



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GNSS VE IMU KULLANARAK ARM TABANLI
SEYRÜSEFER SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

RAMAZAN SAYAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Veysel Gökhan BÖCEKÇİ

EŞ DANIŞMAN

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

İSTANBUL, 2024



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GNSS VE IMU KULLANARAK ARM TABANLI SEYRÜSEFER SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

RAMAZAN SAYAN

523120001

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Veysel Gökhan BÖCEKÇİ

EŞ DANIŞMAN

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen pek çok kişi ve kuruma teşekkürü borç bilirim. Öncelikle, bana ilham veren ve çalışmalarıyla yol gösteren Selçuk BAYRAKTAR'a özel bir teşekkür etmek istiyorum. İleri teknolojiye olan katkıları ve Türkiye'nin savunma sanayisinde çığır açan çalışmaları, bu projeyi gerçekleştirirken bana büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur. Onun liderliği ve vizyonu, sadece bu tez çalışmasında değil, kariyerim boyunca ilham kaynağım olmaya devam edecektir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde önemli bir katkı sağlayan BAYKAR Teknoloji Ar-Ge Direktörü Mehmet Ali GÜNEY ve Gömülü Yazılım Teknolojileri Birim Lideri Bedreddin KARAKUŞ'a da içten teşekkürlerimi sunmak isterim. GNSS ve karıştırma cihazlarının temini konusunda ve sürecin her aşamasında bana destek olmuşlardır.

Lisans dönemimden beri yanımda olan, bana her zaman destek veren Dr. Öğr. Üyesi Veysel Gökhan BÖCEKÇİ ve Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ hocalarıma verdikleri eğitim, bilgi, rehberlik ve anlayışları için derin teşekkürlerimi sunuyorum. Onların bana olan inançları ve destekleri, bu çalışmayı başarıyla tamamlamamda büyük bir katkı sağladı.

Bu süreçte her zaman yanımda olan ve beni bugünlere getiren aileme ve sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ailem, verdikleri sevgi, destek ve değerli öğütlerle bu zorlu yolculukta hep yanımda oldu. Sevgili eşim ise her daim yanımda olarak, bana güç ve motivasyon kaynağı oldu. Onların desteği ve sevgisi, bu çalışmayı başarıyla tamamlamamdaki en büyük itici güçlerden biri olmuştur.

Tez çalışmam sırasında testlerimi gerçekleştirirken ve zorlandığım anlarda yardımlarını esirgemeyen Elmas Merve SAYAN, Abdülbaki ÜNAL, Yunus Emre ÇELİK ve Sefa SAYRACI'ya da özel olarak teşekkür etmek istiyorum. Bu değerli yardımları için kendilerine minnettarım.

Haziran 2024

Ramazan SAYAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vii
SEMBOLLER	x
KISALTMALAR	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
TABLO LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması.....	4
1.2. Özgün Değer.....	6
1.3. Tezin Amacı	6
2. MATERYAL ve YÖNTEM	7
2.1. Algılayıcılar	7
2.1.1 Küresel Konumlandırma Uydu Sistemi	8
2.1.1.1 GPS Uydu Sistemi	10
2.1.1.2 GLONASS Uydu Sistemi	13
2.1.1.3 Galileo Uydu Sistemi.....	14
2.1.1.4 BeiDou Uydu Sistemi	15
2.1.1.5 GNSS Konum Belirleme.....	16
2.1.1.6 GNSS Konum Belirleme Hataları.....	17
2.1.1.7 Uydu Tabanlı İyileştirme Sistemleri.....	20
2.1.1.8 Hareketli Base-Rover Konfigürasyonu.....	20
2.1.2 Ataletsel Ölçüm Birimi	21
2.1.2.1 İvmeölçer	23
2.1.2.2 Dönüölçer.....	27
2.1.3 Manyetometre.....	29
2.1.4 Barometre	29
2.2. Coğrafi Koordinat Sistemleri ve Dönüşümleri	30
2.2.1 ENU Koordinat Sistemi	31
2.2.2 ECEF Koordinat Sistemi.....	31

2.2.3	Gövde Çerçevesi	32
2.2.4	LLH Koordinat Sistemi	32
2.2.5	ENU Koordinat Sisteminden Gövde Çerçevesine Dönüşüm	32
2.2.6	Gövde Çerçevesinden ENU Koordinat Sistemine Dönüşüm	33
2.3.	Sensör Füzyon	33
2.3.1	Belirgin Tamamlayıcı Filtre	34
2.4.	Tahmin.....	39
2.5.	Kalman Filtre	41
2.5.1	Kalman Filtre Algoritması	42
2.5.1.1	KF Tahmin	43
2.5.1.2	KF Güncelleme	43
2.5.2	Doğrusal Olmayan Kalman Filtre	45
2.5.3	Lineer Kalman Filtre	46
2.5.4	Genişletilmiş Kalman Filtre	47
2.5.5	Kokusuz Kalman Filtre	49
2.6.	Sistem Tasarımı	54
2.6.1	Test Düzenegi Tasarımı	54
2.6.2	Sistem Çalışma Algoritması.....	65
2.6.3	Arayüz Tasarımı	73
2.6.4	Mekanik Tasarım.....	76
3.	TEST	78
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	81
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
	KAYNAKLAR.....	97
	ÖZGEÇMİŞ	104

ÖZET

GNSS VE IMU KULLANARAK ARM TABANLI SEYRÜSEFER SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Seyrüsefer, bir taşıtın veya kişinin belirli bir hedefe doğru güvenli ve verimli bir şekilde yol almasını sağlayan süreç olarak tanımlanmaktadır. Seyrüsefer yapan bir araç gideceği yere varmak amacıyla bulunduğu konum ile hedef konum arasında sürekli yeni yol noktaları oluşturur. Oluşturduğu bu yol noktaları arasında bulunduğu pozisyona göre bir sonraki noktaya ulaşabilmek için yönelimi belirler. Gitmek istediği pozisyona ulaşana kadar sürekli olarak bu süreç devam eder. Bir sonraki noktaya ulaşabilmek için yönelimini kestirerek pozisyon ve yönelim denetimini gerçekleştirir.

Günümüzün hızla gelişen teknolojisi, konum belirleme ve hareket izleme sistemlerinin hassasiyet ve güvenilirlik gereksinimlerini artırmıştır. Bu bağlamda, GNSS (Global Navigation Satellite Systems-Küresel Konumlandırma Uydu Sistemi) ve IMU (Inertial Measurement Unit-Ataletsel Ölçüm Birimi) gibi ileri seviye sensörler, yüksek doğrulukta veri sağlama kapasiteleriyle konum belirleme ve hareket izleme sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. GNSS, dünya çapında uydular aracılığıyla konum bilgisi sağlayarak, geniş kapsamda ve açık alanlarda yüksek hassasiyetle konum belirleme imkânı sunar. GNSS alıcıları temel olarak pozisyon, hız ve zaman çıktısı veren sistemlerdir. Ancak GNSS sinyalleri, karıştırma (Jammer) etkisi sonucu veya binaların içi, yoğun ağaçlık alanlar veya şehir içinde yüksek binaların arasında zayıflayabilir veya kesilebilir. Bu durumlarda IMU sensörleri devreye girer. IMU, bir nesnenin ivmesini, açısal hızını ölçen sensörlerden oluşur. Bu sensörler, taşıtın veya kişinin hareketini ve yönelimini sürekli olarak izler. IMU'nun en büyük avantajı, kapalı alanlarda veya GNSS sinyallerinin alınamadığı durumlarda bile çalışabilmesidir. Ancak, IMU sensörlerinin hata biriktirme problemi, zamanla doğruluğun azalmasına neden olmaktadır.

Hava araçlarında da yönelim belirleme işlemleri için GNSS, IMU ve manyetometre sistemleri kullanılmaktadır. İvmeölçer, dönüölçer ve manyetometre algılayıcılarından elde edilen veriler belirli matematiksel denklemler ile bir önceki pozisyon ve yönelim değerlerine entegre edilir. Böylece mevcut yönelim ve pozisyon bilgisi IMU algılayıcısından elde edilen veriler ile sürekli olarak hesaplanabilir. IMU yüksek frekansta çözüm üretebilmesine rağmen, çalışma doğası gereği sürekli olarak üzerinde hata biriktirir ve böylece sistemin zamanla hatasının da artmasına sebep olur. Bu sebeple seyrüsefer sistemlerinde pozisyon hassasiyetinin artması ve biriken

hataların en küçük seviyeye indirilmesi için ataletsel seyrüsefer sistemleriyle birlikte GNSS de kullanılmaktadır.

GNSS ve IMU sensörlerinden elde edilen veriler sensör füzyonu yöntemleri ile birleştirilerek, daha güvenilir ve kesintisiz bir konum ve hareket izleme sistemi oluşturulmasına olanak tanır. Sensör füzyonu, farklı sensörlerden gelen verilerin bir araya getirilerek her birinin zayıf yönlerinin telafi edilmesini ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. GNSS ve IMU sensörlerinden elde edilen veriler üzerinde EKF (Extended Kalman Filter-Genişletilmiş Kalman Filtre), UKF (Unscented Kalman Filter-Kokusuz Kalman Filtre) ve ECF (Explicit Complementary Filter-Belirgin Tamamlayıcı Filtre) filtre yöntemleri kullanılarak seyrüsefer sistemleri geliştirilmektedir.

EKF, lineer bir sistemde bulunan Gaussian normal dağılım gösteren gürültülü ham verileri kullanarak optimum kestirim sağlayabilmektedir. ECF ise pozisyon tahmini için dönüölçer, ivmeölçer ve manyetometre verilerini birleştirir. Yapılan son çalışmalar incelendiğinde EKF filtreye alternatif olarak UKF adı verilen alternatif bir filtre yaklaşımı üzerinde çalışıldığı görülmüştür. Bu alternatif yöntemde, belirli bir nokta kümesi üzerinde rasgele gauss değişkenlerinin ilerletilmesi kullanılmaktadır. Bu noktalar, doğrusal olmayan bir fonksiyonun dönüşümü için “*unscented (kokusuz)*” dönüşüm adı verilen bir yöntemle ilerletilir. Unscented dönüşüm, fonksiyonları doğrusallaştırmak yerine belirli noktaları kullanır ve bu noktaları doğrusal olmayan fonksiyon üzerinde ilerletir. Bu noktalar, rasgele gauss değişkeni ile eşleşecek şekilde seçilir ve ortalama, kovaryans ve yüksek dereceli momentler gibi özellikler hesaplanır. Yeniden hesaplanan ortalama ve kovaryans, geleneksel fonksiyon doğrusallaştırma yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar verir. Bu yaklaşımın temel amacı, fonksiyonun kendisi yerine olasılık dağılımına yaklaşımdır. Bu strateji, genel olarak hesaplama karmaşıklığını azaltırken daha doğru ve hızlı sonuçlar elde ederek kestirim doğruluğunu artırır.

Bu tez çalışması kapsamında düşük maliyetli GNSS ve IMU sensörleri kullanılarak EKF, UKF ve ECF yöntemleri ile sensör füzyonu gerçekleştirilmiş olup pozisyon kestirimi yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada GNSS ve IMU sensörlerinin genel çalışma prensipleri, yönelim belirleme ve sensör füzyon konusu ele alınmıştır. Çalışmanın özgünlüğü, el tipi karıştırma cihazı kullanarak ve kullanılmayarak gerçekleştirilen iki farklı test senaryosuyla GNSS sinyal karışımının sistem performansına etkilerini incelemektir. İlk senaryoda, GNSS sinyallerine müdahale edilmeden doğal ortamda veri toplanmış; ikinci senaryoda ise el tipi karıştırma cihazı kullanılarak GNSS sinyalleri kasıtlı olarak belirli aralıklarla bozulmuş ve bu durumun sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Verilerin toplanması için düşük maliyete sahip gelişmiş sensörler, bir devre kartında birleştirilmiş olup; GNSS, IMU, manyetometre ve barometrenin bulunduğu bir veri toplama sistemi tasarlanmıştır. Sensörlerden elde edilen ham veriler, testin genel analizinin yapılabilmesi ve kestirim filtrelerinde kullanmak için 100 Hz frekansta SD karta ve aynı zamanda gerçek zamanlı olarak sistem kontrolünün sağlandığı arayüz aracılığıyla .txt formatında bilgisayara kaydedilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sensör füzyonu yönteminin farklı koşullarda GNSS ve IMU sensörlerinin performansını optimize ettiğini ve güvenilirliği artırdığını göstermektedir. Bu bağlamda, çalışmanın sonuçları, gelecekteki konum belirleme ve hareket izleme uygulamaları için önemli bir referans oluşturacaktır. GNSS ve IMU sensörlerinin entegrasyonu, modern seyrüsefer sistemlerinin temel yapı taşlarından biri olup, havacılık ve uzay, denizcilik, otomotiv ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde operasyonel verimliliği ve güvenliği artırmaktadır.



ABSTRACT

DEVELOPMENT OF ARM BASED NAVIGATION SYSTEM USING GNSS AND IMU

Navigation is defined as the process that enables a vehicle or person to travel safely and efficiently towards a specific destination. A navigating vehicle constantly creates new waypoints between its current location and the target location in order to reach its destination. It determines the orientation to reach the next point according to its position between these waypoints. This process continues continuously until it reaches the position it wants to go to. It realizes position and orientation control by estimating its orientation to reach the next point.

Today's rapidly evolving technology has increased the accuracy and reliability requirements of positioning and motion tracking systems. In this context, advanced sensors such as GNSS (Global Navigation Satellite Systems) and IMU (Inertial Measurement Unit) play a critical role in positioning and motion tracking systems with their capacity to provide highly accurate data. GNSS provides position information via satellites around the world, enabling high-precision position determination over a wide area and in open spaces. GNSS receivers are basically systems that output position, velocity and time. However, GNSS signals may be weakened or interrupted due to jamming, or inside buildings, densely wooded areas or between tall buildings in the city. In these cases, IMU sensors come into play. IMU consists of sensors that measure the acceleration and angular velocity of an object. These sensors continuously monitor the movement and orientation of the vehicle or person. The biggest advantage of IMU is that it can work even in confined spaces or in situations where GNSS signals cannot be received. However, the problem of error accumulation of IMU sensors leads to decreasing accuracy over time.

GNSS, IMU and magnetometer systems are also used for orientation determination in aircraft. The data obtained from accelerometer, rotometer and magnetometer sensors are integrated with the previous position and orientation values with certain mathematical equations. Thus, the current orientation and position information can be calculated continuously with the data obtained from the IMU sensor. Although the IMU can produce solutions at high frequency, due to the nature of its operation, it constantly accumulates errors on it, thus causing the error of the system to increase over time. For this reason, GNSS is used together with inertial navigation systems to increase position accuracy and minimize accumulated errors in navigation systems.

Data from GNSS and IMU sensors can be combined with sensor fusion methods to create a more reliable and seamless position and motion tracking system. Sensor fusion allows data from different sensors to be combined to compensate for the weaknesses of each sensor and provide more reliable results. Navigation systems are developed by using EKF (Extended Kalman Filter), UKF (Unscented Kalman Filter) and ECF (Explicit Complementary Filter) filter methods on the data obtained from GNSS and IMU sensors.

EKF can provide optimal estimation using noisy raw data with Gaussian normal distribution in a linear system. ECF combines rotometer, accelerometer and magnetometer data for position estimation. In recent studies, an alternative filter approach called UKF has been studied as an alternative to the ECF filter. In this alternative method, random Gaussian variables are advanced over a set of points. These points are advanced by a method called "*unscented*" transformation for the transformation of a nonlinear function. Instead of linearizing functions, the unscented transformation uses specific points and advances these points over the nonlinear function. These points are chosen to match a random Gaussian variable and features such as mean, covariance and higher-order moments are calculated. The recalculated mean and covariance are more accurate than traditional function linearization methods. The main goal of this approach is to approximate the probability distribution rather than the function itself. This strategy improves estimation accuracy by obtaining more accurate and faster results while reducing computational complexity overall.

In this thesis, low-cost GNSS and IMU sensors are used for sensor fusion and position estimation using EKF, UKF and ECF methods. In this study, the general working principles of GNSS and IMU sensors, orientation determination and sensor fusion are discussed. The novelty of the study is to investigate the effects of GNSS signal mixing on system performance in two different test scenarios with and without the use of a handheld jamming device. In the first scenario, data was collected in a natural environment without interfering with the GNSS signals; in the second scenario, the GNSS signals were intentionally interfered with using a handheld jamming device and the effects of this on the system were analyzed. For data collection, low-cost advanced sensors were combined on a circuit board and a data acquisition system was designed including GNSS, IMU, magnetometer and barometer. The raw data obtained from the sensors were saved to an SD card at a frequency of 100 Hz for general analysis of the test and for use in the prediction filters, and also to a computer in .txt format through the interface where the system is controlled in real time.

The results show that the sensor fusion method optimizes the performance of GNSS and IMU sensors under different conditions and improves reliability. In this context, the results of the study will serve as an important reference for future position determination and motion tracking applications. The integration of GNSS and IMU sensors is one of the fundamental building blocks of modern navigation systems, improving operational efficiency and safety in various industries such as aerospace, maritime, automotive and defense.



SEMBOLLER

η	: Ölçüm Gürültüsü
$\hat{x}_k$	: Durum Vektörü
R_b^g	: Gövde-ENU Dönüşüm Matrisi
R_g^b	: ENU-Gövde Dönüşüm Matrisi
P_k	: Hata Kovaryans Matrisi
P_0	: Deniz Seviyesindeki Basınç (Pa)
Q_k	: Süreç Gürültüsü
X_i	: Sigma noktaları
t_k	: Süreç Gürültüsü
w_i	: Ağırlıklar
$\hat{x}$	: Ortalama
$\hat{x}$	: Bilinmeyen parametrelerin en küçük kareler tahmini vektörü
x_k	: k zaman anındaki durum vektörü
$\Phi_{k+1,k}$	: Durum Geçiş Matrisi
G	: Gauss
S	: Saniye zaman birimi
T	: Tesla
θ	: Dikilme (Eğim-Pitch) Açısı
φ	: Yatış (Yuvarlanma-Roll) Açısı
ψ	: Baş (Sapma-Dönüş-Heading) Açısı
F	: Yay Üzerindeki Kuvvet (Newton, N)
$F(t)$	: Sistem dinamikleri matrisi
$G(t)$	: Sistem gürültü matrisi
H	: Gözlem
I	: Birim Matris
M	: Havanın Molar Kütlesi (kg/mol)
P	: Kovaryans
P	: Yükseklikteki Basınç (Pa)
R	: Gaz Sabiti ($[\frac{J}{mol \cdot K}]$)
T	: Mutlak Sıcaklık (K)

$\mathbf{a}(t)$	: t zamanındaki İvme (m/s^2)
$\mathbf{g}$	: Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
$\mathbf{h}$	: Yükseklik
$\mathbf{k}$	: Yay Sabiti (N/m)
$\mathbf{m}$	: Kütle (kg)
$\mathbf{p}$	: Sigma noktalarının sayısı
$\mathbf{p}(t)$	: t zamanındaki pozisyon
$\mathbf{v}(t)$	: t zamanındaki hız
$\mathbf{w}(t)$	: Kovaryansı $Q(t)$ Olan Süreç Gürültüsü
$\mathbf{x}$	: Yay Gerilimi (metre)
$\mathbf{z}$	: Ölçüm Vektörü
Δt	: Zaman Adımı
α	: Filtre Sabiti
$\theta(t)$	: t zamanındaki Birleşik Aç
$\omega(t)$	: t Zamanındaki Açısal Hız

KISALTMALAR

ARNS	: Havacılık Radyo Navigasyon Hizmeti (Aeronautical Radio Navigation Service)
BPS	: Saniyede Bit Sayısı (Bits Per Second)
BPSK	: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying)
CASC	: Çin Havacılık ve Uzay Bilim ve Teknoloji Kurumu (China Aerospace Science and Technology Corporation)
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
CGCS	: Çin Jeodezik Koordinat Sistemi (Chinese Geodetic Coordinate System)
DMA	: Doğrudan Bellek Erişimi (Direct Memory Access)
DOP	: Hassasiyet Seyrelme Oranı (Dilution of Precision)
ECEF	: Yer Merkezli Yer Sabit (Earth-Centered, Earth-Fixed)
ECF	: Belirgin Tamamlayıcı Filtre (Explicit Complementary Filter)
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtre (Extended Kalman Filter)
ENU	: Doğu Kuzey Yukarı (East North Up)
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
GEO	: Jeostasyonier Dünya Yörüngesi (Geostationary Earth Orbit)
GNSS	: Küresel Konumlandırma Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite Systems)
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Position Systems)
GTRF	: Jeosantrik Yersel Referans Sistemi (Geocentric Terrestrial Reference Frame)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization)
IGSO	: Eğimli Jeosenkron Uydu Yörüngesi (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit)
IMU	: Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
INS	: Ataletsel Navigasyon Sistemi (Inertial Navigation System)
IOV	: Yörüngede Doğrulama Araçları (In-Orbit Verification Tools)
KF	: Kalman Filtre (Kalman Filter)
LKF	: Lineer Kalman Filtre (Linear Kalman Filter)
MEMS	: Mikro Elektromekanik Sistemler (Micro Electro-Mechanical Systems)
MEO	: Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit)
PPS	: Hassas Konumlandırma Hizmeti (Precise Positioning Service)
RF	: Radyo Frekans (Radio Frequency)
RNSS	: Radyo Navigasyon Uydu Hizmetleri (Radio Navigation Satellite Service)
RTK	: Gerçek Zamanlı Kinematik (Real Time Kinematic)
SBAS	: Uydu Tabanlı İyileştirme Sistemleri (Satellite Based Augmentation System)

SPS	: Standart Konumlandırma Hizmeti (Standard Positioning Service)
SUT	: Ölçekli Kokusuz Dönüşüm (Scale Unscented Transform)
TOA	: Varış Zamanı (Time of Arrival)
UKF	: Kokusuz Kalman Filtre (Unscented Kalman Filter)
UT	: Kokusuz Dönüşüm (Unscented Transform)
UTC	: Koordinatlı Evrensel Zaman (Coordinated Universal Time)



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Test Düzeneği.....	4
Şekil 2. GPS Uyduları Takımyıldızı.....	11
Şekil 3. GPS Blok III Uydusu	12
Şekil 4. Galileo Uydusu.....	14
Şekil 5. İyonosfer Etkisi [33].....	17
Şekil 6. GNSS Çok Yollu (Multipath) Hataları.....	19
Şekil 7. IMU Tabanlı Konumlandırma ve Yönelim Hesaplama Süreci	21
Şekil 8. IMU İç Yapısı.....	23
Şekil 9. Farklı Koşullarda Küte ve Yay İvmeölçerleri	24
Şekil 10. Kapasitif İvmeölçer İç Yapısı.....	26
Şekil 11. Dönüölçer	27
Şekil 12. Güncel Dönüölçer Uygulamaları [56]	28
Şekil 13. ENU, ECEF ve LLH Koordinat Sistemi	31
Şekil 14. Sensör Füzyonu	34
Şekil 15. İvmeölçer ve Dönüölçer Verileri ile Pozisyon Tahmini Süreci	35
Şekil 16. İvmeölçer ve Dönüölçer Verileri ile Açık Tahmini Süreci	36
Şekil 17. Kalman Filtre Algoritması.....	45
Şekil 18. LKF ve EKF Algoritması	49
Şekil 19. UKF Algoritması.....	54
Şekil 20. Test Düzeneği Modül Bağlantıları	56
Şekil 21. Kutuların Açık Durumu.....	57
Şekil 22. Kutuların Kapalı Durumu.....	57
Şekil 23. Kontrol ve Sensör Modül Kutusu.....	59
Şekil 24. Navigasyon Modül Kutusunda.....	60

Şekil 25. ZED-F9P Geliştirme Kartı	60
Şekil 26. Hareketli Baz-Gezici Konfigürasyonu	62
Şekil 27. UBLOX ZED F9P Mesaj Konfigürasyonu	62
Şekil 28. Mikroişlemci Pin Atamaları	67
Şekil 29. Mikrodenetleyici Saat Yapılandırması	68
Şekil 30. Akış Diyagramı – I.....	70
Şekil 31. Akış Diyagramı – II.....	72
Şekil 32. Kullanıcı Arayüzü Ana Ekran	73
Şekil 33. Kullanıcı Arayüzü Bağlantı ve Kayıt Ekranı	74
Şekil 34. Barometre Sensör Ekranı.....	74
Şekil 35. IMU Sensör Ekranı.....	75
Şekil 36. Sürek Paket Ekranı	76
Şekil 37. Kontrol ve Sensör Modül Kutusu Üst Kapak Tasarımı	76
Şekil 38. Kontrol ve Sensör Modül Kutusu Alt Kapak Tasarımı	77
Şekil 39. Navigasyon Modül Kutusu Üst Kapak Tasarımı	77
Şekil 40. Navigasyon Modül Kutusu Alt Kapak Tasarımı	77
Şekil 41. Test Güzergahı	78
Şekil 42. Karıştırma Cihazı	79
Şekil 43. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 1 (Normal Şartlar Altında).....	82
Şekil 44. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 2 (Normal Şartlar Altında).....	82
Şekil 45. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 3 (Normal Şartlar Altında).....	83
Şekil 46. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 4 (Normal Şartlar Altında).....	83
Şekil 47. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 5 (Normal Şartlar Altında).....	83
Şekil 48. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 1 (Karıştırma Etkisi Altında)	84
Şekil 49. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 2 (Karıştırma Etkisi Altında)	85

Şekil 50. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 3 (Karıştırma Etkisi Altında)	85
Şekil 51. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 4 (Karıştırma Etkisi Altında)	86
Şekil 52. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 5 (Karıştırma Etkisi Altında)	86
Şekil 53. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 6 (Karıştırma Etkisi Altında)	86
Şekil 54. Test – 1 DOP Değerleri (Normal Şartlar Altında)	89
Şekil 55. Test – 2 DOP Değerleri (Karıştırma Etkisi Altında)	89
Şekil 56. Test – 1 Sigma Değerleri (Normal Şartlar Altında)	90
Şekil 57. Test – 2 Sigma Değerleri (Karıştırma Etkisi Altında)	91
Şekil 58. Test – 1 Yönelim Açısı (Normal Şartlar Altında)	92
Şekil 59. Test – 2 Yönelim Açısı (Karıştırma Etkisi Altında)	92
Şekil 60. Test – 1 Euler Açılırları (Normal Şartlar Altında)	93
Şekil 61. Test – 2 Euler Açılırları (Karıştırma Etkisi Altında)	94

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. GNSS ve IMU Sistemlerinin Karşılaştırılması	2
Tablo 2. GNSS Frekans Bantları	9
Tablo 3. GNSS Sistemlerinin Temel Özellikleri	10
Tablo 4. GNSS Mesaj Konfigürasyonu ve Kullanım Amaçları	63
Tablo 5. IMU Sensöründen Alınan Veriler	64
Tablo 6. Sürek Paket.....	65
Tablo 7. Test Güzergahı	78
Tablo 8. Test – 1 Başarım Durumu (Normal Şartlar Altında).....	87
Tablo 9. Test – 2 Başarım Durumu (Karıştırma Etkisi Altında)	87

1. GİRİŞ

Bir noktadan, başka bir noktaya gitmek amacıyla yapılan yönelim ve konum tayini seyrüsefer olarak bilinmektedir. Seyrüsefer, hareketlerin hem planlanmasını hem de yürütülmesini içerir [1]. Yıllar boyunca, yönelim ve pozisyon belirleme gereksinimi nedeniyle çeşitli yöntemlerle bir dizi alet ve sistem geliştirilmiştir. Günümüzde GNSS sistemleri, kullanıcılara uydu tabanlı navigasyon sağlayarak mutlak konum doğruluğu sunmaktadır. Ancak, bu sinyallerin kesildiği veya bozulduğu durumlarda, konum bilgisi alınamamaktadır. Bu sebeple GNSS tarafından sağlanan herhangi bir konum bilgisi olmadan pozisyon saptama, kapalı alanda konum bulma gibi güncel konular ortaya çıkmıştır [2, 3]. GNSS sinyallerinin kaybolduğu durumlarda ise IMU benzeri sistemler ile kısa süreli pozisyon tahminleri gerçekleştirilebilmektedir.

Karıştırma sinyalleri, GNSS sistemlerinin işleyişini engellemek amacıyla üretilen elektromanyetik sinyallerdir. Bu sinyaller, GNSS alıcılarının uydu sinyallerini doğru bir şekilde almasını ve işlemesini zorlaştırarak veya tamamen engelleyerek sistemi kullanılamaz hale getirmeyi amaçlar. Karıştırma cihazları, sivil ve askeri uygulamalarda güvenlik tehditleri oluşturabilir ve kritik operasyonların güvenilirliğini ciddi şekilde tehlikeye atabilir.

Yüksek doğrulukta ve güvenilir veri elde etmek amacıyla çeşitli sensörlerin birlikte kullanılması, sistemin performansını artırmaktadır. Bu bağlamda, GNSS, IMU, manyetometre ve barometre gibi sensörler, birbirlerinin zayıf yönlerini telafi ederek daha hassas ve kesintisiz sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar. GNSS, dünya etrafındaki uydular aracılığıyla konum bilgisi sağlayan sistemdir. GPS (Amerika Birleşik Devletleri), GLONASS (Rusya), Galileo (Avrupa Birliği) ve BeiDou (Çin) gibi çeşitli GNSS sistemleri, geniş alanlarda yüksek doğrulukta konum bilgisi sunar. Bu sistemler, açık alanlarda metre altı doğrulukta konum belirleyebilir. GNSS alıcılarının bulunduğu ortamda karıştırma sinyalinin olması, alıcıların şehir içindeki yüksek binaların arasında veya kapalı konumlarda bulunması sinyal kayıplarının yaşanmasına sebep olabilir.

IMU, GNSS sinyal kayıpları yaşandığı durumlarda yüksek frekansta sürekli veri sağlayabilir. Fakat sadece IMU sensöründen elde edilen veriler ile pozisyon hesaplanmak istendiğinde uzun süreli kullanımlarda hata birikeceği için doğruluk kaybı yaşanmaktadır. Manyetometreler, Dünya'nın manyetik alanını ölçerek yön belirlemeye yardımcı olur. Manyetometre, GNSS ve IMU tarafından elde edilen verileri destekleyerek daha kesin bir yön tayini yapılmasına olanak sağlar. Barometreler ise atmosfer basıncını ölçerek yükseklik bilgisi sunar. Özellikle hava

taşımacılığı ve yüksek hassasiyet gerektiren diğer uygulamalarda, barometre verileri kritik öneme sahiptir. Bir sistemde bulunan sensörlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Sensör füzyon yöntemleri ile bu sensörlerden elde edilen veriler birleştirilerek daha güvenilir sonuçlar elde edilir. GNSS ve IMU sistemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırması Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. GNSS ve IMU Sistemlerinin Karşılaştırılması

Özellik	IMU	GNSS
Sürekli Veri Sağlama	Sürekli veri sağlar.	Sinyal kesintisi durumunda veri kaybı yaşanabilir.
Doğruluk	Kısa sürede yüksek doğruluk sağlar. Uzun sürede birikimli hata oluşur.	Uzun süreli yüksek doğruluk sağlar. Kısa sürede sinyal gecikmesi yaşanabilir.
Çalışma Ortamı	Her ortamda çalışabilir (kapalı alanlar, tüneller, vb.)	Açık alanlarda yüksek performans gösterir. Kapalı alanlarda sinyal kaybı yaşar.
Örnekleme Hızı	Yüksek (100 Hz – 1000 Hz)	Düşük (5 Hz – 20 Hz)
Gürültü ve Titreşim Hassasiyeti	Gürültü ve titreşimlerden etkilenebilir.	Dış parazitlere karşı duyarlıdır. Karıştırma sinyalleri etkisinde kalabilir.
Tepki Süresi	Yüksek frekanslı veri topladığı için anlık hareket değişikliklerine hızlı tepki sağlar.	Çalışma frekansının düşük olması sebebiyle anlık hareketlere tepki vermeyebilir.
Birikimli Hata	Zamanla hata biriktirir ve doğruluğu azalır. Dışarıdan bir kaynak tarafından doğrulanması gerekir.	Birikimli hata problemi yoktur. Zamanla doğruluğunu korur.
Kalibrasyon Gereksinimi	Düzenli olarak kalibre edilmesi gerekir.	Kalibrasyon gerektirmez.
Zaman ve Konum Bilgisi	Zaman bilgisi sağlamaz, yalnızca hareket ve yön verisi sağlar.	Kesin zaman ve konum bilgisi sağlar.
Başlangıç Konum İhtiyacı	Evet	Hayır

Sensör füzyonu, farklı sensörlerden gelen verilerin bir araya getirilerek daha güvenilir ve doğru sonuçların elde edilme sürecidir. Sensör füzyonu teknikleri, her sensörün güçlü yönlerini kullanarak zayıf yönlerini telafi etmeyi amaçlar. Bu çalışmada, sensör füzyonunda yaygın

olarak kullanılan üç ana filtreleme yöntemi olan EKF, UKF ve ECF filtre yöntemleri üzerinde durulmuştur.

EKF, doğrusal olmayan sistemlerdeki durumu tahmin etmek için kullanılan bir KF'dir (Kalman Filter-Kalman Filtre). Temel KF yalnızca doğrusal sistemler için uygunken, EKF doğrusal olmayan sistemler için uyarlanmıştır. EKF, sistem dinamiklerini ve ölçüm modellerini doğrusal hale getirmek için birinci dereceden Taylor serisi genişlemesi kullanır. GNSS ve IMU verilerini birleştirerek doğrusal olmayan hareket modellerini izlemek için sıklıkla kullanılır. UKF, doğrusal olmayan sistemlerdeki durumu tahmin etmek için kokusuz dönüşüm tabanlı bir filtredir. UKF, doğrusal olmayan dönüşümlerin etkilerini daha doğru şekilde modellemek için sigma noktaları kullanır. UKF, EKF'ye göre daha yüksek doğruluk ve kararlılık sağlar. ECF ise genellikle IMU verilerinin işlenmesinde kullanılan basit ve etkili bir sensör füzyon yöntemidir. Bu filtre, yüksek frekansta gürültüye duyarlı olan ivmeölçer verilerini ve düşük frekansta birikimli hata sorunu yaşayan dönüölçer verilerini birleştirerek, daha güvenilir ve doğru bir oryantasyon (dönme açısı) bilgisi elde etmeyi amaçlar. Tamamlayıcı filtre, bu iki sensörün verilerini belirli frekans bantlarında ağırlıklandırarak birleştirir ve her iki sensörün de avantajlarından yararlanır.

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan sistemde ARM Cortex M4 tabanlı 32 bit işlemcili bir mikroişlemci, iki adet UBLOX ZED-F9P GNSS alıcısı, BNO055 IMU ve manyetometre sensörü ayrıca irtifa hesaplanabilmesi için BMP388 barometrik basınç sensörü kullanılmıştır. Yazılımlar C programlama dili kullanılarak geliştirilmiş olup; sistem kontrolünün sağlanması ve hata durumlarının gözlemlenebilmesi için C# kullanılarak bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Test süresince toplanan veriler mikroişlemciden seri haberleşme ile bilgisayara aktararak gerçek zamanlı olarak .txt formatında kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler MATLAB'de geliştirilen yazılımlar ile analiz edilmiş ve pozisyon kestirimleri yapılmıştır. Sistem tasarımında SolidWorks programı kullanılarak iki adet kutu tasarlanmış ve 3D yazıcıdan çıktı alınmıştır. Bu kutulardan bir tanesinde mikroişlemci, IMU, manyetometre, barometre, SD kart modülü ve bilgisayar ile haberleşmek için kullanılan seri haberleşme modülü bulunurken diğer kutuda iki adet GNSS alıcısı konumlandırılmıştır. GNSS alıcıları 5 Hz frekansta çözüm ürettikleri pozisyon ve zaman verilerini mikroişlemciye göndermiştir.

İki adet GNSS kullanılarak, GNSS tabanlı sistemlerde yüksek doğrulukta konum belirleme ve relatif pozisyonlama amacıyla kullanılan hareketli baz-gezici konfigürasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu konfigürasyon ile GNSS tabanlı yönelim değeri elde edilmiştir. Elde

edilen yönelim değeri ile manyetometre verileri ile desteklenmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan test düzeneği Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Test Düzeneği

1.1. Literatür Araştırması

İnsansız hava araçlarında pozisyonun minimum hata ile elde edilebilmesi için GNSS, IMU, manyetometre, radar, barometre, pitot alfa beta, odometre gibi birçok farklı sensör kullanılmaktadır. Bu sensörlerden elde edilen verilerin farklı filtre yöntemleri ile işlenmesi sonucunda pozisyon kestirimi yapılmaktadır. Genellikle seyrüsefer amaçlı kullanılan algılayıcıların entegrasyonlarında, GNSS kullanılarak pozisyon düzeltmeleri üzerinde yoğunlaşmaktadır [4]. Yönelim tahmininde ortaya çıkacak hatalar, konumun yanlış hesaplanmasına sebep olacağından, karıştırma altında konum tayini yapmadan önce yönelim değerinin doğru bulunması sistemin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için çok önemlidir. Bu sebeple algılayıcı birimlerinin seçimleri, algılayıcılardan verilerin doğru bir şekilde toplanması, algılayıcıların kalibrasyonları ve yönelim kestiriminin mutlak doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir [5].

IMU, konum hesaplaması için sürekli olarak üç yönlü açısal hızlanma, ivmelenme ve dönüklükleri ölçen bir sensördür. IMU sensörünün sistem üzerindeki ana avantajı, aracın hız

ve konum bilgilerinin dinamik olarak sağlanması ve sensör verilerinin hızlı bir şekilde güncellenmesinden dolayı kısa sürede yüksek performans elde edilmesidir. Ancak, ivmeölçer hataları zamanla birikerek artar. Ayrıca, IMU kullanımının dezavantajları arasında, yatay platformun düzeltme hatası gibi dönüklük hatalarından kaynaklanan dönüölçer hataları bulunmaktadır. Her iki hata da zamanla artan bir fonksiyon olarak ortaya çıktığı için, IMU verileri kullanılarak elde edilen pozisyon çözümü, GNSS gibi harici sistemler kullanılarak düzeltilmemesi durumunda sadece kısa bir süre doğru sonuçlar sağlar [4].

KF, lineer bir sistemdeki gürültülü veriler üzerinde optimal tahminler sağlayan ve gerçek zamanlı olarak bu tahminleri yapabilen bir filtreleme yöntemidir. Bu filtre, gauss normal dağılımı gösteren verileri kullanarak sistem durumunu tahmin eder. [6]. Kalman filtresinin diğer pozisyon kestirimi ya da sensör füzyonu yöntemlerine göre en büyük avantajı gerçek zamanlı sistemlerde kararlı sonuçlar verebilmesidir. [7].

ECF, oryantasyon tahmini için ivmeölçer ve dönüölçer verilerini birleştirir. İvmeölçerler ani darbelere ve ivmelenme değerlerine karşı hassas olmasına rağmen, önyargı (bias) değerleri düşüktür. Bu nedenle, kısa ölçüm aralıklarında fazla hata yapabilirler, ancak uzun süreli ölçümlerde daha kararlı olurlar. Diğer yandan, dönüölçer sensörlerinin önyargı değerleri yüksektir. Dönüölçer çıkışından açı değeri almak için sensörden elde edilen verilerin zamanla integrali alınır. Bu işlem sonucunda uzun süreli ölçümlerde birikimli hatalara (kayma) neden olur. ECF uygulamalarında, ivmeölçer çıkışına alçak geçiren filtre ve dönüölçer çıkışına yüksek geçiren filtre uygulanır, ardından bu veriler toplanır. [8, 9].

Kokusuz dönüşüm yöntemi ilk olarak Julier, Uhlmann ve Durrant- Wyte tarafından tanıtılmıştır [10, 11]. Julier, Uhlmann ve Durrant-Wyte tarafından, bu yöntemde N boyutlu bir gauss değişkeninin sigma noktalarını $2N+1$ örnek ile ifade edilmiştir. Bu sigma noktalarını belirlerken, sağladıkları gauss dağılımının aynı kovaryansa sahip olması için karekök matrisi ve kovaryans tanımlarından yararlanmışlardır. Noktaların simetrik bir şekilde seçilmesi, çarpıklığı önlemiştir. Bu yöntemle yaklaşım hatası düşük tutulmuştur. Ancak dördüncü ve daha yüksek momentlerden kaynaklanan hatalar mevcut olabilmektedir. Bu yapılan çalışmaların KF’de kullanımı Julier ve Uhlmann tarafından UKF formunda ortaya koyulmuştur [12]. Bu filtre, [13] no’lu makalede detaylı olarak analiz edilmiştir.

1.2. Özgün Değer

Literatür araştırması sonucunda gerçekleştirilen çalışmalarda tek bir filtre yöntemi üzerinde durulduğu gözlemlenmiş olup genel olarak GNSS ve IMU birleşimi sistemlerde EKF filtresi kullanılarak pozisyon çözümü yapıldığı görülmüştür. Karıştırma altında GNSS ünitesinden elde edilecek ham veriler bozulacağından dolayı bu yöntem ile elde edilen veriler doğrudan kullanılarak pozisyon çözümü gerçekleştirilemeyecektir. Bu çalışmada günümüzde birçok sistemde yaygın olarak kullanılmakta olan EKF filtreye ilave olarak UKF filtre ile de pozisyon çözümü gerçekleştirilerek iki filtrenin birbirlerine göre performansları karşılaştırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda baş açısı değerinin genel olarak manyetometre tarafından elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu tezde UBLOX tarafından geliştirilen mevcut durumda en güncel ve fonksiyonel ZED F9P alıcısı kullanılmış olup bu alıcılardan yönelim değeri elde edilerek kestirim algoritmalarında kullanılmıştır. Kullanılan GNSS alıcısı GPS, GALILEO, BEIDOU, GLONASS ve QZSS uydu sistemlerini desteklemekte ve karıştırma altında karıştırma olduğunu kullanıcıya bildirmektedir. Aynı zamanda verilerin toplanması için gelişmiş bir veri toplama sistemi tasarlanmıştır.

1.3. Tezin Amacı

Bu çalışmasının amacı; düşük maliyetli, yeni nesil teknolojik sensörler kullanarak gelişmiş filtre yöntemleri ile insansız hava araçlarında kullanılabilecek yönelim ve pozisyon değerlerinin bulunmasıdır. Bu çalışmanın başlıca dört hedefi bulunmaktadır:

- Bir veri toplama sistemi tasarlanması. Gerekli yazılım ve donanım geliştirmelerinin yapılarak sistemin çalıştırılması.
- Seyrüsefer sisteminin tanımının gerçekleştirilmesi. GNSS, IMU, manyetometre ve barometre sensörlerinin çalışma prensipleri ve matematiksel hesaplamaları hakkında bilgi verilmesi.
- Sensör füzyonu hakkında bilgi verilmesi. Tasarlanan test düzeneğinden elde edilen verileri kullanarak EKF, UKF ve ECF filtreleri ile pozisyon çözümü gerçekleştirilmesi. Filtrelerin performans karşılaştırılmalarının yapılması.
- Karıştırmanın GNSS üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi.

2. MATERİYAL ve YÖNTEM

2.1. Algılayıcılar

Bu bölümde, tez çalışmasının geliştirme aşamasında kullanılan sensörlerin temel tanımları hakkında bilgiler verilecek olup, sensörlerin nasıl çalıştığı, hangi parametreleri ölçtüğü ve bu verilerin nasıl işlendiğini daha iyi anlamak için bir temel oluşturulacaktır.

GNSS, dünya genelinde konum, hız ve zaman bilgisi sağlayan uydu tabanlı bir navigasyon sistemidir. Bu sistem, birçok uyduya yerleştirilmiş hassas saatler aracılığıyla sinyaller gönderir ve alıcı cihazların bu sinyalleri kullanarak kendi konumlarını belirlemesine yardımcı olur. GNSS yüksek doğrulukta pozisyon çözümü gerçekleştirir. Günümüzde denizcilik, arazi navigasyonu, araç takibi, askeri uygulamalar ve acil durum hizmetleri gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

İvmeölçer, dönüölçer, manyetometre ve barometre gibi çeşitli sensörler mevcut durumda taşıt izleme, konumlandırma, hız, irtifa ve yönelim belirleme gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. İvmeölçer, bir nesnenin ivmesini ölçerken, dönüölçer bir nesnenin açısal hızını ölçer. Manyetometreler ise manyetik alanın hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan, nesnelerin veya araçların yönelimini belirlemek için kullanılan bir sensördür. Manyetometre navigasyon sistemlerinde, kuzey yönünün tespitinde önemli bir rol oynar.

Ataletsel navigasyon, bulunduğu sistemin ivme verilerini kullanarak hız ve konum bilgilerini hesaplamak amacıyla entegre eder. Başlangıç pozisyonu bilinmesi halinde, dışarıdan herhangi bir sinyal almaya gerek kalmadan IMU sensöründen elde edilen veriler ile bir dizi hesap sonucunda sistemin yeni pozisyon, hız ve yönelim değerleri hesaplanabilir. [14]. IMU, yüksek frekansta çalışıp pozisyon çözümünü GNSS sistemine göre daha sık olarak gerçekleştirirken gürültü kaynaklı zamanla hata biriktirir. Sistemin çalışma süresi arttıkça hesaplanan pozisyonda ise kaymalar meydana gelir. Bu sebeple ataletsel navigasyon sistemlerinin GNSS gibi doğruluğundan emin olunan bir sistem ile birlikte kullanılması sistemin daha doğru pozisyon çözümü gerçekleştirmesi için gereklidir.

IMU yüksek frekansta pozisyon çözümü yapabilir fakat çözüm ürettiği pozisyon zamanla hata biriktirerek kayma meydana getirir. Ayrıca sistemin çalışması için bir başlangıç pozisyonuna ihtiyaç duyar. GNSS ise düşük frekansta çalışıp yüksek doğrulukta pozisyon çözümü üretebilirlerken karıştırma altında pozisyon çözümü üretemez ve spoofing (aldatma) etkisinden

dolayı sistemi olduğu yerden farklı bir yere taşıyabilir. İki sistemin hibrit olarak kullanılması ile doğruluğu daha yüksek bir pozisyon çözümü gerçekleştirilebilir.

2.1.1 Küresel Konumlandırma Uydu Sistemi

GNSS sistemleri “bir veya daha fazla uydu takımı yıldızını içeren dünya çapında konum ve zaman belirleme sistemi” olarak resmi olarak tanımlanır [15]. GNSS, bir dizi uydu tarafından gönderilen sinyallerin alınması ve bu sinyallerin bir alıcı tarafından işlenmesiyle çalışır. Bu sinyaller, aracın bulunduğu konumu ve zamanı belirlemek için kullanılır. GNSS, birden fazla uydu üzerinden gelen sinyalleri alarak, aracın konumunu üç boyutlu bir koordinat sistemi içinde belirler. Günümüzde GNSS sistemleri, cep telefonları, araç navigasyon sistemleri, denizcilik, havacılık, askeri araçlar, jeodezi, coğrafi bilgi sistemleri ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. GNSS sistemlerinin temel prensibi, bir alıcının uydulardan gönderilen sinyalleri alması ve bu sinyallerin zaman ve konum bilgisini kullanarak alıcının bulunduğu konumu belirlemesidir.

GNSS, insansız otonom araçların dünya üzerindeki konumunu belirlemek için kullanılan temel teknolojilerden biridir. Bu araçlar, GNSS uydu sinyallerini uçuş veya görev kontrol sistemlerinde, istenilen rotanın takip edilmesi ve konumlarının belirlenmesi amacıyla kullanır. GNSS tarafından sağlanan hassas konum bilgileri, araçların güvenli bir şekilde seyir yapmasına ve hedeflenen bölgelere hassas bir şekilde ulaşmasına olanak tanır. Bu teknoloji, uçaklar ve otomobiller gibi araçların hava sahasında diğer araçlarla çarpışma riskini azaltmak için konumlarını izlemelerine yardımcı olur, böylece uçuş güvenliğini artırır.

Şu an dört ana GNSS sistemi bulunmaktadır: GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou. Bu dört ana GNSS sistemi, küresel ölçekte navigasyon ve konumlandırma hizmeti sunmaktadır. Bunların yanı sıra, bölgesel ve geniş alan kapsama sağlayan iki uydu sistemi daha vardır: QZSS (Japonya), NavIC (Hindistan). Mevcut GNSS sistemlerinin sinyal adları ve yayın frekansları Tablo 2 ile gösterilmiştir. GNSS sistemlerinin çeşitliliği, kullanıcıların farklı ihtiyaç ve gereksinimlerine göre seçenek sunar ve küresel navigasyon altyapısının çeşitliliğini artırır [16].

Tablo 2. GNSS Frekans Bantları

GNSS Sistemi	Sinyal Adı	Yayın Frekansı (MHz)
GPS	L1 C/A	1575.42
	L1C	1575.42
	L2 C	1227.6
	L2 P	1227.6
	L5	1176.45
GLONASS	L1 C/A	1598.0625-1609.3125
	L2 C	1242.9375-1251.6875
	L2 P	1242.9375-1251.6875
	L3 OC	1202.025
Galileo	E1	1575.42
	E5a	1176.45
	E5b	1207.14
	E5 AltBOC	1191.795
	E6	1278.75
BeiDou	B1I	1561.098
	B2I	1207.14
	B3I	1268.52
	B1C	1575.42
	B2a	1176.45
	B2b	1207.14
NAVIC	L5	1176.45
SBAS	L1	1575.42
	L5	1176.45
QZSS	L1 C/A	1575.42
	L1 C	1575.42
	L5	1176.45
	L6	1278.75

Bütün uydu sistemleri sürekli olarak radyo sinyalleri yayar. Bu sinyaller, her uydunun kimliğini, yayın saatini ve yörünge bilgilerini içerir. GNSS alıcı cihazları bu sinyalleri alır ve en az dört farklı uydu sinyalini aldığı anda, kendi konumunu (enlem, boylam ve yükseklik) ve hareket hızını hesaplayabilir. Her uydudan gelen sinyal, yayınlanma zamanına göre işaretlenir. Kullanıcı cihazı bu sinyallerin her birinin geliş süresini ölçer. GNSS alıcısı ışık hızındaki radyo sinyallerinin kat ettiği mesafeyi hesaplar ve her bir uyduya olan mesafeyi belirler. Üç boyutlu

bir konum hesaplaması için en az dört uyduya ait mesafenin bilinmesi gerekmektedir. GNSS alıcısı, dört veya daha fazla uydudan gelen sinyalleri kullanarak, pseudorange yöntemi ile kesin konumunu hesaplar. Pseudorange, uydudan yayınlanan sinyalin uydudan çıkış anı ile alıcıya ulaştığı ana kadar arada geçen zamanın ışık hızı ile ölçeklendirilmesiyle elde edilen uydu-alıcı mesafesinin hesaplandığı, gerçek mesafeden farklı olarak, çeşitli hata kaynaklarından etkilenmiş bir ölçümdür. GNSS sistemlerine ait temel özelliklerin bulunduğu bilgiler Tablo 3 ile gösterilmiştir.

Tablo 3. GNSS Sistemlerinin Temel Özellikleri

Parametre	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Ülke	ABD	Rusya	Avrupa	Çin
Uydu sayısı	32	24	30	35
Yörünge yarıçapı (km)	26508	29601	23222	21528
Eğim	55°	64,8°	56°	55°
Yörünge periyodu	11s 58dk	11s 16dk	14s 05dk	12s 53dk
Sinyal ayırma tekniği	CDMA	FDMA	CDMA	BPSK
Sinyal frekansı (MHz)	L1:1575.42, L2:1227.60, L3:1382.00, L5:1176.45,	G1:1602, G2:1246, G3:1202	E1:1575.42, E5a: 1176.45, E5b: 1207.14, E6:1278.75	B1:1561.098, B2:1207.14, B3:1268.52
Koordinat sistemi	WGS-84	PZ-90	GTRF	CGCS
Zaman ölçeği	GPS Zamanı	GLONASS Zamanı	GST	BDT Zamanı
Yeryüzünden yükseklik (m)	20200	19130	23222	21528

2.1.1.1 GPS Uydu Sistemi

Günümüzde GPS uydu sistemi, 1960'larda belirlenen optimum konumlandırma sistemi kriterlerini tamamen karşılayarak faaliyettedir. Sistem, uygun alıcı ekipmanlarla kullanıcılara doğru, sürekli ve dünya çapında üç boyutlu konum ve hız bilgisi sağlamaktadır. GPS ayrıca UTC (Coordinated Universal Time-Koordinatlı Evrensel Zaman) yayını yapmaktadır. GPS

uydu takımyıldızı, 6 yörünge düzleminde her biri 4 uydu olacak şekilde düzenlenmiş 24 uydudan oluşur. Uyduların dünya etrafındaki takımyıldızı Şekil 2’de gösterilmiştir. Dünya çapında bir yer kontrol ve izleme ağı, uyduların sağlık ve durumunu izleyerek navigasyon ve diğer verileri uydulara iletir [17].



Şekil 2. GPS Uyduları Takımyıldızı

GPS, kullanıcı alıcılarının pasif çalışması nedeniyle sınırsız sayıda kullanıcıya hizmet verebilir. Sistem, tek yönlü TOA (Time of Arrival-Variş Zamanı) ölçümü kavramını kullanır. Uydu iletileri, son derece doğru atomik frekans standartları ile senkronize edilmiştir ve bu standartlar GPS zaman tabanını referans alır. Uydular, CDMA (Code Division Multiple Access-Kod Bölmeli Çoklu Erişim) tekniği ile üç frekansta menzil kodları ve navigasyon verilerini yayar; bu frekanslar L1 (1.575.42 MHz), L2 (1.227.6 MHz) ve L5 (1176.45MHz) olarak adlandırılır. Her uydu bu frekanslarda, diğer uyduların kullandığı kodlardan farklı menzil kodları ile yayın yapar. Bu kodlar, düşük çapraz korelasyon özelliklerine sahip oldukları için seçilmiştir. Her uydu, kısa bir kaba edinim veya C/A kodu ve uzun bir hassasiyet veya P(Y) kodu üretir.

Navigasyon verileri, alıcının sinyal iletim zamanı sırasında uydunun konumunu belirlemesini sağlar; menzil kodu ise kullanıcının alıcısının sinyalin iletim zamanını belirleyerek uydu-alıcı mesafesini hesaplamasına olanak tanır. Bu teknik, alıcının da bir saat bilgisi içermesini gerektirir. Alıcının üç boyutlu konumunu ölçmek için dört farklı uyduya ait TOA menzil ölçümleri gereklidir [18]. Navigasyon alıcılarında genellikle maliyet, karmaşıklık ve boyutu en aza indirmek amacıyla kristal saatler kullanılmaktadır. Kullanıcının enlem, boylam, yükseklik ve alıcı saat kaymasını belirlemek için GNSS alıcısı dört ölçüme ihtiyaç duymaktadır.

GPS, çift kullanımlı bir sistemdir. Sivil ve askeri kullanıcılar için ayrı hizmetler sağlar. Bu hizmetler SPS (Standard Positioning Service-Standart Konumlandırma Hizmeti) ve PPS

(Precise Positioning Service-Hassas Konumlandırma Hizmeti) olarak adlandırılır. SPS, sivil topluluk için tasarlanmışken, PPS ABD yetkili askeri ve belirli devlet kurumları kullanıcıları için tasarlanmıştır.

Ocak 1999'da ABD hükümeti yeni GPS uydularına eklenmek üzere iki sivil sinyalin eklenmesini içeren bir GPS modernizasyon girişimi duyurmuştur. Bu sinyaller L2C ve L5 olarak adlandırılmıştır. L2C sinyali, L2 frekansındaki yaşam güvenliği dışındaki uygulamalar için tasarlanırken L5 yaşam güvenliği uygulamaları için tasarlanmıştır. L5 sinyali bir ARNS (Aeronautical Radio Navigation Services-Havacılık Radyo Navigasyon Hizmeti) bandında ve 1.176,45 MHz'de yer almaktadır. Bu ek sinyaller, iyonosferik gecikmeleri çift frekanslı ölçümler yaparak düzeltme yeteneği sağlayıp sivil kullanıcı doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Üç sinyalin (L1 C/A, L2C ve L5) taşıyıcı fazı ve diferansiyel işleme teknikleri kullanılarak çok yüksek doğruluk (milimetre mertebesinde) hızlı bir şekilde elde edilebilir.

GPS, 17 Temmuz 1995'te tam operasyonel yeteneğe ulaşarak orijinal tasarım hedeflerini tamamlamıştır. Teknolojideki ilerlemeler ve mevcut sistem üzerindeki yeni talepler, GPS sisteminin modernizasyon ihtiyacına yol açmıştır. 2000 yılında ABD Kongresi, GPS III olarak adlandırılan yeni bir sistem üzerinde çalışmaya başlamıştır. [19] GPS blok III uydusu Şekil 3 ile gösterilmiştir.



Şekil 3. GPS Blok III Uydusu

GPS III serisi uydular, sistemin doğruluğunu artıran ve daha güvenilir sinyaller sunan yeni teknolojilerle donatılmıştır. 2023 yılı itibarıyla, altı adet GPS III uydusu başarıyla fırlatılmış olup, toplamda 10 GPS III uydusunun tamamlanması beklenmektedir. Bu uydular, 1 ila 3 metre aralığında doğruluk sağlamaktadır [20]. Vespucci takma adı verilen uzay aracı, Aralık 2018'de fırlatılan ilk GPS III uydusudur. Küresel Uluslararası GNSS Hizmet ağına ait birçok alıcı, Ocak-Temmuz 2019 tarihleri arasında bu yeni nesil GPS uzay aracının sinyallerini izleyerek

gözlemlerde bulunmuştur. Bu veri seti, yayınlanan ephemeris performansı ve saat kararlılığı, güneş radyasyon basıncı ve uydu anten faz merkezi modellerinin analizi için temel oluşturmuştur.

2.1.1.2 GLONASS Uydu Sistemi

GLONASS, Rusya tarafından geliştirilmiş günümüzde birçok alıcı tarafından kullanılan bir küresel uydu navigasyon sistemidir. 1976'da Sovyetler Birliği tarafından başlatılan bu proje, günümüzde Rusya Savunma Bakanlığı tarafından yönetilmektedir. GLONASS uydularının ilk modelleri Ekim 1982'de yörüngeye yerleştirilmiş ve 1982-1985 yılları arasında toplam 18 uydu fırlatılmıştır. Bu prototip uydulara Blok-I adı verilmiştir [21]. GLONASS, dünya genelinde konum, hız ve zaman bilgisi sağlayan ABD'nin GPS sistemi ile benzerlikler taşıyan bir sistemdir.

GLONASS, diğer uydu sistemlerine benzer şekilde üç ana bileşenden oluşmaktadır: uzay segmenti, yer segmenti ve kullanıcı segmenti. Uzay segmenti, toplamda 24 uydudan oluşan bir uydu ağı içerir. Bu uydular, yaklaşık 19.130 km yükseklikte bulunmaktadır. Her bir uydu Dünya çevresinde dairesel yörüngelerde hareket ederek yaklaşık 11 saat 16 dakikada bir tam tur atar. Bu yapı, Dünya üzerindeki herhangi bir noktada her an en az 5-8 uydunun görünür olmasını sağlar. Yer segmenti, sistemin izlenmesi, yönetimi ve kontrolünden sorumlu birimlerden oluşur. Bu birimler arasında yer kontrol istasyonları, izleme istasyonları ve telemetri, takip ve komuta merkezleri bulunur. Bu merkezler, Sistem Kontrol Merkezi, GPS'in Ana Kontrol Merkezi'ne eşdeğer olup, tüm sistemi koordine ve yönetir. Merkezi eşleştirici, standart zaman sinyallerini şekillendirir ve bunları Faz Kontrol Sistemi'ne iletir.

Yer İzleme İstasyonları, her uydunun yörüngesel hareketlerini ölçer ve gerekli bilgileri uyduya yükler. Uyduların uzaklıkları radarlarla 2-5 m hassasiyetle ölçülür. Bu değerler Lazer İzleme İstasyonlarındaki ölçümlerle periyodik olarak kalibre edilir. Faz Kontrol Sistemi, uydudan gelen sinyalleri kumanda eder ve alınan sinyalleri, yüksek kararlılık frekans standardından alınan referans sinyali ile karşılaştırarak yaklaşık uzaklık hesaplar [22]. Rusya'da mevcut yirmi adet Lazer Kontrol İstasyonu dünya koordinat sistemini, gravitasyonel alan modellerini tanımlamak ve uyduların uzaklıklarını 1,5-1,8 cm hassasiyetle ölçmek için kullanılır [23].

Ana kontrol merkezi, Moskova yakınlarındaki Krasnoznamensk'te yer alır ve uydulardan gelen verileri toplar, analiz eder ve gerekli düzeltmeleri yaparak uydulara komutlar gönderir. Kullanıcı segmenti ise GLONASS sinyallerini alıp işleyebilen çeşitli cihaz ve alıcıları içerir.

Bu cihazlar, sivil ve askeri uygulamalar için geniş bir yelpazede kullanılabilir ve GPS uyumlu çoğu cihaz, GLONASS uydu sinyallerini de alabilir, böylece konumlandırma doğruluğunu artırır.

GLONASS sisteminin yüksek hassasiyet, özellikle GPS ile kullanıldığında konum doğruluğunun artması, çift frekans kullanımı ile sinyal karışıklığının ve atmosferik bozulmaların azaltılması ve dünya genelinde sürekli ve güvenilir kapsama alanı sunması gibi avantajları bulunur. GLONASS, GPS gibi diğer küresel navigasyon sistemleriyle birlikte kullanıldığında, dünya genelinde daha yüksek bir konum belirleme doğruluğu elde edilir.

2.1.1.3 Galileo Uydu Sistemi

Galileo, Avrupa'nın uydu navigasyon sistemidir. Ana hedeflerinden biri, Avrupa'nın uydu navigasyon sistemlerindeki bağımsızlığını artırmaktır. Galileo Uydu Sistemi, 30 uydu (27 ana ve 3 aktif yedek) içermektedir. Bu uydular, 23.000 km yükseklikte üç MEO (Medium Earth Orbit-Orta Dünya Yörüngesi) yörünge düzleminde yer almaktadır. Sistem, dört farklı Navigasyon Hizmeti sağlamaktadır: Açık Hizmet, Hayati Güvenlik Hizmeti, Ticari Hizmet ve Kamu Düzenli Hizmeti. İlk iki test uydusu 2005 ve 2008 yıllarında fırlatılmıştır. İlk dört operasyonel uydu, IOV (In-Orbit Verification Tools-Yörüngede Doğrulama Araçları) olarak adlandırılmaktadır. İki IOV uydusu Ekim 2011'de ve sonraki iki uydu 2012'de fırlatılmıştır. Aralık 2023 itibarıyla takımyıldızda görev yapan 23 adet fırlatılmış uydu bulunmaktadır. Yeni nesil uyduların 2025'ten sonra eski ekipmanların yerine geçerek yedekleme yetenekleri için kullanılacak şekilde faaliyete geçmesi beklenmektedir. Galileo navigasyon uydusunun ölçekli modeli Şekil 4 ile gösterilmiştir.



Şekil 4. Galileo Uydusu

Galileo navigasyon sinyalleri dört farklı frekans bandında iletilir: E5a, E5b, E6 ve E1. Bu frekans bantları, Galileo sinyallerinin iletimi için geniş bir bant genişliği sağlar [24]. Galileo

frekans bantları, dünya genelinde RNSS (Radio Navigation Satellite Service-Radyo Navigasyon Uydu Hizmetleri) için tahsis edilen spektrumda seçilmiştir ve ek olarak, E5a, E5b ve E1 bantları, sivil havacılık kullanıcıları tarafından kullanılan ve özel güvenlik kritik uygulamalara izin veren havacılık ARNS için tahsis edilen spektrumda yer almaktadır. Frekans bantları, diğer GNSS takımyıldızları tarafından kullanılan frekans bantları ile de örtüşmekte veya bitişik durumda olacak şekilde tasarlanmıştır. Galileo frekans planı, her uyduya yerleştirilen 10.23 MHz ana saat kullanımı etrafında yapılandırılmıştır bu sebeple GPS ile birlikte çalışabilirlik sağlamaktadır. Bu frekans, 1970'lerde GPS için seçilmiştir. Frekansın 10.23Mhz seçilmesindeki sebep ile 10'a bölündüğünde 1.023 MHz'ye dönüşür ve bu durumda 1023 uzunluğundaki C/A-kodu PRN'nin uygun bir 1 ms aralıkla tekrar edilmesine olanak sağlamaktadır.

2.1.1.4 BeiDou Uydu Sistemi

Günümüzde, Dünya çapında kullanılan ve geliştirilmekte olan uydu navigasyon sistemlerinden biri olan BeiDou, Çin'in uzay teknolojisi alanındaki önemli başarılarından biridir. Çin BeiDou Uydu Navigasyon Sistemi, 35 uyduyla oluşturulan bir takımyıldız olarak geliştirilmiştir [25]. Bu uydulardan 5 tanesi GEO (Geostationary Earth Orbit-Jeostasyoner Dünya Yörüngesi) uyduları ve 3 tanesi IGSO (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit- Eğimli Jeosenkron Uydu Yörüngesi) uydularıdır; diğer 27 uydusu ise MEO uydularıdır. Sinyaller, CDMA tekniğine dayanır ve diğer GNSS sistemlerine benzer şekilde, sivil ve askeri olmak üzere iki seviyeli konum belirleme hizmeti sunar. Sivil hizmet küresel olarak genel kullanıcılara sunulmaktadır [26].

BeiDou Uydu Sistemi geliştirme fikri, 20. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. Çin, 1994 yılında bu alanda çalışmalara başlamış ve 2000 yılında ilk nesil BeiDou sistemi olan BeiDou-1'i başlatmıştır. Ancak, BeiDou-1 sistemi sadece Çin içinde sınırlı kullanıma sahiptir ve küresel ölçekte rekabet edemiyordu. Bunun üzerine Çin, 2007 yılında BeiDou-2 sisteminin ilk uydusunu fırlatmıştır. BeiDou-2, küresel kapsamı ve performansı artırılmış bir uydu navigasyon sistemi olarak hizmet vermeye başlamıştır. BDS-2 ile Asya Pasifik alanlarında hizmet sağlayabilmektedir. 2020 yılı itibariyle uydu takımının tamamlanmasıyla birlikte BDS-3 tam kapasiteyle hizmet vermeye başlamıştır. Günümüzde ise Çin, BDS-3 uydularıyla birlikte küresel ölçekte kapsama alanına ulaşmış ve daha da geliştirilmiş bir uydu navigasyon altyapısına sahiptir.

BeiDou uyduları, jeostatik Beidou-G, jeosenkron Beidou-IGSO ve MEO Beidou-M olarak adlandırılan üç farklı tipe sahiptir. Bu uyduların her biri, sekiz yıllık bir tasarım ömrüne sahiptir ve uzun süreli hizmet vermek üzere geliştirilmiştir. Ayrıca, CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation-Çin Havacılık ve Uzay Bilim ve Teknoloji Kurumu) tarafından inşa edilen, son derece kararlı olan üç eksenli DFH-3 (DongFangHong) platformu üzerine kurulmuşlardır. Bu sistem, kullanıcılarına hassas konum belirleme, zaman senkronizasyonu ve iletişim gibi hizmetler sunarak küresel çapta çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır. BeiDou Uydu Sistemi, bir dizi yörüngeye dağılmış uyduyu içerir. Bu uydu ağı, gezegenin yüzeyinin her noktasından erişilebilirliği sağlamak için stratejik olarak konumlandırılmıştır. BeiDou sistemi, Çin'in kendi geliştirdiği uydu ve yer tabanlı istasyonlardan oluşur. Bu istasyonlar, uydu sinyallerini alır, işler ve son kullanıcılara ileterek yüksek hassasiyetli konumlandırma sağlar.

BeiDou'nun teknolojik altyapısı, kapsamlı bir uydu navigasyon sistemini desteklemek için son derece gelişmiş elektronik ve yazılım bileşenlerini içerir. Bu bileşenler, sinyal işleme, veri iletimi ve güvenilirlik gibi önemli işlevleri yerine getirir. Ayrıca, BeiDou sistemi diğer uydu navigasyon sistemleriyle de uyumlu çalışabilir, böylece kullanıcılar farklı kaynaklardan gelen verilere erişebilir.

2.1.1.5 GNSS Konum Belirleme

GNSS alıcısı, uydulardan gelen sinyalin alıcıya ulaşma süresini ve ışık hızını kullanarak uydularla olan mesafeleri hesaplar. Bu hesaplama sonucunda elde edilen mesafelere "pseudorange" denir. Dünya üzerindeki bir noktanın üç boyutlu konumunu belirleyebilmek için GNSS alıcısı en az üç uyduya ihtiyaç duyar. [27]. Ancak, doğru bir pozisyon bilgisinin elde edilebilmesi için alıcı saatindeki hatanın da konum belirleme problemine dahil edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, en az dört uyduyu görebilecek bir pozisyonda olmalıdır [28]. GNSS uydu konumları ve hesaplanan pseudorange ölçümleri kullanılarak, dört bilinmeyenli denklem çözülür. Bu çözüm yöntemi "trilaterasyon" olarak bilinir [29]. Böylece dünya üzerindeki konum kartezyen koordinatlarla belirlenebilir [30].

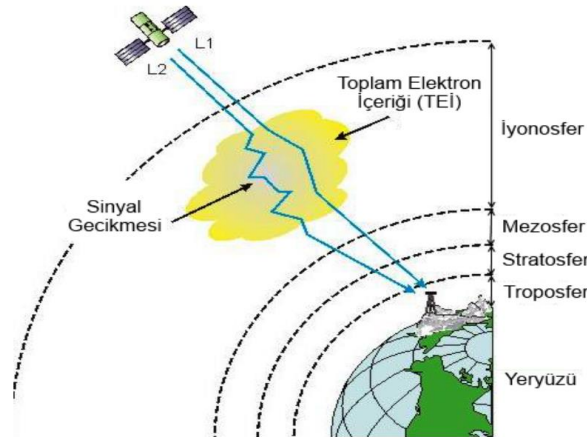
Trilaterasyon yöntemi, iç ve dış mekanlarda konum belirleme için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. GNSS uydularıyla yapılan konum belirleme işlemlerinde sıklıkla bu yöntem tercih edilir. Bu yöntemin uygulanabilirliği, kullanılan referans noktalarının sayısına ve bu noktaların koordinatlarının bilinmesine bağlıdır [31].

2.1.1.6 GNSS Konum Belirleme Hataları

GNSS navigasyonunda doğruluk, alıcının konumuna ve hata kaynaklarının azaltılmasına büyük ölçüde bağlıdır. Yüksek doğruluk, uzayda iyi bir şekilde ayrılmış referans noktaları ile sağlanır. Eğer mesafe ölçümleri birbirine çok yakın dört uyduya göre yapılırsa, sonuçlar neredeyse aynı olur ve küçük göreceli hataların etkisi artar. Uyduların dağılımı, mesafe hatalarının büyümesine neden olabilir. Uydu geometrisinin GNSS çözümüne olan etkisi, birimsiz bir parametre olan DOP (Dilution of Precision- Hassasiyet Seyrelme Oranı) kullanılarak hesaplanır [32]. DOP, GNSS alıcıları için bir performans metriği olarak kullanılan yaygın bir parametredir ve kullanıcıya mevcut konumun olası GNSS çözüm kalitesi hakkında bilgi verir.

2.1.1.6.1 İyonosferik Hatalar

İyonosfer, Dünya yüzeyinden 50 ila 1000 km arasındaki mesafeyi kapsayan bir tabakadır ve Güneş radyasyonu nedeniyle iyonlaşmış gazlardan oluşur. İyonlaşmış gazlar, serbest elektronlar ve iyonlar anlamına gelir. Bu iyonlaşma sonucu oluşan serbest elektronların varlığı, iyonosferin günlük döngü sırasında bile değişken bir ortam gibi davranmasına neden olur. İyonosferin bir kısmı gölgede, diğer kısımları ise güneş ışığı altında olabilir. Bu durum, iyonosferin karakterizasyonunda değişiklikler yaratır ve modellemeyi zorlaştırır. İyonosferin GNSS sinyali üzerindeki birincil etkisi, göreceli hızın azalmasıdır. Işığın hızıyla hareket eden bir sinyal, boşluk yerine bir ortama girdiğinde, sinyallerin göreceli hızı ışık hızının altına düşer. İyonosfer etkisi Şekil 5 ile gösterilmiştir [33].



Şekil 5. İyonosfer Etkisi [33]

İyonosferle ilgili hatanın büyüklüğü, toplam elektron içeriği ile doğru orantılıdır. Elektronlar iyonosferde homojen bir şekilde dağılmaz. Bu durum, yansıma katsayısının rastgele

değişmesine ve GNSS frekans sinyallerinin kod ölçümlerini geciktirerek ve taşıyıcı faz ölçümlerini ilerleterek etkilenmesine yol açar [34]. İyonosferik hataların azaltılması, diferansiyel GNSS yöntemleri kullanılarak mümkündür. İyonosfer, farklı RF frekansları üzerinde aynı etkiye sahip değildir. Bu nedenle, diferansiyel GNSS yöntemlerinin yokluğunda, çift frekanslı bir GNSS alıcısı bu hata türünü ortadan kaldırabilir. Bugün, çoğu yeni alıcı çift frekanslı ve birden fazla uydu takımını desteklemektedir [35].

2.1.1.6.2 Troposferik Hatalar

Troposfer, üst sınırını stratosfere ve alt sınırını Dünya yüzeyinin 9 km üzerine kadar uzanan bir tabakadır. Bu tabaka, kuru gazlar ve su buharından oluşur. İyonosferin aksine, bu tabakanın neden olduğu gecikme tüm GNSS frekansları için aynıdır. Bu nedenle, diferansiyel GNSS veya çok frekanslı GNSS alıcılarının bu hatada bir avantajı yoktur. Troposferik gecikmelerden kaynaklanan hata kaynakları, bu tabakanın kuru ve nemli kısımlarında dağıtılabilir. Kırılma indeksine olan etkinin %90'ı troposferin kuru kısmından, geri kalan %10'u ise nemli kısmından gelir. Kuru kısım hatalarının modellenmesiyle, toplam hatanın %1-2'sine kadar azaltma mümkündür [34, 35]. Nemli kısmın tahmin edilmesinde birtakım zorluklar bulunmaktadır. Ancak, nemli kısmın yüzdesi küçük olduğu ve sadece orta enlemler civarında 5-30 cm'lik bir hataya neden olabileceği için modelleme gerekli değildir. Sonuç olarak, diferansiyel GNSS teknikleri kullanılarak 5 cm'nin altındaki troposferik hatalar giderilebilir [36].

2.1.1.6.3 Uydu Saat Hatası

GNSS alıcı saati ile GNSS uydusunun atomik saati tam olarak senkronize değildir. Her iki tarafın da kendi osilatörü olduğundan, bu zaman bilgisinde gürültüye yol açar. Bu hata genellikle birkaç metre civarındadır ve zamanla çok fazla değişmez. Alıcı diferansiyel GNSS tekniklerini kullanıldığında, çift diferansiyasyon sayesinde hata tamamen ortadan kalkar. Ayrıca, alıcı en az 4 uyduyu görebiliyorsa, GNSS hesaplamaları kullanarak zaman hatası tahmini yapılabilir [37].

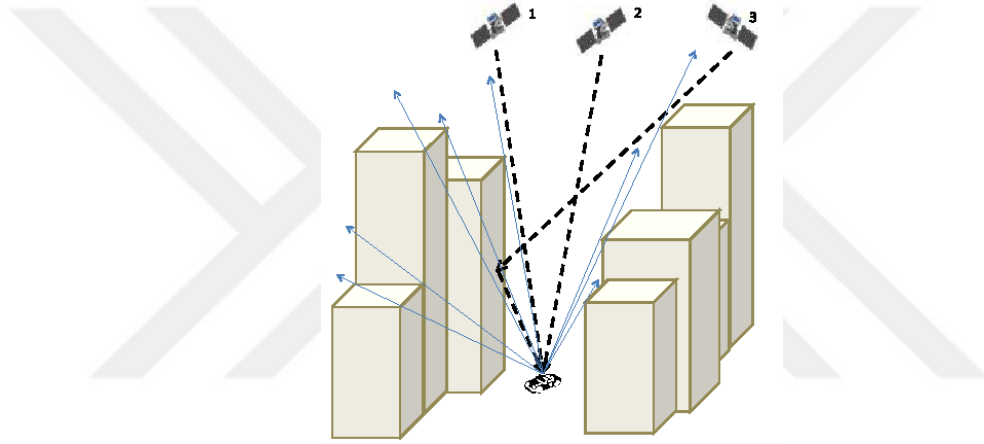
2.1.1.6.4 Uydu Yörünge Hatası

Uydular, görevleri için belirlenmiş yörüngelere sahiptir, ancak uydunun hareket etmesi sırasında bazı hatalar oluşabilir. Uydunun kendi konumu için yapılan hatalı hesaplamalar, navigasyon mesajında yanlış ephemeris verilerine neden olabilir. Yer segmenti, uydunun gerçek konumunu ve hesaplanan konumunu karşılaştırır. Bu karşılaştırmanın sonuçları, yer segmenti tarafından düzeltme mesajları olarak uydulara günde en az bir kez gönderilir.

Düzeltme mesajını alan uydu, hesaplamasını günceller ve güncellenmiş ephemeris verilerini alıcılara iletir. Diferansiyel GNSS teknikleri, bu tür hataları birkaç santimetreye kadar azaltabilir [35].

2.1.1.6.5 Çok Yollu (Multipath) Hataları

GNSS sinyalinin çoklu yol yayılımı, hata kaynaklarından biridir ve özellikle yüksek binalar, engeller ve yoğun ormanlar çevresinde büyük bir sorun teşkil eder. GNSS sinyalleri, alıcıya ulaşmadan önce kolayca yansiyabilir ve alıcıda ikincil veya çoklu sinyaller oluşturabilir. Yansıyan sinyaller her zaman daha uzun yayılma sürelerine sahiptir ve alıcı tarafında, sadece ilgili uydudan gelen doğrudan görüş hattı sinyalini beklediği için sorunlara yol açar. Binalardan kaynaklı oluşabilecek durum Şekil 6 ile gösterilmiştir.



Şekil 6. GNSS Çok Yollu (Multipath) Hataları

Diferansiyel GNSS teknikleri kullanılarak çoklu yol hatalarının giderilmesi mümkün değildir. Antenin yerleştirilme stratejisi, bu hataların azaltılmasında en basit ve en etkili yöntemdir. Başka bir pratik çözüm ise, zemin düzlemi olan antenlerin kullanılmasıdır. Bu zemin düzlemi, antenin tabanında bulunan ve yerden yansıyan sinyalleri azaltmak için tasarlanmış metal bir diskten oluşur. Bir diğer önemli faktör ise, gelen sinyalin polaritesini algılayabilen daha kaliteli bir GNSS anteni seçmektir. Ayrıca, taşıyıcı faz ölçümlerinin, kod ölçümlerine kıyasla daha düşük çoklu yol hatası sağladığına dikkat çekmek gerekir [37]. Multipath hatası modellemesi zor olup, alıcının çevresine bağlı olarak büyük değişiklikler gösterir. Ancak, bu hataları azaltmak için kullanılabilecek yöntemler vardır ve bu yöntemler Mekansal İşleme Teknikleri ve Zaman Alanı Teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Bununla birlikte, bu yöntemler GNSS çözümünün hesaplama karmaşıklığını artırabilir.

2.1.1.6.6 Alıcı Gürültü Hataları

GNSS sinyal seviyeleri çok düşük olduğundan ve alıcının ön ucu zayıf sinyalleri almak için oldukça hassas olduğundan, alıcı gürültüsü GNSS performansı için önemlidir. Alıcı gürültüsü, alıcının kabloları ve antenleri tarafından oluşturulan elektromanyetik alanların toplamıdır. Alıcının iletkenlerindeki elektronların rastgele hareketi, termal gürültü olarak adlandırılan bir etkiye sahiptir. Geçmişte, iki aynı model alıcıyı bir GNSS bölücü kullanarak tek bir antene bağlayarak yapılan testler, alıcı gürültüsünü net bir şekilde ortaya koymuştur [36, 38].

Sonuçlar, diferansiyel GNSS'in tüm büyük hata kaynaklarını ortadan kaldırdığını ancak gürültü ve Multipath hatalarının kaldığını göstermiştir. Tüm olası alıcı gürültü hatalarını bir araya getirdiğimizde, pseudorange kod ölçümlerinin minimum 4 santimetre hata payına sahip olabileceği, taşıyıcı faz ölçümlerinin ise milimetre seviyesinde doğruluğa sahip olabileceği ortaya çıkmaktadır.

2.1.1.7 Uydu Tabanlı İyileştirme Sistemleri

SBAS (Satellite Based Augmentation System-Uydu Tabanlı İyileştirme Sistemleri) uçak navigasyonu için diferansiyel düzeltmeler, bütünlük parametreleri ve iyonosferik veri sağlamak amacıyla küresel sivil havacılık topluluğu tarafından dünya çapında geliştirilmektedir [40]. Bir SBAS, GNSS uydu ölçümlerini toplayan bir yer izleme istasyonları ağından ve bu verileri son kullanıcılara iletmek için GEO uydularından oluşur. Mevcut nesil SBAS GEO'ları, doğrudan GPS L1 taşıyıcı frekansı olan 1575.42 MHz'de yayın yapmaktadır [41]. SBAS sinyali açıktır, GPS C/A kod sinyaline benzer ve mesafe ölçümü için kullanılabilir. GPS C/A koduyla karşılaştırıldığında, kullanıcıya gerekli tüm sistem verilerini sağlamak için $\frac{1}{2}$ oranında ileri hata düzeltme kodlaması ile 250 bps'lik daha yüksek bir veri hızı kullanılmaktadır. Kullanıcı ekipmanları yalnızca L1 üzerinde GPS C/A kodunu ve SBAS sinyallerini işler. SBAS, ICAO (International Civil Aviation Organization-Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) tarafından uluslararası olarak standartlaştırılmıştır [42].

2.1.1.8 Hareketli Base-Rover Konfigürasyonu

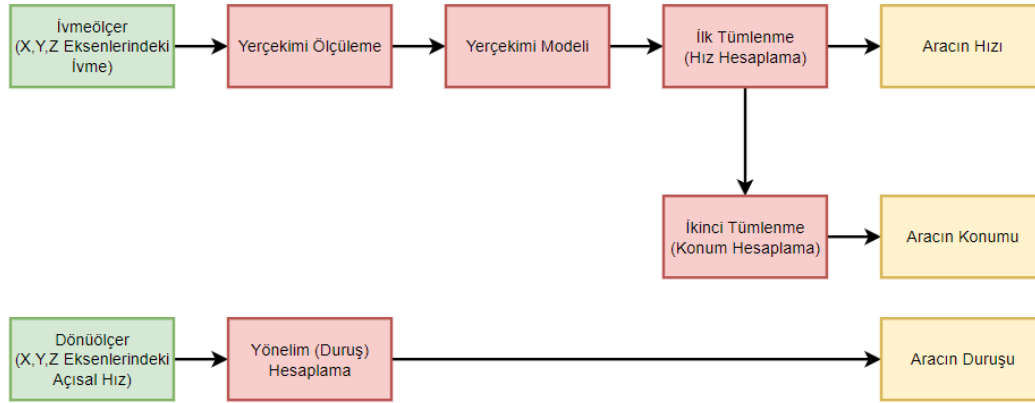
GNSS tabanlı RTK (Real Time Kinematic-Gerçek Zamanlı Kinematik) sistemleri, yüksek hassasiyetli konum belirleme sağlayan tekniklerdir. Baz-Gezici konfigürasyonu ise, özellikle hareket halindeki araçlar veya platformlar için baş açısını ve konum bilgisini gerçek zamanlı olarak tespit etmek üzere geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde bir GNSS alıcısı "base" (baz istasyonu) olarak, diğeri ise "rover" (hareketli istasyon) olarak kullanılır.

Moving Base RTK'da, baz istasyonu olarak kullanılan GNSS alıcısı genellikle hareket halinde olan bir aracın üzerinde yer alır ve sürekli olarak kendi konumunu hesaplar. Rover GNSS alıcısı ise aynı aracın farklı bir noktasına yerleştirilir. İki alıcı arasındaki mesafe ve açısal fark, çok yüksek doğrulukla hesaplanabilir. Bu ölçümler, aracın baş açısının yanı sıra konumunun da çok hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar.

2.1.2 Ataletsel Ölçüm Birimi

Üç eksenle doğrusal ivme ve açısal hızı ölçmek için IMU (Inertial Measurement Unit - Eylemsizlik Ölçüm Birimi) kullanılır. IMU, içinde hem ivmeölçer hem de dönüölçer bulunduran bir sensör paketidir. IMU'nun yapısında, ivmeölçer ve dönüölçer algılayıcılarına ek olarak bir işlemci, sisteme entegre edilmiş şok sönümleyiciler ve algılayıcının güç ihtiyacını karşılamak için bir güç kaynağı da bulunmaktadır. IMU, birbirine dik olarak yerleştirilmiş üçlü ivmeölçer ve dönüölçer sensörlerinden oluşur [43,44].

İvmeölçerlerden alınan veriler ile hız ve konum bilgisi, dönüölçerlerden alınan verilerle ise duruş bilgisi elde edilir. Bu süreç, ataletsel navigasyonun temelini oluşturarak, çeşitli uygulamalarda yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlar. Bir aracın konum ve duruşunun hesaplanmasına dair detaylar Şekil 7 ile gösterilmiştir.



Şekil 7. IMU Tabanlı Konumlandırma ve Yönelim Hesaplama Süreci

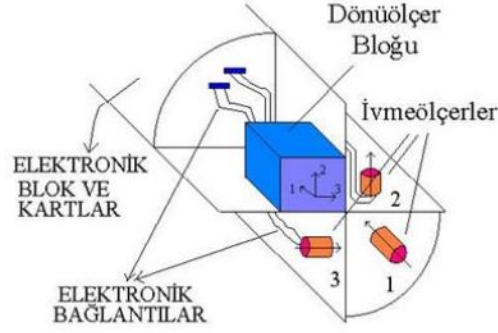
İlk olarak, aracın x, y ve z eksenlerindeki ivme değerlerini ölçen ivmeölçer sensörü, bu verileri sisteme girdi olarak sağlar. Bu ivme verileri, aracın hareket dinamiklerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Ancak, bu veriler yerçekimi kuvvetlerinden etkilenmiş olabileceğinden, doğru analiz için yerçekimi etkilerinin bu verilerden arındırılması gerekmektedir. Bu süreç, *Yerçekimi Ölçüleme* aşamasında gerçekleştirilir. Yerçekimi ölçüleme işlemi, ivme verilerinden yerçekiminin etkilerini çıkararak gerçek ivme değerlerini elde etmeyi amaçlar. Bu aşamada, bir

Yerçekimi Modeli kullanılır. Yerçekimi modeli, yerçekimi kuvvetlerini hesaplayarak ivme verilerini düzeltir ve bu sayede ivme verileri sadece aracın hareketine bağlı olarak elde edilen gerçek ivme değerlerine dönüştürülür. Düzeltme işlemi tamamlandıktan sonra, bu yeni veriler *İlk Tümlenme* aşamasına girer. İlk tümlenme işlemi, ivme verilerini entegre ederek aracın hızını hesaplar. Bu aşamada, hızın hesaplanması için ivme verileri zamanla birleştirilir ve bu sayede hız bilgisi elde edilir. Bu aşamada elde edilen hız bilgisi, bir sonraki adıma geçiş yapar. *İkinci Tümlenme* aşamasında ise, hız verilerinden aracın konumu hesaplanır. Hız verileri entegre edilerek aracın hangi konumda bulunduğu belirlenir. Bu süreç sonunda, araç konumu net bir şekilde hesaplanmış olur ve bu bilgi, sistemin konum çıktısı olarak sunulur.

Diğer yandan, aracın x, y ve z eksenlerinde açısal hız değerlerini ölçen dönüölçer sensörü, bu verileri sisteme girdi olarak sağlar. Açısal hız verileri, aracın yönelim ve dönme hareketlerini anlamak için kullanılır. Bu veriler, *Yönelim (Duruş) Hesaplama* aşamasında işlenir. Yönelim hesaplama aşaması, dönüölçer verilerini kullanarak aracın yönelimini belirler. Bu aşamada elde edilen sonuç, aracın duruşunu netleştiren bir bilgi olarak çıkış verir.

Sonuç olarak, diyagramda yer alan bu süreçler, aracın konumunu, hızını ve yönelimini belirlemek amacıyla birbirine entegre bir şekilde çalışır ve bu süreçlerin sonucunda elde edilen veriler ve aracın hareket dinamiklerinin izlenmesine olanak tanır. Bu bilgiler, araçların hareketlerini takip etmek ve konum belirlemek için kritik öneme sahip olup, navigasyon sistemlerinin temel bileşenlerini oluşturur.

IMU sensöründen elde edilen veriler, genellikle KF (Kalman Filtre-Kalman Filter) gibi algoritmalar kullanılarak işlenir. Bu filtreler, ölçüm hatalarını ve gürültüyü azaltarak daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. KF, özellikle zamanla değişen sistemlerde, gelecekteki durumları tahmin etmek ve ölçüm verilerini düzeltmek için yaygın olarak kullanılır [45]. KF, özellikle sensörlerin doğruluğunu artırmak ve farklı kaynaklardan gelen verileri entegre ederek daha tutarlı bir durum tahmini sağlar. IMU'ların doğru çalışabilmesi için düzenli olarak kalibre edilmesi gerekir. Bu kalibrasyon, sensörlerin sapma, ölçekleme faktörü, hizalama hataları ve sıcaklık değişikliklerinden kaynaklanan hataları düzelterek performansın optimize edilmesini sağlar [45]. Kalibrasyon süreci, sistemin uzun vadede güvenilirliğini artırarak doğru ölçüm sonuçları elde edilmesine katkıda bulunur [46].



Şekil 8. IMU İç Yapısı

Modern IMU'lar, GNSS gibi diğer navigasyon sistemleriyle entegre edilerek daha kapsamlı bir çözüm sunar. Bu tür entegre sistemler, INS (Inertial Navigation System - Ataletsel Navigasyon Sistemi) olarak adlandırılır ve hem ataletsel hem de uydu tabanlı verileri birleştirerek daha doğru konum, hız ve yön bilgisi sağlar [47]. INS, araçların ve cihazların konum ve hareket bilgilerinin kesintisiz bir şekilde izlenmesine olanak tanır, bu da navigasyon doğruluğunu artırır. Bu sistemler, özellikle GNSS sinyalinin zayıf veya kesintiye uğradığı durumlarda kritik öneme sahiptir.

IMU, genellikle diğer sensörlerle birlikte kullanılarak daha geniş bir sensör füzyonu gerçekleştirilebilir. Sensör füzyonu, farklı sensörlerin güçlü yönlerini bir araya getirerek daha güvenilir ve doğru navigasyon bilgisi elde edilmesini sağlar [48]. IMU performansı, birkaç önemli kriterle değerlendirilir. Bunlar arasında ivmeölçer ve dönüölçerlerin hassasiyeti, doğruluğu, tekrarlanabilirliği ve çalışma aralığı yer alır. Ayrıca, cihazın boyutu, ağırlığı, güç tüketimi ve dayanıklılığı da performans değerlendirmesinde önemli faktörlerdir. Bu kriterler, INS'in hava araçları, denizaltılar, otomotiv, robotik ve giyilebilir teknolojiler gibi birçok çeşitli uygulamalarda etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar [49].

2.1.2.1 İvmeölçer

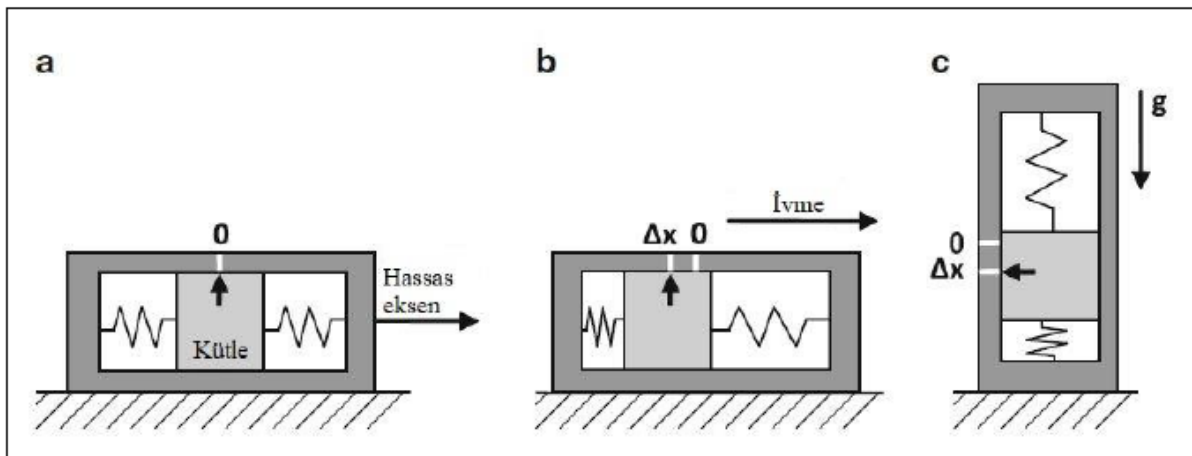
İlk ticari ivmeölçerler, 1920'lerin başlarında McCollum ve Peters tarafından geliştirilen direnç köprüsü prensibine dayanmaktadır. Bu cihazlar, gerginlik-basınç Wheatstone yarım köprüsü konfigürasyonunda karbon halkalar kullanmaktaydı ve oldukça büyük ve ağırdı. 1930'lara gelindiğinde, ivmeölçerler uçak ve köprü testleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaya başlandı. 1930'ların sonlarında bağlı direnç strain gauge'ın ortaya çıkışı, daha hassas ölçümlere ve daha geniş ticari kullanıma olanak tanıyarak önemli bir dönüm noktası oldu. 1940'ların sonları ve 1950'lerin başlarında piezoelektrik malzemelerin ivmeölçerlerde kullanılması,

yüksek rezonans frekansları ve daha büyük dayanıklılık sunarak büyük bir atılım oldu. Bu, yüksek frekanslı titreşimlerin ve kısa süreli şokların ölçülmesi için ideal hale getirdi [50].

İvmeölçerler, sensör içindeki bir kütlenin maruz kaldığı atalet kuvvetlerindeki değişiklikleri tespit etme prensibine dayalı olarak çalışan algılayıcılardır. En yaygın ivmeölçer türü MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems - Mikro Elektromekanik Sistemler) ivmeölçerdir. MEMS ivmeölçerlerde, küçük bir kütle bir mikro yapı içinde asılıdır ve uygulanan ivmeye bağlı olarak yer değiştirmesi ölçülür. İvmeye maruz kaldığında, asılı kütle eylemsizlik kuvvetlerine maruz kalır ve bu da onu çevreleyen yapıya göre sapmasına neden olur. Bu sapma piezoelektrik, piezoresistif, kapasitif veya optik algılama yöntemleri gibi çeşitli mekanizmalar aracılığıyla tespit edilir. Algılanan sinyal daha sonra uygulanan ivmenin büyüklüğünü ve yönünü belirlemek için işlenir.

İvmeölçerler, genellikle piezoelektrik, kapasitif veya piezoresistif sensörler kullanarak çalışır. Bu sensörler, eksenel doğrultuda meydana gelen kuvvetleri elektrik sinyallerine dönüştürerek doğrusal ivmeyi ölçerler [51].

İvmeölçer yerleştirildiği sistemin hassas ekseni boyunca herhangi bir ivme uygulanmadığı durumda Şekil 9 a'daki gibi gözükmemektedir. Hassas ekseni boyunca bir ivme etkisinde kaldığı durumda kütle bulunduğu konuma göre yer değiştirecektir ve Şekil 9 b'deki gibi gözükcektir. Sistem üzerinde herhangi bir kuvvet olmaması durumunda ise kütle üzerindeki kuvvet yayın gerilimiyle dengede kalmaktadır. Yayın uzaması ya da sıkışması durumunda ise kütle yer değiştirecektir ve yer değiştirmesi ile doğru orantılı bir şekilde kuvvet yaratacaktır. Bir cisme uygulanan ivme, cismin kütlesi ile yer değiştirmesi ölçülerek belirlenebilir. [52].



Şekil 9. Farklı Koşullarda Kütle ve Yay İvmeölçerleri

İvme ölçme prensibi Denklem (2.1) ile gösterilen Hooke Yasası'na ve Denklem (2.2) ile gösterilen Newton'un 2. Yasası'na dayanır.

$$F = kx \quad (2.1)$$

$$F = ma \quad (2.2)$$

F ; Yay üzerindeki kuvvet (Newton, N)

k ; Yay Sabiti (N/m)

x ; Yay Gerilimi (metre)

m ; Kütle (kg)

a ; İvme (m/s^2)

Sistemde iki kuvvet birbirine eşit olduğundan yayın uzama miktarı, kütlenin ivmesi ile doğru orantılı bir değerdir.

$$ma = kx \quad (2.3)$$

2.1.2.1.1 Mekanik İvmeölçerler

İvmeölçerler, kütle-yay mantığına dayanan bir çalışma prensibine sahiptir. Bu sensörler, uzun yıllardır geliştirilip kullanılmaktadır ve farklı ortamlarda kullanım için çeşitli yapısal teknikler geliştirilmiştir. Yüksek doğruluk ve geniş dinamik aralık sunan, kompakt ve güvenilir cihazlar büyük miktarlarda üretilmiştir. İvmeyi son derece hassas bir şekilde, μg veya daha iyi bir çözünürlük seviyesinde ölçebilirler. Mekanik ivmeölçerler atalet ve atalet dışı kullanımlarda genellikle tercih edilmektedir. Bu sensörler, çeşitli endüstriyel ve bilimsel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve sürekli olarak geliştirilmektedir.

2.1.2.1.2 Kuvars İvmeölçerler

Kuvars ivmeölçerler, adını içerdikleri kuvars malzemesinden alır. Bu tür ivmeölçerler, sarkaç yapılı veya titreşen kirişli olarak üretilebilir ve genellikle en yaygın kullanılan modellerdendir. Sarkaç yapılı ivmeölçerlerde, askı ve sarkaç kısımları genellikle kuvars malzemesinden üretilir. Benzer şekilde, titreşen kirişli ivmeölçerlerde ise titreşen kiriş genellikle kuvars malzemesinden imal edilir. Kuvars malzemenin piezoelektrik özelliklere sahip olması, elektriksel olarak kolay sürülmesini sağlar ve mekanik olarak kararlı bir yapı sunar. Bu özellikler, kuvarsın ivmeölçerlerde tercih edilme sebeplerinden sadece birkaçıdır. Bu özellikler, ivmeölçerlerin hassasiyetini ve dayanıklılığını artırarak geniş bir kullanım alanına olanak tanır.

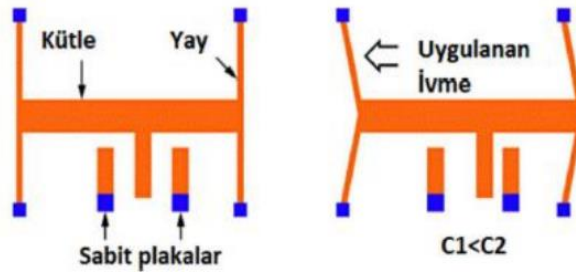
2.1.2.1.3 MEMS İvmeölçerler

MEMS ilk olarak 1960'ların sonlarında, tümleşik devrelerin üretiminde kullanılan fabrikasyon yöntemlerinin küçük değişikliklerle, minyatür mekanik elemanların üretiminde de kullanılabileceğinin fark edilmesiyle başlamıştır [53]. Günümüzde MEMS türü sensörler, mekanik ve elektronik sistemlerin mikron boyutlarında tasarlanmış versiyonlarıdır. Bu sensörlerin küçük boyutlu olması, düşük maliyetli olmaları ve yüksek güvenilirlik sunmaları gibi avantajlar, piyasada büyük talep görmelerini sağlar. MEMS ivmeölçerler, 0.5-1 g ivme değerlerinden başlayarak 1000g ivme değerlerine kadar ölçüm yapabilirler.

MEMS ivmeölçerlerin mikro yapısı, silikon gibi yarı iletken malzemelerden üretilen mikro yapılar içerir. Bu yapılar, genellikle mikrometre boyutlarındadır ve kimyasal aşındırma veya fotolitografi gibi mikro işleme teknikleri ile oluşturulur. Asılı kütle, genellikle bir yay sistemi ile desteklenir ve bir çerçeveye bağlıdır. İvme, bu kütlenin yer değiştirmesine neden olarak sensörün içindeki değişiklikleri tetikler [54].

2.1.2.1.4 Kapasitif İvmeölçerler

Kapasitif ivmeölçerlerde, kütlenin hareketi iki iletken plaka arasındaki kapasitansta değişiklik yaratır. Bu değişiklik, bir diferansiyel kapasitans köprüsü aracılığıyla tespit edilir ve ivme bilgisine dönüştürülür. Kapasitif ivmeölçerler, düşük gürültü seviyeleri ve yüksek hassasiyetleri nedeniyle tercih edilir. Kapasitif ivmeölçer iç yapısı Şekil 10 ile gösterilmiştir.



Şekil 10. Kapasitif İvmeölçer İç Yapısı

2.1.2.1.5 Piezoelektrik İvmeölçerler

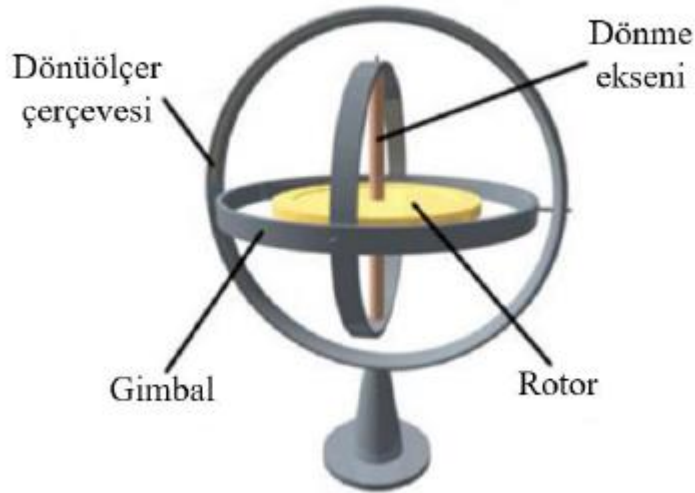
Piezoelektrik ivmeölçerler, belirli kristal veya seramik malzemelerin mekanik deformasyonları elektrik sinyallerine dönüştürme yeteneğine dayanır. Bu tür ivmeölçerler, genellikle yüksek frekans tepkisi ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılır.

2.1.2.1.6 Piezorezistif İvmeölçerler

Termal ivmeölçerler, küçük ısı kaynakları ve ısı algılayıcıları içerir. İvme, ısı kaynağının konumunu değiştirerek algılayıcılar arasında bir sıcaklık farkı oluşturur. Bu sıcaklık farkı, ivmenin büyüklüğünü ve yönünü belirlemek için kullanılır.

2.1.2.2 Dönüölçer

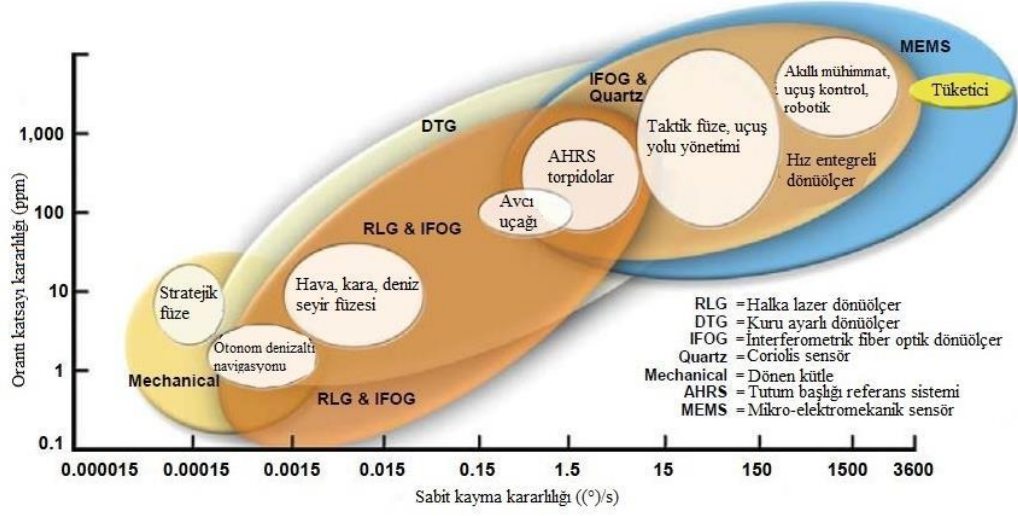
Dönüölçerler, bulundukları platformun açısal hızını ölçerek, yapıların hareketinin büyüklüğü ve yönü hakkında bilgi sağlayan bir tür sensördür. Bu algılayıcılar, platformun eylemsiz referans çerçevesine göre açısal hızını ölçerler. Bir dönüölçer genellikle bir rotor, bir çerçeve ve birkaç destekleme mekanizması içerir. Rotor, dönme hareketini algılamak için kullanılan ana parçadır. Rotorun etrafındaki çerçeve, rotora dönme serbestliği sağlar ve rotora uygulanan dönme kuvvetlerini algılar. Destekleme mekanizmaları, dönüölçerin istikrarını sağlar ve dış etkilere karşı direnç gösterir. Tipik bir dönüölçer Şekil 11 ile gösterilmiştir.



Şekil 11. Dönüölçer

Dönüölçerler, seyrüsefer, kararlılık gerektiren sistemler, insansız araçların oto pilot sistemlerinde, uçuş yolu sensörü veya platform kararlılık gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı teknolojik altyapılara ve işleyiş prensiplerine sahip birçok dönüölçer sistemi mevcuttur. Bu sistemler arasında yaygın olarak kullanılanlar arasında mekanik dönüölçerler, Halka Lazer Dönüölçerleri, Optik Dönüölçerler, Fiber Optik Dönüölçerler ve MEMS dönüölçerler bulunmaktadır [55]. Bulunacağı sistem için sabit kayma

kararlılığı ve orantı katsayı kararlılığı gereksinimlerinin hangi uygulamalarda karşılandığı ve kullanıldığına ilişkin bir şema Şekil 12 ile gösterilmiştir [56].



Şekil 12. Güncel Dönüölçer Uygulamaları [56]

2.1.2.2.1 Mekanik Dönüölçerler

Mekanik Dönüölçerler, dönen bir rotorun açısal hızını ölçmek için kullanılır. Bu tür dönüölçerler genellikle büyük ve ağırdır, ancak yüksek doğruluk sağlarlar. Mekanik dönüölçerlerde rotorun hızı ve dönme yönü, çerçeve ve destekleme mekanizmaları tarafından algılanır ve bu bilgiler elektriksel sinyallere dönüştürülür.

2.1.2.2.2 Halka Lazer Dönüölçerler

Halka Lazer Dönüölçerler, ışığın kapalı bir döngü içinde döndürülmesi prensibine dayanır. İki karşılıklı lazer ışını, birbiriyle etkileşime girer ve oluşturdukları girişim deseninden açısal hız hesaplanır. Yüksek doğruluk ve kararlılık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

2.1.2.2.3 Optik Dönüölçerler

Optik Dönüölçerler, ışığın bir optik fiber içinde yayılması ve fiberin döndürülmesi prensibine dayanır. Lazer ışığının girişim etkisini kullanarak açısal hızı belirler.

2.1.2.2.4 Fiber Optik Dönüölçerler

Fiber Optik Dönüölçerler, bir optik fiberin içerisindeki ışığın faz farkını ölçerek açısal hızı tespit eder. Işık fiber içinde iki yönde yayılması sağlanır ve bu iki ışın arasındaki faz farkı ölçülerek dönme hızı hesaplanır.

2.1.2.2.5 MEMS Dönüölçerler

MEMS Dönüölçerler, küçük boyutlu ve düşük maliyetli sensörlerdir. Bu sensörler, bir mikro yapının dönme hareketine maruz kalması sonucu oluşan Coriolis kuvvetlerini algılar ve bu kuvvetleri açısal hıza dönüştürür. MEMS dönüölçerler, otomotiv ve tüketici elektroniği gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır.

2.1.3 Manyetometre

Manyetometreler, manyetik alanları ölçerek yön bulma amacıyla kullanılan cihazlardır. Yön bulma işlemi, Dünya'nın manyetik alanından yararlanarak bir referans yönü belirlemeyi içerir. Manyetometreler manyetik kuzeye göre yönelimin tahmin edilmesi için kullanılabilir [57]. Manyetometreler, Dünya'nın manyetik alanını algılayarak çalışır ve bu sayede kuzey yönünü belirler. Geleneksel manyetik pusulalar, manyetometrelerin en basit formudur. Bu cihazlar, manyetik kuzeyi işaret eder ve böylece diğer yönler hesaplanabilir. Elektronik manyetometreler, bu işlemi daha hassas ve dijital olarak gerçekleştirebilir. Manyetometrelerin hassasiyeti, çevresel manyetik parazitlerden etkilenebilir. Özellikle kapalı alanlarda veya elektromanyetik alanların yoğun olduğu ortamlarda, manyetik alan ölçümleri yanıltıcı olabilir. Bu nedenle, manyetometrelerin doğru çalışabilmesi için çevresel etkilerden arındırılmış olması önemlidir.

MEMS tabanlı manyetometreler, modern yön bulma cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar, genellikle bir mikrodenetleyici ile çalışarak manyetik alan ölçümlerini işler ve yön bilgisi elde edilmesini sağlarlar. MEMS dönüölçer ve ivmeölçer, yön bulma sistemlerinde sıkça kullanılır. Bu sistemler, genellikle birleştirilmiş sensör verilerini füzyon yöntemiyle elde ederek daha doğru yön bilgisi elde eder [58]. MEMS dönüölçerler Dünya'nın dönüş hızını ölçerken, ivmeölçerler cihazın hareketini algılar ve bu veriler birleştirilerek yön bilgisi hassas şekilde belirlenir. Manyetometreler ve diğer sensörlerin verilerinin birleştirilmesi, genellikle dijital filtreler aracılığıyla yapılır. Tamamlayıcı filtreler, bu tür birleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılır.

2.1.4 Barometre

Barometre, atmosferik basıncı ölçen bir cihazdır. Atmosferik basınç, belirli bir yüzey alanına etki eden hava kütesinin ağırlığıdır. Genellikle barometrik basınç verileri, yüksekliğin hesaplanmasında kullanılır. Barometrik yükseklik hesaplaması, hava basıncının yükseklikle

ters orantılı olarak değişmesi prensibine dayanır. Atmosferik basınç Denklem (2.4) ile gösterilmiştir.

$$P = P_0 \exp \left(-\frac{Mgh}{RT} \right) \quad (2.4)$$

P ; Yükseklikteki basınç (Pa)

P_0 ; Deniz seviyesindeki basınç (Pa)

M ; Havanın molar kütlesi (kg/mol)

g ; Yerçekimi ivmesi (m/s²)

h ; Yükseklik (m)

R ; Gaz sabiti [$\frac{J}{mol \cdot K}$]

T ; Mutlak sıcaklık (K)

Barometreden irtifaya dönüşüm yapmak için kullanılan temel denklem, atmosfer basıncı ile irtifa arasındaki ilişkiyi tanımlayan barometrik formüldür. Deniz seviyesinden itibaren yükseklik arttıkça atmosfer basıncı azalır. Standart atmosfer koşulları altında (deniz seviyesinde sıcaklık 15°C ve basınç 1013.25 (hPa), irtifa (h) ve basınç (P) arasındaki ilişki Denklem (2.5) ile gösterilen şekilde ifade edilebilir.

$$h = 44330 \left(1 - \left(\frac{P}{1013.25} \right)^{0.1903} \right) \quad (2.5)$$

2.2. Coğrafi Koordinat Sistemleri ve Dönüşümleri

Coğrafi koordinat sistemleri, dünyanın yüzeyine göre bir noktayı temsil etmek için kullanılan farklı koordinat sistemlerini ifade eder. Dünya oldukça düzensiz bir şekle sahiptir, bu da onu düzgün bir matematiksel modelle temsil etmeyi çok zorlaştırır. Bu nedenle, farklı uygulamalar için, bazıları küresel olarak kabul edilen, bazıları ise sadece belirli bölgeler için olan çeşitli koordinat sistemleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan farklı koordinat sistemleri ve bunlar arasındaki dönüşümler bu bölümde açıklanmıştır.

ENU (East North Up -Doğu Kuzey Yukarı) referans sistemi, bu çalışmada standart referans olarak seçilmiştir.

2.2.1 ENU Koordinat Sistemi

Yerel ENU koordinatları, belirli bir konuma sabitlenmiş ve Dünya'nın yüzeyine teğet bir düzlemde oluşur. Doğu yönü x-ekseni, kuzey yönü y-ekseni ve yukarı yönü z-ekseni olarak tanımlanır. Mesafeler metre cinsinden ifade edilir. Bu referans sisteminde Euler açıları, Doğu eksenini (x-ekseni) etrafında saat yönünün tersine olan dönüşler olarak tanımlanır ve bu açıya yuvarlanma (φ), Kuzey eksenini (y-ekseni) etrafında eğim (θ) ve Yukarı eksenini (z-ekseni) etrafında sapma (ψ) denir.

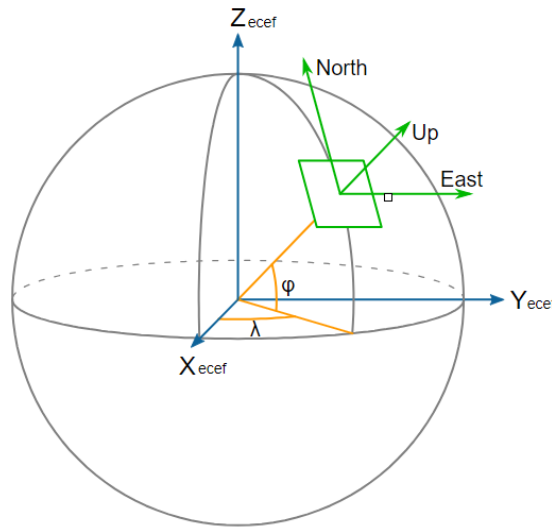
Bu referans sistemi, üstsimge (g) ile gösterilir. Pozisyonlar 'p' olarak, hızlar 'v', ivmeler 'a' ve Euler açıları φ , θ , ψ ile sırasıyla yuvarlanma, eğim ve sapma olarak gösterilir. Referans eksenini alt simge olarak E, N veya U ile gösterilir.

2.2.2 ECEF Koordinat Sistemi

ECEF (Earth Centered, Earth Fixed - Yer Merkezli Yer Sabit) koordinat sistemi, Dünya ile birlikte döner ve merkezi Dünya'nın merkezindedir. x eksenini, 0° enlem (ekvator) ve 0° boylam (baş meridyen) üzerinde Dünya'nın küresini keser. z eksenini, Dünya'nın dönme eksenini boyunca Kuzey Kutbu'na doğru uzanır. Y eksenini, z ve x eksenlerine dik olup sağ el kuralına uyar. Mesafeler metre cinsinden ifade edilir. Bu, GNSS sistemlerinde kullanılan referans sistemidir.

Bu referans sistemi, üst simge (E) ile gösterilir. Pozisyonlar 'p', hızlar 'v', ivmeler 'a', Euler açıları ise φ , θ , ψ olarak adlandırılır ve sırasıyla yuvarlanma, eğim ve sapma anlamına gelir. Referans eksenini, x, y veya z alt simgesi ile gösterilir.

ENU ve ECEF koordinat sistem ilişkisi Şekil 13 ile gösterilmiştir.



Şekil 13. ENU, ECEF ve LLH Koordinat Sistemi

2.2.3 Gövde Çerçevesi

Bu, ataletsel sensörlerin monte edildiği araca bağlı koordinat sistemidir. Bu koordinat sisteminin orijini, aracın kütle merkezidir. x eksen ileri yöne, z eksen yukarı yöne ve y eksen sağ el kuralına uygun olarak z ve x eksenlerine dik şekilde yönlendirilmiştir. Mesafeler metre cinsinden ifade edilir. Basitlik açısından, referans eksenlerinin ataletsel sensörlerin eksenleri ile hizalandığı varsayılmıştır.

Bu referans çerçevesi, üst simge (b) ile gösterilir. Pozisyonlar 'p', hızlar 'v', ivmeler 'a', Euler açıları ise ϕ , θ , ψ olarak adlandırılır ve sırasıyla yuvarlanma, eğim ve sapma anlamına gelir. Referans eksen, x, y veya z alt simgesi ile gösterilir.

2.2.4 LLH Koordinat Sistemi

Bir noktanın koordinatları, enlem, boylam ve yükseklik cinsinden ifade edilir ve sırasıyla λ , ϕ ve h ile gösterilir. Enlem, ölçülen noktanın içinden geçen referans elipsoidi ile ekvator düzlemi arasındaki açıyı (-90° ile 90° arasında) ölçer. Boylam, Baş Meridyen ile ölçülen nokta arasındaki döngüsel açıyı (-180° ile 180° arasında) ölçer. Yükseklik, ölçülen nokta ile referans elipsoidi arasındaki yerel dikey mesafedir. ENU, ECEF ve LLH sistemleri arasındaki ilişki Şekil 13 ile gösterilmiştir.

2.2.5 ENU Koordinat Sisteminden Gövde Çerçevesine Dönüşüm

ENU koordinatlar, üç ardışık Euler dönüşümüyle Gövde çerçevesi koordinatlarına dönüştürülebilir. İlk dönüşüm sapma açısı (ψ) ile, ikinci dönüşüm eğim açısı (θ) ile ve üçüncü dönüşüm yuvarlanma açısı (ϕ) ile yapılır. Konum koordinatları, hızlar ve ivmeler için dönüşüm aynıdır, çünkü her iki sistem de aynı orijine sahiptir. Pozisyon dönüşümü Denklem (2.6) ile, Hız ve İvme dönüşümü sırasıyla Denklem (2.7) ve Denklem (2.8) ile, Dönüşüm matrisi ise Denklem (2.9) ile gösterilmiştir.

$$[p_X^{(b)} \ p_Y^{(b)} \ p_Z^{(b)}]^T = R_g^b * [p_E^{(g)} \ p_N^{(g)} \ p_U^{(g)}]^T \quad (2.6)$$

$$[v_X^{(b)} \ v_Y^{(b)} \ v_Z^{(b)}]^T = R_g^b * [v_E^{(g)} \ v_N^{(g)} \ v_U^{(g)}]^T \quad (2.7)$$

$$[a_X^{(b)} \ a_Y^{(b)} \ a_Z^{(b)}]^T = R_g^b * [a_E^{(g)} \ a_N^{(g)} \ a_U^{(g)}]^T \quad (2.8)$$

$$R_g^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi^{(g)} & -\sin\varphi^{(g)} \\ 0 & \sin\varphi^{(g)} & \cos\varphi^{(g)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta^{(g)} & 0 & -\sin\theta^{(g)} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta^{(g)} & 0 & \cos\theta^{(g)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\varphi^{(g)} & -\sin\varphi^{(g)} & 0 \\ \sin\varphi^{(g)} & \cos\varphi^{(g)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta^{(g)}c\varphi^{(g)} & -c\theta^{(g)}s\varphi^{(g)} & -s\theta^{(g)} \\ c\varphi^{(g)}s\varphi^{(g)} - s\varphi^{(g)}s\theta^{(g)}c\varphi^{(g)} & c\varphi^{(g)}c\varphi^{(g)} + s\varphi^{(g)}s\theta^{(g)}s\varphi^{(g)} & -s\varphi^{(g)}c\theta^{(g)} \\ s\varphi^{(g)}s\varphi^{(g)} + c\varphi^{(g)}s\theta^{(g)}c\varphi^{(g)} & s\varphi^{(g)}c\varphi^{(g)} - c\varphi^{(g)}s\theta^{(g)}s\varphi^{(g)} & c\varphi^{(g)}c\theta^{(g)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.2.6 Gövde Çerçevesinden ENU Koordinat Sistemine Dönüşüm

Koordinatların gövde çerçevesinden ENU çerçevesine dönüşümü de sefer ters sırada üç ardışık Euler dönüşümleri ile yapılır. İlk dönüşüm roll açısı (ϕ) ile, sonra pitch açısı (θ) ve son olarak yaw açısı (ψ) ile yapılır. Konum koordinatları, hızlar ve ivmeler için dönüşüm aynıdır, çünkü her iki sistem de aynı orijine sahiptir. Pozisyon dönüşümü Denklem (2.10) ile, Hız ve İvme dönüşümü sırasıyla Denklem (2.11) ve Denklem (2.12) ile, Dönüşüm matrisi ise Denklem (2.13) ile gösterilmiştir.

$$[p_E^{(g)} \ p_N^{(g)} \ p_U^{(g)}]^T = R_b^g * [p_X^{(b)} \ p_Y^{(b)} \ p_Z^{(b)}]^T \quad (2.10)$$

$$[v_E^{(g)} \ v_N^{(g)} \ v_U^{(g)}]^T = R_b^g * [v_X^{(b)} \ v_Y^{(b)} \ v_Z^{(b)}]^T \quad (2.11)$$

$$[a_E^{(g)} \ a_N^{(g)} \ a_U^{(g)}]^T = R_b^g * [a_X^{(b)} \ a_Y^{(b)} \ a_Z^{(b)}]^T \quad (2.12)$$

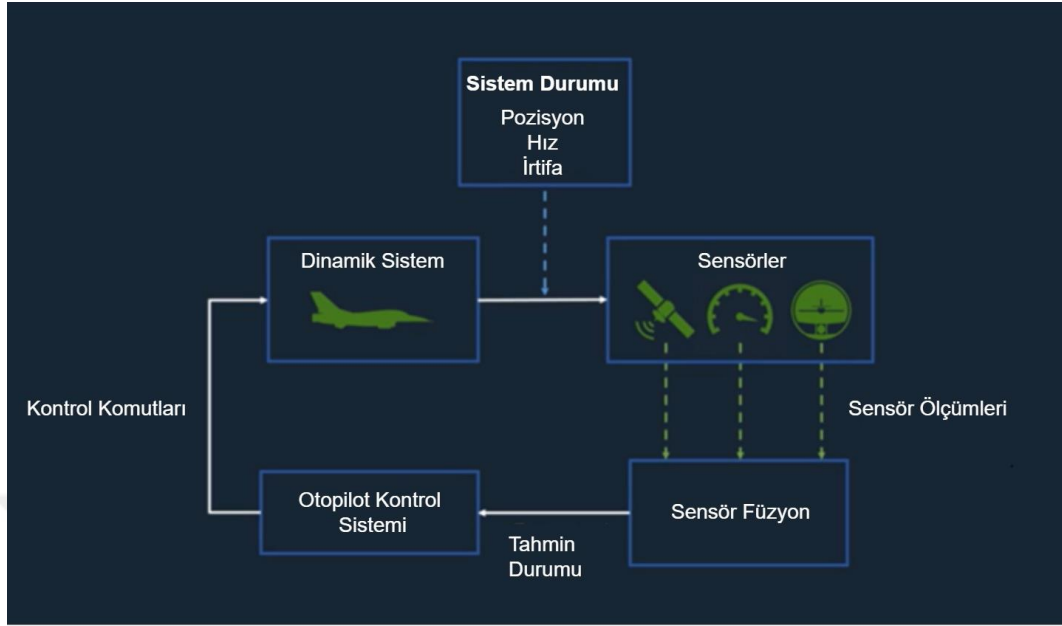
$$R_b^g = \begin{bmatrix} \cos\varphi^{(b)} & -\sin\varphi^{(b)} & 0 \\ \sin\varphi^{(b)} & \cos\varphi^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta^{(b)} & 0 & -\sin\theta^{(b)} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta^{(b)} & 0 & \cos\theta^{(b)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi^{(b)} & -\sin\varphi^{(b)} \\ 0 & \sin\varphi^{(b)} & \cos\varphi^{(b)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\varphi^{(b)}c\theta^{(b)} & -c\varphi^{(b)}s\theta^{(b)}s\varphi^{(b)} - s\varphi^{(b)}c\varphi^{(b)} & -c\varphi^{(b)}s\theta^{(b)}c\varphi^{(b)} + s\varphi^{(b)}s\varphi^{(b)} \\ s\varphi^{(b)}c\theta^{(b)} & -s\varphi^{(b)}s\theta^{(b)}s\varphi^{(b)} + c\varphi^{(b)}c\varphi^{(b)} & -s\varphi^{(b)}s\theta^{(b)}c\varphi^{(b)} - c\varphi^{(b)}s\varphi^{(b)} \\ s\theta^{(b)} & c\theta^{(b)}s\varphi^{(b)} & c\theta^{(b)}c\varphi^{(b)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.3. Sensör Füzyon

Sensör füzyon, genel olarak herhangi bir bilgi kaynağının tek başına sağlayabileceğinden daha doğru, daha eksiksiz ve daha sağlam bir sonuç oluşturmak için birden fazla veri kaynağını bir araya getirme sürecidir. Bu süreç, tek bir sensörün sağlayabileceğinden daha fazla bilgi sağlamak ve sistem performansını artırmak amacıyla kullanılır [59]. Sensör füzyonu, çeşitli endüstrilerde, özellikle otomotiv, savunma, tıp, havacılık ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Her türlü algılamayı veya otomasyonu içeren hemen

hemen her modern teknoloji parçasında bulunmaktadırlar [66]. Bir sensör füzyon örneği Şekil 14 ile gösterilmiştir.



Şekil 14. Sensör Füzyonu

Bir uçağın hareketini ve dinamiğini ele aldığımızda, bu sistemin durumu, uçağın herhangi bir andaki mevcut pozisyonunu açıklar. Uçağın hızı, konumu, ivmesi, irtifası gibi parametreler uçağın mevcut durumunu oluşturur. Modern uçak sistemlerinde uçağı uçurmak amacıyla otopilot kontrolünün çalışması için otopilot tarafından uçağın mevcut durumunun bilinmesi gerekir. Bu bilgileri elde etmek için uçakta sistemin fiziksel özelliklerini ölçen sensörler kullanılır. GNSS, IMU, manyetometre, barometre, odometre gibi sensörler, uçağın durumu hakkında ölçüm verileri sağlar ancak çoğu durumda hiçbir sensör gerekli tüm bilgileri aynı anda algılayamamaktadır. Bu nedenle uçağın tahmini durumu hakkında tam bir ölçüm oluşturmak için bir sensör birleştirme işlemi gereklidir. Gerçek hayatta hiçbir sensör mutlak doğru bir ölçüm gerçekleştirmez, sağladığı her türlü ölçüm, gürültü ya da kalibrasyonun yanlış olmasından kaynaklı hatalarla bozulacaktır. Sensör füzyon bu alanların etkilerinin azaltılmasını sağlar. Çoğu durumda ham sensör verilerinin kendisi, bu hataları düzeltmek için bir filtre olmadan yanlış sonuçlar üretmektedir.

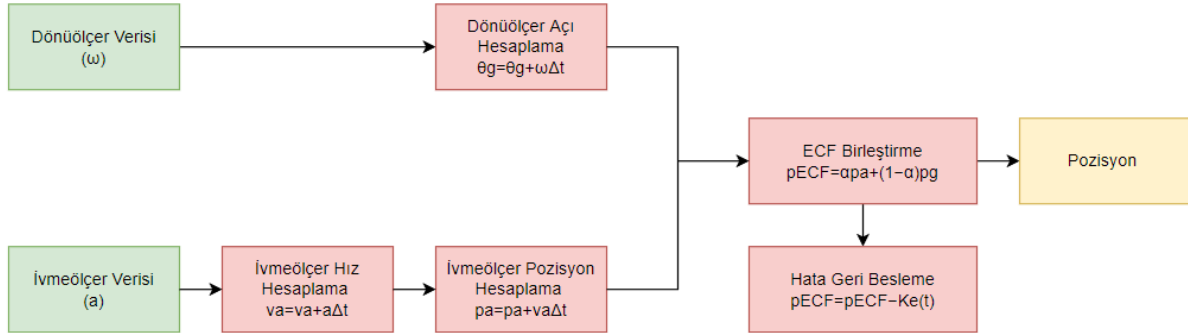
2.3.1 Belirgin Tamamlayıcı Filtre

Belirgin Tamamlayıcı Filtre, birden fazla sensörden gelen verileri bileştirip güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlayan bir filtreleme yöntemidir. İki veya daha fazla sensörün çıktılarını

birleştirmek için yaygın olarak kullanılmakta olup genellikle hız, ivme, konum gibi çeşitli değişkenleri tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

ECF, birincil ve ikincil sensörlerin çıktılarını birleştirirken, her bir sensörün avantajlarını ve dezavantajlarını dikkate alır. Birinci sensör, genellikle daha yavaş ancak düşük frekanslı sinyalleri doğru bir şekilde ölçebilirken, ikincil sensör daha hızlı ancak daha yüksek frekanslı sinyalleri doğru bir şekilde ölçebilir. ECF, sensörlerin çıkışlarındaki hataları doğrudan hesaba katar ve bu hataları minimize etmek için doğrudan bir geri besleme mekanizması kullanır.

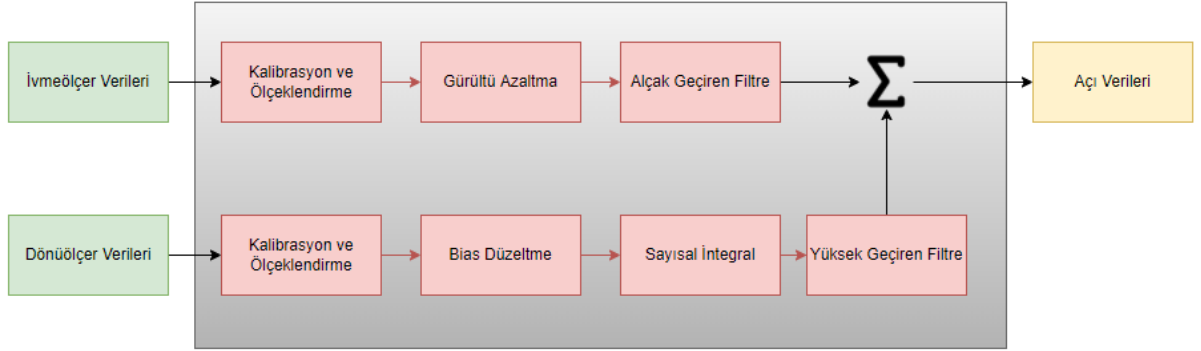
ECF, dönüölçerin yüksek frekanslı (kısa süreli) hassasiyetini ve ivmeölçerin düşük frekanslı (uzun süreli) doğruluğunu birleştirir. Yönelim ve açısal hız ölçümlerinde anlık değişiklikleri çok hassas şekilde algılar. Ancak, uzun süreli kullanımlarda sapma ve hata birikimi yaşanabilir. İvmeölçer, düşük frekanslı bileşenler için doğruluk sağlar. Yerçekimi vektörüne dayalı olarak eğim ölçümleri yapar ve uzun süreli kararlılık sağlar. Ancak, anlık değişikliklere karşı duyarlılığı daha düşüktür. ECF, dönüölçerin kısa süreli hassasiyetinden faydalanırken, ivmeölçerin uzun süreli doğruluğunu da kullanır. Geri besleme mekanizması sayesinde sensör verilerindeki hatalar minimize edilerek daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Bu bağlamda, ECF'nin performansını incelemiş ve bu filtrenin yüksek doğruluk ve kararlılık sağladığını belirtmişlerdir [61]. İvmeölçer ve dönüölçer verilerini kullanarak pozisyon tahmin süreci Şekil 15 ile gösterilmiştir.



Şekil 15. İvmeölçer ve Dönüölçer Verileri ile Pozisyon Tahmini Süreci

ECF, dönüölçer ve ivmeölçer verilerini birleştirmek için kullanılacağı zaman başlangıçta, dönüölçer verisi (ω) ile açısal pozisyon hesaplanır. Bu, dönüölçer sensöründen gelen açısal hız verileri kullanılarak gerçekleştirilir. Ardından, ivmeölçer verisi (a) kullanılarak sırayla hız ve pozisyon hesaplanır. Bu iki hesaplama, ECF birleştirme adımıyla birleştirilir. Bu adımda, ivmeölçer ve dönüölçer verileri belirli bir ağırlık (α ile temsil edilir) kullanılarak birleştirilir.

Bu, her iki sensörün de avantajlarını ve dezavantajlarını dengeler, böylece daha doğru bir sonuç elde edilir. Hesaplanan pozisyondaki hatalar geri besleme mekanizması ile düzeltilir. Bu, önceden belirlenmiş bir geri besleme katsayısı (K) ile pozisyon hatasının çarpılması yoluyla gerçekleştirilir. Bu hata düzeltmesi, daha doğru bir çıkış pozisyonu elde edilmesini sağlar. Genel olarak, ECF yöntemi, dönüölçer ve ivmeölçer gibi farklı sensörlerden gelen verileri birleştirerek daha doğru bir pozisyon tahmini sağlar ve ardından geri besleme mekanizması ile hataları düzelterek daha doğru sonuçlar elde eder [62]. İvmeölçer ve dönüölçer verilerini kullanarak açı tahmin süreci Şekil 16 ile gösterilmiştir.



Şekil 16. İvmeölçer ve Dönüölçer Verileri ile Açı Tahmini Süreci

Alçak geçiren filtre, yüksek frekanslı bileşenleri zayıflatırken düşük frekanslı bileşenlerin geçmesine izin verir. İvmeölçer verilerinde kullanıldığında, bu tür bir filtre yüksek frekanslı gürültüyü, kısa süreli titreşimler ve ani hareketler gibi dinamik ivmeleri zayıflatarak yerçekimi gibi düşük frekanslı bileşenleri vurgular. Bu, ivmeölçerden elde edilen verilerin daha pürüzsüz ve daha kararlı olmasını sağlar. Örneğin, cihazın eğimini hesaplamak için yerçekimi bileşenini izole etmek istendiğinde alçak geçiren filtre kullanılır. Dönüölçer verilerinde ise, alçak geçiren filtre yüksek frekanslı gürültüyü zayıflatarak daha pürüzsüz açısal hız verileri sağlar. Bu, dönüölçer verilerinin daha doğru ve kararlı olmasını sağlar, özellikle düşük frekanslı hareketler vurgulanır. Denklem (2.14) ile gösterilmiştir.

$$a_{\text{filtrelenmiş}}(t) = \alpha \cdot a_{\text{filtrelenmiş}}(t - 1) + (1 - \alpha) \cdot a(t) \quad (2.14)$$

Burada α alçak geçiren filtre katsayısıdır ve genellikle 0 ile 1 arasında bir değerdir. Bu katsayı, filtreleme işleminin ne kadar agresif olacağını belirler.

Yüksek geçiren filtre, düşük frekanslı bileşenleri zayıflatırken yüksek frekanslı bileşenlerin geçmesine izin verir. İvmeölçer verilerinde kullanıldığında, bu filtre yerçekimi gibi düşük frekanslı bileşenleri zayıflatarak ani hareketler ve titreşimler gibi yüksek frekanslı bileşenleri

vurgular. Bu, ivmeölçer verilerinden dinamik ivmeleri izole etmek ve yüksek frekanslı hareketleri analiz etmek için kullanılır. Örneğin, bir cihazın ani sarsıntılarını veya titreşimlerini analiz etmek istendiğinde yüksek geçiren filtre kullanılır. Dönüölçer verilerinde ise, yüksek geçiren filtre düşük frekanslı bileşenleri (örneğin, uzun süreli sabit dönüşler) zayıflatarak yüksek frekanslı açısal hız bileşenlerini vurgular. Bu, ani açısal hız değişikliklerini izole etmek ve analiz etmek için kullanılır. Örneğin, bir cihazın ani dönme hareketlerini izlemek istendiğinde yüksek geçiren filtre kullanılır. Denklem (2.15) ile gösterilmiştir.

$$g_{\text{filtrelenmiş}}(t) = g(t) - \alpha \cdot (g(t-1) - g_{\text{filtrelenmiş}}(t-1)) \quad (2.15)$$

Burada α yüksek geçiren filtre katsayısıdır ve genellikle 0 ile 1 arasında bir değerdir. Bu katsayı, dönüölçer verisinin ne kadarının korunacağını belirler.

Alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler genellikle birlikte kullanılarak hem düşük frekanslı bileşenlerin (statik eğim veya yerçekimi) hem de yüksek frekanslı bileşenlerin (dinamik hareketler veya titreşimler) doğru bir şekilde izlenmesini sağlar. Örneğin, bir belirgin tamamlayıcı filtre tasarımı alçak geçiren filtre ile ivmeölçer verilerinden düşük frekanslı yerçekimi bileşenini elde ederken, yüksek geçiren filtre ile dönüölçer verilerinden yüksek frekanslı hareket bileşenlerini elde eder. Bu şekilde, her iki sensör verisi de doğru bir şekilde birleştirilerek daha kararlı ve doğru bir pozisyon veya duruş tahmini yapılabilir. Bu filtrelerin doğru uygulanması, özellikle hareket izleme ve kontrol sistemlerinde, robotik uygulamalarda ve navigasyon sistemlerinde oldukça önemlidir. Sensör verilerinin gürültüden arındırılması ve anlamlı bilgiye dönüştürülmesi, sistemlerin performansını ve doğruluğunu önemli ölçüde artırır.

Dönüölçer, bir nesnenin açısal hızını ölçen bir algılayıcıdır. Algılayıcıdan elde edilen ham veriye zaman entegrasyonu yapılarak açı verileri hesaplanabilir. Denklem (2.16) ile gösterilmiştir.

$$\theta_{\text{gyr}}(t) = \theta_{\text{gyr}}(t-1) + \omega(t) \cdot \Delta t \quad (2.16)$$

$\theta_{\text{gyr}}(t)$; t zamanındaki açı (dönüölçer verisine dayalı)

$\omega(t)$; t zamanındaki açısal hız (dönüölçer verisi)

Δt ; Zaman adımı

İvmeölçer, bir nesnenin ivmesini ölçen bir algılayıcıdır. Üç eksen boyunca hareketin ivmesini algılayabilir, bu da cihazın hem doğrusal hareketleri hem de dönme hareketlerinin hesaplanmasını mümkün kılar. Denklem (2.17) ile gösterilmiştir.

$$\theta_a(t) = \arctan\left(\frac{a_y(t)}{a_z(t)}\right) \quad (2.17)$$

$\theta_a(t)$; t zamanındaki açı (ivmeölçer verisine dayalı)

$a_y(t)$; t zamanındaki y eksenini ivmesi

$a_z(t)$; t zamanındaki z eksenini ivmesi

Tamamlayıcı filtre, dönüölçer ve ivmeölçer verilerini birleştirerek daha doğru bir açı hesaplaması yapar. Dönüölçer verileri genellikle kısa süreli doğruluk sağlar, ancak zamanla kayma meydana gelir. İvmeölçer verileri ise uzun vadeli doğruluk sağlar, ancak gürültülü olabilir. Tamamlayıcı filtre, bu iki veriyi birleştirir. Denklem (2.18) ile gösterilmiştir.

$$\theta(t) = \alpha \cdot (\theta(t-1) + \omega(t) \cdot \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot \theta_a(t) \quad (2.18)$$

$\theta(t)$; t zamanındaki birleşik açı

α ; Filtre sabiti (genellikle 0.98 gibi bir değer seçilir)

$\theta(t-1)$; t-1 zamanındaki birleşik açı

$\omega(t)$; t zamanındaki açısal hız (dönüölçer verisi)

Δt ; Zaman adımı

$\theta_a(t)$; t zamanındaki açı (ivmeölçer verisine dayalı)

İvme verilerini kullanarak pozisyon hesaplamak için önce hız, sonra pozisyon hesaplanır. Ancak ivme verileri gürültülü ve kayma içerebilir, bu yüzden filtreler veya daha gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanmak gerekebilir. İvme verisinden hızı hesaplama Denklem (2.19) ile gösterilmiştir.

$$v(t) = v(t-1) + a(t) \cdot \Delta t \quad (2.19)$$

$v(t)$; t zamanındaki hız

$a(t)$; t zamanındaki ivme

Δt ; Zaman adımı

Hız verisinden pozisyonu hesaplama Denklem (2.20) ile gösterilmiştir.

$$p(t) = p(t - 1) + v(t) \cdot \Delta t \quad (2.20)$$

$p(t)$: t zamanındaki pozisyon

$v(t)$: t zamanındaki hız

Δt : Zaman adımı

2.4. Tahmin

Tahmin, çeşitli gözlemlerden elde edilen bilgileri kullanarak bilinmeyen parametreleri hesaplama süreci olarak tanımlanabilir. Temel olarak, bilinen parametrelerin sayısı bilinmeyen parametrelerin sayısına eşit olduğunda, bilinmeyen parametreler doğru bir şekilde bulunabilir. Ayrıca, ilgilenilen sistem doğrusal ise, ölçümlerden elde edilen bilgi Denklem (2.21) olarak ifade edilebilir.

$$z = Hx + \eta \quad (2.21)$$

z ; Ölçüm Vektörü

H ; Gözlem

η ; Ölçüm Gürültüsü

Ölçüm gürültüsü, ölçüm ekipmanından, teknikteki kusurlardan veya çevresel koşullardan kaynaklanan rastgele hatalardan oluşur. Bilinen ölçümlerin sayısı, bilinmeyenlerin sayısına eşitse, problem çözülebilir. Ancak, ölçümlerin sayısı bilinmeyenlerden fazlaysa, problemin optimal bir çözümü bulunabilir. Bu noktada en küçük kareler tahmini devreye girer. En küçük kareler tahmini, minimum kalıntıya sahip en uygun durumu hesaplar. Kalıntılar, ölçümler ile bilinmeyenlerin tahmini arasındaki farklardır. Bu yöntem, tahmin edilen değerlerin ölçümlerle en iyi uyum sağladığı durumu belirler. Bu yöntem, minimum kalıntıya sahip durumu seçerek en olası, en kesin ve en doğru tahmini verir [63].

Ölçümlerden bir tahmin hesaplamak için en küçük kareler yöntemi kullanılarak, aşağıdaki hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu yöntemde, kalıntılar (ölçümler ile bilinmeyenlerin tahmini arasındaki farklar) minimum olacak şekilde belirlenir. Denklem (2.22), bu durumu matematiksel olarak ifade eder ve çözüm sürecinde kullanılır.

$$v = z - H\hat{x} \quad (2.22)$$

Burada $\hat{x}$, bilinmeyen parametrelerin en küçük kareler tahmini vektörüdür. Ölçümlerin sayısının bilinmeyenlerin sayısından az olduğu durumlar için optimal çözüm mümkün değildir. Ayrıca, bilinmeyen parametreler zamanla değişken değilse, ölçümler optimal bir tahmin yapmak için yeterli değildir. Bu durumda, sistemin belirli bir zaman aralığındaki dinamik davranışını bilmek gerekir. GNSS/IMU entegre sistemleri, bu tür hesaplamalar için iyi bir örnektir. Sistemlerin dinamik davranışını anlamak için bilgi kullanılarak daha iyi tahminler yapılabilir. Ölçüm sayısından kaynaklanan sınırlamalar ortadan kalkar, bu nedenle bilinmeyenlerin sayısından daha az ölçüm olduğu durumlarda tahmin yapmak mümkün olacaktır. Lineer zamanla değişen sistem dinamiği ve ölçüm modelleri Denklem (2.23) ve Denklem (2.24) ile gösterilmiştir.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)w(t) \quad (2.23)$$

$$z(t) = H(t)x(t) + \eta(t) \quad (2.24)$$

‘Nokta’ zaman türevini temsil eder.

$F(t)$; Sistem dinamikleri matrisi

$G(t)$; Sistem gürültüsünün şekillendirme matrisi

$w(t)$; Kovaryansı $Q(t)$ olan süreç gürültüsü

Denklem (2.23) ve Denklem (2.24), en iyi sonucu elde etmek için sistemin hem ölçümlerini hem de dinamiklerini kullanan KF’nin temelini oluşturmaktadır. Ayrık zamanlı sistemler üzerinden gerçekleşen denklemler aşağıda Denklem (2.25) ve Denklem (2.26) şeklinde gösterilmiştir:

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1,k}x_k + G_k w_k \quad (2.25)$$

$$z_k = H_k x_k + \eta_k \quad (2.26)$$

x_{k+1} ; k+1 zaman anındaki durum vektörü,

x_k ; k zaman anındaki durum vektörü

$\Phi_{k+1,k}$; k zaman anından k+1 zaman anına kadar sistem dinamikleri matrislerinden hesaplanan durum geçiş matrisi

G_k ; k zaman anındaki sistem gürültüsünün şekillendirme matrisi

w_k ; Kovaryansı Q_k olan k zaman anındaki süreç gürültüsü

z_k ; k zaman anındaki ölçüm vektörü

H_k ; k zaman anındaki ölçüm matrisidir,

η_k ; Kovaryansı R_k olan k zaman anındaki ölçüm gürültüsüdür.

Sistem dinamiklerinin k zaman anından (k+1) zaman anına kadar değişmediği varsayımıyla, durum geçiş matrisinin hesaplanması, sistem dinamiklerinde Taylor serisi açılımı kullanılarak yapılmaktadır. Durum geçiş matrisinin denklemleri, Denklem (2.27) ile gösterilmiştir. Sapmalar ve gürültüler Gauss-Markov, beyaz Gauss, rastgele sabit gibi uygun modellerin seçilmesiyle iyi modellenenilmektedir.

$$\Phi \approx e^{F\Delta t} = I + F\Delta t + \frac{(F\Delta t)^2}{2!} + \frac{(F\Delta t)^3}{3!} + \dots \quad (2.27)$$

Burada I birim matris ve Δt iki zaman arasındaki anın aralığıdır. Birinci dereceden Taylor açılımı, yüksek dereceli terimlerin ihmal edildiği varsayımıyla durum geçiş matrisi olarak Denklem (2.27)'nin ilk iki terimini kullanır. Süreç gürültüsü matrisi, her bir köşegen elemanın o zaman anındaki süreç gürültüsünün beklenen değerine sahip olduğu bir köşegen matristir. Denklem (2.28) ile gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$Q_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi_{k+1,\tau} G(\tau) Q(\tau) G^T(\tau) \Phi_{k+1,\tau}^T d\tau \quad (2.28)$$

Zaman anları t_k ve t_{k+1} arasında sabit süreç gürültüsü varsayımı kullanılarak, süreç gürültüsü Denklem (2.29) ile gösterildiği verildiği gibi olur. UKF hesaplama yükü EKF hesaplamasından daha büyüktür. UKF, EKF'den daha fazla kaynak kullanabilir, bu nedenle gerçek zamanlı uygulamalar için EKF tercih edilir.

$$Q_k \approx \frac{1}{2} [\Phi_k G_{t_k} Q_{t_k}^T + G_{t_k} Q_{t_k} G_{t_k}^T \Phi_k^T] \Delta t_{k+1} \quad (2.29)$$

2.5. Kalman Filtre

KF algoritması, belirsizlik durumunda sistem durumlarını tahmin etmek ve kestirim sonuçları için kullanılan güçlü bir filtreleme yönetimidir. Hedef izleme, navigasyon ve kontrol gibi uygulamalarda temel bir bileşen olarak kullanılmaktadır ve birçok izleme ve veri tahmin görevleri için optimal çözüm olarak kabul edilmektedir [64]. Günümüzün modern sistemlerinde, sistemdeki bilinmeyen durumları tahmin etmek için birkaç algılayıcıdan elde edilen verileri birleştirir. Örneğin, bir GNSS alıcısı konum ve hızı tahmin edebilir. Konum ve hız bilinmeyen durumları temsil ederken, uydulardan gelen sinyallerin geliş zamanının diferansiyel ölçümü, ölçüm verisi olarak kullanılır. İzleme ve kontrol sistemlerinin en büyük

zorluklarından biri, belirsizlik durumunda gizli durumların doğru ve kesin tahminini sağlamaktır. GNSS alıcılarında, termal gürültü, atmosferik etkiler, uydu konumlarındaki küçük değişiklikler, alıcı saat hassasiyeti ve benzeri dış faktörler ölçüm belirsizliklerine neden olur. Ölçümler kesin ve belirli bir hata payı taşısa da KF bu belirsizlikleri minimize ederek sistemin gizli durumlarını tahmin etmek için tasarlanmıştır.

2.5.1 Kalman Filtre Algoritması

Kalman Filtresi'nin iki ana aşaması mevcuttur: tahmin ve ölçüm güncellemeleri. İşleme başlamadan önce, filtre uygun şekilde başlatılmalıdır. Yanlış bir başlatma, filtrenin yanlış sonuçlara ulaşmasına neden olabilir. Tez çalışmasında kullanılan KF algoritması için de bazı varsayımlar vardır ve bunlar aşağıda özetlenmiştir:

- Doğrusallık Varsayımı: Kalman Filtresi, doğrusal sistemler için optimal bir çözümdür. Bu nedenle hem süreç hem de ölçümler doğrusal modeller olarak tanımlanmalıdır. Bu, sistem dinamiklerinin ve ölçüm modellerinin doğrusal matris denklemleri ile ifade edilmesini gerektirir.
- Ayırık Zaman Modelleri: KF, tahmin edilecek sürecin ve ölçümlerin ayırık zaman noktalarında gerçekleştiğini varsayar. Hem süreç hem de ölçümler Denklem (2.23) ve Denklem (2.24) ile gösterildiği gibi ayırık zaman modelleriyle temsil edilir.
- Gürültü Varsayımları: Sistem (süreç) gürültüsü w_k ve ölçüm gürültüsü η_k sıfır ortalamalı beyaz gürültü süreçleridir ve kovaryans fonksiyonları Q_k , R_k olarak bilinir. Bu fonksiyonların pozitif tanımlı olması gerekir. Q_k , IMU sensör hatalarıyla ilişkili süreç gürültüsünü temsil eden pozitif tanımlı bir matristir. R_k , yardımcı sensör hatası ve kısıtlamalarla ilişkili ölçüm gürültüsünü temsil eden pozitif tanımlı bir matristir.
- Başlatma: Başlatma yanlış yapılırsa, filtre sapabilir ve hatalı sonuçlar verebilir. İlk durum vektörünün, ölçüm ve süreç gürültüleri ile ilişkisiz rastgele bir vektör olduğu varsayılır. Bu başlatma, sistemin gerçek başlangıç durumuna mümkün olduğunca yakın olmalıdır.

KF, sürekli tekrarlanan bir ardışık algoritmadır. Başlatma tamamlandıktan sonra, bir sonraki durum vektörü hakkında tahmin yapılır. Yardımcı sistemden gelen ölçümler, tahmin edilen durum vektörünü düzeltmek için kullanılır. Bu iki aşama, KF'nin ölçüm verilerini kullanarak sistem durumlarını tahmin etmesini sağlar.

2.5.1.1 KF Tahmin

KF tahmin aşamasında, önceki zaman diliminin en iyi tahmini, Denklem (2.27) ile belirtilen durum geçiş matrisi kullanılarak gerçekleştirilir. Süreç gürültüsü sıfır ortalamalı kabul edildiği için, tahmin edilen durum vektörü Denklem (2.30) ile gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\hat{x}_{k+1}^- = \Phi_{k+1,k} \hat{x}_k^+ \quad (2.30)$$

Burada, $\hat{x}_k^+$ tahmin edilen parametreyi ifade ederken, üst simge '+' ölçümden önceki tahmin edilen parametreyi, üst simge '-' ise son ölçümden sonraki güncellenmiş değeri belirtir. Tahmin edilen durum vektörünün yalnızca durum geçiş matrisi yani sistem dinamikleri ve son bilinen güncellenmiş durum ile ilişkili olduğu unutulmamalıdır. Hata kovaryans matrisinin hesaplanması da benzer şekilde yapılır. Bu matris, süreç gürültüsünden kaynaklanan hata yayılımını temsil eder ve zaman anı k ile $k + 1$ arasındaki periyodu kapsar.

$$P_{k+1}^- = \Phi_{k+1,k} P_k^+ \Phi_{k+1,k}^T + Q_k \quad (2.31)$$

- $\hat{x}_k$; Durum Vektörü
- P_k ; Hata Kovaryans Matrisi
- $\Phi_{k+1,k}$; Durum Geçiş Matrisi
- Q_k ; Süreç Gürültüsü

Tahmin edilen hata kovaryans matrisinin sistem süreç gürültüsü Q_k ve önceki zaman dilimindeki güncellenmiş hata kovaryansı P_k^+ ile ilişkili olduğu belirtilmelidir. Bu matris, zaman içinde hata yayılımını ve sistemin güvenilirliğini anlamak için kritik bir rol oynar.

2.5.1.2 KF Güncelleme

Yardımcı sistem ölçümü mevcut olduğunda, bu ölçüm tahmin edilen durumdaki hataları düzeltmek için kullanılır. Yardımcı sistemden gelen yeni bilgiler, tahmin edilen hata kovaryans matrisi P_{k+1}^- ve ölçüm gürültüsü kovaryansı R_{k+1} kullanılarak ağırlıklandırılmalıdır. Kalman kazancının hesaplanması, tahminin ortalama kare hatasını en aza indirmeyi amaçlar.

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1}^- H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad (2.32)$$

Kalman kazancı, yeni ölçümden tahmin edilen durum hakkında ne kadar düzeltme yapılacağını belirlemede anahtar bir parametredir. Denklem (2.32), yeni ölçüm gürültülü ise ölçüm gürültüsü kovaryansının daha yüksek olmasının beklendiğini veya tahmin edilen hata

kovaryansı daha düşükse KF'nin yeni ölçüm yerine tahmin edilen değerlerin doğruluğunu gösterdiğini belirtir. Buna karşılık, yeni ölçüm doğru ve daha az gürültülü ise veya tahmin edilen hata kovaryansı daha yüksekse, KF ölçümü doğruluğunu artıracaktır. Kalman kazancı parametresi, düzeltmenin genliğini belirler. GNSS ölçümleri doğruysa, K büyük bir genliğe sahiptir ve ölçüm gürültüsü kovaryans matrisi R_{k+1} daha küçük olur.

Tahmin edilen durum vektörü ile ölçüm arasındaki karşılaştırma, Denklem (2.33) ile gösterildiği gibi Kalman kazancı kullanılarak yapılır.

$$\hat{x}_{k+1}^+ = \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1}(z_{k+1} - H_{k+1}\hat{x}_{k+1}^-) \quad (2.33)$$

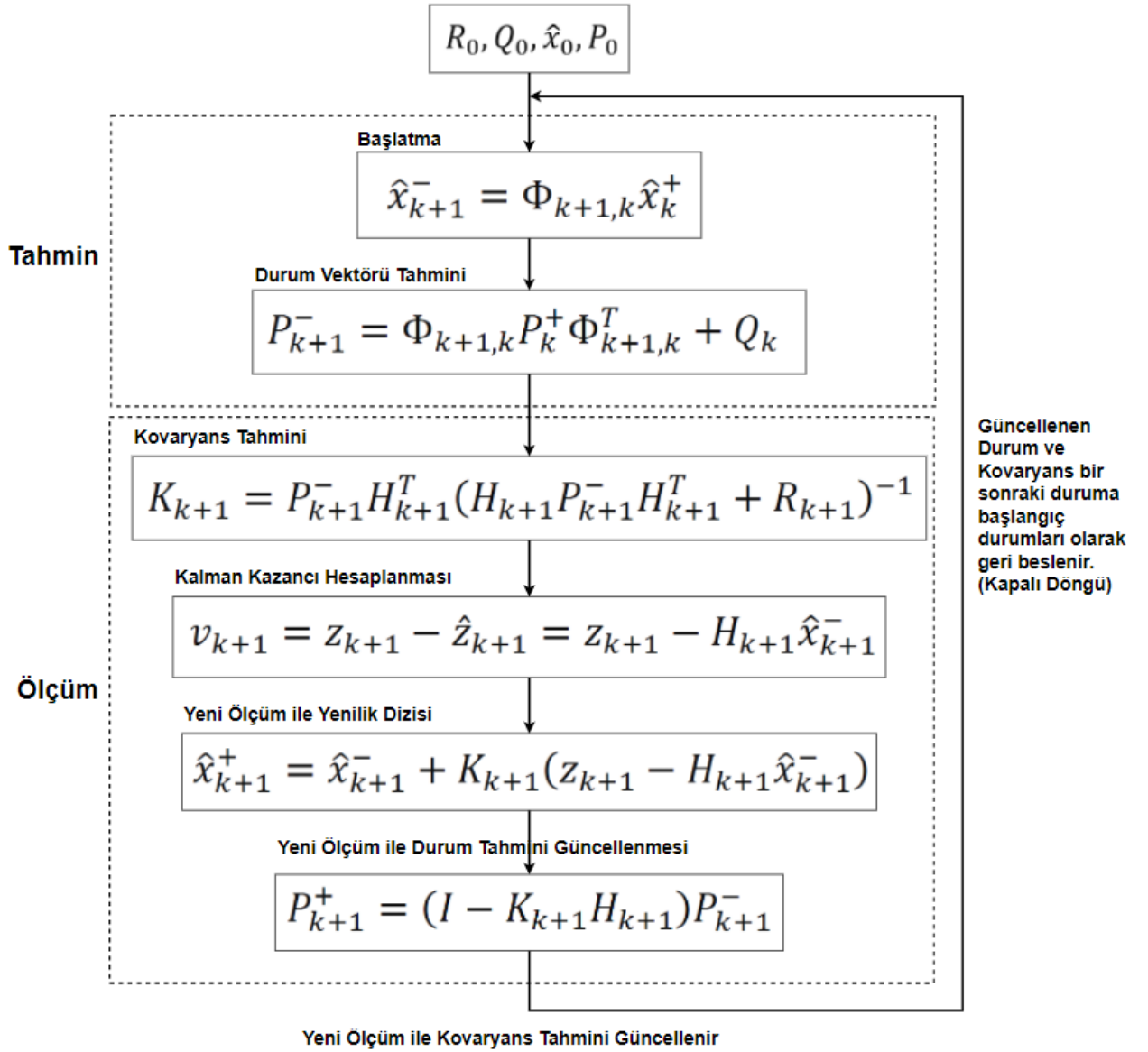
Burada $H_{k+1}\hat{x}_{k+1}^-$ tahmin edilen ölçüm ve z_{k+1} , $k + 1$ zaman anında yapılan doğru ölçümdür. Her ikisi de Denklem (2.34) gösterilen yenilik dizisini v_{k+1} oluşturur.

$$v_{k+1} = z_{k+1} - \hat{z}_{k+1} = z_{k+1} - H_{k+1}\hat{x}_{k+1}^- \quad (2.34)$$

Yenilik dizisi, ölçümde gelen yeni bilginin miktarını ifade eder ve daha önce açıklandığı gibi Kalman kazancı ile ağırlıklandırılır. Hata kovaryansı, mevcut zaman anı için tahmin edilen hata kovaryans matrisi ve Kalman kazancı kullanılarak Denklem (2.35) ile gösterildiği gibi güncellenir. Hata kovaryans matrisi, hata analizi ve bir sonraki zaman diliminin tahmin öncesi başlatılması için kullanılmaktadır.

$$P_{k+1}^+ = (I - K_{k+1}H_{k+1})P_{k+1}^- \quad (2.35)$$

Güncellenmiş hata kovaryans matrisi, bir sonraki durum için güncellenmiş (düzeltilmiş) durum vektörü $\hat{x}_{k+1}^+$ üzerindeki güvenilirlik düzeyini gösterir. Genel Kalman filtre algoritması Şekil 17 ile gösterilmiştir.



Şekil 17. Kalman Filtre Algoritması

2.5.2 Doğrusal Olmayan Kalman Filtre

KF'nin optimizasyonu hakkında önceki bölümde yapılan varsayımlardan biri, süreç ve ölçüm modellerinin doğrusal modeller olarak tanımlanması gerektiğidir. Ancak, GNSS ve IMU entegrasyonu gibi uygulamalarda kullanılan matematiksel model ve denklemler doğrusal değildir. Doğrusal olmayan sistemler için yapılan ilk çalışmalar 1960'larda Apollo uzay görevlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların temel amacı, doğrusal olmayan bir sistemi doğrusal hale getirerek KF algoritmasını uygulamaktır. Doğrusal olmayan süreç ve ölçüm modelleri, Denklem (2.36) ve Denklem (2.37) ile gösterilmiştir.

$$x_{k+1} = f(x_k, k) + w_k \quad (2.36)$$

$$z_{k+1} = h(x_{k+1}, k + 1) + \eta_{k+1} \quad (2.37)$$

Burada f ve h doğrusal olmayan, bilinen sistem ve gözlem fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların lineerleştirilmesi, bunların nominal yörüngeden sapmalarını ifade eder.

$$x_{k+1} = x_{k+1}^* + \delta x_{k+1} \quad (2.38)$$

Burada '*' referans olarak kullanılacak değeri, 'δ' ise referans değerden sapmayı ifade eder. Bu nedenle, doğrusal olmayan sistemler üzerinde çalışılırken, KF tüm durumlar yerine hata durumlarını tahmin eder. Hata durumları, tahmin edilen durumlar ve ölçüm durumları arasındaki farkı temsil eder. Sistem ve ölçüm denklemleri, Denklem (2.39) ve Denklem (2.40) ile gösterilmiştir.

$$\delta x_{k+1} = \phi_{k+1,k} \delta x_k + w_k \quad (2.39)$$

$$\delta z_{k+1} = H_{k+1,k} \delta x_{k+1} + \eta_{k+1} \quad (2.40)$$

Diğer alt bölümlerde doğrusal olmayan sistemlerin lineerleştirilmesi için kullanılan üç yöntem açıklanacaktır. İlk iki yöntem, sistem ve süreç modellerinin lineerleştirilmesi için Taylor serisi açılımı veya Jacobian kullanır. Üçüncü yöntem, Gaussian dağılım özelliklerine odaklanır ve dağılımdan sigma noktaları seçerek lineerleştirme yapar. Bu yöntemler sırasıyla Doğrusallaştırılmış LKF, Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve Üçüncü yöntem Unscented Kalman Filtresi (UKF) olarak adlandırılır.

2.5.3 Lineer Kalman Filtre

Denklem (2.39) ve Denklem (2.40) ile hesaplanan farklı varsayımlara dayalı olarak, birinci dereceden Taylor serisi açılımı, sistem geçiş matrislerini ($\phi_{k+1,k}$) ve ölçüm matrislerini (H_{k+1}) hesaplamak için uygulanabilir. Denklem (2.27) ile gösterildiği verildiği gibi, doğrusal olmayan bir durum dinamikleri matrisi F türevlenebilir ise, Jacobian matrisi ile lineerleştirilebilir. Bu nedenle, $\phi_{k+1,k}$, Jacobian sistem dinamikleri ile lineerleştirilmiş sistem modeli olarak temsil edilebilir. Benzer şekilde, doğrusal olmayan bir gözlem matrisi H türevlenebilir ise, Jacobian matrisi ile lineerleştirilebilir. Bu nedenle, $H_{k+1,k}$, Jacobian gözlemleri ile lineerleştirilmiş ölçüm (sensör) modeli olarak temsil edilebilir.

Jacobian matrislerinin değerlendirilmesi için, LKF bilinen bir yörünge kullanır. LKF, genellikle bir sistemin tasarımının başlangıç aşamasında veya lineerleştirme için küçük

pertürbasyon varsayımını bozmadan referans bir yörünge oluşturulabilecek uygulamalarda kullanılır. Bu uygulamalar, bir uçak rotası veya yıllarca aynı yörünge ile dünya etrafında dönecek bir uydu gibi uygulamaları içerir. Ayrıca GNSS/IMU uygulamaları için de kullanılır. GNSS/IMU uygulamalarında, mekanizasyon denklemleri çıktısı mevcut zaman dilimi için referans yörünge olarak kabul edilir.

LKF, hesaplanan pertürbasyonların KF'den doğrudan referans yörüngesinden çıkarıldığı ve hesaplanan pertürbasyonların atalet navigasyon sistemine geri beslenmediği açık döngü bir konfigürasyondur [65].

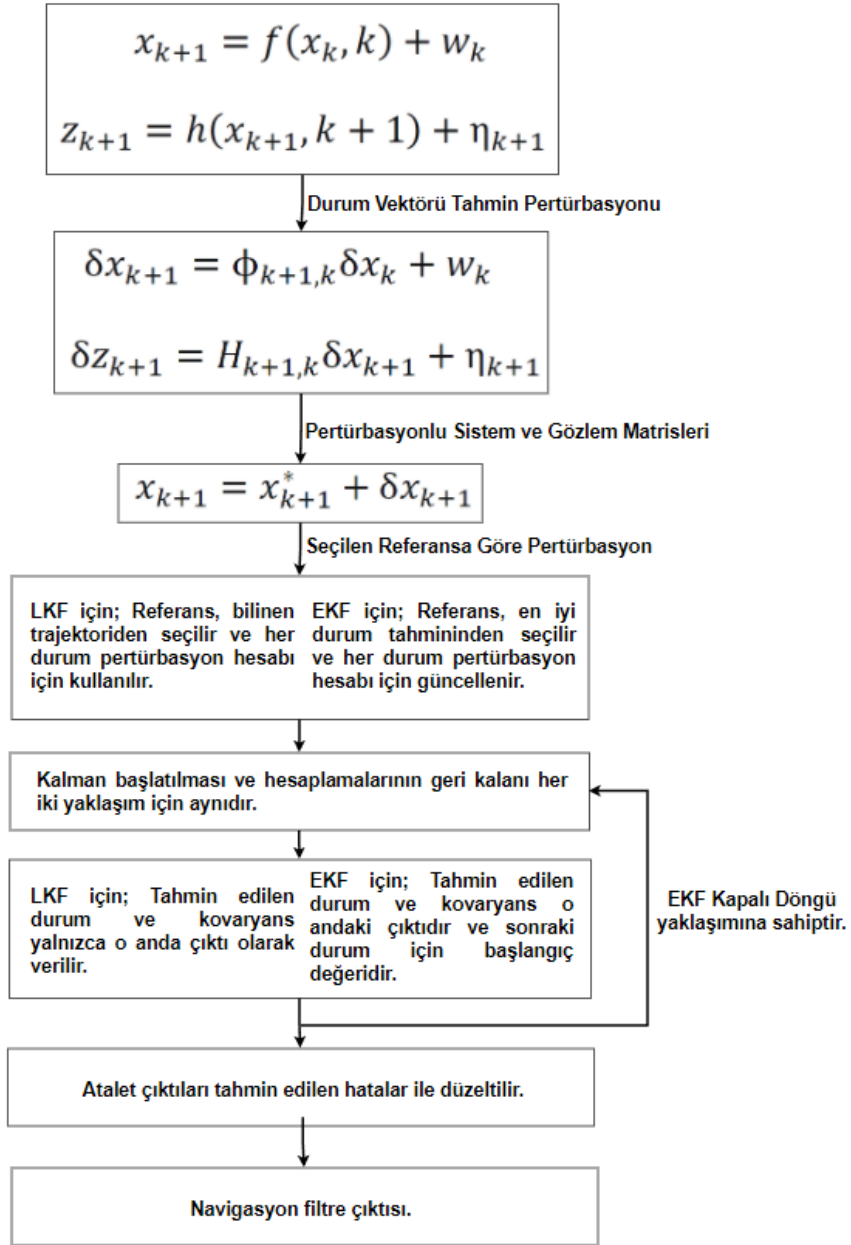
2.5.4 Genişletilmiş Kalman Filtre

EKF, Kalman Filtresi'nin doğrusal olmayan sistemlerin izlenmesi ve tahmin edilmesi için kullanılan bir türüdür. Eğer bir sistemdeki dinamik veya ölçüm ilişkilerinden biri veya birkaçı doğrusal değilse, bu sistem için Kalman Filtresi uygulanmadan önce doğrusallaştırılması gerekir. Bu nedenle, son tahmin yakınında ilişki Taylor serisi ile genişletilir. İkinci dereceden ve daha yüksek terimler ihmal edilerek doğrusallaştırılır. Daha sonra Kalman Filtresi, bu doğrusallaştırılmış ilişkiler üzerinde uygulanır. EKF, iki temel adımdan oluşur: tahmin ve güncelleme adımları. Bu adımlar, sistem hakkındaki tahminleri ve mevcut ölçümleri birleştirerek sistem durumunun daha doğru bir tahminini sağlar. EKF kullanılarak birçok sensör füzyonu içeren bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir:

Ailneni ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, ölçümleme metodolojisini ve Atalet Ölçüm Birimi'ni kalibre etmek için izlenen test prosedürünü sunmayı amaçlamışlardır. Amaç, bir MEMS AÖB'nin üç eksenli ivmeölçer ve dönüölçer hatalarını belirlemektir. Elde edilen ölçümleme sabitleri, EKF tabanlı bir füzyon algoritmasında kullanılmıştır. Kalibrasyonun Euler açıları ve konum tahmini üzerindeki etkisi açıkça ortaya konmuştur [66]. Bhise ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, görsel bilgilerden hedefin mevcut konumunu tahmin etmek ve ardından gözlem dizisini kullanarak gelecekteki konumunu tahmin etmek için EKF kullanmışlardır. Hedef hareket modeli, hedef yörüngesinin yaklaşık bilinen modeli dikkate alınarak geliştirilmiştir [67]. Sun ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, araç navigasyonu için düşük maliyetli IMU, GPS ve monoküler Görüntü Odometri (VO) sensörleri ile kullanım için çok sensörlü bir bütünleşmiş navigasyon algoritması geliştirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirilen EKF tabanlı füzyon algoritması, nispeten düz alanlarda araç konumlandırma ve dinamik durum tahmininde yüksek performans sağlamıştır [68]. Tailanian

ve arkadaşları çalışmalarında, quadrotorun otonom uçuşunu sağlamak için kullanılan sensör füzyonunun tasarımını amaçlamışlardır. Sensör füzyonu, EKF ile yapılmıştır. Bunlardan biri AÖB tarafından sağlanan verileri birleştirmiş, diğeri de GNSS tarafından sağlanan bilgileri birleştirmiştir. Deneyler sonucunda istikrarlı bir otonom platform elde edilmiştir [69]. Balzer ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, düşük maliyetli GNSS alıcısı ve IMU için Doppler Etkisinin gölgelenmesi veya kaybindan kaynaklanan kötü sinyal kalitesini idare edebilen AEKF için yeni bir yaklaşım sunmayı amaçlamışlardır. Filtre uygulaması bir benzetim içinde ve gerçek verilerle test edilmiş ve sonuç olarak standart bir EKF'ye kıyasla önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir [70].

Çoğu gerçek zamanlı navigasyon uygulamasında, rastgele yörüngelerin sıkça meydana geldiği durumlarda referans bir yörünge bulmak mümkün değildir. Ayrıca, referans yörünge ile hesaplanan tahminler arasındaki fark zamanla büyüyebilir ve küçük pertürbasyon varsayımının geçerli olmayabileceği olasılığı vardır. Jacobian matrislerinin referans yörüngesine göre değil, en iyi durum tahminine göre hesaplandığı başka bir doğrusal hale getirme yöntemi daha vardır. Bu yöntemde, en iyi tahminler KF'yi başlatır ve tahmin edilen değer mevcut zaman dilimi için Jacobian matris hesaplamaları için referans yörünge olarak kullanılır. Bu yöntem, atalet navigasyon sisteminin çıktısını hesaplamadan önce son hesaplanan güncellenmiş durumu kapalı döngü bir konfigürasyon oluşturarak kullanır. En iyi tahminlerle referans yörüngede güncelleme yaparak, referans ile tahmin edilen durumlar arasındaki büyük farktan kaynaklanan hata artışı sınırlıdır. Ancak, başlangıç değerleri yüksek derecede hatalı ve gürültülü ise, filtrenin tahminlerinden sapma olasılığı hala vardır [71]. LKF ve EKF algoritması Şekil 18 ile gösterilmiştir.



Şekil 18. LKF ve EKF Algoritması

2.5.5 Kokusuz Kalman Filtre

UKF, verilen ortalama ve kovaryans değerlerinden birkaç noktanın örneklenmesi ve bu seçilen örneklemeler ile doğrusal olmayan sistemlerin lineerleştirilmesi yöntemine dayanan bir filtredir. Doğrusal hale getirilmiş noktalar, dönüştürülmüş ortalama ve kovaryansı oluşturur. EKF'de tahminler yalnızca önceki zaman anından gelen ortalama değerine bağlıdır ve kovaryans, doğrusal Kalman filtre denklemlerinde olduğu gibi hesaplanır. Ancak, birinci

dereceden terimlerdeki yaklaşımlar yüksek hatalara sahipse, Kalman filtresi optimal çalışmayabilir ve doğru ortalama ve kovaryanstan tamamen sapabilir [72].

Geçmişte UKF hakkında araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. UT (Unscented Transform-Kokusuz Dönüşüm) için ilk öneri Julier ve Uhlmann tarafından sunulmuş olup [73], daha sonra Wan ve Merwe bu dönüşümün UKF'ye adaptasyonları üzerinde çalışmış ve IMU/GNSS entegre sistemlerindeki performansını gözlemlemişlerdir [74]. EKF ile karşılaştırıldığında bazı durumlarda daha iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen, bazı durumlarda Euler açısı hesaplamalarından kaynaklanan tekillikler meydana gelmiştir [75]. Bu sorun, kuaterniyonlar kullanılarak çözülmüştür [76]. Ayrıca, Wan ve Merwe, UKF'nin doğrusal olmayan tahmin üzerindeki performansını inceleyerek, EKF ile karşılaştırmalarını sunmuşlardır [77].

UKF'nin uygulanmasındaki en büyük endişe, doğrusal olmayan tahminde gerçek zamanlı uygulamalarda hesaplama yüküdür. Çok sayıda sigma noktası olan sistemler için, bu ek dönüşüm önemli bir hesaplama yüküne yol açabilir; EKF'de bu dönüşüm yapılmaz ve bu da daha düşük bir hesaplama yükü sağlar [75]. Ayrıca, UKF ile ilgili çeşitli ek çalışmalar da yapılmıştır. Hin, Cholesky güncelleme algoritmalarının yanı sıra kare kök UKF kullanma yöntemini sunmuşlardır [78]. Aynı zamanda, sigma noktalarının azaltılması için yöntemler geliştirilmiştir [76].

UKF'nin temelinde UT yer alır. UT, doğrusal olmayan bir dönüşümün sonucunu hesaplamak için belirli sayıda sigma noktası kullanır. Bu noktalar, sistemin durum uzayını ve olasılık dağılımını temsil eder. UT, verilen ortalama ve kovaryansa göre bir dizi ağırlık ve sigma noktası örneklemeye dayanan bir prosedürdür. Seçilen ağırlıklar ve sigma noktaları aşağıdaki koşulları sağlar:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{p-1} w_i = 1 \\ \sum_{i=0}^{p-1} w_i X_i = \hat{x} \\ \sum_{i=0}^{p-1} w_i (X_i - \hat{x})(X_i - \hat{x})^T = P \end{cases} \quad (2.41)$$

w_i ; Ağırlıklar

X_i ; Sigma noktaları

p ; Sigma noktalarının sayısı

$\hat{x}$; Ortalama

P ; Kovaryans

Denklem (2.41), UT'nin gerçekleştirilmesi hakkında bir fikir verir. Ağırlıkların seçilmesi ile ilgili olarak, belirsizlik seviyesini aşmak için iki kısıtlama vardır.

1. 0^th ağırlık serbest bir parametredir ve tasarımcı tarafından serbestçe seçilebilir.
2. 0^th ağırlık ortalamaya eşittir ve diğer tüm ağırlıklar ortalama merkezlenmiş bir küre üzerinde bulunur.

Kısaca UT denklemleri Denklem (2.42) ve Denklem (2.43) ile gösterilmiştir.

$$X_i = \begin{cases} \bar{x} & , i = 0 \\ \bar{x} + \sqrt{n + \kappa P_x} & , i = 1, \dots, N \\ \bar{x} - \sqrt{n + \kappa P_x} & , i = N + 1, \dots, 2N \end{cases} \quad (2.42)$$

$$w_i = \begin{cases} \frac{\kappa}{n + \kappa} & , i = 0 \\ \frac{1}{2(n + \kappa)} & , i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.43)$$

Burada κ dördüncü ve daha yüksek dereceli doğrusal olmayanları ayarlamak için kullanılan bir ölçeklendirme parametresidir ve P verilen olasılık dağılım fonksiyonu için kovaryans matrisidir. κ genellikle sıfır olarak atanır [78].

Standart UT ile yukarıdaki kısıtlamalar uygulanmış olsa bile, özellikle duruş açıları için büyük belirsizlikler olabilir. Bu nedenle, [79] sigma noktalarını ölçeklendiren ve bu yöntemi SUT (Scale Unscented Transform-Ölçeklendirilmiş Kokusuz Dönüşüm) olarak adlandıran güncellenmiş bir UT yöntemi sunmuştur.

Sigma noktaları ve ağırlıklar aşağıdaki denklemler kullanılarak ölçeklendirilebilir. Sigma noktaları için [74]:

$$X_i = \begin{cases} \bar{x} & , i = 0 \\ \bar{x} + \alpha \sqrt{n + \kappa P_x} & , i = 1, \dots, N \\ \bar{x} - \alpha \sqrt{n + \kappa P_x} & , i = N + 1, \dots, 2N \end{cases} \quad (2.44)$$

Burada α , 0.0001 ile 1 arasında değerler alan küçük bir pozitif ölçek faktörüdür. SUT'da, ağırlıklar Denklem (2.45) ve Denklem (2.46) ile gösterildiği gibi ortalama ve varyans için farklı şekilde ölçeklendirilir.

$$w_i^m = \begin{cases} \frac{w_0 - 1}{\alpha^2} + 1 & , i = 0 \\ \frac{w_i}{\alpha^2} & , i = 1, \dots, 2N \end{cases} \quad (2.45)$$

$$w_i^c = \begin{cases} \frac{w_0 - 1}{\alpha^2} + 2 + \beta - \alpha^2, & i = 0 \\ \frac{w_i}{\alpha^2}, & i = 1, \dots, 2N \end{cases} \quad (2.46)$$

Burada w_i^m dönüştürülmüş ortalama için ölçeklendirilmiş ağırlıkları ve w_i^c dönüştürülmüş kovaryans için ölçeklendirilmiş ağırlıkları ifade eder, β daha yüksek dereceli etkileri azaltmak için başka bir parametredir ve Gauss dağılımları için optimal değer 2'dir [76]. Yukarıda verilen ağırlıklar ve sigma noktalarının başlangıçta verilen üç koşul için doğru olmalıdır. Hesaplamalar burada verilmemiştir, ancak [74]'de bulunabilir.

Doğrusal olmayan bir sistem dinamikleri matrisi ve eklemeli Gaussian gürültüsü ile bir ölçüm matrisinin varlığı varsayımıyla, Koksuz Kalman Filtrele algoritması aşağıda verilmiştir.

$$x_{k+1} = f(x_k, k) + w_k, \text{ burada } Q_k = E[w_k w_k^T] \quad (2.47)$$

$$z_{k+1} = h(x_{k+1}, k+1) + \eta_{k+1}, \text{ burada } R_{k+1} = E[\eta_{k+1} \eta_{k+1}^T] \quad (2.48)$$

İlk adım başlatıldığında,

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad (2.49)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \quad (2.50)$$

Bir sonraki adım, Denklem (2.45) ve Denklem (2.46) ile verilen SUT denklemlerine göre ağırlıkları ve sigma noktalarını hesaplamaktır. Bu adımdan sonra, Kalman filtresi INS çıktısına dayanarak tahmin durumunu başlatabilir. Hesaplanan sigma noktalarının dönüşümü, doğrusal olmayan sistem dinamikleri matrisi aracılığıyla yapılır.

$$\dot{x}_{k+1,k} = f(X_k) \quad (2.51)$$

Burada $\dot{x}_{k+1,k}$ k zaman diliminden k+1 zaman dilimine dönüştürülen sigma noktalarını temsil eder. Dönüştürülmüş sigma noktalarından ortalama ve kovaryans hesaplamaları ise aşağıdaki şekilde yapılabilir.

$$\hat{x}_{k+1} = \sum_{i=0}^{p-1} w_i^m \hat{x}_{i,k+1,k} \quad (2.52)$$

$$P_{k+1}^- = \sum_{i=0}^{p-1} w_i^c (\dot{x}_{i,k+1,k} - \hat{x}_{k+1}^-)(\dot{x}_{i,k+1,k} - \hat{x}_{k+1}^-)^T + Q_k \quad (2.53)$$

Ölçüm güncellemesi için, ölçüm tahmini yapılmalıdır. Bunun gerçekleşmesi için, Denklem (2.51) ile dönüştürülen sigma noktaları doğrusal olmayan ölçüm matrisi aracılığıyla tekrar dönüştürülür:

$$\hat{Z}_{k+1,k} = h(\hat{X}_{k+1,k}) \quad (2.54)$$

Tahmin edilen ölçüm hesaplandığında;

$$\hat{Z}_{k+1}^- = \sum_{i=0}^{p-1} w_i^m \hat{Z}_{i,k+1,k} \quad (2.55)$$

Tahmin edilen durum ile ölçüm arasındaki kovaryans;

$$P_{xz,k+1} = \sum_{i=0}^{p-1} w_i^c \hat{X}_{i,k+1,k} - \hat{x}_{k+1}^- \hat{Z}_{i,k+1,k} \hat{Z}_{k+1}^-{}^T \quad (2.56)$$

Yenilik dizisinin kovaryansı da aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$P_{zz,k+1} = \sum_{i=0}^{p-1} w_i^c \hat{X}_{i,k+1,k} - \hat{z}_{k+1}^- \hat{Z}_{i,k+1,k} \hat{Z}_{k+1}^-{}^T + R_k \quad (2.57)$$

Kalman kazancı bu kovaryanslar ile aşağıdaki gibi hesaplanır:

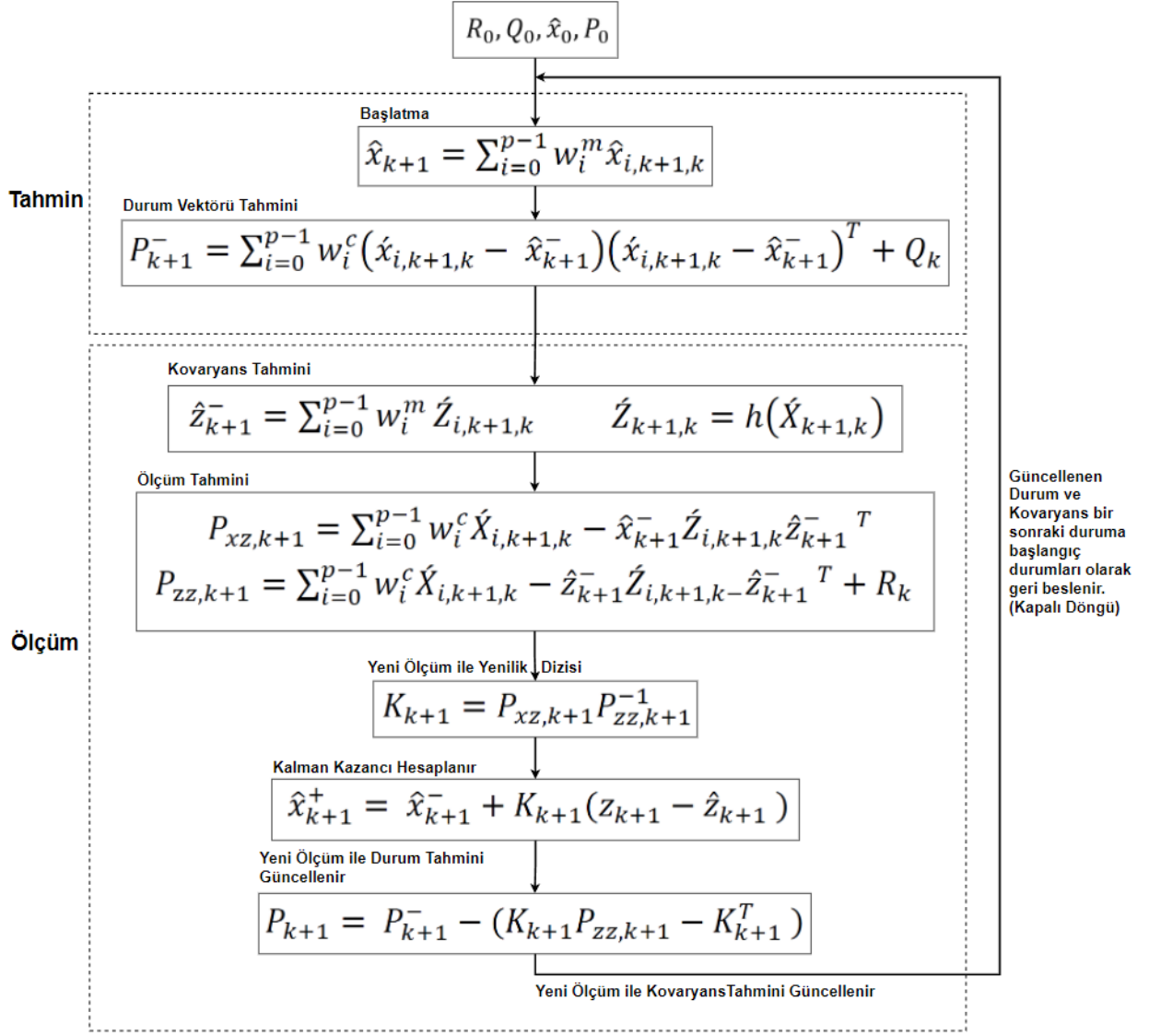
$$K_{k+1} = P_{xz,k+1} P_{zz,k+1}^{-1} \quad (2.58)$$

Kalman kazancı hesaplandıktan sonra, ölçüm güncellemesi düzeltilmiş durum vektörü ile sonlandırılır.

$$\hat{x}_{k+1}^+ = \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1} (z_{k+1} - \hat{z}_{k+1}) \quad (2.59)$$

$$P_{k+1} = P_{k+1}^- - (K_{k+1} P_{zz,k+1} - K_{k+1}^T) \quad (2.60)$$

Düzeltilmiş veya güncellenmiş durum vektörü ve kovaryans, bir sonraki iterasyon için başlangıç değerleri olarak kullanılır ve sigma noktalarının ve ağırlıkların hesaplanması için kullanılırlar. Kullanılan algoritma, UKF için kullanılan algoritma Şekil 17 ile verilmiştir.



Şekil 19. UKF Algoritması

2.6. Sistem Tasarımı

Bu bölümde verilerin toplanması için hazırlanan test düzeneği, sistemin çalışma algoritması, kullanıcı arayüz tasarımı, mekanik tasarım ve algılayıcılardan verilerin toplanması için yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

2.6.1 Test Düzeneği Tasarımı

Test düzeneğinde, ARM Cortex M4 tabanlı 32-bit işlemcili bir mikroişlemci, iki adet u-blox ZED-F9P GNSS alıcısı, bir adet BNO055 IMU sensörü, bir adet BMP388 barometrik basınç sensörü, bilgisayar ile iletişim kurmak için bir seri haberleşme modülü ve veri kaydı yapmak

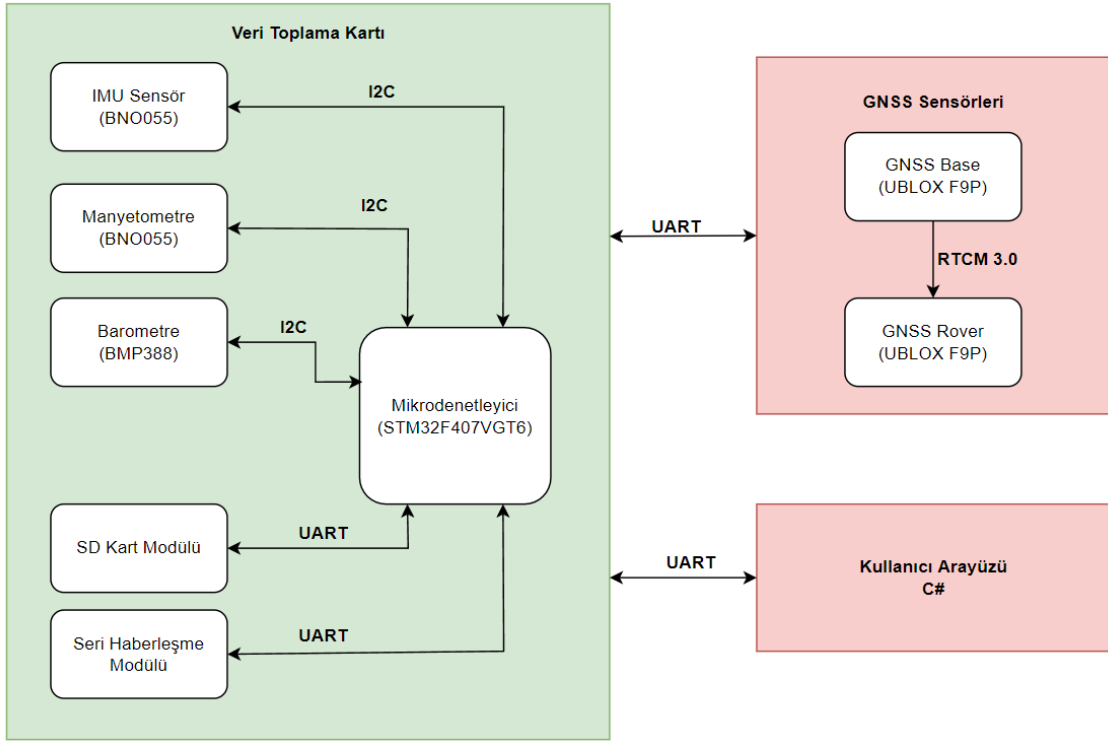
için bir SD kart modülü kullanılmıştır. Bu cihazlar ile, gelişmiş konum belirleme, baş açısı hesaplama ve veri toplama yeteneklerine sahip bir sistem geliştirilmiştir.

ARM Cortex M4 tabanlı 32-bit işlemcili mikroişlemci, yüksek performanslı hesaplamalar için kullanılmış ve düşük güç tüketimi ile sistemin verimliliğini artırmıştır. İki adet u-blox ZED-F9P GNSS alıcısı, sabit RTK uygulaması için değil, baş açısı hesaplamak amacıyla kullanılmıştır. Bu alıcılar, birbirlerine göre olan konum farklarını kullanarak, sistemin yönelim bilgisini hassas bir şekilde belirlemeye yardımcı olmuştur. Ayrıca, iki adet u-blox GNSS anteni kullanılarak GNSS sinyallerinin hassas bir şekilde alınması sağlanmıştır. Bu antenler, yüksek hassasiyetli konum ve baş açısı hesaplamalarında önemli rol oynamıştır.

BNO055 IMU, sistemin ivme, dönüş hızı ve manyetik alan verilerini toplayarak hareket ve yönelim bilgilerini sağlamak için kullanılmıştır. Bu sayede, sistemin hareketli nesnelerle etkileşimi daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. BMP388 barometrik basınç sensörü, hassas yükseklik ölçümleri için kullanılmış ve çevresel basınç verileri ile sistemin yükseklik değişimlerine duyarlı hale gelmesi sağlanmıştır.

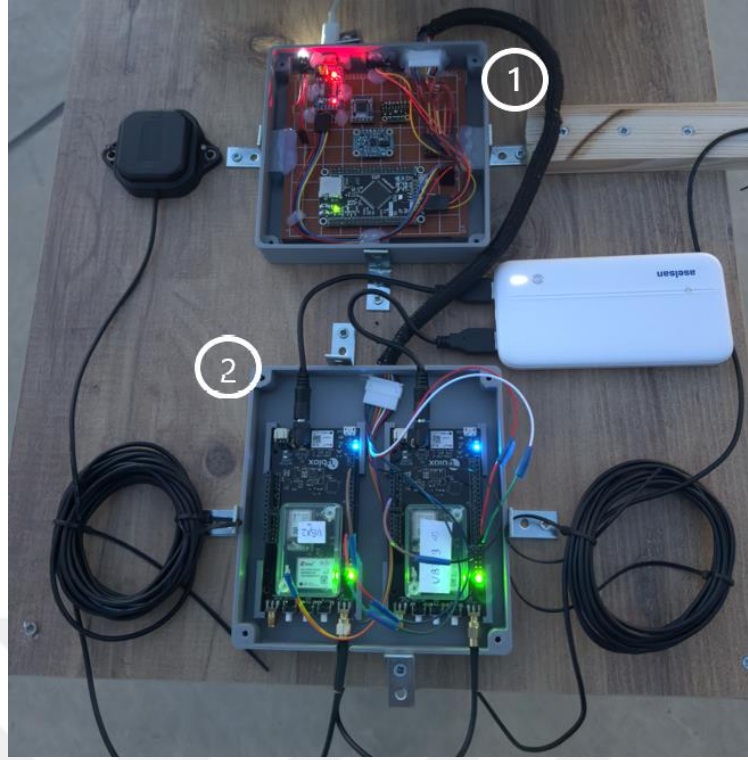
Seri haberleşme modülü, sistemin bilgisayar ile veri alışverişini kolaylaştırmış ve hızlı, güvenilir bir iletişim altyapısı sağlamıştır. SD kart modülü ise, toplanan verilerin güvenli bir şekilde depolanmasını ve sonradan analiz edilmek üzere saklanmasını mümkün kılmıştır. Bu proje kapsamında, gerçek zamanlı veri işleme, baş açısı hesaplama ve hassas konumlandırma gerektiren uygulamalar için gelişmiş bir sistem geliştirilmiştir.

Test düzeneğinde kullanılan modül bağlantıları Şekil 20 ile gösterilmiştir.



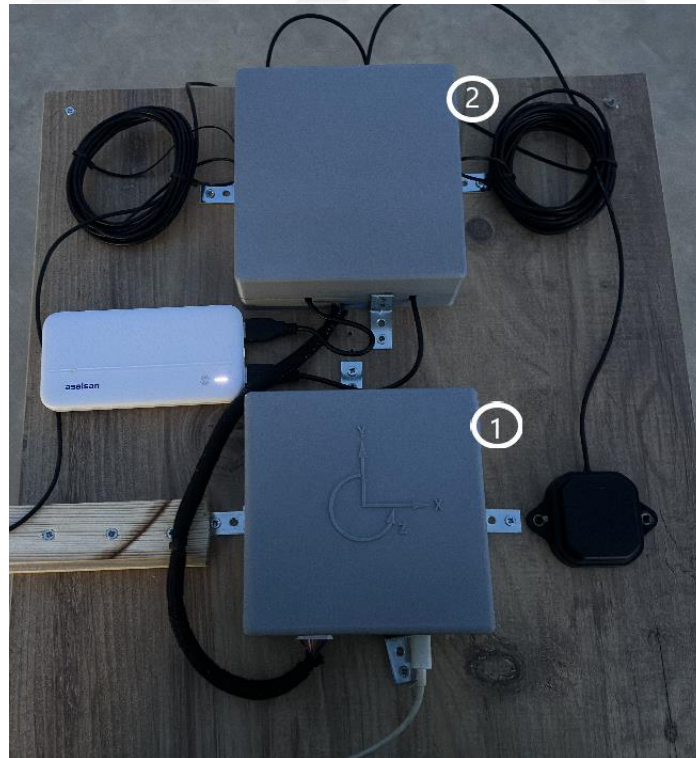
Şekil 20. Test Düzeneği Modül Bağlantıları

Mikroişlemci, sensörler ve modüller yerleştirilirken iki adet kutu tasarlanmıştır. Bu iki kutu ile sensörler ve modüllerin düzenli bir şekilde yerleştirilmesi ve koruma altına alınmasını sağlanmıştır. Kutu düzenlemesi, sistemin çevresel etkilerden korunmasına yardımcı olurken, bileşenlere kolay erişim ve arıza durumunda değişim imkânı sunmaktadır. Proje kapsamında oluşturulan bu kutulama sistemi, verilerin etkin bir şekilde toplanmasını, işlenmesini ve saklanmasını mümkün kılarak, sistemin güvenilirliğini ve performansını artırmıştır. Kutuların açık durumları Şekil 21 ile gösterilmiştir. Birinci kutu, Kontrol ve Sensör Modül Kutusu (1) olarak isimlendirilmiştir. Kutunun içerdiği mikroişlemci ve sensörlerin kontrol ve veri toplama işlevlerini vurgular. İkinci kutu Navigasyon Modül Kutusu (2) olarak isimlendirilmiştir. Kutunun navigasyon ve konum belirleme işlevine odaklandığını vurgular.



Şekil 21. Kutuların Açık Durumu

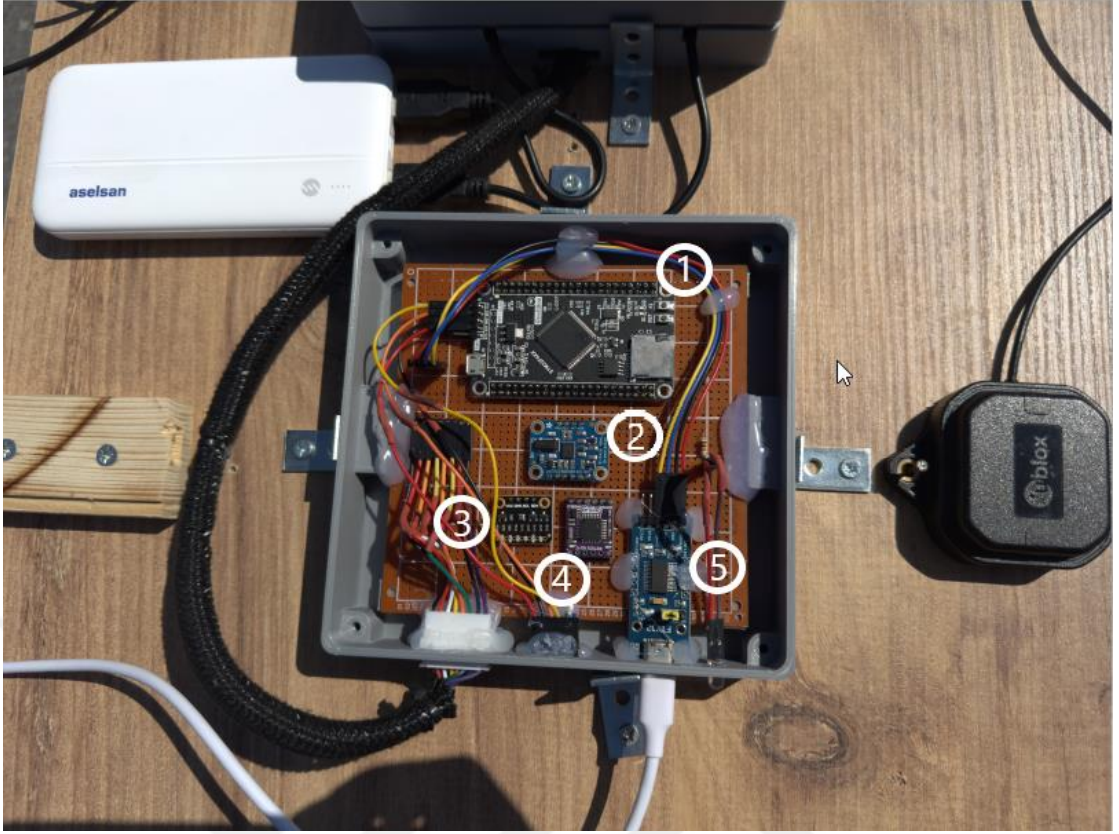
Şekil 22’de ise Kontrol ve Sensör Modül Kutusu (1), Navigasyon Modül Kutusu (2) kapalı durumları gösterilmiştir.



Şekil 22. Kutuların Kapalı Durumu

Kontrol ve Sensör Modül Kutusunda aşağıda belirtilen sistemler yer almaktadır:

- **Mikroişlemci:** ARM Cortex M4 tabanlı 32-bit işlemcili mikroişlemci bulunmaktadır. Bu işlemci, sistemin merkezi birimi olarak görev yapar ve tüm sensörlerden gelen verileri işler. Yüksek hesaplama gücü ve düşük enerji tüketimi ile projenin etkin bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Şekil 23 (1) ile gösterilmiştir.
- **BNO055 IMU:** Bu kutuda yer alan IMU ivme, açısal hız ve manyetik alan verilerini toplar. Bu sensör, hareket ve yönelim bilgilerini sağlamak için kullanılır ve sistemin hareketli nesnelerle etkileşimini daha hassas hale getirir. Şekil 23 (2) ile gösterilmiştir.
- **BMP388 Barometrik Basınç Sensörü:** Bu sensör, hassas yükseklik ölçümleri yapmak için kullanılır. Barometrik basınç verileri, sistemin yükseklik değişimlerini algılayarak çevresel koşullara duyarlı hale gelmesini sağlar. Şekil 23 (3) ile gösterilmiştir.
- **SD Kart Modülü:** Bu modül, toplanan verilerin güvenli bir şekilde depolanmasını sağlar. Sistem çalışırken sürekli olarak veri kaydı yapar ve bu veriler sonradan analiz edilmek üzere saklanır. Şekil 23 (4) ile gösterilmiştir.
- **Seri Haberleşme Modülü:** Bilgisayar ile veri alışverişi için kullanılan bu modül, sistemin hızlı ve güvenilir bir şekilde bilgisayar ile iletişim kurmasını sağlar. Bu sayede, topladığımız verileri analiz etmek ve sistemle ilgili ayarlamalar yapmak daha kolay hale gelir. Şekil 23 (5) ile gösterilmiştir.



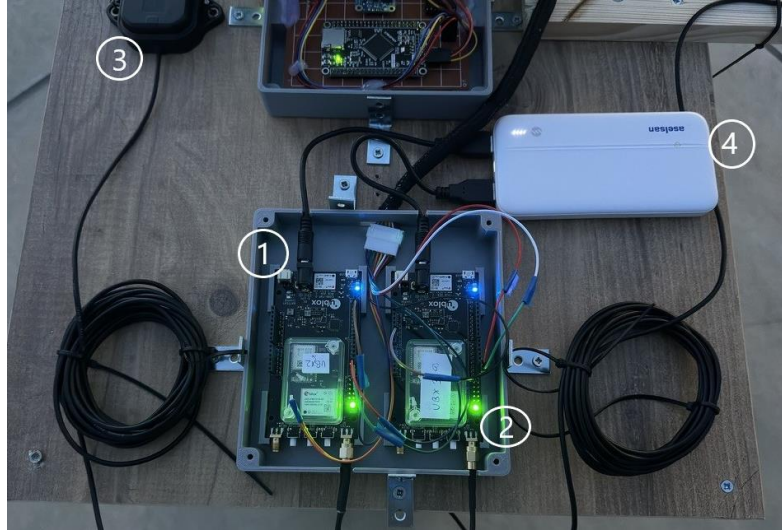
Şekil 23. Kontrol ve Sensör Modül Kutusu

Navigasyon Modül Kutusunda aşağıda belirtilen sistemler yer almaktadır.

U-BLOX ZED-F9P GNSS Alıcısı: Bu kutuda iki adet u-blox ZED-F9P GNSS alıcısı bulunmaktadır. Bu alıcılar, sabit RTK uygulamaları için değil, baş açısı hesaplamak amacıyla kullanılır. Alıcılar, birbirlerine göre olan konum farklarını kullanarak, sistemin yönelim bilgilerini hassas bir şekilde belirler. Böylece, hareketli nesnelerin doğru yönelim verileri elde edilir. GNSS Baz Şekil 24(1) ile, GNSS Hareketli ise Şekil 24(2) ile gösterilmiştir.

GNSS Antenleri: Kutuda yer alan GNSS alıcılarına, yüksek hassasiyetli GNSS sinyallerini almak için gerekli olan antenler bağlanmıştır. Bu antenler, sinyalleri toplayarak GNSS alıcılarına iletir ve doğru konum ve yön bilgilerinin elde edilmesini sağlar. Şekil 24(2) ile Baz GNSS alıcısına takılan anten gösterilmiştir. Hareketli GNSS alıcısına takılan anten ise bu görselde bulunmamaktadır.

Powerbank: GNSS alıcıları, enerji ihtiyacını karşılamak için kutuya bağlı bir powerbank kullanır. Bu taşınabilir enerji kaynağı, GNSS alıcılarının kesintisiz çalışmasını sağlar ve sistemin taşınabilirliğini artırır. Şekil 24 (3) ile gösterilmiştir.



Şekil 24. Navigasyon Modül Kutusunda

Projede iki adet UBLOX ZED F9P GNSS modülü kullanılmıştır. ZED-F9P GNSS modülü, düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli konumlandırma sağlama potansiyeli ile öne çıkan bir üründür. Şekil 25 ile gösterilmiştir.



Şekil 25. ZED-F9P Geliştirme Kartı

UBLOX ZED-F9P modülü, konumlandırma alanında yüksek hassasiyetli ve gerçek zamanlı konumlandırma sağlayan PPP-RTK (Precise Point Positioning-Real Time Kinematic) tekniklerini birleştirerek baz istasyonu gerektirmeden gerçek zamanlı yüksek hassasiyetli konumlandırma sunan bir GNSS işleme tekniğini destekler. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gibi tüm GNSS konstelasyonlarından gelen sinyalleri eşzamanlı olarak kullanabilen çok bantlı bir alıcıdır. 184 kanal kapasitesine sahip olan bu modül, farklı GNSS sinyallerini izleyebilir ve L1, L2, E1, E5b gibi çeşitli frekans bantlarında çalışabilir.

PPP-RTK teknolojisi, U-BLOX'un PointPerfect hizmeti aracılığıyla desteklenmektedir. Bu hizmet, uydu yörüngesi ve saat düzeltmeleri, uydu faz düzeltmeleri ve atmosferik düzeltmeler gibi çeşitli düzeltme verilerini sağlar ve kullanıcıların santimetre düzeyinde konum

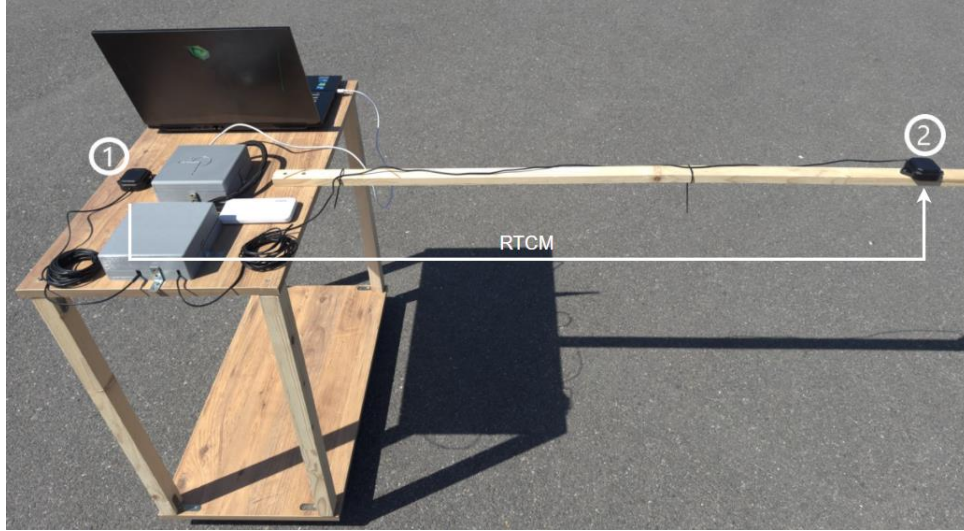
doğruluğuna ulaşmasını mümkün kılar. PointPerfect hizmeti, GNSS sinyallerini kullanarak kullanıcıya yüksek hassasiyetli konum bilgileri sunar ve baz istasyonuna ihtiyaç duymaz [80].

Düşük maliyetli GNSS modülleriyle yapılan deneyler, ZED-F9P'nin konumlandırma doğruluğunun ve kararlılığının yüksek olduğunu göstermiştir. Statik ve dinamik testlerde, bu cihazın santimetre seviyesinde hassasiyet sağladığı ve güçlü hareket sinyallerini çözümleyebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, farklı anten türleri ile yapılan deneyler, düşük maliyetli ekipmanların bile yüksek performans gösterebildiğini ortaya koymuştur [81].

ZED-F9P'nin sağladığı hızlı başlatma ve faz belirsizliği çözme yetenekleri, bu modülü çeşitli uygulamalar için ideal hale getirmektedir. Özellikle, PPP-RTK teknolojisinin sağladığı hızlı düzeltme süreleri ve yüksek doğruluk, bu modülü mobil haritalama sistemleri, insansız araçlar ve uzaktan algılama gibi uygulamalarda kullanıma uygun hale getirmektedir.

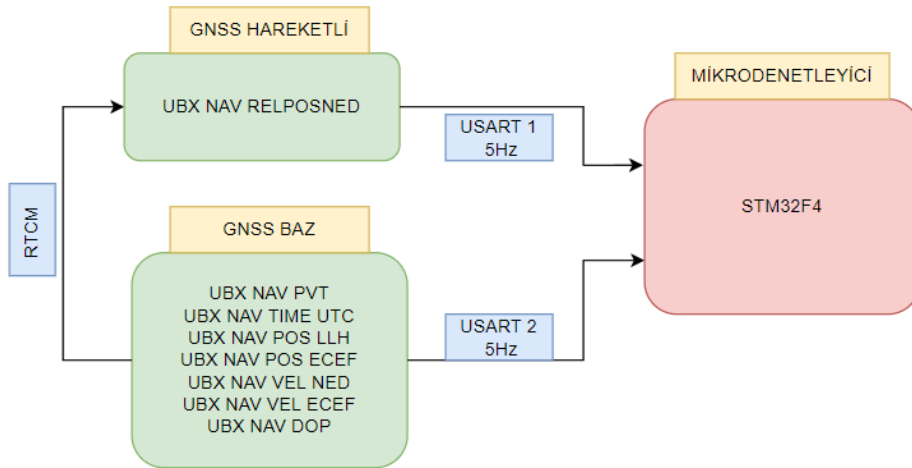
İki U-UBLOX ZED-F9P modülü ile yapılan hareketli baz-gezici konfigürasyonu, özellikle dinamik uygulamalar için yüksek hassasiyetli konumlandırma sağlar. Bu konfigürasyonda, iki ZED-F9P alıcısı birbirine bağlanarak biri baz istasyonu, diğeri gezici olarak çalışır. Baz istasyonu sabit bir konumda bulunurken, gezici hareket halindedir ve her iki alıcı arasındaki mesafe sürekli olarak hesaplanır. Bu yapılandırma, özellikle insansız hava araçları ve otonom kara araçları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. ZED-F9P modülleri, hareketli baz konfigürasyonunda GNSS sinyallerini senkronize eder ve RTK düzeltmeleri ile yüksek hassasiyetli konum verilerini sağlar. Bu konfigürasyon, alıcıların birbirine göre relatif konumlarını çok düşük hata payları ile belirlemelerine olanak tanır. Yapılan testlerde, iki ZED-F9P modülü kullanılarak yapılan hareketli baz-gezici konfigürasyonunda, santimetre düzeyinde doğruluğa ulaşılabildiği ve faz belirsizliğinin hızlı bir şekilde çözülebildiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında GNSS Baz modülünden GNSS Gezici modülüne seri haberleşme üzerinden RTCM 1005, 1074, 1084, 1094 ve 1230 RTCM mesajları gönderilmiştir. Gezici modülü, baz modülünden gelen düzeltme verilerini alarak kendi pozisyonunu belirlemiş ve iki modül arasındaki pozisyon farkını kullanarak yön bilgisini hesaplamıştır. GNSS Gezici modülünden UBX-NAV-RELPOSNED mesajı ile iki GNSS anteni arasındaki göreceli pozisyon bilgisi NED eksen takımı olarak elde edilmiştir.



Şekil 26. Hareketli Baz-Gezici Konfigürasyonu

GNSS alıcılarında yapılandırılan mesaj konfigürasyonu Şekil 27 ile gösterilmiştir. GNSS Hareketli modülü, UBX NAV RELPOSNEED mesajını 5 Hz frekansta USART 1 üzerinden mikrodenetleyiciye gönderir. Bu mesaj, baz istasyonu ile olan göreceli pozisyon bilgisini içerir. GNSS baz modülü, çeşitli UBX mesajlarını yine 5 Hz frekansta USART 2 üzerinden mikrodenetleyiciye gönderir. Bu mesajlar, baz istasyonunun sabit konumunu ve diğer önemli GNSS verilerini içerir. RTCM mesajları, GNSS Hareketli ve GNSS Baz modülleri arasında veri akışını sağlamak için kullanılır. Bu mesajlar, baz istasyonundan gelen düzeltme verilerini içeren kritik bilgiler içerir ve hareketli modülün konum doğruluğunu artırır.



Şekil 27. UBLOX ZED F9P Mesaj Konfigürasyonu

GNSS hareketli ve baz modülleri ile GNSS RTCM düzeltme mesajlarının mikrodenetleyiciye iletimini ve kullanım amaçlarını Tablo 4 ile gösterilmiştir. GNSS sistemlerinde yüksek hassasiyetli konum ve yön belirleme işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılan mesajların frekansları, kaynakları ve hedefleri belirtilmiş, her bir mesajın ne amaçla kullanıldığı açıklanmıştır.

Tablo 4. GNSS Mesaj Konfigürasyonu ve Kullanım Amaçları

Mesaj Adı	Frekans	Kaynak	Hedef	Amaç
UBX-NAV-RELPOSNED	5 Hz	GNSS Hareketli	Mikrodenetleyici	Hareketli baz sisteminde göreceli pozisyon ve yön bilgisi sağlar.
UBX-NAV-PVT	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	GNSS konum, hız ve zaman çözümü sağlar.
UBX-NAV-TIMEUTC	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	Evrensel zaman koordinatları sağlar.
UBX-NAV-POSLLH	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	Enlem, boylam ve yükseklik bilgileri sağlar.
UBX-NAV-POSECEF	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	Dünya Merkezli Dünya Sabit koordinatlarında pozisyon bilgisi sağlar.
UBX-NAV-VELNED	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	Kuzey, Doğu ve Aşağı yönünde hız bileşenlerini sağlar.
UBX-NAV-VELECEF	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	Dünya Merkezli Dünya Sabit koordinatlarında hız bileşenlerini sağlar.
UBX-NAV-DOP	5 Hz	GNSS Baz	Mikrodenetleyici	Uydu geometrisi ve pozisyon hatalarını içerir.
RTCM 1005	1 Hz	GNSS Baz	GNSS Hareketli	Sabit baz istasyonu konum bilgisi sağlar.
RTCM 1074	1 Hz	GNSS Baz	GNSS Hareketli	GPS faz ölçüm düzeltmeleri sağlar.
RTCM 1084	1 Hz	GNSS Baz	GNSS Hareketli	GLONASS faz ölçüm düzeltmeleri sağlar.
RTCM 1094	1 Hz	GNSS Baz	GNSS Hareketli	Galileo faz ölçüm düzeltmeleri sağlar.
RTCM 1230	1 Hz	GNSS Baz	GNSS Hareketli	GLONASS kod fazı kaymaları düzeltmeleri sağlar.

IMU ve manyetometre sensörü olarak BNO055 sensörü kullanılmıştır. BNO055, Bosch Sensortec'in geliştirdiği, birden fazla sensörü tek bir çipte birleştiren bir 9 eksenli mutlak yönelim sensörüdür. Bu sensör, 3 eksenli bir ivmeölçer, 3 eksenli bir dönüölçer ve 3 eksenli bir manyetometreden oluşur. Böylece, ivme, açısal hız ve manyetik alan bilgilerini tek bir entegre devrede toplar. Küçük ve kompakt bir yapıda olan BNO055, düşük enerji tüketimi ve geniş bir

çalışma sıcaklık aralığı (-40°C ile $+85^{\circ}\text{C}$) ile birçok uygulamada kullanılabilir. BNO055 sensörü, veri iletimi için I²C, UART ve SPI gibi yaygın iletişim protokollerini destekler, bu da onu çeşitli mikrodenetleyicilerle entegre etmeyi kolaylaştırır. Sensör, Bosch'un geliştirdiği 9 eksenli füzyon algoritması sayesinde ham sensör verilerini işleyerek mutlak yönelim verisi üretir ve bu veriyi doğrudan sunar. Otomatik kalibrasyon ve dengeleme özellikleri, sensörün çeşitli ortam ve koşullarda doğru ölçümler yapmasına olanak tanır. Yönelim verilerini Euler açısı, dönüş matrisi ve quaternion gibi farklı formatlarda sunarak esnek kullanım sağlar.

Yapılan çalışmada, pozisyon verisini hesaplamak ve analizlerde kullanmak için BNO055 sensöründen elde edilen ham dönüölçer (gyr), ivmeölçer (acc) ve manyetometre verileri ile sensörün kendi içinde hesapladığı Euler açısı ve quaternion verileri I²C aracılığıyla işlemciye aktarılmıştır. BNO055 sensöründen alınan veriler ve verilerin frekansları Tablo 5 ile gösterilmiştir.

Tablo 5. IMU Sensöründen Alınan Veriler

Veri Türü	Açıklama	Frekans
İvmeölçer (acc)	Doğrusal ivme bilgisi (m/s^2)	100 Hz
Dönüölçer (gyr)	Açısal hız bilgisi (rad/s)	100 Hz
Manyetometre	Manyetik alan bilgisi (μT)	20 Hz
Euler Açıları	Yönelim bilgisi (Roll, Pitch, Yaw)	100 Hz
Quaternions	Dört bileşenli yönelim (q_0, q_1, q_2, q_3)	100 Hz

Basınç sensörü olarak BMP388 sensörü kullanılmıştır. BMP388 sensöründen elde edilen ham basınç verileri ile irtifa değeri hesaplanmıştır. BMP388, Bosch Sensortec tarafından geliştirilen ve yüksek doğrulukta atmosferik basınç ölçümleri yapabilen bir barometrik basınç sensörüdür. Bu sensör, deniz seviyesinde ± 8 Pa doğruluk sağlayarak yaklaşık ± 0.66 metre yükseklik farklarını hassas bir şekilde tespit eder. Geniş bir basınç ölçüm aralığına sahip olan BMP388, 300 hPa ile 1250 hPa arasında ölçüm yapabilir ve bu, deniz seviyesinden yaklaşık 9000 metre yüksekliğe kadar uzanan bir kapsamı ifade eder. I²C ve SPI gibi yaygın iletişim protokollerini desteklemesi, BMP388'in mikrodenetleyiciler ve diğer sistemlerle kolayca entegre edilmesini sağlar. Sensör, MEMS teknolojisiyle çalışarak atmosferik basınç değişikliklerini hassas bir diyafram aracılığıyla algılar ve bu değişiklikleri elektrik sinyallerine dönüştürür. Bu sinyaller, yüksek çözünürlüklü 24-bit ADC ile dijital verilere dönüştürülerek mikrodenetleyiciye iletilir.

2.6.2 Sistem Çalışma Algoritması

Bu çalışmada, ARM Cortex M4 tabanlı 32-bit işlemcili mikrodenetleyici, GNSS alıcıları, IMU, barometrik basınç sensörü, seri haberleşme modülü ve SD kart modülü ile çeşitli haberleşme protokolleri kullanılarak haberleşmektedir. U-BLOX ZED-F9P GNSS alıcıları, UART protokolü ile mikrodenetleyiciye bağlanmış olup, UBX formatında veri iletmektedir. BNO055 IMU sensörü ve BMP388 barometrik basınç sensörü, I2C protokolü kullanılarak mikrodenetleyici ile haberleşmekte ve ivme, dönüölçer, manyetik alan, basınç ve sıcaklık verilerini sağlamaktadır. Seri haberleşme modülü, UART üzerinden mikrodenetleyici ve bilgisayar arasında veri iletişimi sağlayarak, sensör verilerinin bilgisayara hızlı ve güvenilir bir şekilde aktarılması sağlanmıştır. SD kart modülü ise, I2C protokolü ile mikrodenetleyiciye bağlanarak veri yazma ve okuma işlemlerini gerçekleştirmiştir. Bu sayede, mikrodenetleyici çeşitli cihazlardan gelen verileri işleyerek, gelişmiş konum belirleme, baş açısı hesaplama ve veri toplama yeteneklerine sahip bir sistem oluşturulmuştur.

GNSS verileri 5Hz, IMU verileri 100Hz, manyetometre verileri 20Hz ve barometrik basınç verileri 50Hz frekansında elde edilmiştir. Toplanan bu veriler 100Hz frekansta bilgisayara aktarılmış ve .txt formatında kaydedilmiştir. Bu sayede, verilerin güvenli bir şekilde depolanması ve daha sonra analiz edilmesi sağlanmıştır. Mikrodenetleyiciden bilgisayara 100Hz kayıt için gönderilen paket “Sürek Paket” olarak adlandırılmıştır. Paket içeriği Tablo 6 ile gösterilmiştir.

Tablo 6. Sürek Paket

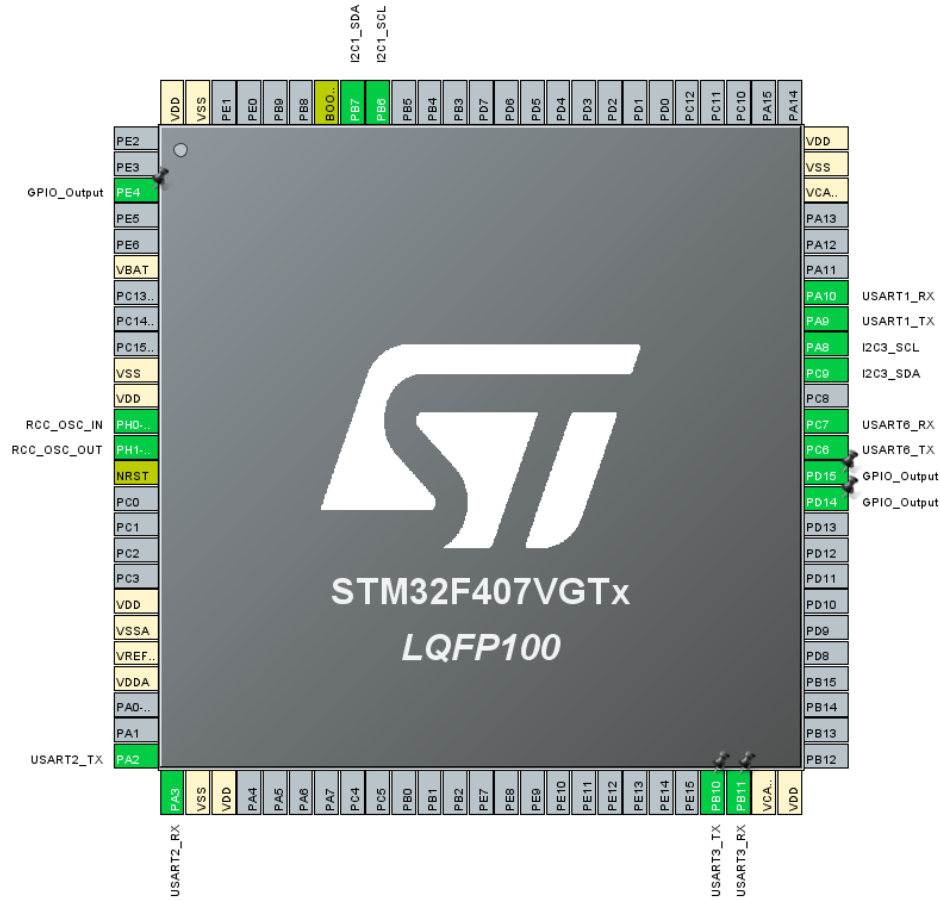
Veri	Boyut (Byte)	Açıklama
SENKRON_1_u8	1	Senkronizasyon bayrağı - 1
SENKRON_2_u8	1	Senkronizasyon bayrağı - 2
Paket_Tipi_u8	1	Paket tipi
Arayuzde_Goster_u8	1	Arayüzde Gösterim Bayrağı
Sayac_ms_u32	4	Mikroişlemci çalışma zamanı (milisaniye)
Gyroscope_s16a[EKSEN_X]	2	Dönüölçer X eksen
Gyroscope_s16a[EKSEN_Y]	2	Dönüölçer Y eksen
Gyroscope_s16a[EKSEN_Z]	2	Dönüölçer Z eksen
Acceleration_s16a[EKSEN_X]	2	İvmeölçer X eksen
Acceleration_s16a[EKSEN_Y]	2	İvmeölçer Y eksen
Acceleration_s16a[EKSEN_Z]	2	İvmeölçer Z eksen
Manyetometre_s16a[EKSEN_X]	2	Manyetometre X eksen
Manyetometre_s16a[EKSEN_Y]	2	Manyetometre Y eksen

Manyetometre_s16a[EKSEN_Z]	2	Manyetometre Z eksen
Quaternion_s16a[EKSEN_X]	2	Quaternions X eksen
Quaternion_s16a[EKSEN_Y]	2	Quaternions Y eksen
Quaternion_s16a[EKSEN_Z]	2	Quaternions Z eksen
Quaternion_s16a[EKSEN_W]	2	Quaternions W bileşeni
Euler_Heading_s16	2	Euler baş açısı
Euler_Pitch_s16	2	Euler dikilme açısı
Euler_Roll_s16	2	Euler yatış açısı
Basinc_pa_s32	4	Basınç (Pa)
Sicaklik_c_s32	4	Sıcaklık (°C)
Barometrik_Irtifa_s32	4	Barometrik irtifa
GNSS_ms_u32	4	GNSS zaman damgası (milisaniye)
GNSS_Hafta_u16	2	GNSS hafta numarası
ECEF_cm_X_s32	4	ECEF X koordinatı (cm)
ECEF_cm_Y_s32	4	ECEF Y koordinatı (cm)
ECEF_cm_Z_s32	4	ECEF Z koordinatı (cm)
Enlem_mrad_s32	4	Enlem (miliradyan)
Boylam_mrad_s32	4	Boylam (miliradyan)
Irtifa_wgs84_cm_s32	4	İrtifa (WGS84, cm)
Yatay_Hiz_cm_s_s16	2	Yatay hız (cm/s)
Dusey_Hiz_cm_s_s16	2	Düşey hız (cm/s)
Hiz_Yonelme_mrad_s16	2	Hız yönelimi (miliradyan)
velN_mm_s_s32	4	Kuzey yönünde hız (mm/s)
velE_mm_s_s32	4	Doğu yönünde hız (mm/s)
velD_mm_s_s32	4	Düşey hız (mm/s)
hAcc_mm_u32	4	Yatay doğruluk (mm)
vAcc_mm_u32	4	Düşey doğruluk (mm)
headVeh_deg_e5_s32	4	Araç baş açısı (miliradyan)
gSpeed_mm_s_s32	4	Yatay hız (mm/s)
numSV_u8	1	Kullanılan uydu sayısı
headMot_deg_e5_s32	4	Hareket baş açısı (miliradyan)
Hiz_ECEF_m_s_X_s32	4	ECEF X eksen hız (m/s)
Hiz_ECEF_m_s_Y_s32	4	ECEF Y eksen hız (m/s)
Hiz_ECEF_m_s_Z_s32	4	ECEF Z eksen hız (m/s)
Hiz_NED_cm_s_X_s32	4	NED X eksen hız (cm/s)
Hiz_NED_cm_s_Y_s32	4	NED Y eksen hız (cm/s)
Hiz_NED_cm_s_Z_s32	4	NED Z eksen hız (cm/s)
p_DOP_x10_u8	1	P DOP (ölçüm doğruluğu)
h_DOP_x10_u8	1	H DOP (yükseklik doğruluğu)
v_DOP_x10_u8	1	V DOP (düşey doğruluğu)
t_DOP_x10_u8	1	T DOP (zaman doğruluğu)

Sigma_Dusey_cm_s16	2	Düşey hız sapması (cm)
Sigma_Yatay_cm_s16	2	Yatay hız sapması (cm)
Sigma_Hiz_cm_s_s16	2	Hız sapması (cm/s)
Sigma_Hiz_yon_mrad_s16	2	Hız yön sapması (miliradyan)
Bas_Acisi_deg_s32	4	Baş Açısı Değeri
mb_uzaklik_cm_f32	4	Görelî konum (cm)
mb_uzaklik_hassasiyeti_mm_u32	4	Görelî konum hassasiyeti (mm)
mb_bas_acisi_hassasiyeti_u32	4	Baş açısı hassasiyeti (miliradyan)
Durum_Bayraklar_1_u16	2	Durum bayrakları 1
Durum_Bayraklar_2_u16	2	Durum bayrakları 2

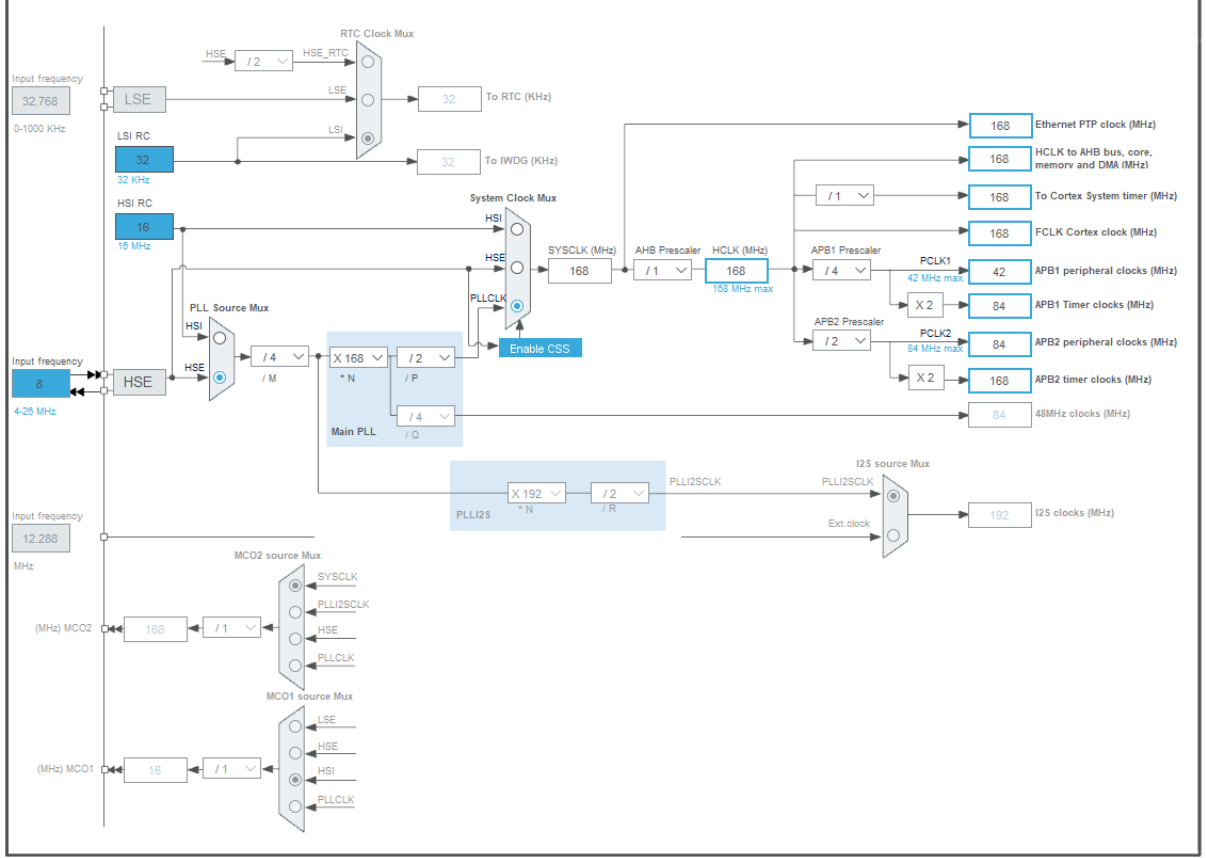
Sürek Paket içerisinde toplam 177 byte veri bulunmaktadır. Veriler 100 Hz frekansta kaydedilmiştir. Mikroişlemciden bilgisayara USART protokolünden 460800bps (bits per seconds) hızında gönderim sağlanmıştır.

Çalışmada kullanılan mikrodenetleyicinin LQFP100 paketleme formatındaki pin düzeni, Şekil 28 ile ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 28. Mikroişlemci Pin Atamaları

Mikrodenetleyicinin saat sisteminin ve frekans çoğaltıcılarının yapılandırması Şekil 29 ile gösterilmiştir. Diyagramın ortasında SYSCLK, sistem saati seçicisi bulunmaktadır. Bu yapı, mikrodenetleyicinin ana saat kaynağını belirler. Ana saat kaynağı olarak 4 MHz ile 26 MHz arasında değişebilen yüksek frekanslı harici bir osilatör olan HSE seçilmiştir.



Şekil 29. Mikrodenetleyici Saat Yapılandırması

Mikroişlemci üzerinde geliştirilen yazılım algoritması Şekil 30 ve Şekil 31 ile akış diyagramı olarak gösterilmiştir. Sistemin başlatılmasından itibaren gerçekleştirilen yapılandırma adımları ve bu adımların sırası Şekil 30 ile göstermektedir.

Başla: Sistemin başlangıç noktasıdır. İşlemler bu adımda başlar ve sistemin başlatılmasıyla ilgili ilk işlemler gerçekleştirilir.

Genel Değişkenleri Sıfırla: Bu adımda, sistemin çalışmaya başlamadan önce tüm genel değişkenler başlangıç değerlerine getirilir. Değişkenlerin sıfırlanması, sistemin temiz bir başlangıç yapmasını ve daha önceki çalışmalardan kalan verilerin yeni çalışmayı etkilememesini sağlar.

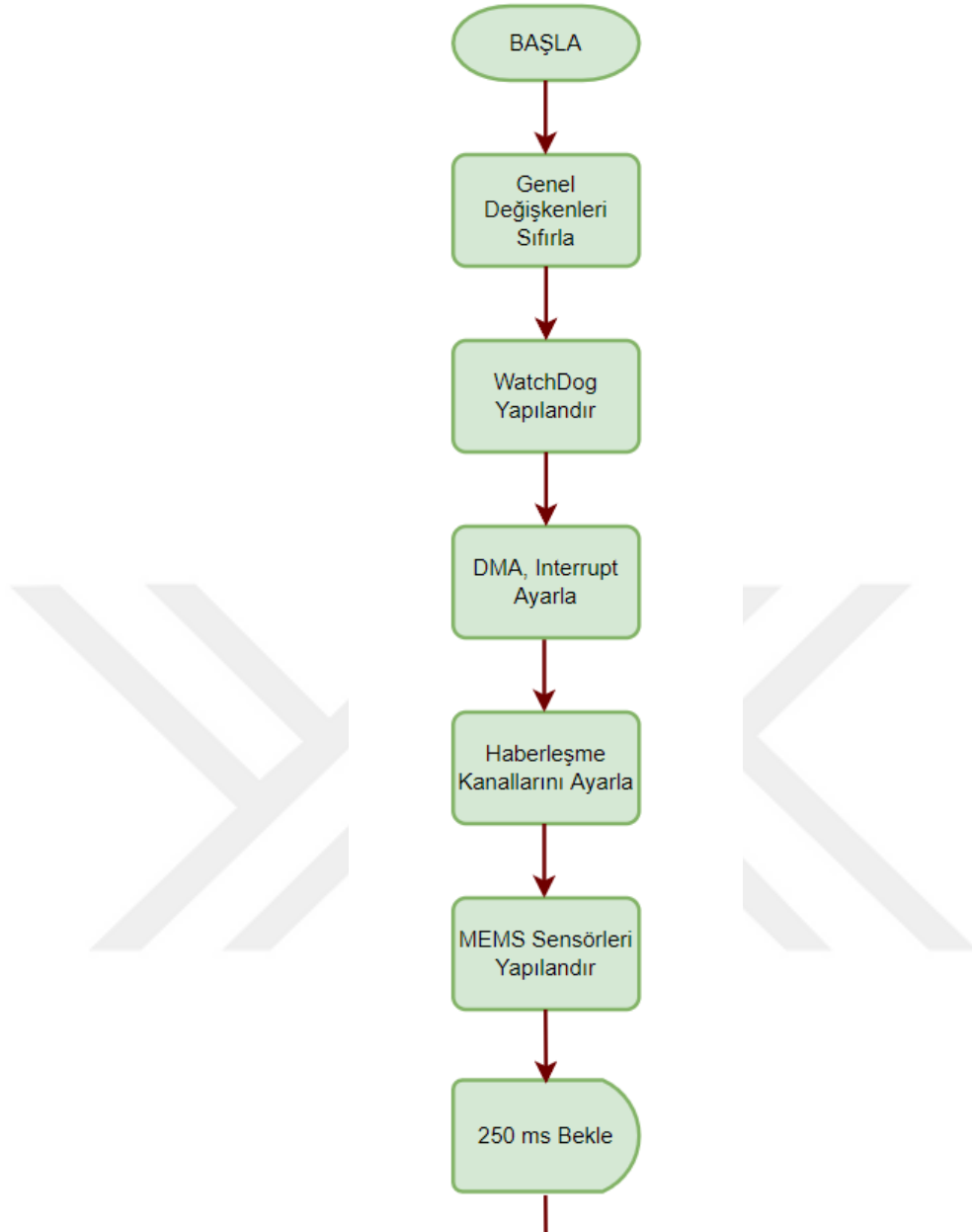
WatchDog Yapılandır: WatchDog timer, sistemin belirli aralıklarla çalıştığını ve sistemin bir problem yaşayıp yaşamadığını kontrol eden bir devredir. Bu adımda, WatchDog yapılandırılarak sistemin belirli bir süre boyunca tepki vermemesi durumunda kendini yeniden başlatması sağlanır. Bu, sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini artırır.

DMA, Interrupt Ayarla: DMA (Direct Memory Access) ve kesmeler (interrupt) için gerekli ayarlamaların yapıldığı adımdır. DMA, veri transferlerini CPU müdahalesi olmadan gerçekleştirerek sistemin verimliliğini artırır. Kesmeler ise, belirli olaylar meydana geldiğinde CPU'ya bildirim yaparak hızlı ve zaman kritik işlemler gerçekleştirilmesini sağlar.

Haberleşme Kanallarını Ayarla: Sistem içerisindeki veya sistem dışı cihazlarla veri iletişimini sağlamak için gerekli haberleşme kanallarının ayarlandığı adımdır. Bu, sistemin diğer cihazlarla veri alışverişi yapabilmesi için gerekli bağlantıların kurulmasını sağlar. I2C ve USART ayarlamaları gerçekleştirilir.

MEMS Sensörleri Yapılandır: MEMS sensörleri, ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometre gibi cihazları içerir. Bu adımda, bu sensörlerin sistemle uyumlu çalışabilmesi için gerekli yapılandırmalar yapılır. Bu sensörler, sistemin hareket ve konum bilgisini toplamak için kullanılır.

250 ms Bekle: Sistemin kararlı hale gelmesi ve tüm yapılandırmaların tamamlanması için kısa bir süre beklenir. Bu, sistemin düzgün bir şekilde başlatılmasını ve tüm bileşenlerin çalışmaya hazır hale gelmesini sağlar.



Şekil 30. Akış Diyagramı – I

Yapılandırma adımları tamamlandıktan sonra gerçekleşen yazılım akışı Şekil 31 ile göstermektedir. Bu akış diyagramı ile sistemin veri toplama, işleme ve saklama süreçlerini detaylandıran algoritma gösterilmiştir.

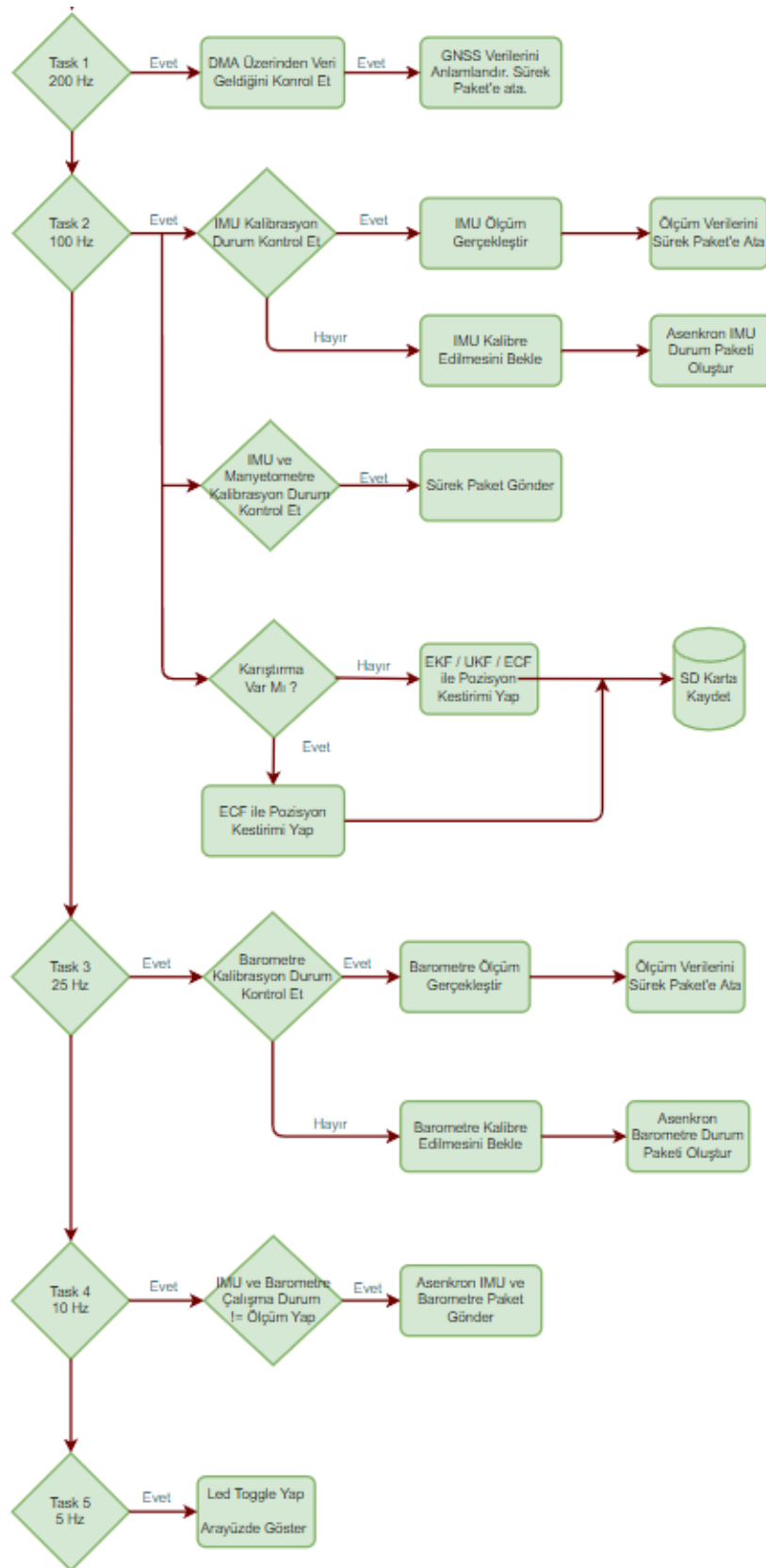
Task 1 – 200 Hz: Bu görev, her 5ms’de bir çalışır. DMA üzerinden mikrodenetleyiciye veri akışı olup olmadığı kontrol edilir. Eğer veri gelmişse, GNSS verilerini anlamlandırır ve sürekli pakete atama işlemi gerçekleştirilir.

Task 2 – 100 Hz: Bu görev, her 10ms’de bir çalışır. IMU sensörünün kalibrasyon durumu kontrol edilir. İvmeölçer, dönüölçer ve manyetometre kalibre edilmiş durumdaysa ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Elde edilen ham verilerin sürekle pakete ataması yapılır. Eğer IMU ve manyetometre kalibre durumda değilse, kalibrasyonun tamamlanması beklenir. Bu durumda IMU ve manyetometre kalibrasyon adımlarının uygulanması gerekir. Şekil 35 ile gösterilen IMU Sensör Ekranından IMU ve manyetometre durumu takip edilebilir. Hem IMU hem de manyetometre sensörünün çalışma durumları kontrol edilir. Her ikisi de ölçüm durumundaysa sürekle paket SD karta kaydedilir, bilgisayara hem kaydedilmesi için hem de Şekil 36 ile gösterilen Sürekle Paket Ekranında gösterilmesi için gönderilir.

Task 3 – 25 Hz: Bu görev, her 40ms’de bir çalışır. Barometre sensörünün kalibrasyon durumu kontrol edilir. Barometre kalibre edilmiş durumdaysa ölçüm işlemi gerçekleştirilir ve elde edilen ham verilerin sürekle pakete ataması yapılır. Eğer barometre kalibre durumda değilse, kalibrasyonun tamamlanması beklenir. Şekil 34 ile gösterilen Barometre Sensör Ekranından barometre durumu takip edilebilir.

Task 4 – 10 Hz: Bu görev, her 100ms’de bir çalışır. IMU ve Barometre çalışma durumları kontrol edilir. Eğer ikisinden bir tanesi ÖLÇÜM_YAP durumunda değilse, çevrimlerinde oluşturulan durum paketleri kullanıcı arayüzüne gönderilir.

Task 5 – 5 Hz: Bu görev, her 200ms’de bir çalışır. Sistemin sağlıklı olarak çalıştığını göstermek için Kontrol ve Sensör Modül kutusunda bulunan LED’in yanıp sönmeye sağlanır. Arayüzde Göster durum bit TRUE olarak atanır. Bu şekilde bilgisayara gönderilen her 20 paketten birinin Şekil 36 ile gösterilen Sürekle Paket Ekranında gösterilmesi sağlanır.



Şekil 31. Akış Diyagramı – II

2.6.3 Arayüz Tasarımı

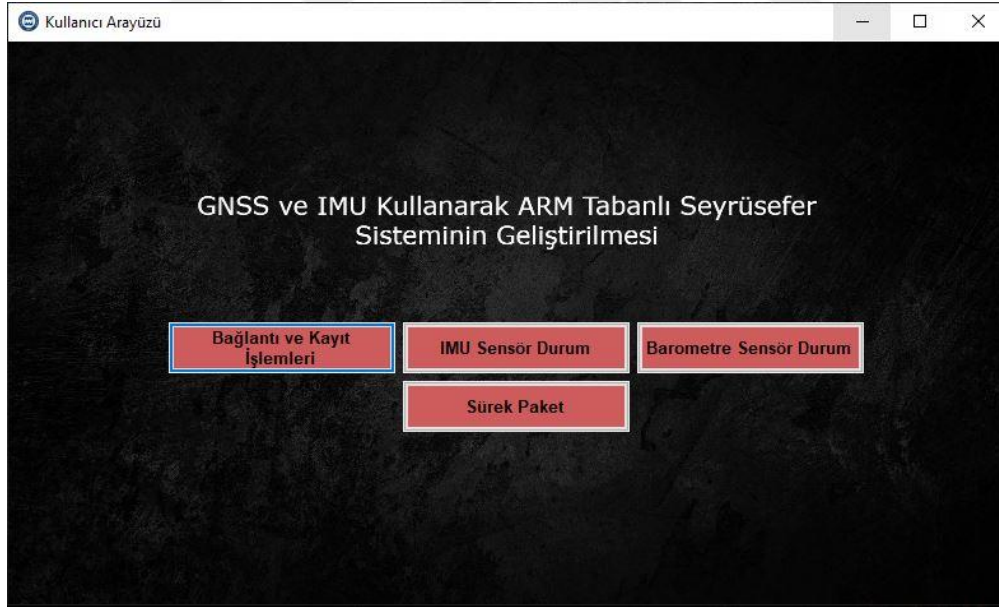
Tez çalışması kapsamında hazırlanan test düzeneğine bilgisayar üzerinden bağlanıp ölçüm verilerini gözlemleyebilmek ve veri kayıt işlemlerini gerçekleştirebilmek için C# kullanılarak bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Arayüz açıldığında ana ekran Şekil 32 ile gösterilmektedir.

Başlangıç ekranından “Bağlantı ve Kayıt İşlemleri” penceresi açıldığında test düzeneğinde bulunan işlemci ile UART üzerinden bağlantının kurulabileceği aynı zamanda veri kayıt işlemlerinin başlatılabileceği ekran açılmaktadır.

Başlangıç ekranından “IMU Sensör Durum” penceresi açıldığında test düzeneğinde bulunan IMU sensörünün durumu hakkında bilgilerin gözlemlenebileceği ekran açılmaktadır.

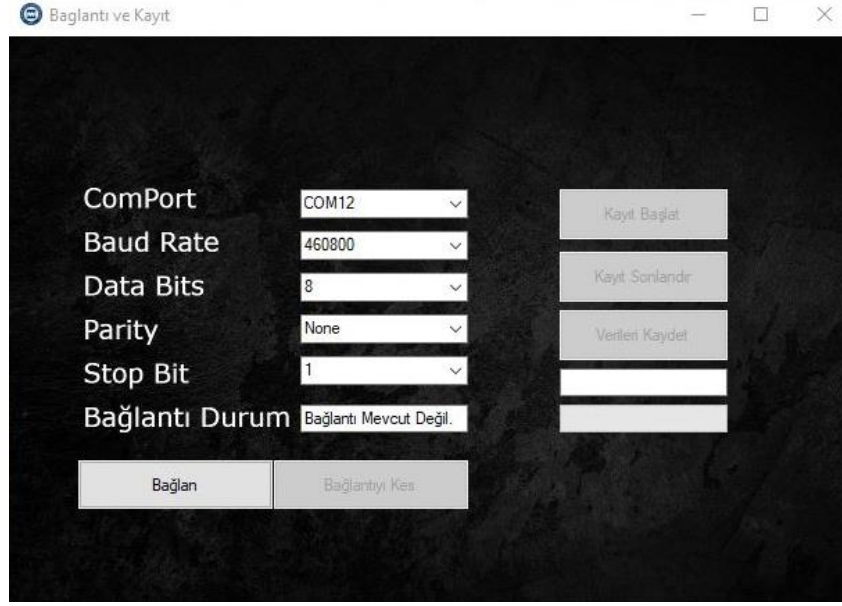
Başlangıç ekranından “Barometre Sensör Durum” penceresi açıldığında test düzeneğinde bulunan barometre sensörünün durumu hakkında bilgilerin gözlemlenebileceği ekran açılmaktadır.

Başlangıç ekranından “Sürek Paket” penceresi açıldığında test düzeneğinde sensörlerden elde edilen verilerin anlık olarak gözlemlenebileceği ekran açılmaktadır.



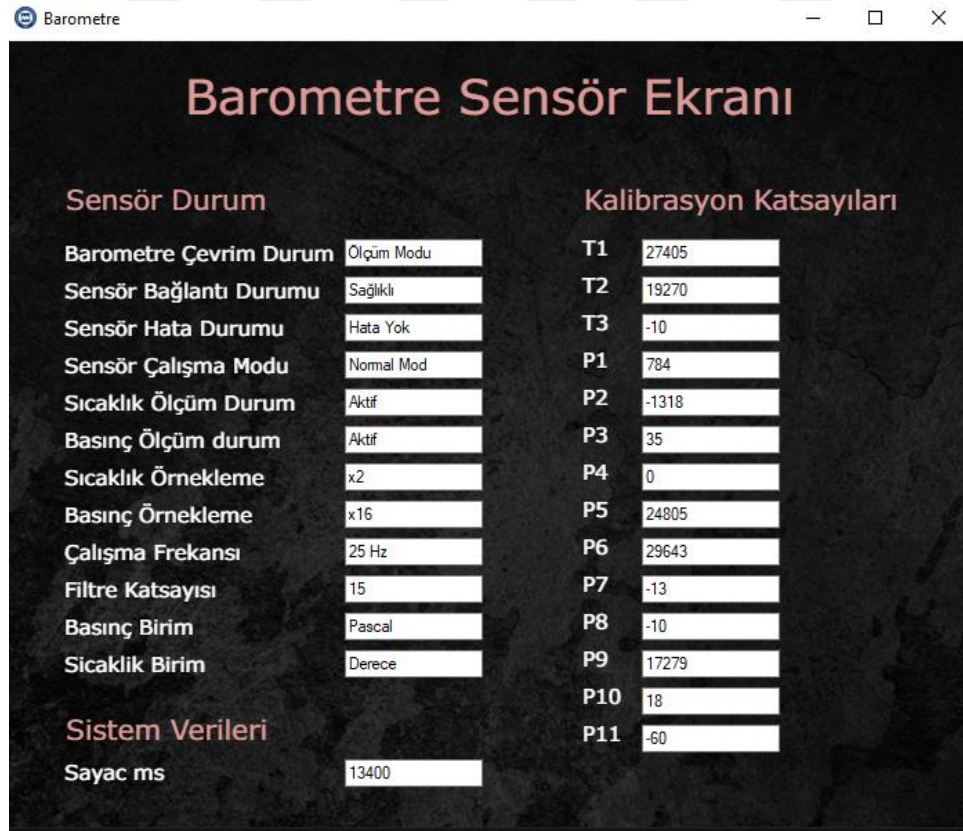
Şekil 32. Kullanıcı Arayüzü Ana Ekran

“Bağlantı ve Kayıt” penceresi Şekil 33 ile gösterilmiştir. Bu pencere üzerinden test düzeneğinde bulunan işlemci ile seri haberleşme bağlantısı kurabilmek için gerekli port ayarlamaları gerçekleştirilebilmektedir. Bağlantı sağlandıktan sonra Kayıt Başlat, Kayıt Sonlandır, Verileri Kaydet butonları aktif olmaktadır.



Şekil 33. Kullanıcı Arayüzü Bağlantı ve Kayıt Ekranı

“Barometre Sensör Ekranı” penceresi Şekil 34 ile gösterilmiştir. Bu pencere üzerinden test düzeneğinde bulunan barometre sensörünün bağlantı durumu, hata durumu, çalışma modu, sensör ölçüm birimleri, örnekleme frekansı ve kalibrasyon katsayıları gözlemlenebilmektedir.



Şekil 34. Barometre Sensör Ekranı

“IMU Sensör Ekranı” penceresi Şekil 35 ile gösterilmiştir. Bu pencere üzerinden test düzeneğinde bulunan IMU sensöründe yer alan ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometre birimlerinin bağlantı durumları, kalibrasyon durumları, sensörde oluşan hata durumu, güç durumu, sensör verilerinin birimleri ve kalibrasyon katsayıları gözlemlenebilmektedir.

Sensör Durum		Kalibrasyon Katsayıları	
IMU Çevrim Durum	Ölçüm Modu	Acc X Offset	-3
IMU Bağlantı Durumu	Başarılı	Acc Y Offset	4
Acc Bağlantı Durumu	Başarılı	Acc Z Offset	-28
Gyr Bağlantı Durumu	Başarılı	Mag X Offset	199
Mag Bağlantı Durumu	Başarılı	Mag Y Offset	115
IMU Kalibrasyon Durumu (0-3)	3	Mag Z Offset	49
Acc Kalibrasyon Durumu (0-3)	3	Gyr X Offset	-1
Gyr Kalibrasyon Durumu (0-3)	3	Gyr Y Offset	0
Mag Kalibrasyon Durumu (0-3)	3	Gyr Z Offset	-5
Sensör Hata Durumu	Hata Yok	Sistem Verileri	
Sensör Çalışma Modu	NDOF	Sayac ms	111100
Gyr Bandwidth	100 Hz	IMU Çalışma Frekansı	100 Hz
Gyr Range	2000 dps		
Gyr Power Mod	Normal		
Acc Bandwidth	100 Hz		
Acc Range	4G		
Acc Power Mod	Normal		
Mag Data Output Rate	20 Hz		
Mag Opr Mode	Regular		
Mag Power Mod	Force Mode		
Gyr Birim	DPS		
Acc Birim	m/s ²		
Eul Birim	Derece		
Sıcaklık Birim	Derece		

Şekil 35. IMU Sensör Ekranı

“Sürek Paket Ekranı” penceresi Şekil 36 ile gösterilmiştir. Bu pencere üzerinden test düzeneğinde bulunan sensörlerden elde edilip analiz için kaydedilen verilerden bir kısmı yer almaktadır. IMU sensöründen elde edilen x,y,z eksenlerinde dönüölçer, ivmeölçer ve manyetometre ham verileri, yatış dikilme ve baş aç değeri ile quaternion değeri, barometre sensöründen elde edilen basınç, sıcaklık ve irtifa değeri, GNSS alıcısından elde edilen pozisyon ve hız verileri de gösterilmektedir.

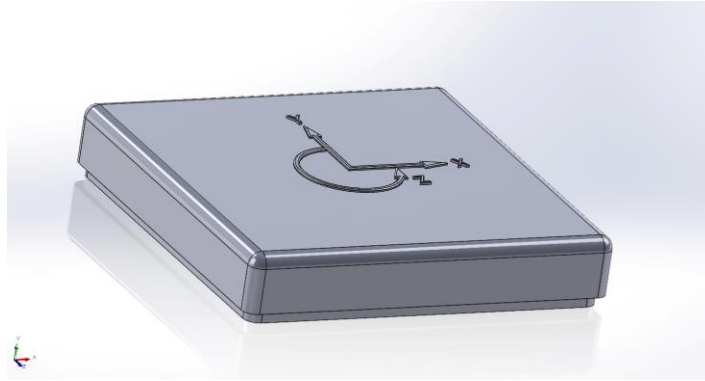


Şekil 36. Sürek Paket Ekranı

2.6.4 Mekanik Tasarım

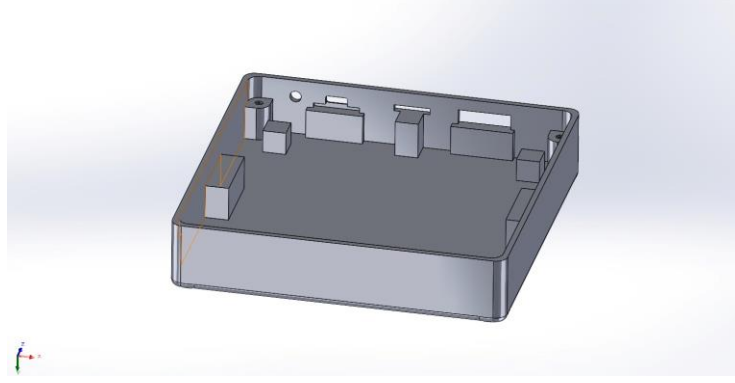
Test düzeneğinde bulunan mikroişlemci ve sensörlerin yerleştirilmesi için SolidWorks programı kullanılarak mekanik tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen parçaların 3D yazıcı ile prototipleri oluşturulmuştur.

Anakart üst kapat tasarımı Şekil 37 ile gösterilmiştir.



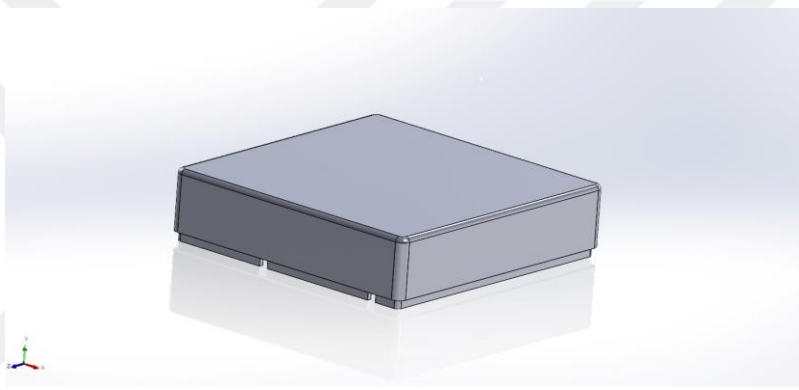
Şekil 37. Kontrol ve Sensör Modül Kutusu Üst Kapak Tasarımı

Anakart alt kapat tasarımı Şekil 38 ile gösterilmiştir.



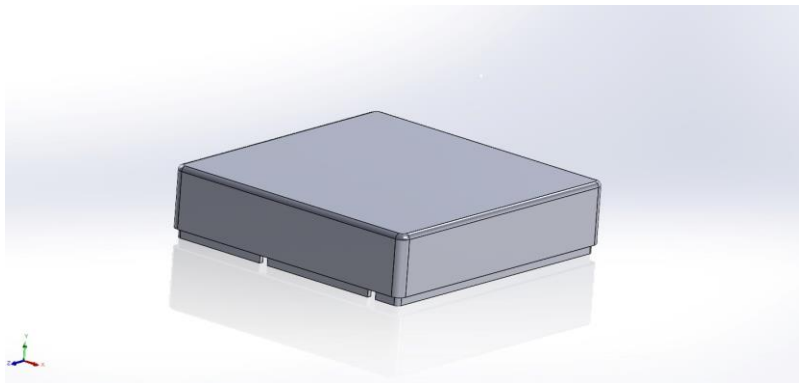
Şekil 38. Kontrol ve Sensör Modül Kutusu Alt Kapak Tasarımı

GNSS ünitelerinin bulunduğu üst kapak tasarımı Şekil 39 ile gösterilmiştir.



Şekil 39. Navigasyon Modül Kutusu Üst Kapak Tasarımı

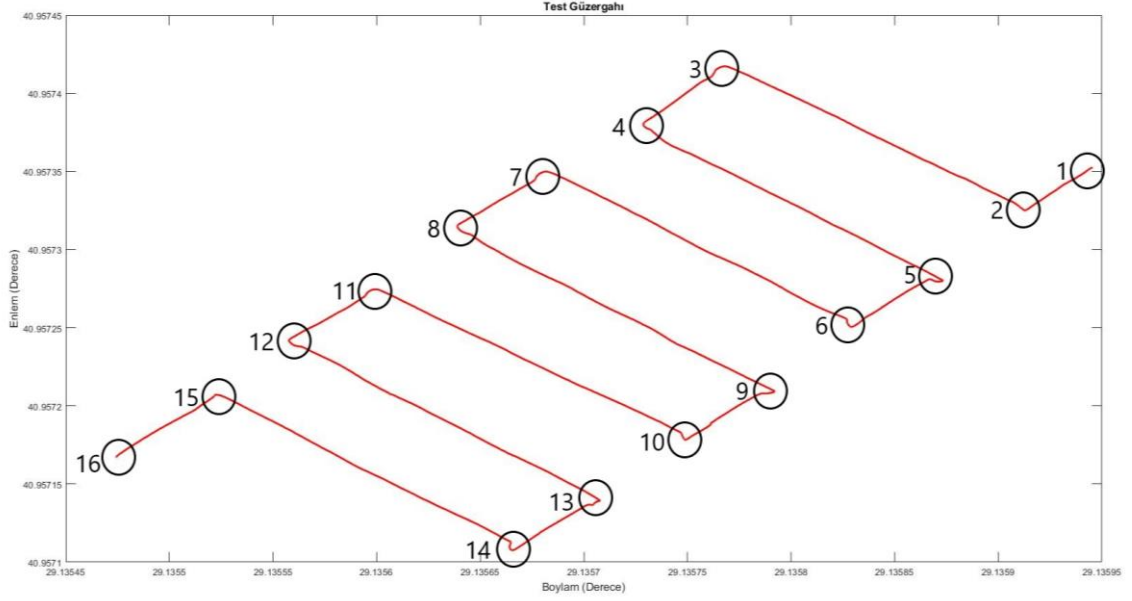
GNSS ünitelerinin bulunduğu alt kapak tasarımı Şekil 39 ile gösterilmiştir.



Şekil 40. Navigasyon Modül Kutusu Alt Kapak Tasarımı

3. TEST

Bu çalışma kapsamında, tasarlanan test düzeneği ile Marmara Üniversitesi Recep Tayyip Erdoğan Külliyesi Maltepe Yerleşkesi'nde belirlenen bir güzergâh boyunca iki aşamalı test gerçekleştirilmiştir. Test güzergahı Şekil 41 ile gösterilmiştir. Güzergâh yaklaşık olarak toplam 173 metredir.



Şekil 41. Test Güzergahı

Test güzergahında işaretlenen koordinat bilgileri ise Tablo 7 ile gösterilmiştir.

Tablo 7. Test Güzergahı

Adım	Enlem	Boylam	İrtifa	Mesafe (m)
1	40.957352	29.135945	124.518	0.0
2	40.957325	29.135913	125.064	4.029
3	40.957417	29.135769	126.105	15.84
4	40.957382	29.13573	125.34	5.086
5	40.957282	29.135872	126.497	16.304
6	40.95725	29.135829	125.518	5.069
7	40.95735	29.135681	125.922	16.676
8	40.957316	29.13564	125.165	5.113
9	40.957209	29.135792	126.427	17.45
10	40.957179	29.135748	125.455	4.978

11	40.957274	29.135599	125.67	16.375
12	40.957242	29.135558	124.485	4.951
13	40.957139	29.135707	125.462	16.963
14	40.957108	29.135666	125.012	4.872
15	40.957207	29.135523	125.322	16.29
16	40.957168	29.135475	124.84	5.92

İlk test, normal şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Araç, belirlenen güzergâh boyunca herhangi bir dış müdahale olmaksızın hareket ettirilmiş ve bu sırada GNSS alıcıları, IMU ve barometre sensörü tarafından veriler toplanmıştır. Bu test, GNSS ve diğer sensörlerin normal çalışma koşullarında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

İkinci testte, GNSS alıcılarının performansını bozucu sinyallerle değerlendirmek amacıyla bir karıştırma cihazı kullanılmıştır. Bu test sırasında, belirlenen güzergâh boyunca araç hareket ederken, karıştırma cihazı GNSS alıcılarına sinyal bozucu etki yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Bu sayede, GNSS alıcılarının karıştırıcı sinyal altında nasıl tepki verdiği ve toplanan verilerin kalitesi incelenmiştir. Testi yaparken kullanılan el tipi karıştırma cihazı Şekil 42 ile gösterilmiştir.



Şekil 42. Karıştırma Cihazı

Kullanılan el tipi karıştırma cihazı, L1 (1575.42 MHz) ve L2 (1227.60 MHz) GNSS sinyallerini hedef olarak geniş bir frekans aralığında çalışır. Cihaz, yüksek veya düşük güç olmak üzere iki farklı güç modunda çalışmaktadır. Güç modu, karıştırma işleminin etkinliğini ve menzilini belirlemektedir. Geniş bant (WB), dar bant (NB), sürekli dalga (CW) ve Chirp gibi çeşitli karıştırma modları bulunmaktadır. Bu modlar, cihazın sinyalleri nasıl yaydığını ve hangi sinyalleri hedef aldığını belirtmektedir. Cihazın kontrolü, üzerinde bulunan düğmeler ve LED göstergeler aracılığıyla sağlanır. Bu kontrol paneli, cihazın modlarını, frekanslarını ve güç seviyelerini ayarlamak için kullanılır.

Her iki test boyunca bütün sensörlerden sürekli veri toplanmıştır. Bu veriler, güzergâh boyunca aracın konumunu, hızını, ivmesini ve irtifasını belirlemek için kullanılmıştır. Toplanan veriler, testlerin sonunda detaylı bir şekilde analiz edilerek, normal ve bozucu sinyaller altında sistemin performansı karşılaştırılmıştır.

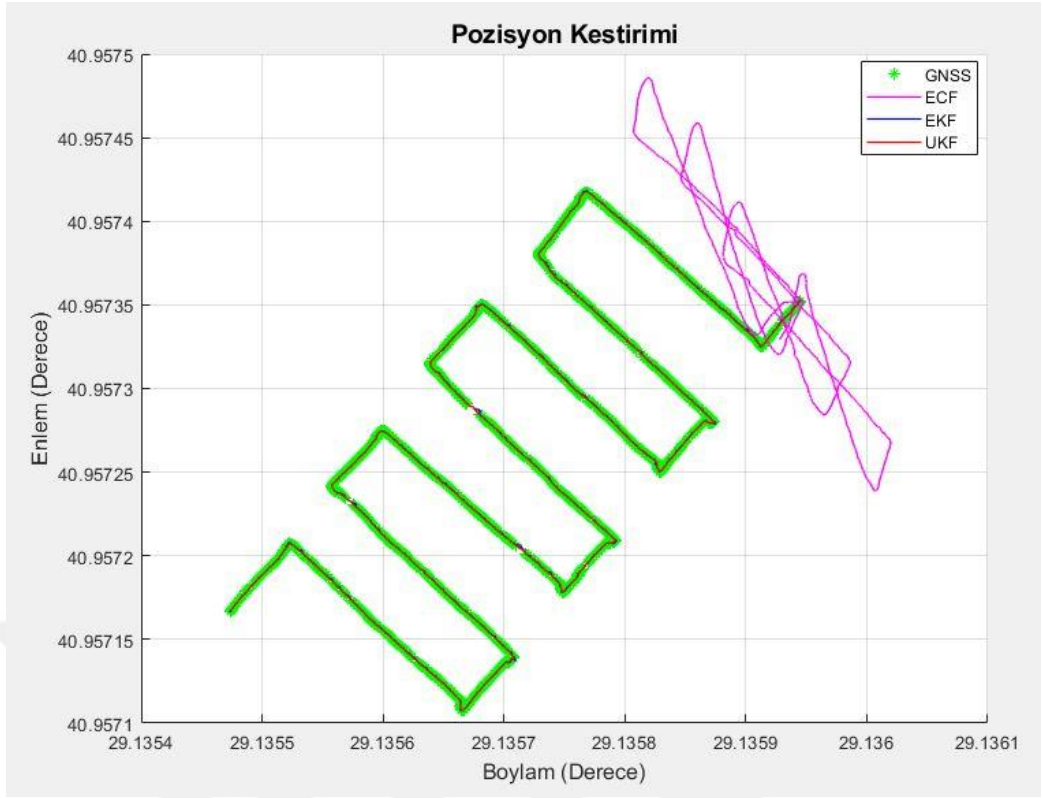
Elde edilen veriler kestirim analizlerinde kullanılmıştır. Bu analizde, aracın hareketleri, konum değişiklikleri ve çevresel koşullar detaylı olarak incelenmiş ve ileriye dönük tahminlerde bulunulmuştur. Kestirim analizi, özellikle GNSS alıcılarının normal ve bozucu sinyaller altında nasıl bir performans sergilediğini belirlemek aynı zamanda farklı kalman filtrelerinin karşılaştırılması ve sensörlerin güvenilirliğini değerlendirmek açısından önemli veriler sağlamıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

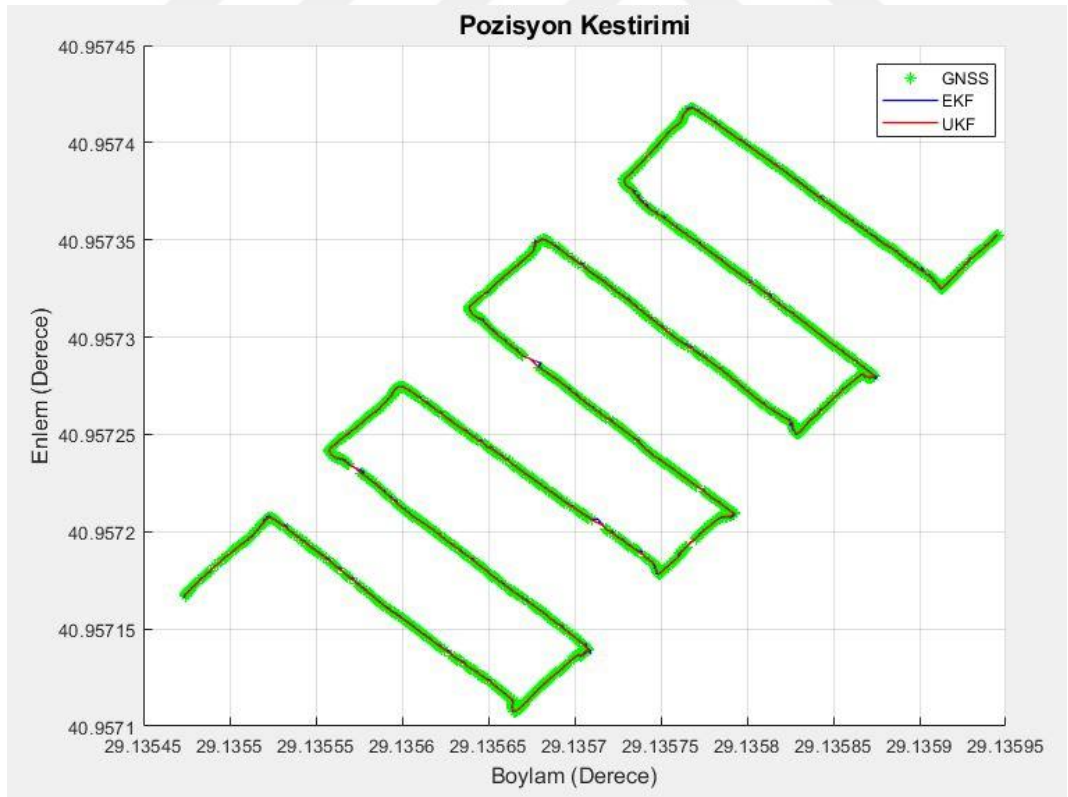
Normal koşullar altında yapılan testlerde UBLOX ZED-F9P GNSS alıcısından elde edilen veriler, pozisyon belirleme açısından yüksek doğruluk göstermiştir. Yapılan analizler, GNSS pozisyon verilerinin, belirlenen rota boyunca minimal sapma ile doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. IMU sensöründen alınan ivme, dönüölçer ve manyetometre verileri, değerlendirildiğinde, verilerin zamanla doğru bir şekilde toplandığı ve beklenen aralıkta 100Hz olduğu görülmüştür. Bu veriler kullanılarak gerçekleştirilen ECF pozisyon çözümleri, başlangıçta doğru sonuçlar vermesine rağmen zamanla küçük hataların birikmesi nedeniyle sapmalar oluşmuştur. Analizlerinde barometre sensöründen elde edilen yükseklik verilerinin, gerçek ortam koşullarıyla uyumlu olduğu ve yüksek doğrulukta olduğu gözlemlenmiştir. Manyetometre verileri, yön tayini açısından tutarlı sonuçlar sağlamıştır.

Karıştırma etkisinin olmadığı teste ait pozisyon kestirimleri Şekil 43, Şekil 44, Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47 ile gösterilmiştir. Burada UKF'nin özellikle dönüşlerde olmak üzere hattı düzgün takip ettiği de EKF'ye göre daha iyi pozisyon kestirimi yaptığı gözlemlenmiştir.

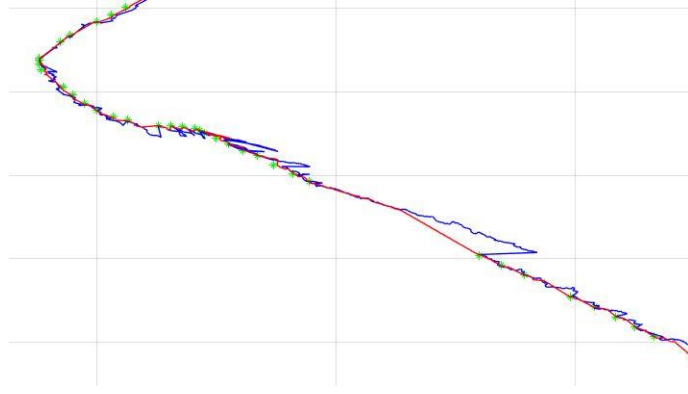
Analizlerde Test – 1 isimli görseller normal şartlar altında (karıştırmanın olmadığı), Test – 2 isimli görseller ise karıştırma etkisi altında yapılan testi belirtmektedir.



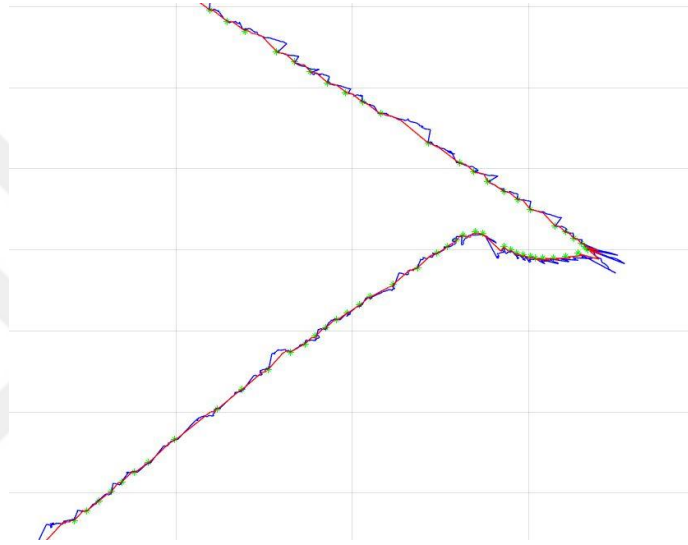
Şekil 43. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 1 (Normal Şartlar Altında)



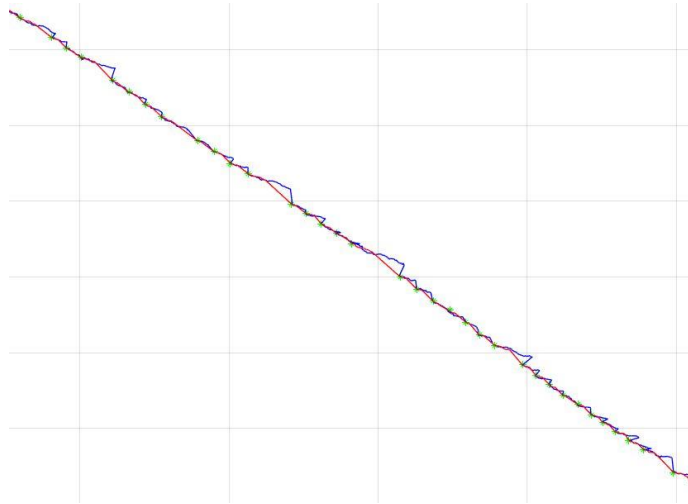
Şekil 44. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 2 (Normal Şartlar Altında)



Şekil 45. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 3 (Normal Şartlar Altında)

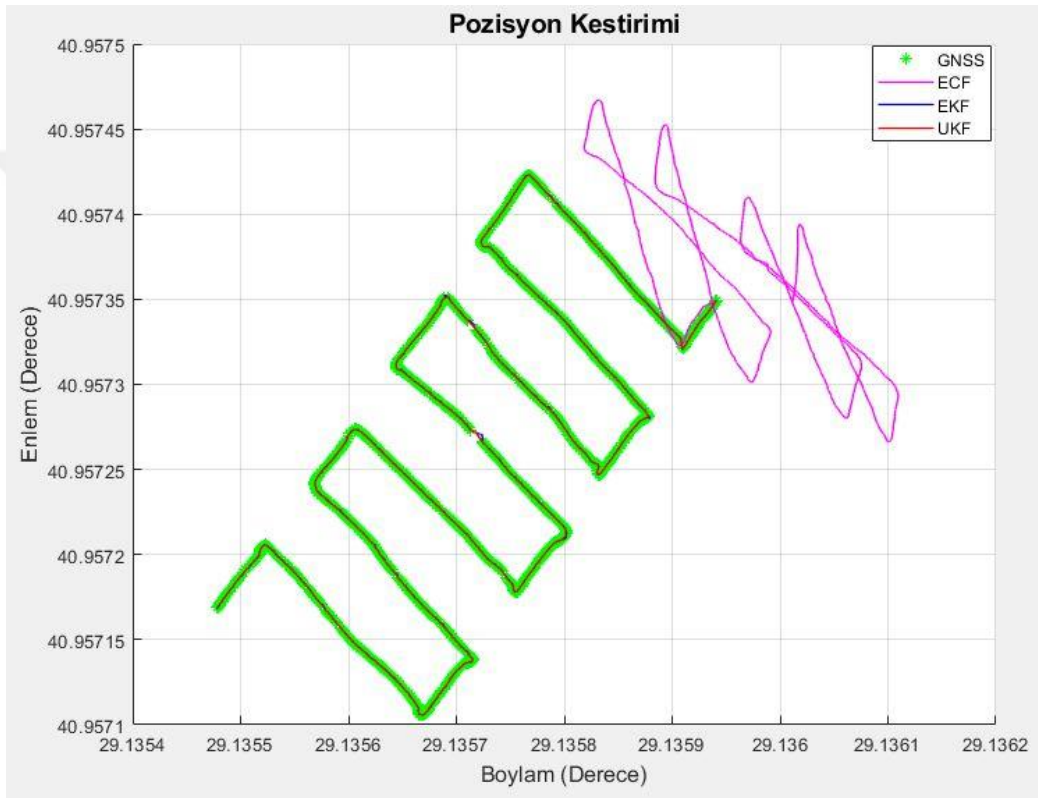


Şekil 46. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 4 (Normal Şartlar Altında)

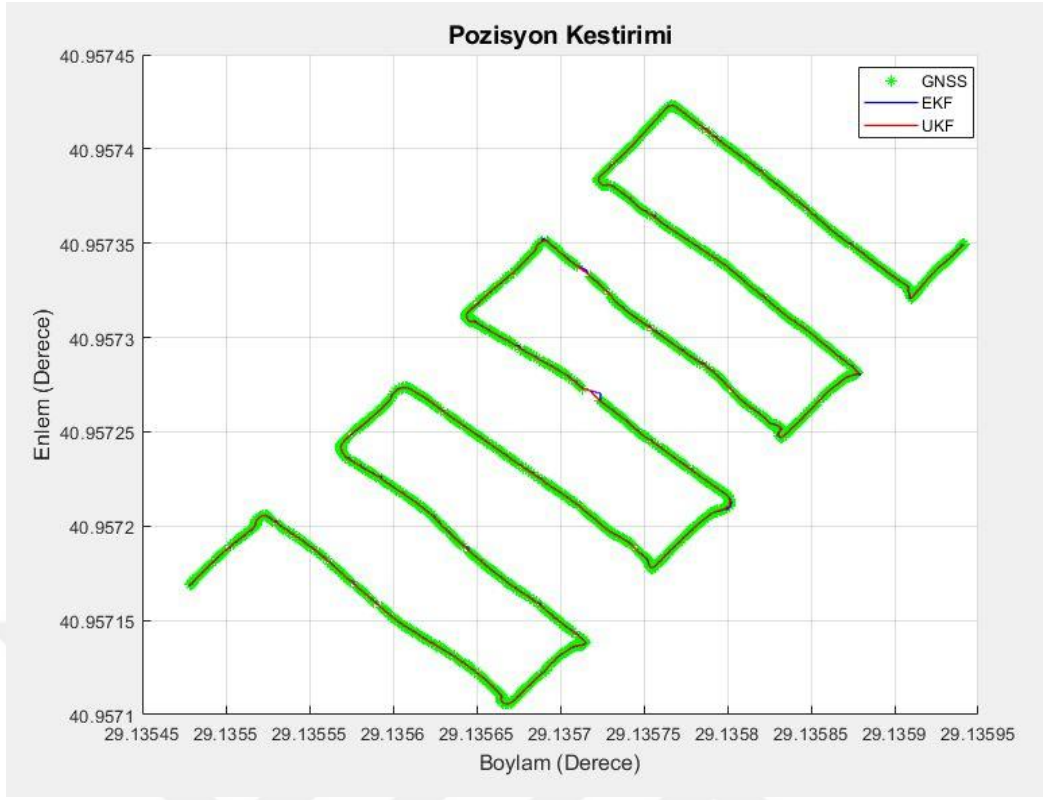


Şekil 47. Test – 1 Pozisyon Kestirimi – 5 (Normal Şartlar Altında)

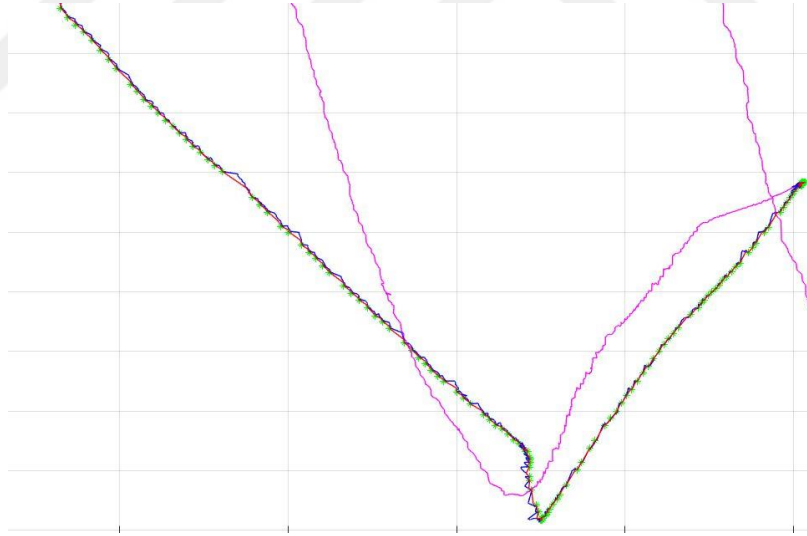
Karıştırma cihazı kullanılarak gerçekleştirilen testte, UBLOX ZED-F9P'nin karıştırma sinyallerine rağmen doğru pozisyon verileri üretmeye devam ettiğini göstermiştir. Bu, GNSS alıcısının karıştırma sinyallerine karşı beklenenden daha dayanıklı olduğunu ve performansını bozmadığını ortaya koymaktadır. Şekil 50 ile ECF kestiriminin başlangıçta GNSS pozisyon çözümüne yakın olduğu fakat zamanla hata biriktirdiğinden dolayı farklı pozisyona gittiği Şekil 48 ile gösterilmiştir. Karıştırma altında yapılan testlerde de UKF pozisyon kestiriminin EKF'ye göre daha iyi gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



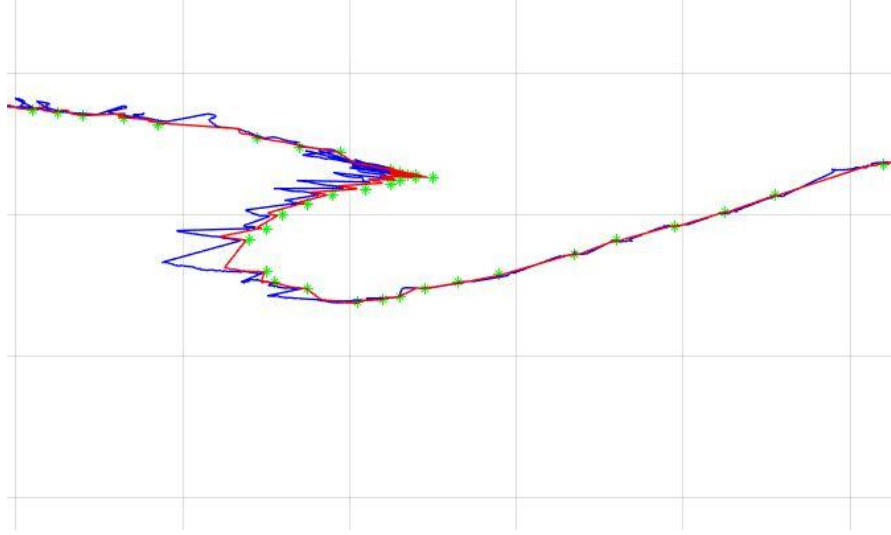
Şekil 48. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 1 (Karıştırma Etkisi Altında)



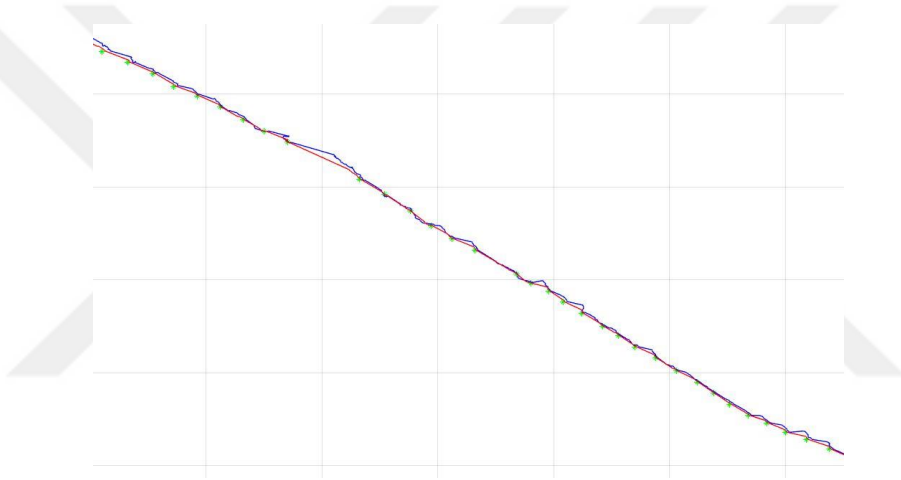
Şekil 49. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 2 (Karıştırma Etkisi Altında)



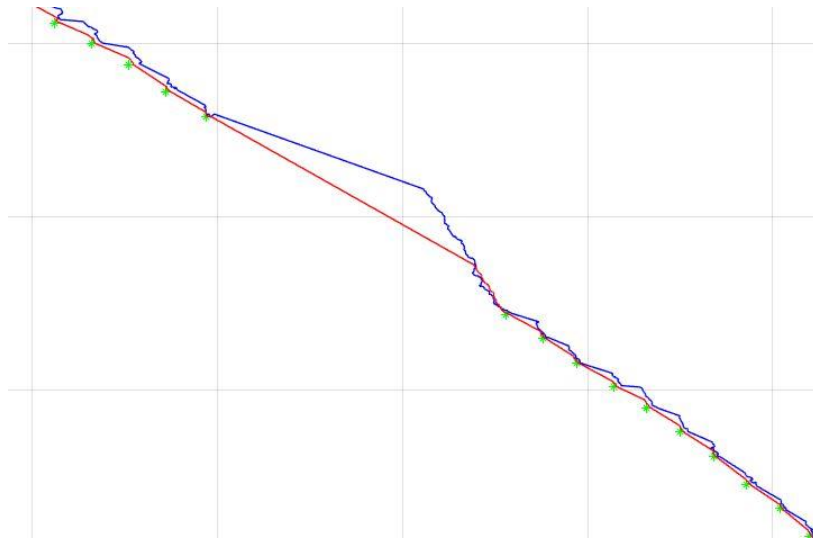
Şekil 50. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 3 (Karıştırma Etkisi Altında)



Şekil 51. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 4 (Karıştırma Etkisi Altında)



Şekil 52. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 5 (Karıştırma Etkisi Altında)



Şekil 53. Test – 2 Pozisyon Kestirimi – 6 (Karıştırma Etkisi Altında)

Toplanan verilerin analizi gerçekleştirildiğinde yapılan iki teste ait başarımlar Tablo 8 ve Tablo 9 ile gösterilmiştir.

Tablo 8. Test – 1 Başarımlar Durumu (Normal Şartlar Altında)

Kriter	ECF	EKF	UKF
Minimum Hata (m)	0.14	0.02	0.01
Maksimum Hata (m)	42.98	3.87	2.86
Ortalama Hata(m)	19.70	1.57	1.28
Standart Sapma(m)	11.50	0.87	0.72
Ortalama Süre	5ms	8ms	11ms
Hesaplama Karışıklığı	Düşük	Orta	Yüksek

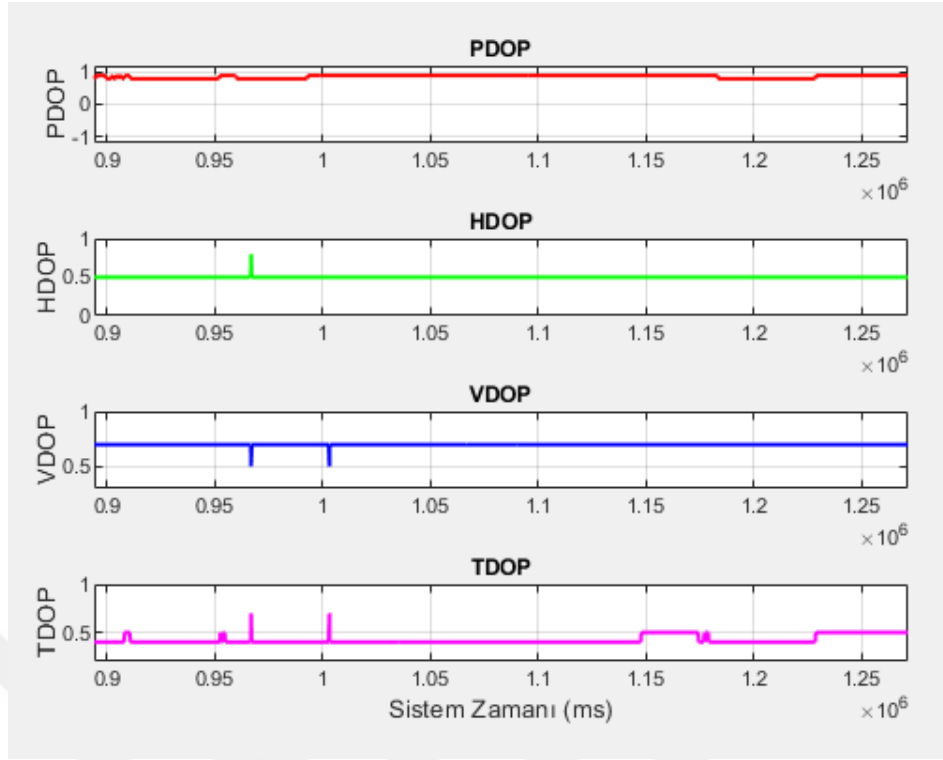
Tablo 9. Test – 2 Başarımlar Durumu (Karıştırma Etkisi Altında)

Kriter	ECF	EKF	UKF
Minimum Hata (m)	0.17	0.01	0.01
Maksimum Hata (m)	49.76	5.85	4.22
Ortalama Hata (m)	23.35	2.55	2.02
Standart Sapma (m)	14.48	1.45	1.16
Ortalama Süre	5ms	8ms	11ms
Hesaplama Karışıklığı	Düşük	Orta	Yüksek

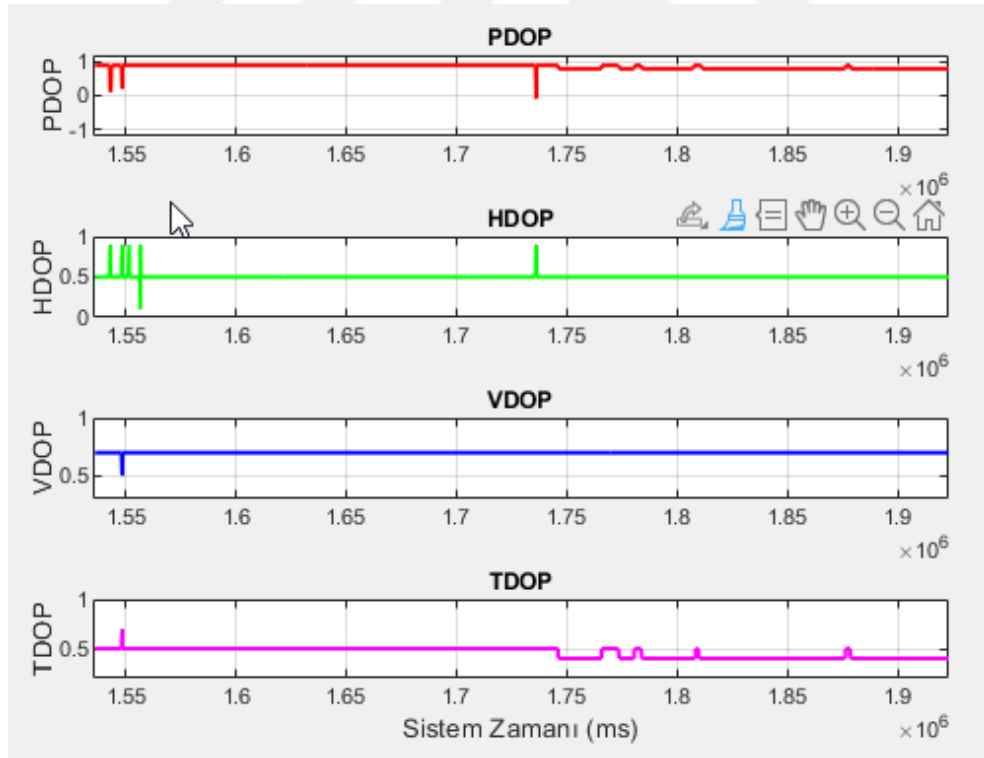
Yapılan testlerin sonuçlarına göre, normal koşullarda EKF, minimum hata değeri olarak 0.02 metre ile oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Ancak, maksimum hata değeri 3.87 metreye kadar çıkmış olup, bu durum EKF'nin belirli koşullarda daha yüksek hata sapmaları yaşadığını göstermektedir. Ortalama hata değeri 1.57 metre olup, hata değerlerinin ortalama etrafında dağılımını gösteren standart sapma değeri 0.87 metredir. Bu, EKF'nin stabil ve tutarlı bir kestirim sağladığını göstermektedir. Ortalama hesaplama süresi 8 milisaniye olarak belirlenmiş olup, bu süre, gerçek zamanlı uygulamalar için yeterli hızda çalışabileceğini ortaya koymaktadır. EKF'nin hesaplama karışıklığı orta düzeyde olup, bu da yöntemin genel kullanım için uygun olduğunu göstermektedir. UKF, minimum hata değeri olarak 0.01 metre ile en düşük hata oranını sağlamış ve maksimum hata değeri 2.86 metreye ulaşmıştır. Ortalama hata değeri 1.28 metre ile en düşük ortalama hataya sahiptir ve standart sapma değeri 0.72 metre ile hata

dağılımının daha dar olduğunu göstermektedir. Bu, UKF'nin kararlı ve doğru pozisyon kestirimi sağladığını ifade eder. Ortalama hesaplama süresi 11 milisaniye olup, EKF'ye göre biraz daha fazla zaman gerektirmektedir. Yüksek hesaplama karışıklığı, bu yöntemin daha karmaşık ve kaynak tüketici olduğunu ifade eder. Ancak, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için tercih edilebilir. Karıştırma koşullarında, EKF'nin minimum hata değeri 0.01 metreye düşmüş, maksimum hata değeri ise 5.85 metreye çıkmıştır. Bu durum, EKF'nin karıştırma etkisi altında doğruluğunun azaldığını ve hata aralığının genişlediğini göstermektedir. Ortalama hata değeri 2.55 metreye yükselmiş olup, standart sapma değeri 1.45 metreye çıkmıştır. Bu, karıştırma koşullarında EKF'nin hata dağılımının daha geniş olduğunu ve kestirimin stabilitesinin azaldığını ifade eder. UKF'nin minimum hata değeri 0.01 metre olarak sabit kalmış ve maksimum hata değeri ise 4.22 metreye çıkmıştır. Bu durum, UKF'nin karıştırma koşullarında da EKF'ye göre düşük hata oranını koruyabildiğini göstermektedir. Ortalama hata değeri 2.02 metre olup, standart sapma değeri 1.16 metredir. Bu değerler, UKF'nin karıştırma etkisi altında EKF'ye göre stabil bir performans sergilediğini gösterir.

Yapılan her iki teste ait DOP değerleri Şekil 54 ve Şekil 55 ile gösterilmiştir. DOP, GNSS sistemlerinde uydu geometrisinin konum ve zaman belirleme doğruluğunu etkileyen bir ölçüdür. Düşük DOP değeri, daha iyi uydu geometrisi ve daha yüksek konum doğruluğu sağlar. DOP değerleri genellikle PDOP (Pozisyon DOP), HDOP (Yatay DOP), VDOP (Dikey DOP) ve TDOP (Zaman DOP) olarak ayrılır. Bunlar sırasıyla üç boyutlu konum belirleme, yatay konum belirleme ve dikey konum belirleme için hassasiyetin azalmasını ölçer. GNSS alıcıları, DOP değerlerini dikkate alarak doğru konum belirleme sağlamak için uygun bir konumda uydu sinyallerini almayı tercih eder. Gerçekleştirilen testlerde ortamda karıştırma sinyallerinin de etkisinden kaynaklı Test-2 PDOP değerleri Test-1'e göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. DOP değerlerinin <1 olması uydular iyi bir geometride olduğunu ve konum belirleme doğruluğunun yüksek olduğunu belirtir. Her iki test için de bu durum geçerlidir.

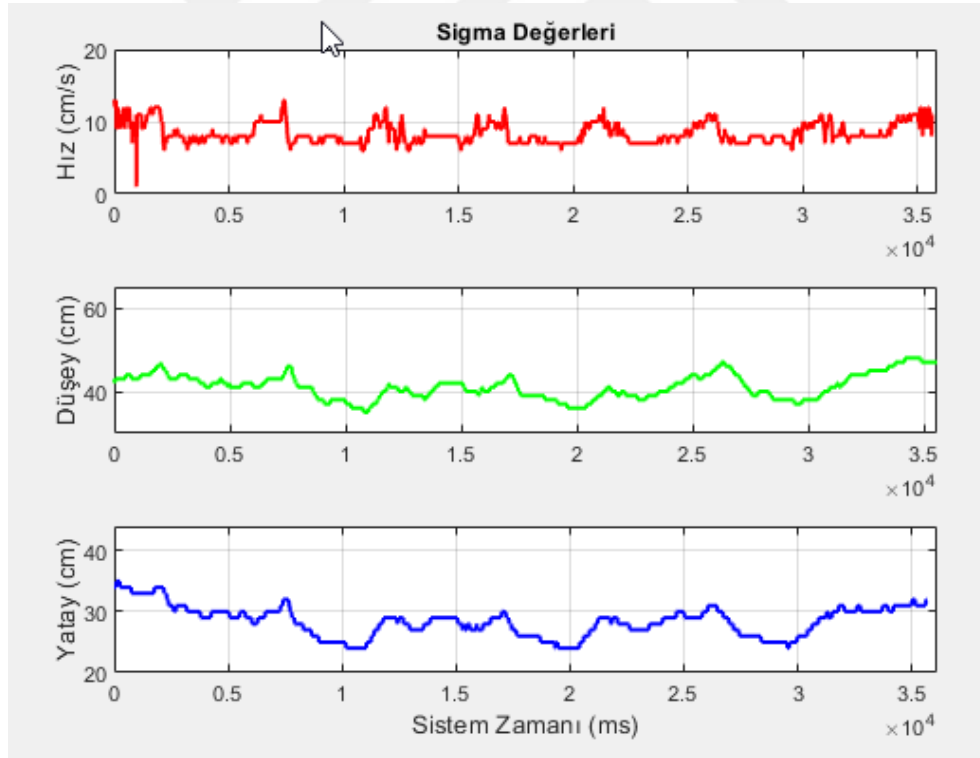


Şekil 54. Test – 1 DOP Değerleri (Normal Şartlar Altında)

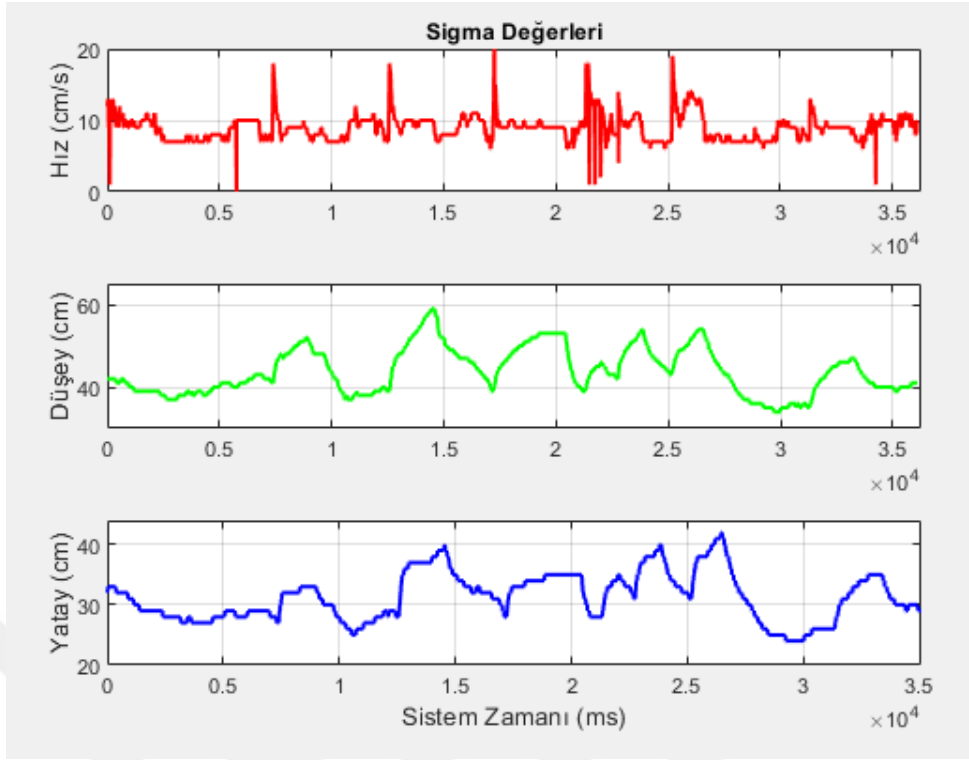


Şekil 55. Test – 2 DOP Değerleri (Karıştırma Etkisi Altında)

Sigma, GNSS uygulamalarında, ölçüm hatalarının veya sapmaların standart sapmasını ifade eder. Sigma parametreleri, GNSS ölçümlerinin doğruluğunu değerlendirmek ve belirli bir ölçümdeki hata oranını göstermek için kullanılır. GNSS sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sigma parametreleri arasında sigma hız, sigma düşey ve sigma yatay bulunur. Bu parametreler, GNSS alıcılarının konum, hız ve yükseklik ölçümlerindeki belirsizlikleri ve hata oranlarını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Sigma hız, hız bileşeninin tahmin edilen hata oranını ve bu ölçümdeki belirsizliğini, sigma düşey, dikey (yükseklik) konum bileşeninin tahmin edilen hata oranını ve bu ölçümdeki belirsizliği, sigma yatay ise yatay konum bileşeninin (enlem ve boylam) tahmin edilen hata oranını ve bu ölçümdeki belirsizliği ifade eder. Her iki teste ait sigma değerleri Şekil 56 ve Şekil 57 ile gösterilmiştir. Karıştırma altında yapılan testlerde, sigma değerlerinin, karıştırma olmadan yapılan teste göre biraz daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu artış, karıştırma sinyallerinin GNSS alıcısının sinyal kalitesini ve konum belirleme doğruluğunu olumsuz etkilediğini göstermektedir. Karıştırma sinyalleri, GNSS alıcısının hız, yükseklik ve yatay pozisyon hesaplamalarında daha büyük hata oranlarına yol açarak sigma değerlerinin artmasına neden olmuştur.

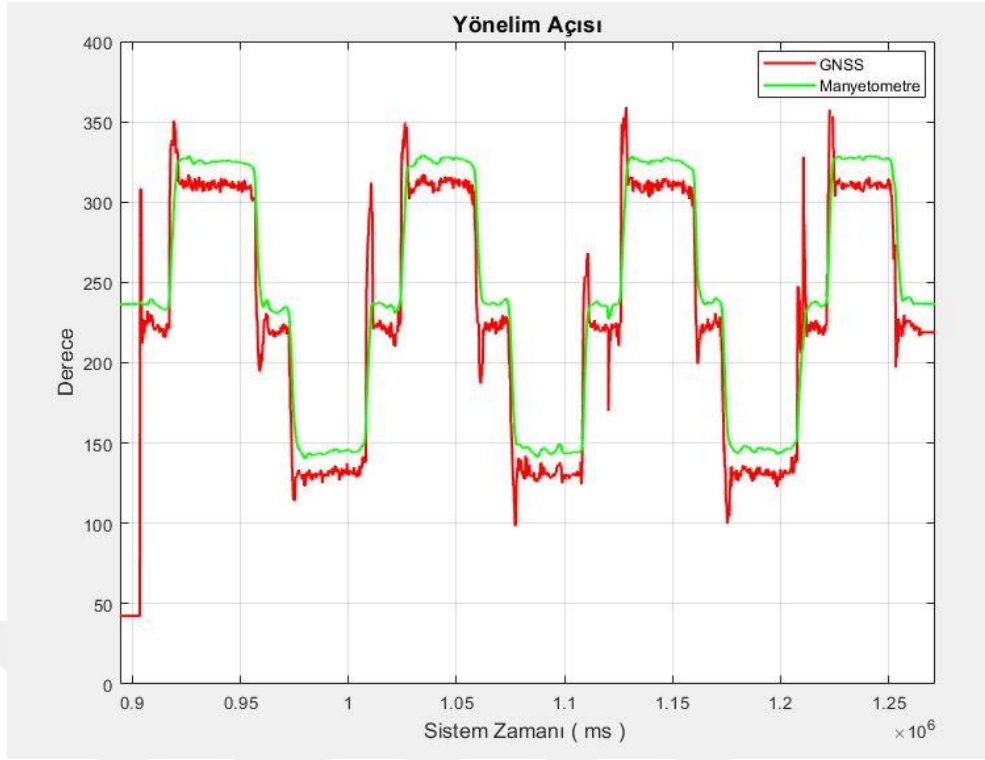


Şekil 56. Test – 1 Sigma Değerleri (Normal Şartlar Altında)

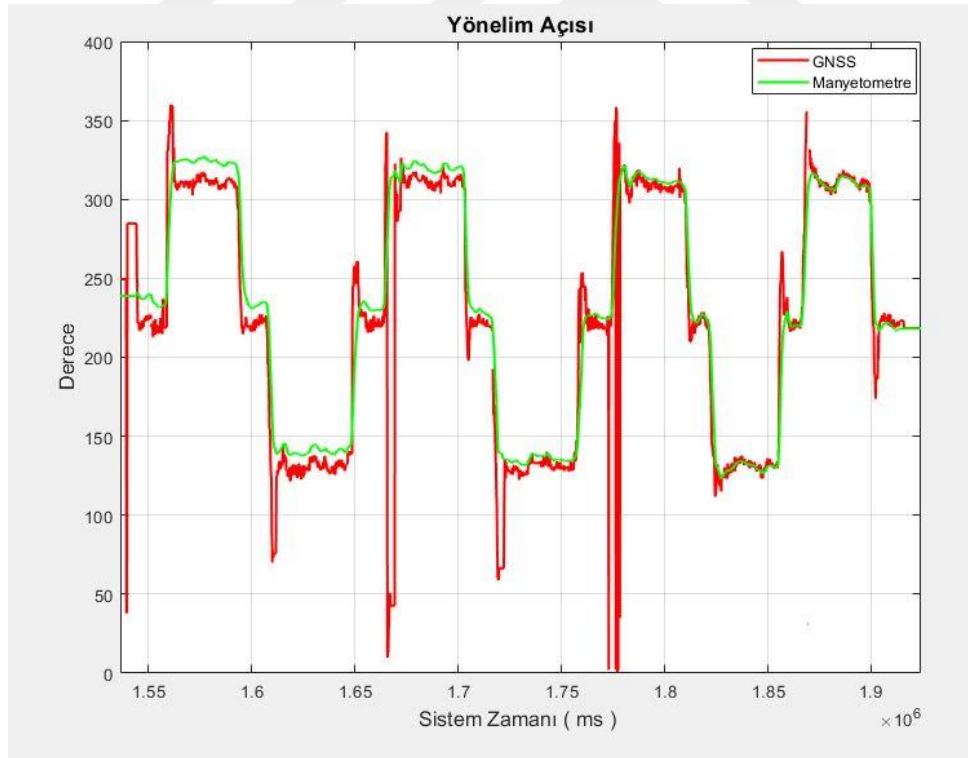


Şekil 57. Test – 2 Sigma Değerleri (Karıştırma Etkisi Altında)

GNSS ve manyetometre sensöründen elde edilen yönelim açıları Şekil 58 ve Şekil 59 ile gösterilmiştir. Manyetometreden elde edilen yönelim değerinin, GNSS ünitesinden elde edilen yönelim değerine göre daha kararlı olduğu görülmüştür. Bu, manyetometre sensörünün, manyetik alan ölçümlerine dayanarak daha tutarlı ve ani değişikliklere karşı daha dirençli yönelim verileri sağladığını gösterir. Manyetometre, çevresel manyetik alanları sürekli olarak ölçerek, yönelim değişikliklerini daha hassas bir şekilde algılayabilmektedir. Karıştırma altında yapılan testte görülen keskin dalgalanmalar, karıştırma sinyallerinin GNSS alıcısına etkisinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu dalgalanmalar, GNSS sinyallerinin karıştırma nedeniyle bozulduğunu ve doğruluklarının azaldığını göstermektedir. Yapılan analizlerde, GNSS sisteminin karıştırma sinyalleri altında ani yönelim değişikliklerine karşı daha hassas olduğu, manyetometrenin ise yönelim bilgisi sağlama konusunda daha tutarlı ve kararlı olduğunu görülmüştür.



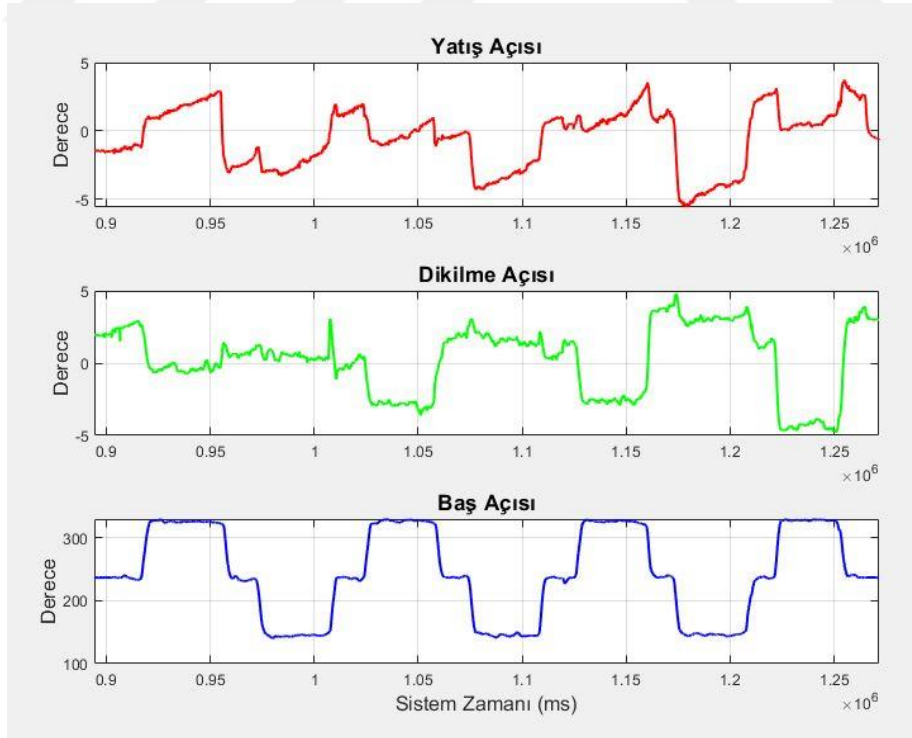
Şekil 58. Test – 1 Yönelim Açısı (Normal Şartlar Altında)



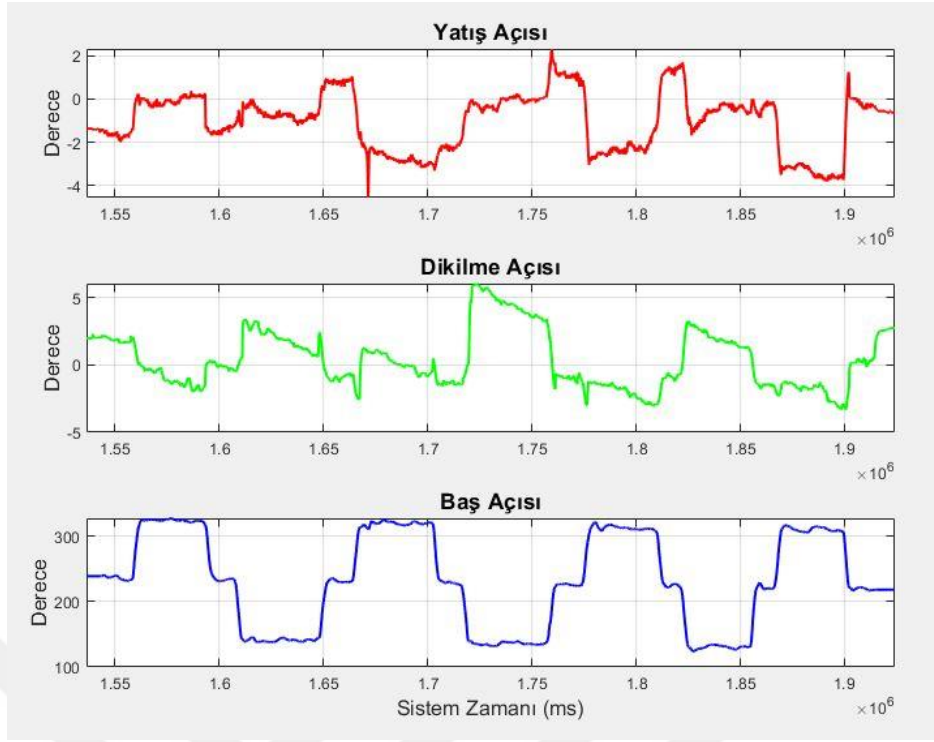
Şekil 59. Test – 2 Yönelim Açısı (Karıştırma Etkisi Altında)

Birinci test sırasında GNSS ve manyetometre verileri arasında belirgin bir fark bulunduğu Şekil 58 ile görülmektedir. Bu farkın, manyetometrenin ilk testte henüz tam olarak kalibre olmamış olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kalibrasyon süreci tamamlanmadan önce manyetometre, çevresel manyetik parazitlerden etkilenmiş ve bu da verilerde hatalara yol açmıştır. Birinci test esnasında manyetometre veri topladıkça kendini çevresel manyetik alanlara göre kalibre etmiştir. İkinci testte, manyetometrenin iyice kalibre olmuş olmasından dolayı, GNSS ve manyetometre verileri arasındaki farkın kapandığı gözlemlenmiştir. Bu, manyetometrenin çevresel etkilerden daha az etkilendiğini ve yönelim ölçümlerini daha doğru bir şekilde gerçekleştirdiğini gösterir. Kalibrasyon sonrası manyetometre, GNSS verileri ile daha uyumlu sonuçlar üreterek, GNSS ile arasındaki farkı minimize etmiştir.

IMU'dan elde edilen ham veriler ile hesaplanan Euler açıları Şekil 60 ve Şekil 61 ile gösterilmiştir. Her iki testte yatış, dikilme ve baş açıları düzenli olarak değişmekte ve sistemin hareket dinamiklerini yansıttığı görülmüştür. Birinci testte hareketlerin daha keskin ve dalgalı olduğu, ikinci testte ise hareketlerin daha kararlı hale geldiği gözlemlenmektedir. İkinci yapılan testte yatış, dikilme ve baş açıları daha tutarlı bir seyir izlediği Şekil 61 ile görülmüştür. Bu, IMU sensörlerinin kalibrasyon sürecinin tamamlandığını ve sistemin daha tutarlı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.



Şekil 60. Test – 1 Euler Açıları (Normal Şartlar Altında)



Şekil 61. Test – 2 Euler Açıları (Karıştırma Etkisi Altında)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Karıştırma altında yapılan testlerde UBLOX ZED-F9P GNSS alıcısının karıştırma sinyallerine karşı yüksek dayanıklılık gösterdiği, güvenilir bir şekilde çalıştığı ve pozisyon belirleme yeteneklerinin karıştırma sinyallerine rağmen etkilenmediği gözlemlenmiştir.

IMU ve manyetometre verileri kullanılarak yapılan ECF pozisyon çözümlerinde, başlangıçta doğruluğun sağlandığı ancak zamanla IMU sensörlerinden kaynaklanan birikimli hatalar nedeniyle pozisyon doğruluğunun azaldığı gözlemlenmiş ve IMU sensörlerinin uzun vadeli doğruluk üzerindeki sınırlamalarını ortaya koymaktadır. Bu tip uygulamalarda, harici bir sensör ile doğrulama yapmak gerekmektedir. GNSS ya da Odometre'nin yaygın olarak kullanıldığı yapılan araştırmalarda görülmüştür.

Yapılan analizler, UKF'nin EKF'ye kıyasla özellikle dönüşlerin olduğu noktalarda daha üstün performans sergilediğini göstermiştir. UKF, doğrusal olmayan dinamikleri daha iyi modelleyerek, ani dönüşler ve keskin virajlarda IMU verilerindeki sapmaları daha etkin bir şekilde düzeltebilmiştir. EKF'nin, dönüşler sırasında meydana gelen ani ivme değişiklikleri ve yön sapmalarını yeterince doğru modelleyememesi sonucu pozisyon hataları ortaya çıkarken, UKF, GNSS verileriyle IMU verilerini daha etkin bir şekilde birleştirerek bu dinamik değişimlere hızlı tepki vermiş ve daha doğru pozisyon belirleme sağlamıştır. Bu durum, UKF'nin yüksek doğruluk gerektiren ve dinamik değişimlerin yoğun olduğu uygulamalarda EKF'ye göre daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan testlerin sonuçları, UKF'nin hem normal hem de sinyal karıştırma koşullarında düşük hata oranları ve stabil performansı ile öne çıktığını göstermektedir. UKF'nin minimum hata ve düşük standart sapma değerleri, bu yöntemin yüksek doğruluk ve kararlılık gerektiren uygulamalar için ideal olduğunu ortaya koyarken, hesaplama süresi ve karmaşıklığının yüksek olması, daha fazla işlem gücü gerektiren senaryolar için uygun olduğunu belirtmektedir. EKF ise, hız ve doğruluk açısından dengeli bir performans sergileyerek, genel kullanım için tatmin edici bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalar için, orta düzeyde hesaplama karmaşıklığı ve kabul edilebilir hata oranlarıyla uygun bir tercih olabilir. Her iki filtre de sinyal karıştırma koşullarında hata oranlarında artış gösterse de UKF'nin daha düşük hata oranları ve stabil performansı, bu yöntemin karıştırmaya karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yüksek doğruluk ve kararlılık gerektiren durumlar için UKF, daha hızlı ve genel kullanım için ise EKF tercih edilmelidir.

GNSS ve Manyetometre sensöründen elde edilen yönelim verileri incelendiğinde, manyetometreden elde edilen verilerinin doğruluğu büyük ölçüde kalibrasyonuna bağlı olduğu görülmüştür. Manyetometre, çevresel manyetik parazitlerden etkilenerek hatalı ölçümler yapabilmekte ve bu da yönelim verilerinin doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Kalibrasyon süreci, manyetometrenin bu çevresel etkileri tanıyıp, hataları en aza indirmesini sağlar. İyi kalibre edilmiş bir manyetometre, çevresel manyetik alanlardan daha az etkilenir ve daha doğru ve güvenilir yönelim verileri sunar. Yapılan testlerde, manyetometre kalibrasyonunun, doğru ve güvenilir yönelim ölçümleri elde etmek için kritik olduğu gözlemlenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] Montello, D. R. (2005). Navigation. In P. Shah (Ed.) & A. Miyake, The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking (pp. 257–294). Cambridge University Press.
- [2] Steinhoff, U., & Schiele, B. (2010, March). Dead reckoning from the pocket-an experimental study. In 2010 IEEE international conference on pervasive computing and communications (PerCom) (pp. 162-170). IEEE.
- [3] Castanedo, F. (2013). A review of data fusion techniques. The scientific world journal, 2013.
- [4] İlvan, A., & Bostancı, B. (2021). İnsansız Hava Araçları İçin Düşük Bütçeli INS/GNSS Sistemi Entegrasyonunda Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Kokusuz Kalman Filtresi Yöntemlerinin Karşılaştırılması.
- [5] Urmat, S. (2015). Yönelim Çıkarımı İçin Arm Tabanlı Bir Gömülü Sistem Tasarımı Ve Gerçeklenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [6] C. K. Chui, G. Chen et al., Kalman Filtering: With Real-time Applications. Springer,
- [7] Shrotriya, A. (2010). Robot path planning and tracking of a moving target using Kalman filter.
- [8] Pricope, B., & Haas, H. (2011, September). Performance analysis of a novel pedestrian dead-reckoning method. In 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (pp. 1244-1248). IEEE..
- [9] Özkan, O. (2019). Sensör füzyonu algoritmaları ile açısız konum referans sistemi tasarımı. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1), 93-103.
- [10] Julier, S. J., Uhlmann, J. K., & Durrant-Whyte, H. F. (1995, June). A new approach for filtering nonlinear systems. In Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95 (Vol. 3, pp. 1628-1632). IEEE.
- [11] Quine, B., Uhlmann, J., & Durrant-Whyte, H. (1995, June). Implicit Jacobian for linearised state estimation in nonlinear systems. In Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95 (Vol. 3, pp. 1645-1646). IEEE.
- [12] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (1997, July). New extension of the Kalman filter to nonlinear systems. In Signal processing, sensor fusion, and target recognition VI (Vol. 3068, pp. 182-193). Spie.
- [13] Wan, E. A., & Van Der Merwe, R. (2000, October). The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. In Proceedings of the IEEE 2000 adaptive systems for signal

- processing, communications, and control symposium (Cat. No. 00EX373) (pp. 153-158). Ieee.
- [14] Günhan, Y. (2014). Ataletsel ölçüm birimi hatalarının belirlenmesi ve düzeltilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [15] Hegarty, C. J., & Chatre, E. (2008). Evolution of the global navigation satellitesystem (gnss). *Proceedings of the IEEE*, 96(12), 1902-1917.
- [16] Hegarty, C. J. (2012, May). GNSS signals—An overview. In *2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings* (pp. 1-7). IEEE.
- [17] Kaplan, E. D., & Hegarty, C. (Eds.). (2017). *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. Artech house.
- [18] Brown, A., & Nordlie, J. (2006, April). Integrated GPS/TOA navigation using a positioning and communication software defined radio. In *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006* (pp. 147-152).
- [19] Haddad, R., Kovach, K., Slattery, R., & Gillis, J. (2020, April). GPS modernization and beyond. In *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)* (pp. 399-406). IEEE.
- [20] Steigenberger, P., Thielert, S., & Montenbruck, O. (2020). GPS III Vespucci: Results of half a year in orbit. *Advances in Space Research*, 66(12), 2773-2785.
- [21] Shakor, A. Q. (2022). Gözlem aralığının GPS, Glonass, Galileo ve BeiDou statik PPP üzerindeki etkisinin araştırılması (Doctoral dissertation, Necmettin Erbakan University (Turkey)).
- [22] Uzel, T., Kartal, F., Gülal, E., Erkaya, H., & Hoşbaş, G. (1999). GPS/Glonass ikili sistemi. *Harita Kadastro Mühendisliği Dergisi*, 5, 53-69.
- [23] Bazarov, Y. (1996). *Introduction to Global Navigation Satellite System/AG A RD ECTURE SERIES 207. System implications and innovative applications of satellite navigation*. NATO AGARD.
- [24] European Union. (2010). *European GNSS (Galileo) open service: signal in space interface control document*. Office for Official Publications of the European Communities.
- [25] Yang, Y., Gao, W., Guo, S., Mao, Y., & Yang, Y. (2019). Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system. *Navigation*, 66(1), 7-18.
- [26] ICD, B. (2018). *BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document. Open Service Signal Version, 2*.

- [27] Aggrey, J., Bisnath, S., Naciri, N., Shinghal, G., & Yang, S. (2020). Multi-GNSS precise point positioning with next-generation smartphone measurements. *Journal of Spatial Science*, 65(1), 79-98.
- [28] Blewitt, G. (1997). Basics of the GPS technique: observation equations. *Geodetic applications of GPS*, 1, 46.
- [29] Jgouta, M., & Nsiri, B. (2015). Statistical estimation of GNSS pseudo-range errors. *Procedia Computer Science*, 73, 258-265.
- [30] Davidovic, M., & Mijic, N. (2017). Analysis of the influence of satellites constellation in GNSS positioning accuracy. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 15(2), 141.
- [31] Al Qathrady, M., & Helmy, A. (2017, November). Improving BLE distance estimation and classification using TX power and machine learning: A comparative analysis. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems* (pp. 79-83).
- [32] Noureldin, A., Karamat, T. B., & Georgy, J. (2012). *Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration*. Springer Science & Business Media.
- [33] Dey, A., & Dashora, N. (2015, November). Low latitude ionospheric effects: GNSS positioning at ionospheric anomaly peak region. In *2015 International Conference on Computers, Communications, and Systems (ICCCS)* (pp. 108-112). IEEE.
- [34] Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2007). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.
- [35] Enge, P., & Misra, P. (2011). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance-Revised*. *International Journal of Wireless Information Networks*.
- [36] Godha, S. (2006). Performance evaluation of low cost MEMS-based IMU integrated with GPS for land vehicle navigation application. UCGE report, (20239).
- [37] Schultz, C. E. (2006). *INS and GPS integration* (Master's thesis, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark).
- [38] Petovello, M. G. (2003). *Real-time integration of a tactical-grade IMU and GPS for high-accuracy positioning and navigation*.
- [39] Institute of Navigation. (1980). *Global Positioning System: Papers Published in Navigation* (Vol. 1). Institute of Navigation.

- [40] Walter, T., & El-Arini, M. B. (Eds.). (1999). Global Positioning System: Papers published in NAVIGATION, Vol. VI (Satellite-based Augmentation Systems). The Institute of Navigation.
- [41] RTCA (Firm). SC-159. (2006). Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment. RTCA.
- [42] Abeyratne, R. (2014). Convention on international civil aviation. A Commentary, Switzerland.
- [43] Groves, P. D. (2015). Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, [Book review]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 30(2), 26-27.
- [44] Titterton, D., & Weston, J. L. (2004). Strapdown inertial navigation technology (Vol. 17). IET.
- [45] Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2014). Kalman filtering: Theory and Practice with MATLAB. John Wiley & Sons.
- [46] Jekeli, C. (2023). Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- [47] Farrell, J., & Barth, M. (1999). The global positioning system and inertial navigation.
- [48] Skog, I., & Handel, P. (2009). In-car positioning and navigation technologies—A survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10(1), 4-21.
- [49] Gebre-Egziabher, D., Elkaim, G. H., David Powell, J., & Parkinson, B. W. (2006). Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain. Journal of Aerospace Engineering, 19(2), 87-102.
- [50] Walter, P. L. (2007). The history of the accelerometer: 1920s-1996-prologue and epilogue, 2006. Sound & vibration, 41(1), 84-90.
- [51] Yazdi, N., Ayazi, F., & Najafi, K. (1998). Micromachined inertial sensors. Proceedings of the IEEE, 86(8), 1640-1659.
- [52] Bhattacharyya, S. S., Deprettere, E. F., Leupers, R., & Takala, J. (Eds.). (2013). Handbook of signal processing systems. New York: Springer.
- [53] Erdener, Ö. (2005). MEMS Accelerometer Design (Doctoral dissertation, MS Thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul).
- [54] Fraden, J., & King, J. G. (2016). Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications (Vol. 5). New York: springer.

- [55] Passaro, V. M., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., & Campanella, C. E. (2017). Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. *Sensors*, 17(10), 2284.
- [56] Schmidt, G. T. (2015). Navigation sensors and systems in GNSS degraded and denied environments. *Chinese journal of aeronautics*, 28(1), 1-10.
- [57] Renaudin, V., Afzal, M. H., & Lachapelle, G. (2010, May). New method for magnetometers based orientation estimation. In *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* (pp. 348-356). IEEE.
- [58] Ariffin, N. H., & Arsad, N. (2017). MEMS gyroscope and accelerometer based north finding system. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(22), 6517-6522.
- [59] Sasiadek, J. Z. (2002). Sensor fusion. *Annual Reviews in Control*, 26(2), 203-228.
- [60] Yeong, D. J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J., & Walsh, J. (2021). Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*, 21(6), 2140.
- [61] Valenti, R. G., Dryanovski, I., & Xiao, J. (2015). Keeping a good attitude: A quaternion-based orientation filter for IMUs and MARGs. *Sensors*, 15(8), 19302-19330.
- [62] Won, S. H. P., Melek, W. W., & Golnaraghi, F. (2009). A Kalman/particle filter-based position and orientation estimation method using a position sensor/inertial measurement unit hybrid system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(5), 1787-1798.
- [63] Gupta, A. K., Koilpillai, R. D., Evani, S. S. S. (2007). A Kalman Filtering Approach for Integrating MEMS Based INS and GPS for Land Vehicle Application *Proceedings of National Conference on Communications*, 1–5.
- [64] Thacker, N., & Lacey, A. (1998). Tutorial: The kalman filter. *Imaging Science and Biomedical Engineering Division, Medical School, University of Manchester*, 61.
- [65] Teunissen, P. J., & Kleusberg, A. (Eds.). (2012). *GPS for Geodesy*. Springer Science & Business Media.
- [66] Ailneni, S., Kashyap, S. K., Kumar, N. S., Livingstone, D. D., Aishwarya, N., Varghese, N., & Karthik, K. V. (2019, February). Characterization of MEMS based inertial measurement unit. In *2019 International Conference on Range Technology (ICORT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [67] Bhise, A., Jana, S., Tony, L. A., & Ghose, D. (2020). Target state estimation and prediction for high speed interception. *arXiv preprint arXiv:2010.02512*.

- [68] Sun, R., Yang, Y., Chiang, K. W., Duong, T. T., Lin, K. Y., & Tsai, G. J. (2020). Robust IMU/GPS/VO integration for vehicle navigation in GNSS degraded urban areas. *IEEE Sensors Journal*, 20(17), 10110-10122.
- [69] Tailanián, M., Paternain, S., Rosa, R., & Canetti, R. (2014, May). Design and implementation of sensor data fusion for an autonomous quadrotor. In *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings* (pp. 1431-1436). IEEE.
- [70] Balzer, P., Trautmann, T., & Michler, O. (2014, September). Epe and speed adaptive extended kalman filter for vehicle position and attitude estimation with low cost gnss and imu sensors. In *2014 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)* (Vol. 1, pp. 649-656). IEEE.
- [71] Gao, J. (2007). Development of a precise GPS/INS/on-board vehicle sensors integrated vehicular positioning system. Calgary, AB, Canada: University of Calgary.
- [72] Winnerling, T. Kollektiver Individualismus und das Heavy Metal Universe. *Metal Matters. Heavy Metal als Kultur und Welt*, 457.
- [73] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401-422.
- [74] Shin, E. H., & El-Sheimy, N. (2004, April). An unscented Kalman filter for in-motion alignment of low-cost IMUs. In *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium* (IEEE Cat. No. 04CH37556) (pp. 273-279). IEEE.
- [75] Shin, E. H. (2005). Estimation techniques for low-cost inertial navigation.
- [76] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2002, May). Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariances through nonlinear transformations. In *Proceedings of the 2002 American control conference* (IEEE Cat. No. CH37301) (Vol. 2, pp. 887-892). IEEE.
- [77] Van der Merwe, R. (2000). Doucet, and A., de Freitas, "The unscented particle filter,". Technical Report CUED/F-INFENG/TR 380, Cambridge University Engineering Department.
- [78] Wan, E. A., & Van Der Merwe, R. (2001). The unscented Kalman filter. *Kalman filtering and neural networks*, 221-280.
- [79] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401-422.

- [80] u-blox AG. (2023). PointPerfect - Precise positioning service. Erişim adresi: <https://www.u-blox.com/en/pointperfect>
- [81] Hohensinn, R., Stauffer, R., Glaner, M. F., Herrera Pinzón, I. D., Vuadens, E., Rossi, Y., ... & Rothacher, M. (2022). Low-cost gnss and real-time ppp: Assessing the precision of the u-blox zed-f9p for kinematic monitoring applications. Remote Sensing, 14(20), 5100.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Ramazan SAYAN

Lisans: Marmara Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği (3.28/4.0)

