orantı katsayısı değeri; } S_z = \frac{Av(a_z^{yukarı}) - Av(a_z^{aşağı}) - 2.g}{2.g} \quad (36)$$

Dönüölçer hatalarını aşağıdaki denklemler ile belirleyebiliriz. w dünyanın dönüş hızını temsil etmektedir.

$$\text{x-ekseni dönüölçer sabit kayma değeri; } B_x = \frac{Av(w_x^{yukarı}) + Av(w_x^{aşağı})}{2} \quad (37)$$

$$\text{x-ekseni dönüölçer orantı katsayısı değeri; } S_x = \frac{Av(w_x^{yukarı}) - Av(w_x^{aşağı}) - 2.w}{2.w} \quad (38)$$

$$\text{y-ekseni dönüölçer sabit kayma değeri; } B_y = \frac{Av(w_y^{yukarı}) + Av(w_y^{aşağı})}{2} \quad (39)$$

$$\text{y-ekseni dönüölçer orantı katsayısı değeri; } S_y = \frac{Av(w_y^{yukarı}) - Av(w_y^{aşağı}) - 2.w}{2.w} \quad (40)$$

z-ekseni dönüölçer sabit kayma değeri;  $B_z = \frac{Av(w_z^{yukarı}) + Av(w_z^{aşağı})}{2}$  (41)

z-ekseni dönüölçer orantı katsayısı değeri;  $S_z = \frac{Av(w_z^{yukarı}) - Av(w_z^{aşağı}) - 2.w}{2.w}$  (42)

Altı pozisyonlu statik test ile sensörün sabit kayma hatası ve orantı katsayısı hatası belirlenirken, aksenal kaçıklık hatası ve ivmeye bağıli sabit kayma hatası belirlenemez.



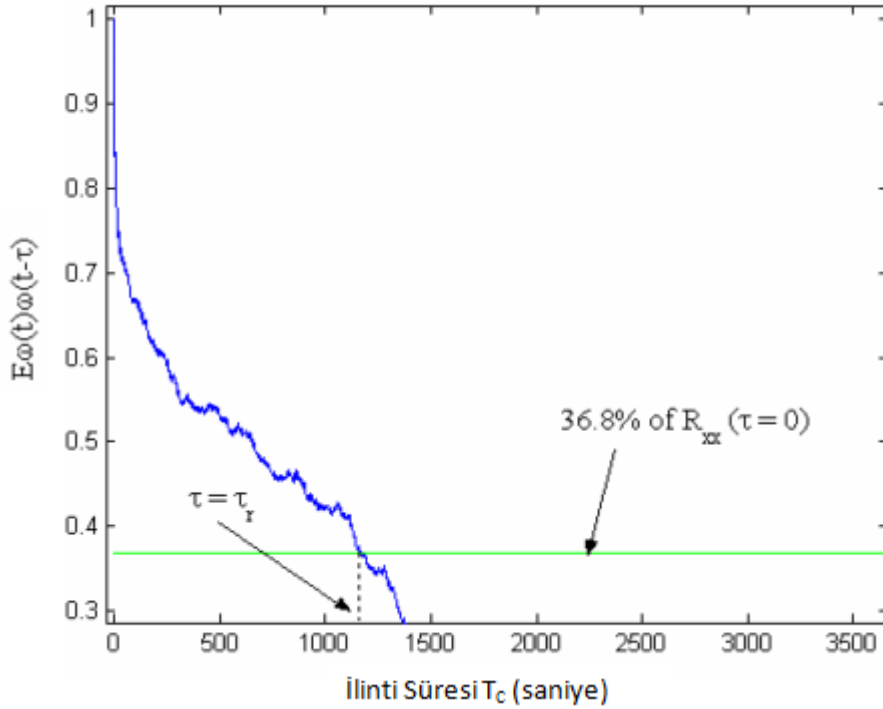
## EK.B - Özilinti Fonksiyonu

$x(k)$ 'nin gecikmiş versiyonu olan  $x(k - \tau)$  serisinin,  $x(k)$  serisine ne kadar benzediğini belirlemek için özilinti fonksiyonunu bir araç olarak düşünebiliriz.

$x(k)$  ayrık zaman olasılıksal serisinin özilinti fonksiyonu  $R_x(\tau)$  (43) numaralı denklemde gösterilmektedir.

$$R_x(\tau) = E[x(k)x(k - \tau)] \quad (43)$$

Sürecin ilinti süresini belirlemek için özilinti fonksiyonu hesaplanır. Özilinti fonksiyonunun başlangıç noktasındaki değeri referans alınarak % 36.8 değerine düştüğü nokta ilinti süresi olarak kabul edilir [20]. Şekil B.1'de gösterilen özilinti fonksiyonu ilinti süresini doğrulamak için kullanılabilir.



Şekil B.1 Özilinti fonksiyonu grafiği ve ilinti süresi gösterimi [20]

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Yeşim Günhan

Doğum Yeri : Yalova

Medeni Hali : Bekar

E-posta : yesimgunhan@hotmail.com

Adresi : Tepebaşı mah. Çığ sok. No:43/18 Keçiören

### Eğitim

Lise : Rauf Denktaş Lisesi

Lisans : Başkent Üniversitesi

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, İyi

### İş Deneyimi

3 yıl Roketsan A.Ş.'de Ara Safha Ataletsel Güdüm Sistemleri Tasarım Mühendisi

### Deneyim Alanları

Ataletsel Ölçüm Birimi Tasarımı ve Geliştirme, Sensör Karakterizasyonu, Hata Telafi Algoritma Tasarımı, Sensör ve Ataletsel Ölçüm Birimi Kalibrasyonu, Sensör ve Ataletsel Ölçüm Birimi Testi

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

“Polynomial Degree Determination for Temperature Dependent Error Compensation of Inertial Sensors” isimli makale

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium 2014