

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTİKAMET-DURUM BİLGİSİ VEREN SİSTEM
SENSÖRLERİNİN HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ
VE ANALİZİ

EMRE ATASOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2018

**İSTİKAMET-DURUM BİLGİSİ VEREN SİSTEM
SENSÖRLERİNİN HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ
VE ANALİZİ**

**ESTIMATION AND ANALYSIS OF ERROR PARAMETERS
OF ATTITUDE-HEADING REFERENCE SYSTEM
SENSORS**

EMRE ATASOY

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK-ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

“İstikamet-Durum Bilgisi Veren Sistem Sensörlerinin Hata Parametrelerinin Kestirimi ve Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 17/08/2018 tarihinde **ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hamit Erdem

Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Selda Güney

Üye : Doç. Dr. Mustafa Doğan

ONAY

..../..../2018

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÜR

Tez danıőmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selda Güney'e tez çalışmanın sonuca ulaőtırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aőtılmasında her zaman yardımcı olduğu için teőkekkür ederim.

Bu tez çalışmasının belirlenmesinde yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Mustafa Doğan'a yol gösterici önerileri için teőkekkür ederim.

Tez çalışmasında benzetim sonuçlarının elde edilmesinde yardımlarını esirgemeyen başta Sayın Bađıő Altınöz olmak üzere, Sayın Anıl Sami Önen ve Sayın Gökhan Alkan'a teőkekkür ederim.

Annem Emine Atasoy, babam Murat Atasoy ve abim Ali Atasoy'a çalışmalarım sırasında gösterdikleri destekleri için teőkekkür ederim.

ÖZ

İSTİKAMET-DURUM BİLGİSİ VEREN SİSTEM SENSÖRLERİNİN HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ VE ANALİZİ

Emre Atasoy

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İstikamet-Durum bilgisi veren sistem, ataletsel ölçüm birimi ve manyetometre sensörlerini kullanarak bir cismin yalpalanma, yunuslama, savrulma açılarını bir düzlemi referans alarak kestirim yapmaktadır. İstikamet-Durum bilgisinin kestirimi için ileri kestirim algoritmalarından faydalanır. Sensör hataları, kestirim performansını yani sistem performansını etkileyen önemli etkenlerdendir. Bu durumda İstikamet -Durum bilgisi veren sistemin ne kadar iyi çalışacağını ataletsel ölçüm birimi ve manyetometrenin performansı belirler.

Bu tez çalışmasında ataletsel ölçüm birimi ve manyetometre hata parametrelerinin kestirim çalışmalarına yer verilmiştir. Ataletsel ölçüm birimi hata kestiriminden önce sıcaklığa bağımlı hatanın telafisi için sıcaklık kalibrasyonu yapılmış, sonra hata parametrelerinin kestirimi için iki ayrı yöntem olan Allan deviasyon ve güç tayf yoğunluğu yöntemlerine başvurulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Önerilmiş yöntemler ayrıca denenmiş ve performansları irdelenmiştir. Manyetometrenin sert-demir ve yumuşak-demir hata parametreleri belirlenerek hataların telafisi sağlanmıştır. Hata telafisi yapılmış sonuçlar hatalı sonuçlar ile karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

Ataletsel ölçüm birimi verileri robotik seviye düşük maliyetli bir MEMS sensör modülü ile elde edilmiştir. Manyetometre verileri için düşük maliyetli hall sensörü tipi bir manyetometre kullanılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Ataletsel Ölçüm Birimi, Manyetometre, Allan Deviasyon, Allan Varyans, Güç Tayf Yoğunluğu, Olasılıksal Hatalar, Yumuşak-Demir, Sert-Demir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selda Güney, Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

ESTIMATION AND ANALYSIS OF ERROR PARAMETERS OF ATTITUDE- HEADING REFERENCE SYSTEM SENSORS

Emre Atasoy

Master of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

Attitude-heading reference system estimates roll, pitch and yaw angles by taking a plane as reference using inertial measurement unit and magnetometer sensors. It utilizes advance estimation algorithm while estimating attitude-heading information. The error parameters of inertial measurement unit and magnetometer sensors are key factors that affect estimation performance, in other words the system performance.

In this thesis, estimation studies of inertial measurement unit and magnetometer error parameters have been performed. Before estimating the errors parameters of inertial measurement unit, temperature calibration has been done to compensate temperature dependent error. Then, two different methods that are Allan deviation and power spectral density methods have been applied for error parameter estimation and the results have been compared. In addition, the proposed methods have been tested and their performances have been examined. Soft-iron and hard-iron error parameters of magnetometer have been estimated and compensated. The compensated and erroneous results have been compared.

Inertial measurement unit datum have been obtained with robotics grade low cost MEMS sensor module. Low cost hall sensor type magnetometer have been used for magnetometer datum.

KEYWORDS: Inertial Measurement Unit, Magnetometer, Allan Deviation, Allan Variance, Power Spectral Density, Stochastic Errors, Soft-Iron, Hard-Iron.

Supervisor: Asst.Prof Dr. Selda Güney, Baskent University, Department of Electrical and Electronics Engineering

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT.....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1 GİRİŞ.....	1
2 İSTİKAMET-DURUM BİLGİSİ VEREN SİSTEMLER VE ATALETSEL NAVİGASYON TEMEL BİLGİSİ	3
2.1 AÖB Algılayıcıları	3
2.1.1 İvmeölçer	4
2.1.2 Dönüölçer.....	8
2.2 Manyetometre	10
3 ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ HATA PARAMETRELERİ.....	13
3.1 Sabit Kayma (Bias) Hatası	13
3.2 Orantı Katsayısı Hatası	13
3.3 Eksen Kaçıklık Hatası	14
3.4 İvme Bağımlı Orantı Katsayısı Hatası	14
3.5 Sensör Gürültüsü	15
4 MANYETOMETRE HATA PARAMETRELERİ.....	16
4.1 Sert-Demir Bozulması	16
4.2 Yumuşak-Demir Bozulması.....	17
5 AÖB HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ.....	18
5.1 Deterministik Hataların Kestirimi	19
5.2 AÖB Sıcaklık Bağımlı Hatası.....	20
5.3 Deterministik Hata Telafi Modeli.....	21
5.4 Olasılıksal Hataların Kestirimi	22
5.4.1 Güç tayf yoğunluğu (Power spectral density)	22
5.4.2 Allan deviasyon	27
5.4.3 Allan deviasyon eğrisinin oluşturulması	27
5.4.4 Hata parametrelerinin çıkarımı	30
5.4.4.1 Kuantalama gürültüsü	30
5.4.4.2 Hız/Açı rasgele yürüyüş	31
5.4.4.3 Sabit kayma kararsızlığı	33

5.4.4.4 Oransal rasgele yürüyüş	35
5.5 Parametre Kestirimi İçin Önerilen Eğri Uydurma Yöntemleri.....	36
6 MANYETOMETRE HATALARININ KESTİRİMİ	38
7 BENZETİM SONUÇLARI	43
7.1 AÖB Sıcaklık Kalibrasyonu Benzetim Sonuçları	43
7.1.1 İvmeölçer sıcaklık kalibrasyonu.....	44
7.1.2 Dönüölçer sıcaklık kalibrasyonu.....	56
7.2 AÖB Olasılıksal Hata Parametrelerinin Kestirimi Benzetim Sonuçları.....	68
7.3 Önerilen Yöntem ile Uydurulmuş Allan Deviasyon Benzetim Sonuçları	79
7.4 Manyetometre Hata Telafisi Benzetim Sonuçları	82
7.4.1 Sert-demir bozulması telafi sonuçları	84
7.4.2 Yumuşak-demir bozulması telafi sonuçları.....	86
8 SONUÇLAR	89
KAYNAKLAR LİSTESİ	91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Ataletsel Navigasyon Sistemi İşleyiş Şeması	3
Şekil 2.2	Ataletsel Ölçüm Birimi Sensör Bileşenleri [2].....	4
Şekil 2.3	Temel İvmeölçer Bileşenleri [3].....	4
Şekil 2.4	Durağan Halde ve (b) İvme Uygulanmış İvmeölçer Bileşenleri [4].....	5
Şekil 2.5	Kapatif MEMS İvmeölçer Yapısı [5].....	6
Şekil 2.6	İvmeölçer Enstrumantasyon Devresi Şeması [6]	6
Şekil 2.7	Piezoelektrik İvmeölçer Yapısı [7].....	7
Şekil 2.8	İki Eksenli Dış Gimbal Dönüölçer Yapısı [9]	8
Şekil 2.9	Ring Laser Gyro Yapısı [9]	9
Şekil 2.10	Manyetik Kuzey ve Coğrafik Kuzey Gösterimi [11]	10
Şekil 2.11	Hall Sensörü Algılama Bölgesi [14].....	11
Şekil 2.12	Manyetoresistif Sensörü Algılama Bölgesi [14].....	12
Şekil 3.1	AÖB Sabit Kayma Hatası Gösterimi [17]	13
Şekil 3.2	AÖB Orantı Katsayısı Hatası Gösterimi [18].....	14
Şekil 4.1	Sert-Demir Bozulması Gösterimi [20].	16
Şekil 4.2	Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Gösterimi [20].	17
Şekil 5.1	3 Eksenli Dönü Tablası [23].....	19
Şekil 5.2	Fiber Optik Dönüölçer Sabit Kayma Hatası Sıcaklığa Bağlı Değişim Grafiği [25].....	20
Şekil 5.3	GTY Loglog Çizimi ve Hata Terimlerini İçeren Eğimler [28].	25
Şekil 5.4	Sensör Verisinin GTY Örneği	25
Şekil 5.5	Sensör Verisinin Frekans Ortalama Tekniği Uygulanmış GTY Örneği .	26
Şekil 5.6	Allan Deviasyon Eğrisi ve Hata Terimlerini İçeren Eğimler [28].	27
Şekil 5.7	Allan Deviasyon Akış Şeması.....	29
Şekil 5.8	Kuantalama Gürültüsü Çizimi [28].	31
Şekil 5.9	Hız/Açı Rasgele Yürüyüş Çizimi [28]	32
Şekil 5.10	Sabit Kayma Kararsızlığı Çizimi [28].....	34
Şekil 5.11	Oransal Rasgele Yürüyüş Çizimi [28].	35
Şekil 6.1	Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Gösterimi [20].	38
Şekil 6.2	Manyetometre X – Ekseni Rotasyon Grafiği [19]	40
Şekil 6.3	Manyetometre Y – Ekseni Rotasyon Grafiği [19]	40
Şekil 6.4	Manyetometre Z – Ekseni Rotasyon Grafiği [19]	41

Şekil 6.5 Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Ölçüm Gösterimi [20].....	42
Şekil 7.1 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.....	44
Şekil 7.2 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği.....	45
Şekil 7.3 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	45
Şekil 7.4 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği.....	46
Şekil 7.5 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	46
Şekil 7.6 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği.....	47
Şekil 7.7 İvmeölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	47
Şekil 7.8 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.....	48
Şekil 7.9 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği.....	49
Şekil 7.10 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	49
Şekil 7.11 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği.....	50
Şekil 7.12 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	50
Şekil 7.13 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği.....	51
Şekil 7.14 İvmeölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	51
Şekil 7.15 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.....	52
Şekil 7.16 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği.....	53

Şekil 7.17 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	53
Şekil 7.18 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği.....	54
Şekil 7.19 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	54
Şekil 7.20 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği.....	55
Şekil 7.21 İvmeölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	55
Şekil 7.22 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.....	56
Şekil 7.23 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği.....	57
Şekil 7.24 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	57
Şekil 7.25 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği.....	58
Şekil 7.26 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	58
Şekil 7.27 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği.....	59
Şekil 7.28 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	59
Şekil 7.29 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.....	60
Şekil 7.30 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği.....	61
Şekil 7.31 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	61
Şekil 7.32 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği.....	62
Şekil 7.33 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	62

Şekil 7.34 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği.....	63
Şekil 7.35 Dönüölçer Y – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	63
Şekil 7.36 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.....	64
Şekil 7.37 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği.....	65
Şekil 7.38 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	65
Şekil 7.39 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği.....	66
Şekil 7.40 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	66
Şekil 7.41 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği.....	67
Şekil 7.42 Dönüölçer Z – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği	67
Şekil 7.43 İvmeölçer X – Ekseni Ham ve Filtrelenmiş Veri Grafiği.....	69
Şekil 7.44 İvmeölçer X – Ekseni Ham ve Filtrelenmiş Verinin GTY Grafiği	69
Şekil 7.45 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi	70
Şekil 7.46 İvmeölçer Y – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi	71
Şekil 7.47 İvmeölçer Z – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi.....	71
Şekil 7.48 İvmeölçer X – Ekseni GTY Eğrisi.....	73
Şekil 7.49 İvmeölçer Y – Ekseni GTY Eğrisi.....	73
Şekil 7.50 İvmeölçer Z – Ekseni GTY Eğrisi.....	74
Şekil 7.51 Dönüölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi.....	75
Şekil 7.52 Dönüölçer Y – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi.....	76
Şekil 7.53 Dönüölçer Z – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi.....	76
Şekil 7.54 Dönüölçer X – Ekseni GTY Eğrisi	77
Şekil 7.55 Dönüölçer Y – Ekseni GTY Eğrisi.....	78
Şekil 7.56 Dönüölçer Z – Ekseni GTY Eğrisi	78
Şekil 7.57 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği	80

Şekil 7.58 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan 10. Derece Polinom Grafiği	80
Şekil 7.59 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan 20. Derece Polinom Grafiği	81
Şekil 7.60 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan Pay Derecesi 4 Payda Derecesi 2 Rasyonel Polinom Grafiği.....	81
Şekil 7.61 Hata Telafisi Yapılmamış Manyetometre Y – Z Ekseni Grafiği	83
Şekil 7.62 Hata Telafisi Yapılmamış Manyetometre Z – X Ekseni Grafiği	83
Şekil 7.63 Hata Telafisi Yapılmamış Manyetometre X – Y Ekseni Grafiği	84
Şekil 7.64 Sert-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Manyetometre Y – Z Ekseni Grafiği.....	84
Şekil 7.65 Sert-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Manyetometre Z – X Ekseni Grafiği.....	85
Şekil 7.66 Sert-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Manyetometre X – Y Ekseni Grafiği.....	85
Şekil 7.67 Eksen Hizalama Yapılmış Manyetometre X – Y Ekseni Grafiği	86
Şekil 7.68 Sert-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Manyetometre Grafiği	87
Şekil 7.69 Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Manyetometre Grafiği.....	87

ÇİZELGELER LİSTESİ

Tablo 5.1	32768 Adet Verinin Frekans Ortalama Tekniği Tablo Gösterimi [28]...	26
Tablo 7.1	Allan Deviasyon Eğrileri ile Bulunan İvmeölçer Hata Parametreleri.....	72
Tablo 7.2	GTY Eğrileri ile Bulunan İvmeölçer Hata Parametreleri.....	74
Tablo 7.3	Allan Deviasyon Eğrileri ile Bulunan Dönüölçer Hata Parametreleri....	77
Tablo 7.4	GTY Eğrileri ile Bulunan İvmeölçer Hata Parametreleri.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

C	Kapasitans
A	Plaka alanı
ε	Dielektrik katsayısı
d	Plakalar arası mesafe
a_x	Gerçek ivme
\widetilde{a}_x	İvmeölçer çıkışı
\hat{a}	Telafi edilmiş ivmeölçer çıkışı
w_x	Gerçek dönü
\widetilde{w}_x	İvmeölçer çıkışı
\hat{w}	Telafi edilmiş dönüölçer çıkışı
S_x	AÖB orantı katsayısı hatası
M_{xy}	Eksen kaçıklık hatası
B_x	Sabit kayma hatası
B_{gx}	İvme bağımlı sabit kayma hatası
n_x	Rassal sensör gürültüsü
B_C	Sıcaklığa bağlı sabit kayma hatası
T	Sıcaklık
a_1	Polinom pay katsayısı
b_1	Polinom payda katsayısı
$S_x(jw)$	Güç tayf yoğunluğu fonksiyonu
$S^1(f)$	Tek taraflı güç tafy yoğunluğu fonksiyonu
$R_x(\tau)$	Verinin Otokorelasyonu
τ	Grup zamanı
$\sigma(\tau)$	Allan deviasyon fonksiyonu

Q	Kuantalama hatası
N	Hız/açı rasgele yürüyüş hatası
B	Sabit kayma kararsızlığı
K	Oransal rasgele yürüyüş hatası
HI_x	Sert-Demir bozulması
\tilde{m}	Manyetometre çıkışı
\hat{m}	Sert-Demir bozulması telafi edilmiş manyetometre çıkışı
m	Ham manyetometre verisi
m_R	Eliptik eksenini hizalanmış manyetometre verisi
R_x	Rotasyon matrisi
α_x	Manyetometre orantı katsayısı
Ppm	Part per million
AÖB	Ataletsel Ölçüm Birimi
AHRS	İstikamet-Durum Bilgisi Veren Sistem
GTY	Güç Tayf Yoğunluğu
KKS	Küresel Konumlama Sistemi
MEMS	Micro Electro-Mechanical System
SQUID	The Superconducting Quantum Interference Device

1. GİRİŞ

Bir istikamet-durum bilgisi veren sistem, AÖB(ataletsel ölçüm birimi) ve manyetometre sensörlerini kullanarak bir cismin yalpalanma, yunuslama, savrulma açılarını bir düzlemi referans alarak hesaplayan bir sistemdir. Hava araçlarında yer alan AHRS(istikamet-durum bilgisi veren sistem), otonom ve otonom olmayan uçuş kontrolünde önemli yer tutar. Ayrıca robotik uygulamalarda da kullanım alanlarına sahiptir.

AHRS dönüölçer, ivmeölçer ve manyetometre sensörlerinin verilerinden yararlanarak istikamet-durum bilgisinin kestirimini yapar. İleri kestirim algoritmalarından yararlanır. Bu sistem aynı zamanda ataletsel navigasyon sisteminin bir parçasıdır. AÖB'ni oluşturan ivmeölçer ve dönüölçer sensörleri manyetometre ile birlikte, AHRS'nin yorumlaması gereken sinyalleri sağlar. Yorumlama işleminde kullanılan yöntemler, (Kalman vb.) sistemin ne kadar iyi çalıştığını belirler. AÖB'nin ve manyetometrenin algılayıcı kaynaklı hataları oldukça fazladır. AÖB ve manyetometrenin algılayıcı kaynaklı hatalarının minimize edilmesi AHRS'nin istikamet-durum bilgisi kestirimini iyileştirecektir.

AÖB hatalarının kestirimi, AÖB'nin performans ölçümü açısından büyük önem arz etmektedir. Kestirilen hata parametreleri AÖB'nin sensör kalitesi hakkında bilgi verir. Kullanılacak AÖB'nin AHRS için uygunluğu kestirilen hata parametreleri ile ortaya çıkar.

Bu tez kapsamında, AÖB ve manyetometre algılayıcı verileri yorumlanarak, yapısından kaynaklı hata çeşitleri belirlenmeye çalışılmıştır. AÖB'nin performansı ile ilgili bilgi içeren hata parametreleri, çeşitli yöntemlerle kestirilmeye çalışılmıştır. AHRS'nin doğruluğunu arttırmak amacıyla ayrıca hata telafi yöntemleri irdelenmiştir. Kullanılan kestirim ve telafi yöntemlerinin sonuçları hakkında yorum ve analiz yapılmıştır.

Bu tez birinci bölümü giriş olmak üzere toplamda sekiz bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde ataletsel navigasyon sistemi, AHRS ve AHRS sensörleri hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü ve dördüncü bölümde, manyetometre ve AÖB hata kaynakları hakkında bilgiler verilmiş ve hataların etkileri incelenmiştir.

Beşinci bölümde, AÖB olasılıksal hata parametrelerinin kestirimi için güç tayf yoğunluğu ve allan deviasyon yöntemlerinden bahsedilmiştir. Hızlı ve otomatikleştirilmiş kestirim için polinom uydurma yöntemleri önerilmiştir. Ayrıca telafi edilebilir hataların telafi yöntemlerine değinilmiştir.

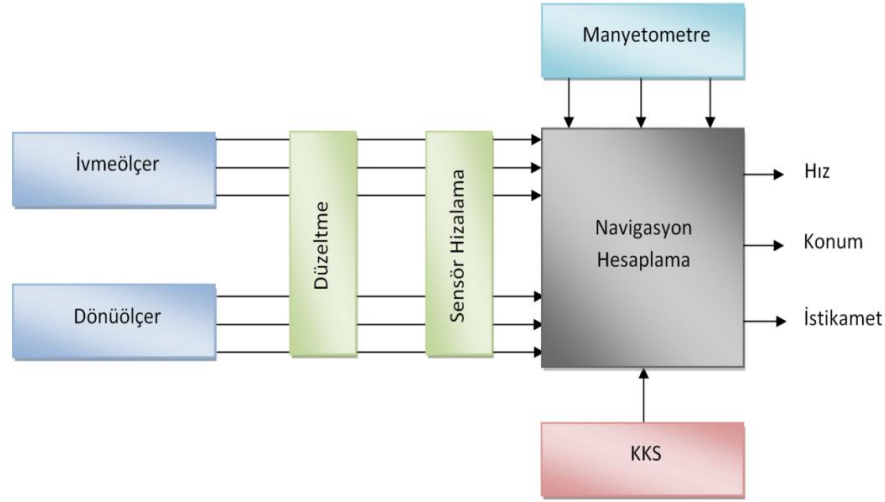
Altıncı bölümde, manyetometrenin sert-demir(hard-iron) ve yumuşak-demir(soft-iron) hata parametrelerinin kestirimi ve hata telafi yöntemleri anlatılmıştır.

Yedinci bölümde, AÖB ve manyetometre hata parametrelerinin kestirimi ve telafi yöntemleri ile ilgili benzetim çalışmaları ve yapılan çalışmaların yorumları yer almaktadır.

Son olarak sekizinci bölümde, bu tez çalışması kullanılan yöntemler ve benzetim sonuçları genel hatlarıyla değerlendirilmiş ve bu tez ile ilgili gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

2. İSTİKAMET-DURUM BİLGİSİ VEREN SİSTEMLER VE ATALETSEL NAVİGASYON TEMEL BİLGİSİ

Ataletsel seyrüsefer sisteminin bir parçası olan AHRS, bir cismin istikamet ve yöneliminin belirli bir referans atalet çerçevesine göre bulunması için cismin hareketlerini yorumlar. AÖB ve manyetometre sadece algılayıcı verilerini taşır. AHRS ise bu bilgileri yorumlayarak istikamet-durum bilgisini sağlar. AHRS'i AÖB'nden ayıran önemli farklılık budur.

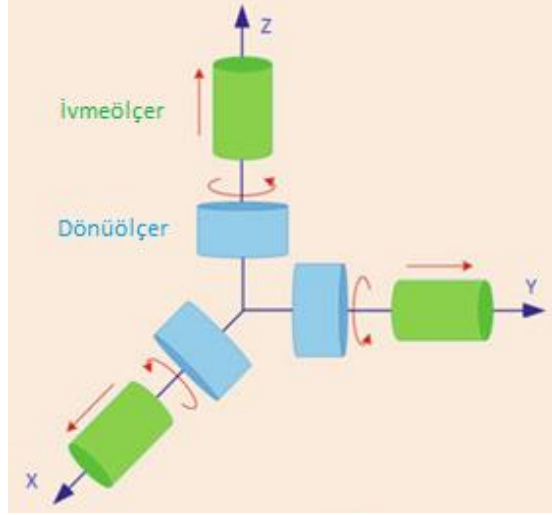


Şekil 2.1 Ataletsel Navigasyon Sistemi İşleyiş Şeması

AHRS kullanıldığı cismin istikamet ve yönelim bilgilerini, AHRS harici herhangi bir sisteme ihtiyaç duymadan hesaplar. AHRS tarafından hesaplanan istikamet ve yönelim bilgileri, Ataletsel navigasyon sistemi için girdi olarak kullanılabilir. Ataletsel navigasyon sistemi Küresel Konumlama Sistemi ile AHRS girdilerini kullanarak tümlev algoritmaları ile birlikte cismin hız ve konum bilgisini hesaplayabilir.

2.1 AÖB Algılayıcıları

Ataletsel Ölçüm Birimi yapısal olarak ivmeölçer ve dönüölçerden oluşur. Her biri tek ekseninde de ölçüm alabilen üçer adet ivmeölçer ve dönüölçerin ölçüm eksenlerinin birbirine dik olarak konumlandırılmasıdır. Böylelikle AÖB 3 ekseninde ivme ve açısal hız ölçülebilir. AÖB algılayıcıları kullanım alanları ve referans ölçüm tekniklerine göre çeşitli gruplara ayrılır.

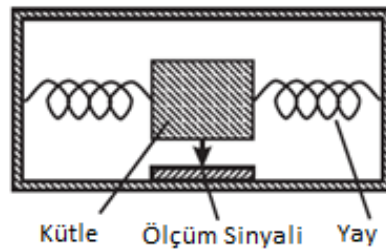


Şekil 2.2 Ataletsel Ölçüm Birimi Sensör Bileşenleri [2]

Gelişen teknoloji ve mikroelektronik alanındaki ilerleyişler, MEMS ataletsel sensörleri ortaya çıkarmıştır. Mikro Elektro-Mekanik Sistemler olarak adlandırılan MEMS sensörler küçük kullanışlı yapısı ve düşük maliyeti ile günümüzde tercih sebebidir.

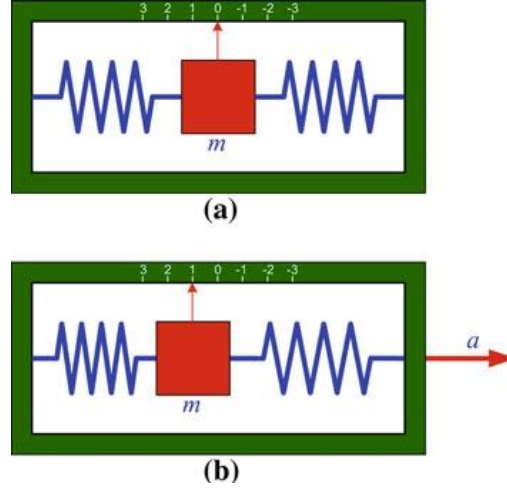
2.1.1 İvmeölçer

Tek eksen olarak ivmeölçer, ölçüm eksenini yönünde cisme(kendisine) uygulanan ivmeyi ölçer. Eğer ölçüm eksenini yere 90 derece ise eksen hareketi olmaksızın ölçülen değer yer çekimi ivmesi olacaktır. Bu yüzden, ivmeölçerlerde ölçüm yapılırken dikey ekseninde oluşan yer çekimi ivmesi hesaba katılmalıdır. Genel ölçüm mekanizması olarak kütle yay sistemini baz alınarak geliştirilmiştir. İvme ölçme prensibi Hooke Yasası($F=kx$) ve Newton'un 2. Yasası'na($F=ma$) dayanır [1].



Şekil 2.3 Temel İvmeölçer Bileşenleri [3]

Sistemdeki bu iki kuvvetin eşitliğinden $ma=kx$ olmaktadır. İvme bilgisi, yayın uzama miktarı ile orantılı bir değerdir. İvmeölçerler bu ilintiyi enstrumante edebilen bir yapıda geliştirilmiştir. Böylelikle uygulanan ivme ölçülebilir. Çeşitlerine göre yay yerine başka malzemeler de kullanılabilir.



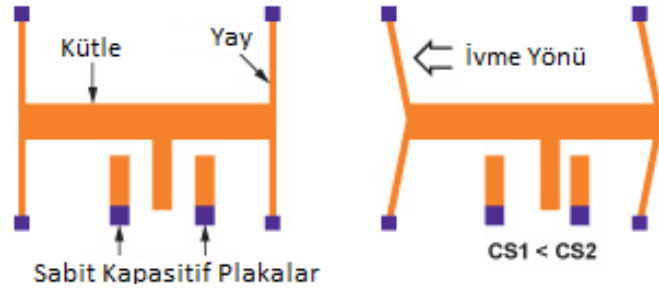
Şekil 2.4 (a) Durağan Halde ve (b) İvme Uygulanmış İvmeölçer Bileşenleri [4]

- **Kapasitif İvmeölçer**

Mekanizma olarak sabit ve hareketli plakalardan oluşur. Hareketli kısım kütle-yay sistemidir. İvme uygulandığında sabit plakalar ile hareketli plaka arasındaki mesafeler değişir. Bu değişim kapasite değişimine yol açar. Bu değişim bağıntısı $C = \epsilon A/d$ 'dir. Bu durumda plaka mesafeleri arasındaki değişim ile kapasitans ters orantılıdır [1]. Hareketli kısım plakaları, sabit kısımdaki her bir plakanın arasına yerleşir. Böylece aralıkları birbirleriyle ters olarak değişen iki kapasitans elde edilmiş olur. Elde edilen kapasitans değeri enstrumantasyon yükselteç devresi sayesinde ivme ile ilintili bir voltaj değeri elde edilir.

C: kapasitans, A: plaka alanı,

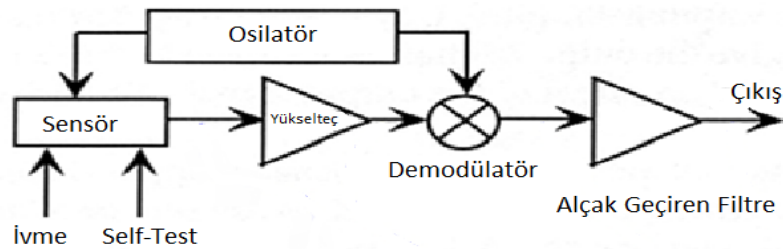
ϵ : dielektrik katsayısı, d: plakalar arası mesafe



Şekil 2.5 Kapasitif MEMS İvmeölçer Yapısı [5]

Enstrumantasyon devresinin işleyişi şu şekildedir [2];

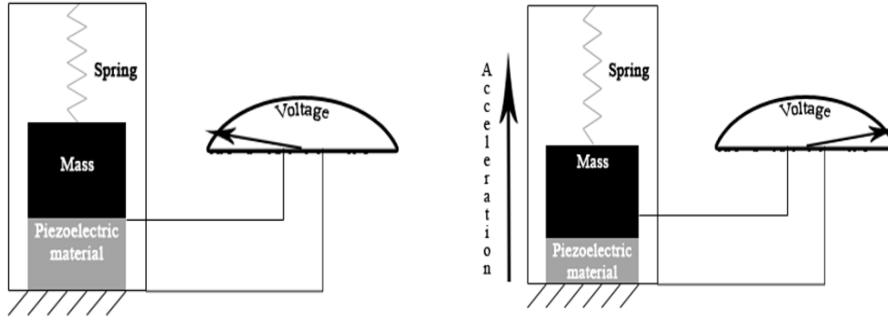
- Değişen kapasitansın değeri ise yük yükselteci (charge amplifier) adı verilen bir devre ile elektriksel sinyale çevirilir.
- Yük yükseltecine (charge amplifier), kapasitörün iki ucuna birbirleri arasında 180 derece faz farkı olan yüksek frekanslı olan kare dalga uygulanır. Bu sinyalin frekansı, genlik tepkisinin maksimum değerini sağlayacak biçimde belirlenir.
- Bu sinyal bir buffer tarafından güçlendirilir ve demodülatöre sokulur.
- Demodülatör, sinyalin zarfını yani genlik bilgisini elde ederek, analog çıkış üretir.



Şekil 2.6 İvmeölçer Enstrumantasyon Devresi Şeması [6]

Robotik uygulamalarda kapasitif MEMS ivmeölçerler düşük maliyeti ve yüksek hassasiyete sahip olması nedeniyle tercih sebebidir.

- **Piezelektrik İvmeölçer**



Şekil 2.7 Piezelektrik İvmeölçer Yapısı [7]

Piezelektrik ivmeölçer, piezelektrik malzeme ile oluşturulmuş ivmeölçerdir. Piezelektrik malzemenin özelliği ise basınç uygulandığında elektriksel bir çıkış üretmesidir. İvme uygulandığında piezelektrik malzeme sayesinde kütle-yay sisteminde oluşan ivme malzeme üzerinde bir basınç oluşturur. Bu basınç ivme ile ilintili bir elektriksel sinyale çevrilir [8].

- **Piezo resistif İvmeölçer**

Uygulanan ivmeyi değişken direnç prensibi ile ölçer. Hassasiyeti düşük ve sıcaklık bağımlılığı yüksek olduğu için yüksek hassasiyetin gerektiği uygulamalarda tercih edilmezler.

- **Tünel Akım İvmeölçer**

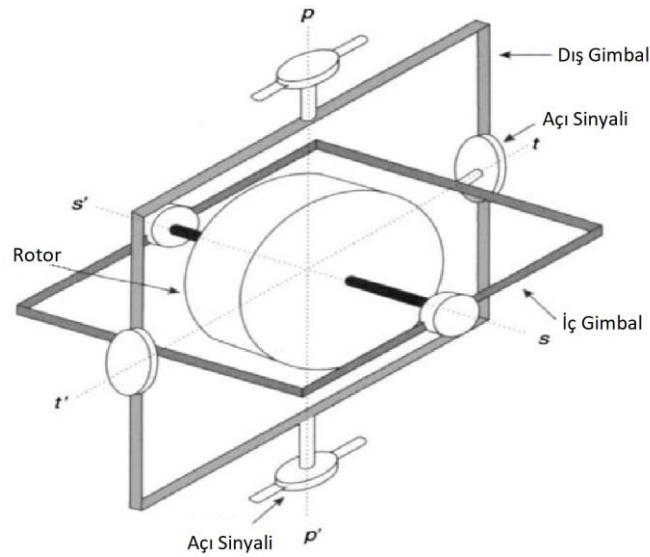
İki karşılıklı elektrot plaka arasında oluşan tünel akımından faydalanır. İvme uygulandığında elektrot plakalardan biri hareket eder ve tünel akımını değiştirir. Bu değişim ivme ile orantılıdır. Ölçüm bu oran ile sağlanır. Gürültü seviyesi düşüktür fakat üretimi maliyetli olduğu için çok yaygın değildir.

- **Rezonans İvmeölçer**

Rezonans ivmeölçerler, sistemdeki kütle titreşim frekansını referans alır. İvme uygulandığında, sistemin frekansını değiştirir. Bu değişim ivme ile ilintili değeri verir. Rezonans ivmeölçerlerin hassasiyeti piezo resistif ivmeölçerlere göre yüksektir. Doğrusal olmaması bu sensörün dezavantajıdır.

2.1.2 Dönüölçer

Dönüölçer, eylemsiz referans çerçevesinde eksen etrafındaki açisal oranı/hızı ölçen sensördür. Prensip olarak ölçüm, dönen bir rotorun açisal momentumundan faydalanılarak yapılır [4]. Ataletsel elemanın dönmesi, rotorun dönüş açısı ile örtüşen bir açisal momentum vektörü oluşturur [9]. Dönüölçerler genellikle kullanıldığı araçların savrulmasını engelleme ve dengede tutma amaçlı kullanılır. Açisal momentumun korunması ilkesiyle çalışır.



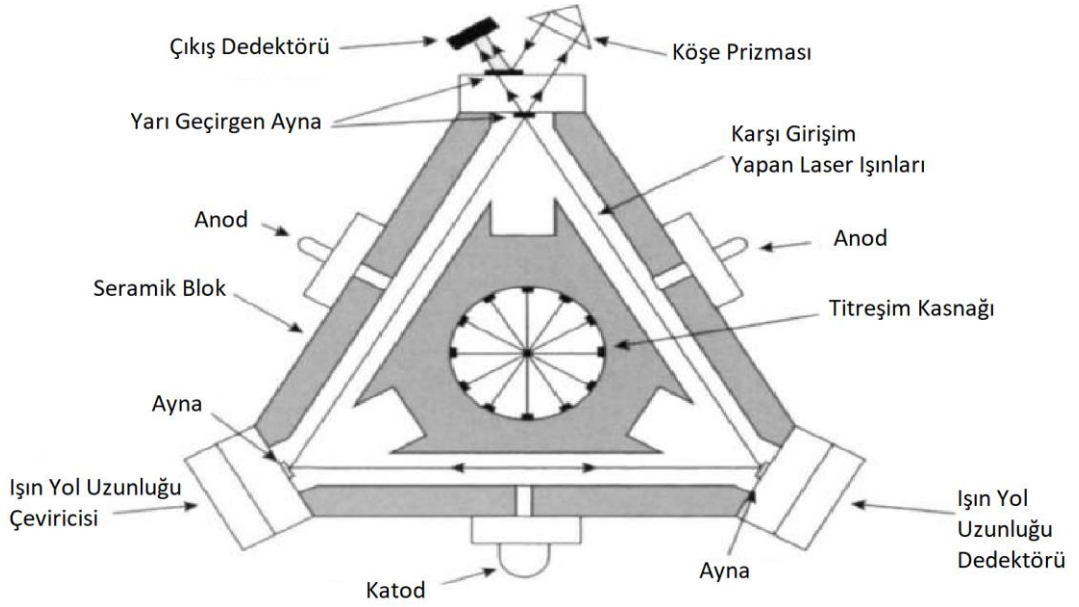
Şekil 2.8 İki Eksenli Dış Gimbal Dönüölçer Yapısı [9]

Günümüzde denizcilik ve havacılık sektöründe yön tayini amaçlı yaygın olarak kullanılmaktadır. Maliyet ve kullanım alanlarına göre farklı çeşitlerde dönüölçerler günümüzde üretilmektedir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte küçük, hafif ve fiyat açısından ucuz olan MEMS dönüölçerler kısa süreli navigasyon uygulamalarından tercih edilmektedir. Taktik dereceli ve robotik AÖB'leri MEMS dönüölçerin kullanıldığı alanlardır.

- **Optik Dönüölçer**

Işık kaynağından çıkan ışın, ışık bölücü ile ikiye ayrılarak fiber optik sargıya iletilir. Daha sonra bu iki ışın algılayıcıya yansıtılır. Algılayıcı iki ışın arasındaki faz farkını gözeterek bir çıkış üretir. Dönüş hareketi uygulandığında, dönüş açısına ters yönde hareket eden ışın daha az yol alır ve iki ışın arasında faz farkı yaratır. Bu olaya Sagnac etkisi denir [9]. Bu faz farkı açısal hızı belirlemede kullanılır.



Şekil 2.9 Ring Laser Gyro Yapısı [9]

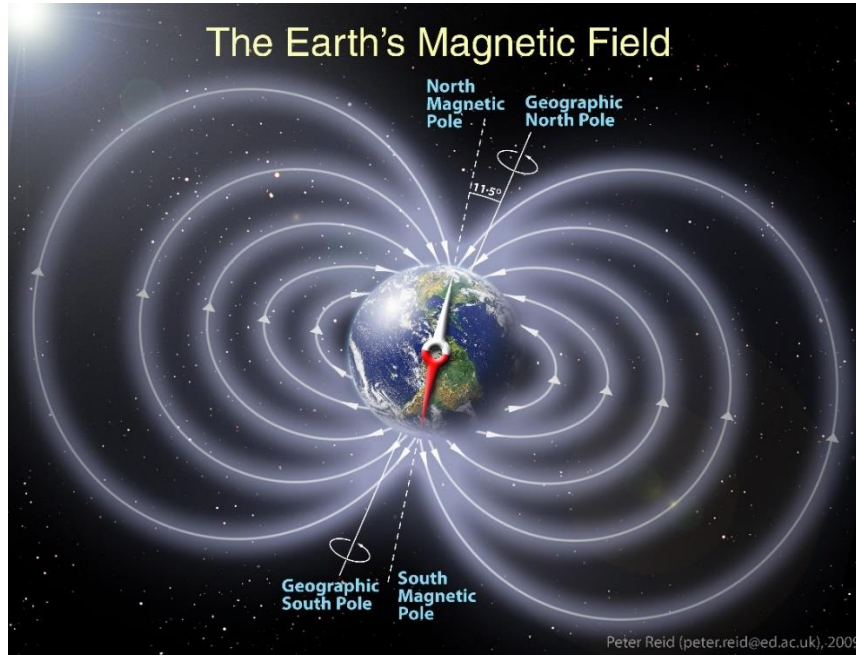
Uzun çalışma ömrü, yüksek hassasiyeti, geniş dinamik aralığı ve ivmeye bağımlı bias değerinin az olması optik dönüölçerin avantajlarındandır. Yüksek hassasiyet gerektiren askeri uygulamalarda optik dönüölçerlerden çokca kullanılır. Ring Laser Gyro ile Fiber Optic Gyro en çok bilinen optik dönüölçerlerdir.

- **MEMS Dönüölçer**

Mikro Elektro-Mekanik Sistemler olarak adlandırılan MEMS dönüölçerler titreten kütlelerin yarattığı Coriolis ivmesini kullanarak ölçüm sağlar. Coriolis ivmesi doğrusal hareket eksenindeki hızın ve dönme kaynaklı açısal hızın çarpımıdır. Coriolis ivmesinin oluşmasıyla titreten kapasitif plakaların hareketiyle doğru orantılı olarak açısal hız algılanır.

2.2 Manyetometre

Manyetometre belirli bir alandaki manyetik alan şiddetini ve yönünü ölçen sensördür. Ölçülen bu manyetik alan şiddeti, dünyanın manyetik alanı ve ölçülen alandaki çevresel faktörlerden kaynaklı manyetik alanın kombinasyonudur. Tesla veya Gauss cinsinden ölçüm yapabilir [10]. (1 Gauss = 10^{-4} Tesla)



Şekil 2.10 Manyetik Kuzey ve Coğrafik Kuzey Gösterimi [11]

Dünyanın merkezindeki çekirdek, dünya üzerinde bir manyetik alan yaratır. Bu manyetik alan güney kutbundan çıkar, kuzey kutbuna geri döner. Manyetik alanın çıktığı yer geri döndüğü noktalara manyetik güney ve manyetik kuzey denir. Manyetik kuzey, coğrafik kuzeyden farklıdır. Coğrafik kuzey dünyanın dönüş eksenine göre tanımlanır. Manyetik kuzey, manyetik alanın dikey olduğu (geri döndüğü) yerdir. Manyetik kuzey her zaman farklı noktayı gösterir. Bu yüzden manyetik kuzey ile coğrafik kuzey birbirinden farklı noktaları gösterir. Bu farklılığa sapma(declination) adı verilir. Bu sapma her sene haritalandırılır ver ölçümler bu haritalandırma kullanılarak yapılır [12]. Manyetometrenin referans olarak ölçtüğü nokta manyetik kuzeydir.

Farklı çalışma prensiplerine sahip manyetometre çeşitleri mevcuttur. Hall sensör, Proton sensör, SQUID sensör, Manyetorezistif sensör bunlardan bazılarıdır.

- **Hall Sensörü**

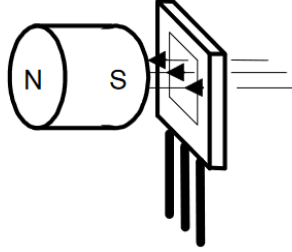
Manyetik alan sıfır iken bir ince tabaka yarıiletken den akım geçirilirse, herhangi bir potansiyel fark oluşmaz. Fakat tabakaya dik bir manyetik alan varsa, tabakadaki geçen akımda bozulma(bükülme) meydana gelir. Bu bozulma yarıiletken tabakanın çıkış terminallerinde potansiyel fark oluşturur. Hall etkisi prensibine dayanan bu voltaja Hall voltajı denir. Hall sensörleri de bu prensip ile çalışır. Hall sensörlerdeki bu voltaj manyetik alanın şiddeti ile orantılı bir çıkış üretir [13]. Sıcaklık duyarlılığı bu sensörlerde fazladır. Bu genellikle otomobil frenleme sistemlerinde kullanılır. Bu tez kapsamında Hall sensör tipi manyetometre kullanılmıştır.

$$V_H \approx I \times B \quad (2.1)$$

V_H : Hall voltajı

I : Tabakadan geçen akım

B : Manyetik alan



Şekil 2.11 Hall Sensörü Algılama Bölgesi [14]

- **Proton Sensörü**

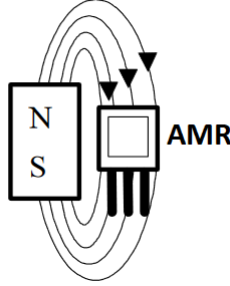
Proton sensörü, protonların rezonans frekansından yararlanarak ölçüm yapar. Proton atomlarının frekansı atomik sabitlere ve ortamın manyetik alan şiddetine bağlıdır. Genellikle maden aramalarında kullanılır [15].

- **SQUID (The Superconducting Quantum Interference Device) Sensörü**

SQUID sensörünün türkçe açılımı süperiletken quantum girişim cihazı'dır. Manyetometreler arasında hassasiyeti en yüksek manyetometre tipidir. 10^{-15} Tesla hassasiyetle ölçüm yapabilir. 4.2 Kelvin gibi düşük sıcaklıklarda ölçüm yapabilir. Soğutma ihtiyacı nedeniyle SQUID tip manyetometre maliyetli bir manyetometredir. Biyoloji ve Manyetoensefalografi gibi yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalarda kullanılır [15].

- **Manyetorezistif Sensörü**

Manyetorezistif sensörlerde Nikel ve Demir alaşımlı ferromanyetik materyal kullanılır. Bu ferromanyetik materyalin direnci, belirli bir yöndeki manyetik alanın şiddeti ile orantılı bir şekilde değişir [16]. Bu direnç değeri manyetik alan ile ilintili değerdir. Manyetorezistif tip sensörün hassasiyeti düşüktür. Düşük maliyetlidir taktiksel askeri uygulamalarda ve akademik çalışmalarda kullanılır [15].



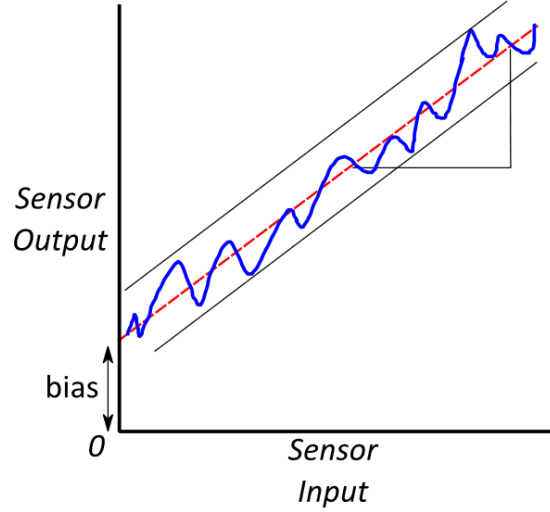
Şekil 2.12 Manyetoresistif Sensörü Alıgilama Bölgesi [14]

3.ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ HATA PARAMETRELERİ

Ataletsel sensörlerin fiziki yapılarından dolayı çeşitli hata kaynaklarına sahiptir. Bu hatalar ikiye ayrılır; deterministik ve olasılıksal hatalar. Sabit kayma (bias) hatası, orantı katsayısı hatası, eksen kaçıklık hatası ve ivmeye bağlı orantı katsayısı hatası deterministik hata kaynaklarıdır. Sabit kayma (bias) kararsızlığı, orantı katsayısı kararsızlığı ve sensör gürültüsü olasılıksal hata kaynaklarıdır. Deterministik hatalar olasılıksal hatalara göre daha kolay belirlenir ve telafi edilir. Çeşitli laboratuvar testleriyle deterministik hatalar telafi edilip kalibrasyonu yapılabilir.

3.1 Sabit Kayma (Bias) Hatası

Sabit kayma hatası, ivmeölçerin ve dönüölçerin herhangi bir ivme ve dönü hareketi uygulanmadığı durumda ölçülen çıkışıdır. Laboratuvar testleri sonucu bu hatanın tahmin edilip düzeltilebilir. İvmeölçer için g veya mg, dönüölçer için °(derece)/saniye ile ifade edilir.

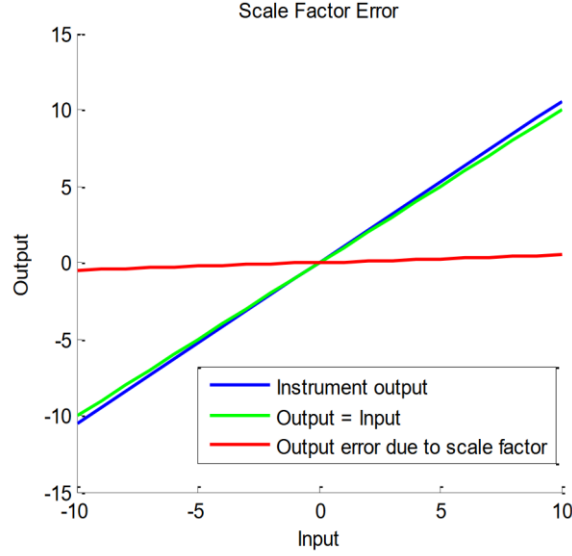


Şekil 3.1 AÖB Sabit Kayma Hatası Gösterimi [17]

3.2 Orantı Katsayısı Hatası

Orantı katsayısı hatası, sensör çıkışındaki değişimin giriş değişimine oranıdır. Bir ivme veya dönü uygulandığında, sensör ideal ölçüm eğrisinden kayar. Elde edilen ölçüm eğrisi ile ideal ölçüm eğrisi arasındaki oran orantı katsayısı hatasını verir. Sensör enstrumantasyonundaki elektriksel sinyalin bilgi sinyaline çevrilmesinden

kaynaklanır. İdeal AÖB'nin orantı katsayısı hatası 1'dir. Orantı katsayısı hatası yüzde(%) veya ppm olarak ifade edilir.



Şekil 3.2 AÖB Orantı Katsayısı Hatası Gösterimi [18]

3.3 Eksen Kaçıklık Hatası

Eksen kaçıklık hatası, harici ve dahili olmak üzere ikiye ayrılır. AÖB'nin oluşturulması sırasında 3 eksenli ivmeölçer ve dönüölçer sensörlerinin birbirlerine dik monte edilememesi harici hatadır. İvmeölçer ve dönüölçer sensörlerinin üretimi sırasında oluşan kaçıklık ise dahili hatadır. Bu hatanın sonucunda Ölçüm yapılan eksen de görülen değer doğru değildir. Bunun için eksenlerin birbirlerine göre olan kaçıklıkları hesaba katılmalıdır. Laboratuvar testleri sonucunda sensör eksenlerinin ayrı ayrı birbirlerine göre hataları bulunabilir. Bu hata her iki sensör için de mrad cinsinden edilir.

3.4 İvme Bağımlı Orantı Katsayısı Hatası

Dönüölçerlere ivme uygulandığında, ölçümde değişim gözlenir. Dönüölçerler için ivme etkisinin neden olduğu bu hata ivme bağımlı orantı katsayısı hatasıdır. Laboratuvar testleri ile bu ivmeye bağımlı katsayı belirlenebilir. Bu katsayı °/saniye/g ile ifade edilir.

3.5 Sensör Gürültüsü

Yüksek frekans kaynaklı hata bileşenlerini içeren gürültüdür. Sensör gürültüsünün etkileri sayısal filtreleme teknikleriyle azaltılabilir. Bu hata bileşenleri arasında en baskın olanlar hız/açı rasgele yürüyüş, oransal rasgele yürüyüş, sabit kayma kararsızlığı, kuantalama gürültüsüdür.

Sensör gürültüsü (3.1)'deki denklemde hata bileşenleri ile ifade edilmiştir [2].

$$n(t) = N(t) + Q(t) + B(t) + R(t) + s(t) \quad (3.1)$$

n(t): toplam sensör gürültüsü

N(t) : açı, hız rasgele yürüyüş

Q(t) : kuantalama gürültüsü

B(t) : sabit kayma kararsızlığı

R(t) : oransal kayma rasgele yürüyüş

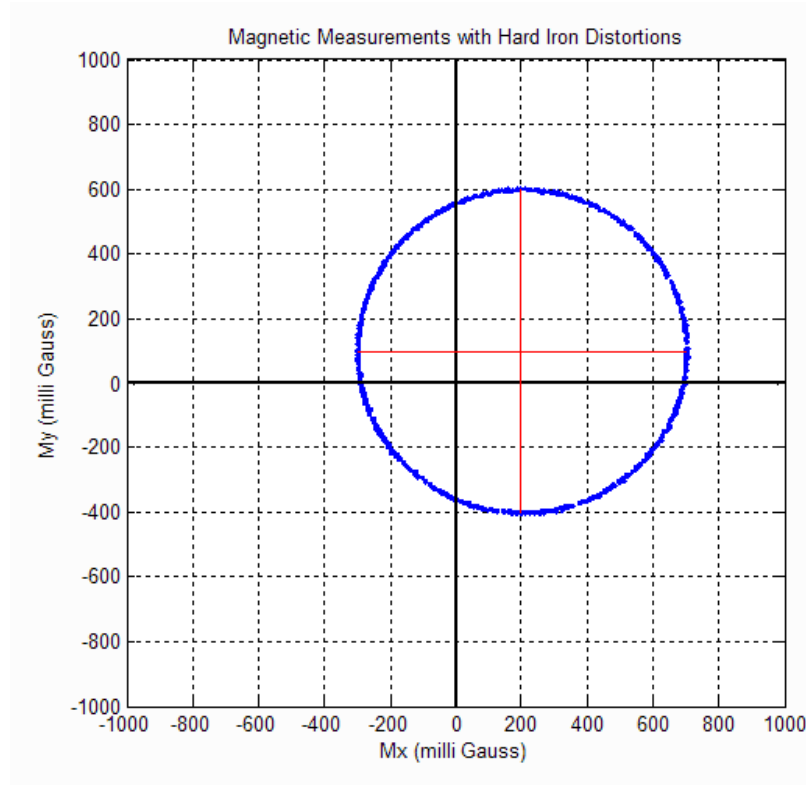
s(t) : sinuzoidal gürültü

4. MANYETOMETRE HATA PARAMETRELERİ

Sensörü çevreleyen ferromanyetik bileşenlerin oluşturduğu hatalardır. Bu hatalardan ilki sert-demir bozulması, ikincisi yumuşak-demir bozulmasıdır.

4.1 Sert-Demir Bozulması

Sert-demir bozulması, sensör çevresindeki ferromanyetik materyallerin oluşturduğu bozulmadır. Bu ek kalıcı hata manyetometrenin 3 ekseninde de görülür [19]. İdeal manyetometrede (0,0) noktası etrafında bir iki eksenli(x,y) manyetik ölçüm grafiği görünür. Fakat sert-demir bozulması etkisine bağlı olarak ölçüm grafiği (0,0) noktasından kayar.

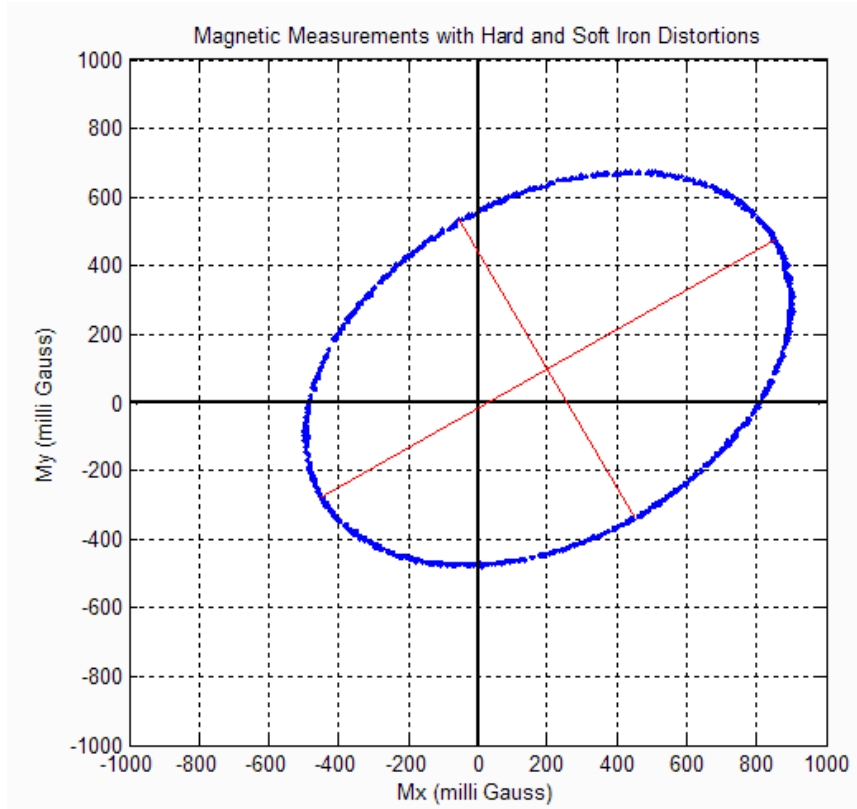


Şekil 4.1 Sert-Demir Bozulması Gösterimi [20].

Bu hatanın etkileri iki eksenli ölçüm grafiği ile kolayca görülebilir. Ölçüm grafiğinin (0,0) noktasından kayma değerleri, ölçüme değerlerinden bir hata sabiti olarak çıkarılarak sert-demir bozulması kolayca telafi edilebilir [20],[21].

4.2 Yumuşak-Demir Bozulması

Yumuşak-demir bozulması, tabiatı gereği sert-demir bozulmasına benzer, üstelik dünyanın manyetik alanına eklenmiş bir manyetik alan bir davranışı sergiler [19]. Yumuşak-demir bozulması iki eksenli manyetik ölçüm grafiğinde(x,y) eliptik bir yapı oluşturur. Sert-demir bozulması yönelimden bağımsız olarak sabitken, yumuşak-demir bozulması ölçüm grafiğinde oluşturduğu eliptik yapı nedeniyle sensörün yönelimine bağlı olarak değişkenlik gösterir [20].



Şekil 4.2 Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Gösterimi [20].

Yumuşak-demir bozulması tek bir hata sabiti ile telafi edilemez. Telafi için daha karmaşık bir yöntem izlenilir [19]. Bunun için eliptik büyük ve küçük eksenleri, trigonometrik fonksiyonların yardımıyla (x,y) ölçüm eksenlerine denkleştir. Eliptik büyük eksenler arasındaki oran, orantı katsayısı olarak kullanılır.

5. AÖB HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

Bu bölümde AÖB deterministik hata parametrelerinin nasıl belirlendiği ve deterministik hata modeli belirtilecektir. Diğer yandan olasılıksal hataların kestirimi için gerekli yöntemlerden bahsedilecektir.

3 eksenli ivmeölçer için hata modeli (5.1)'deki denklem ile belirtilmiştir [22].

$$\begin{bmatrix} \widetilde{a}_x \\ \widetilde{a}_y \\ \widetilde{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$\widetilde{a}_x, \widetilde{a}_y, \widetilde{a}_z$: İvmeölçer çıkışları

a_x, a_y, a_z : Gerçek ivme değerleri

S_x, S_y, S_z : Orantı katsayısı hataları

$M_{xy}, M_{xz}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}, M_{zy}$: Eksen kaçıklık hataları

B_x, B_y, B_z : Sabit kayma hataları

n_x, n_y, n_z : Rassal sensör gürültüleri

3 eksenli dönüölçer için hata modeli (5.2)'deki denklem ile belirtilmiştir [22].

$$\begin{bmatrix} \widetilde{w}_x \\ \widetilde{w}_y \\ \widetilde{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & B_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & B_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$\widetilde{w}_x, \widetilde{w}_y, \widetilde{w}_z$: Dönüölçer çıkışları

w_x, w_y, w_z : Gerçek dönü değerleri

S_x, S_y, S_z : Orantı katsayısı hataları

$M_{xy}, M_{xz}, M_{yx}, M_{yz}, M_{zx}, M_{zy}$: Eksen kaçıklık hataları

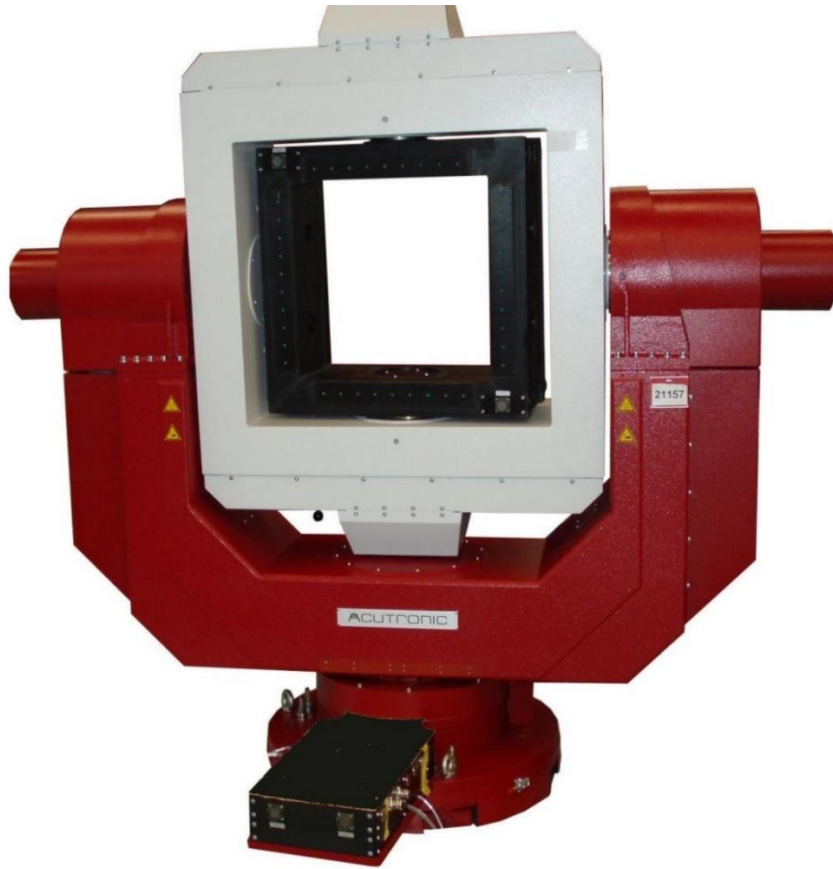
B_x, B_y, B_z : Sabit kayma hataları

B_{gx}, B_{gy}, B_{gz} : İvme bağımlı sabit kayma hataları

n_x, n_y, n_z : Rassal sensör gürültüleri

5.1 Deterministik Hataların Kestirimi

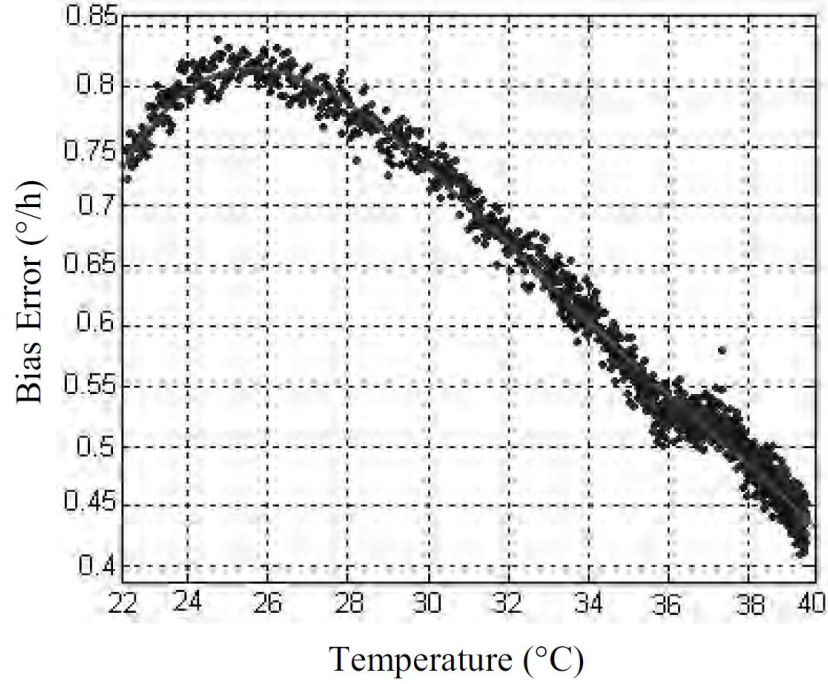
Deterministik hatalar, laboratuvar kalibrasyon testleri ile belirlenir. İvmeölçer için farklı yönelimlerde, dönüölçer için farklı açısız hızlarda olmak üzere AÖB kalibrasyon testleri gerçekleştirilir. Literatürde iki metot yer almaktadır. Bunlar, 6 pozisyonlu testler ve çoklu pozisyonlu testlerdir [2],[22]. Testler genellikle 3 eksenli ivmeölçer ve dönüölçer barındıran AÖB'ler için 2 ve 3 eksenli dönü tablalarında yapılır. Bu tablalar sayesinde AÖB'ye hassas dönü ve ivme girişleri uygulayarak, AÖB'nin tepkisi analiz edilir [22]. Bu analizlerin sonucunda da deterministik hata parametrelerine ulaşılabilir.



Şekil 5.1 3 Eksenli Dönü Tablası [23]

5.2 AÖB Sıcaklık Bağımlı Hatası

AÖB'nin sabit kayma, eksen kaçıklık ve orantı katsayısı hatalarında sıcaklığa bağlı değişimler yaşanır. Bu deterministik hataların belirlenmesinden önce sıcaklığa bağlı değişimlerin kalibre edilmesi gereklidir [24]. Her bir deterministik hata için sıcaklığa bağlı değişimlerin bulunması gerekir.



Şekil 5.2 Fiber Optik Dönüölçer Sabit Kayma Hatası Sıcaklığa Bağlı Değişim Grafiği [25]

Kalibrasyon için gerekli katsayılar polinom uydurma yöntemi ile çıkarılır. Uydurulacak polinomun katsayısı sıcaklığa bağlı değişimler açısından önem arz etmektedir. Sıcaklığa bağlı değişime en iyi yakınsayacak şekilde polinomun derecesi seçilmelidir [2].

Sıcaklığa bağlı sabit kayma hatası polinom örneği aşağıda verilmiştir [2]:

$$B_x = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4 \quad (5.3)$$

B_x = sıcaklığa bağlı sabit kayma hatası

T = sıcaklık

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 = \text{polinom kaysayıları}$

Yukarıda sabit kayma hatası için verilmiş 4. dereceden polinomun katsayılarını farklı sıcaklıklarda ölçümler alınır. Farklı sıcaklıklarda ölçüm alınmış sabit kayma hatası verilerine polinom uydurma yöntemi uygulanır. Bu yöntem ile belirlenmiş polinom katsayıları denklemde yerine konularak AÖB'nin belli bir andaki sıcaklığa bağlı sabit kayma katsayı hatası bulunur. AÖB'nin ham çıkışından sıcaklığa bağlı sabit kayma hatası çıkarılarak AÖB'nin sabit kayma hatası sıcaklığa göre kalibre edilir.

Bu tezde olasılıksal hataların belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden önce AÖB'nin ham sabit kayma değerleri sıcaklığa bağlı kalibre edilmiştir.

5.3 Deterministik Hata Telafi Modeli

İvmeölçer deterministik hata parametrelerinin belirlenmesiyle ivmeölçer hata telafi modeli (5.4)'deki denklem ile belirtilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \widehat{a}_x \\ \widehat{a}_y \\ \widehat{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \widetilde{a}_x \\ \widetilde{a}_y \\ \widetilde{a}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \right) \quad (5.4)$$

\widetilde{a} : Hatalı ivmeölçer çıkışı

\widehat{a} : Hatası telafi edilmiş ivmeölçer çıkışı

Dönüölçer deterministik hata parametrelerinin belirlenmesiyle ivmeölçer hata telafi modeli (5.5)'deki denklem ile belirtilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \widehat{w}_x \\ \widehat{w}_y \\ \widehat{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 + S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 + S_z \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \widetilde{w}_x \\ \widetilde{w}_y \\ \widetilde{w}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & B_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & B_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{a}_x \\ \widehat{a}_y \\ \widehat{a}_z \end{bmatrix} \right) \quad (5.5)$$

\widetilde{w} : Ham dönüölçer çıkışı

\widehat{w} : Hatası telafi dönüölçer çıkışı

5.4 Olasılıksal Hataların Kestirimi

AÖB olasılıksal hataların kestirimi, AÖB performansını öğrenme ölçmek için oldukça gereklidir. AÖB sensör verileri üstünde büyük etkiye sahip bu hataların kestiriminin yapılması oldukça önemlidir. Böylelikle kestirilen hata parametreleri, ölçüm alınan AÖB sensörü hakkında performans kriteri olarak kullanılabilir.

AÖB olasılıksal hata parametrelerinin belirlenmesi için güç tayf yoğunluğu ve Allan deviasyon teknikleri bu bölümde anlatılmıştır.

5.4.1 Güç tayf yoğunluğu (Power spectral density)

Güç tayf yoğunluğu(GTY) , bir sinyali veya zaman serisini analiz etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Literatürde, GTY frekans kümesindeki güç dağılımını tanımlar [26]. GTY ataletsel sensör hata terimleri için tanımlayıcı özellik taşır. Verideki gürültü miktarını belirten, güç frekans bileşenleri ile ilgili bilgi içerir [2].

GYT (5.6)'daki denklemde verilmiştir.

$$S_x(jw) = F[R_x(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-jw\tau} d\tau \quad (5.6)$$

$S_x(jw)$: Güç Tayf Yoğunluğu

$R_x(\tau)$: Verinin Otokorelasyonu

$F[]$: Fourier Dönüşümü

(5.6)'daki denklem aynı zamanda GTY ile otokorelasyon fonksiyonunun ilintisini gösterir [2]. Diğer bir yaklaşım olan geniş zaman aralığı (T) için belli bir periyottaki verinin bekleneni alınmış denklem (5.7)' de gösterilmiştir.

$$S_x(jw) = E \left[\frac{1}{T} |F\{x_T(t)\}|^2 \right] \quad (5.7)$$

$S_x(jw) : \text{Güç Tayf Yoğunluğu}$

$F[] : \text{Fourier Dönüşümü}$

Sürekli zaman sinyali için tek taraflı güç tayf yoğunluk denklemi (5.8)'de verilmiştir. Ayırık zaman sinyalleri kullanacağımız için (5.9)'daki denklem kullanılarak ayırık frekans bileşenlerine ayırık Fourier dönüşümü yapılmıştır.

$$S^1(f) = \frac{1}{T} |X(f)|^2 \quad (5.8)$$

$S^1 : \text{Tek Taraflı Güç Tayf Yoğunluğu}$

$$X(f_j) \cong X_j \delta t, \quad j = 1, 2, 3, \dots, \left[\frac{N}{2} - 1 \right] \quad (5.9)$$

$X(f) : \text{Sürekli Fourier Dönüşümü}$

$\delta t : \text{Örnekleme Aralığı}$

$X_j : \text{Ayırık Fourier Dönüşümü}$

(5.9)'daki denklemi (5.8)'deki denkleme eklenerek, GTY fonksiyonunun ayırık tek taraflı eşitliğine ulaşılmıştır. Ayırık GTY fonksiyonu (5.10) ve (5.11)'daki denklemlerde gösterilmiştir.

$$N \text{ tek ise,} \quad S^1(f_j) = \frac{\delta t^2}{T} |X_j|^2 \quad (5.10)$$

$$N \text{ çift ise,} \quad S^1(f_j) = \frac{\delta t^2}{2T} |X_j|^2 \quad (5.11)$$

Lineer bir sistem için çıkış GTY, giriş GTY ve transfer fonksiyonunun genlik eşlenik çarpımlarından oluşur. Giriş ve çıkış GTY matrislerinin sistemin transfer fonksiyonu ile ilişkisi aşağıda belirtilmiştir.

$$S_o(w) = H(jw) S_i(w) H^{*T}(jw) \quad (5.12)$$

H: Transfer fonksiyon matrisi

*H^{*T}: Eşlenik transfer fonksiyon matrisinin transpozu*

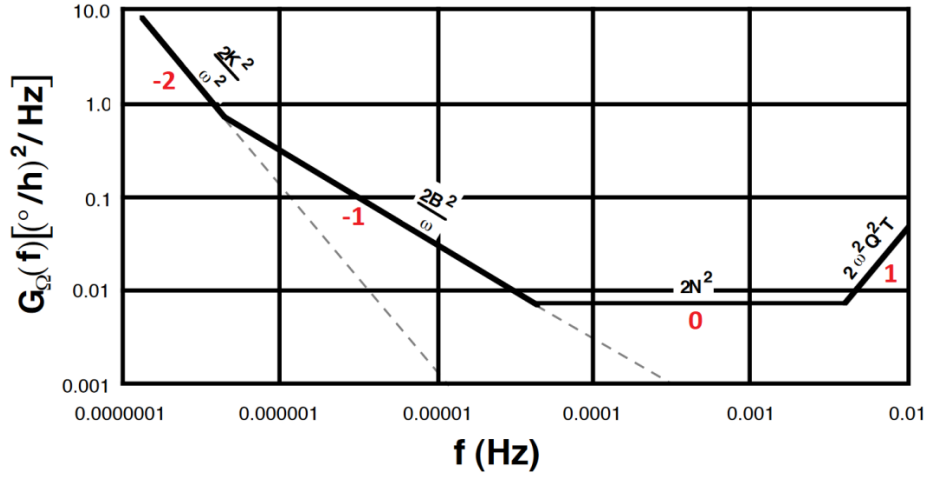
S_o: Çıkış GTY

S_i: Giriş GTY

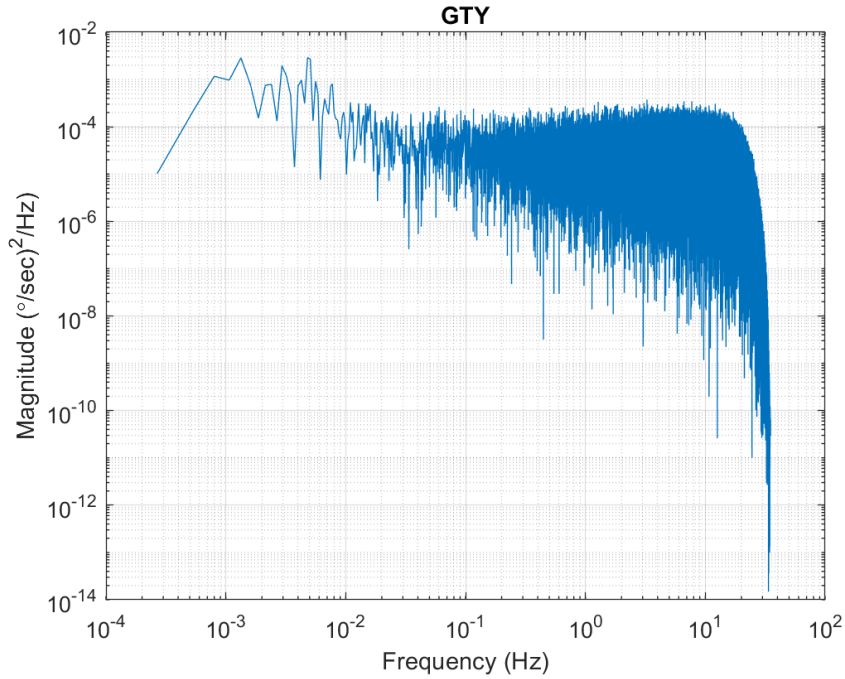
Giriş GTY'yi sabit bir değer olarak beyaz gürültü varsayarsak, çıkış GTY sistemin transfer fonksiyonunu verir. Beyaz gürültüyü uygulama ve transfer fonksiyonunu oluşturma yöntemi bu anlamda rassal modelleme için büyük önem arz etmektedir.

Rassal modellemede giriş ile ilgili direk bir bağlam olmasa da beyaz gürültü uygulanmış varsayılan bir model aynı çıkış karakteristiklerine sahiptir. Bu nedenle, eğer giriş beyaz gürültü ise doğrusal zamana bağlı değişmeye sistemin transfer fonksiyonunu çıkış GTY ile kestirilebilir. Faz bilgisi sadece genlik tepkisi ile belirlenir. Böylelikle doğrusal zamana bağlı değişmeyen sistem için beyaz gürültü girişi varsayımıyla sadece çıkış bilgisini kullanarak bilinmeyen modeli karakterize etmek mümkündür [27],[28].

GTY fonksiyonunun loglog grafik çizimi farklı eğimler oluşturur. Bu eğimleri kullanılarak farklı hata terimlerine ulaşmak mümkündür. Eğimin -2 olduğu bölge oransal rasgele yürüyüş, -1 olduğu bölge sabit kayma kararsızlığı, 0 olduğu bölge açı/hız rasgele yürüyüş, +1 olduğu bölge ise kuantalama gürültüsüdür. [2].



Şekil 5.3 GTY Loglog Çizimi ve Hata Terimlerini İçeren Eğimler [28].



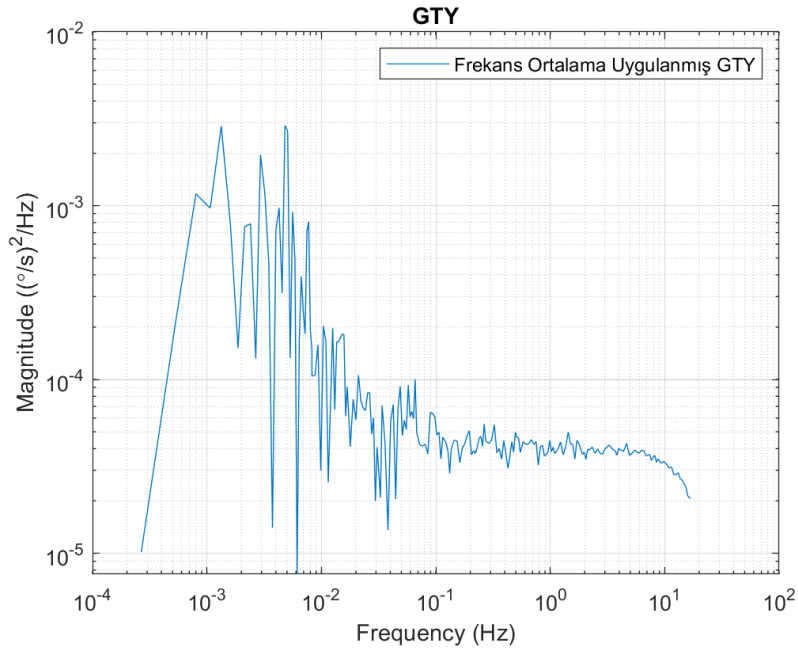
Şekil 5.4 Sensör Verisinin GTY Örneği

AÖB'den elde edilen verilerle oluşturulmuş GTY sonucu loglog çizimi ile Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Loglog çizim sonucu grafiğin yüksek frekans noktalarında verinin saçaklanmasından dolayı, hata terimlerini ayrıştırma ve elde etme oldukça zordur. Bu saçaklanma probleminin çözümü frekans ortalaması tekniğidir [29]. Bu teknik GTY'nin verilerinin yüksek frekans noktalarındaki veri sayısını ortalama olarak

azaltır. Böylelikle, frekans ortalaması tekniği uygulanmış GTY verileri ile AÖB hata terimleri daha kolay bulunabilir [2].

Tablo 5.1 32768 Adet Verinin Frekans Ortalama Tekniği Tablo Gösterimi [28]

Veri Aralığı	Aralıkta Yer Alan Veri Sayısı	Aralıkta Yer Alan Verinin Sırasıyla Ortalaması Alınacak Nokta Sayısı	Gösterilecek Veri Sayısı	Ortalama Seviyesi
1-32	32	1	32	0
33-64	32	2	16	1
65-128	64	4	16	2
129-256	128	8	16	3
257-512	256	16	16	4
513-1024	512	32	16	5
1025-2048	1024	64	16	6
2049-4096	2048	128	16	7
4097-8192	4096	256	16	8
8193-16384	8192	512	16	9
16385-32768	16384	1024	16	10

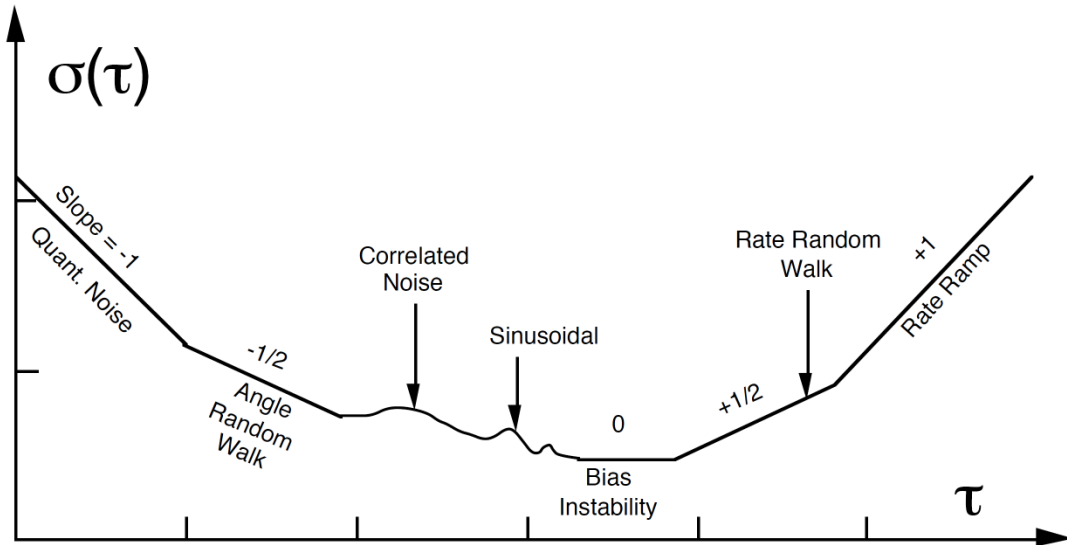


Şekil 5.5 Sensör Verisinin Frekans Ortalama Tekniği Uygulanmış GTY Örneği

5.4.2 Allan deviasyon

İlk başlarda Allan deviasyon metodu, osilatör kararsızlık hatalarının saptanması için kullanılmaya başlandı [27]. Bu hataların ataletsel sensör hatalarına yakınlık gösterdiğini belirten çalışmalar sonucu bu metodun ataletsel sensör hatalarının belirlenmesinde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır [2],[27]. Allan deviasyon metodu IEEE tarafından rassal ataletsel sensör hatalarının belirlenmesi için uygun bir yöntem olarak 1997 yılında kabul görmüştür [28].

Allan deviasyon yöntemi verinin zaman kümesi analizini yaparak, ataletsel sensör gürültüsünün hata parametrelerini ortaya çıkarır [2]. Bu yöntem, sensör gürültüsünün belirli bir terim tarafından üretildiğini varsayar [27] ve verinin gürültü karakterinin standart sapmasını hesaplayarak bir Allan varyans eğrisi oluşturur. Bu eğri ataletsel sensörlerin rassal hata terimlerinin belirlenmesinde kullanılır.



Şekil 5.6 Allan Deviasyon Eğrisi ve Hata Terimlerini İçeren Eğimler [28].

5.4.3 Allan deviasyon eğrisinin oluşturulması

Allan deviasyon tekniği dt örnekleme zamanı ile örneklenmiş toplamı N adet olan veriyi ardışık n taneli gruplara ayırır ($n < N/2$ olmak şartıyla). n taneli grupların oluşturduğu veri sayısı seçilen τ değerine bağlıdır ($n = \frac{\tau}{dt}$). İlk grup için $\tau_1 = \tau$ iken, ikinci grup için $\tau_2 = 2\tau$ olur. Ardışık gruplar için $\tau_k = k\tau$ 'dir. Buna bağlı olarak her gruplandırılmış verilerinin hesaplanacak ortalama değerleri için n değeri

güncellenmiş olur. Seçilen τ değeri ardışık gruplarda hesaplanacak Allan deviasyon eğrisinin işlem yükünü belirler.

Gürültü karakteristiğini ortaya çıkarmak için diğer tekniklere oranla Allan deviasyon tekniği daha fazla veriye ihtiyaç duyar [2].

Allan deviasyon eğrisi oluşturulma işleyişi şöyledir [2];

- τ (grup zamanı) belirlenir.
- Önceden belirlenmiş τ değerleri kullanılarak verinin tamamı bu grup zamanlarına göre ayrıştırılır ve her τ değerine karşılık gelen grupların ortalaması alınır.
- Bu ortalama değerleri $y(i)$ ile belirtelim. $y(i)$, n taneli grupların oluşturduğu ortalama değeridir. (i tamsayı, $i \geq 0$)
- Her bir τ değerine karşılık gelen $\sigma(\tau)$ değeri aşağıdaki denkleme göre hesaplanır:

$$\sigma(\tau) = \left[\frac{1}{2M} \sum_{i=0}^{M-1} (y(i+1) - y(i))^2 \right]^{1/2} \quad (5.13)$$

$$M = \left[\frac{dt}{\tau_k} - 1 \right]$$

$dt = \text{örnekleme aralığı}$

- Her τ değerine karşılık gelen $\sigma(\tau)$ değeri için loglog çizimi yapılır.
- Ölçüm değerleri ile $\sigma(\tau)$ değerlerinin birimi aynıdır.

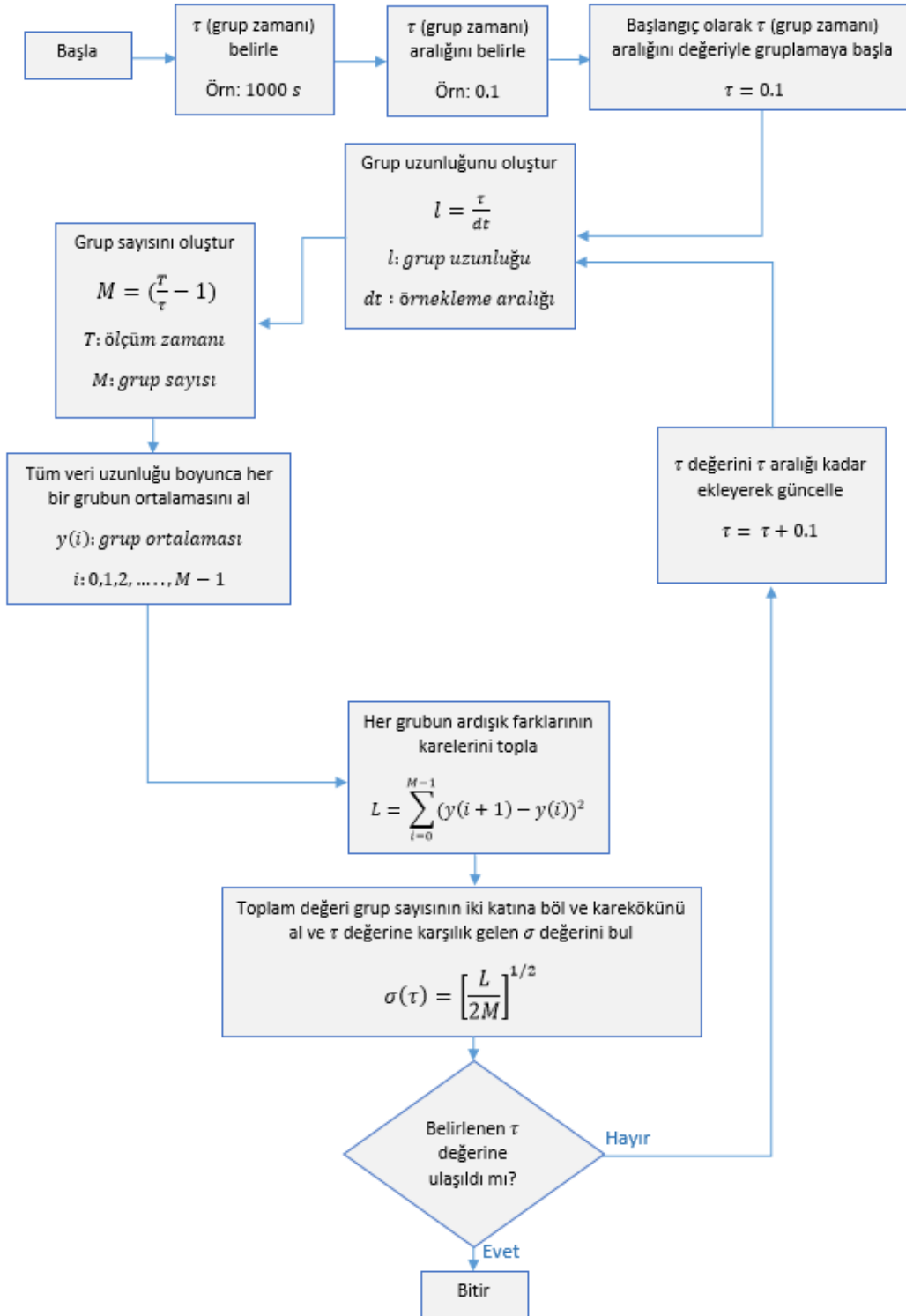
Allan deviasyon ile GTY arasındaki ilişki (5.14)'deki denklemden gösterilmiştir [28].

Allan deviasyon değeri GTY'nun $\frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$ transfer fonksiyonu ile filtreden geçirilmiş hali ile orantılı bir değerdir. Bu transfer fonksiyonu Allan deviasyon metodunun gruplama işleminin sonucunda ortaya çıkmıştır [27].

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (5.14)$$

$S_{\Omega}(f) = \text{rassal sürecin güç tayf yoğunluğu}$

Allan deviasyon eğrisinin hesaplama adımları Şekil 5.7'deki akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Allan Deviasyon Akış Şeması

5.4.4 Hata parametrelerinin çıkarımı

5.4.4.1 Kuantalama gürültüsü

Bu hata, analog sinyalin sayısal sinyale çevrilmesi sonucu ortaya çıkar. Bunun nedeni örneklenen sinyalin gerçek değeri ile analog-sayısal çeviricinin bit çözünürlüğünün arasındaki farktan kaynaklıdır [27],[30].

Kuantalama gürültüsünün GTY denklemi (5.16)'da verilmiştir [28].

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (5.15)$$

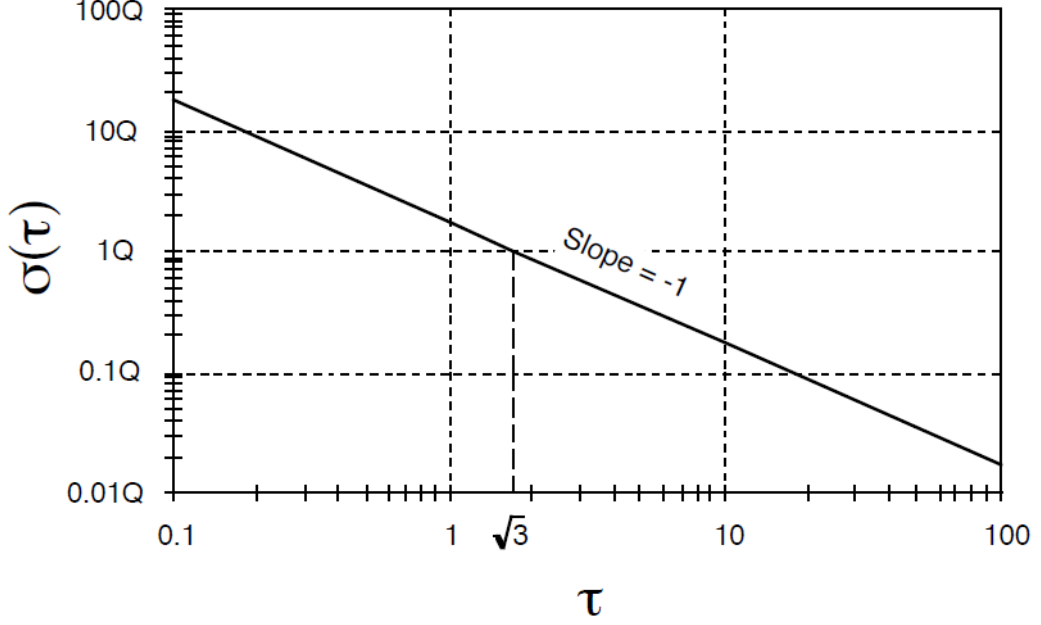
$$S_{\Omega}(f) = \frac{4Q_z^2}{\tau_z} \sin^2(\pi f \tau_z) \approx (2\pi f)^2 \tau_z Q_z^2, \quad f < \frac{1}{2\tau_z} \quad (5.16)$$

Q_z : kuantalama hata katsayısı

(5.16)'daki denklem (5.15)'de yerine konulduğunda ve tümlev işlemi alındığında (5.18)'daki denklem elde edilir.

$$\sigma^2(\tau) = \frac{3Q^2}{\tau^2} \quad (5.17)$$

$$\sigma(\tau) = Q \frac{\sqrt{3}}{\tau} \quad (5.18)$$



Şekil 5.8 Kuantalama Gürültüsü Çizimi [28].

Kuantalama gürültüsü, Allan deviasyon eğrisinin -1 eğimli eğrisi ile denklemin kesiştiği noktadaki τ değerinin denklemde karşılık gelen Q değeridir.

5.4.4.2 Hız/Açı rasgele yürüyüş

Hız/Açı rasgele yürüyüş hatası tüm ataletsel sensör tipleri için baskın bir hatadır [31],[24]. Hız/Açı rasgele yürüyüş frekans değer kümesinde sabit değere sahiptir. Hız/Açı rasgele yürüyüş hata sabitinin, GTY fonksiyonu gösterimi (5.20)'deki denklemde verilmiştir [27].

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (5.19)$$

$$S_{\Omega}(f) = N^2 \quad (5.20)$$

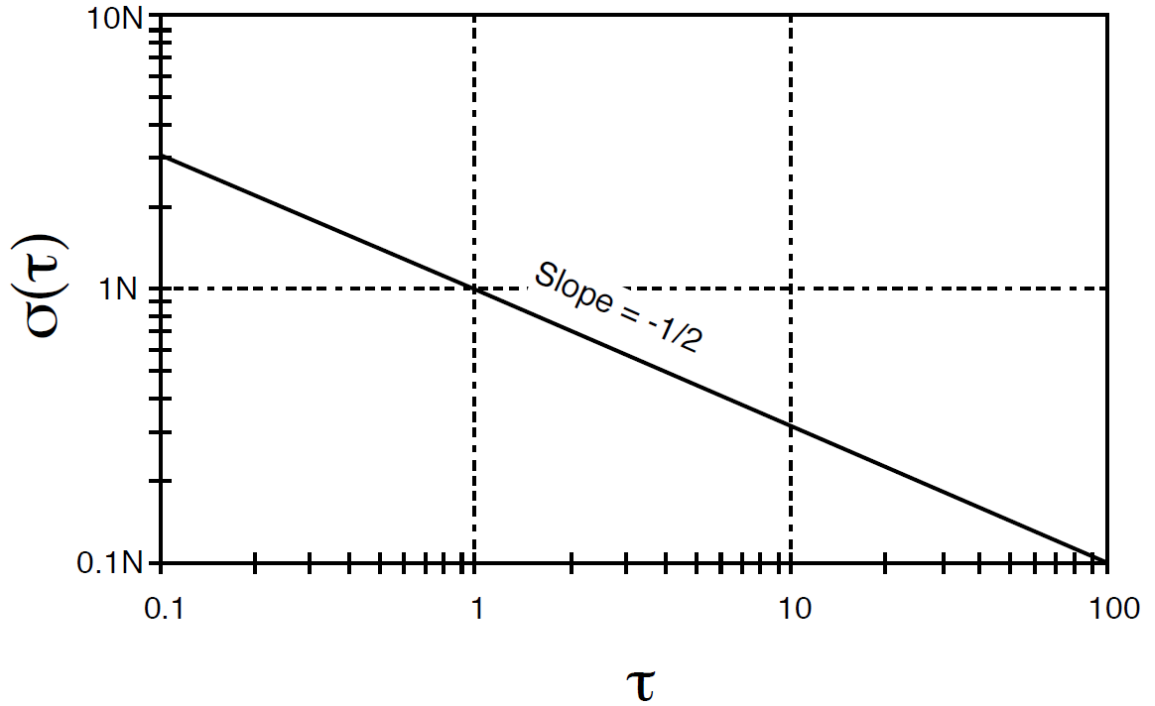
N^2 : hız – açı rasgele yürüyüş parametresi

$$\sigma^2(\tau) = \frac{4}{\pi \tau} \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(u)}{(u)^2} du, \quad u = \pi f \tau \quad (5.21)$$

(5.20)'deki denklem (5.19)'da yerine konulduğunda ve tümlev işlemi alındığında (5.23)'deki denklem elde edilir [27].

$$\sigma^2(\tau) = \frac{N^2}{\tau} \quad (5.22)$$

$$\sigma(\tau) = \frac{N}{\sqrt{\tau}} \quad (5.23)$$



Şekil 5.9 Hız/Açı Rasgele Yürüyüş Çizimi [28]

Hız/Açı rasgele yürüyüş Allan deviasyon eğrisinde $-1/2$ eğimli bir eğriye karşılık gelmektedir. Bu nedenle, (5.23)'deki denklemden yola çıkarak, hız/açı rasgele yürüyüş hata parametresi $-1/2$ eğimli eğrinin kesiştiği noktadaki τ değerinde karşılık gelen N değerine eşittir. Dönüölçer için açı rasgele yürüyüş birimi deg/\sqrt{h} , ivmeölçer için hız rasgele yürüyüş birimi $m/s\sqrt{s}$ veya g/\sqrt{Hz} ile ifade edilir [2]. Dönüölçer için $1h = 3600s$ çevrimi yapılmalıdır.

5.4.4.3 Sabit kayma kararsızlığı

Sabit kayma kararsızlığı düşük frekanslı bir hata terimidir. Sabit kayma kararsızlığının GTY yüksek frekanslarda sıfırdır. Allan deviasyon eğrisinde küçük τ değerlerinde sabit kayma kararsızlığı hesaplanamaz [2].

Sabit kayma kararsızlığının GTY (5.25)'deki denklemde verilmiştir [28].

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (5.24)$$

$$S_{\Omega}(f) = \left(\frac{B^2}{2\pi} \right) \frac{1}{f}, \quad f \leq f_c \quad (5.25)$$

$B =$ sabit kayma kararsızlığı parametresi

$f_c =$ kesim frekansı

$$\sigma^2(\tau) = \frac{4}{\pi \tau} \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(u)}{(u)^2} du, \quad u = \pi f \tau$$

(5.25)'deki denklem (5.24)'de yerine konulduğunda (5.26)'daki denklem elde edilir [27].

$$\sigma^2(\tau) = \frac{2B^2}{\pi} \int_0^{\pi \tau f_c} \frac{\sin^4(u)}{(u)^3} du, \quad u = \pi f \tau \quad (5.26)$$

(5.26)'daki tümlev işlemi alındığında (5.29)'daki denklem elde edilir [28].

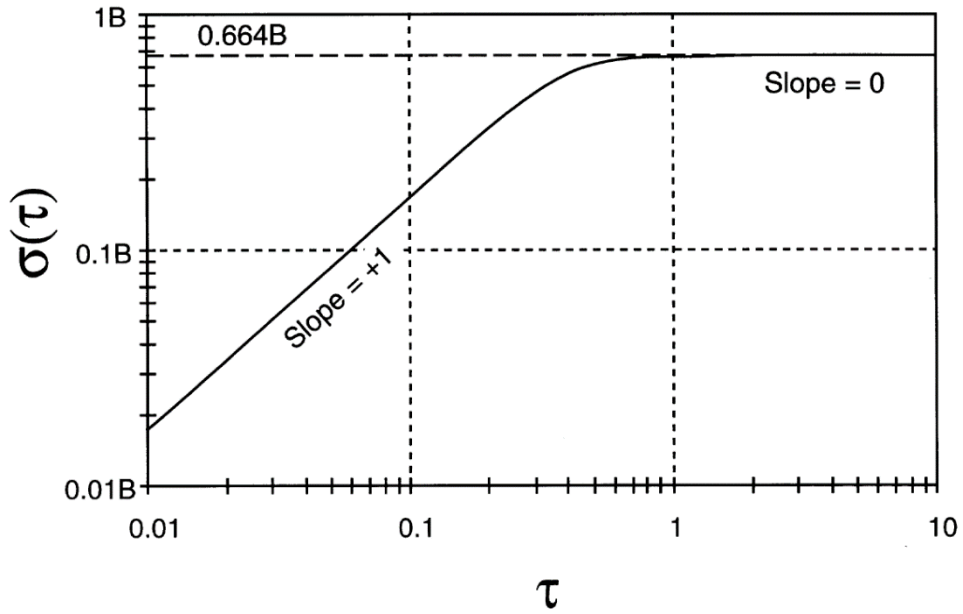
$$\sigma^2(\tau) = \frac{2B^2}{\pi} \left[\ln 2 - \frac{\sin^3 u}{2u^2} (\sin u + 4u \cos u) + C_i(2u) - C_i(4u) \right] \quad (5.27)$$

$$u = \pi f_c \tau$$

$$\sigma^2(\tau) \rightarrow 0, \quad \tau \ll \frac{1}{f_c}$$

$$\sigma^2(\tau) \rightarrow \frac{2B^2}{\pi} \ln 2, \quad \tau \gg \frac{1}{f_c} \quad (5.28)$$

$$\sigma(\tau) \rightarrow \sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi}} B \cong 0.664B, \quad \tau \gg \frac{1}{f_c} \quad (5.29)$$



Şekil 5.10 Sabit Kayma Kararsızlığı Çizimi [28].

Allan deviasyon eğrisinde de görüldüğü gibi $f_c \ll \frac{1}{\tau}$ için $\sigma(\tau)$ değeri +1 eğimli eğri üzerinde devam edip kesim frekansının üstündeki τ değerleri için $0.664B$ değerine ulaşır. Böylece eğrinin +1 eğimden 0 eğime döndüğü noktanın $\sigma(\tau)$ değerinin 0.664 katsayısına bölünmüş sonucu sabit kayma kararsızlığı hatasının değerini vermektedir [27].

5.4.4.4 Oransal rasgele yürüyüş

Oransal rasgele yürüyüş yüksek grup zamanında ortaya çıkar ve diğer gürültü terimlerine nazaran büyük τ değerlerinde gözlemlenebilir. Kısa zamanlı uygulamalar için kullanılacak bir ataletsel sensör için bu hata gözlemlenemeyebilir [2].

Bu hatanın GTY (5.30)'daki denklemde verilmiştir [28].

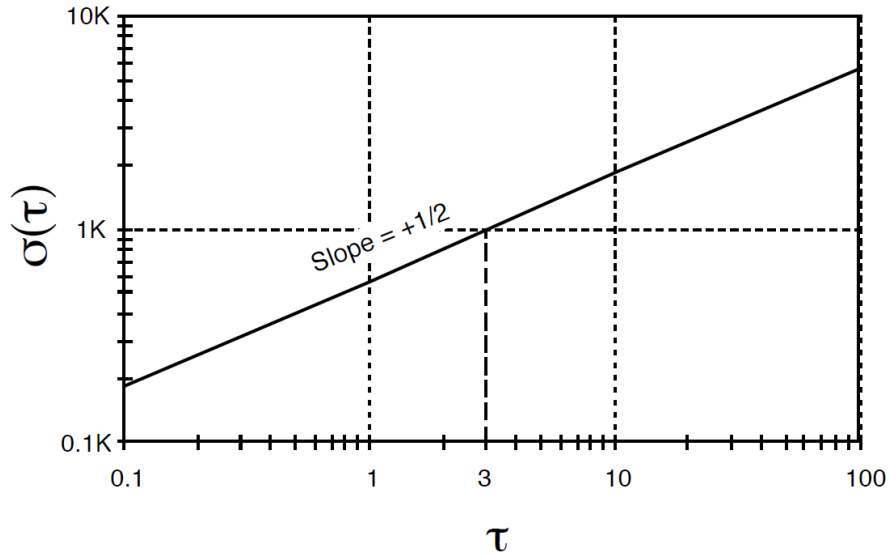
$$S_{\Omega}(f) = \frac{K^2}{(2\pi f)^2} \quad (5.30)$$

$K =$ oransal rasgele yürüyüş parametresi

(5.30)'daki denklem (5.24)'de yerine konulduğunda ve tümlev işlemi alındığında (5.32)'daki denklem elde edilir.

$$\sigma^2(\tau) = \frac{K^2 T}{3} \quad (5.31)$$

$$\sigma(\tau) = K \sqrt{\frac{T}{3}} \quad (5.32)$$



Şekil 5.11 Oransal Rasgele Yürüyüş Çizimi [28].

Oransal rasgele yürüyüş, Allan deviasyon eğrisinde +1/2 eğimli bir eğriye karşılık gelmektedir. Allan deviasyon eğrisinin +1/2 eğimli eğrisi ile denklemin kesiştiği noktadaki τ değerinin oransal rasgele yürüyüş hatasına karşılık gelen K değeridir.

5.5 Parametre Kestirimi İçin Önerilen Eğri Uydurma Yöntemleri

Önerilen eğri uydurma yöntemlerinin amacı, Allan deviasyon eğrisiyle bulunabilen baskın hata parametrelerinin, hızlı ve otomatikleştirilmiş biçimde kestirilmesini sağlayacak düzgün ve pürüzsüz eğrilerin oluşturulmasıdır. Eğri uydurma yöntemleri kullanılarak Allan deviasyon eğrisine yakınsayan bir eğri elde edilmeye çalışılacaktır.

Geleneksel polinom uydurma ve rasyonel polinom uydurma yöntemleri bu tez kapsamında irdelenmiştir.

- **Geleneksel Polinom Uydurma:** Bu yöntem sıcaklık kalibrasyonunda da kullanılmıştır. Uydurulan eğrinin performansını polinomun derecesi belirler. Allan deviasyon ile τ değerlerine karşılık gelen σ değerlerini kullanarak polinom uydurma yöntemi uygulanır. Belirlenen polinom katsayıları denklemde yerlerine konularak, her bir τ değerine karşılık gelen uydurulmuş değer bulunur.

Geleneksel polinom uydurma denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\sigma(\tau) = a_1\tau^n + a_2\tau^{n-1} + \dots + a_{n-1}\tau^2 + a_n\tau + a_{n+1} \quad (5.33)$$

$\sigma(\tau)$: τ değerine karşılık gelen uydurulmuş polinom değeri

τ : Zaman sabiti

$a_1, a_2 \dots a_n, a_{n+1}$: polinom katsayıları

- **Rasyonel Polinom Uydurma:** Rasyonel polinom uydurma yöntemi geleneksel yöntem ile benzerlik gösterir. Rasyonel polinom uydurma yönteminin geleneksel yöntemden farkı payda polinomunun da kullanılmasıdır. Yöntemin uygulanması Allan deviasyon ile τ değerlerine karşılık gelen σ değerlerini kullanarak pay ve payda polinomları belirlenmesi şeklindedir.

Rasyonel polinom uydurma denklemi (5.34) verilmiştir:

$$\sigma(\tau) = a_1\tau^n + a_2\tau^{n-1} + \dots + a_n\tau + a_{n+1}/(b_1\tau^n + \dots + b_n\tau + b_n) \quad (5.34)$$

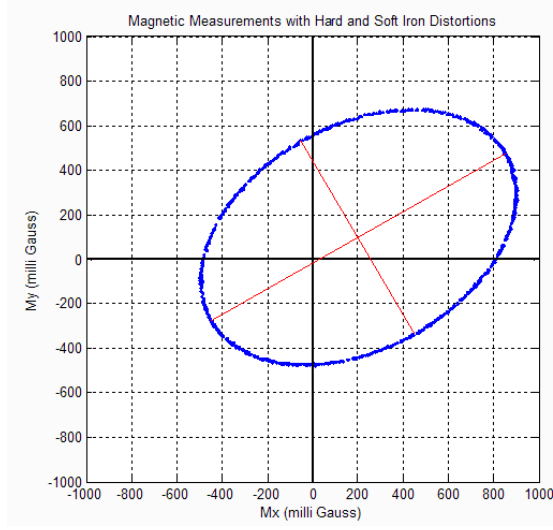
$\sigma(\tau)$: τ değerine karşılık gelen uydurulmuş polinom değeri

τ : Zaman sabiti

$a_1, a_2 \dots a_n, a_{n+1}$: pay polinomu katsayıları

$b_1, \dots b_n, b_{n+1}$: payda polinomu katsayıları

6. MANYETOMETRE HATALARININ KESTİRİMİ



Şekil 6.1 Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Gösterimi [20].

Sert-demir bozulması manyetometrenin iki eksenli(x,y) grafiğinde (0,0) noktasından kaydığı ofset değerleridir. Ofset değerleri manyetometrenin ölçüm değerlerinden çıkarılarak kolaylıkla sert-demir bozulması telafi edilebilir.

Sert-demir bozulması telafi modeli (6.4)'te verilmiştir.

$$HI_x = \frac{(\max(m_x) + \min(m_x))}{2} \quad (6.1)$$

$$HI_y = \frac{(\max(m_y) + \min(m_y))}{2} \quad (6.2)$$

$$HI_z = \frac{(\max(m_z) + \min(m_z))}{2} \quad (6.3)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{m}_x \\ \widehat{m}_y \\ \widehat{m}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{m}_x - HI_x \\ \widetilde{m}_y - HI_y \\ \widetilde{m}_z - HI_z \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

\widetilde{m} : Manyetometre çıkışı

\widehat{m} : Sert – Demir bozulması telafi edilmiş manyetometre çıkışı

Yumuşak-demir bozulması, sert-demir bozulmasındaki gibi basit bir ofset ile telafi edilmez. Yumuşak-demir bozulmasını telafi etmek için daha karmaşık bir yol izlemek gerekir. Daha düzgün sonuçlar elde etmek için yumuşak-demir bozulmasını telafi etmeden önce sert-demir bozulması telafisini yapmak gerekir.

Yumuşak-demir bozulması telafisinin ilk adımı olarak tüm eksenlerde (X, Y, Z) rotasyon matrisi kullanılarak eliptik r_{yz}, r_{zx}, r_{xy} büyük eksenleri ile kendi yatay eksenleri hizalanır. Temsili yumuşak-demir bozulmalarını gösteren eliptik ve büyük eksenleri hizalanmış grafikleri Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de gösterilmiştir.

$$\varphi = X - \text{ekseni dönüş açısı}$$

$$\theta = Y - \text{ekseni dönüş açısı}$$

$$\psi = Z - \text{ekseni dönüş açısı}$$

X – eksen rotasyon matrisi (6.5)'da verilmiştir [4].

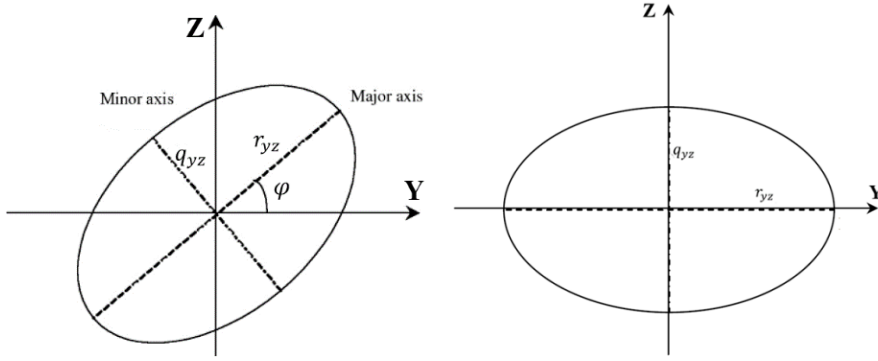
$$m_R = R_x m$$

$$m = \text{Ham manyetometre verisi}$$

$$m_R = \text{Eliptik eksen hizalanmış manyetometre verisi}$$

$$R_x = X \text{ eksen rotasyon matrisi}$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6.5)$$



Şekil 6.2 Manyetometre X – Ekseni Rotasyon Grafiği [19]

Y – ekseni rotasyon matrisi (6.6)'da verilmiştir [4].

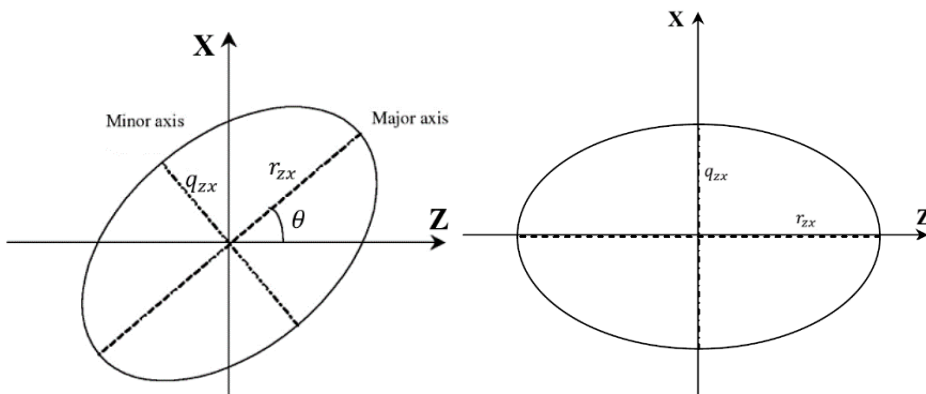
$$M_R = R_y M$$

m = Ham manyetometre verisi

m_R = Eliptik ekseni hizalanmış manyetometre verisi

R_y = Y ekseni rotasyon matrisi

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6.6)$$



Şekil 6.3 Manyetometre Y – Ekseni Rotasyon Grafiği [19]

Z – eksenli rotasyon matrisi (6.7)'da verilmiştir [4].

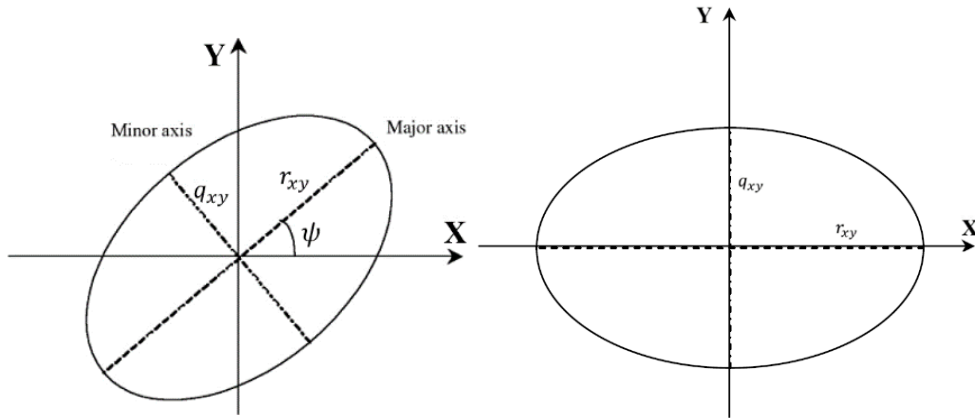
$$M_R = R_Z M$$

m = Ham manyetometre verisi

m_R = Eliptik eksenli hizalanmış manyetometre verisi

R_Z = Z eksenli rotasyon matrisi

$$R_Z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$



Şekil 6.4 Manyetometre Z – Eksenli Rotasyon Grafiği [19]

X, Y ve Z – eksenlerinin rotasyon matrisleri kullanılarak 3 eksenli rotasyon matrisi oluşturulur. 3 eksenli rotasyon matrisi (6.8)'da verilmiştir [3].

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & (-\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \theta \cos \psi) & (\sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi) \\ \cos \theta \sin \psi & (\cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi) & (-\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi) \\ -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}$$

3 eksenli rotasyon matrisi kullanılarak elipsoidin büyük eksenleri X, Y ve Z koordinatlarına hizalanır. Böylece yumuşak-demir bozulması telafisinin ilk adımı tamamlanmış olur.

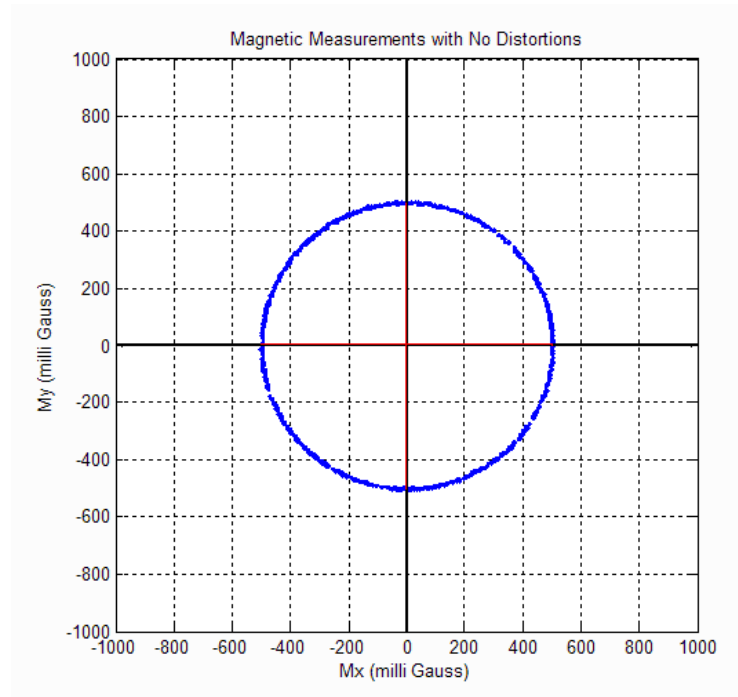
İkinci adım olarak 3 eliptik büyük eksenlerin ortalaması, her ikili eksen grafiğinin kendi büyük eksenine oranlanır. Bu oran orantı katsayısı olarak kullanılır.

X, Y ve Z eksenlerinin orantı katsayısı denklemleri (6.9)'da verilmiştir.

$$\alpha_x = \frac{r_{yz}}{\left(\frac{r_{yz}+r_{zx}+r_{xy}}{3}\right)}, \quad \alpha_y = \frac{r_{zx}}{\left(\frac{r_{yz}+r_{zx}+r_{xy}}{3}\right)}, \quad \alpha_z = \frac{q_{xy}}{\left(\frac{r_{yz}+r_{zx}+r_{xy}}{3}\right)} \quad (6.9)$$

$\alpha = \text{Orantı katsayısı}$

Sonuç olarak sert-demir ve yumuşak-demir bozulması telafi edilmiş manyetometre ölçüm verileri elde edilir. Sert-demir ve yumuşak-demir bozulması telafi edilmiş örnek manyetometre verisi Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Ölçüm Gösterimi [20]

7. BENZETİM SONUÇLARI

Tez kapsamında uygulanan benzetim sonuçları üç bölümde incelenmiştir.

Birinci bölümde AÖB'nin sıcaklığa bağımlı sabit kayma hatası belirlenerek bu hatanın giderilmesi için kalibrasyon çalışmaları yer almaktadır. Polinom uydurma yöntemi kullanılarak sıcaklığa bağlı sabit kayma hatasının giderilmesi amaçlanmıştır. Her eksen için uydurulan 1, 3 ve 5. dereceden polinomlar ayrı ayrı uygulanarak hata kalibrasyonu yapılmıştır. Polinom derecelerine göre kalibrasyon performansları karşılaştırılmıştır.

İkinci bölümde AÖB'nin olasılıksal hata parametrelerinin kestirim çalışmaları yer almaktadır. Olasılıksal hatalarının frekans ve zaman kümesini analizi için Allan deviasyon ve GTY yöntemlerine başvurulmuştur. Allan deviasyon ve GTY ile olasılıksal hataların kestirimi yapılmıştır. Sayısal filtreleme teknikleri kullanılarak olasılıksal hataların etkileri azaltılmaya çalışılmıştır. Sayısal filtreleme teknikleri uygulandıktan sonra güç tayf yoğunluğuna bakılarak açılı/hız rasgele yürüş parametresinin etkilerinin azaldığı görülmüştür. Önerilen polinom uydurma yöntemleri denenmiş ve Allan deviasyon eğrisine yakınsatılmaya çalışılmıştır.

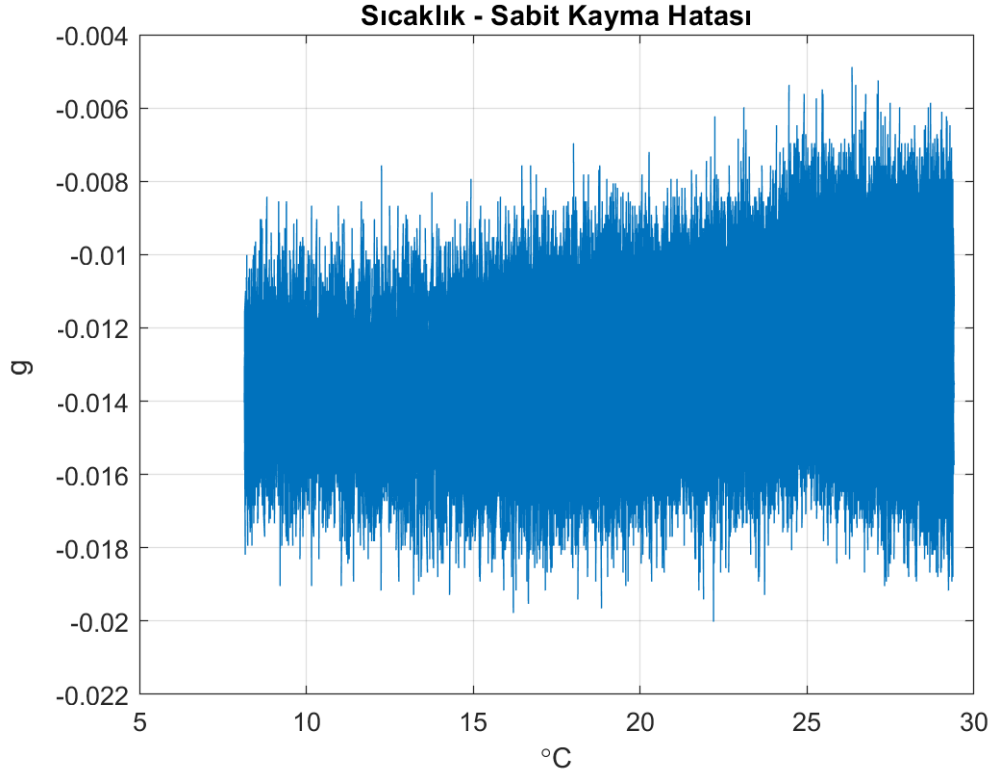
Üçüncü bölümde manyetometre hatalarının telafi çalışmaları yer almaktadır. Manyetometre ölçümünü etkileyen yumuşak-demir ve sert-demir bozulmalarını telafi etmek için ayrı hata telafi modelleri uygulanmıştır. Hatalı ve hata telafisi yapılmış manyetometre verileri karşılaştırılmıştır.

7.1 AÖB Sıcaklık Kalibrasyonu Benzetim Sonuçları

Bu bölümde AÖB'nin sıcaklık kalibrasyonu için uygulanan polinom uydurma yönteminin benzetim sonuçları yer almaktadır. AÖB'nin her ekseni için 1, 3 ve 5. dereceden olmak üzere 3 farklı polinom uydurulmuştur. Uydurulan polinomlara göre yapılan kalibrasyonlar grafiklerle gösterilmiş ve performansları karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

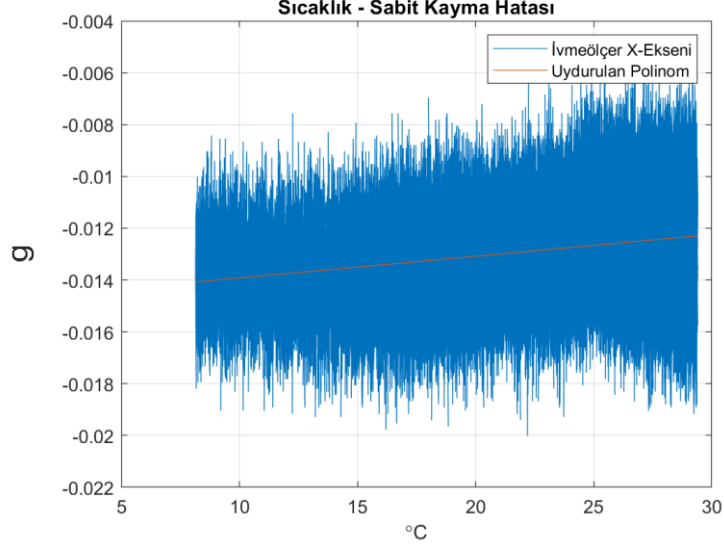
7.1.1 İvmeölçer sıcaklık kalibrasyonu

İvmeölçer X – eksenine sıcaklığa göre değişim grafiği Şekil 7.1’de verilmiştir.

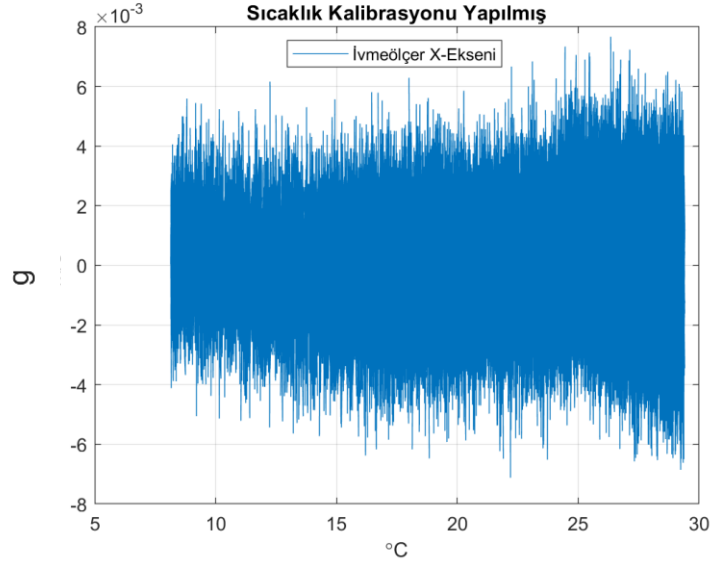


Şekil 7.1 İvmeölçer X – Eksenine Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

İvmeölçer X – eksenini için 1. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Uydurulan 1. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.3’de verilmiştir.

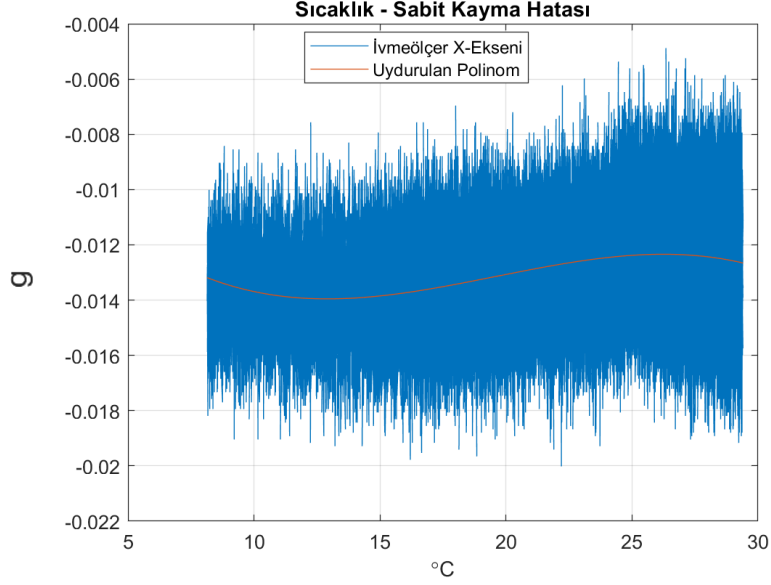


Şekil 7.2 İvmeölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği

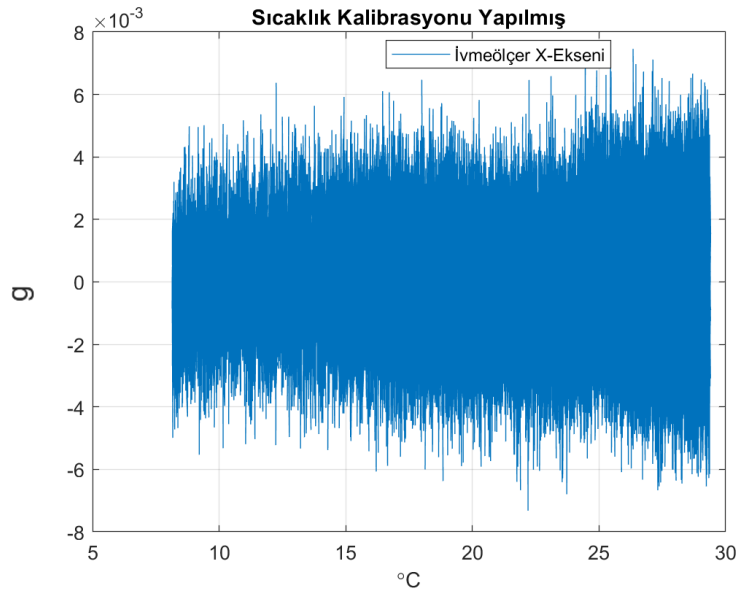


Şekil 7.3 İvmeölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer X – eksenini için 3. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Uydurulan 3. derecen polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.5’de verilmiştir.

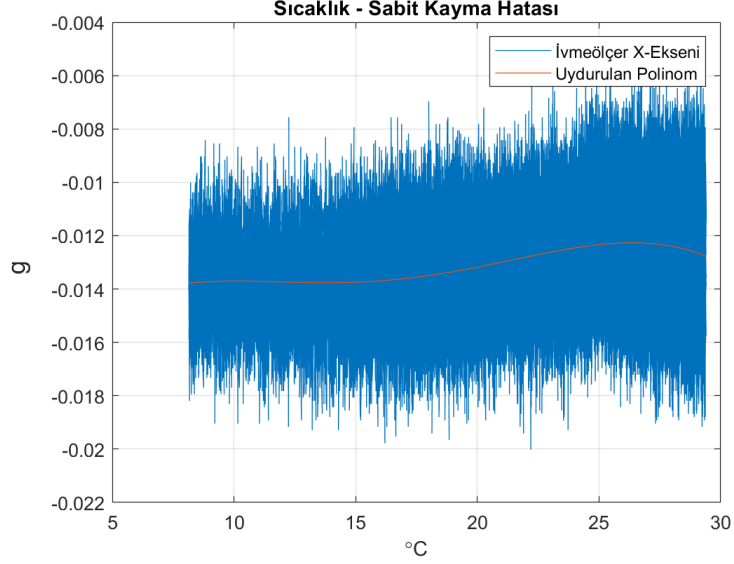


Şekil 7.4 İvmeölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği

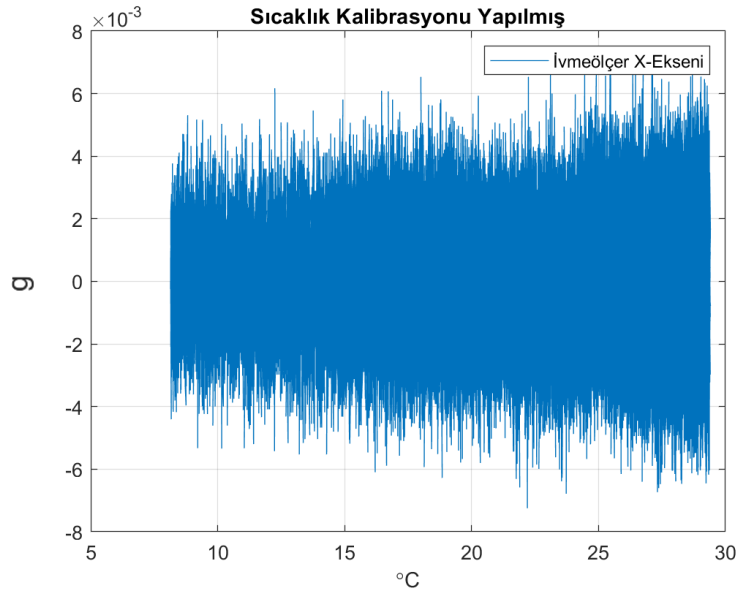


Şekil 7.5 İvmeölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer X – eksenini için 5. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Uydurulan 5. derecenin polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.7'da verilmiştir.

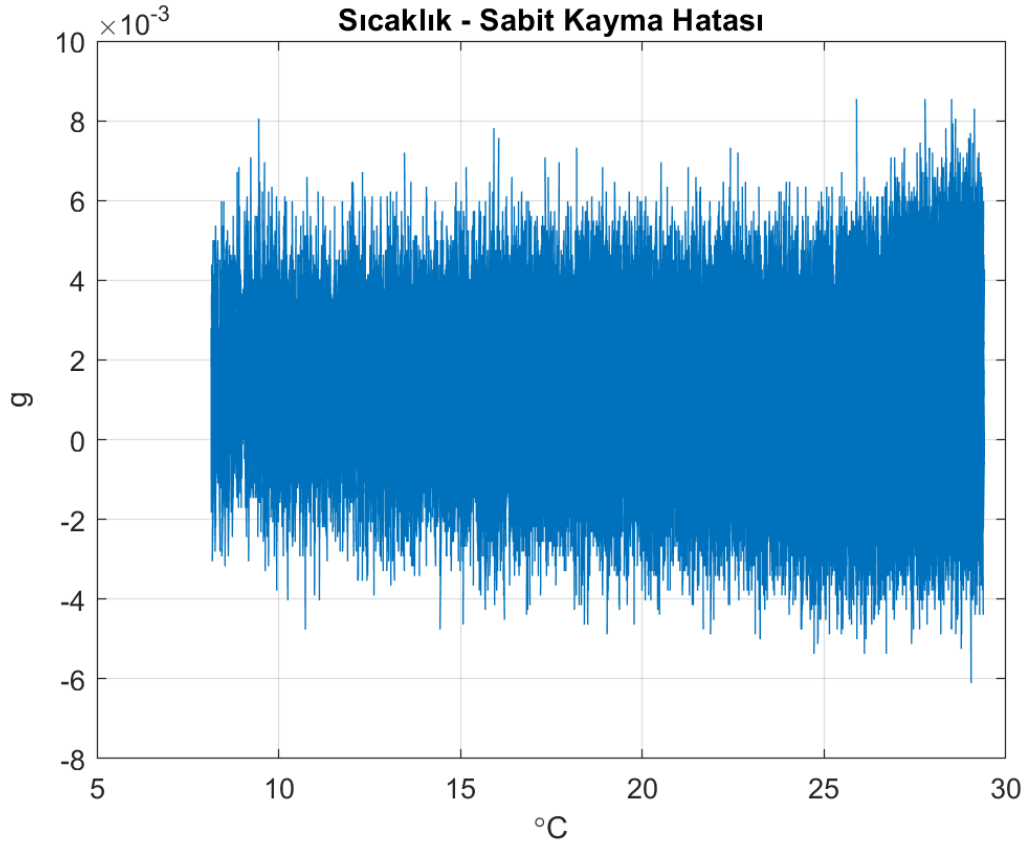


Şekil 7.6 İvmeölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği



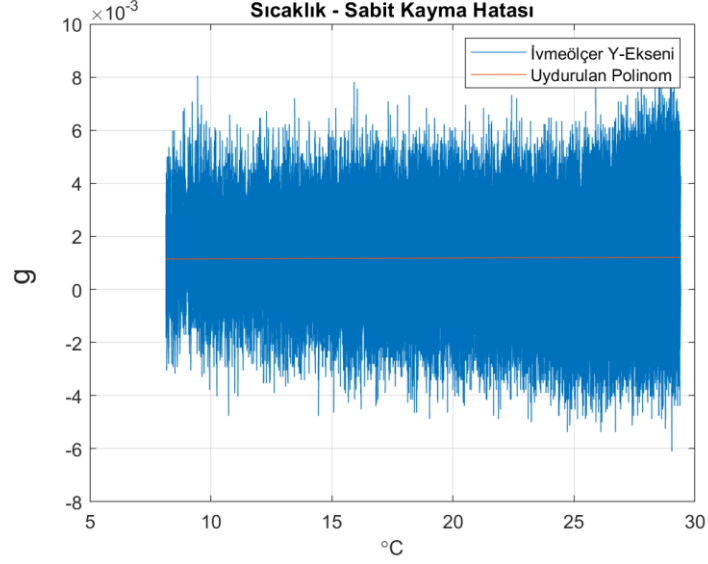
Şekil 7.7 İvmeölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer Y – eksenine sıcaklığa göre değişim grafiği Şekil 7.8’de verilmiştir.

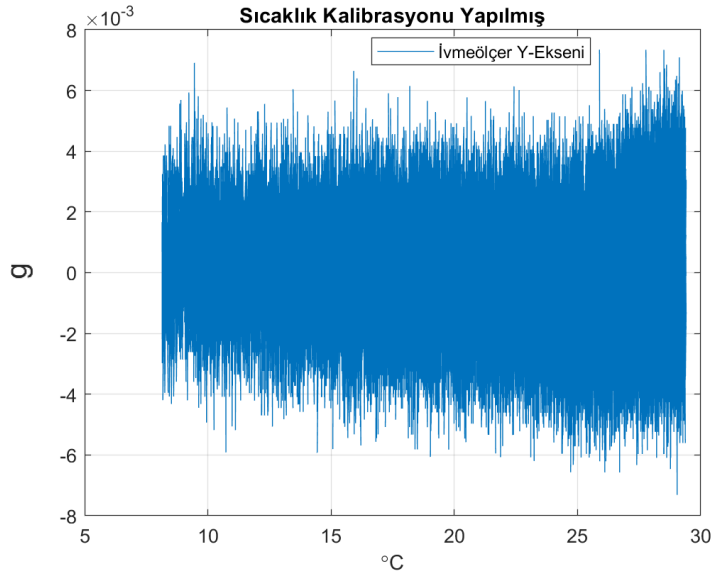


Şekil 7.8 İvmeölçer Y – Eksenine Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

İvmeölçer Y – eksenini için 1. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Uydurulan 1. derecenin polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.10'da verilmiştir.

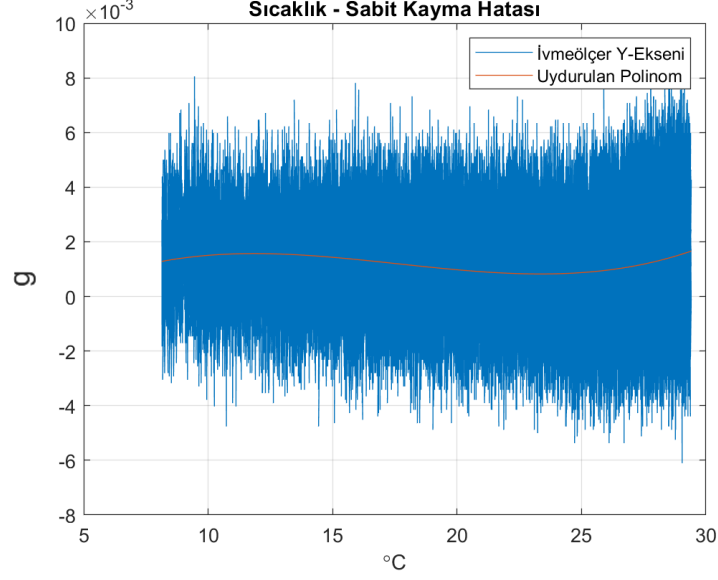


Şekil 7.9 İvmeölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği

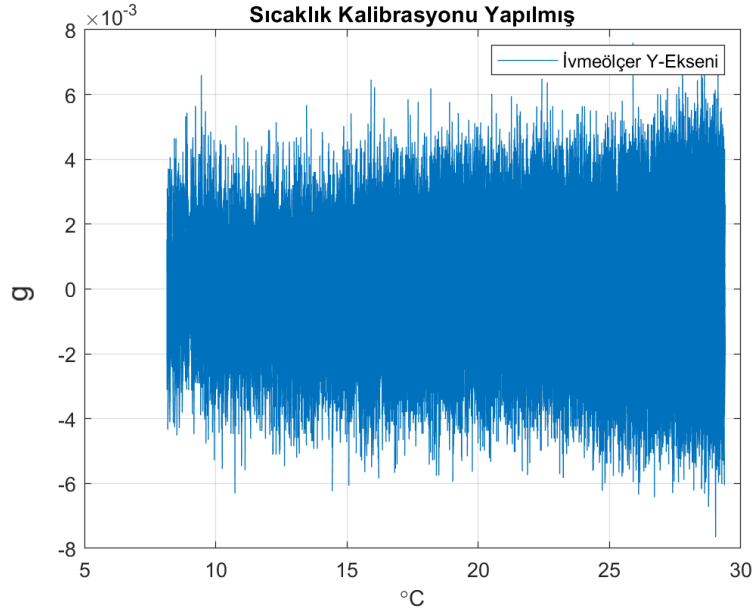


Şekil 7.10 İvmeölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer Y – eksenine için 3. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.11’de gösterilmiştir. Uydurulan 3. derecen polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.12’de verilmiştir.

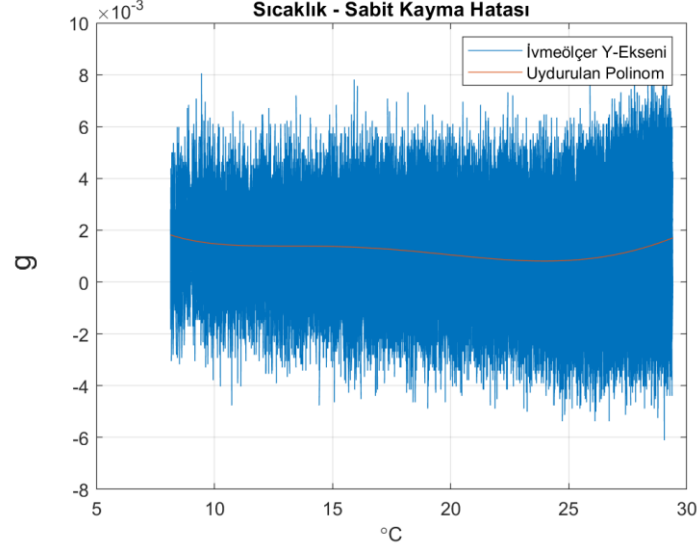


Şekil 7.11 İvmeölçer Y – Eksenine Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği

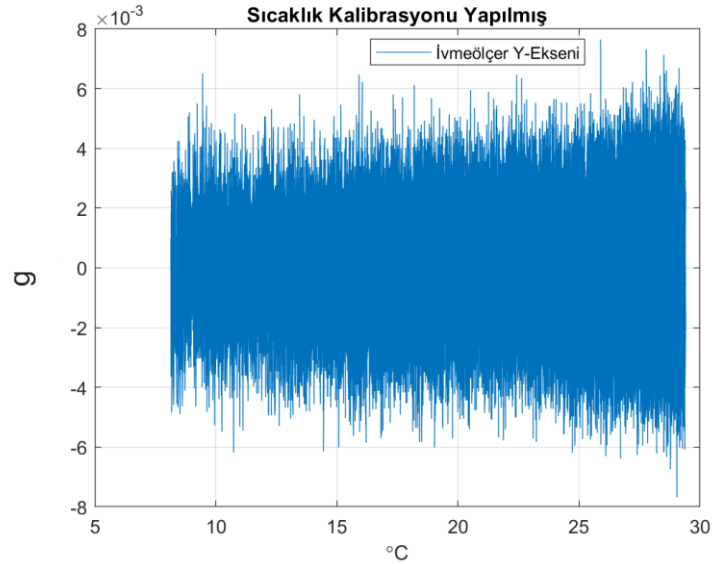


Şekil 7.12 İvmeölçer Y – Eksenine Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer Y – eksenini için 5. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.13’de gösterilmiştir. Uydurulan 5. derecenin polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.14’de verilmiştir.

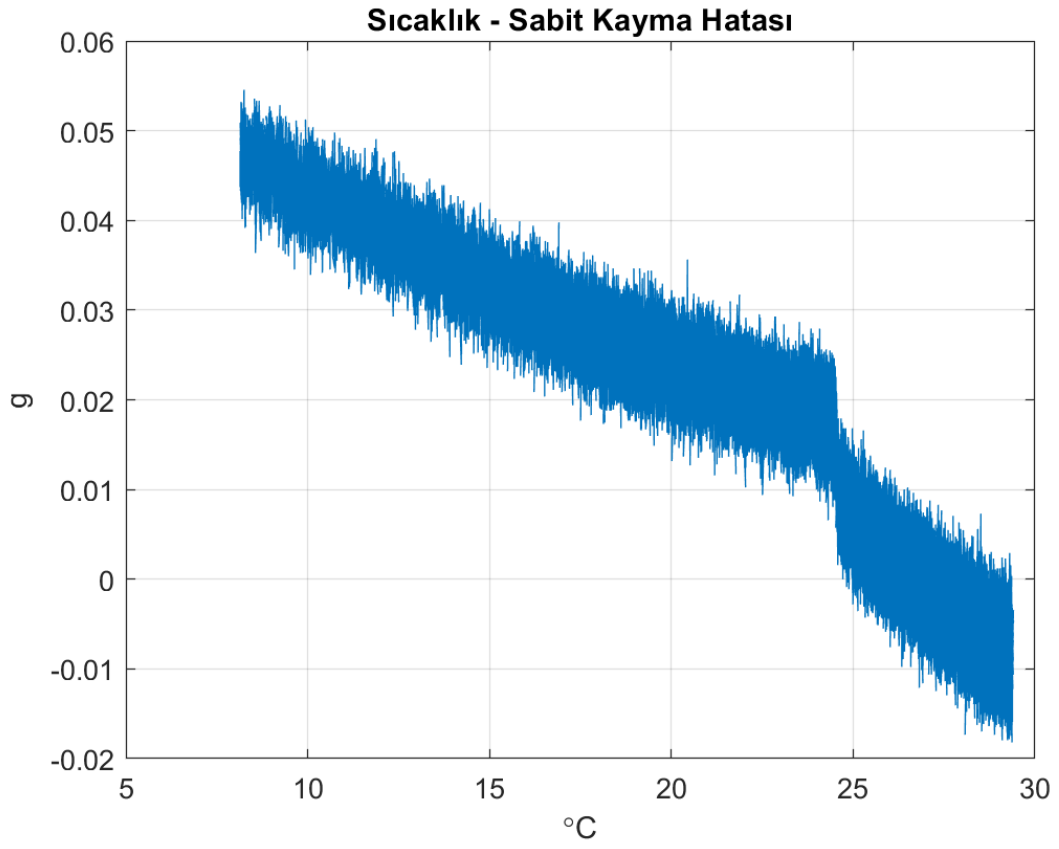


Şekil 7.13 İvmeölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği



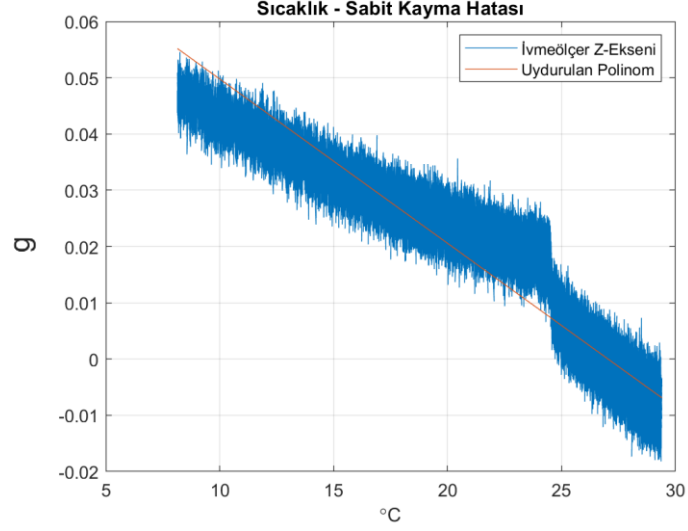
Şekil 7.14 İvmeölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer Z – eksenine sıcaklığa göre değişim grafiği Şekil 7.15’de verilmiştir.

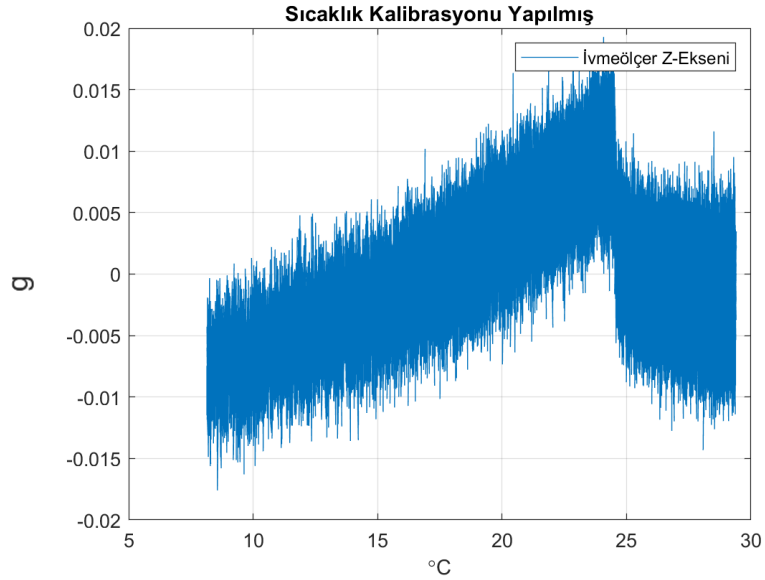


Şekil 7.15 İvmeölçer Z – Eksenine Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

İvmeölçer Z – eksenini için 1. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.16’da gösterilmiştir. Uydurulan 1. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.17’de verilmiştir.

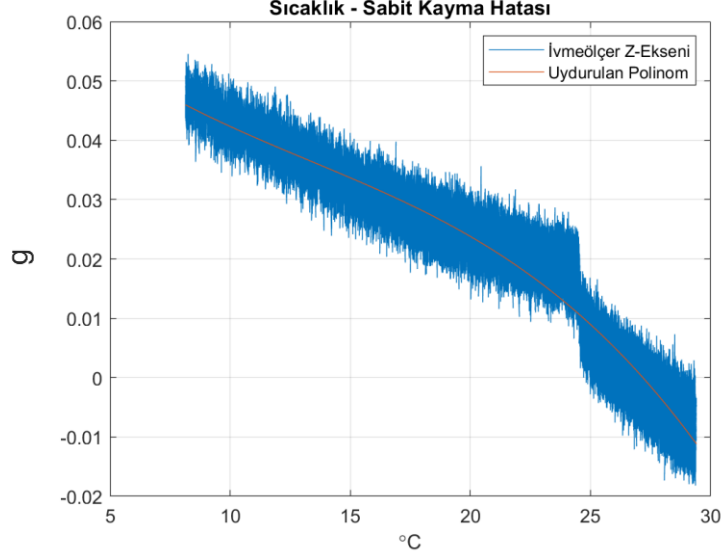


Şekil 7.16 İvmeölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği

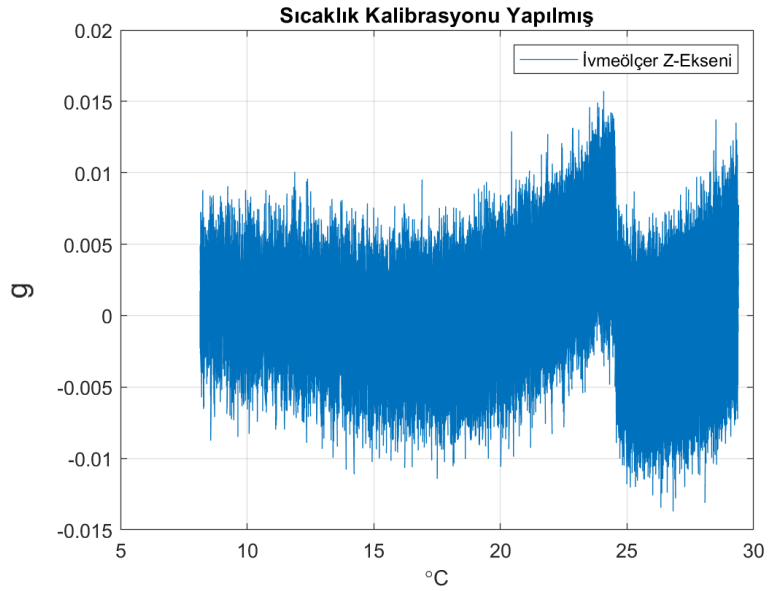


Şekil 7.17 İvmeölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer Z – eksenini için 3. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.18’de gösterilmiştir. Uydurulan 3. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.19’da verilmiştir.

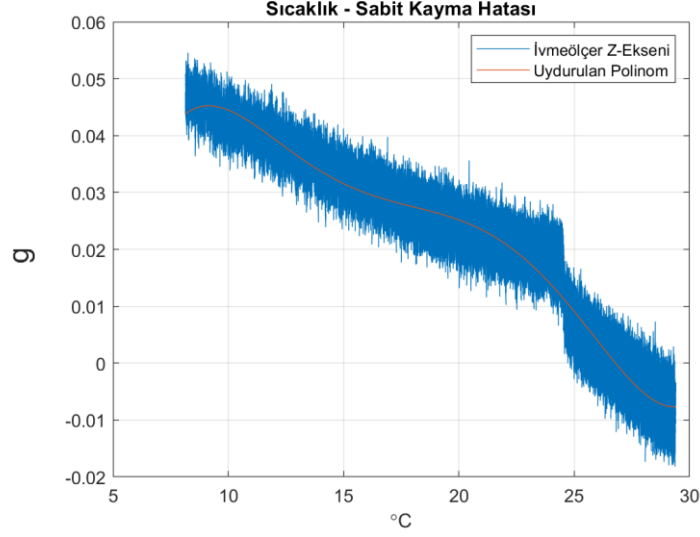


Şekil 7.18 İvmeölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği

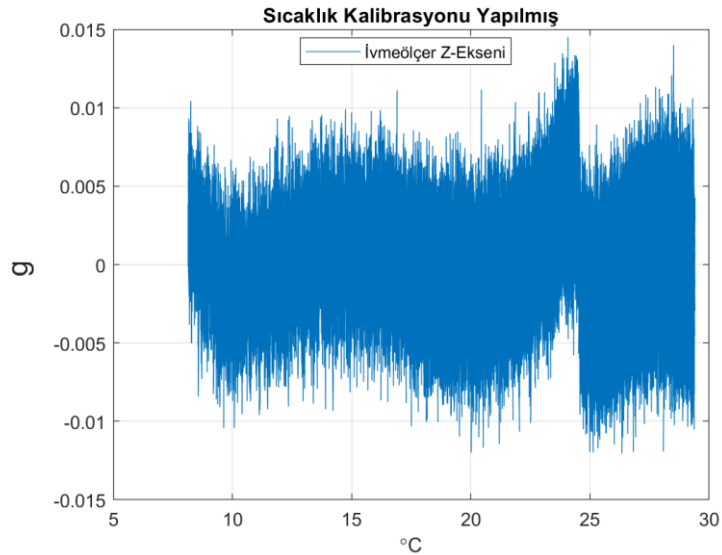


Şekil 7.19 İvmeölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçer Z – eksenini için 5. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.20’de gösterilmiştir. Uydurulan 5. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.21’de verilmiştir.



Şekil 7.20 İvmeölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği

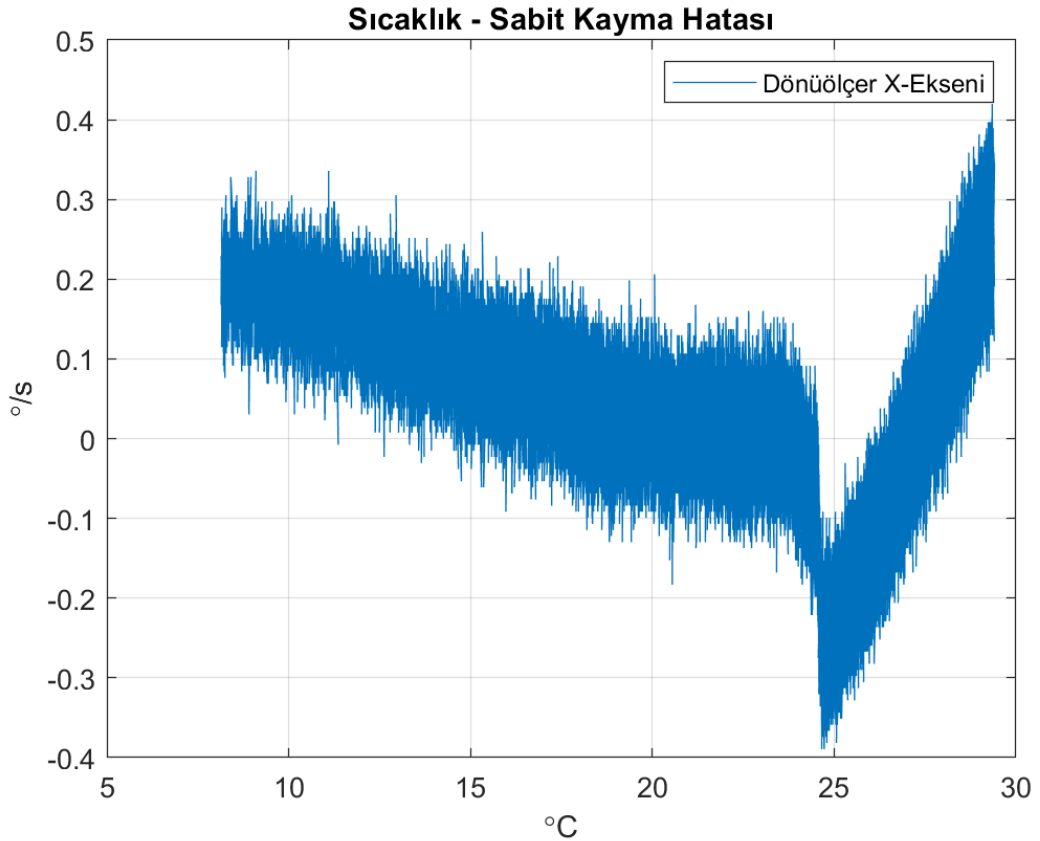


Şekil 7.21 İvmeölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

İvmeölçerin X, Y ve Z – eksenleri için 1, 3. ve 5. derece polinomlar uydurularak farklı kalibrasyonlar uygulanmıştır. Uydurulan 1. derece polinomlar tüm eksenlerde yetersiz kalmıştır. Uydurulan 3. ve 5. derece polinomlar kullanılarak yapılan kalibrasyonda, ivmeölçerin X ve Y – eksenlerinin sıcaklığa göre değişimleri telafi edildiği görülmüştür. Z ekseninin sıcaklık değişimindeki davranışının iyi olmadığı gözlenmiştir. Bunun nedeni sıcaklığa göre değişimin fazla olmasıdır. 24 – 25 °C aralığında Z – ekseni çıkındaki ani değişim, Şekil 7.15’de kırılma ile görülmüştür. Z – ekseni için uydurulan 3. ve 5. derece polinomlar sıcaklığa göre değişimleri büyük ölçüde telafi etse de ani değişimin yaşandığı 24 – 25 °C aralığındaki değişimi iyi bir şekilde telafi edememiştir.

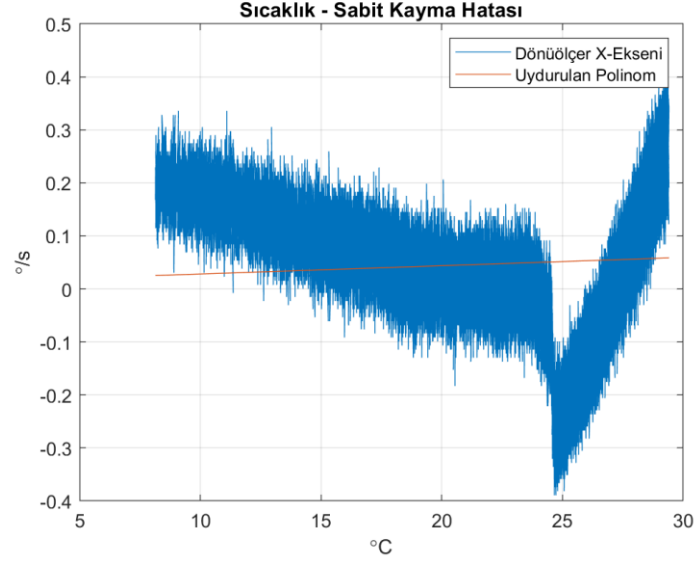
7.1.2 Dönüölçer sıcaklık kalibrasyonu

Dönüölçer X – ekseni sıcaklığa göre değişim grafiği Şekil 7.22’de verilmiştir.

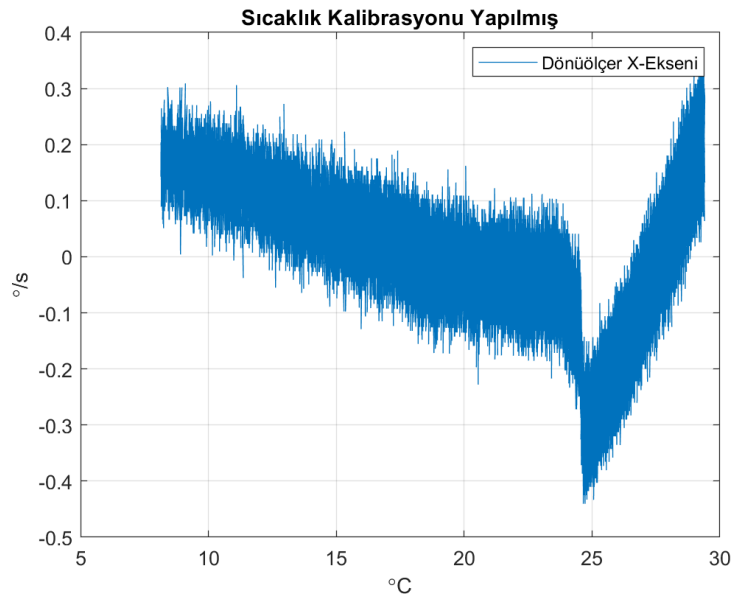


Şekil 7.22 Dönüölçer X – Ekseni Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

Dönüölçer X – eksenini için 1. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.23’de gösterilmiştir. Uydurulan 1. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.24’de verilmiştir.

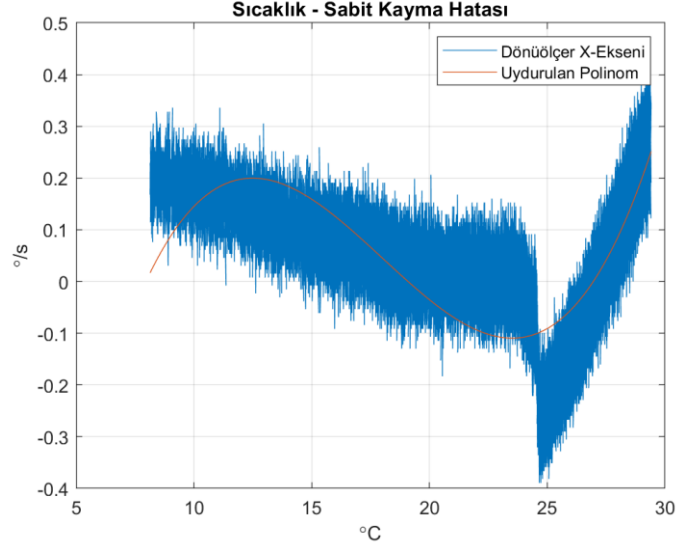


Şekil 7.23 Dönüölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimini ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği

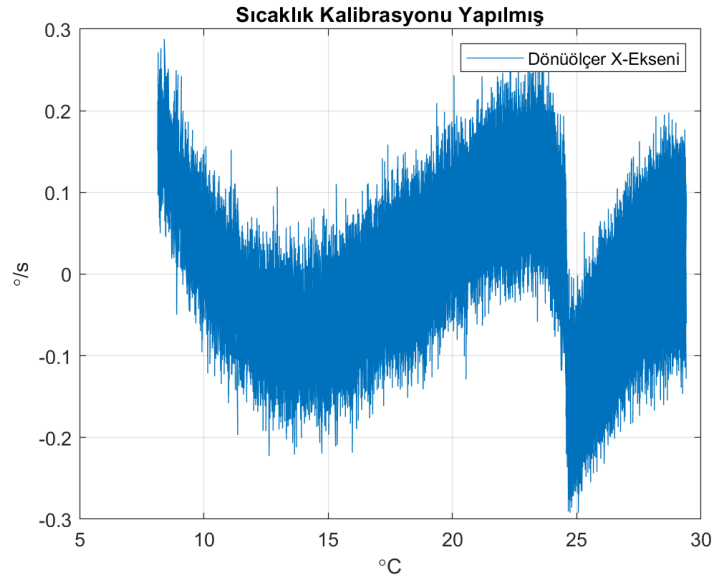


Şekil 7.24 Dönüölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

Dönüölçer X – eksenini için 3. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.25’de gösterilmiştir. Uydurulan 3. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.26’da verilmiştir.

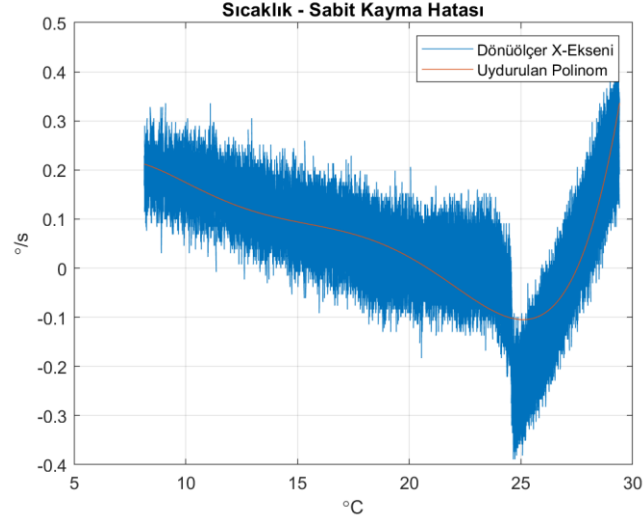


Şekil 7.25 Dönüölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği

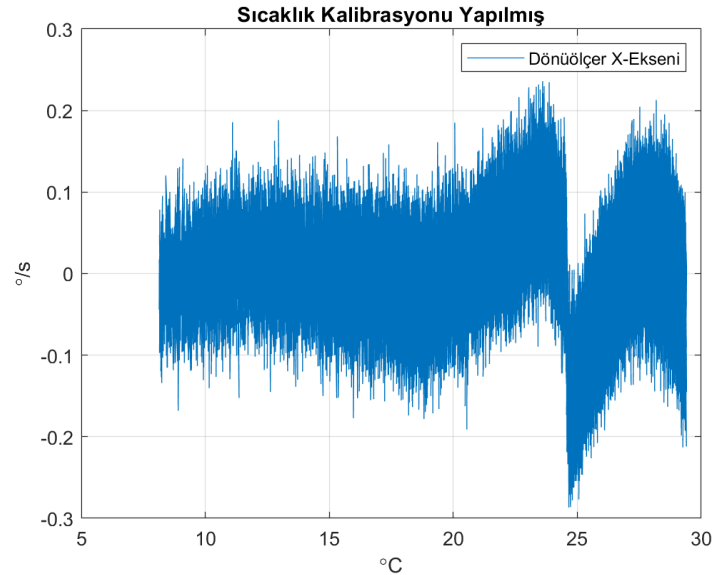


Şekil 7.26 Dönüölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

Dönüölçer X – eksenini için 5. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.27’de gösterilmiştir. Uydurulan 5. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.28’de verilmiştir.

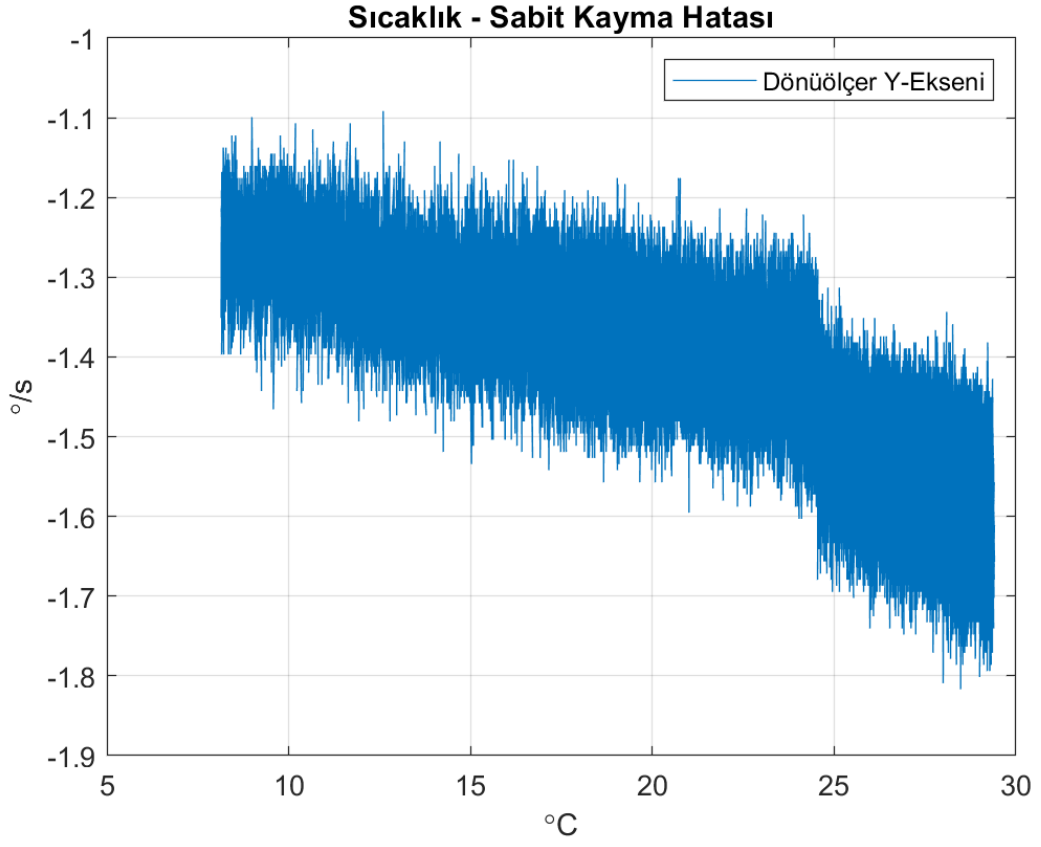


Şekil 7.27 Dönüölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimini ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği



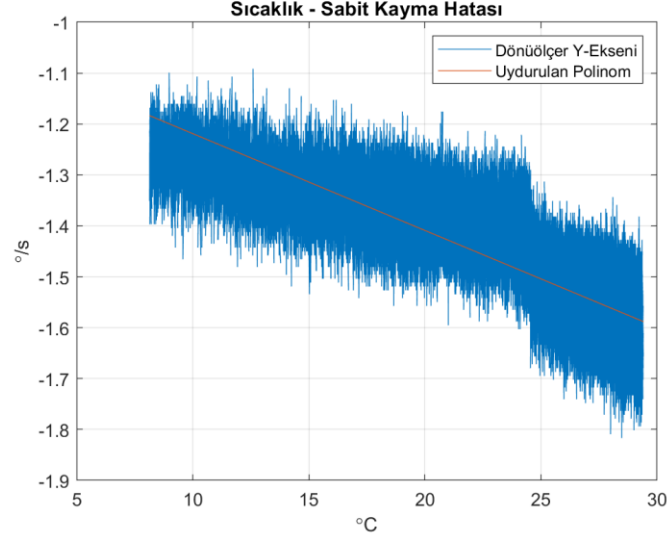
Şekil 7.28 Dönüölçer X – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

Dönüölçer Y – eksenini sıcaklığa göre değişim grafiği Şekil 7.29’de verilmiştir.

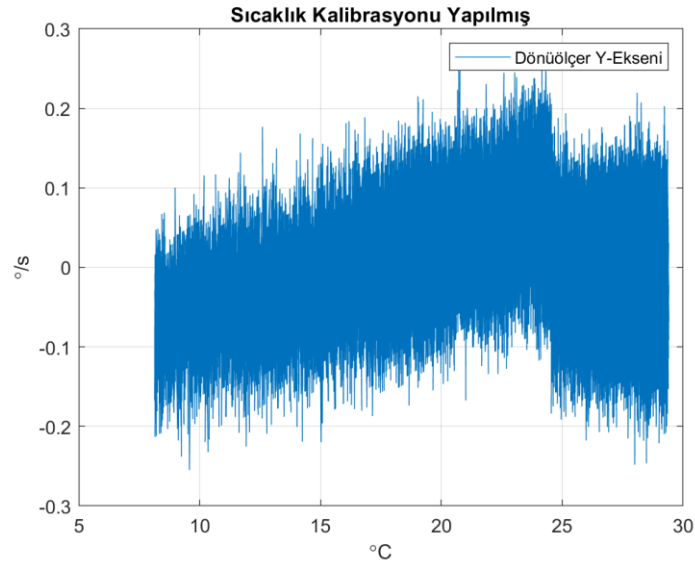


Şekil 7.29 Dönüölçer Y – Eksenli Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

Dönüölçer Y – eksenini için 1. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.30’da gösterilmiştir. Uydurulan 1. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.31’de verilmiştir.

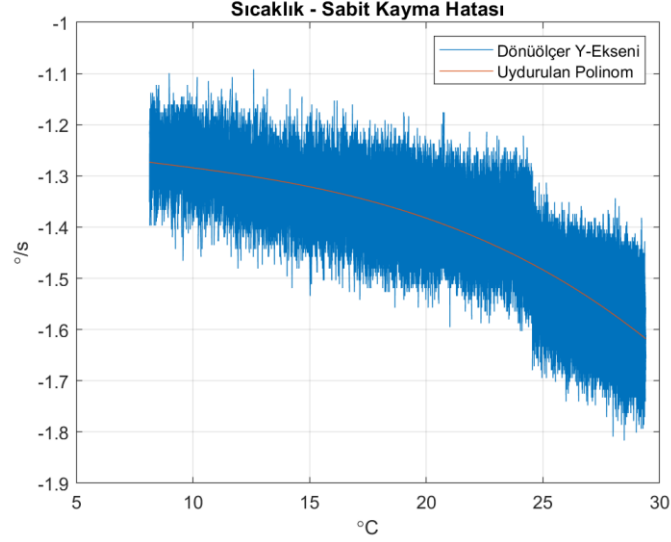


Şekil 7.30 Dönüölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği

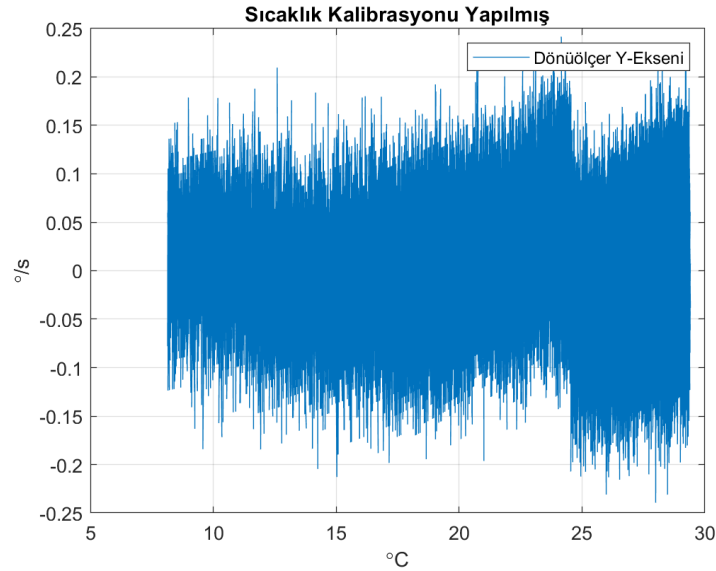


Şekil 7.31 Dönüölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

Dönüölçer Y – eksenini için 3. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.32’de gösterilmiştir. Uydurulan 3. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.33’de verilmiştir.

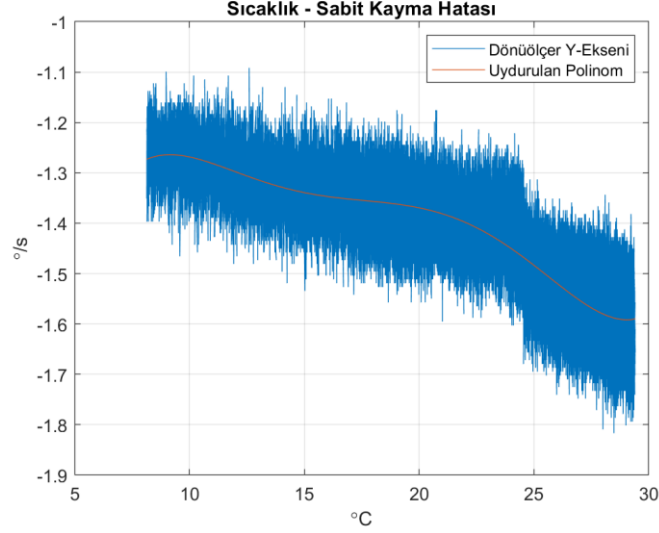


Şekil 7.32 Dönüölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği

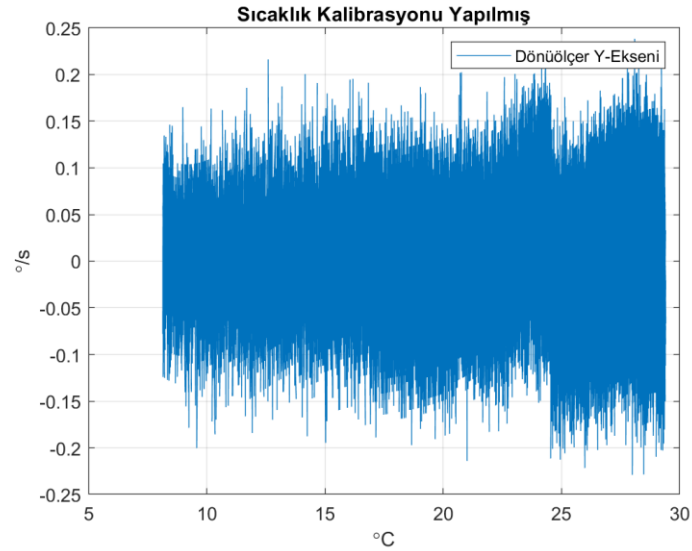


Şekil 7.33 Dönüölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

Dönüölçer Y – eksenini için 5. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.34’de gösterilmiştir. Uydurulan 5. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.35’de verilmiştir.

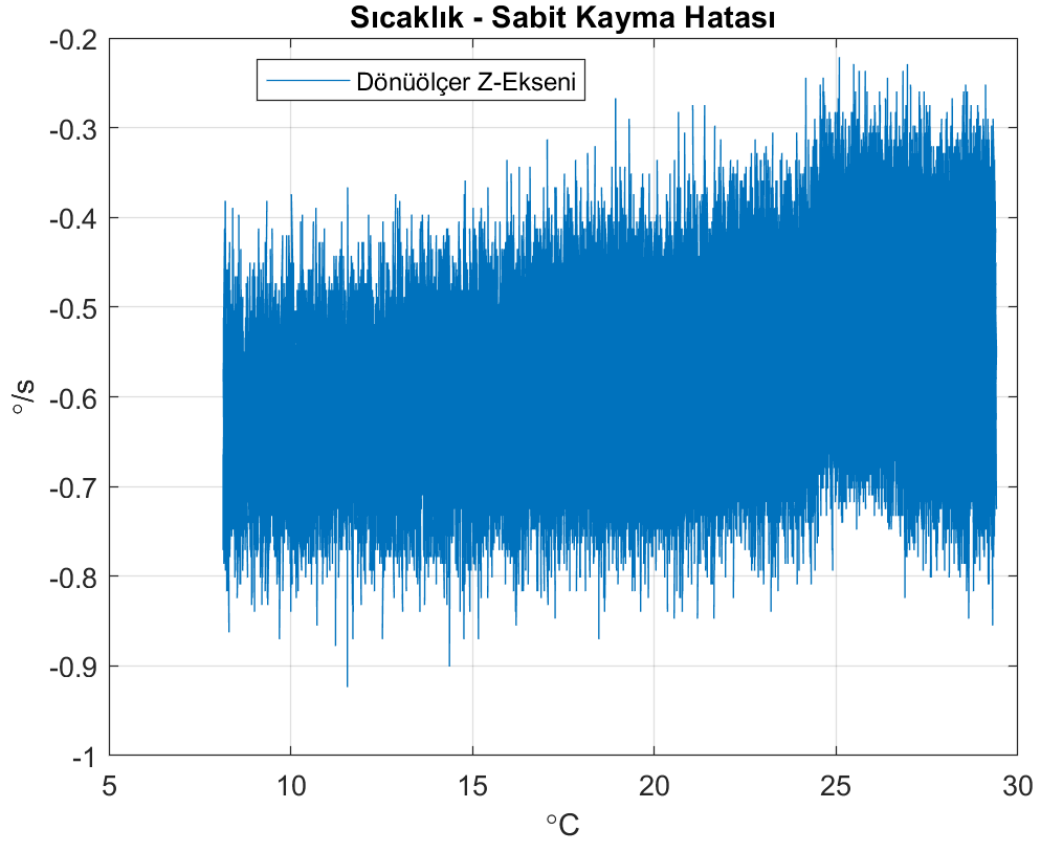


Şekil 7.34 Dönüölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği



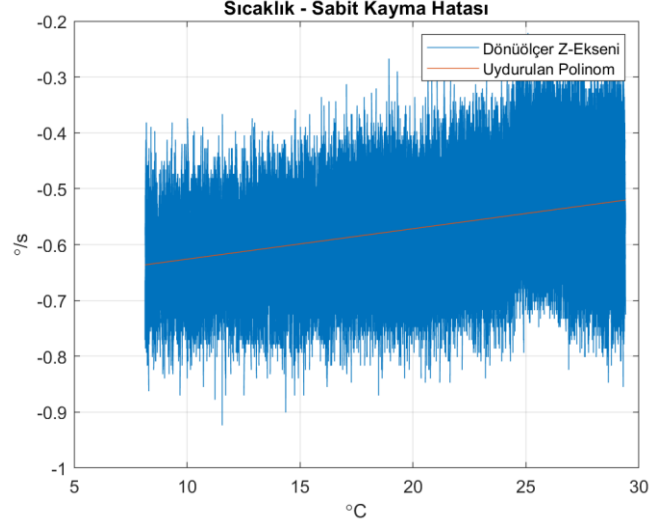
Şekil 7.35 Dönüölçer Y – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

Dönüölçer Z – eksenini sıcaklığa göre değişim grafiği Şekil 7.36’da verilmiştir.

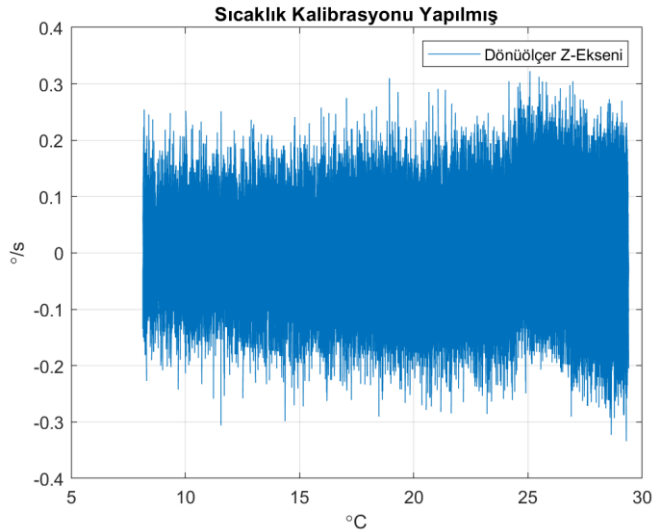


Şekil 7.36 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

Dönüölçer Z – eksenini için 1. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.37’de gösterilmiştir. Uydurulan 1. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.38’de verilmiştir.

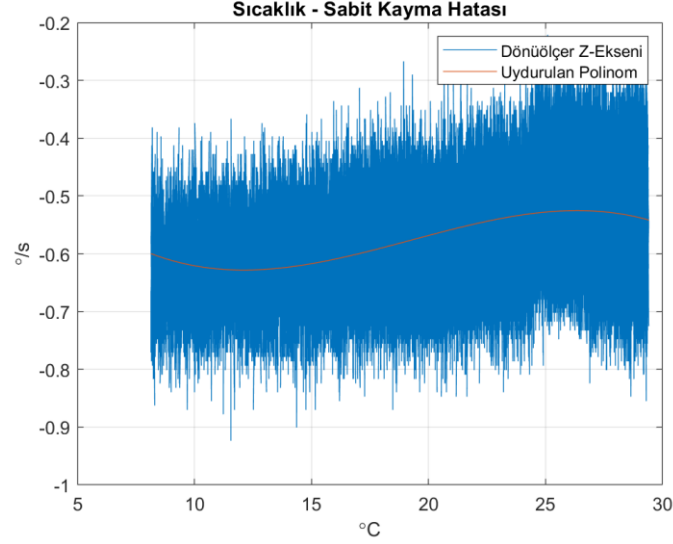


Şekil 7.37 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 1. Derece Polinom Grafiği

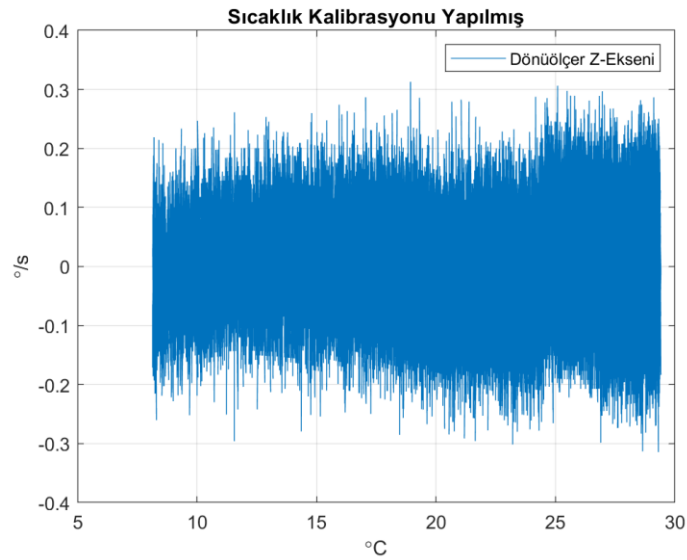


Şekil 7.38 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 1. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyonu Grafiği

Dönüölçer Z – eksenini için 3. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.39’da gösterilmiştir. Uydurulan 3. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.40’da verilmiştir.

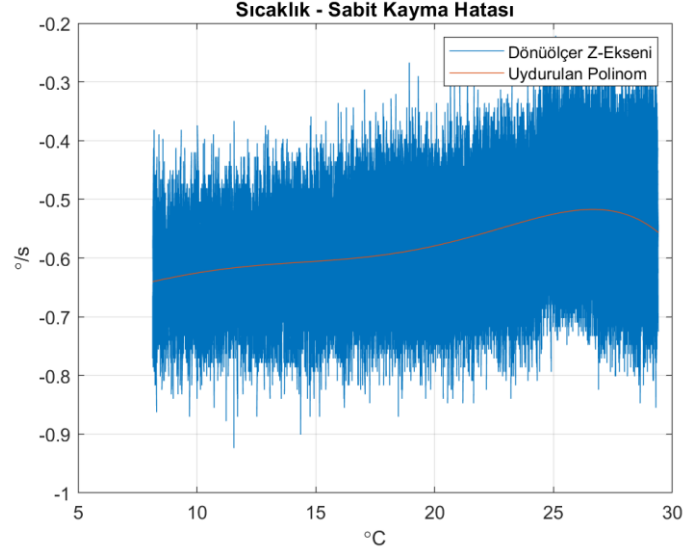


Şekil 7.39 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimini ve Uydurulan 3. Derece Polinom Grafiği

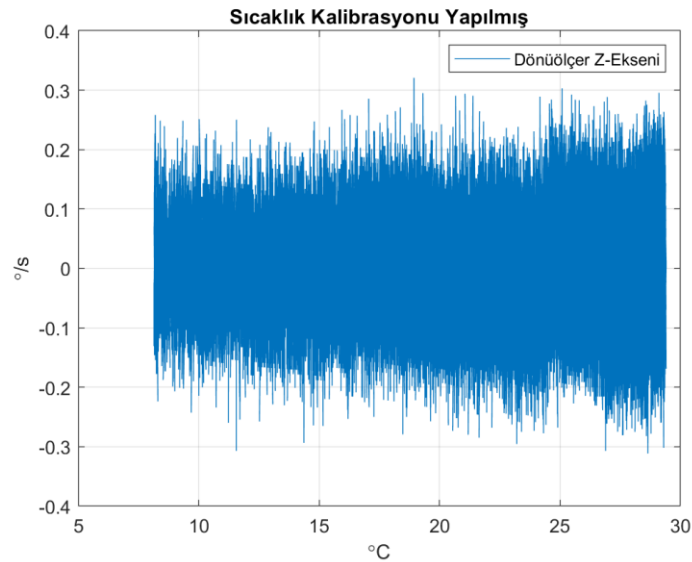


Şekil 7.40 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 3. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyonu Grafiği

Dönüölçer Z – eksenini için 5. derece uydurulmuş polinom Şekil 7.41’da gösterilmiştir. Uydurulan 5. derece polinoma göre yapılan sıcaklık kalibrasyonu Şekil 7.42’da verilmiştir.



Şekil 7.41 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Sıcaklığa Göre Değişimi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği



Şekil 7.42 Dönüölçer Z – Eksenini Sabit Kayma Hatasının Uydurulan 5. Derece Polinoma Göre Yapılmış Kalibrasyon Grafiği

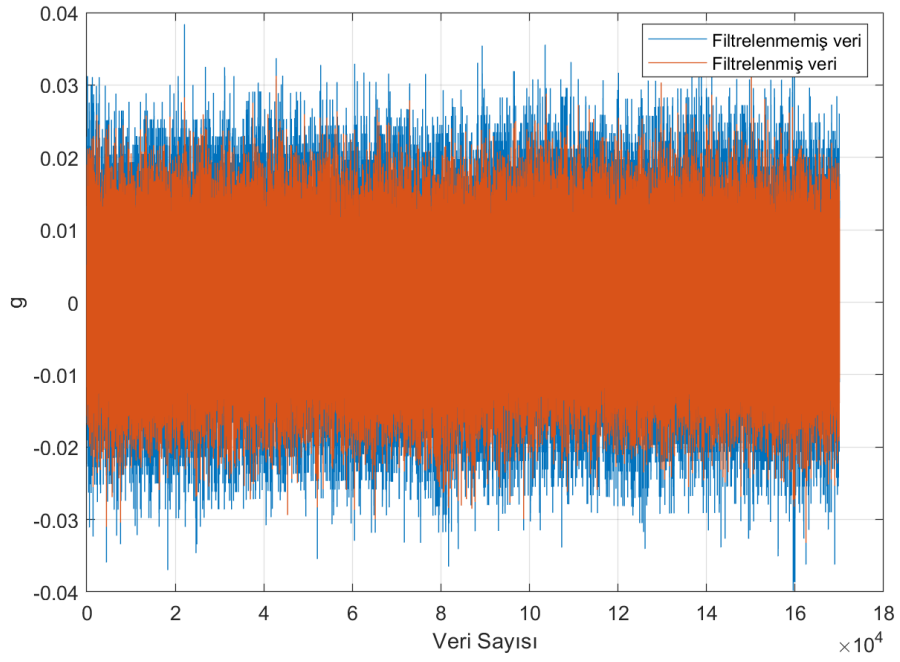
Dönüölçerin X, Y ve Z – eksenleri için 1, 3. ve 5. derece polinomlar uydurularak farklı kalibrasyonlar uygulanmıştır. Uydurulan 1. derece polinomlar tüm eksenlerde yetersiz kalmıştır. Uydurulan 3. ve 5. derece polinomlar kullanılarak yapılan kalibrasyonda, dönüölçerin Z – ekseninin sıcaklığa göre değişimleri telafi edildiği görülmüştür. X ve Y – eksenlerinin sıcaklık değişimindeki davranışlarının iyi olmadığı gözlenmiştir. Bunun nedeni sıcaklığa göre değişimin fazla olmasıdır. 24 – 25 °C aralığında X ve Y – eksenlerindeki ani değişim, Şekil 7.22 ve Şekil 7.29'daki kırılma ile görülmüştür. X – eksenindeki ani değişim oldukça büyük olması uydurulan polinomun performansını azaltmıştır. X – eksenini için uydurulan polinomlar sıcaklığa göre değişimleri telafi edememiştir. Y – eksenini için uydurulan 3. ve 5. derece polinomlar sıcaklığa göre değişimleri büyük ölçüde telafi etse de ani değişimin yaşandığı 24 – 25 °C aralığındaki değişimi iyi bir şekilde telafi edememiştir.

7.2 AÖB Olasılıksal Hata Parametrelerinin Kestirimi Benzetim Sonuçları

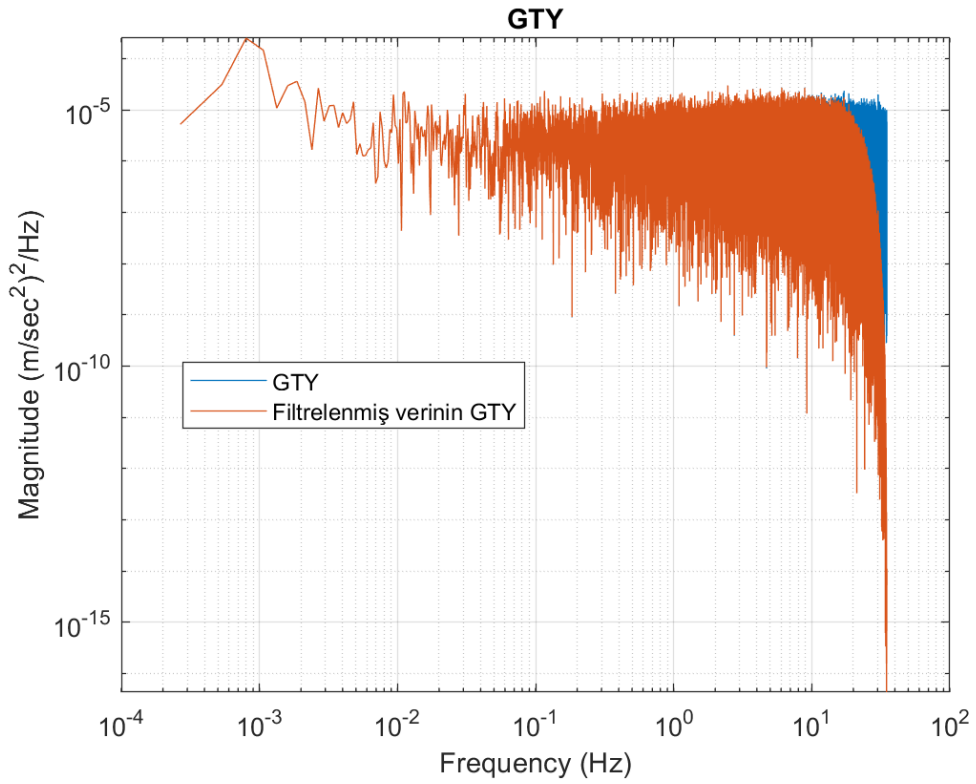
Bu bölümde AÖB'nin olasılıksal hata parametrelerinin kestirimi için kullanılan Allan deviasyon ve GTY yöntemlerinin benzetim sonuçları yer almaktadır. AÖB performansını belirleyen baskın olasılıksal hata parametrelerinin kestirimi gerçekleştirilmiştir. İki önemli baskın olasılıksal hata olan sabit kayma kararsızlığı ve açı/hız rasgele yürüyüş hatalarının yanı sıra, AÖB'nin birkaç ekseninde görülen oransal rasgele yürüyüş hatasının da kestirimi yapılmıştır. Açı/hız rasgele yürüyüş hatasının etkilerini azaltmak amacıyla sayısal alçak geçiren filtreden geçirilmiştir. Bu filtrenin etkileri GTY ile gösterilmiştir. İki yöntemden elde edilen kestirim sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bu tez kapsamında kullanılan ivmeölçer ve dönüölçer verileri robotik seviye AÖB ile sağlanmıştır. Allan deviasyon ve GTY yöntemlerinden sağlıklı sonuçlar almak için AÖB'nin sıcaklık kalibrasyonunun yapılması gerektiğinden bu çalışmada da uygulanmıştır.

AÖB'nin açı/hız rasagele yürüyüş hatasının etkinliğini azaltmak için ayrıca sayısal alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Sayısal alçak geçiren filtrenin etkisi ivmeölçer verisi ve GTY grafiğı ile Şekil 7.43 ve Şekil 7.44'de gösterilmiştir.



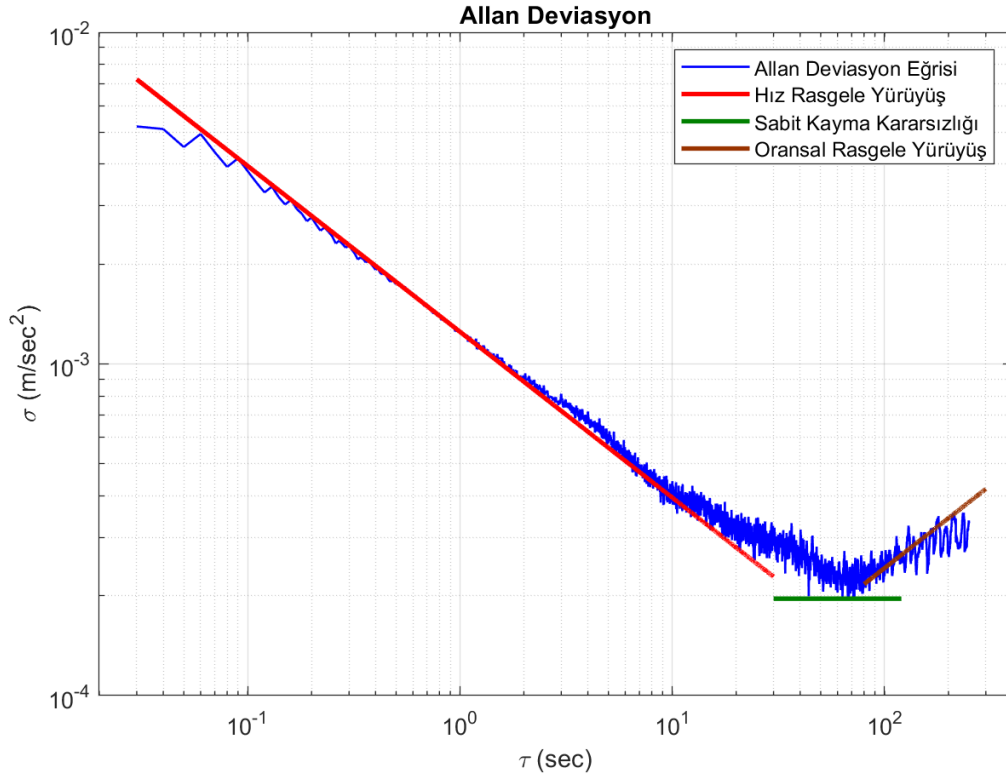
Şekil 7.43 İvmeölçer X – Ekseni Ham ve Filtrenmiş Veri Grafiği



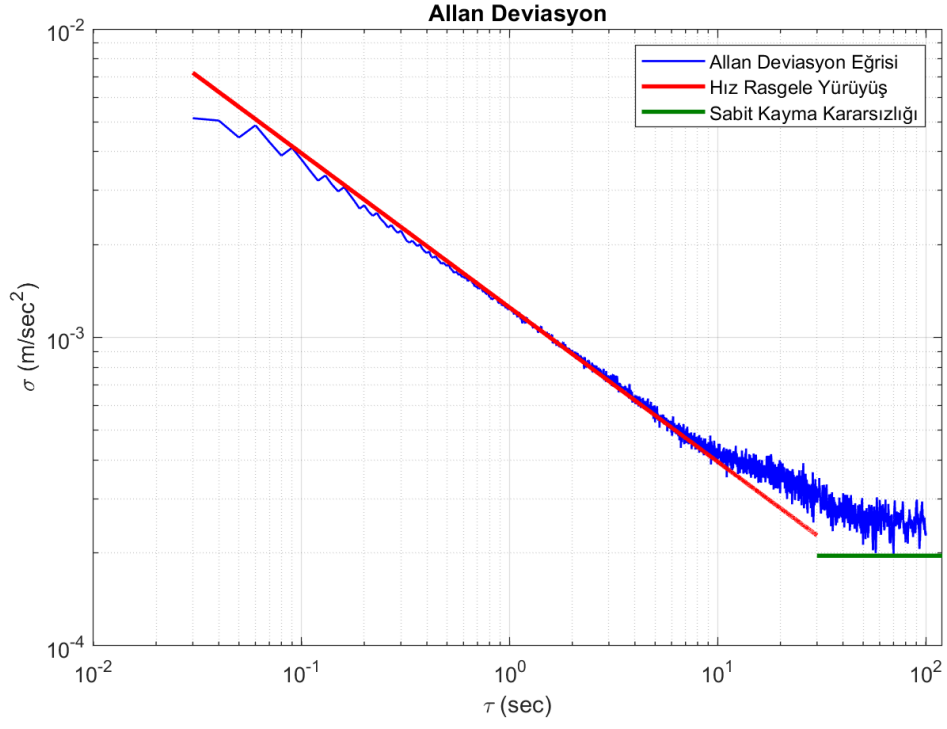
Şekil 7.44 İvmeölçer X – Ekseni Ham ve Filtrenmiş Verinin GTY Grafiği

20 Hz bant genişliğine sahip AÖB'ne kesim frekansı 20 Hz olan sayısal alçak geçiren filtre uygulanmıştır. GTY'da 0 eğimine sahip olan açı/hız rasgele yürüyüş hatasının etkileri 20 Hz'den itibaren bastırıldığı görülmüştür. Böylelikle uygun bir parametre kestirimi için kullanılan yöntemlerden önce hem sıcaklık kalibrasyonu hem de sayısal alçak geçiren filtre uygulanmış veriler kullanılmıştır.

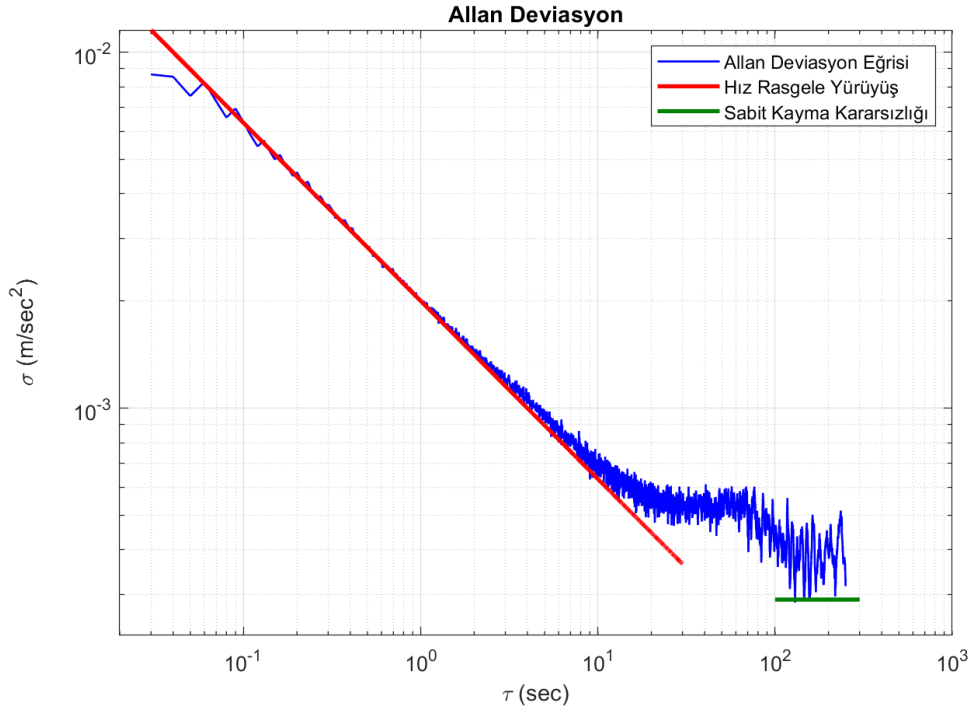
İvmeölçer X, Y ve Z eksenlerinin Allan deviasyon grafikleri Şekil 7.45, Şekil 7.46 ve Şekil 7.47'de gösterilmiştir.



Şekil 7.45 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi



Şekil 7.46 İvmeölçer Y – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi

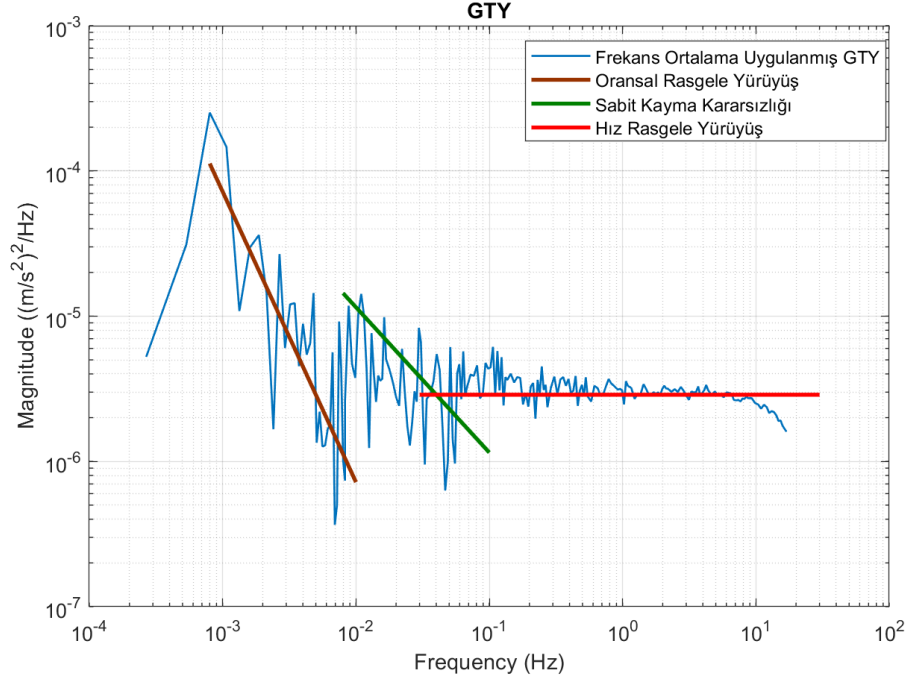


Şekil 7.47 İvmeölçer Z – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi

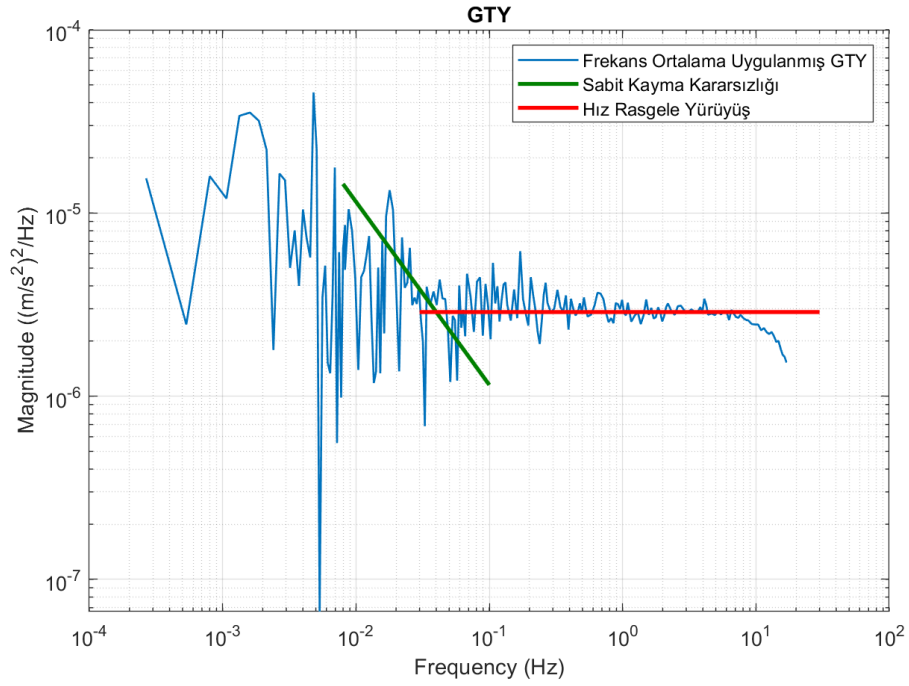
Tablo 7.1 Allan Deviasyon Eğrileri ile Bulunan İvmeölçer Hata Parametreleri

İvmeölçer	X – Ekseni	Y – Ekseni	Z – Ekseni
Hız Rasgele Yürüyüş (mg/√hz)	0.128	0.128	0.2
Sabit Kayma Kararsızlığı (mg)	0.03	0.03	0.044
Oransal Rasgele Yürüyüş (m/s/h^{3/2})	9.07	Hata Etkisi Yoktur.	Hata Etkisi Yoktur.

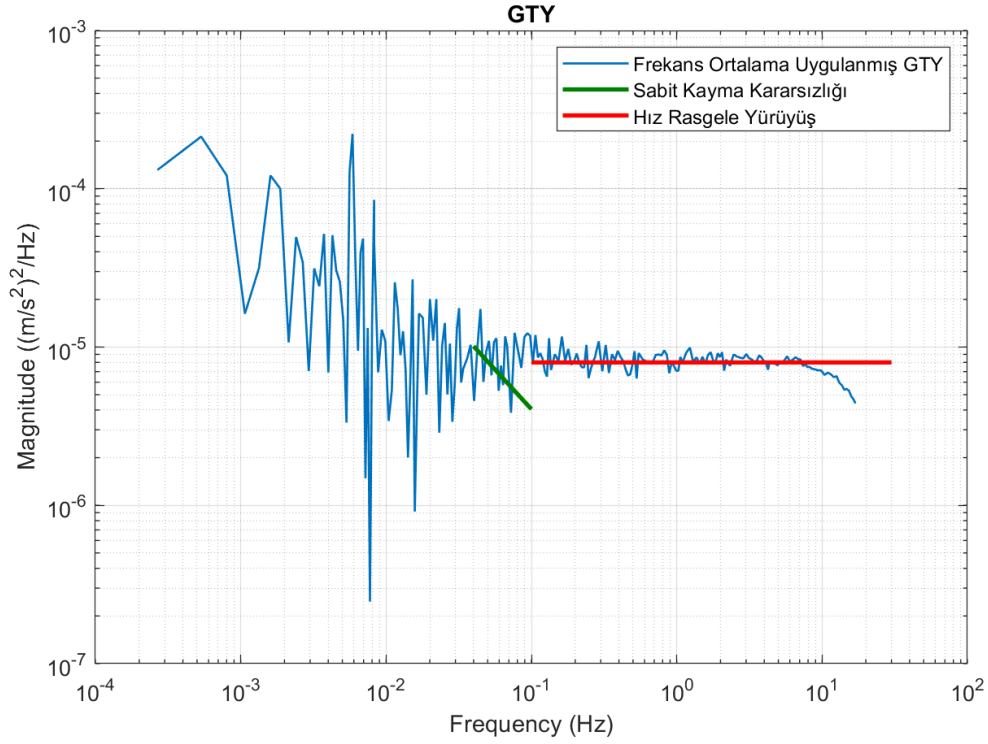
GTY eğrilerinin düzgün bir biçimde belirlenmesi için frekans ortalama tekniği uygulanmıştır. İvmeölçer X, Y ve Z eksenlerinin GTY grafikleri Şekil 7.48, Şekil 7.49 ve Şekil 7.50’de gösterilmiştir.



Şekil 7.48 İvmeölçer X – Ekseni GTY Eğrisi



Şekil 7.49 İvmeölçer Y – Ekseni GTY Eğrisi



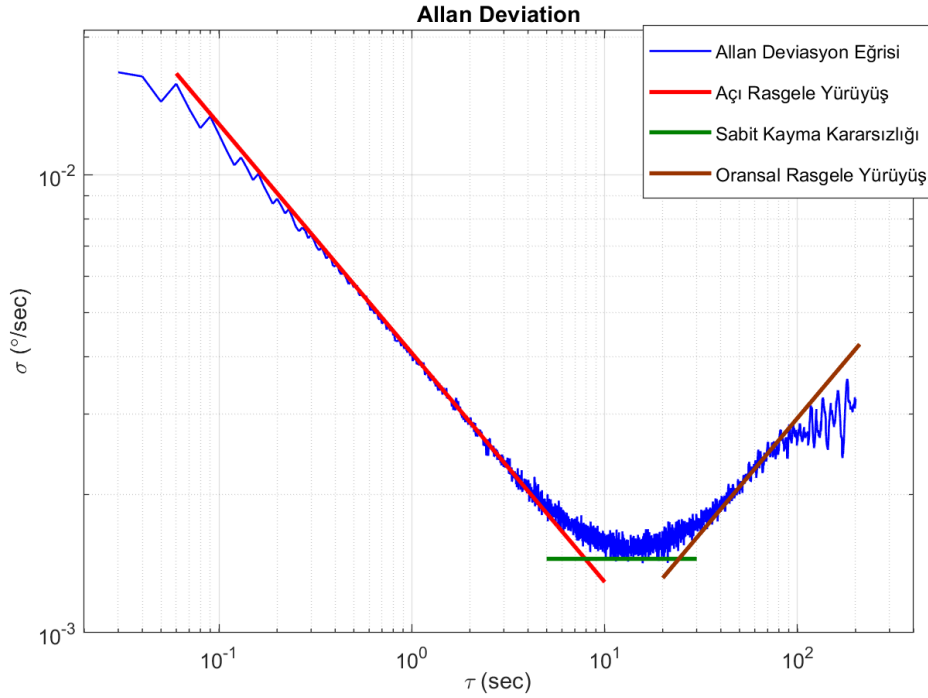
Şekil 7.50 İvmeölçer Z – Eksen GTY Eğrisi

Tablo 7.2 GTY Eğrileri ile Bulunan İvmeölçer Hata Parametreleri

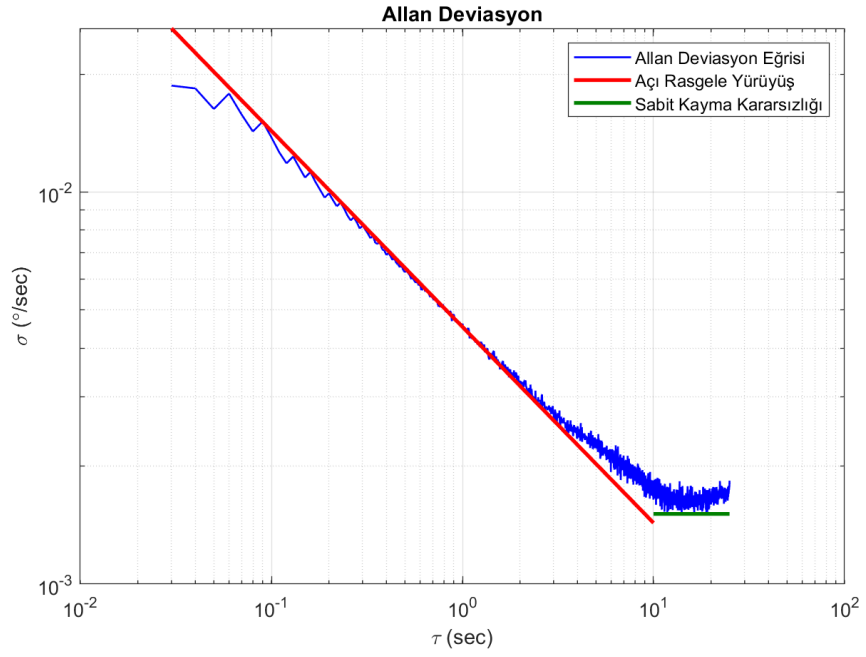
İvmeölçer	X – Eksen	Y – Eksen	Z – Eksen
Hız Rasgele Yürüyüş (mg/√hz)	0.122	0.122	0.2
Sabit Kayma Kararsızlığı (mg)	0.0244	0.0244	0.046
Oransal Rasgele Yürüyüş (m/s/h ^{3/2})	0.99	Hata Etkisi Yoktur.	Hata Etkisi Yoktur.

İvmeölçerin X, Y ve Z eksenlerinin hata parametreleri Allan deviasyon ve GTY yöntemleriyle kestirimi yapılmıştır. Üç eksen için de hız rasgele yürüyüş ve sabit kayma kararsızlığı hatalarının Allan deviasyon ve GTY ile kestirim sonucu birbirine oldukça yakın değerler bulunmuştur. Y ve Z eksenlerinde oransal rasgele yürüyüş hatasının etkisi görülmemiştir. X – ekseninde ise oransal rasgele yürüyüş hata kestirimlerinde farklı değerler bulunmuştur. Bu durumun nedeni frekans ortalama tekniğinin GTY'deki hata parametrelerini ortaya çıkarmakta yetersiz kalmasıdır. Allan deviasyon eğrisinin sonucu teorideki +1/2 eğrisi ile tam uyduğu için oransal rasgele yürüyüş hatasının değeri Allan deviasyon eğrisi ile kestirilen değer olmalıdır.

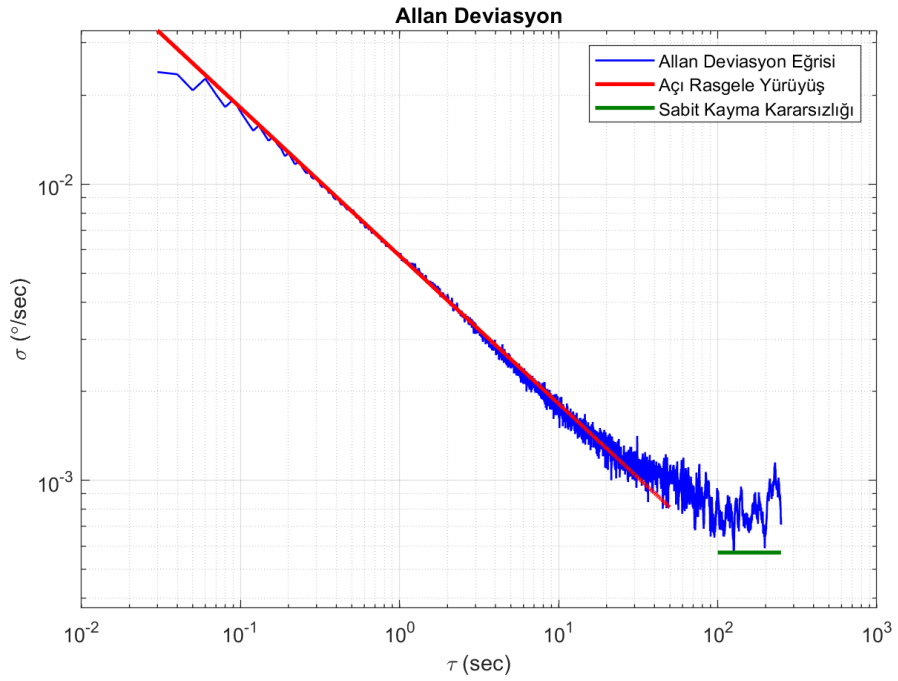
Dönüölçer X, Y ve Z eksenlerinin Allan deviasyon grafikleri Şekil 7.51, Şekil 7.52 ve Şekil 7.53'de gösterilmiştir.



Şekil 7.51 Dönüölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi



Şekil 7.52 Dönüölçer Y – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi

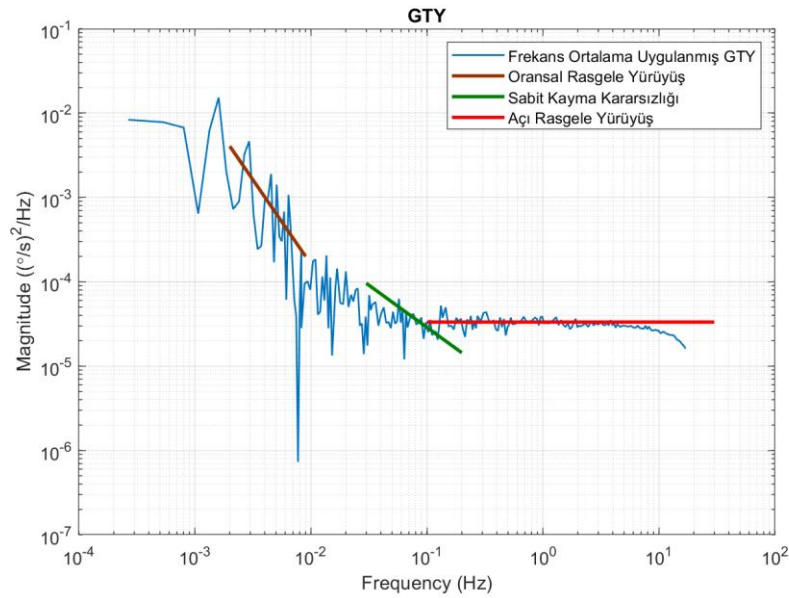


Şekil 7.53 Dönüölçer Z – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi

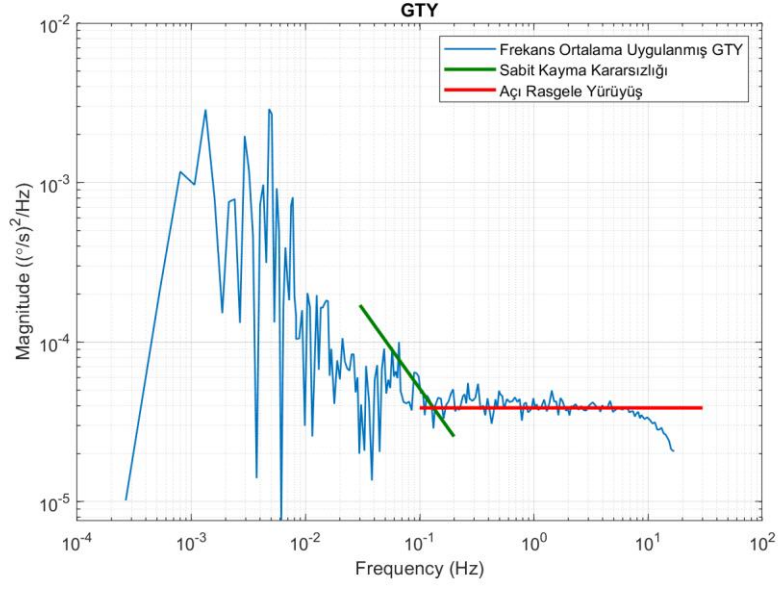
Tablo 7.3 Allan Deviasyon Eğrileri ile Bulunan Dönüölçer Hata Parametreleri

Dönüölçer	X – Eksen	Y – Eksen	Z – Eksen
Açı Rasgele Yürüyüş ($^{\circ}/\sqrt{h}$)	0.245	0.272	0.344
Sabit Kayma Kararsızlığı ($^{\circ}/h$)	7.56	7.92	3.06
Oransal Rasgele Yürüyüş ($^{\circ}/h/\sqrt{s}$)	1.8	Hata Etkisi Yoktur.	Hata Etkisi Yoktur.

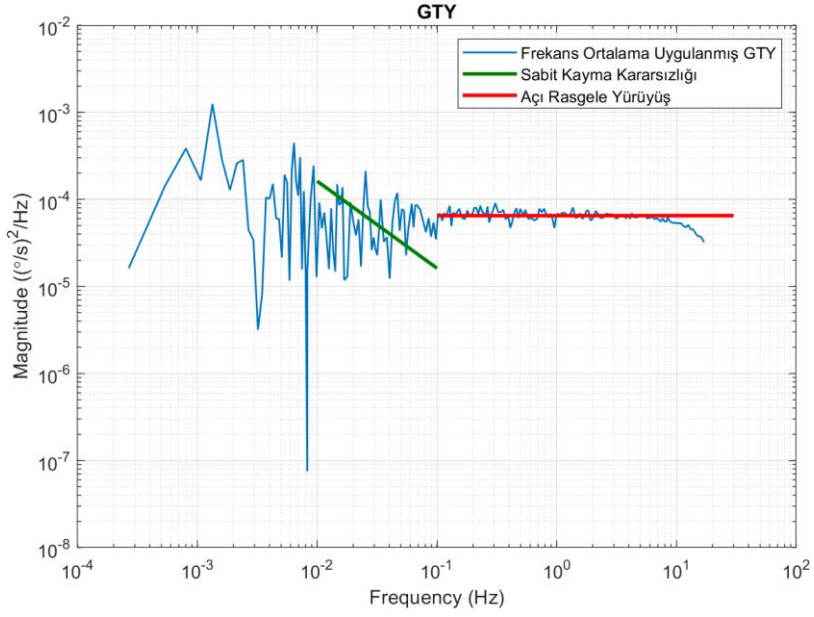
Dönüölçer X, Y ve Z eksenlerinin frekans ortalama tekniği uygulanmış GTY grafikleri Şekil 7.54, Şekil 7.55 ve Şekil 7.56’da gösterilmiştir.



Şekil 7.54 Dönüölçer X – Eksen GTY Eğrisi



Şekil 7.55 Dönüölçer Y – Ekseni GTY Eğrisi



Şekil 7.56 Dönüölçer Z – Ekseni GTY Eğrisi

Tablo 7.4 GTY Eğrileri ile Bulunan İvmeölçer Hata Parametreleri

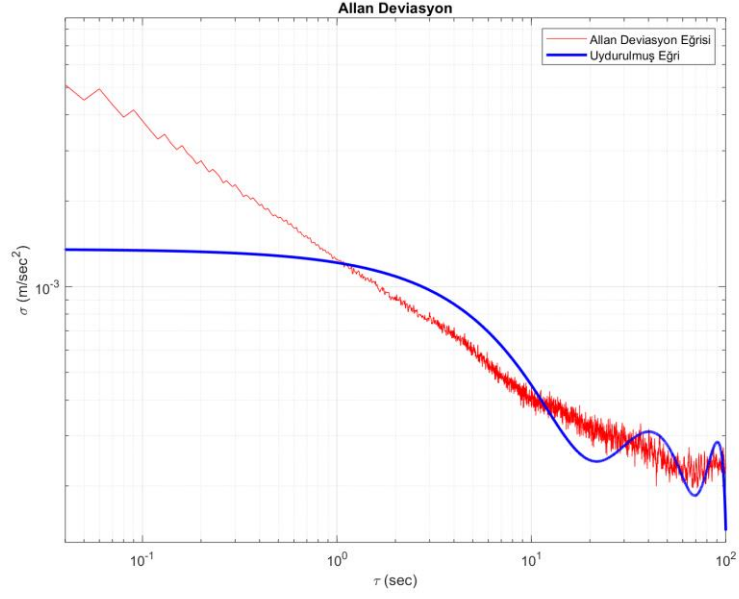
Dönüölçer	X – Ekseni	Y – Ekseni	Z – Ekseni
Açı Rasgele Yürüyüş ($^{\circ}/\sqrt{h}$)	0.24	0.264	0.342
Sabit Kayma Kararsızlığı ($^{\circ}/h$)	4.32	5.76	3.6
Oransal Rasgele Yürüyüş ($^{\circ}/h/\sqrt{s}$)	0.36	Hata Etkisi Yoktur.	Hata Etkisi Yoktur.

Dönüölçerin X, Y ve Z eksenlerinin hata parametreleri Allan deviasyon ve GTY yöntemleriyle kestirim yapılmıştır. Aynı ivmeölçer kestiriminde olduğu gibi hız rasgele yürüyüş ve sabit kayma kararsızlığı hatalarının Allan deviasyon ve GTY ile kestirimi sonucu birbirine oldukça yakın değerler bulunmuştur. Y ve Z eksenlerinde oransal rasgele yürüyüş hatasının etkisi görülmemiştir. Dönüölçerde de GTY'nin hata parametrelerini ortaya çıkarmakta yetersiz kalmasından kaynaklı X – ekseninde oransal rasgele yürüyüş hata kestirimlerinde farklı değerler bulunmuştur. Allan deviasyon eğrisinin sonucu teorideki +1/2 eğimli eğri ile tam uyduğu için, oransal rasgele yürüyüş hatasının değeri Allan deviasyon eğrisi ile kestirilen değer olmalıdır.

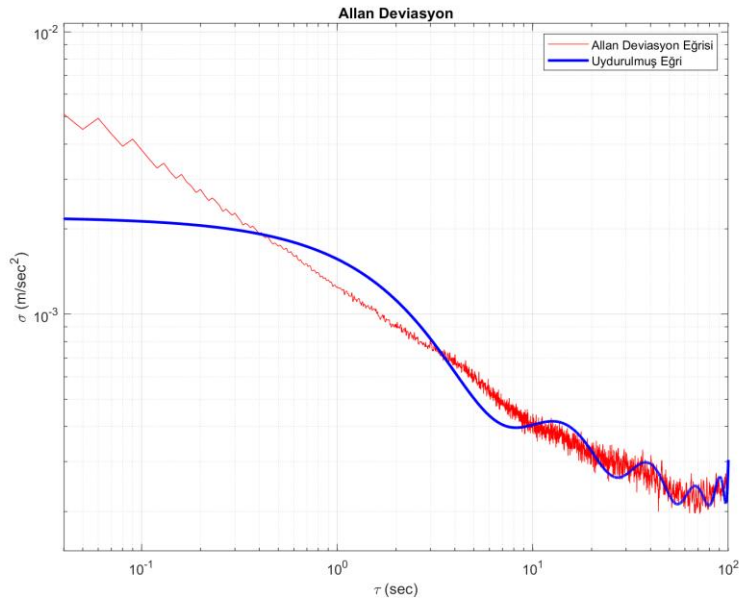
7.3 Önerilen Yöntem ile Uydurulmuş Allan Deviasyon Benzetim Sonuçları

Bu bölümde Allan deviasyon eğrisinin uydurulması için geleneksel ve rasyonel polinom uydurma yöntemlerinin benzetim sonuçları yer almaktadır. Farklı polinom katsayıları ile uydurulmuş Allan deviasyon eğrileri karşılaştırılmış ve performansları yorumlanmıştır.

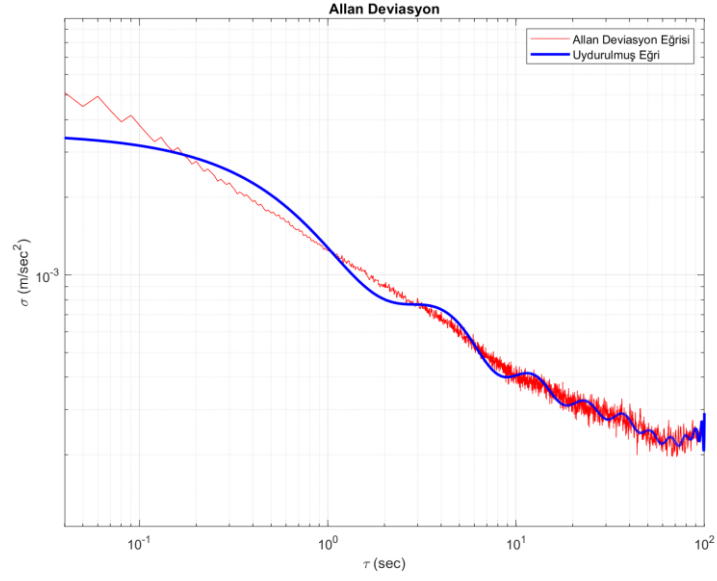
5, 10 ve 20. dereceden geleneksel polinom uydurma yöntemi ile uydurulmuş Allan deviasyon eğrileri Şekil 7.57, Şekil 7.58 ve Şekil 7.59'da gösterilmiştir.



Şekil 7.57 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan 5. Derece Polinom Grafiği

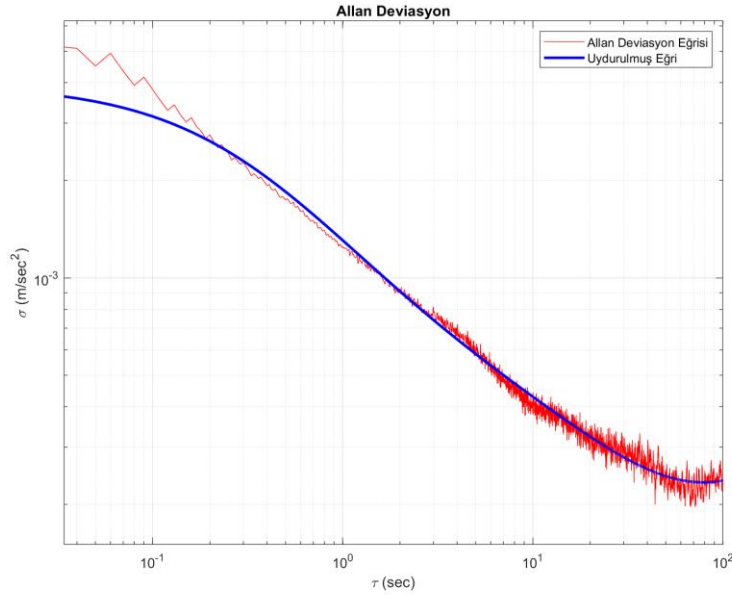


Şekil 7.58 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan 10. Derece Polinom Grafiği



Şekil 7.59 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan 20. Derece Polinom Grafiği

Pay derecesi 4, payda derecesi 2 olan rasyonel polinom yöntemi ile uydurulmuş Allan deviasyon eğrileri Şekil 7.60'da gösterilmiştir.



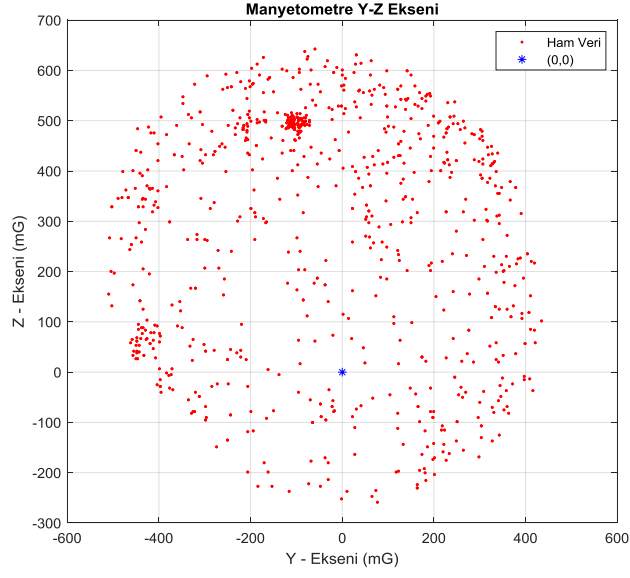
Şekil 7.60 İvmeölçer X – Ekseni Allan Deviasyon Eğrisi ve Uydurulan Pay Derecesi 4 Payda Derecesi 2 Rasyonel Polinom Grafiği

Geleneksel ve rasyonel polinom uydurma yöntemleri ile Allan deviasyon eğrileri uydurulmuştur. Geleneksel yöntemde 5, 10 ve 20 dereceden olmak üzere 3 farklı polinom uydurulmuştur. Polinom derecesi artmasıyla birlikte Allan deviasyon eğrisine yakınsıyor olsa bile, istenilen eğri uydurulamamıştır. Pay derecesi 4, payda derecesi 2 olan rasyonel polinom uydurma yöntemi ile eğri uydurulmuştur. Uydurulan rasyonel polinom Allan deviasyon eğrisine nerdeyse bire bir yakınsamıştır. Rasyonel yöntemde yer alan payda polinomu eğri üzerindeki sinüzoidal dalgalanmayı telafi etmiştir. Bu nedenle rasyonel yöntem geleneksel yöntemle göre daha iyi performans göstermiştir.

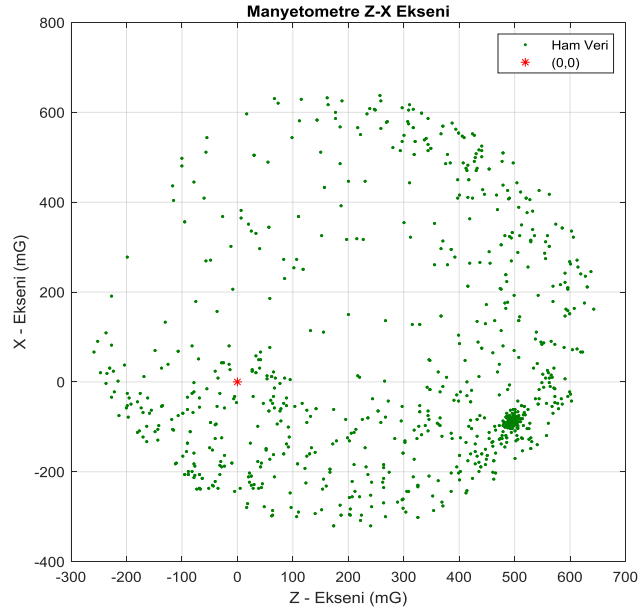
7.4 Manyetometre Hata Telafisi Benzetim Sonuçları

Bu bölümde manyetometrenin sert-demir ve yumuşak-demir bozulmalarının telafisi için uygulanan hata telafi yöntemlerinin benzetim sonuçları yer almaktadır. İlk adımda ham manyetometre verilerini kullanarak sert-demir bozulması ofset değerleri her eksen için belirlendikten sonra ölçüm değerlerine uygulanmıştır. İkinci adımda yumuşak-demir bozulması telafisi için rotasyon açıları belirlenip eksen hizalama işlemi uygulanmıştır. Ardından büyük eksenlerden elde edilmiş orantı katsayısı değerleri uygulanarak yumuşak-demir telafisi giderilmeye çalışılmıştır. Ham veriler ile hataları telafi edilmiş veriler karşılaştırılıp, telafi yöntemlerinin performansı yorumlanmıştır.

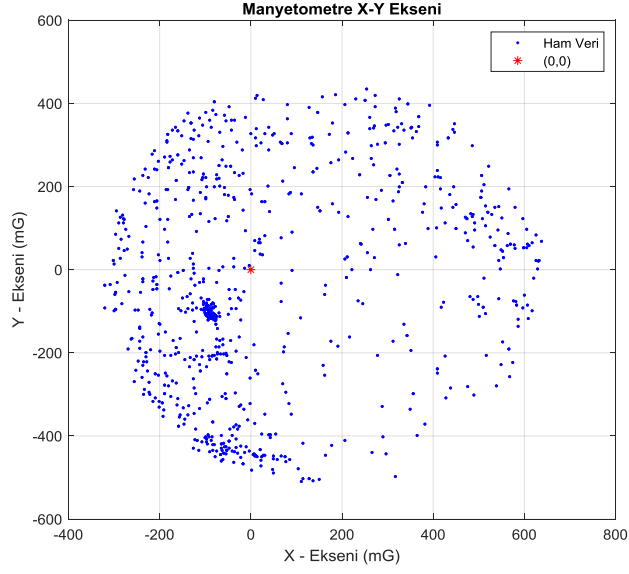
Bu tez kapsamında kullanılan manyetometre verileri robotik seviye manyetometre ile sağlanmıştır. Hata telafisi yapılmamış ham manyetometre verileri Şekil 7.61, Şekil 7.62 ve Şekil 7.63'de mili gauss cinsinden verilmiştir.



Şekil 7.61 Hata Telifisi Yapılmamış Manyetometre Y – Z Eksenli Grafiği



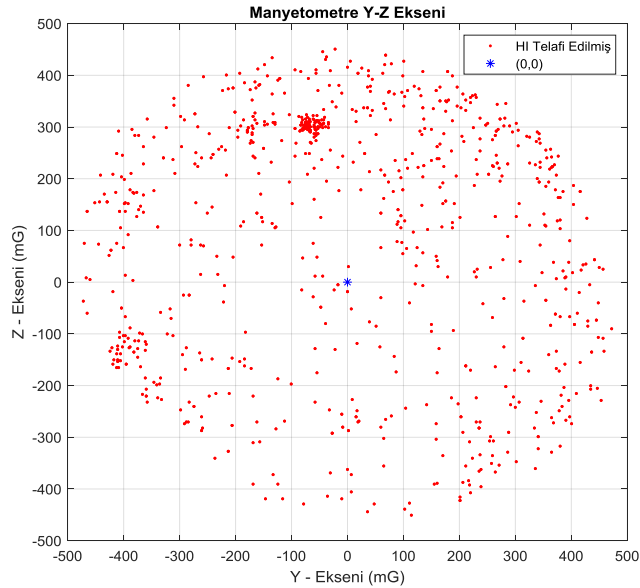
Şekil 7.62 Hata Telifisi Yapılmamış Manyetometre Z – X Eksenli Grafiği



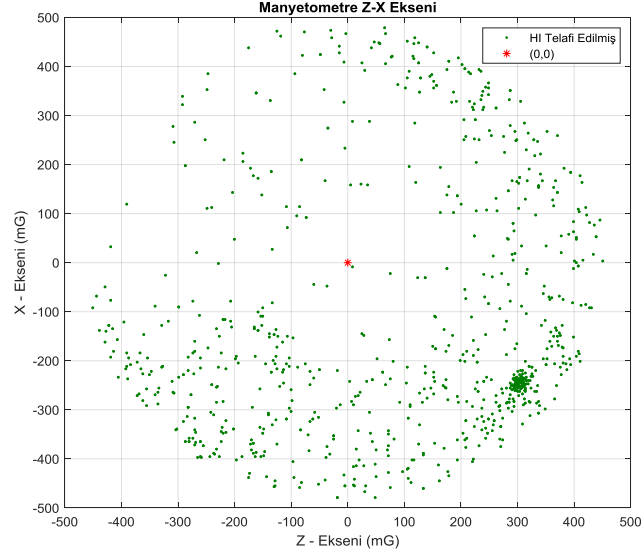
Şekil 7.63 Hata Telifisi Yapılmamış Manyetometre X – Y Eksenli Grafiği

7.4.1 Sert-demir bozulması telafi sonuçları

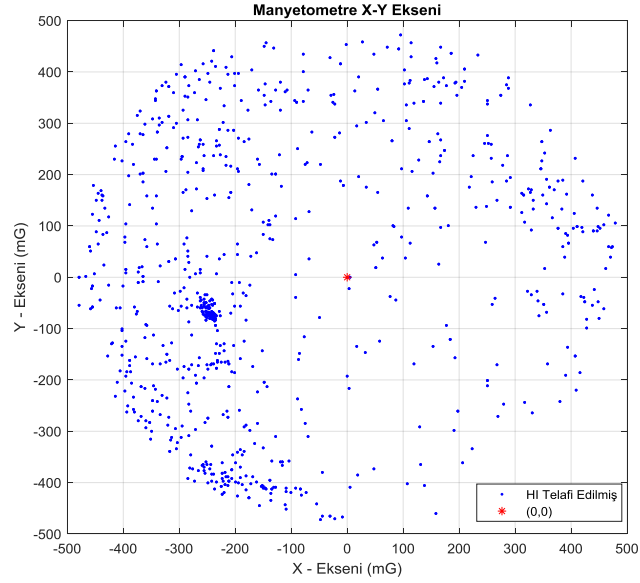
Sert-demir bozulması ofset değerleri X, Y ve Z – eksenleri için sırasıyla $HI_x = 158.50$, $HI_y = -37.49$, $HI_z = 191.96$ 'dır. Ofset değerleri kullanılarak telafi yapılmış manyetometre verileri Şekil 7.64, Şekil 7.65 ve Şekil 7.66'da gösterilmiştir.



Şekil 7.64 Sert-Demir Bozulması Telafi Edilmiş Manyetometre Y – Z Eksenli Grafiği



Şekil 7.65 Sert-Demir Bozulması Telifi Edilmiş Manyetometre Z – X Eksenini Grafiği



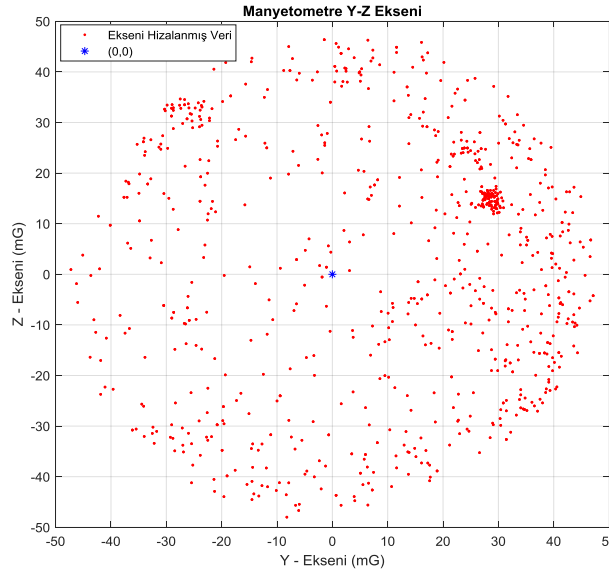
Şekil 7.66 Sert-Demir Bozulması Telifi Edilmiş Manyetometre X – Y Eksenini Grafiği

Manyetometrenin X, Y ve Z eksenlerinden ofset değerleri çıkarılarak telifisi yapılmıştır. Şekil 7.64, Şekil 7.65 ve Şekil 7.66'da da görüldüğü gibi sert-demir telifisi sonucunda ölçümler (0,0) orta nokta olmakla birlikte manyetometrenin ölçüm

aralığı olan (+500,-500) mili gauss değerleri arasındadır. Böylelikle manyetometre sert-demir bozulması başarıyla telafi edilmiştir.

7.4.2 Yumuşak-demir bozulması telafi sonuçları

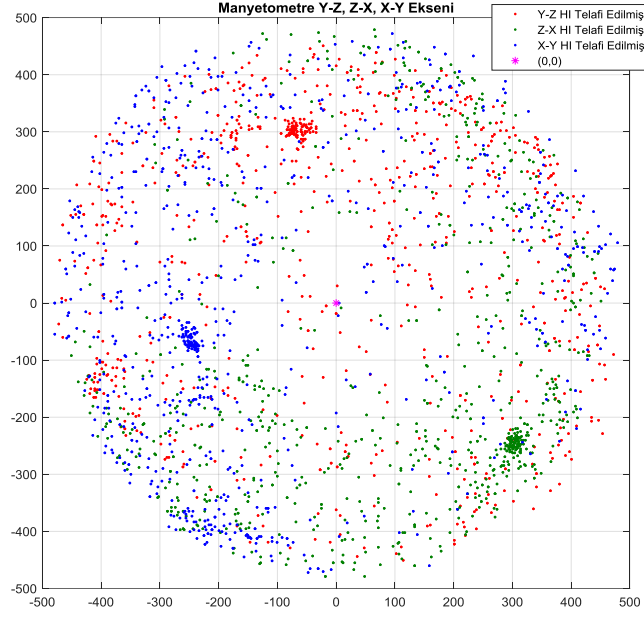
Yumuşak-demir bozulmasının ilk adımı olan eksen hizalama için rotasyon açıları $\varphi = 11.3$, $\theta = 0$, $\psi = 0$ olarak belirlenmiştir. Manyetometre Z – X ve X – Y grafiklerinde eksen hizalama gereksinimi görülmediği için θ ve ψ rotasyon açıları 0 olarak belirlenmiştir. Y – Z eksen grafiğinde ise sapma açıkça görülmektedir. Bu nedenle eksen hizalama yapılması gerekmiştir ve φ rotasyon açısı 11.3 olarak belirlenmiştir. Ekseni hizalaması yapılmış manyetometre Y – Z sonucu Şekil 7.67’de gösterilmiştir.



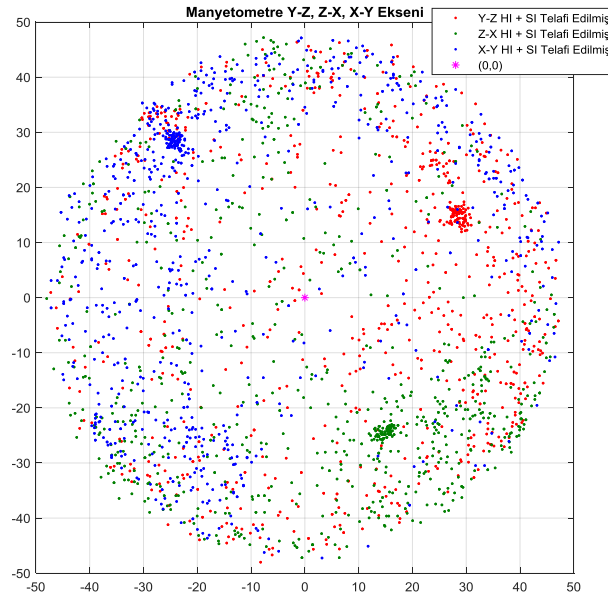
Şekil 7.67 Eksen Hizalama Yapılmış Manyetometre X – Y Eksen Grafiği

Yumuşak-demir bozulmasının ikinci adımı olan orantı katsayısı değerleri, tüm eksenlerde belirlenmiştir. X, Y ve Z ölçümleri için orantı katsayısı değerleri $\alpha_x = 1.0150$, $\alpha_y = 0.9393$, $\alpha_z = 1.0455$ 'dir. Orantı katsayısı değerleri manyetometre eksenlerine uygulanarak yumuşak-demir telafisi tamamlanmıştır.

Sadece sert-demir telafisi yapılmış ve hem sert-demir hem de yumuşak-demir telafisi yapılmış manyetometre grafikleri sırasıyla Şekil 7.68 ve Şekil 7.69'da gösterilmiştir.



Şekil 7.68 Sert-Demir Bozulması Telfi Edilmiş Manyetometre Grafiği



Şekil 7.69 Sert-Demir ve Yumuşak-Demir Bozulması Telfi Edilmiş Manyetometre Grafiği

Ham manyetometre verileri kullanılarak önce sert-demir ardından yumuşak-demir bozulmaları başarıyla telafi edilmiştir. Sert-demir bozulmasını telafi etmek için X, Y ve Z eksenlerinde ofset değerleri belirlenmiştir. Belirlenen ofset değerleri Sert-Demir bozulması telafi modelinde kullanılarak sert-demir bozulması telafi edilmiştir. Yumuşak-demir bozulmasını telafi etmek için, ilk olarak Y – Z, Z – X ve X – Y grafiklerinden eksen hizalama gereksinimlerine uygun olarak φ , θ , ψ rotasyon açıları belirlenmiştir. Belirlenen aılar rotasyon matrisinde kullanılarak, eliptik eksenler hizalanmıştır. İkinci olarak orantı katsayısı değerleri tüm eksenler için belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen orantı katsayısı değerleri uygulanarak yumuşak-demir bozulması telafi edilmiştir.

8. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında AHRs'i oluşturan AÖB ve manyetometrenin hata parametrelerinin kestirimi için yöntemler incelenmiştir. AÖB'nin deterministik hata parametrelerinin kestirimi, sadece dönü tablası kullanılarak çok pozisyonlu testler sonucu yapılabilmesi nedeniyle tez çalışmasında yer verilmemiştir. Deterministik hata parametrelerine dair sadece teorik bilgiler anlatılmıştır.

AÖB'nin olasılıksal hata parametrelerinin kestirimi için Allan deviasyon ve GTY yöntemlerine başvurulmuştur. Olasılıksal hata parametrelerinin kestiriminden önce AÖB'deki hem dönüölçer hem de ivmeölçer için sıcaklığa bağımlı sabit kayma hatalarının giderilmesi gerekmiştir. Polinom uydurma yöntemi kullanılarak ivmeölçer ve dönüölçerin tüm eksenlerinde sıcaklığa bağımlı sabit kayma hatası büyük ölçüde giderilmiştir. Uydurulan polinomun derecesinin, sıcaklık kalibrasyon performansını belirlediği benzetim sonuçlarından görülmüştür. Olasılıksal hata parametrelerinden olan açı ve hız rasgele yürüyüş hatasının sensör çıkışındaki etkileri sayısal alçak geçiren filtre kullanılarak azaltılmıştır.

Uygulanan Allan deviasyon ve GTY yöntemleri sonucunda sabit kayma kararsızlığı, açı/hız rasgele yürüyüş ve oransal rasgele yürüyüş hatalarının kestirimi yapılmıştır. Sabit kayma kararsızlığı ve açı/hız rasgele yürüyüş hataları Allan deviasyon ve GTY ile yapılan kestirimler sonucunda birbirlerine çok yakın değerler bulunmuştur. AÖB'nin Y ve Z eksenlerinde oransal rasgele yürüyüş hatalarının etkisi görülmemiştir. Frekans ortalama tekniğinin GTY'deki hata parametrelerini ortaya çıkarmakta yetersiz kalması nedeniyle AÖB'nin X – ekseninde oransal rasgele yürüyüş hatalarının kestirimi sonucunda birbirinden farklı değerler görülmüştür. AÖB'nin Allan deviasyon eğrileri Şekil 5.6'da gösterilen +1/2 eğimli eğri ile örtüştüğü için oransal rasgele yürüyüş hatalarının değeri Allan deviasyon sonucu kestirilen değerlerdir. Böylelikle AÖB sensörlerinin performansını belirlemede Alan deviasyon yönteminin GTY yöntemine göre daha iyi bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Önerilen eğri uydurma yöntemlerinden olan geleneksel ve rasyonel polinom uydurma yöntemleri ile Allan deviasyon eğrisi uydurulmaya çalışılmıştır. Geleneksel yöntemde, polinom derecesi arttıkça daha iyi performans göstermesine rağmen yüksek derecelerde uydurulan polinomlarda bile beklenen yakınsama

performansını gösterememiştir. Pay derecesi 4, payda derecesi 2 olarak uydurulan rasyonel polinom, Allan deviasyon eğrisine nerdeyse bire bir yakınsayarak iyi performans göstermiştir.

Manyetometre hatalarının kestirimi için ikili eksen grafiklerinden faydalanılmıştır. Sert-demir bozulmasının kestirimi, eksen grafiklerinin orta noktasının (0,0) noktasından kaydığı değerler belirlenerek yapılmıştır. Üç eksen için ayrı ayrı belirlenen sıfır noktasından kayma değerleri, sert-demir hatasının telafisi için ofset değeri olarak kullanılmıştır. Ardından yumuşak-demir bozulmasının kestirimi ilk adımı olarak ikili eksen grafiklerinden hizalama için gerekli rotasyon açıları belirlenmiştir. İkinci adımda ikili eksen grafiklerinden büyük eksen değerlerinden orantı katsayısı değerleri bulunmuştur. Rotasyon açıları ve orantı katsayıları kullanılarak yumuşak-demir telafisi yapılmıştır. Yapılan telafi adımları önceki durumlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda sert-demir ve yumuşak-demir telafisinde başarıya ulaşıldığı görülmüştür.

Bu tez hakkında yapılabilecek gelecek çalışmalarda, önerilen yöntemin devamı olarak farklı eğri uydurma yöntemleri denenerek daha performanslı yöntemler saptanabilir. Böylelikle düzgün ve pürüzsüz uydurulmuş Allan deviasyon eğrisi elde edilebilir. Manuel olarak uydurulan hata parametrelerinin saptamasında kullanılan $-1/2$, 0 ve $+1/2$ eğimlerine sahip eğriler için otomatikleştirilmiş şekilde bu eğimleri saptayabilen algoritmalar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] E.M. Akbaş, *Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Analizi ve Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [2] B. Altinoz, *Identification Of Inertial Sensor Error Parameters*, Master Thesis, 2015.
- [3] P.D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, 2008.
- [4] Noureldin A., Karamat T. B., Geogy J., *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*, 2013.
- [5] R. O'Reilly, A. Khenkin, K. Harney, *Using MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments*, Analog Devices, 2009.
- [6] H. Zumbahlen, *Linear Circuit Design Handbook*, Elsevier, 2008.
- [7] Piezoelectric Accelerometer, Wikipedia, 2018.
- [8] Patrick L. W., *The History of the Accelerometer*, Texas C. University, 2006.
- [9] D.H. Titterton, J.L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [10] *Magnetometer*, Wikipedia, 2018.
- [11] Peter R., *Schematic illustration of Earth's magnetic field*, The University of Edinburgh.
- [12] *More Than 60 Minutes- When Earth Stands Still*, T.S. Niazi, 2009.
- [13] *Hall Effect Sensing and Application*, Sensing and Control, Honeywell.
- [14] *Magneto-resistive Sensors Application note*, Honeywell.
- [15] *P. Jain, Magnetometers*, Engineers Garage.
- [16] *Principle of the AMR Sensor*, article, KOHDEN Co Ltd.
- [17] *IMU Errors and Their Effects*, NovAtel Journal, 2014.

- [18] J. Ferguson, *Calibration of Deterministic IMU Errors*, Embry-Riddle Aeronautical University, 2015.
- [19] C. Konvalin, *Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects*, MEMSense LLC, 2009.
- [20] *Magnetometer*, VectorNav Support Library, VectorNav Embedded Navigation Solutions.
- [21] V. Renaudin, M. Haris Afzal, G. Lachapelle, *Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain*, Hindawi Journal of Sensors, 2010.
- [22] Y. Günhan, *Detection And Compensation Of Inertial Measurement Unit Error*, 2014.
- [23] Acutronic, *Inertial Guidance Test and Calibration System*, 2018.
- [24] Y. Yüksel, B.H. Kaygısız, *Notes on Stochastic Errors of Low Cost MEMS Inertial Units*, Technical Report, University of Calgary, 2013.
- [25] X. Li, C. Zhang, Z. He, Z. Zhong, *Temperature Errors of IFOG and Its Compensation in Engineering Application*, ICEMI, 2009.
- [26] Y. Zhao, *Stochastic Modelling and Analysis of Imu Sensor Errors*, 2011.
- [27] H. Hou, *Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance*, M.Sc. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2004.
- [28] *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*, IEEE Std 952, 1997.
- [29] *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers*, IEEE Std 1293, 1998.
- [30] P.G. Savage, *Analytical Modeling of Sensor Quantization in Strapdown Inertial Navigation Error Equations*, *Journal of Guidance*, vol. 25, 2002.
- [31] J.O. Woodman, *An Introduction to Inertial Navigation*, Technical Report, University of Cambridge, 2007.