

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İVMEÖLÇER SİNYALLERİNİN İLERİ YÖNTEMLERLE  
ANALİZİ**

**DUYGU PINAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**2017**

# **İVMEÖLÇER SİNYALLERİNİN İLERİ YÖNTEMLERLE ANALİZİ**

## **SIGNAL ANALYSIS OF THE ACCELEROMETER WITH ADVANCED METHODS**

**DUYGU PINAR**

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

2017

“İvmeölçer Sinyallerinin İleri Yöntemleri Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 10/02/2017 tarihinde, **ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Doç. Dr. Erol ŞAHİN

Üye (Danışman)

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Üye

Doç. Dr. Hamit ERDEM

**ONAY**

/02/2017

Prof. Dr. Emin AKATA  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 10 / 02 / 2017

Öğrencinin Adı, Soyadı : Duygu PINAR

Öğrencinin Numarası : 21410157

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Adı, Soyadı : Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Tez Başlığı : İvmeölçer Sinyallerinin İleri Yöntemlerle Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 66 sayfalık kısmına ilişkin, 10 / 02 / 2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 16 'dır.

Uygulanan filtreleme:

1. Kaynakça hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esasları”nı inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası

Onay

10 / 02 / 2017

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

## TEŐEKKÜR

Tez çalıŐmalarımın sonuca ulaŐtırılmasında ve karŐılaŐtıđım gÜçlÜklerin aŐılmasında her zaman yardımcı ve yol gÖsterici olduğundan hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa DOĞAN 'a teŐekkür ederim.

Doç. Dr. Erol ŞAHİN ve Doç. Dr. Hamit ERDEM 'e, yardım ve Önerileri için teŐekkür ederim.

Tez çalıŐmalarım sırasında desteğini esirgemeyen bilgi ve deneyimleriyle her zaman yanımda olan arkadaŐım Erkan MİLLİ 'ye yardımlarından dolayı teŐekkür ederim.

ÇalıŐmalarım sırasında gÖsterdikleri sevgi, sabır ve destek için babam Sayın İsmail Hakkı PINAR, annem Sayın Azize PINAR ve ablam Sayın Damla PINAR ALPAK'a teŐekkür ederim.

## ÖZ

### İVMEÖLÇER SİNYALLERİNİN İLERİ YÖNTEMLERLE ANALİZİ

Duygu PINAR

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmada, titreşim analizi için kullanılan ivmeölçerli sinyallerin ürettiği durağan olmayan sinyallerin tanımlanması ve kestirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle ataletsel ölçüm birimi üzerindeki ivmeölçerden her üç ekseninde (x, y, z) ivmeölçer değerleri okunarak deneysel veri kümesi oluşturulmuştur. Ataletsel ölçüm birimi aracılığıyla elde edilen bu deneysel verinin çeşitli hatalar içerdiği gözlenmiştir. Bu hatalar deterministik (sistemik) ve olasılıksal (rasgele) olarak iki ayrı grupta incelenmiştir.

Bu araştırmada zaman tanım bölgesinde çalışan yöntemler tercih edilmiştir. Bunun nedeni frekans tanım bölgesine geçerken kullanılan dönüşüm tekniklerinin içerdiği yöntemsel hatalardan (Örneğin Fourier dönüşümünün sınır değerler ve yayılma-smearing problemleri) kaçınmaktır. Bu yöntemsel hatalar her dönüşüm ve ters-dönüşüm operasyonunda katlanarak artmıştır. Öncelikle Kalman süzgeci, iki farklı model için incelenerek deneysel verilerden hız ve konum bilgisi kestirilmiştir.

Ayrıca yakınsama özellikleri, Kalman kazancının ve durum hata ortak değişiminin normlarının belirli bir değere yakınsadığı, dolayısı ile kestirim hatasının minimize edildiği kanıtlanmıştır. Allan varyans yöntemi kullanılarak zamanla değişen varyans hesaplanarak, olasılıksal hata karakterizasyonu yapılmıştır.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** ataletsel ölçüm birimi, deterministik hata, olasılıksal hata, Allan Varyans Yöntemi, Kalman Filtreleme.

**Danışman:** Doç.Dr. Mustafa DOĞAN, Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.

## **ABSTRACT**

### **SIGNAL ANALYSIS OF THE ACCELEROMETER WITH ADVANCED METHODS**

Duygu PINAR

Baskent University Graduate School of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

This study aimed to identify non-stationary signals produced by accelerometer used for vibration analysis and prediction. First, the experimental data set was generated by reading the accelerometer values of all three axes (x, y, z) from the accelerometer on the inertial measurement unit. This experimental data obtained through the inertial measurement unit contains various errors. These errors can be studied in two separate groups as deterministic (systematic) and stochastic (random).

In this study, the methods are operated in the time domain, are preferred.

The reason for this is to avoid methodological errors (such that Fourier transform's boundary value and smearing problems) that are caused by the conversion techniques used in transformation to the frequency domain. These errors increase in each conversion and in the reverse-conversion operation. Firstly, Kalman filter is examined for two different models and speed and position information are estimated from experimental data. In the mean time, by examining convergence properties of the filter, norms of Kalman gain and state error covariance matrix are converged to certain value, that proves the minimization of the estimation error. Characterization of stochastic errors was performed by calculating the time varying variance by Allan variance method.

**KEY WORDS:** inertial measurement unit, deterministic error, stochastic error, Allan Variance Method, Kalman Filter.

**Advisor:** Assoc. Prof. Mustafa DOĞAN, Baskent University, Department of Electrical and Electronics Engineering.

# İÇİNDEKİLER LİSTESİ

Sayfa

ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Navigasyon.....	1
<b>2. ATALETSEL NAVİGASYON VE ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ.....</b>	<b>4</b>
2.1. Ataletsel Navigasyon Sistemi ve Ataletsel Ölçüm Birimi.....	4
2.2. Ataletsel Sistemlerin Çalışma Prensibi.....	5
2.2.1. Ataletsel eksen takımı.....	5
2.2.2. Dünya eksen takımı.....	6
2.2.3. Navigasyon eksen takımı.....	6
2.2.4. Gövde eksen takımı.....	6
2.3. İvmeölçer.....	6
2.3.1. İvmeölçer seçim kriterleri.....	8
2.3.1.1. <u>İvmeölçer tipi</u> .....	8
2.3.1.2. <u>İvmeölçer eksenleri</u> .....	8
2.3.1.3. <u>Ölçüm kapasitesi</u> .....	8
2.3.1.4. <u>Doğruluk</u> .....	9
2.3.1.5. <u>Hassasiyet</u> .....	9
2.3.1.6. <u>Çözünürlük</u> .....	9
2.3.1.7. <u>İvmeölçer çıkışı</u> .....	9
2.3.1.8. <u>Bant genişliği</u> .....	9
2.3.1.9. <u>Gürültü yoğunluğu</u> .....	9
2.3.2. MEMS ivmeölçerler.....	10
2.3.2.1. <u>Piezoelektrik ivmeölçer</u> .....	10
2.3.2.2. <u>Piezoresistif ivmeölçer</u> .....	10
2.3.2.3. <u>Kapasitif ivmeölçer</u> .....	11
2.3.2.4. <u>Optik ivmeölçer</u> .....	12
2.3.2.5. <u>Termal ivmeölçer</u> .....	12



2.3.2.6. <u>Rezonans ivmeölçer</u> .....	12
2.4. Dönüölçer .....	13
2.4.1. Optik dönüölçer .....	13
2.4.2. Titreşimli dönüölçer .....	14
<b>3. VERİLERİN TOPLANMASI VE ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ HATALARI....</b>	<b>15</b>
3.1. Arduino ile Verilerin Toplanması .....	15
3.2. Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Türleri .....	19
3.2.1. Deterministik ve olasılıksal hatalar .....	20
3.2.1.1. <u>Sabit kayma hatası</u> .....	20
3.2.1.2. <u>Orantı katsayısı hatası</u> .....	21
3.2.1.3. <u>Eksenel kaçaklık hatası</u> .....	21
3.2.1.4. <u>Sabit kayma kararsızlığı</u> .....	22
3.2.1.5. <u>Orantı katsayı kararsızlığı</u> .....	22
3.2.1.6. <u>Rasgele sensör gürültüsü</u> .....	22
3.3. İvmeölçer Hata Modeli .....	22
3.4. Dönüölçer Hata Modeli .....	23
<b>4. KALMAN SÜZGECİ VE ALLAN VARYANS.....</b>	<b>25</b>
4.1. Kalman Süzgeci .....	25
4.1.1. Durum uzay modeli .....	27
4.1.2. Sistemin modellenmesi .....	30
4.2. Allan Varyans .....	33
<b>5. BULGULAR VE YORUMLAR .....</b>	<b>36</b>
<b>6. SONUÇLAR .....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR LİSTESİ .....</b>	<b>67</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1	Ataletsel Navigasyon Sistemi Temel Şema .....	4
Şekil 2.2	Kütle Yay Sitemi .....	7
Şekil 2.3	Kapasitif İvmeölçer .....	12
Şekil 2.4	Optik Dönüölçerin Çalışma Prensibi .....	14
Şekil 3.1	Arduino kartı .....	16
Şekil 3.2	Ataletsel sensör ile Arduino kartının bağlantısı .....	17
Şekil 3.3	Orantı katsayısı hatası .....	21
Şekil 4.1	Kalman süzgeci .....	26
Şekil 4.2	Gauss Dağılım Grafiği .....	28
Şekil 4.3	Allan Varyans Zaman Kümelerinin Gösterimi .....	33
Şekil 4.4	Allan varyans eğrisi.....	34
Şekil 4.5	Hesaplanan Allan varyans .....	35
Şekil 5.1	X yönündeki konum – sentetik veri .....	36
Şekil 5.2	Y yönündeki konum – sentetik veri .....	37
Şekil 5.3	X yönündeki hız – sentetik veri .....	37
Şekil 5.4	Y yönündeki hız – sentetik veri .....	38
Şekil 5.5	X yönündeki konum – sentetik veri – sabit ivme .....	39
Şekil 5.6	Y yönündeki konum – sentetik veri – sabit ivme .....	40
Şekil 5.7	X yönündeki hız – sentetik veri – sabit ivme .....	40
Şekil 5.8	Y yönündeki hız – sentetik veri – sabit ivme .....	41
Şekil 5.9	X yönündeki konum 2000 iterasyon.....	42
Şekil 5.10	Y yönündeki konum 2000 iterasyon.....	43
Şekil 5.11	X yönündeki hız 2000 iterasyon.....	44
Şekil 5.12	Y yönündeki hız 2000 iterasyon.....	45
Şekil 5.13	X yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon.....	46
Şekil 5.14	Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon.....	47
Şekil 5.15	X yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon.....	48
Şekil 5.16	Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon.....	49
Şekil 5.17	X-Y yönlerindeki konum için Kalman kazancı .....	50

Şekil 5.18	X-Y yönlerindeki konum için Kalman kazancı .....	51
Şekil 5.19	X yönündeki konum 50000 iterasyon.....	52
Şekil 5.20	Y yönündeki konum 50000 iterasyon.....	53
Şekil 5.21	X yönündeki hız 50000 iterasyon.....	54
Şekil 5.22	Y yönündeki hız 50000 iterasyon.....	55
Şekil 5.23	X yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon.....	56
Şekil 5.24	Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon.....	57
Şekil 5.25	X yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon.....	58
Şekil 5.26	Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon.....	59
Şekil 5.27	X-Y yönlerindeki Kalman kazancı hata 50000 iterasyon.....	60
Şekil 5.28	X-Y yönlerindeki hız Kalman kazancı hata 50000 iterasyon .....	61
Şekil 5.29	X yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata - Wiener.....	62
Şekil 5.30	X yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata – Wiener....	63
Şekil 5.31	Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata – Wiener.....	64
Şekil 5.32	Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata – Wiener....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$O_t$	sensör çıkışı
$i_t$	sensör girişi
$D_T$	deterministik hata
$n_t$	gürültü terimi
$t$	zaman
$T$	sıcaklık
$\widetilde{a}_x$	ivmeölçer çıkışı
$a_x$	gerçek ivme
$O_x$	orantı katsayısı hatası
$\Delta O_x$	orantı katsayısı kararsızlığı
$K_x$	sabit kayma hatası
$\Delta K_x$	sabit kayma kararsızlığı
$g_x$	rasgele sensor gürültüsü
$E_{xy}$	ivmeölçer ve dönüölçer eksenel kaçaklık hatası
$E_{xz}$	ivmeölçer ve dönüölçer eksenel kaçaklık hatası
$E_{yz}$	ivmeölçer ve dönüölçer eksenel kaçaklık hatası
$E_{zx}$	ivmeölçer ve dönüölçer eksenel kaçaklık hatası
$E_{zy}$	ivmeölçer ve dönüölçer eksenel kaçaklık hatası
$\widetilde{G}_x$	dönüölçer çıkışı
$G_x$	gerçek dönü
$D_{Gx}$	ivmeye bağlı sabit kayma hatası
$Z_n$	sensörden ölçülen konum ve hız değerleri
$X_n$	ivme değerlerinden dönüştürülen konum ve hız değerleri
$W_n$	gürültü
$V_n$	gürültü
$\mu$	ortalama
$\sigma$	sapma
$Q, R$	kovaryans matrisi
$L_n$	filtreleme kazancı
$K_n$	kalman kazancı
$F$	durum geçiş matrisi

G	kontrol-giriş matrisi
H	gözlem matrisi
N	örnek sayısı
$\tau_0$	örnekleme periyodu
$\tau$	ortalama zaman

ADC	Analog Digital Converter
AÖB	Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
FOG	Fiber Optik Gyroscope
GM	Gauss-Markov
IDE	Integrated Development Environment
IFOG	Interferometric Fiber Optik Gyroscope
LSF	Least Squares Fitting
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
PIC	Peripheral Interface Controller
PPM	Part Per Million
RLG	Ring Laser Gyroscope

## 1. GİRİŞ

Cep telefonlarından, robotlara, hava araçlarından, stabilizasyon sistemlerine kadar hemen hemen her alanda kullanılan ataletsel ölçüm birimi (IMU-inertial measurement unit) birden fazla atalet sensörünü içinde barındıran sensör birimidir. Üzerinde bulunan dönüölçer (jiroskop) ve ivmeölçer sensörleri ile elde edilen veriler sayesinde, cisimlerin açısal hızlarını, yerçekimi yönlerini ve hareketten kaynaklanan ivmeleri ölçebilmekteyiz. Ataletsel ölçüm birimi sensöründen alınan ve titreşimler dolayısı ile gürültülü sinyalleri barındıran verilere Kalman Filtresi uygulanarak sistemlerin hassasiyeti artırılmıştır. Ataletsel ölçüm biriminde sensör hataları meydana gelmektedir. Ataletsel sensörler fiziksel yapıları gereği çeşitli hata kaynaklarına sahiptir. Bu hataları deterministik (sistemik) hatalar ve olasılıksal (rasgele) hatalar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Allan varyans durağan durumdaki ölçerlerden, uzun süreli veri alınarak gerçekleştirilmektedir. Alınan bu ölçer verilerinin grup ortalamalarının farklarına dayalı işlem sonucunda çizilen grafikten, gürültü kaynaklı değişik hatalar hesaplanır. Olasılıksal hatalar için ise Kalman süzgeci kullanılmaktadır. Bu konu aşağıda detaylandırılmaktadır.

### 1.1 Navigasyon

Navigasyon, belirli bir referansa göre konum, hız yönelim bulma işlemidir. Navigasyonda kullanılan en eski yöntemlerden biri, belirli gök cisimlerini gözlemleyerek yerküre üzerinde konum ve yönelim bulunmasıdır. İlk çağlarda denizciler, temel yönler olarak doğu ve batıyı; güneşin doğduğu ve battığı, güneyi ise kuzey yarım kürede, güneşin gökyüzünde en tepe noktada bulunduğu andaki yönler olarak belirlemişlerdir.

Dünya üzerinde bir noktanın enleminin (kuzey – güney konumu), çok eski zamanlardan beri, güneşin ya da belirli yıldızların ufuk hattıyla yaptığı açı ölçülerek hesaplanabilmesine rağmen, boylamının (doğu-batı konumu) hesaplanması 18. Yüzyılda çok hassas saatlerin yapılmasıyla mümkün olmuştur. Başlangıç meridyeni olarak kabul edilen Greenwich meridyeni üzerindeki bir noktada güneş en tepe noktasındayken başlatılan bir saat, başka bir noktada, yine güneş en tepe noktasındayken, örneğin, üç saat geçtiğini gösteriyorsa, bu noktanın 45 derece batı boylamı üzerinde olduğu hesaplanır. Çünkü dünya, saatte 15 derecelik sabit bir hızla batıdan doğuya doğru dönmektedir [1,2].

Ataletsel Navigasyon sistemleri temelde bir tür parakete hesabına dayanır. Ancak, seyir halindeki sistemin hızını ve bu hızın yönünü hesaplama yöntemi farklıdır. Bir ataletsel navigasyon sisteminde, birbirine dik üç eksene yerleştirilmiş ivmeölçerler kullanılarak, bu eksenler boyunca sisteme etki eden kuvvetler ölçülür. Yine bu eksenlere yerleştirilmiş üç adet dönüölçer, sistemin her bir eksen etrafındaki dönüş hızını ölçer. Bu ölçümler işlenerek, navigasyon bilgileri (yerküreye göre konum, hız ve yönelim) elde edilir [3].

Navigasyon, tarihte ağırlıklı olarak denizlerde seyahat gemileri ile yapılmıştır. Günümüzde ise konum tabanlı hizmetler, arama ve kurtarma, kara ve hava araçları, uzay araçları, balistik roketler, otomatik tarım, inşaat araçları ve robotik gibi alanlarda askeri ve sivil amaçlar için kullanılmaktadır [4].

Özellikle havacılıkta ve savunma sanayisinde kullanılan navigasyon sistemleri birçok araştırmamanın konusu olmuştur [5;6]. İlerleyen teknolojik gelişmeler, ekonomik ve basit olduğu için MEMS ivmeölçerlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır [7;8;23]. Bu ivmeölçerler, jiroskoplarla ve manyetometerlerle birleştirilerek, çeşitli gelişmiş süzgeçler de kullanılarak entegre sistemler olarak birçok uygulamada kullanılmıştır [9;10;11].

Bu araştırmaların çoğunda hata tipleri ve hata kompanzasyon teknikleri ayrıca incelenmiştir [12;13]. Özellikle zamanla değişen varyans teknikleri geliştirilmiştir [14;22]. Gömülü sistem tasarımı ve gerçekleştirilmesinin en önemli kaynaklarından

birisi olan navigasyon sistemleri, çeşitli yeniliklere yol açmıştır [15;16]. Süzgeç uygulamalarında genellikle Kalman algoritması kullanılmıştır [16;17]. İleri süzgeç algoritmaları, örneğin doğrusal olmayan Kalman ya da ön-süzgeçleme yöntemleride oldukça önemli bir gelişmedir [17;18]. Daha sonra bütün bu sistemleri kapsayan ve bunları navigasyon standartlarıyla bütünleştirip, radar ve güdüm dibi uygulamalarıda entegre çözüme dahil eden, çok gelişmiş sistemler üretilmiştir [19;20;21].

Son yıllarda teknoloji hızla gelişmeye devam etmektedir. Böylece hem daha kaliteli hem de daha ucuz maliyetli ürünlerin üretiminde artış olmuştur. Uzun süreli navigasyon işlemlerinde ataletsel sensörlerde tümlev alma işlemi ile oluşan hatalar verilerin doğru bir şekilde ölçülmesini zorlaştırmaktadır. Bu tez çalışmasında bu hataların belirlenmesi için gerekli çeşitli yöntemler uygulanacaktır.

Bu tez birinci bölümü giriş olmak üzere toplamda altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde ataletsel navigasyon, ataletsel navigasyon sensörlerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise deneysel verilerin toplanması ve ataletsel ölçüm birimi hata türleri anlatılacaktır. Dördüncü bölümde Kalman süzgeci ve Allan varyans metodları ile yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Beşinci bölümde bulgular ve yorumlar, altıncı bölümde ise sonuçlar bulunmaktadır.



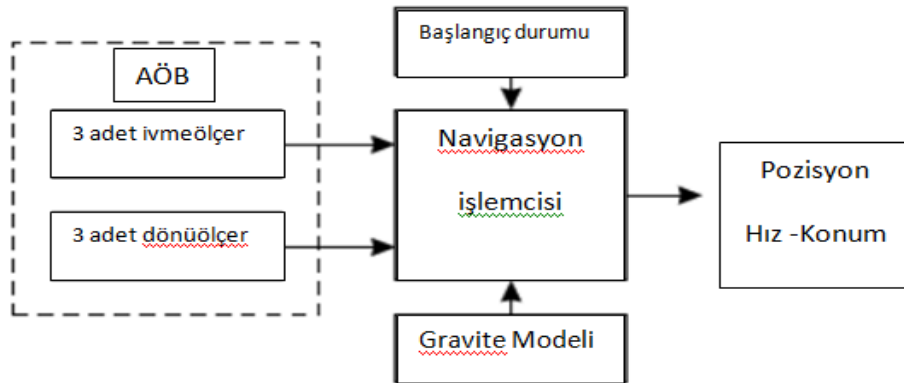
## 2. ATALETSEL NAVİGASYON VE ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ

Navigasyon bir geminin veya bir uçağın konumunun çeşitli yöntemlerle belirlenmesidir. Bu ifade iki kavramı kapsamaktadır. İlki hareket eden kütlenin veya cismin bilinen bir referans noktasına göre hızının ve konumunun bilinmesidir. Diğeri ise bir konumdan başka bir konuma giderken herhangi bir engelle karşılaşmayı önlemek olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında ilk ifade üzerinden gidilecektir.

Navigasyon yöntemiyle hız ve pozisyon manuel veya otomatik olarak tanımlanabilmektedir. Kısacası navigasyon sistemi konum, ivme ve açıl hız bilgilerini sağlar. Navigasyon sistemi ivmeölçer, dönüölçer ve radyo alıcılarından oluşmaktadır [4].

### 2.1. Ataletsel Navigasyon Sistemi ve Ataletsel Ölçüm Birimi

Ataletsel navigasyon sistemi, ataletsel ölçüm birimi (AÖB) olarak da tanımlanır. Bu AÖB üç eksende parakete hesabı yapmaktadır. AÖB birbirine dik üç eksende üç adet ivmeölçer ve üç adet dönüölçerin oluşturduğu bütündür. Böylece navigasyon işlemcisinin ürettiği AÖB verileriyle pozisyon hız ve konum bilgilerine ulaşılabilir.



Şekil 2.1 Ataletsel Navigasyon Sistemi Temel Şema

AÖB başlangıç konumu bilindiği durumda, üç eksende anlık doğrusal ivmeyi, yuvarlanma, yunuslama ve sapmadaki açıl değışimleri belirler ve tümlev olarak

mevcut konum, hız ve yönelimin belirlenmesini sağlar. Bu hesaplamalarda ataletsel sensör verilerinin tümlevi alındığından AÖB hataları eklenerek artan hatalara yol açar. Örnekleme periyodunu ne kadar arttırırsak o kadar az hatalı integral sonucu alabiliriz. Ancak bu durumda daha fazla hafıza, daha hızlı ADC, daha güçlü işlemci ve daha fazla güç gerekir. Yüksek kalite ataletsel sensörler daha az hataya sebep olduklarından daha kararlı navigasyon sağlarlar.

Dönüölçer ve ivmeölçerler kayma sürüklenmesi adı verilen bir kayma yaparlar ve bundan dolayı hassas açı ölçümünde tek başlarına kullanılmazlar. Ayrıca ivmeölçer kuvvete karşı çok duyarlı olduğundan en ufak titreşimlerde çok yüksek gürültüler oluşturmaktadırlar. Dönüölçerler bu kuvvetlerden etkilenmezler. Dönüölçerler, ivmeölçer çıkışlarını filtreleyerek daha doğru ölçüm yapılmasını sağlarlar.

Elektronik mühendisliği, elektro-optik ve makine mühendisliği gibi bilimin çeşitli dallarında ataletsel sensörleri geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Uygulamaların çoğunda sensör performansının yanında sensör fiyatı ve boyutları da etkili rol oynamaktadır [23].

## **2.2. Ataletsel Sistemlerin Çalışma Prensibi**

Bir ataletsel navigasyon sisteminde, birbirine dik üç eksene yerleştirilmiş ivmeölçerler kullanılarak, bu eksenler boyunca sisteme etki eden kuvvetler ölçülür. Yine bu eksenlere yerleştirilmiş üç adet dönüölçer, sistemin her bir eksen etrafındaki dönüş hızını ölçer. Bu ölçümler işlenerek, navigasyon bilgilerine (yerküreye göre konum, hız ve yönelim) ulaşılır.

### **2.2.1. Ataletsel eksen takımı**

Uzak yıldızlara göre dönmediği ve ivmelenmediği varsayılan eksen takımlarıdır. Navigasyon amaçlı çalışmalarda genellikle ataletsel eksen takımının z ekseni dünya dönüş ekseni yönünde, x ve y eksenleri ise ekvator düzleminde seçilir.

### 2.2.2. Dünya eksen takımı

Merkezi dünyanın merkezi ile çakışık, dünya ile dönen, z-ekseni dünya dönüş eksen yönünde, y eksen boylam ve x-ekseni Greenwich meridyeni ile Ekvator çizgisinin kesişim noktasından geçen bir eksen takımıdır.

### 2.2.3. Navigasyon eksen takımı

Merkezi seyir sistemi üzerinde olan ve eksenleri kuzey, doğu ve aşağı yönlerde seçilen bir eksen takımıdır.

### 2.2.4. Gövde eksen takımı

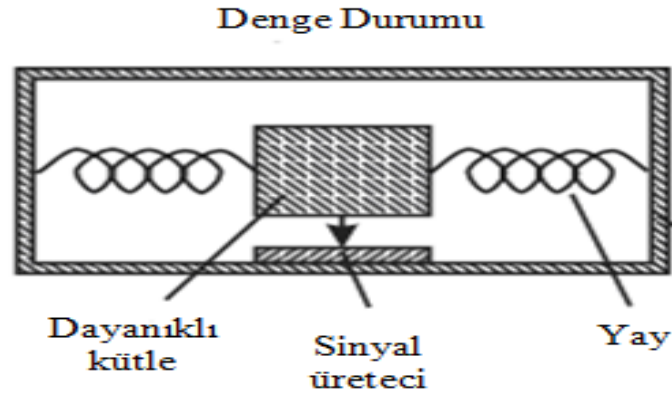
Merkezi seyir sistemi üzerinde olan ve eksenleri belirgin araç yönleriyle çakışık olarak seçilen eksen takımıdır. Örneğin merkezi uçak ağırlık merkezinde, x-ekseni burun, y-ekseni sağ kanat doğrultusunda ve z-ekseni sağ el kuralına göre seçilebilir. Bu eksen takımları arasındaki dönüşümü ifade etmenin bir yöntemi, Euler açıları olarak adlandırılan üç açı değeri ile sıralı bir dönüşüm yapmaktır. Örneğin, Seyrüsefer eksen akımı önce kendi z - eksen etrafında  $\psi$  (sapma açısı) kadar döndürülür, sonra yeni oluşan eksen takımı y - eksen etrafında  $\theta$  (yunuslama açısı) kadar döndürülür ve son olarak bu eksen takımı x - eksen etrafında  $\Phi$  (yalpa açısı) kadar döndürülerek gövde eksen takımına ulaşılır [3].

## 2.3. İvmeölçer

İvmeölçerler, hareketli bir cismin belli bir yöndeki ivmesini ölçer. Dünya ekseninde hareketsiz bir cismin ivmesi, yerçekimi ivmesi olduğundan ölçüm bu değere göre yapılır. İvmeölçer hareketsizken de yerçekimi ivmesini ölçer. Bu durumda cismin dikey eksene (z eksen) göre ivmesi hesaplanırken yer çekimi ivmesi hesaba katılmalıdır. Yani ivmeölçer tanım olarak üzerine düşen statik kuvvet veya dinamik ivmeleri ölçen cihazdır. Statik ivmelere yerçekimi, dinamik ivmelere ise hızlanmadan kaynaklanan ivme, örnek verilebilir. İvmeölçerlerin ölçtüğü ivmeler metre cinsinden olabileceği gibi 'g' yani yerçekimi cinsinden de hesaplanabilir. Ölçülen ivmeler x, y ve z eksenlerinde ölçülmektedir. İvmeölçer hareketsiz

konumda iken z ekseninde ' 1 g ' (yerçekimi) ivme ölçmektedir. Hareket ettiğinde ise hareket yönüne göre ivme değişmektedir.

İvmeölçerlerde genel mekanizma olarak kütle yay sistemini baz alan, ivme ölçme prensibi Hooke Yasası ve Newton'un birinci hareket kanununa dayanır. Bu kanuna göre hareketsiz cisimler hareketsiz kalma, hareketli cisimler ise hareket etme eğilimindedir. Şekilde basit ivmeölçer yapısı verilmiştir. Basit ivmeölçerler yapılarında dayanıklı kütle, yay, sinyal üretici ve kutu bulundurulur. Newton'un birinci hareket kanununa göre kütlenin maruz kaldığı kuvvet  $F=ma$ 'dır. Hooke Yasası'na göre ise, yayın maruz kaldığı kuvvet  $F=kx$ 'tir. Sistemde bu iki kuvvet eşit olduğundan  $ma=kx$  olmaktadır. Buradan anlaşılan, kütlenin ivmesi ile yayın uzama miktarı doğru orantılıdır. İvmeölçer, yayın uzama miktarını yapısında bulunan çeşitli algılayıcılar kullanarak elde eder ve ivme bilgisine ulaşılır. İvmeölçerlerde kullanılan kütleyle sismik kütle adı verilir. Yay yerine başka bükülebilen malzeme de kullanılabilir.



Şekil 2.2 Kütle Yay Sitemi

İvmeölçerler üç eksendeki ivmelenmeyi ölçerler. Bunu üzerlerine düşen statik veya dinamik basıncı ya da manyetik alanı ölçerek yapabilirler. Statik basınç durma anındaki değerdir yani yerçekimidir. Sensörden alınan değerler  $m / s^2$  veya 'g kuvveti' diye isimlendirilir. Dolayısıyla durgun pozisyonda sensörden okunacak '1g' değeri  $9.8 m/s^2$ ' ye yani yerçekimi kuvvetine denk gelmektedir.

İvmeölçerler 3 ana grupta incelenir. Bu grupların içerisinde mekanik ivmeölçerler, kuvars ivmeölçerler ve MEMS ivmeölçerler bulunmaktadır. Her grup sensör farklı hata karakteristiklerine ve dolayısıyla farklı uygulama alanlarına sahiptir.

### **2.3.1. İvmeölçer seçim kriterleri**

İvmeölçerlerin birçok farklı özellikleri bulunmaktadır. Çeşitli kullanım amaçlarına göre bu özelliklere bakılarak ivmeölçer seçimi yapılabilir.

#### **2.3.1.1. İvmeölçer tipi**

İvmeölçerin, ivme bilgisine hangi mekanizmayı kullanarak ulaştığı, hangi tip algılayıcı kullanılarak algılandığını belirten özelliktir.

#### **2.3.1.2. İvmeölçer eksenleri**

İvmeölçerlerin, hangi eksenlerde ölçüm yapabildiğini belirtir. Başlangıçta tek eksenle ölçüm yapabilen ivmeölçerler var iken, şimdi iki veya üç eksenle ölçüm yapabilen ivmeölçerler kullanılmaktadır. Eksen seçimi kullanılan alanlara göre değişir. Üç eksenli ivmeölçer üç boyutlu hareketi (x,y,z) vektörel olarak net bir biçimde elde eder.

#### **2.3.1.3. Ölçüm kapasitesi**

İvmeölçerlerin maksimum ölçebileceği maksimum ivmeyi belirtir. Kapasite seçimi uygulamaya bağlıdır. Şok dalgası, deprem gibi yüksek ivmeli olayların ölçümü için yüksek ölçüm kapasitesine sahip ivmeölçerler kullanılır. Hassas ölçüm yapılması ve hareket yönünün belirlenmesi gibi uygulamalarda düşük ölçüm kapasitesine sahip ivmeölçerler kullanılır. Ölçüm kapasitesi düştükçe doğruluk ve çözünürlük artar.

#### **2.3.1.4. Doğruluk**

İvmeölçerin ölçtüğü ivme değerinin gerçek ivme değerine ne kadar yakın olduğunu belirtir.

#### **2.3.1.5. Hassasiyet**

İvmeölçerin verdiği çıkış ile ölçtüğü ivme arasındaki ilişkiyi veren bağıntıdır. Hassasiyet belirli bir oranda ise ivmeölçer doğrusaldır. Doğrusal ivmeölçerler her zaman daha fazla tercih edilir.

#### **2.3.1.6. Çözünürlük**

İvmeölçerin ölçebildiği en küçük ivme değerini belirtir. Ölçtüğü bu değer ne kadar küçükse, çözünürlük o kadar fazladır.

#### **2.3.1.7. İvmeölçer çıkışı**

İvmeölçerin ivme ile ilintili ne tip bir çıkış verdiğini belirtir. İvmeölçer çıkış tipleri; analog, sayısal ve PWM'dir. (Pulse width modulation-darbe genişliği modülasyonu)

#### **2.3.1.8. Bant genişliği**

İvmeölçerlerin ölçebildiği en yüksek frekanslı ivme değişimini belirtir. Yüksek salınımlı hareketlerin ölçümünde bu özellik önemli bir yere sahiptir. Ancak yüksek bant genişliğine sahip ivmeölçerlerin süzgeçsiz kullanımı, gürültülerin algılanmasına neden olarak olumsuz etki yaratır.

#### **2.3.1.9. Gürültü yoğunluğu**

Birim bant genişliği başına düşen gürültü gücünün kareköküdür. Gürültünün, spektruma göre ortalama dağılımını gösteren bir ölçüttür. Birimi ivmeölçerler için

$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  'dir. Bu ifade enerji spektrumun sinyalin genliğinin karesinin frekansa oranı olmasından kaynaklanmaktadır. Her iki tarafın karekökü alınarak bu birime ulaşılır.

### **2.3.2. MEMS ivmeölçerler**

MEMS ivmeölçerler piezoelektrik, piezoresistif, kapasitif, optik, termal ve rezonans (resonant) olmak üzere algılama mekanizmalarına göre altı grupta incelenebilir.

#### **2.3.2.1. Piezoelektrik ivmeölçer**

Piezoelektrik özellik; sürekli kutuplaşmaya sahip bir iyonik kristale basınç uygulanırsa kutuplar arası uzaklık azalır, yüzeyinde yük birikimi artar, dolayısıyla iki uç arasında bir gerilim farkı doğar ve bir iletkenle birleşirse akım artar. Böylece mekanik etki elektriksel büyüklüğü dönüşür. Diğer taraftan, aynı kristalin iki ucu arasına '-' yükler '+' elektroda, '+' yükler '-' elektroda doğru çekilir. '+' ve '-' yük merkezleri arasındaki uzaklık artar ve bunun sonucunda kristalin boyu büyür. Alanın yönü değişirse aynı yüklü işaretler birbirini iter ve kristalin boyu kısalır. Böylece elektriksel etki mekanik büyüklüğe dönüşür. Bu davranışına piezoelektrik özellik denir.

Piezoelektrik ivmeölçerler, içinde bulunan kütle yay sisteminden elde ettiği ivmeyi bir piezoelektrik malzeme yardımıyla elektriksel sinyale çevirir. Piezoelektrik malzemenin özelliği ise mekanik basınç altında kaldığında basınca dik yönde elektriksel potansiyel üretmesidir. Aynı zamanda, piezoelektrik malzemeye, elektriksel potansiyel uygulandığında mekanik basınç üretir. Bu etkiden yararlanarak, ivme altındaki kütlelerin piezoelektrik malzemeye uyguladığı basınç ivme ile ilintili bir elektriksel potansiyel elde etmemizi sağlar. Piezoelektrik ivmeölçerlerin ölçüm kapasitesi yüksektir fakat doğrusallıkları düşüktür.

#### **2.3.2.2. Piezoresistif ivmeölçer**

İvmeyi, değişken direnç yardımıyla elektrik sinyallerine çevirir. Bu ivmeölçerlerde, kullanılan üç farklı yapı vardır.

Potansiyometrik ivmeölçerin içyapısında, kütle yay sistemindeki kütleyle bağlı bir potansiyometre kolu bulunur. Böylelikle, ivme uygulandığında hareket eden kütle, potansiyometre direncini değiştirir. Potansiyometredeki değişim, akım ya da voltaj olarak algılanabilir.

Piezorezistif ivmeölçerde, piezorezistif malzeme üzerine mekanik basınç uygulandığında, malzemenin empedansı değişmektedir. Piezoelektrik etkiye çok benzer bir yapıdır ancak farklı mekanizmalara sahiptir.

Bükülme algılayıcı ivmeölçer ise ince bir film üzerine yerleştirilmiş dirençten oluşur. Bu ivmeölçerlerde yay yerine, ivme altında eğilen bir malzeme bulunur. Malzeme üzerindeki bükülme algılayıcısının, ivme uygulandığında direnci değişir. Değişen direnç, içinde bulunan Wheatstone Köprüsü üzerinden algılanır. Böylelikle ivme değeri elektrik sinyallerine çevirilir.

### **2.3.2.3. Kapasitif ivmeölçer**

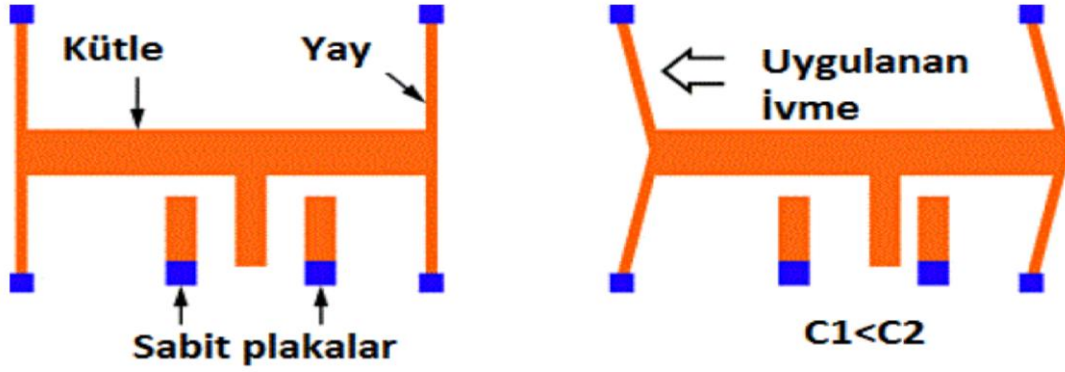
Mekanizma olarak sabit ve hareketli plaka kısımlarından oluşur. Hareketli kısım kütle-yay sistemidir. İvme uygulandığında sabit plakalar ile hareketli plaka arasındaki mesafeler değişir. Bu değişim kapasite değişimine yol açar. Bu değişimin bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.1)$$

Burada C : kapasitans,  $\epsilon$  : dielektrik sabiti, A : Dik kesit alanı, d: uzaklığı göstermektedir. Bu durumda plaka mesafeleri arasındaki değişim ile kapasitans ters orantılıdır. Hareketli kısım plakaları, sabit kısımdaki her bir plakanın arasına yerleşir. Böylece aralıkları birbiriyle ters olarak değişen iki kapasitans elde edilmiş olur. Değişen kapasitansın değeri ise yük yükseltici (charge amplifier) adı verilen bir devre ile elektriksel sinyale çevirilir. Yük yükselticine, kapasitörün iki ucuna birbirleri arasında 180 derece faz farkı olan ve frekansı 1 MHz olan kare dalga uygulanır. Bu sinyalin 1 MHz olma nedeni, sistemin frekans genlik tepkisinin bu değer için maksimum olmasıdır. Eğer bir ivme algılanırsa, kapasitörlerden birinin kapasitansı artar, diğerinin azalır. Böylelikle sinyallerden birinin genliği daha fazla



olur ve toplam çıkış sinyalinin genliği artar. Bu sinyal bir buffer tarafından güçlendirilir ve çözücüye sokulur. Çözücü, sinyalin zarfını yani genlik bilgisini elde ederek, analog çıkış üretir. Kapasitif ivmeölçer, düşük maliyetli ve lineer olma özelliği gösterir. [3]



Şekil 2.3 Kapasitif İvmeölçer

#### 2.3.2.4. Optik ivmeölçer

Optik sensörlerin yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi ve yüksek performans göstermesi avantajlarıdır ancak elektromanyetik girişime karşı duyarsızdırlar.

#### 2.3.2.5. Termal ivmeölçer

Termal ivmeölçerin dayanıklı kütlesi 2 adet elektrot arasına yerleştirilmiş sıcak hava baloncuğudur. Herhangi bir ivme girişi olmadığı zaman, elektrotlar arasındaki sıcaklık farkı sabit kalır. Harici bir ivme uygulandığında ise sıcak hava kabarcığı hareket eder ve elektrotlar arasındaki sıcaklık farkı değişir. Bu tip sensörlerde ivme sıcaklık farkına dönüştürülür.

#### 2.3.2.6. Rezonans ivmeölçer

Rezonans ivmeölçerlerin dayanıklı kütlesi doğal rezonans frekansında titreştirilir. Harici ivme uygulandığında kazanılan ataletsel kuvvet sistemin rezonans frekansını değiştirir. Rezonans frekansındaki değişimi bularak, ivmenin büyüklüğü elde edilebilir [8].

## 2.4. Dönüölçer

Dönüölçer, açısız hızı ölçerek eksen etrafındaki hareketi tanımlar. Yön ölçümü veya ayarlamasında kullanılan, açısız dengenin korunması ilkesiyle çalışan bir alettir. Günlük hayatta, uçak ve gemilerde yön bulmak, uzay teleskoplarında yörünge kararlılığını sağlayabilmek için yaygın olarak dönüölçerlerden yararlanılmaktadır. Kısaca dönüölçerler, bir tekerleğin dik bir çubuğa bağlı olarak dönmesi sonucu bırakıldığı şekilde durması esasına dayanmaktadır. Tekerleğin etrafında bir çember bulunmaktadır ve bu çembere de dik olacak şekilde bir çember daha bulunmaktadır. Yatay ekseninde dönen tekerlekten dolayı dönüölçer sürekli olarak bırakıldığı konumda hareket edecektir. Bu da cihazların ne şekilde durdukları hakkında bize bilgi verecektir. dönüölçerler, uçakların otomatik pilot sistemlerinde ve uyduların sürekli olarak dünyaya bakabilmelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca son zamanlarda telefon ve tabletlerde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede mobil cihazlar, ekran döndürme, telefon ile oyunda araba veya karakterleri yönlendirme gibi birçok işlevleri yerine getirebilir hale gelmiştir.

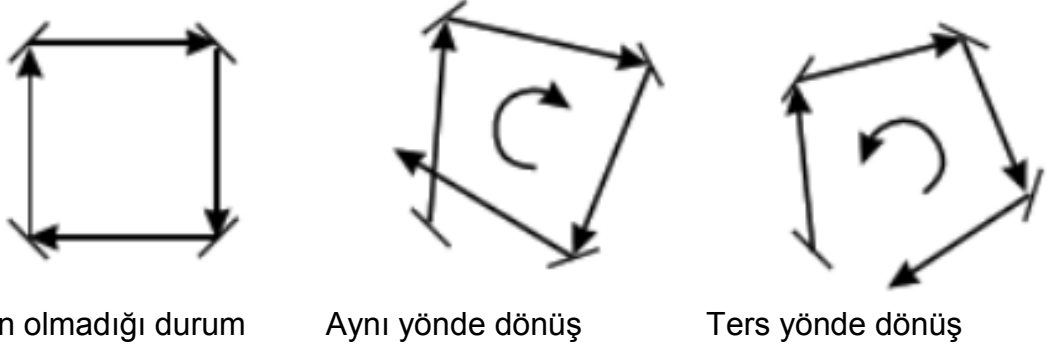
Farklı dönüölçer çeşitleri üretilmiştir. Optik dönüölçerler, titreşimli (vibrasyonlu) dönüölçerler ve mekanik dönüölçerleri örnek olarak verebiliriz. Optik dönüölçerlerin iki temel çeşidi bulunur. Bunların ilki RLG (ring laser gyro) dönüölçerdir. 1960'larda geliştirilmiştir ve yüksek performans gösterir. Diğeri ise IFOG (interferometric fiber optic gyro) dur. Bu dönüölçer ise 1970'lerde geliştirilmiş olup düşük maliyetlidir. IFOG dan farklı olarak RFOG ve MOG gibi dönüölçer çeşitleri de bulunmaktadır. Optik dönüölçerler, güdümlü nükleer füze, hava/kara/deniz navigasyon uygulamalarında kullanılmaktadır.

Titreşimli dönüölçerler 1981'de geliştirilmiştir ve tüm MEMS dönüölçerler bu mantığa göre çalışmaktadır.

### 2.4.1. Optik dönüölçer

Optik dönüölçerlerin çalışma ilkesi belirli bir alan içerisindeki ışın demetinin açısız hareket sırasında bir faz farkı oluşturacağını göstermektedir. Bu olay Sagnac etkisine dayanmaktadır. Bu olaya daha ayrıntılı olarak bakarsak; ışık ayna veya optik fiberden yapılmış bir dönmeyen kapalı çevrim dalga kılavuzu etrafında her iki

yönde gönderilirse, yol uzunluğu her iki kırışler için aynıdır. Ancak çerçeve ışının gönderildiği yönde döndürülürse toplam uzunluğunda artış yani, ışık yolu ile aynı yönde dalga kılavuzu dönüş yolunun uzunluğunu artırır tersi yönde döndürüldüğünde ise azalma olacaktır.[9]



Şekil 2.4 Optik Dönüölçerin Çalışma Prensibi [4]

#### 2.4.2. Titreşimli dönüölçer

Bu dönüölçerin çalışması basit bir harmonik hareket mantığına dayanmaktadır. Titreşim elemanı kırış, kırış çifti, diyapozon, yüzük, silindir veya yarıküre olabilir. Burada dönüölçer titreşim elemanının Coriolis ivmesini tespit etmek prensibiyle çalışır. Coriolis ivme ölçümü, doğrusal hareket eksenine dik bir eksen etrafında dönen referans çerçevesindeki doğrusal titreşen kütle üzerine etki eden kuvveti belirleme prensibine dayanır. Coriolis ivmesini yönü hem doğrusal hareket eksenine hem de dönme eksenine diktir. [9]

### 3. VERİLERİN TOPLANMASI VE ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ HATALARI

#### 3.1. Arduino ile Verilerin Toplanması

Arduino Uno, kendi derleyicisi sayesinde C++'a yakın bir dil ile kolay bir şekilde programlanabilen bir mikro denetleyicidir. Ayrıca piyasada kullanılan diğer denetleyici devreler ile arasında çok fazla maliyet farkı yoktur. PIC'e göre daha kolay programlanabilmesi ve düşük maliyetli olmasından dolayı tercih edilir. Arduino platformu genel olarak iki bileşenden oluşur.

Üzerinden programlarımızı yazdığımız, derleme ve programın yüklenmesi işlemlerini yürüten bütünleşik geliştirme ortamı (IDE) ve programın üzerinde çalıştığı mikro denetleyici, diğer çevre bileşenleri ve giriş çıkış portlarını içeren Arduino kartı bileşenleridir.

Bu tezde kullanılan Arduino Uno kartının temel bileşenleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Kart üzerinde mikro denetleyici, DC güç girişi, usb bağlantı konektörü, dijital giriş-çıkış bacakları, reset butonu, seri iletişim giriş (RX) ve çıkış (TX) ledleri, kart programlama bacakları, güç regülatörü, analog giriş bacakları ve güç bağlantıları bulunmaktadır.

Usb girişi sayesinde bilgisayara bağlanıp, arayüzde yazılan kodların çalıştırılması sağlanır ya da bilgisayar ile haberleşmesi sağlanır. Arduino işlemci dilini kullanarak çevre elemanları ile temel giriş çıkış uygulamalarını gerçekleştiren açık kaynaklı fiziksel programlama platformudur. Kart üzerindeki bacaklara daha ayrıntılı bakacak olursak;

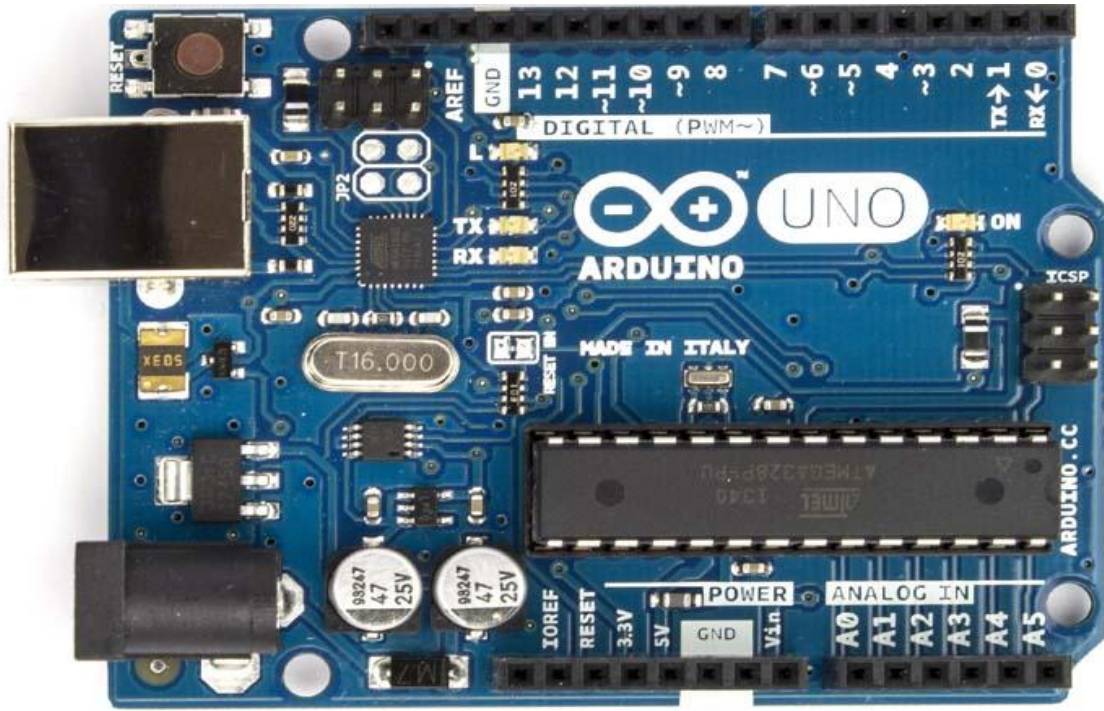
Usb girişi; bilgisayar ile Arduino arasındaki iletişimin sağlanması için Arduino üzerinde bulunan giriştir. Reset bacağı adından da anlaşıldığı gibi Arduino içerisinde yüklü olan yazılımın resetlenmesini ve baştan başlatılmasını sağlamaktadır. Resetleme işlemi reset bacağının topraklanması ile gerçekleştirilir.

3.3 Volt güç pini ile 3.3 Voltluk bir çıkış sağlar. Devremizde 3.3 Volt ile çalışması gereken bileşenler var ise beslemesi bu pinden sağlanabilmektedir. Ancak bu bacağın çıkış akımı 50 mA kadardır. Bu nedenle çok yüksek akım isteyen bileşenleri bu bacağı bağlamamız mümkün değildir. 5 Volt bacağı, 5 Voltluk bir

çıkış sağlamaktadır. Devrede 5 Volt ile çalışan bileşenler var ise bu bacak aracılığı ile bu besleme sağlanabilmektedir. Bu bacak çıkışı 450 mA dir.

Topraklama bacağı, devremizin tamamlanması için gerekli topraklama bacağıdır. Arduinonun kart şeklinde tasarlanmış çeşitlerinde genellikle birden fazla topraklama bacağı bulunmaktadır.

Giriş ve çıkışlar bulunan bacakların tamamı digital okuma ve digital yazma fonksiyonları için kullanılır. Bazı bacakların özel fonksiyonları vardır. Seri RX ve TX bacakları ise, seri veri almak ve yaymak için kullanılır.



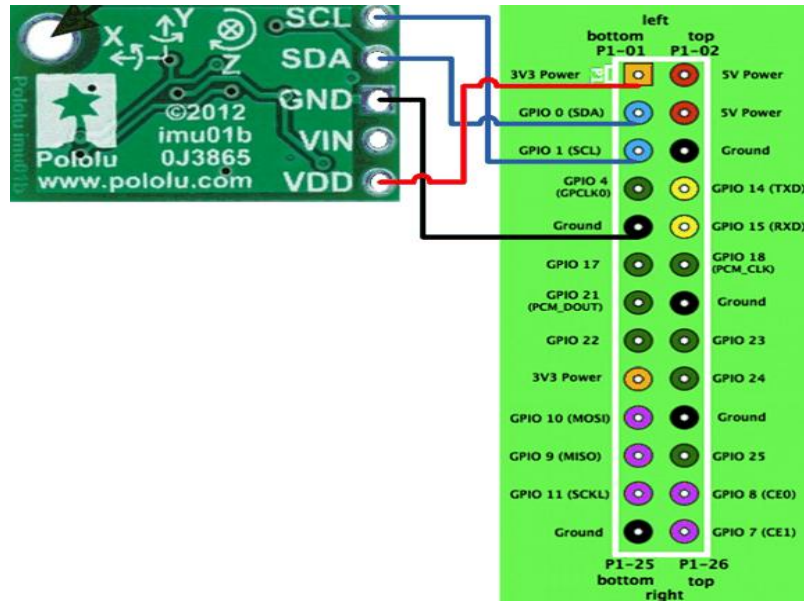
Şekil 3.1. Arduino kartı

Bu tezde Arduino kart ve ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometreden oluşmuş bir sensör aracılığıyla veriler toplanmıştır. Kullanılan sensörün özelliği aşağıda belirtilmiştir.

- Boyutlar: 0.8" × 0.5" × 0.1" (20 mm × 13 mm × 3 mm)
- Voltaj: 2.5 V to 5.5 V

- Akım: 6 mA
- Çıkış Formatı (I<sup>2</sup>C):
  - Dönüölçer: 16-bit her bir eksen için
  - İvmeölçer: 16-bit her bir eksen için
  - Manyetometre: 16-bit her bir eksen için
- Hassasiyet Formatı:
  - Dönüölçer:  $\pm 245$ ,  $\pm 500$ , or  $\pm 2000^\circ/s$
  - İvmeölçer:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 6$ ,  $\pm 8$ , veya  $\pm 16$  g
  - Manyetometre  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ , or  $\pm 12$  gauss

Sensör ve Arduino kart arasında yapılan bağlantı ise aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.



Şekil 3.2 Ataletsel sensör ile Arduino kartının bağlantısı

Elektronik birimler kendi başlarına çalışabildikleri gibi zaman zaman aralarında iletişim kurmaları da gerekebilir. Bu durumda çeşitli haberleşme protokolleri üzerinden birbirleriyle haberleşirler. Protokoller iki veya daha fazla birimin kendi aralarında haberleşmede kullandıkları kurallar bütünüdür.

Dijital haberleşmede temel olarak iki yöntem bulunur. Bunlar; seri ve paralel haberleşmedir. Seri haberleşmede dijital veriler (bitler) tek bir hat üzerinden peşi sıra gönderilirken paralel haberleşmede ise belirli gruplar halinde eş zamanlı olarak iletilirler. Daha az veri hattı gerektiğinden seri haberleşme elektronik projelerinde sıkça kullanılır. Günümüzde bilgisayarlarımızda kullanılan USB, SATA vs... gibi terimler seri haberleşme standartlarına birer örnektir.

Geçmişte bilgisayarlarda seri haberleşme için 9 bacaklı RS232 portu bulunmaktaydı. Artık günümüzde usb kullanılarak bu standart sağlanmaktadır. Ancak hala RS232 üzerinden iletişim kuran cihazları kullanabilmek için RS232-usb dönüştürücü elemanlar kullanılır. Arduino Uno üzerinde de pc ile haberleşmeyi sağlayacak bir adet seri-usb dönüştürücü çip (yonga) bulunmaktadır. [15] İki ayrı hat üzerinden (RX ve TX) veriler bit dizileri halinde gönderilip alınır. Hemen hemen bütün mikrodenetleyicilerde seri haberleşme ünitesi bulunur.

Protokol detaylarına bakılacak olursa, Arduino kartı üzerinden haberleşmede I<sup>2</sup>C protokölü kullanılır. I<sup>2</sup>C teorik olarak biraz karışık görünmekle beraber Arduino kütüphane fonksiyonlarıyla oldukça kolay bir şekilde kullanılabilir. I<sup>2</sup>C arabirimiyle haberleşen birçok sensör donanımı ve çevreirim bulunmaktadır. Harici analog-digital çeviriciler, giriş-çıkış çoklayıcılar, sıcaklık, hareket sensörleri ve lcd ekranlar bunlara örnek olarak verilebilir. I<sup>2</sup>C protokolle birçok modülle haberleşilir.

I<sup>2</sup>C haberleşmesi ana modölün başlangıç sinyalini veri yoluna iletmesiyle başlatılır. Böylelikle hat üzerindeki bütün modüller dinleye geçer. Ardından ana modöl haberleşmek istediği uydu modölün adresini veri yoluna yollar. Veri yolu üzerindeki her bir modölün kendine özgü bir adresi bulunur. Bu adres 7 bit uzunluğundadır. 8. bit yazma ve okuma komut seçimi için kullanılır. Kendi adresini veriyolu üzerinden okuyan uydu modöl daha sonra ana modölün gönderdiği komutu alır. Bu komut bir kaydediciyi okuma veya yazma komutu olabilir. Komutun içeriği uydu modölün tipine göre değişkenlik gösterir [15].

Sensörden alınan veriler Arduino programıyla gözlenmiştir. Verilerin toplandığı sensörde I3gd20h kodlu dönüölçer ve lsm303d kodlu ivmeölçer, manyetometre bulunmaktadır. Veriler toplanırken 16 bitlik adc kullanılmış ve kodlama sırasında

'0' (sıfır) g değerindeki besleme gerilimine ve diğer parametrelerin duyarlılıklarına dikkat edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan sensörden alınan ivme bilgileri ham verilerdir ve bu veriler işlemcinin adc (analog digital converter) sayısına bağlı olarak belli değerler arasında sınırlandırılmışlardır. Eğer kullanılan sensörün direk x, y, z bacaklarından arduionun analog bacakları ile değer okunabiliyorsa, yani sensör analog bir sensör ise alınan analog değerler açı cinsinden ifade edilmelidir. Bu işlem şu şekilde yapılmaktadır:

Sensörün 3.3 V ile beslendiğini ve adc (analog digital converter) nin 16 bit (yani  $65536 - 1 = 65535$ ).

İvmeölçer Değeri = (İvmeölçer ADC Degeri \* Vref/1023 - İvmeölçer\_0 g\_Degeri) / Duyarlılık

Bu formülde akselerometre\_ADC\_degeri okunan analog değerdir. Vref sensörün besleme voltajıdır. '0 g' değeri ise sensörün very föyünde yazan '0' g anındaki akselerometrenin verdiği analog çıkış değeridir. Buradan sensörden alınan ham verinin 15536 aralığında olması gerektiği görülür. Duyarlılık sensörün datashetinde verilen sensörün hassasiyet değeridir. Artık akselerometre degerini bilinenleri yerine koyarak bulabiliriz. Bunun üç eksen içinde (x,y,z) yapılması gerekir.

### 3.2. Ataletsel Ölçüm Birimi Hata Türleri

Ataletsel sensörlerden alınan verilerde hatalar vardır. Bu hatalar iki gruba ayrılır. Bunlar; deterministik hatalar ve olasılıksal hatalardır. Bu hataların kestirilmesi ve düzenlenmesi verilerin doğruluğunun sağlanması için önem arz etmektedir [3,10]. Deterministik hataların belirlenmesi ve düzeltilmesi olasılıksal hatalara göre daha kolaydır. Bu tez çalışmasında olasılıksal hataların kestirilmesi için Kalman filtreleme yapılacaktır. Sensörün çıkışını aşağıdaki denklemde olduğu gibi tanımlanabilir.

$$O_t = i_t + D_T + n_t \quad (3.1)$$



$O_t$  : Çıkış

$i_t$ : Giriş

$D_T$ : Deterministik Hata

$n_t$ : Gürültü Terimi

$t$ : Zaman

$T$ : Sıcaklık

Denklemden de görüldüğü üzere deterministik hata terimi ve gürültü terimi doğru bir ölçüm gereklidir. Deterministik hata genel olarak sıcaklığa bağlı iken, olasılıksal hata parametreleri zamana bağlıdır.

### **3.2.1. Deterministik ve olasılıksal hatalar**

Deterministik hata türleri sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası ve aksel kaçıklık hatasıdır. İvmeölçerlerde ve de dönüölçerlerde deterministik hatalar görülmektedir. Olasılıksal hataları bulmak deterministik hatalara daha zordur. Olasılıksal hatalar sabit kayma kararsızlığı, orantı katsayısı kararsızlığı ve rasgele sensör gürültüsüdür. Bu iki hata türü hem ivmeölçer hem de dönüölçer için geçerlidir.

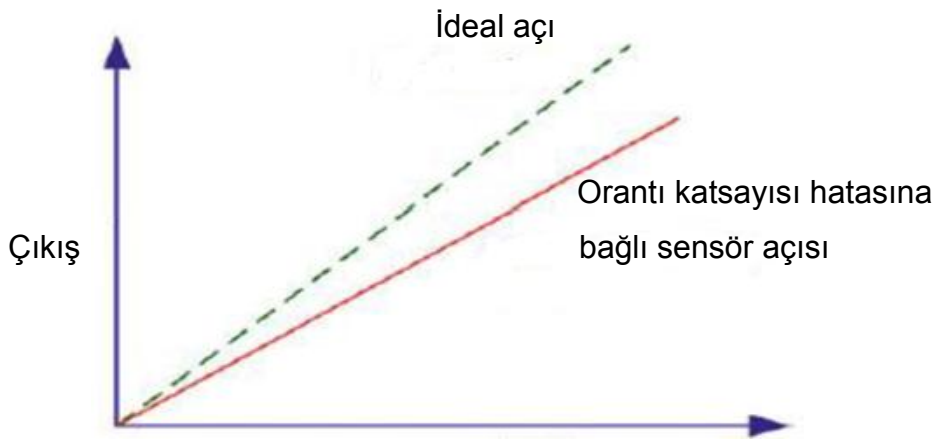
#### **3.2.1.1. Sabit kayma hatası**

Sabit kayma hatası hem ivmeölçer hem de dönüölçerde ölçülen bir deterministik hata türüdür. İvmeölçer sabit kayma hatası, sensöre herhangi bir ivme uygulanmamış olmasına rağmen sensör çıkışında ölçülen değerdir. Dönüölçer içinse açısal hız uygulanmadığı halde çıkışta görülen değerdir. Bu hata terimini birçok parameter etkileyebilir. Bunlar; sıcaklıkla uyarılan değişimler ve tekrarlanabilirlik gibi parametrelerdir. Sensörün etkin olduğu her an hatanın sabit terimi de olacaktır. Hatanın sabit terimi uygun statik kalibrasyon testleri ile önceden kestirilip düzeltilebilir. Sensör her açıldığında değişimlerden kaynaklı hatalar değişir ama sensörü açtığımız andan itibaren sabit kalır [11]. Sabit kayma hatası ivmeölçer için g veya mg (mili g) olarak ifade edilir. Dönüölçerlerde ise sabit kayma hatası derece/saniye veya derece/saat olarak ifade edilir [12].

### 3.2.1.2. Orantı katsayısı hatası

İvmeölçer orantı katsayısı hatası, sensörün çıkışındaki değişimin ve girişindeki değişime oranıdır. İvmeölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de etkin olacaktır.

Dönüölçer orantı katsayısı, açısal hız girişi uygulanan eksen boyunca dönüölçer hassasiyetini etkiler. Bu hata sabit terimini oluşturan faktörler; sıcaklıkla uyarılan değişimler, doğrusal olmama ve asimetri hatasıdır. Orantı katsayısı ppm (part per million) olarak ölçülür.



Şekil 3.3 Orantı katsayısı hatası

### 3.2.1.3. Eksenel kaçıklık hatası

Eksenel kaçıklık problemi ivmeölçer yada dönüölçerin birbirlerine göre dik monte edilmemiş olmasından kaynaklanan bir hata türüdür [12,13]. Ataletsel ölçüm birimini oluşturmak için kullanılan 3 adet ivmeölçerin birbirlerine dik monte edilememiş olması durumunda harici eksenel kaçıklık oluşur. İvmeölçerin üretimi sırasındaki oluşan eksenel kaçıklık ise dahili eksenel kaçıklık olarak adlandırılır. Dahili eksenel kaçıklık hatalarını belirlemek harici eksenel kaçıklık hatalarının belirlenmesine göre daha zordur. İvmeölçer üzerindeki eksenel kaçıklık hatasını belirlemek için her eksen etrafında kalibrasyon testleri uygulanır. Eksenel kaçıklık mrad (mili-radyan) olarak ölçülür.

Dönüölçerde ise bu hata, dönüölçerlerin yanlış hizalanmasından kaynaklanır.

Dönüölçerlerde eksenler birbirine tam dik olmayabilir. Bunun sonucunda her eksenin diğer iki eksen etrafındaki dönüye karşı hassasiyeti oluşur. Dönüölçer üzerindeki eksenel kaçıklık hatasını belirlemek için ivmeölçerde olduğu gibi kalibrasyon testleri uygulanır [14].

#### **3.2.1.4. Sabit kayma kararsızlığı**

İvmeölçerin bu hatası, çalışması sırasında meydana gelen değişiminden kaynaklı hataları içerir. İvmeölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de değişir ve bu durum hatanın artmasına neden olur. İvmeölçer sabit kayma kararsızlığı  $g/\sqrt{Hz}$  olarak ifade edilir. Bu ifade enerji spektrumun sinyalin genliğinin karesinin frekansa oranı olmasından kaynaklanmaktadır. Her iki tarafın karekökü alınarak bu birime ulaşılır. Aynı durum dönüölçer için de geçerli olacaktır. Bu hata, çalışma sırasındaki değişiminden kaynaklı hataları içerir. Dönüölçer sabit kayma kararsızlığı  $derece/saniye/\sqrt{Hz}$  veya  $derece/saat/\sqrt{Hz}$  olarak ifade edilir [12].

#### **3.2.1.5. Orantı katsayı kararsızlığı**

İvmeölçer orantı katsayısı kararsızlığı, orantı katsayısındaki zamanla değişimi ifade eder. İvmeölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de değişir. [12] Dönüölçer orantı katsayısı kararsızlığı, orantı katsayısındaki zamanla değişimi ifade eder. Dönüölçerin etkin olduğu her an hatanın bu bileşeni de değişir [12].

#### **3.2.1.6. Rasgele sensör gürültüsü**

Yüksek frekanslı gürültü terimleri (hız rasgele yürüme, nicemleme gürültüsü ve Gauss-Markov gürültüsü (GM)) rasgele sensör gürültüsünü oluşturmaktadır [12].

### **3.3. İvmeölçer Hata Modeli**

Tek ekseninde için ivmeölçer hata modeli denklemi aşağıda belirtilen gibi olacaktır. [12]

$$\widetilde{a}_x = (1 + O_x + \Delta O_x) a_x + F_x + \Delta F_x + g_x \quad (3.2)$$

- $\widetilde{a}_x$  : İvmeölçer Çıkışı  
 $a_x$  : Gerçek İvme  
 $O_x$  : Orantı Katsayısı Hatası  
 $\Delta O_x$  : Orantı Katsayısı Kararsızlığı  
 $K_x$  : Sabit Kayma Hatası  
 $\Delta K_x$  : Sabit Kayma Kararsızlığı  
 $g_x$  : Rasgele Sensör Gürültüsü

Ataletsel ölçüm biriminde hesaplamalar üç eksende yapılacağından (x, y ve z) ivmeölçer hata modeli aşağıdaki denklemde olduğu gibi ifade edilecektir. [12]

$$\begin{bmatrix} \widetilde{a}_x \\ \widetilde{a}_y \\ \widetilde{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + O_x + \Delta O_x & E_{xy} & E_{xz} \\ E_{yx} & 1 + O_y + \Delta O_y & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & 1 + O_z + \Delta O_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x + \Delta K_x \\ K_y + \Delta K_y \\ K_z + \Delta K_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ ng_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$E_{xy}, E_{xz}, E_{yx}, E_{yz}, E_{zx}, E_{zy}$  : İvmeölçer eksenel kaçaklık hataları

### 3.4. Dönüölçer Hata Modeli

Tek ekseninde dönüölçer hata modeli aşağıdaki denklemde gösterildiği gibidir.

$$\widetilde{G}_x = (1 + O_x + \Delta O_x) G_x + K_x + \Delta K_x + D_{Gx} a_x + g_x \quad (3.4)$$

- $\widetilde{G}_x$  : Dönüölçer çıkışı  
 $G_x$  : Gerçek dönü  
 $a_x$  : Gerçek ivme  
 $O_x$  : Orantı katsayısı hatası  
 $\Delta O_x$  : Orantı katsayısı kararsızlığı  
 $K_x$  : Sabit kayma hatası  
 $\Delta K_x$  : Sabit kayma kararsızlığı  
 $D_{Gx} a_x$  : İvmeye bağlı sabit kayma hatası

$g_x$  : Rasgele sensör gürültüsü

Ataletsel ölçüm birimininde  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerini düşünerek hata modelini (4.4) numaralı denklem ile ifade edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{G}_x \\ \widetilde{G}_y \\ \widetilde{G}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + O_x + \Delta O_x & E_{xy} & E_{xz} \\ E_{yx} & 1 + O_y + \Delta O_y & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & 1 + O_z + \Delta O_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x + \Delta K_x \\ K_y + \Delta K_y \\ K_z + \Delta K_z \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} D_{Gx} & 0 & 0 \\ 0 & D_{Gy} & 0 \\ 0 & 0 & D_{Gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$E_{xy}, E_{xz}, E_{yz}, E_{yx}, E_{zx}, E_{zy}$ : Dönüölçer aksenal kaçaklık hataları

## 4. KALMAN SÜZGEÇİ VE ALLAN VARYANS

### 4.1. Kalman Süzgeci

En yaygın kullanılan durum kestiricisi Kalman süzgecidir. Kalman süzgeci doğrusal sistemler için optimal bir kestiricidir, ancak gerçek dünyada çok az sayıda doğrusal sistem vardır. Bu problemin üstesinden gelmenin yaygın bir yaklaşımı, Kalman süzgecini kullanmadan önce sistemi doğrusal hale getirmektir ve bu yaklaşım genişletilmiş Kalman süzgecinin niteler. Bununla birlikte, doğrusallaştırma kararsız kestirimler gibi bazı problemler ortaya çıkarabilir [17]. Doğrusal olmayan sistemler için daha iyi kestirici algoritmaların geliştirilmesi çabaları, ortaya çıkacak yeniliklerin mühendislik alanlarında geniş bir yelpazede büyük yankı bulmasının kaçınılmaz olacağından bilim dünyasınınca büyük ilgi görmektedir [18].

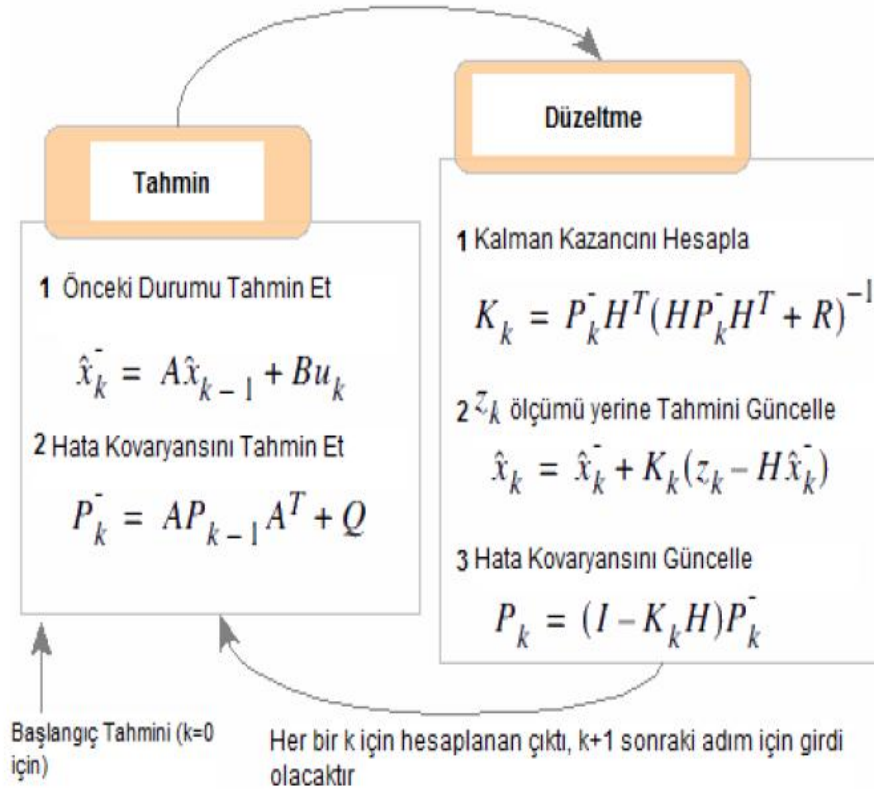
Modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edilebilen süzgeçtir. Eğer sistemin stokastik veya rasgele gürültülü yönü hesaba katılırsa minimum varyans tahmini veya Kalman süzgeci çok uygun olmaktadır. Kalman Filtresi, geleneksel tahmin edicilerde olduğu gibi filtreleme özelliğine rağmen, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin etmek için çok güçlü ve yeteneklidir [16]. Algoritma, gürültülü veriler üzerinde özyinelemeli gerçek zamanlı çalışarak hataları, en az-kareler eğriye sığdırma yöntemi ile filtre eder ve sistemin fiziksel karakteristiklerinin modellenmesi ile üretilen gelecek durumun matematiksel tahminine göre optimize eder. Model tahmini, gözlem ile karşılaştırılır. Elde edilen fark, Kalman kazancı (Kalman gain) olarak bilinen bir çarpan ile ölçeklendirilir. Daha sonra sıradaki tahminleri iyileştirmek için modele bir girdi olarak geri besleme (feedback) uygulanır. Kazanç performansı iyileştirmek için ayarlanabilir yapılır. Yüksek bir kazanç ile, süzgeç gözlemleri daha yakın olarak takip edilir. Düşük bir kazanç ile, süzgeç model tahminlerini daha yakın olarak takip edilir. Yöntem, gerçek bilinmeyen değerlere, model tahminlerine dayanarak elde edilebilecek tahminlerden daha yakın tahminler üretmeye çalışır [16].

Kalman süzgeci her ne kadar süzgeç olarak geçse de bir süzgeç değil daha çok bir tahmin edicidir. 20. yüzyılda yapılan en önemli buluşlardan biri olduğu söylenebilir.

Tekrarlı bir metottur. Yani bir önceki adımın çıktısı bir sonraki adımda girdi olarak kullanılabilir. [16]

Kalman süzgecinin temel mantığı, tahmin eder, karşılaştırır, günceller ve daha iyi tahmin eder. Yani sürekli tahmini iyileştirme yönünde çalışan kuvvetli bir süzgeçtir. Kalman süzgecini daha detaylı bakıp süreç durum uzay modelini açıklayacak olursak; durum uzay modeli, durumunun (x) sayısal bir vektör ile ifade edildiği bir sürecin matematiksel modelidir. Durum uzay modelleri iki ayrı model içerirler. Bu modeller; girdi ve gürültü gibi dış etkenler ile durumun zaman içerisinde nasıl ilerlediğini anlatan süreç modeli ve süreçten ölçümlerin nasıl alınacağını ifade eden genellikle de gürültülü ve/veya doğru olmayan ölçümleri kullanan ölçüm modelidir [18].

Kalman süzgeci tablo ile açıklanırsa;



Şekil 4.1 Kalman süzgeci [16]

#### 4.1.1. Durum uzay modeli

Durum uzay modellerinin en genel biçimi doğrusal olmayan modeldir. Bu model tipik olarak iki fonksiyonu F ve H içerir.

$$X_{k+1} = F(X_k, U_k, W_k) \quad (4.1)$$

$$Z_k = H(X_k, V_k) \quad (4.2)$$

F ve H fonksiyonları sırasıyla durumu ve ölçümleri (gözlemleri) belirleyen fonksiyonlardır. U süreç girdisini, W ve V sırasıyla durum ve ölçüm (gözlem) gürültü vektörlerini ve k ise kesikli zamanı ifade eder. Durum uzay modelleri hemen hemen her çesit sürecin modellenmesinde oldukça kullanılır. F ve H fonksiyonları sürecin dinamiğini ve gözlemlerini belirten kesikli hale getirilmiş diferansiyel denklemler üzerine kurulmuş fonksiyonlardır [18].

Doğrusal durum uzay modeli, F ve H fonksiyonlarının durum ve girdide doğrusal olduğu modeldir. Doğrusal olan bu fonksiyonlar, hesaplamaları doğrusal cebire indirgeyen F, B ve H matrisleri ile ifade edilebilir. Bu şekildeki durum uzay modeli şu şekilde gösterilir:

$$X_{k-1} = F_k X_k + B_k U_k + W_k \quad (4.3)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (4.4)$$

Bu doğrusal modelde hesaplama ve analiz kolaydır. Kullanıcıya denetlenebilirlik, gözlenebilirlik, frekans yanıtı gibi özellikleri irdeleme imkânı sunar. [18] Doğrusal durum modelleri ya gerçek doğrusal süreçler, ya da doğrusal olmayan süreçlerin basit bir şekilde birinci derece Taylor yaklaşımı aracılığı ile doğrusal hale getirilmiş biçimleri üzerine kurulmuş modellerdir.

Kısaca Kalman süzgecinin denklemlerini özetleyecek olursak kullanılan iki ana denklem grubu aşağıdaki gibidir. Bunlar sırasıyla durum denklemi ve ölçüm denklemi olarak aşağıda verilmiştir.



$$X_{n+1} = F_n X_n + G_n W_n \quad (4.5)$$

$$Z_n = H^T X_n + V_n \quad (4.6)$$

$Z_n$  : Sensörden ölçtüğümüz ivme değerleri

$X_n$  : İvme değerlerinden dönüştürülen konum ve hız değerleri

$W_n, V_n$  : Gürültü

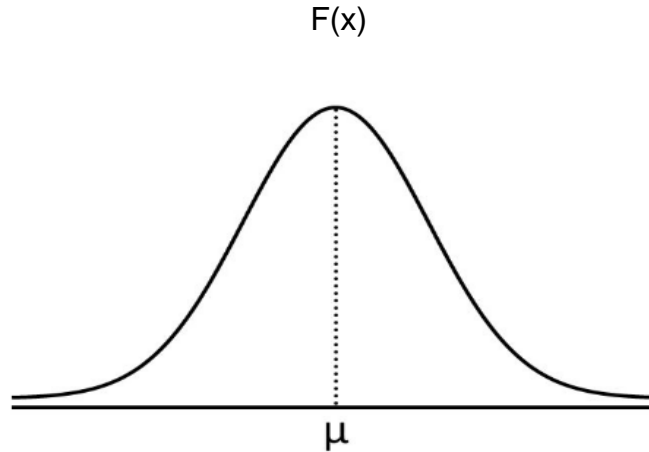
Kalman süzgecinin gürültü modelinin Gaussian dağılım gösterdiği varsayılır. Hem ölçüm ( $V_n$ ), hem de işlem ( $W_n$ ) gürültüsünün Gaussian ve birbirlerinden bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Normal dağılım 'normal dağılım eğrisi' ile kavramlaştırılan hipotetik bir evren dağılımıdır. 'Gauss dağılımı' ya da 'Gauss eğrisi' olarak bilinen normal dağılım eğrisi, sürekli ve olasılıklı bir fonksiyon eğrisidir.

Normal dağılım eğrisinin fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma} \quad (4.7)$$

$\mu$ : Ortalama

$\sigma$ : Sapma



Şekil 4.2 Gauss Dağılım Grafiği

Normal dağılım eğrisi, ölçme sonuçlarının yoğunlaştığı, uç noktalarda seyrekleştiği bir dağılım şeklini ifade etmektedir. Bu eğrinin altında kalan alanın olasılığı '1' dir.

$W_n, V_n$  gürültülerinin kovaryans matrisleri ise sırasıyla Q ve R ile ifade edilir.

Kalman süzgeci oluştururken iki sıkıntılı durum vardır. İlki modelin mükemmel olmaması, diğeri ise ölçümlerin mükemmel olmaması hangisinin daha baskın olduğunu beklediğimiz bilgisi de kullanılır. Birinci durumu temsil etmek için W gürültüsünün V 'ye göre daha yüksek olduğu kabul ederiz. İkinci durumda ise V gürültüsünün W 'ye göre daha yüksek olduğunu kabul ederiz. Bu beklentimizi Q ve R parametreleri ile temsil ederiz:

- Eğer  $Q > R$  alıyorsak modelimizle ilgili sıkıntıların daha baskın olduğunu varsayıyoruz demektir.
- Eğer  $R > Q$  alıyorsak o zaman ölçümlerle ilgili sıkıntıların daha baskın olduğunu varsayıyoruz demektir.
- Eğer hangi sıkıntının daha baskın olduğunu bilmiyorsak gürültülerin etkilerini eşit varsayabiliriz, yani  $Q=R$  alırız.

Süzgecin performansına göre daha sonra Q ve R'yi değiştirip tekrar deneyebiliriz. Teoride Q ve R aslında gürültü kovaryans matrisleri olarak isimlendirilir ve gürültü kovaryanslarının tam olarak bilindiği durumlarda bu değerler kullanılırsa Kalman süzgecinin çok iyi sonuç verdiği ispatlanabilir. Ancak gerçek problemlerde bu değerleri bilmek ve hesaplamak genelde mümkün değildir, pratikte bu değerler genellikle deneyerek, sonuçlara bakıp Q ve R'yi değiştirip tekrar deneyerek ve bu şekilde birkaç iterasyon yaparak bulunur. Kısaca hatanın kovaryans matrisi ile yapılan kestirimin gerçek değerlere ne kadar yaklaştığını gösterir. Gözlemler biriktikçe hatanın kovaryans matrisinin düşmesi beklenir. Kestirilmiş durum hata kovaryansı ( $P_{n+1|n}$  : n anındaki değer verilmiş ise n+1 anındaki değeri gösterir) hesaplanırken kullanılan güncelleme denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$P_{n+1|n} = F_n P_{n|n} F_n^T + G_n Q_n G_n^T \quad (4.8)$$

$$P_{n+1|n} = F_n P_{n|n-1} [F_n^T - H_n K_n^T] + G_n Q_n G_n^T \quad (4.9)$$

Modelleme yapılarak F (sistem ya da durum geçiş), G (giriş) ve H (gözlem) matrislerine ulaşılır. Zamanda ve ölçümlerde güncelleme yapmak için kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\hat{X}_{n+1} = F_n X_{n|n} \quad (4.10)$$

$$\hat{X}_{n+1|n} = \hat{X}_{n|n-1} + \underbrace{P_{n|n-1} H_n [H_n^T P_{n|n-1} R_n]^{-1} + Z_n - H_n^T X_{n|n-1}}_{L_n} \quad (4.11)$$

$$K_n = F_n L_n \quad (4.12)$$

$$P_{n|n} = P_{n|n-1} - L_n H_n^T P_{n|n-1} \quad (4.13)$$

#### 4.1.2. Sistemin modellenmesi

Tez çalışmasında sistemin modellenmesi için iki metot kullanılmıştır. Bu metotlar; Ayırık Beyaz Gürültü Modeli ve Ayırık Wiener Modelidir. Tez çalışması sırasında ataletsel ölçüm birimi sensöründen veriler toplanırken sensor zamanının büyük bir kısmında sabit tutulduğu için modelleme sabit hıza göre yapılmıştır. Bu durum Ayırık Beyaz Gürültü İvme Modeli ile açıklanmıştır. Hareket x ve y eksenlerinde yapıldığından durum matrisini oluşturacak parametreler konum ve hızın x, y eksenlerindeki verilere göre hesaplanmıştır. Bu durumda denklemler;

$$X_x(n+1) = X_x(n) + \Delta t V_x(n) \quad (4.14)$$

$$X_y(n+1) = X_y(n) + \Delta t V_y(n) \quad (4.15)$$

$$V_x(n+1) = V_x(n) \quad (4.16)$$

$$V_y(n+1) = V_y(n) \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} X_x(n+1) \\ V_x(n+1) \\ X_y(n+1) \\ V_y(n+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{F matrisi}} \begin{bmatrix} X_x(n) \\ V_x(n) \\ X_y(n) \\ V_y(n) \end{bmatrix} + G W_n \quad (4.18)$$

F matrisi

Ayrık Beyaz Gürültü İvme Modeli için diğer denklemler;

$$\begin{bmatrix} X_x(n+1) \\ V_x(n+1) \\ X_y(n+1) \\ V_y(n+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{F matrisi}} \begin{bmatrix} X_x(n) \\ V_x(n) \\ X_y(n) \\ V_y(n) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix}}_{\text{G matrisi}} \begin{bmatrix} W_x(n) \\ W_y(n) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

F matrisi

G matrisi

H matrisi ;

$$\begin{bmatrix} V_x(n) \\ V_y(n) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{H^T} \begin{bmatrix} X_x(n) \\ V_x(n) \\ X_y(n) \\ V_y(n) \end{bmatrix} + V_n \quad (4.20)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} q \quad (4.21)$$

Hız sabit olarak alınmazsa bu durumu ifade eden matrisi aşağıdaki gibi olacaktır.

Ayrıca bu durum ivmenin sabit olduğu Ayrık Wiener İvme Modeli ile açıklanmıştır.

$$\begin{bmatrix} X_x \\ V_x \\ a_x \\ X_y \\ V_y \\ a_y \end{bmatrix} = X \quad (4.22)$$

$$X_x(n+1) = X_x(n) + \Delta t V_x(n) + a_x(n) \frac{\Delta t^2}{2} \quad (4.23)$$

$$X_y(n+1) = X_y(n) + \Delta t V_y(n) + a_y(n) \frac{\Delta t^2}{2} \quad (4.24)$$

$$V_x(n+1) = V_x(n) + a_x(n) \Delta t \quad (4.25)$$

$$V_y(n+1) = V_y(n) + a_y(n) \Delta t \quad (4.26)$$

$$a_x(n+1) = a_x(n) \quad (4.27)$$

$$a_y(n+1) = a_y(n) \quad (4.28)$$

$$\begin{bmatrix} X_x(n+1) \\ V_x(n+1) \\ a_x(n+1) \\ X_y(n+1) \\ V_y(n+1) \\ a_y(n+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 1/2\Delta t^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t & 1/2\Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{F \text{ matrisi}} \begin{bmatrix} X_x(n) \\ V_x(n) \\ a_x(n) \\ X_y(n) \\ V_y(n) \\ a_y(n) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta t^2/2 & 0 \\ \Delta t & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & \Delta t^2/2 \\ 0 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{G \text{ matrisi}} \begin{bmatrix} W_x(n) \\ W_y(n) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Ayrık Wiener İvme Model için diğer denklemler;

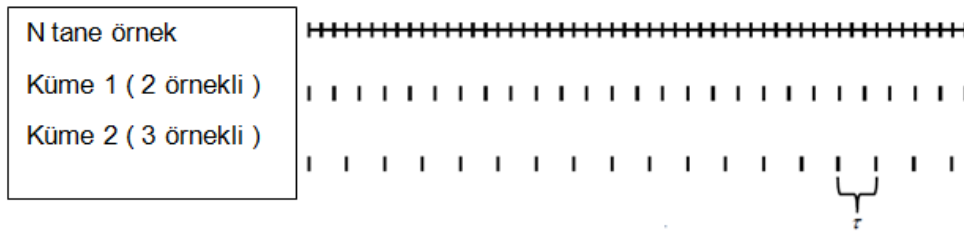
$$\begin{bmatrix} a_x(n) \\ a_y(n) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_H + \begin{bmatrix} X_x(n) \\ V_x(n) \\ a_x(n) \\ X_y(n) \\ V_y(n) \\ a_y(n) \end{bmatrix} + V_n \quad (4.30)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \Delta t^5/20 & \Delta t^4/8 & \Delta t^3/6 \\ \Delta t^4/8 & \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^3/6 & \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} q \quad (4.31)$$

## 4.2. Allan Varyans

Bu yöntem bir sistemdeki asıl gürültüyü ortalama süreye bağlı olarak belirlemek için kullanılabilir. Allan varyans yönteminde amaç atalet sensör verilerindeki farklı gürültü terimlerini tanımlamak ve ölçmektir. Bu yöntemin sonuçları, atalet sensör verileri için uygun olan beş temel gürültü terimi ile ilgilidir. Bu gürültü terimleri quantization noise (kuantalama gürültüsü), angle random walk (açısal rassal yürüyüş), bias instability (sabit kayma kararsızlığı), rate random walk (hızsal rassal yürüyüş) ve rate ramp (hız rampası)'dir.

Allan Varyans metodu veriler arasındaki zaman periyodunu kullanmaya dayanır. Allan varyans ile bir zaman serisinin zaman aralıklı örneklenmesi ile elde edilen serilerdeki ardışık değerlerin arasındaki farkın kareleri ortalamasının yarısı olarak tanımlanmaktadır [22]. Kısaca Allan varyans, bir sinyali farklı kümelere böler. Bu kümeler, farklı zaman aralığına sahiptirler. Örneğin, iki ardışık örnek arasındaki zaman farkı ilk kümede 1 saniye ( $\tau_1$ ), ikinci kümede fark 2 saniye ( $\tau_2$ ) olabilir.



Şekil 4.3 Allan Varyans Zaman Kümelerinin Gösterimi [14]

Allan sapma eğrisi için;

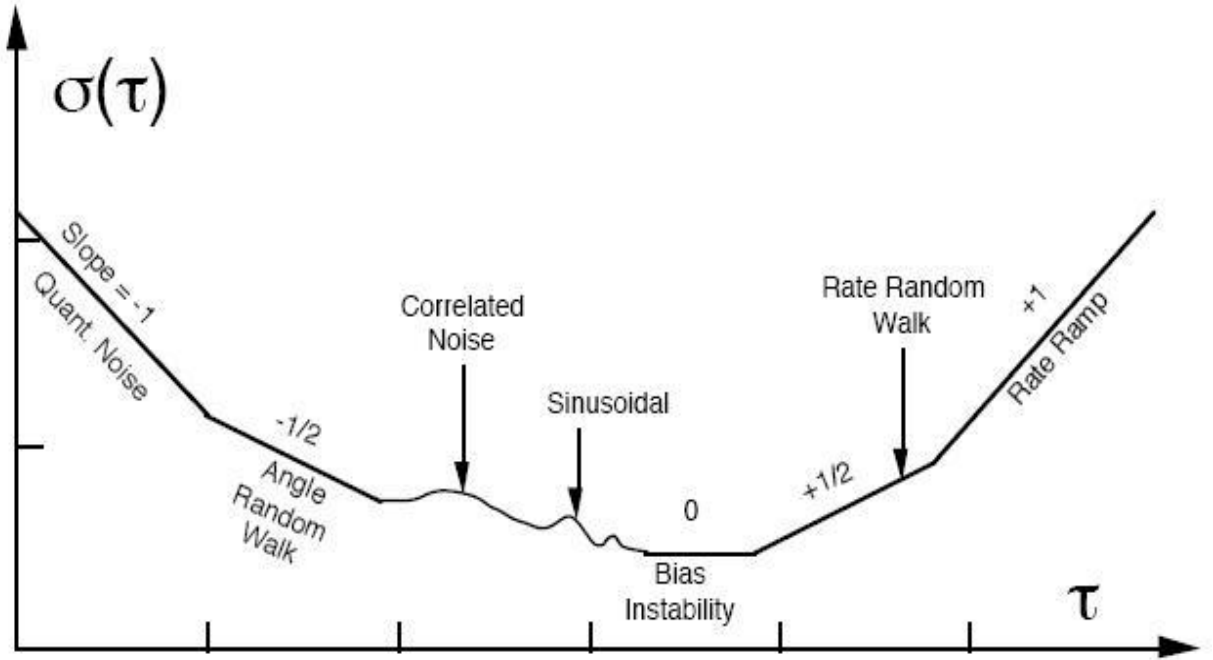
- Korelasyon süresi belirlenir.

- Veri önceden belirlenmiş  $\tau_k$  değerlerinden birine bölünür ve her bölümün ortalama değer hesaplanır.
  - Bu ortalama değer  $y(i)$  değerine atanır.  $i \geq 0$  olmalıdır.
  - Allan eğrisi  $\sigma(\tau)$  nin  $\tau_k$  değerine karşı çizdirilmesiyle bulunur.
- Allan varyansı hesaplamak için kullanılan denklem;

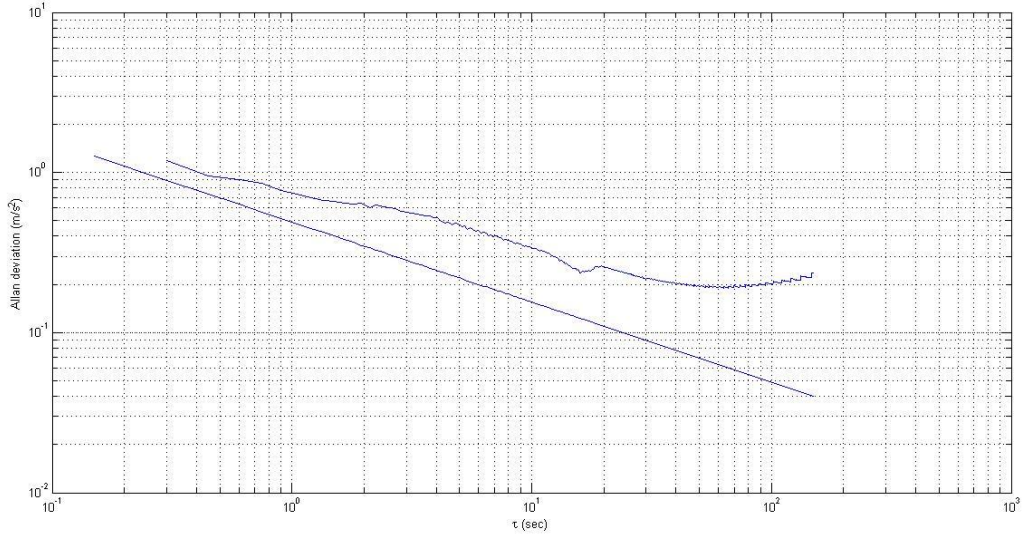
$$\sigma(\tau) = \left[ \frac{1}{2M} \sum_{i=0}^{M-1} (y(i+1) - y(i))^2 \right]^{0.5} \quad (4.32)$$

$$M = \frac{T}{\tau_k} - 1 \quad (4.33)$$

T: ölçüm aralığı



Şekil 4.4 Allan varyans eğrisi [14]



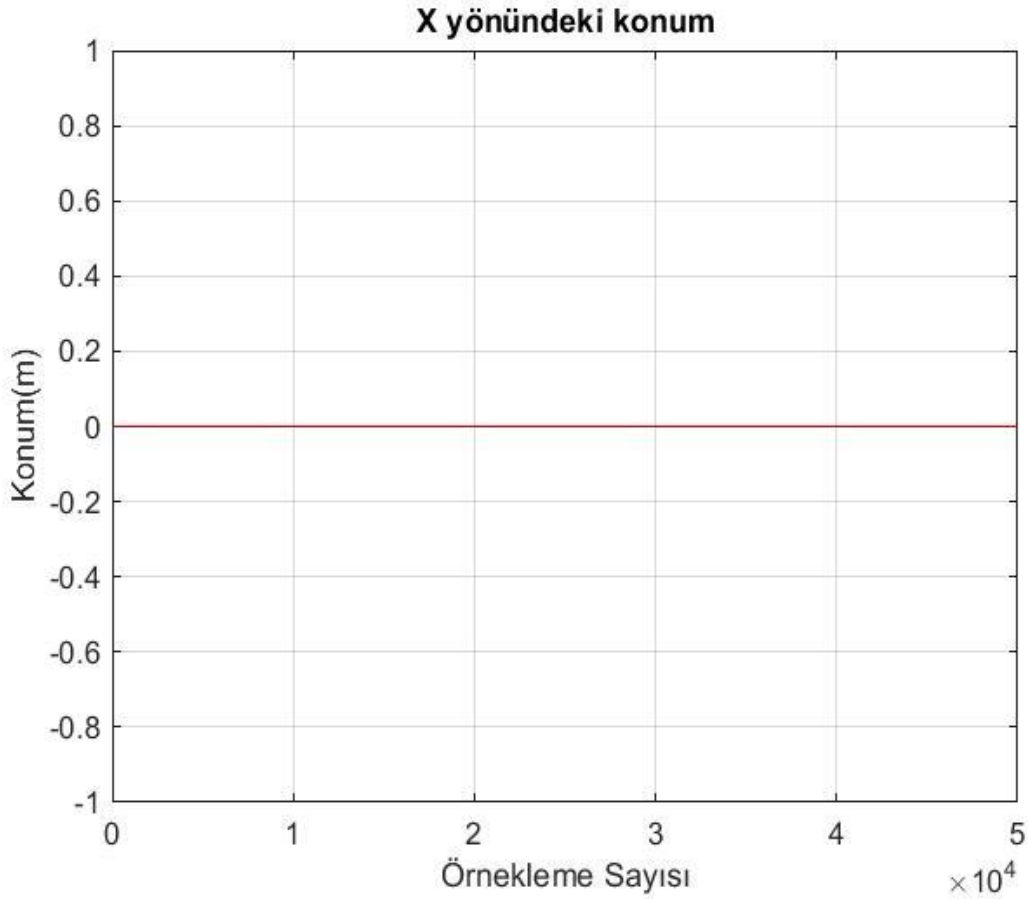
Şekil 4.5 Hesaplanan Allan varyans

882472 uzunluğunda deneysel verinin incelenmesinden sonra, Allan varyans yöntemiyle elde edilen üstteki eğriden de anlaşılacağı gibi, hız rassal yürüme (Velocity random Walk) ve eğimin  $(-1/2)$  : alttaki referans doğrunun eğimi çıkması hız kestirimi yapılmasındadır. Bu şekil ölçüm gürültüsünün Gaussian beyaz gürültü olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla Kalman süzgeci kuramının en önemli varsayımı, gürültünün karakterinin Gaussian olması gerektiği de kanıtlanmıştır. IMU'nun içindeki 16-bit ADC kullanımı Nicemleme hatasını oldukça küçültmüştür. Ayrıca, Nicemleme (Quantization) hatasının ihmal edilecek kadar küçük olması, Allan varyans yöntemiyle kanıtlanmıştır. Çünkü eğimin  $(-1)$  olduğu bölgeye Şekil 4.5'te neredeyse hiç rastlanmamıştır.

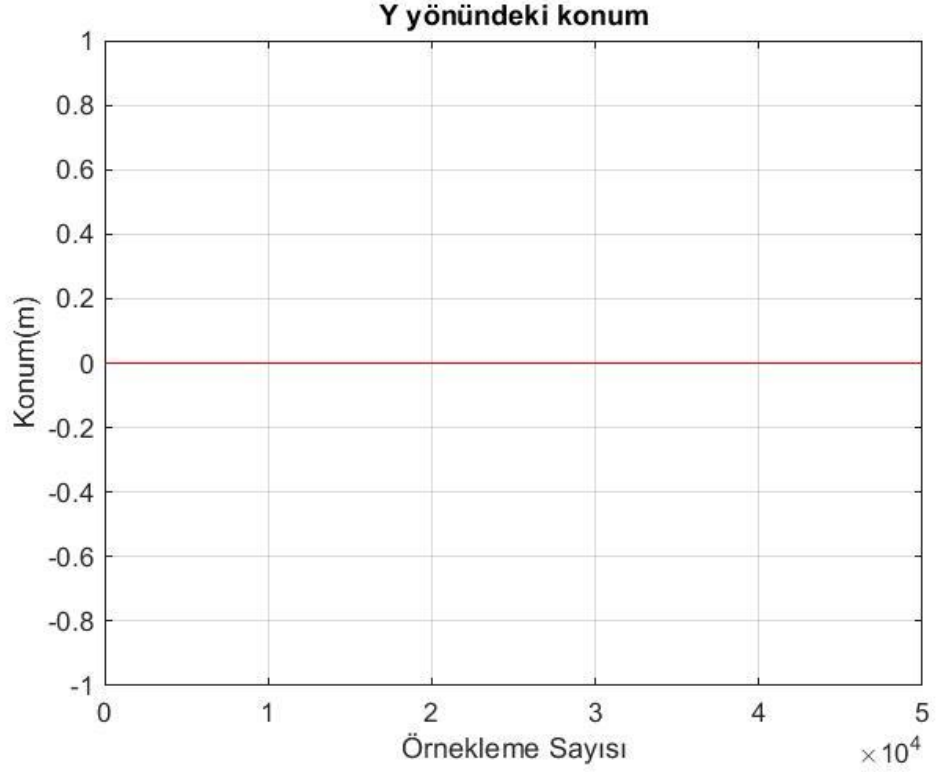


## 5. BULGULAR VE YORUMLAR

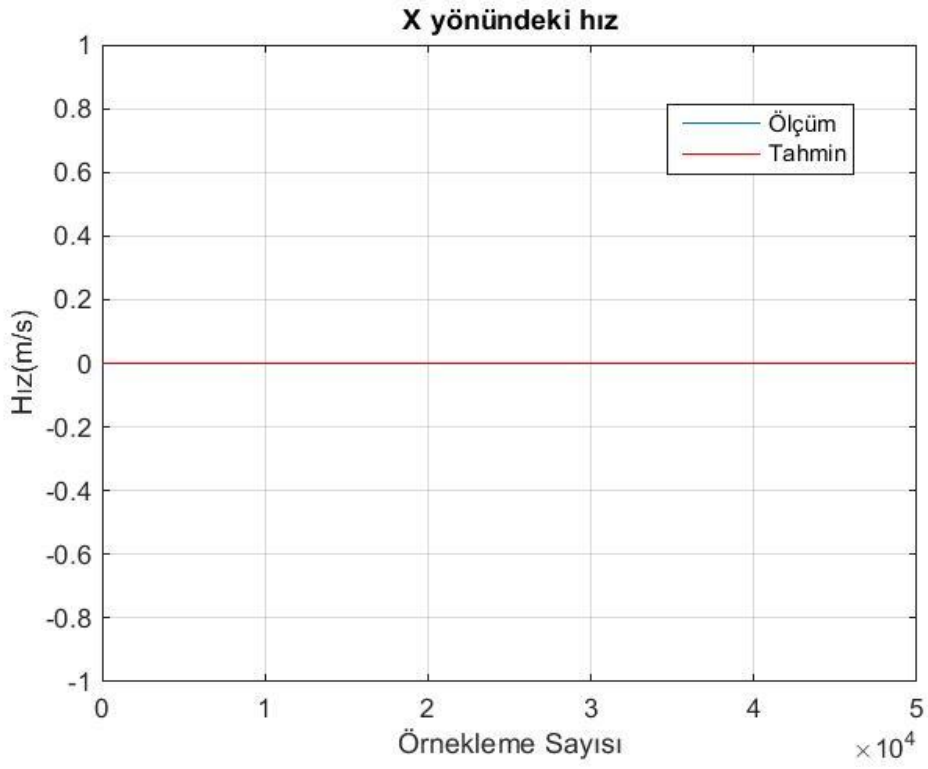
Öncelikle algoritmanın sağlıklı çalıştığını göstermek için bilinen sentetik veri kullanılmıştır. Ayırık beyaz gürültü ivme modeli için sentetik data oluşturularak yapılan gözlemler yerine ivme değerleri (x ve y eksenlerinde ) sıfır ortalamalı beyaz gürültü alındığında aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



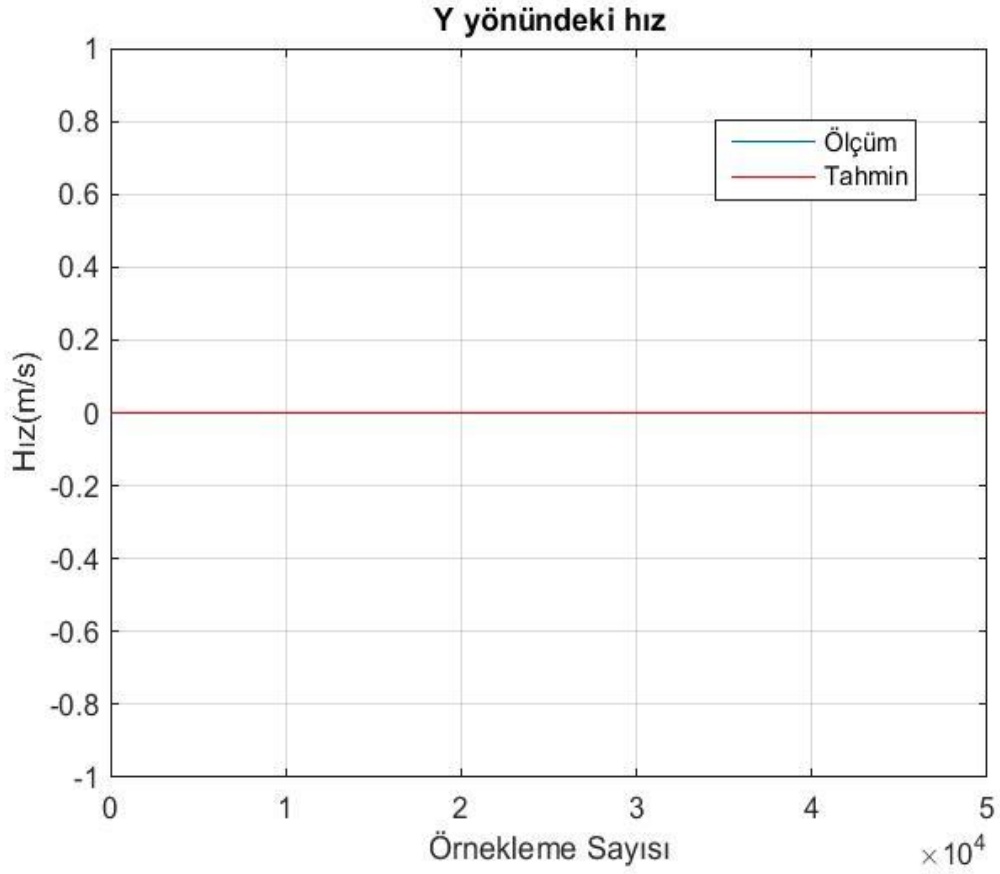
Şekil 5.1 X yönündeki konum – sentetik veri



Şekil 5.2 Y yönündeki konum – sentetik veri



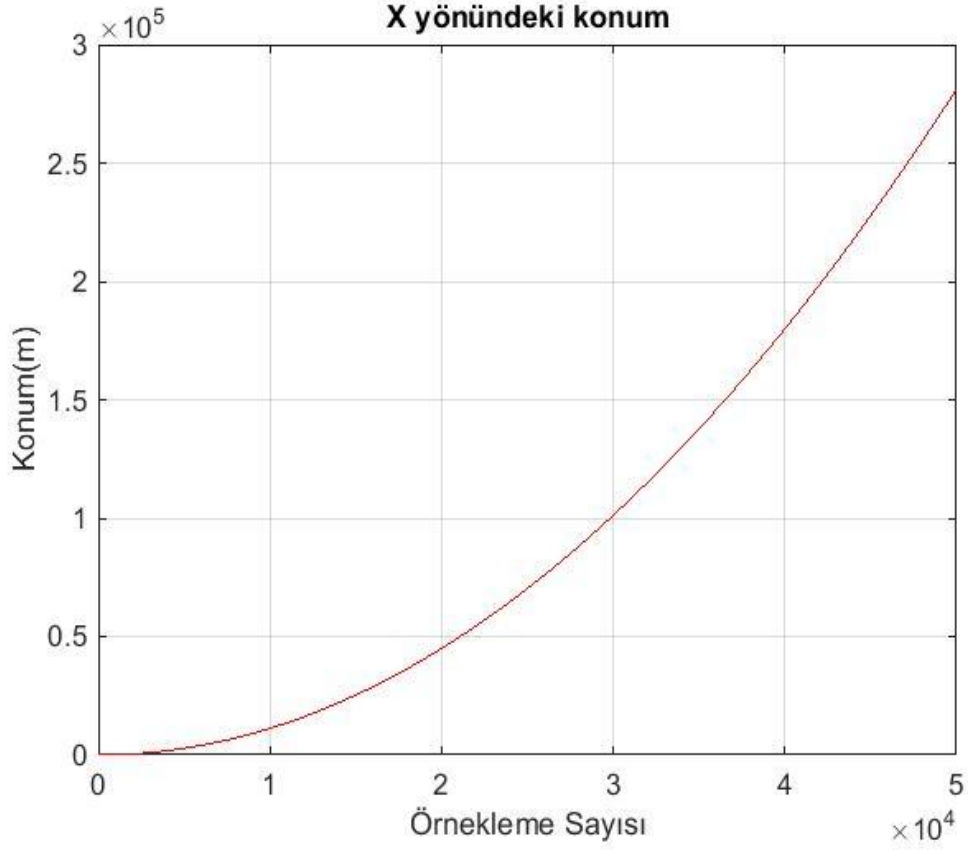
Şekil 5.3 X yönündeki hız – sentetik veri



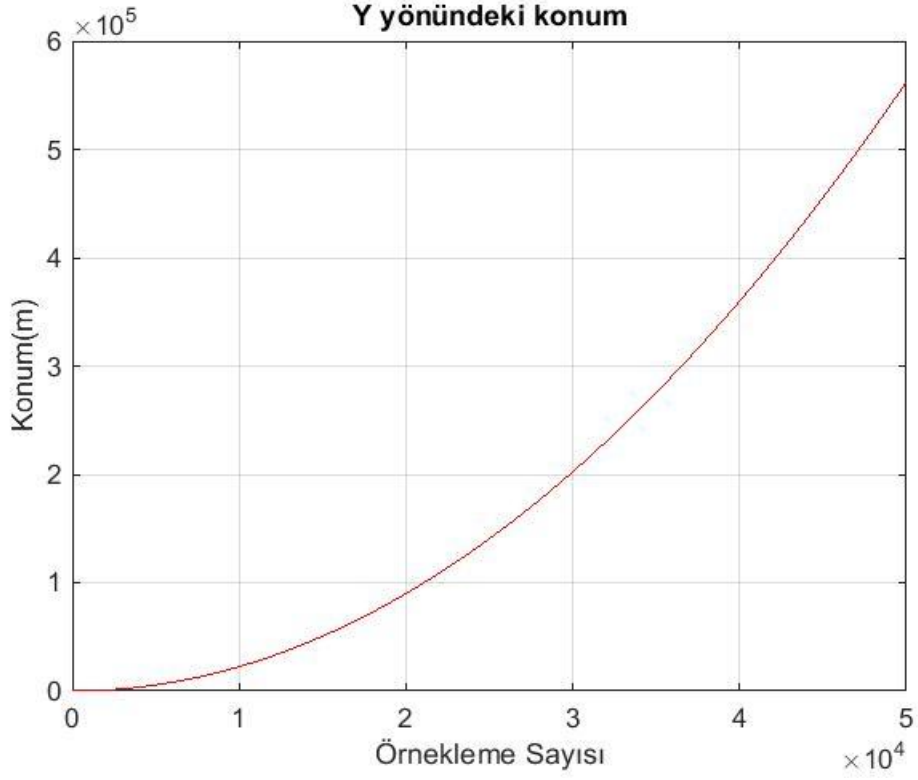
Şekil 5.4 Y yönündeki hız – sentetik veri

Yukardaki şekillerden de anlaşılacağı üzere sonuçlar kuramla örtüşmektedir. Konum ve hız grafikleri hareketsiz sensorü temsil etmektedir.

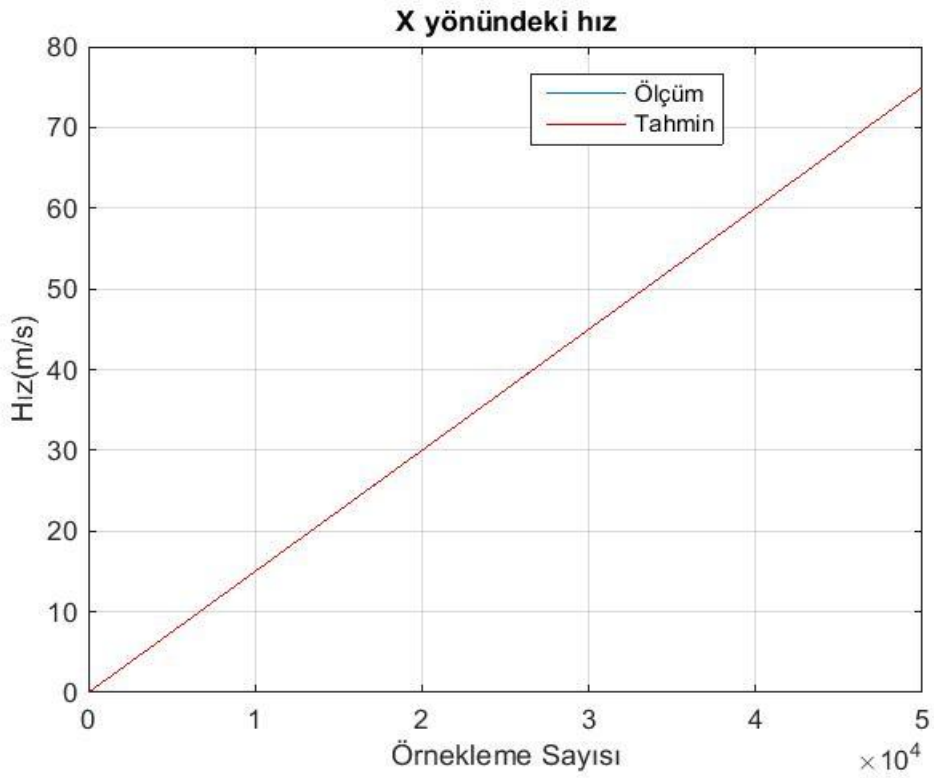
İvme değerleri (x ve y eksenlerinde) sıfır ortalamalı beyaz gürültü içinde sabit değerler alındığında ise aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



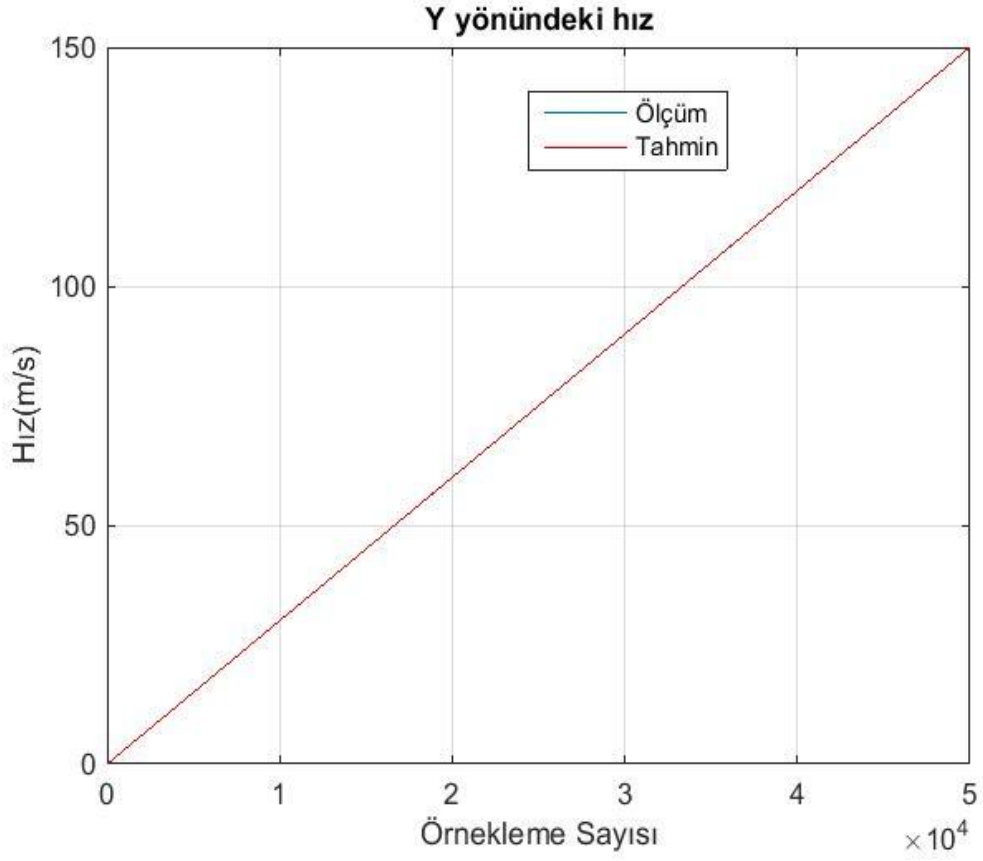
Şekil 5.5 X yönündeki konum – sentetik veri – sabit ivme



Şekil 5.6 Y yönündeki konum – sentetik veri – sabit ivme



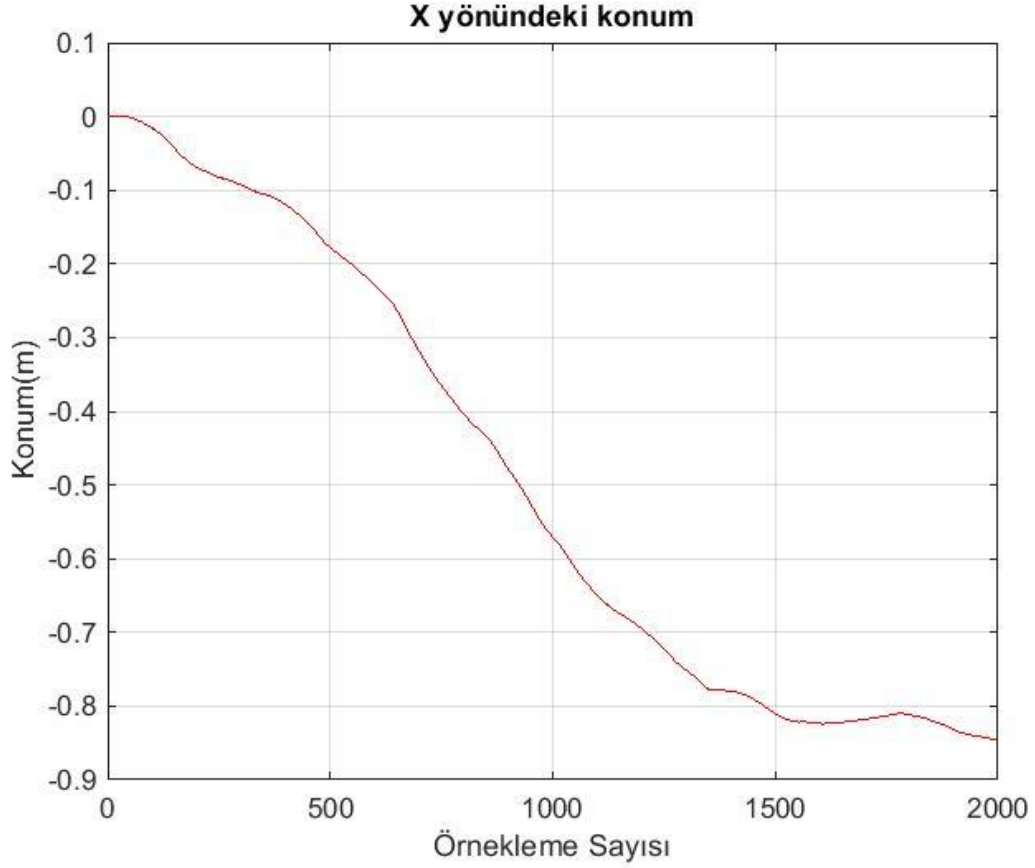
Şekil 5.7 X yönündeki hız – sentetik veri – sabit ivme



Şekil 5.8 Y yönündeki hız – sentetik veri – sabit ivme

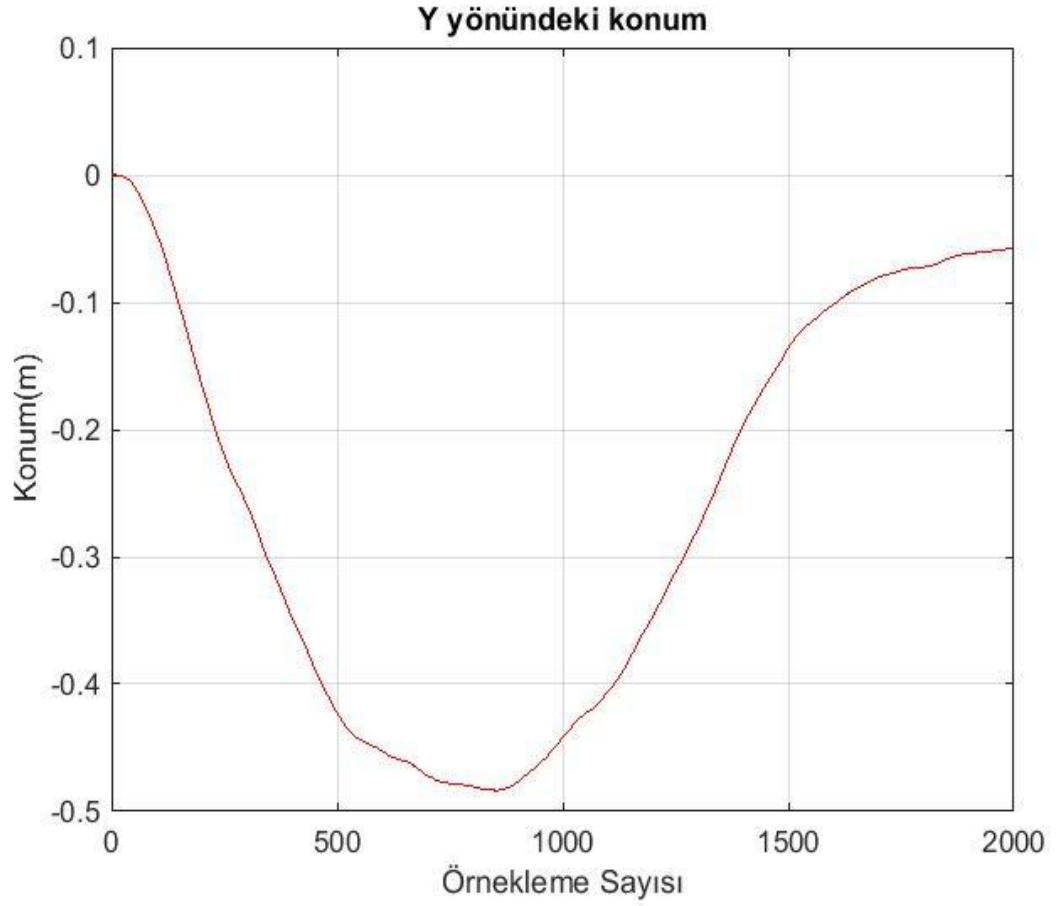
Yukardaki şekillerden de anlaşılacağı üzere sonuçlar kuramla örtüşmektedir. Konum ve hız grafikleri sabit ivmeli hareketi temsil etmektedir. Sabitin integrali doğru şeklinde hız grafiklerinde ortaya çıkmıştır. Öte yandan sabit eğimli doğrunun integrali parabol şeklinde konum grafiklerinde ortaya çıkmıştır.

Bu doğrulamadan sonra, hareket halindeki gerçek sensor için Ayrık Beyaz Gürültü İvme Modeli kullanılarak elde edilen deneysel grafikler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.9 X yönündeki konum 2000 iterasyon

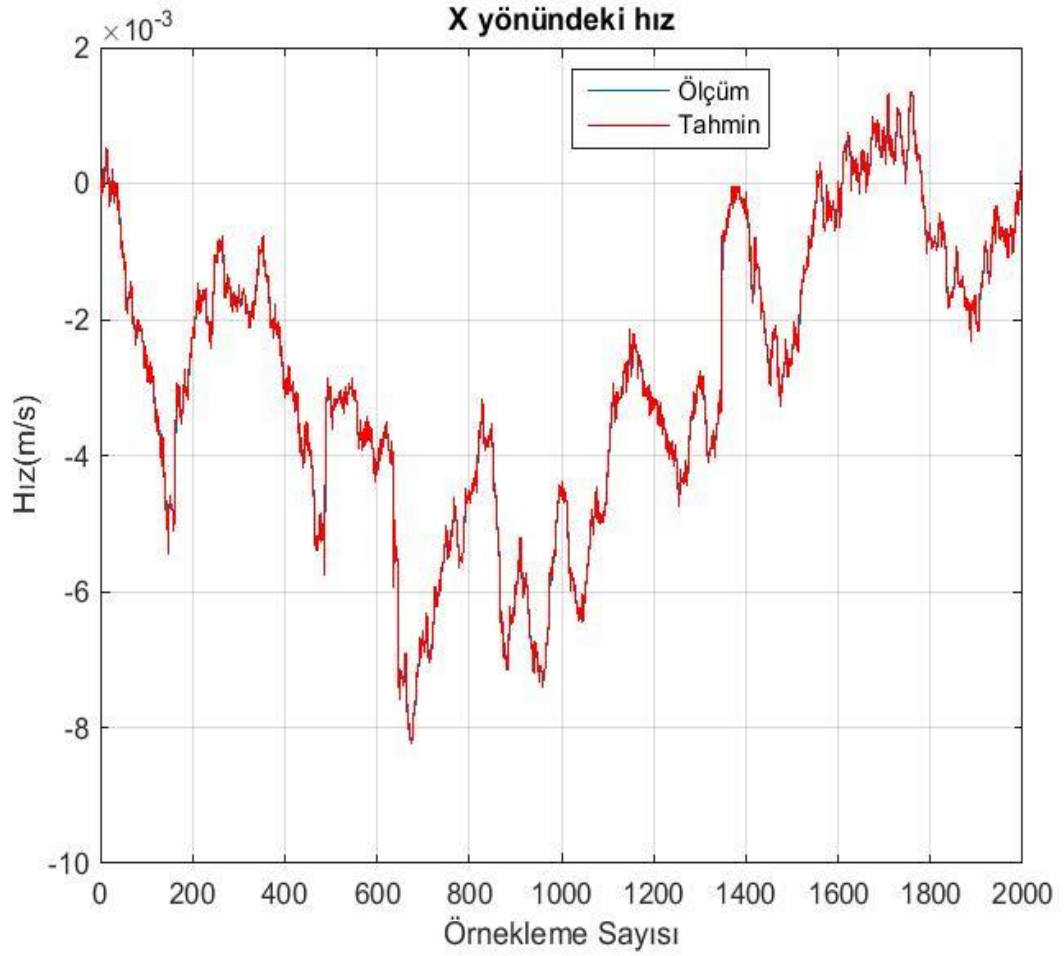
Beyaz gürültü modelinde ivme gürültü olarak, hız ise sabit olarak tanımlanmaktadır. Alınan ivme değerlerinden konum bilgisi geçilmiştir. Oluşan grafiğin doğrusal azalan olması gerekmektedir. Şekilde bu duruma benzerlik göstermektedir. Ancak ivme verilerinden konum verilerine geçilmesi oluşan hataları arttırmıştır. Oluşan grafikte sensör yönlerine göre pozitif veya negatif yönlerde değişimler gözlemlenmektedir.



Şekil 5.10 Y yönündeki konum 2000 iterasyon

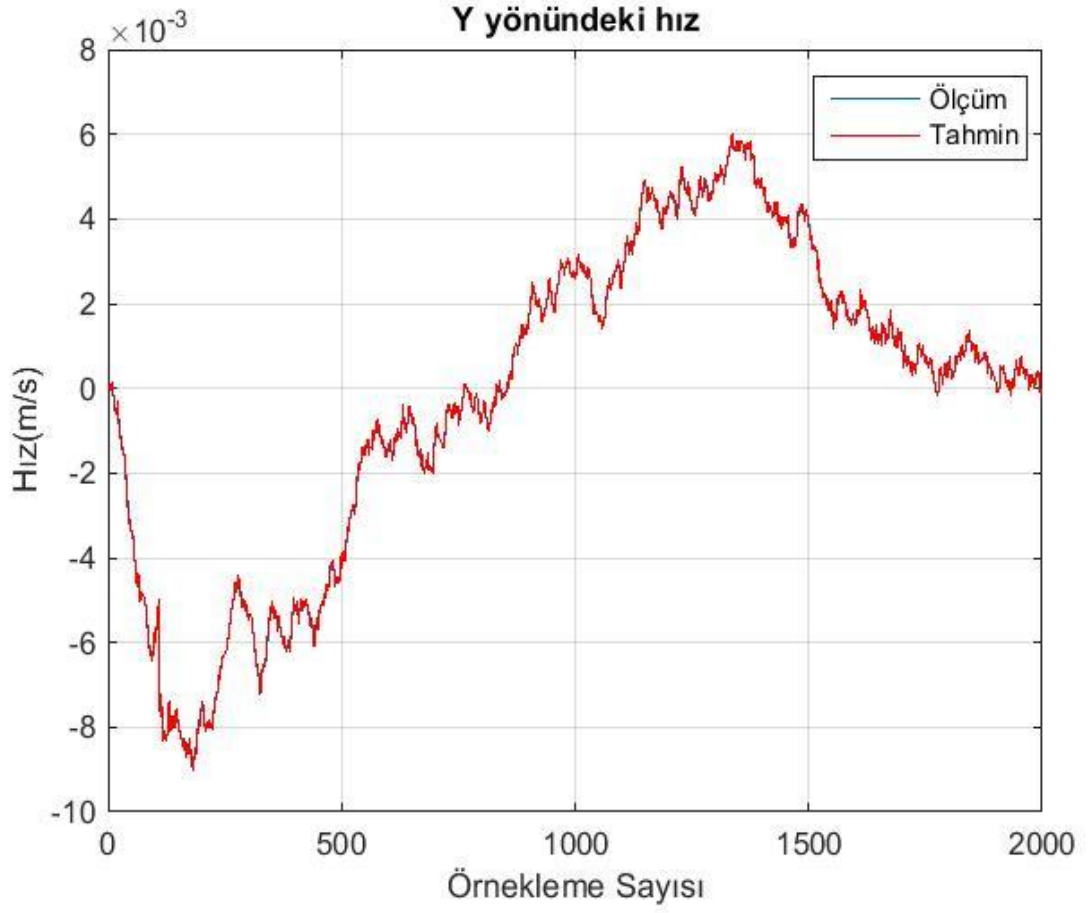
Y yönündeki konum grafiğinin de lineer çıkması gerekir. Yaklaşık 800 iterasyona kadar konum başlangıçta negatif yönde lineer artış göstermiş sonrasında ters yönde artış olmuştur.





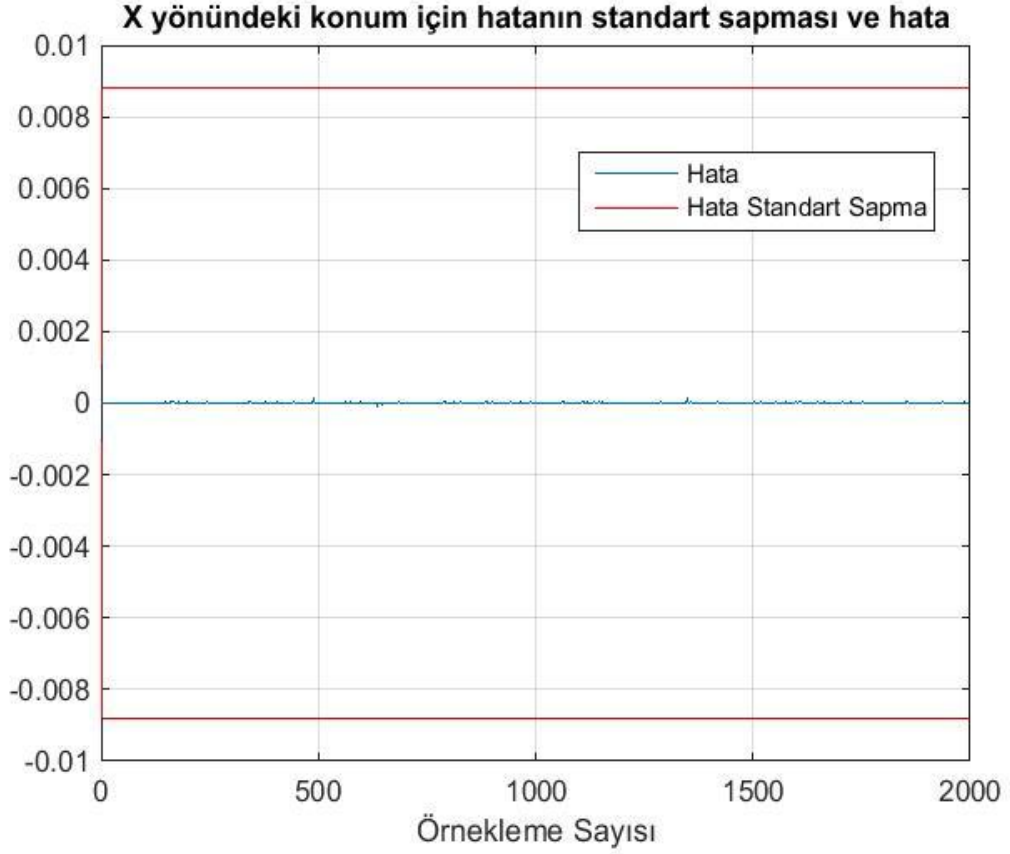
Şekil 5.11 X yönündeki hız 2000 iterasyon

Ayrık beyaz gürültü modeline göre hız grafiğinin sabit çıkması gerekmektedir. Grafiklerde x ve y yönündeki hızların yaklaşık sabit çıktığı, değişimin çok küçük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



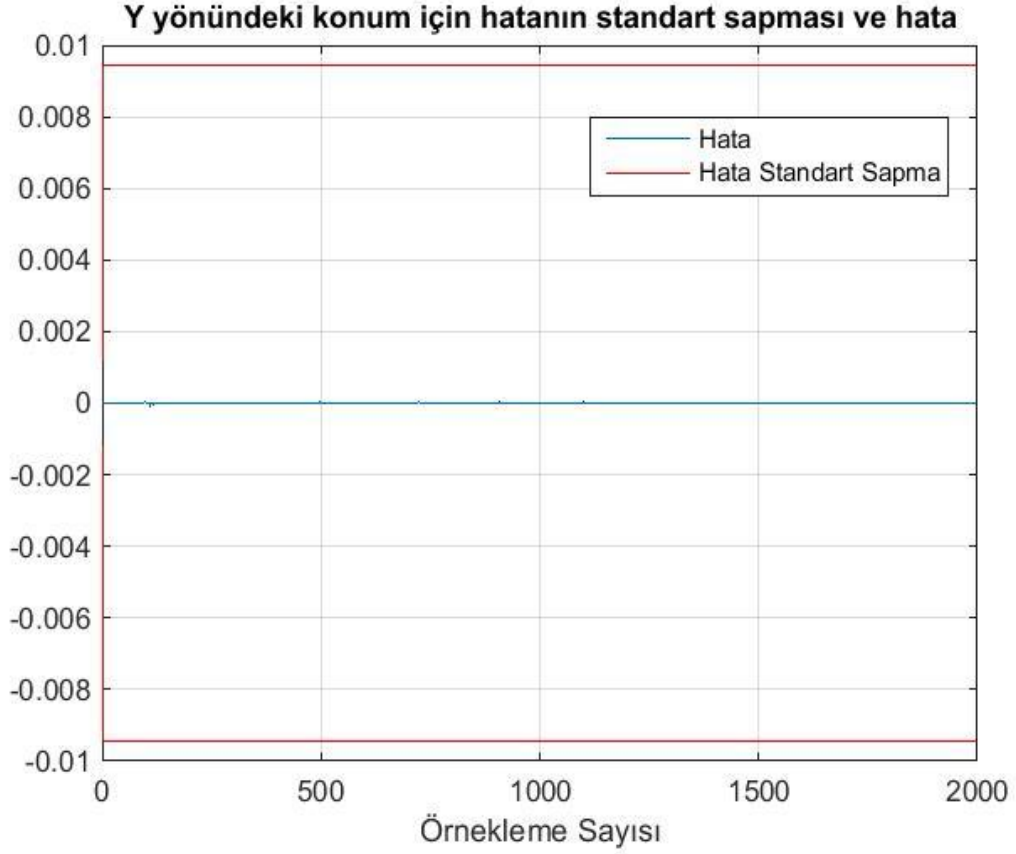
Şekil 5.12 Y yönündeki hız 2000 iterasyon

Hız grafiği sabit çıkmıştır. Değişim çok küçük aralıklarda olmuştur.



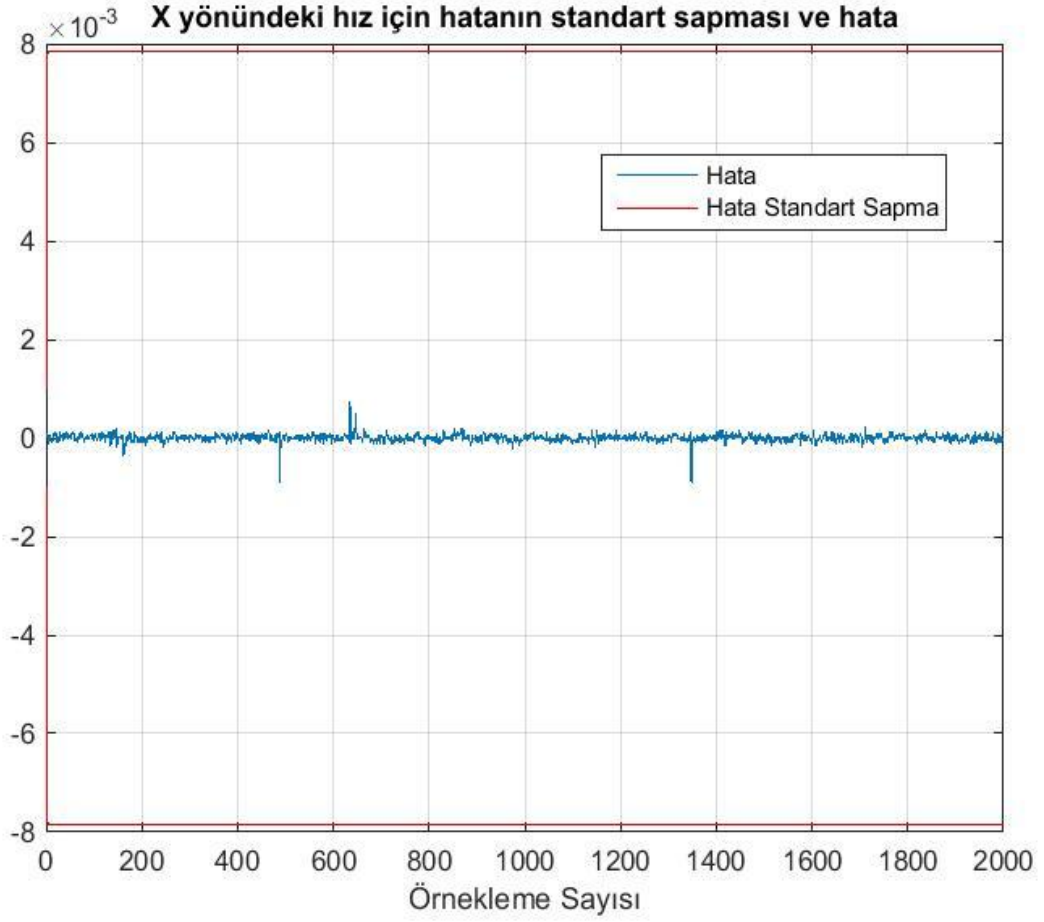
Şekil 5.13 X yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon

Bu grafikte X yönünde oluşan konum için hatanın standart sapması ve hata incelenmiştir. Kestirilen değer ile ölçülen değer arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Hatanın standart sapma değerinin oldukça küçük çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durumda kestirimlerden alınan sonuçlar ile ölçümlerin birbirini yakaladığı gözlemlenmiştir.



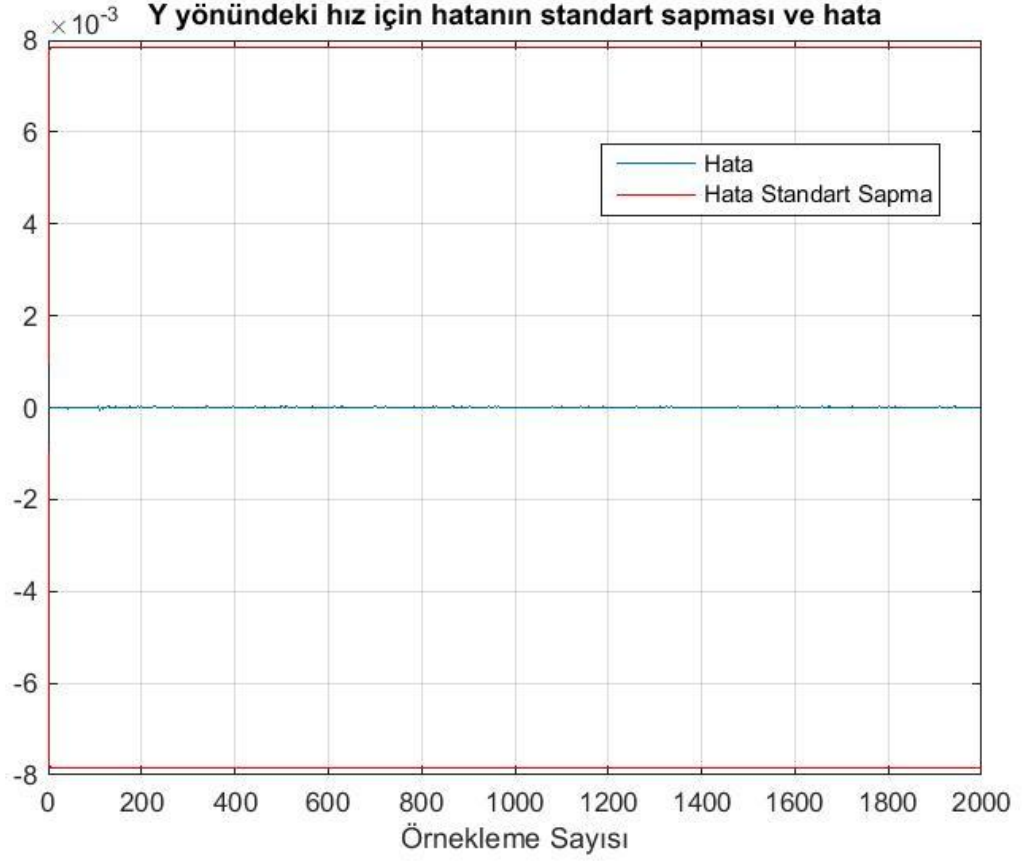
Şekil 5.14 Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon

Grafikte Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata incelenmiştir. Y yönündeki konum için kestirilen konum değeri ile ölçülen konum değeri arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Hata kovaryans matrisinin normunun çok küçük olduğu ve modelin yakınsadığı gözlemlenmiştir.



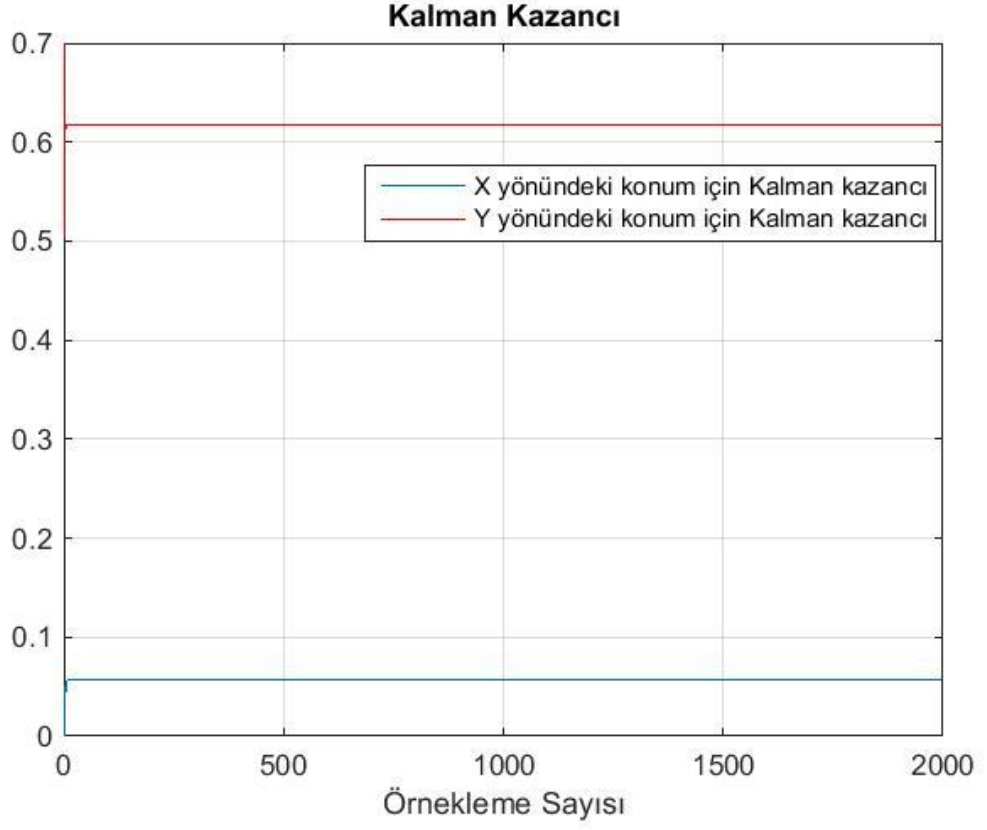
Şekil 5.15 X yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon

Bu grafikte X yönünde oluşan hız için hatanın standart sapması ve hata incelenmiştir. X yönündeki hız için kestirilen hız değeri ile ölçülen hız değeri arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Hata kovaryans matrisinin normu çok küçük çıkmıştır.



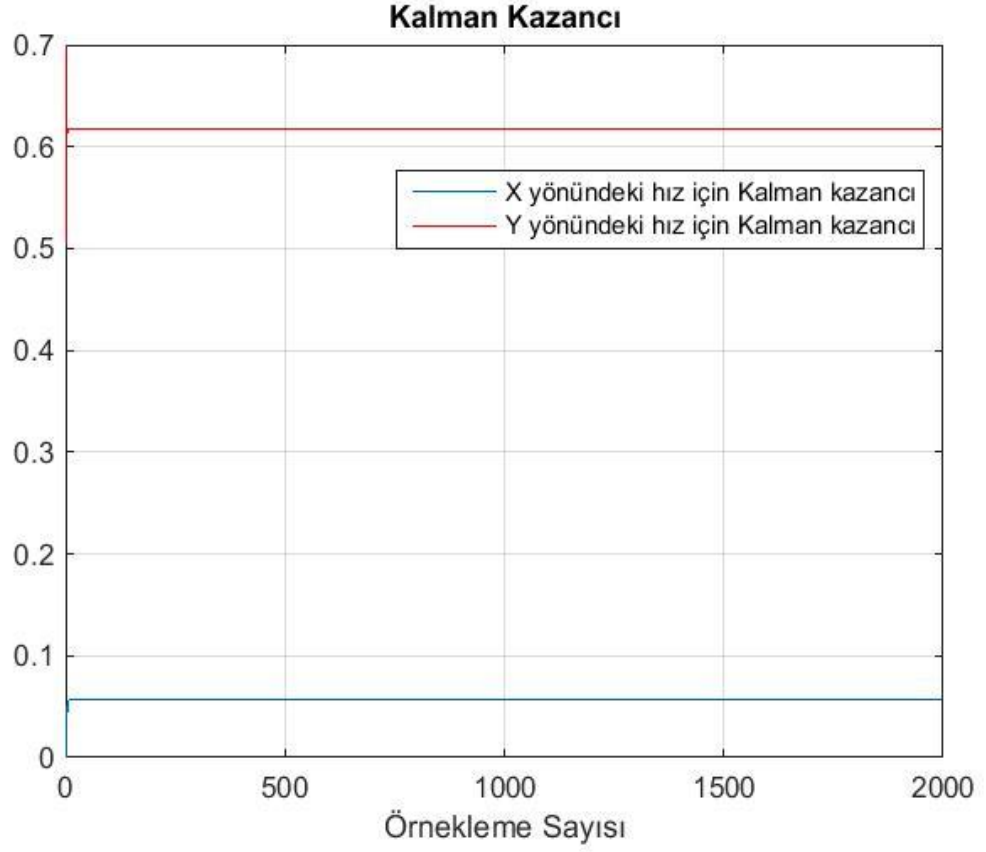
Şekil 5.16 Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 2000 iterasyon

Y yönündeki hız için kestrilen hız değeri ile ölçülen hız değeri arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Hata kovaryans matrisinin normu binde bir seviyelerindedir.



Şekil 5.17 X-Y yönlerindeki konum için Kalman kazancı

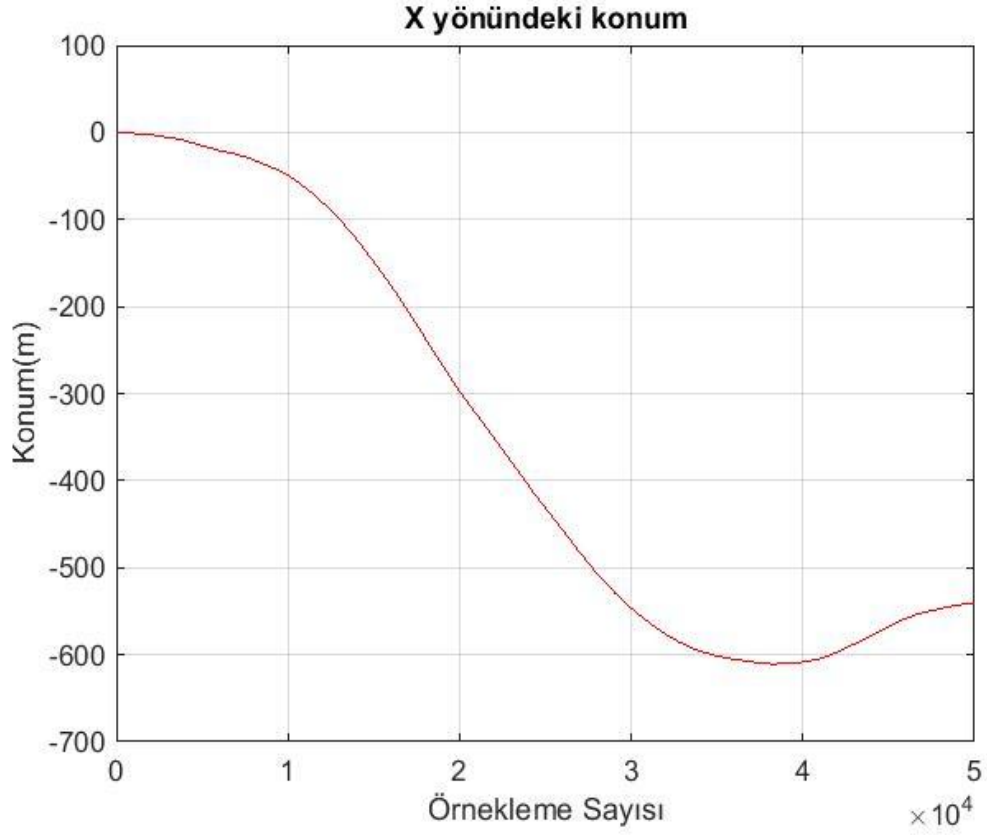
X ve Y yönlerindeki Kalman kazancı hesaplanarak sisteme geri kazanım gönderilmekte bu sayede kestirim sonuçlarının doğru çıktığı gözlenmektedir. Her iki yön içinde Kalman kazancı değerleri çok küçük çıkmıştır. Bu durum da kestirimlerin ölçümleri yakaladığının göstergesidir.



Şekil 5.18 X-Y yönlerindeki konum için Kalman kazancı

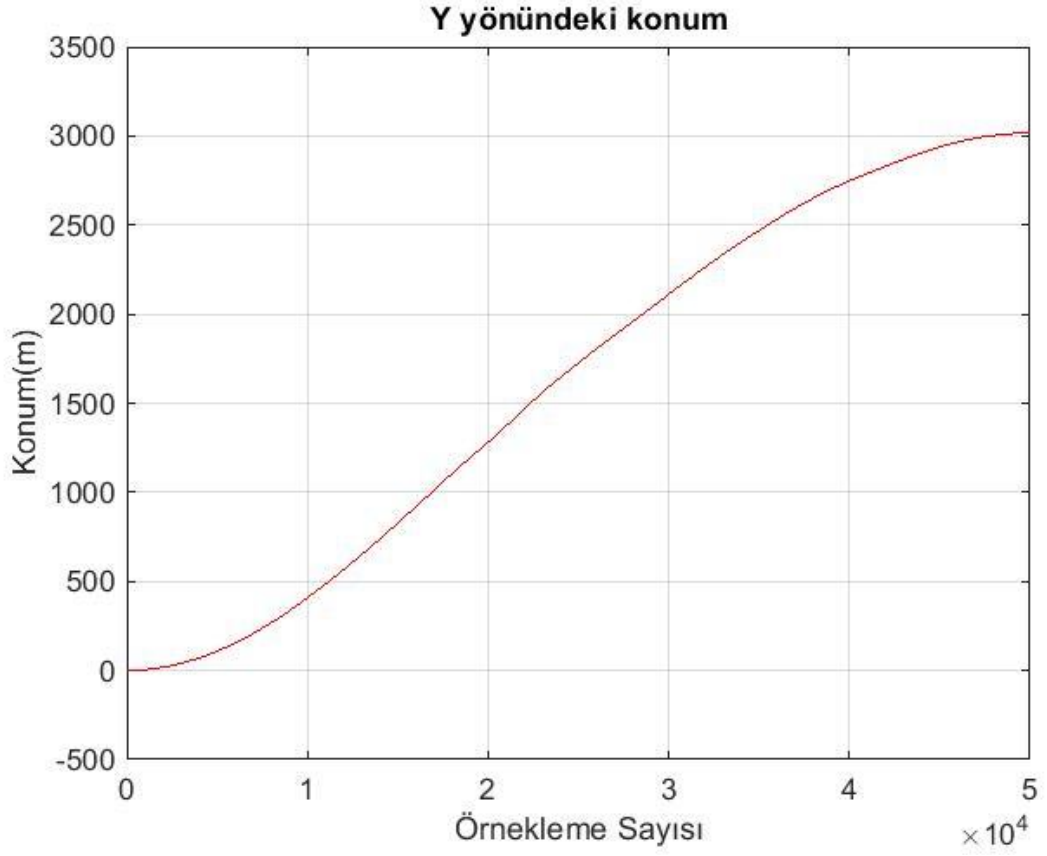
Kalman kazançlarının yakınsaması konum ve hız kestiriminin doğruluğunun ölçüsü ve kanıtıdır.





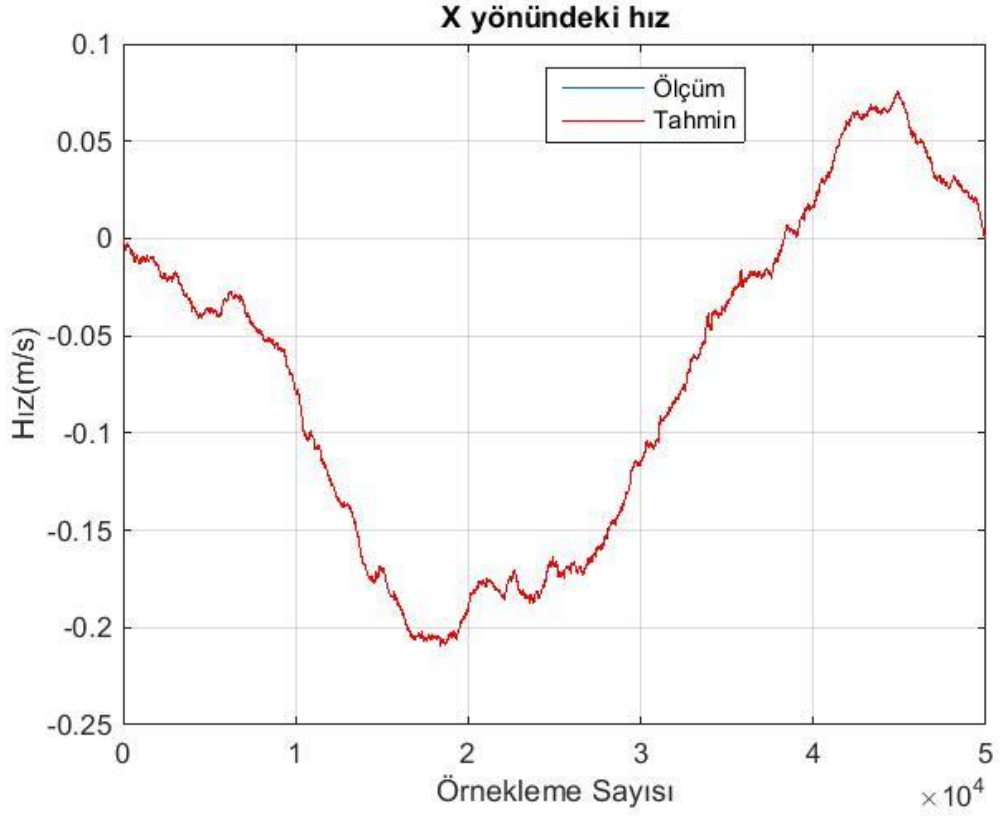
Şekil 5.19 X yönündeki konum 50000 iterasyon

5000 iterasyon için konum grafiği şekildeki gibidir. Beyaz gürültü modelindeki lineer konum grafiği burada da geçerli olmaktadır.



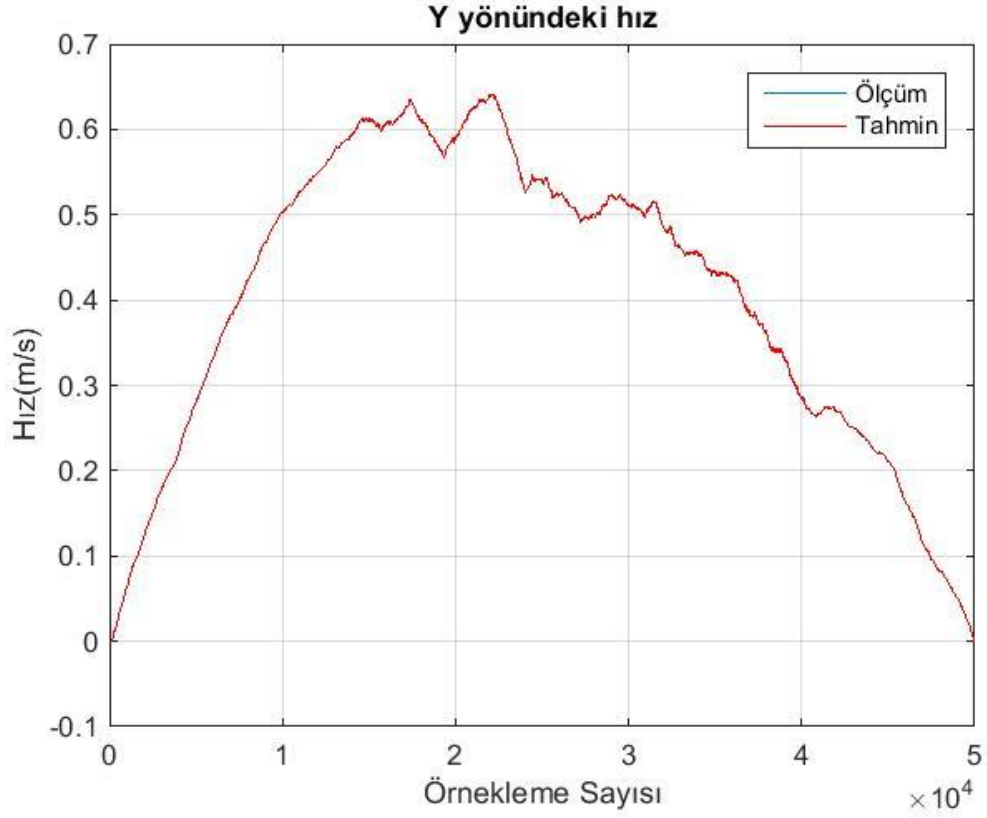
Şekil 5.20 Y yönündeki konum 50000 iterasyon

5000 iterasyon sonucunda y yönündeki konum grafiği grafikteki gibi olmaktadır.



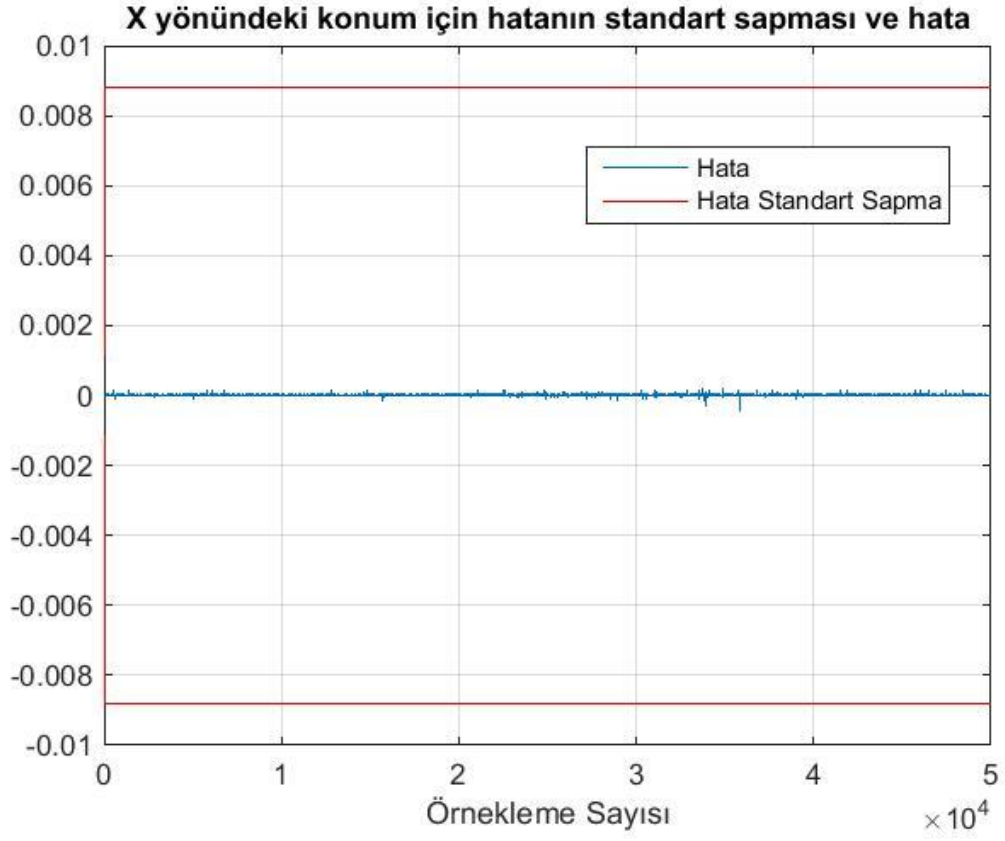
Şekil 5.21 X yönündeki hız 50000 iterasyon

Bu grafikte X yönünde oluşan hız için hatanın standart sapması ve hata incelenmiştir. X yönündeki hız için kestirilen hız değeri ile ölçülen hız değeri arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Hata kovaryans matrisinin normu çok küçük çıkmıştır.



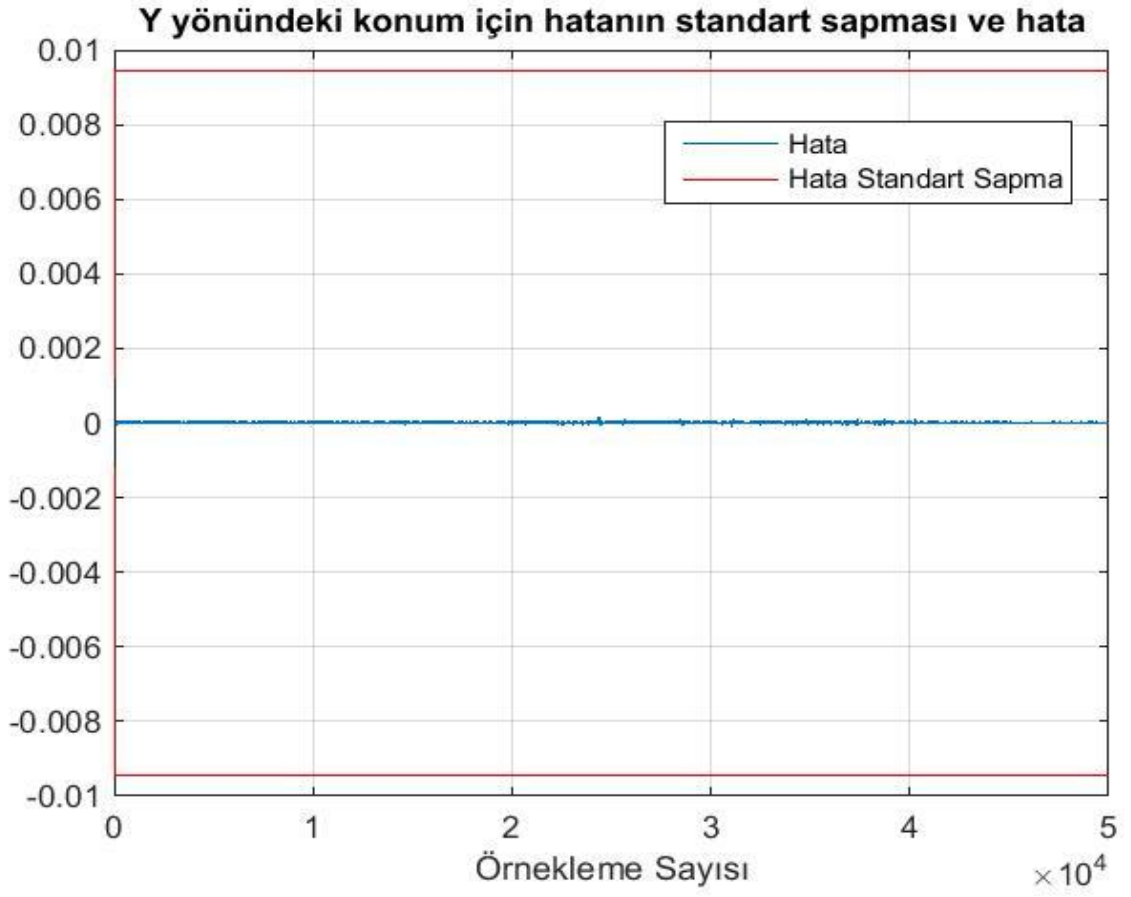
Şekil 5.22 Y yönündeki hız 50000 iterasyon

Grafikte Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata incelenmiştir. Y yönündeki hız için kestirilen hız değeri ile ölçülen hız değeri arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Hata kovaryans matrisinin normunun çok küçük olduğu ve modelin yakınsadığı gözlemlenmiştir.

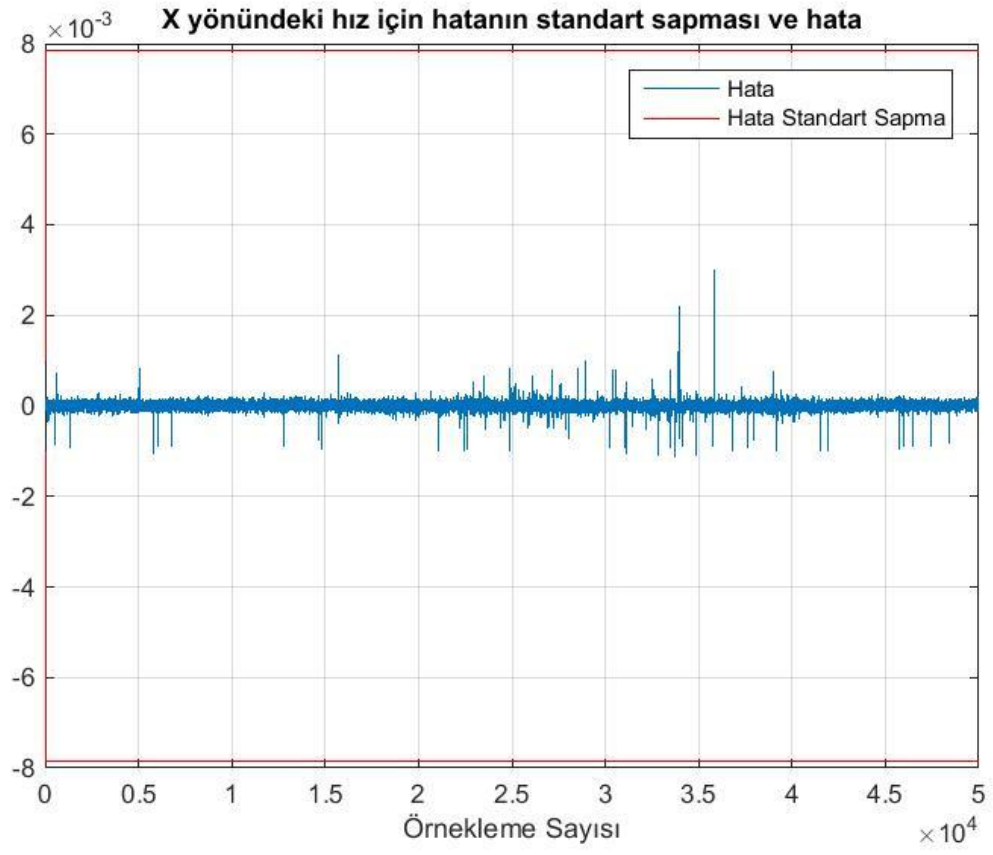


Şekil 5.23 X yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon

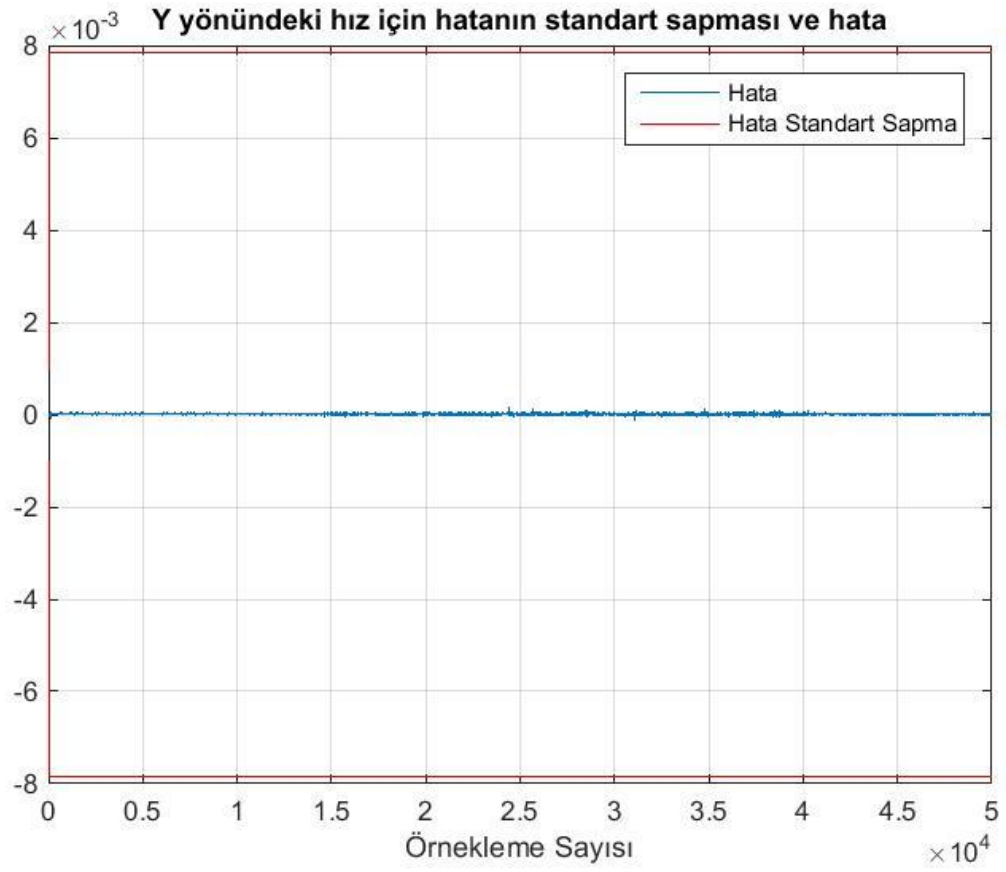
Hata değerinin sıfıra oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Hatanın standart sapmasının (bir sigma) aralığında yeteri kadar iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.24 Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon

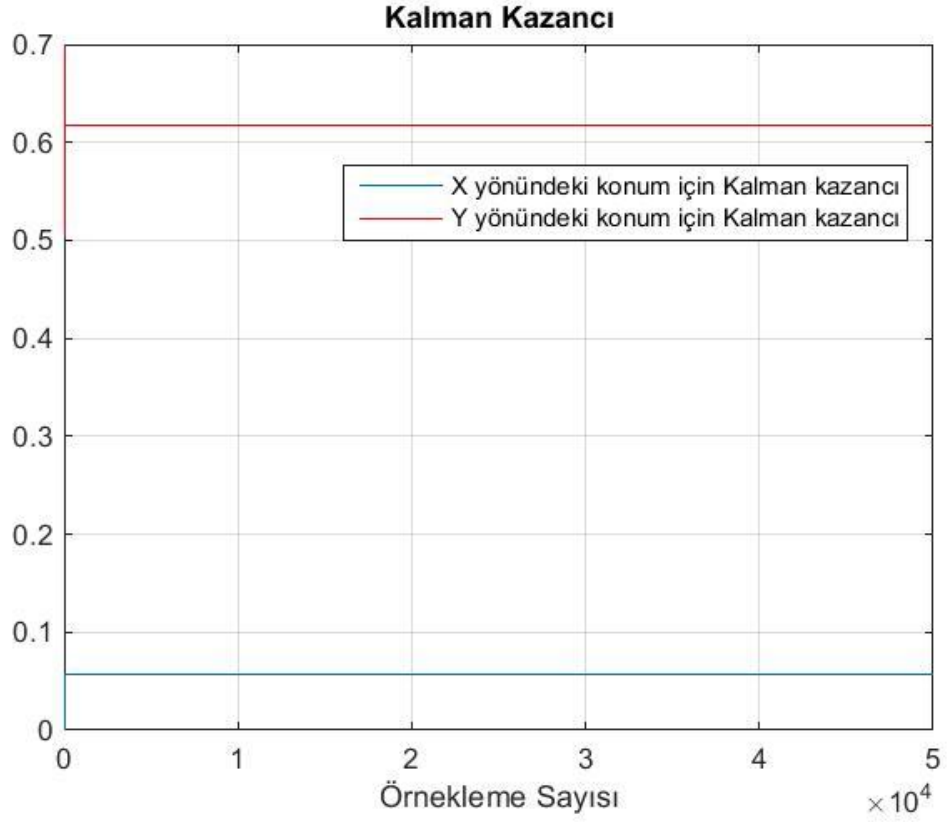


Şekil 5.25 X yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon



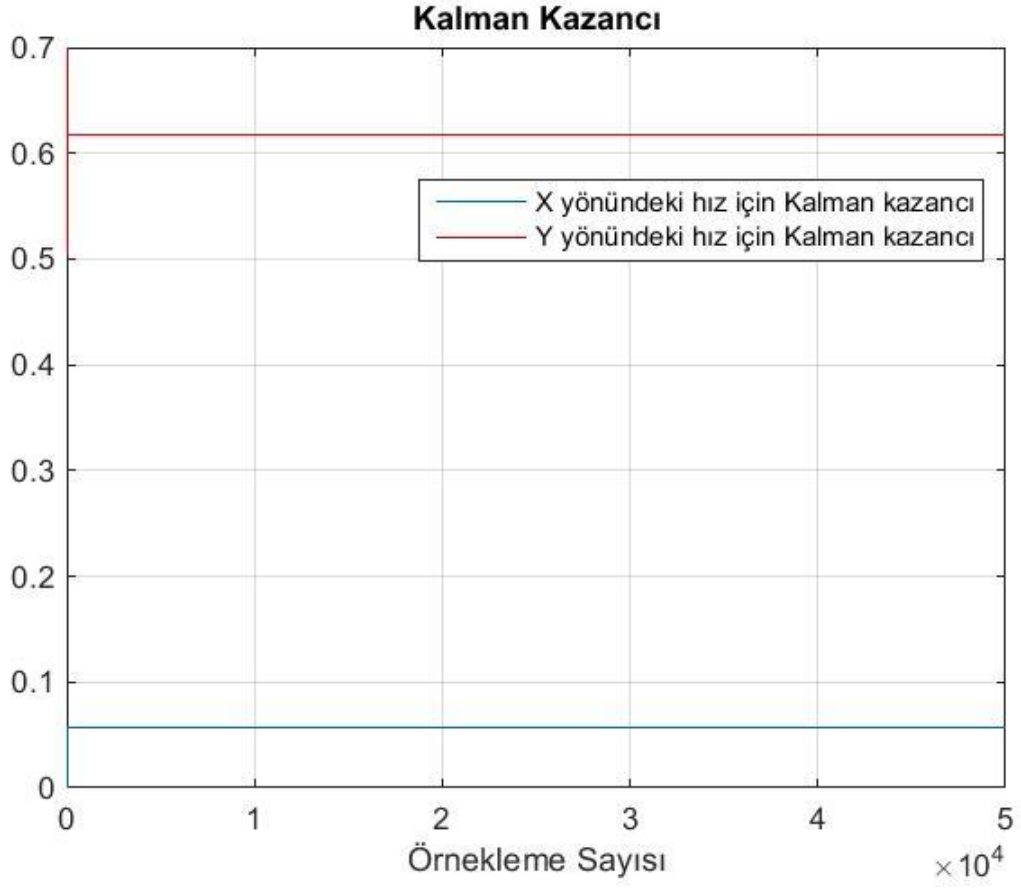
Şekil 5.26 Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata 50000 iterasyon





Şekil 5.27 X-Y yönlerindeki Kalman kazancı hata 50000 iterasyon

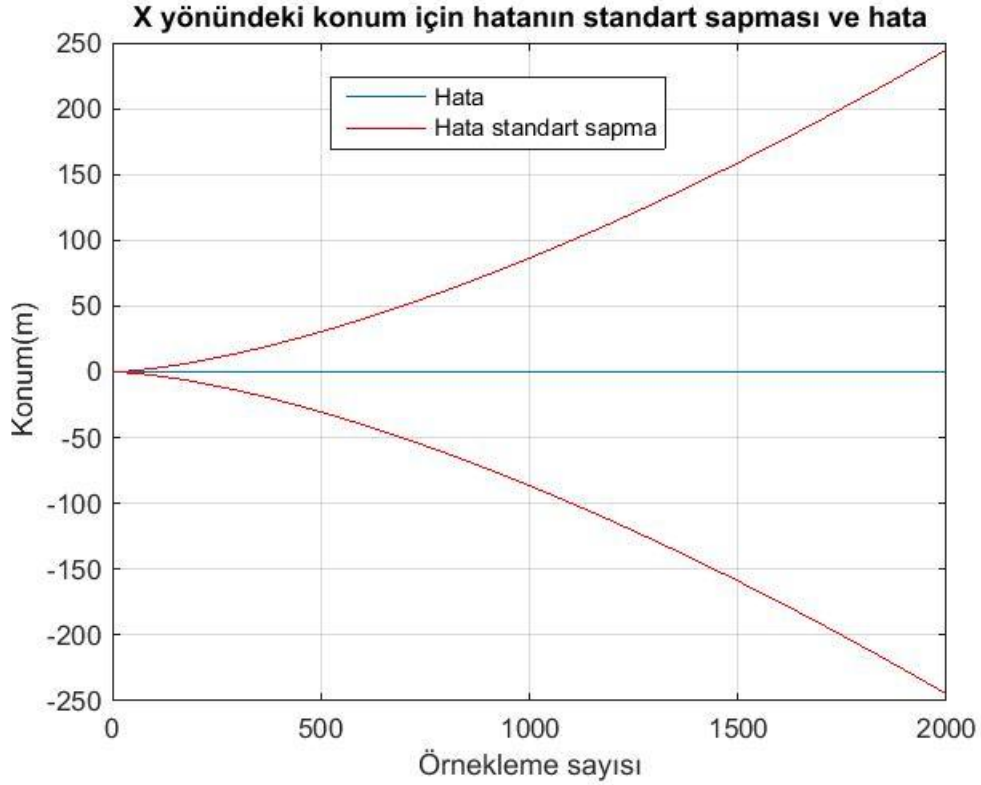
Kalman kazanç değeri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Kalman kazancının çok düşük çıktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.28 X-Y yönlerindeki hız Kalman kazancı hata 50000 iterasyon

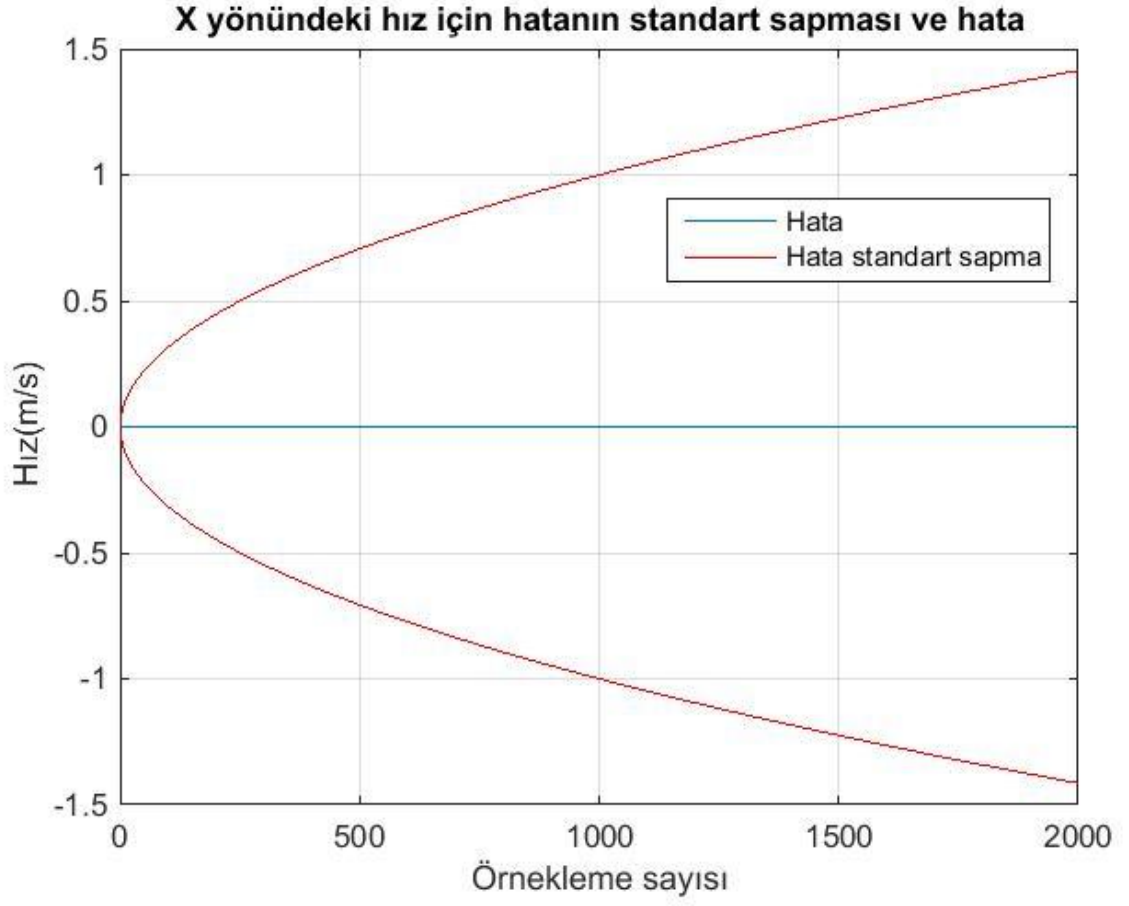
Kalman kazançlarının yakınsaması konum ve hız kestiriminin doğruluğunun ölçüsü ve kanıtıdır.

Bu birinci modelin kuramla uyumlu deneysel sonuçlarından sonra, hareket halindeki gerçek sensor için Ayrık zamanlı Wiener ivme modeli kullanılarak elde edilen deneysel grafikler aşağıda verilmiştir.



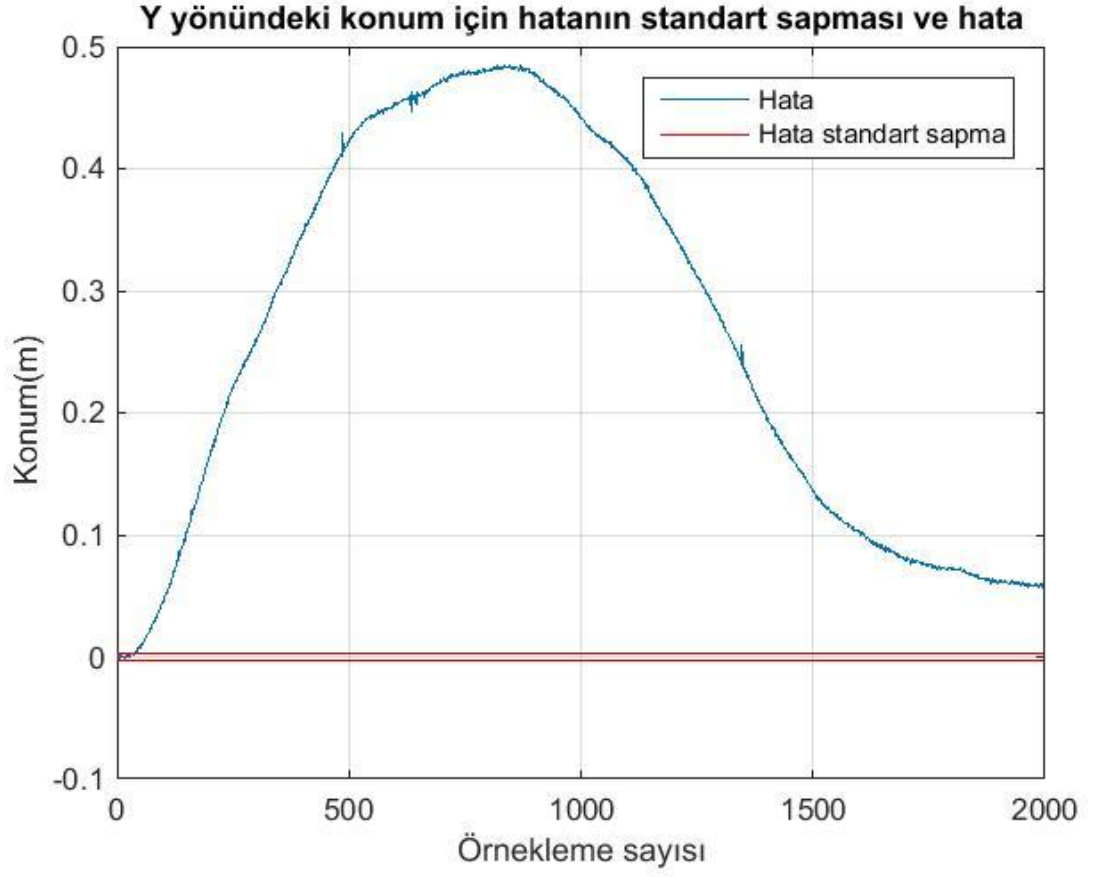
şekil 5.29 X yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata - Wiener

Bu grafikte X yönünde oluşan konum için hatanın standart sapması ve hata incelenmiştir. Kestirilen değer ile ölçülen değer arasındaki fark alınarak inceleme yapılmıştır. Herhangi bir örnekleme zamanında standart sapmaya bakılırken, ortalamadan olan uzaklığın karesi şeklinde hesaplanacağından standart sapmalar pozitif ve negatif yönde olmak üzere iki eksen de olacaktır. Hata sıfır ortalamalı iken, hatanın standart sapmasında iraksama gözlenmiştir. Bu durum ikinci modelin doğru seçilmediğini bu yüzden kestirim sonuçlarının ölçümleri yakalayamadığını göstermektedir.



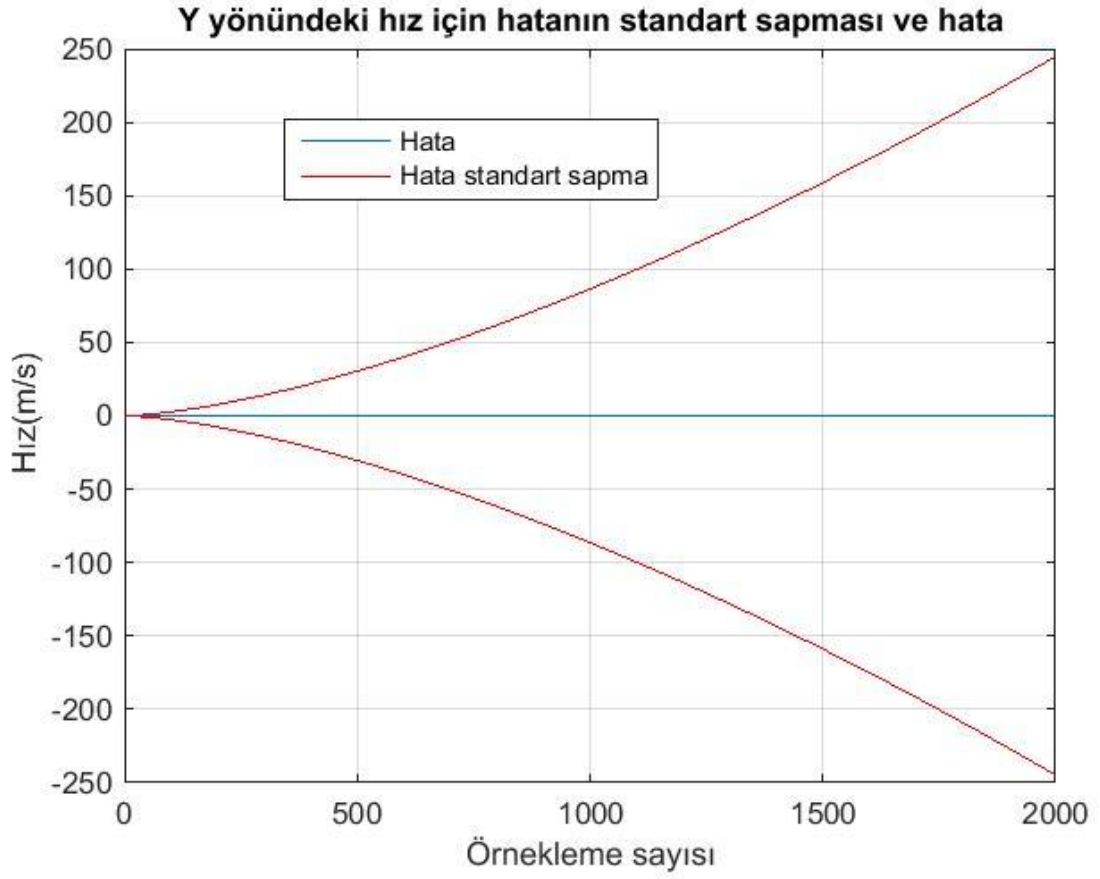
Şekil 5.30 X yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata – Wiener

Hatanın standart sapması giderek artış göstermiştir.



Şekil 5.31 Y yönündeki konum için hatanın standart sapması ve hata - Wiener

Mavi çizgi ile belirtilen hata grafiğinin, hata standart sapma bant aralığında çıkması beklenirken, bu durumdan saptığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.32 Y yönündeki hız için hatanın standart sapması ve hata - Wiener

Hata sıfır ortalamalı olduğu halde, durum hata kovaryans matrisinin normunda ıraksama gözlenmiştir. Bu durum ikinci modelin fiziksel sistemi karşılamadığı için kestirim sonuçlarının ıraksadığını göstermektedir.

## 6. SONUÇLAR

Deterministik hatalar Kalman ile çözülemediğinden, bu çalışmada sadece stokastik hatalar hedeflenmiştir. Kalman model tabanlı bir kestirim algoritması olduğundan, başarıyı gerçekçi ölçülebilmek için iki farklı model kullanılmıştır.

Wiener filtresinin ıraksamasının nedeni hem deterministik hataların ihmal edilmesi hemde fiziksel sistemi karşılayacak uygun bir modelin farklı olabileceği gerçeğidir.

Özellikle hız kestiriminin doğruluğu ve ölçümlerle örtüşmesi ve hatanın yakınsaması bir başarıdır. Kalman özellikle durağan olmayan stokastik sistemlerde iyi sonuçlar vermiştir.

Allan varyans yöntemiyle gürültü tipi, Gaussian Beyaz Gürültü olarak teyid edilmiştir. Bunu eğimin (-1/2) ve Hız rassal yürüme (Velocity random Walk) çıkmasından anlıyoruz. Kalman süzgeci kullanılabilmesi için sağlanması gereken varsayımlardan en önemlisi, modelleme(Q) ve ölçüm (R) gürültülerinin Gaussian olmasıdır. IMU'nun içindeki 16-bit ADC kullanımı Nicemleme hatasını oldukça küçültmüştür. Ayrıca, Nicemleme (Quantization) hatasının ihmal edilecek kadar küçük olması, Allan varyans yöntemiyle kanıtlanmıştır. Çünkü eğimin (-1) olduğu bölgeye neredeyse hiç rastlanmamıştır. Böylelikle, Allan varyans yöntemi tam bir deneysel doğrulama olmuştur.

Gelecek çalışmalarda Kalman için daha gerçekçi modeller, örneğin doğrusal olmayan modeller araştırılıp, incelenebilir. Allan varyans yöntemi için çok daha uzun, örneğin bir aylık veriler toplanabilir. Deterministik hataları önlemek veya azaltmak için, donanımsal olarak yüksek doğrulukta ve gömülü yazılım içeren ileri kalibrasyon yöntemleri geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Sobel, D., Andrewes, W.J.H Boylam, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, 2004.
- [2] W.J.H. Andrewes, "Finding Space on Earth", IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000
- [3] Titterton, D.H., Weston, J.L., Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Pregrinus Ltd., 1997.
- [4] Groves, P. D., Principles of GNSS Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, 2008
- [5] Farrell, J.L Integrated Aircraft Navigation, Academic Press, 1976
- [6] Meirovitch, L., Analytical Dynamics, McGraw-Hill, 1970.
- [7] Unsal, D., Estimation Of Deterministic And Stochastic Imu Error Parameters, M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2012
- [8] Seshia A. A., Palaniapan M., Roessing T. A., Howe R. T., Gooch R. W., Schimert T. R., Montague S., A Vacuum Packaged Surface Micromachined Resonant Accelerometer, 2002
- [9] Groves, Paul D.Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems, 2007
- [10] P. Aggarwal ve e. al., A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units, cilt 61, pp. 323-336. Journal of Navigation, 2007
- [11] Kayasal, U., Modeling and Simulation of a Navigation System with an IMU and a Magnetometer, M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2007
- [12] Günhan, Yeşim Ataletsel Ölçüm Birimi Hatalarının Belirlenmesi ve Düzeltilmesi, 2014
- [13] Tsang, C. C., Error Reduction Techniques for a MEMS Accelerometerbased Digital Input Device, The Chinese University of Hong Kong, 2008
- [14] Altınöz, B. Optimum system identification of inertial sensor error parameters, 2015
- [15] Arduino, Coşkun Taşdemir, 2015
- [16] İbrahim ÇAYIROĞLU, Kalman Filtresi ve Programlama Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 2012
- [17] Simon Julier and Jeffrey Uhlmann. A new extension of the kalman filter to nonlinear systems. Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. And Controls, Orlando, FL, 1997.
- [18] Fredrik Orderud Sem Sælands. Doğrusal Olmayan Ölçümlü Durum Uzay Modelleri için Kalman Filtresi Kestirimi Yaklaşımlarının Karşılaştırılması Türkçeye çeviren: M. Mehmet NEFES, Ankara Üniversitesi, 2009



- [19] Yaakov Bar-Shalom, Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software, 2001
- [20] Erişmiş, Mehmet Akif. Mems Accelerometers and Gyroscopes for Inertial Measurement Units, 2004
- [21] Yaakov Bar-Shalom, Peter K. Willett and Xin Tian Tracking and Data Fusion, 2011
- [22] Howe, D.A., Allan, D.W., Barnes, J.A, 1981, Properties of signal sources and measurement methods, Frequency Control Symposium, 464–469
- [23] Barbour N. M., Inertial Navigation Sensors, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, NATO RTO Lecture Series-232, London, U.K., 2003