

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALMAN FİLTRE TABANLI
SENSÖR FÜZYON TEKNİĞİ KULLANILARAK
SU KAYIP VE KAÇAK KONUM KESTİRİM ROBOTU**



ABDULLAH ERHAN AKKAYA

**DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

AĞUSTOS 2017

Tezin Başlığı : Kalman Filtre Tabanlı Sensör Füzyon Tekniğı Kullanılarak
Su Kayıp ve Kaçak Konum Kestirim Robotu

Tezi Hazırlayan : Abdullah Erhan AKKAYA

Sınav Tarihi : 17.08.2017

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerdendirilerek Bilgisayar Mühendisliğı Ana
Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Muhammed Fatih TALU**
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Ali KARCI
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Davut HANBAY
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Burhan ERGEN
Fırat Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇINAR
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Kalman Filtre Tabanlı Sensör Füzyon Tekniğı Kullanılarak Su Kayıp ve Kaçak Konum Kestirim Robotu” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

ABDULLAH ERHAN AKKAYA

ÖZET

Doktora Tezi

KALMAN FİLTRE TABANLI SENSÖR FÜZYON TEKNIĞI KULLANILARAK SU KAYIP VE KAÇAK KONUM KESTİRİM ROBOTU

Abdullah Erhan Akkaya

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

96 + xii sayfa

2017

Danışman: Doç. Dr. Muhammed Fatih TALU

Giderek artan insan nüfusu ve yerleşim bölgesi sayısı, suya olan talebi günden güne artırmaktadır. Gelecek nesillerin de içilebilir su kaynaklarından faydalanabilmesi için su tasarrufu gerekmektedir. Suyu korumanın bir yolu boru hatlarında meydana gelen boru çatlakları ve arızalarından kaynaklanan su kayıplarını azaltmaktır. Bu arızaların tespit edilerek mümkün olan en kısa zamanda onarılması, su kaybının yanında gelir kaybının da önlenmesi için oldukça önemlidir. Dağıtım şebekelerinde yüksek maliyete sahip genel onarım işlemleri yerine, arızanın kesin konumunun bulunup sadece o bölgede çalışma yapılması onarım maliyetlerini azaltacaktır. Yüzeysel boru dinleme cihazları bu ihtiyaca bir çözüm olarak görünse de, dış ortam seslerinden etkilendiğinden tercih edilmemektedir. Ayrıca yeraltı su kaçaklarının büyük çoğunluğunun küçük çapta olması, bu kaçakların saptanmasını oldukça zorlaştırmaktadır.

Ticari olarak mevcut olan GPS temelli sistemler yüksek maliyetlere sahiptir. Bu tez çalışmasının genel amacı daha küçük çaplı borularda ve GPS sistemine ihtiyaç duymadan çalışabilecek bir kaçak tespit robotu üretmektir. Robot boru içerisinde suyun itme kuvvetiyle hareket etmektedir. Robotun tasarımı, üretimi, kaçak konumu tahmin yazılımları ve test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Robotun boru içerisindeki

hareket güzergâhı, atalet sensörü verisinin (jiroskop, ivmeölçer, manyetik alan ölçer) Genişletilmiş Kalman Filtresiyle birlikte kullanımıyla hesaplanmıştır. Genişletilmiş Kalman Filtresi, jiroskop ölçümlerinin kümülatif toplamından elde edilen hatanın düzeltilmesi için jiroskop, ivmeölçer ve manyetik alan sensörlerinin füzyonunda kullanılmıştır. Elde edilen kuaterniyon değeri kullanılarak ivmeölçer değeri düzeltilmiş sonrasında ise konum hesaplanmıştır. Kaçak konum tahmini, anlık kaydedilen ses verisindeki tepe noktalara karşılık gelen konumun tespitini içermektedir.

Üretilen robot henüz su geçirmez muhafaza içerisine alınmadığından, prototipin test çalışmaları yer üzerinde gerçekleştirilmiştir. Prototip robot kullanılarak farklı hareket senaryoları üzerinde konumu belli olan kaçak bölgelerinin tespiti çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde ortalama 120 metre uzunluğuna sahip bir hat üzerindeki kaçak konumunun ortalama 0,30 metre hatayla tespit edilebildiği görülmüştür. Sonuç olarak, kaçak tespitinin yüksek doğrulukta ve ekonomik bir şekilde yapılabildiği görülmüştür. Konum tahmin yazılımının genelleştirilerek sensör bağımsız hale getirilmesi, robotun sızdırmazlık çalışması ve yapay öğrenme teknikleriyle konum tahminin öğrenilmesi çalışmaları devam etmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Kaçak konum tespiti, sensör füzyonu, Genişletilmiş Kalman Filtresi, kuaterniyon, su boru hatları.

ABSTRACT

Ph.D.Thesis

WATER LOSS AND LEAK LOCATION ESTIMATION ROBOT USING KALMAN FILTER BASED SENSOR FUSION TECHNIQUE

Abdullah Erhan Akkaya

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Computer Engineering

96 + xii pages

2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Muhammed Fatih TALU

Increasing numbers of human populations and settlement areas are increasing the demand for water day by day. Water saving is needed for future generations to benefit them from potable water resources. One way to protect water is to reduce water losses from pipe cracks and faults that occur in pipelines. It is very important to identify these failures and repair them as soon as possible in order to prevent loss of water as well as loss of revenue. Instead of general repair operations with high costs in distribution networks, finding the exact location of the fault and only working in that area will reduce the repair costs. Superficial pipe listening devices seem to be the solution to this need, but they are not preferred because they are influenced by external sounds. Furthermore, the fact that the majority of the underground leaks are small in size makes it very difficult to detect these leaks.

GPS based systems that are commercially available have high costs. The general purpose of this thesis is to produce a leak detection robot that can operate on smaller diameter pipes and without the need for a GPS system. The robot moves by the pushing force of water in the pipe. The robot design, production, leak location estimation software and test works have been carried out. The motion path of the robot in pipe is calculated using the inertia sensor data (gyroscope, accelerometer, magnetometer) in conjunction with the Extended Kalman Filter. The Extended

Kalman Filter is used in the fusion of gyroscope, accelerometer and magnetic field sensors to correct the error that obtained from the cumulative sum of the gyroscope measurements. The accelerometer value was corrected using the obtained quaternion value and the position was calculated afterwards. The leaking location estimate includes the corresponding location determination of the peak points in the instant recorded voice data.

Since the produced robot is not yet taken into a waterproof housing, the prototype test runs were performed on the ground. The prototype robots were used to detect the leak sites that are located on different motion scenarios. As a result of the studies made, it is seen that the leakage position on a line with an average length of 120 meters can be detected with an average of 0.30 meter error. As a result, it has been found that leak detection can be performed with low cost and high accuracy. The studies of making the position estimation software generalized and sensor independent, the leak proof study of the robot and the learning of the position estimation with artificial learning techniques are still continuing.

KEYWORDS: Leakage position detection, sensor fusion, Extended Kalman Filtresi, quaternion, water pipeline.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Muhammed Fatih TALU'ya;

Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca yardım, birikim ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan sayın Prof. Dr. Ali KARCI'ya;

Tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde önemli payı olan ve çalışmayı 215E075 nolu 3501-Kariyer Projeleri programı olarak kabul edip maddi destek sunan TÜBİTAK'a;

Çalışmalarım boyunca, destek olan İnönü Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Ana Bilim dalındaki tüm değerli hocalarıma;

Hayatımın her alanında maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olup bugünlere gelmemi sağlayan kıymetli anneme, babama ve kardeşime;

Doktora çalışmalarım süresince bana karşı sabırla ve anlayışla yaklaşarak her zaman yanımda olan sevgili eşime;

Sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Boru Türleri ve Yapısal Bozunum Süreci	2
1.2. Dağıtım Sistemi Arızaları	3
1.3. Boru Kırılma Tipleri	5
1.4. IWA/AWWA Standart Su Denetim Yöntemi ve Su Dengesi	6
1.5. Fiziksel Arızaların Çevreye ve Toplum Sağlığına Etkisi	9
1.6. Dünya Geneline Gelire Dönüşmeyen Su Kayıpları.....	10
1.7. Türkiye’de Gelire Dönüşmeyen Su Kayıpları	11
1.8. Tezin Amacı.....	12
1.9. Tezin Organizasyonu	13
2. SU KAÇAĞI KONUM TESPİT YÖNTEMLERİ ve ROBOTLARI	15
2.1. Giriş	15
2.2. Su Kaçağı Tespit Yöntemleri.....	15
2.2.1. Donanım tabanlı kaçak tespit yöntemleri	19
2.2.1.1. Görsel inceleme	19
2.2.1.2. İz sürücü gaz	19
2.2.1.3. Fiber optik sensör	20
2.2.1.4. Sıvı algılama kabloları.....	21
2.2.1.5. Sıvı veya buhar algılama tüpleri	21
2.2.1.6. Termografi	22
2.2.1.7. Yeraltı radarı.....	22
2.2.1.8. PIG tabanlı yöntemler.....	23
2.2.1.9. Akustik yöntemler	25
2.2.2. Yazılım tabanlı kaçak tespit yöntemleri	26
2.2.2.1. Hidrostatik test.....	26
2.2.2.2. Basınç noktası analizi	26
2.2.2.3. Kütle/hacim dengesi	27
2.2.2.4. Negatif basınç dalgası.....	27

2.2.2.5. Gerçek zamanlı geçici modelleme.....	28
2.2.2.6. Dijital sinyal işleme.....	29
2.2.2.7. İstatistiksel analiz	29
2.2.2.8. Frekans analizi.....	29
2.3. Kaçak Tespit Robotları.....	30
2.4. Önerilen Kaçak Tespit Robotu	32
2.5. Özet.....	33
3. MEMS ATALET SENSÖRLERİ	34
3.1. Jiroskop.....	34
3.2. İvmeölçer	41
3.3. Manyetik Alan Sensörü	45
4. ATALET SEYİR ve KOORDİNAT SİSTEMİ.....	47
4.1. Atalet Koordinat Sistemleri	47
4.1.1. Dünya merkezli atalet koordinat sistemi (i)	48
4.1.2. Dünya-merkezli dünya-sabit koordinat sistemi (e)	49
4.1.3. Navigasyon/global koordinat sistemi (n veya g)	50
4.1.4. Gövde/nesne/sensör koordinat sistemi (b veya s)	50
4.2. Koordinat Sistemleri Arasında Dönüşüm.....	51
4.2.1. Koordinat dönüşüm matrisi (Direction cosine matrix – DCM)	52
4.2.2. Euler Açıları	54
4.2.3. Kuaterniyon.....	56
5. SENSÖR FÜZYONU ve IMU KULLANILARAK KONUM TESPİTİ.....	59
5.1. Kalman Filtresi	59
5.1.1. Standart Kalman filtresi	60
5.1.2. Genişletilmiş Kalman filtresi	61
5.2. Kuaterniyon Tabanlı Genişletilmiş Kalman Filtresi.....	62
5.2.1. Jiroskop açıları ile kuaterniyon hesabı – entegrasyon adımı.....	62
5.2.2. Vektör gözlemleme adımı	66
5.2.3. Kalman filtresi adımı.....	69
5.3. Kuaterniyon ve İvmeölçer Kullanarak Konum Tahmini	72
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	74
6.1. Kalman Filtresi Kullanılarak Jiroskop Sensörü Drift Gözlemlenmesi	75
6.2. Kuaterniyon Tabanlı EKF Sonucu	77
6.3. Kaçak Konum Tespit Deneyleri	79
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	84
8. KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Su tedarik sistemi ve bileşenleri	2
Şekil 1.2. Yapısal bozunum süreci [2].	3
Şekil 1.3. Katodik koruma uygulaması [8].	4
Şekil 1.4. Boru kırılma tipleri.	5
Şekil 1.5. Su kayıpları (a) fiziki [11] (b) idari [12].	7
Şekil 2.1. Sewerin Aquaphon-200 kaçak tespit sistemi [25].	16
Şekil 2.2. Deacon kayıp su ölçüm cihazı [27].	17
Şekil 2.3. Su kaçağı ses bağdaştırıcısı [28].	17
Şekil 2.4. Su kaçağı tespit yöntemleri.	18
Şekil 2.5. Fiber optik kablolarda geri saçılmış sinyalin şematik gösterimi [35].	20
Şekil 2.6. Sıvı veya buhar algılama tüpleri ile kaçak tespiti [36].	21
Şekil 2.7. Yeraltı radarı (a) radardan alınan işlenmemiş veri; (b) Kontör çıkarımı; ..	23
Şekil 2.8. Nord Stream AG Intelligent PIG [44].	24
Şekil 2.9. Pure Technologies Sahara PIG sistemi [47].	24
Şekil 2.10. Akustik sensörler kullanılarak kaçak konum tespiti.	25
Şekil 2.11. Kaçak tespit robotları; (a) PIG (b) VersaTrax (c) NREC.....	31
Şekil 2.12. Pure Technologies tarafından geliştirilen SmartBall.	31
Şekil 2.13. Kaçak tespit robotunun bileşenleri.....	32
Şekil 2.14. Üretilen kaçak tespit robotu.	32
Şekil 3.1. Presesyon torku örneği [80].	35
Şekil 3.2. Suni ufuk aleti [81].	36
Şekil 3.3. Dünya üzerindeki Coriolis kuvveti.	37
Şekil 3.4. Ayar çatalı jiroskop şeması [87].	38
Şekil 3.5. Bosch tarafından üretilen titreşen tekerlekli jiroskop [84].	38
Şekil 3.6. Yarı-küresel rezonatörlü jiroskop [85].	39
Şekil 3.7. Block 30 tipi 58mm HRG [85].	39
Şekil 3.8. Foucault Sarkacı (Panthéon, Paris) [89].	40
Şekil 3.9. 100µm kalınlığında SOI Foucault jiroskop (QMG) [90].	40
Şekil 3.10. İvmeölçer için yay-kütle-damper diyagramı [91].	41
Şekil 3.11. Paralel plaka kondansatörlü ivmeölçer [91].	43
Şekil 3.12. Wheatstone köprüsü.	43
Şekil 3.13. Piezoelektrik ivmeölçer [94].	44
Şekil 3.14. Farklı ivmeölçerler [98].	45

Şekil 3.15. Elektromanyetik alan çizgilerinin gösterimi [104].	46
Şekil 3.16. Dünya'nın manyetik alan eksenleri [105].	46
Şekil 4.1. İki farklı ortogonal koordinat sistemi.	48
Şekil 4.2. Dünya merkezli atalet koordinat sistemi (<i>i</i> -koordinat sistemi).	49
Şekil 4.3. Dünya-merkezli dünya-sabit koordinat sistemi.	49
Şekil 4.4. Navigasyon/global koordinat sistemi.	50
Şekil 4.5. Gövde veya sensör koordinat sistemi.	51
Şekil 4.6. Global (kırmızı) ve sensör (mavi) koordinat sistemleri.	52
Şekil 4.7. Açısal yönelim sistemlerinin dönüşümleri.	57
Şekil 5.1. Ayırık zamanlı standart Kalman Filtresi akış diyagramı.	60
Şekil 5.2. X ekseninde saat yönünün tersinde 90° döndürülmesi.	63
Şekil 5.3. Entegrasyon adımı blok şeması.	70
Şekil 5.4. Kalman filtresi adımı blok şeması.	70
Şekil 5.5. Vektör gözlemlleme adımı blok şeması.	71
Şekil 5.6. Butterworth filtresi kullanarak ivmeölçer durağan bölge tespiti.	72
Şekil 5.7. İvmeölçer integrali sonucu elde edilen sensör hız grafiği.	73
Şekil 6.1. Veri toplama sistemi	74
Şekil 6.2. Jiroskop sapma hatasının Kalman filtresi ile düzeltilmesi.	76
Şekil 6.3. Filtrelenmiş ivmeölçer ve manyetik alan ölçer verileri.	77
Şekil 6.4. EKF ile gözlemlenen ve tahmin edilen kuaterniyon değerleri.	78
Şekil 6.5. Ses verisi kullanılarak kaçak konumunun tespit edilmesi	80
Şekil 6.6. Gerçek ve tahmin edilen kaçak konumu, Senaryo-1	81
Şekil 6.7. Gerçek ve tahmin edilen kaçak konumu, Senaryo-2.	82
Şekil 6.8. Gerçek ve tahmin edilen kaçak konumu, Senaryo-3.	83

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. AWWA Su Dengesi bileşenleri [14].....	8
Çizelge 1.2. Dünya genelinde gelire dönüşmeyen su kayıp oranları.	10
Çizelge 1.3. 2015 yılı Türkiye il belediyeleri bazında su kayıp oranları [20].	12
Çizelge 2.1. Kaçak tespit ve konum belirleme yöntemlerinin gelişimi [24].....	16
Çizelge 6.1. Kaçak senaryolarına ait gerçek ve tahmin edilen konum değerleri	82



SİMGELER ve KISALTMALAR

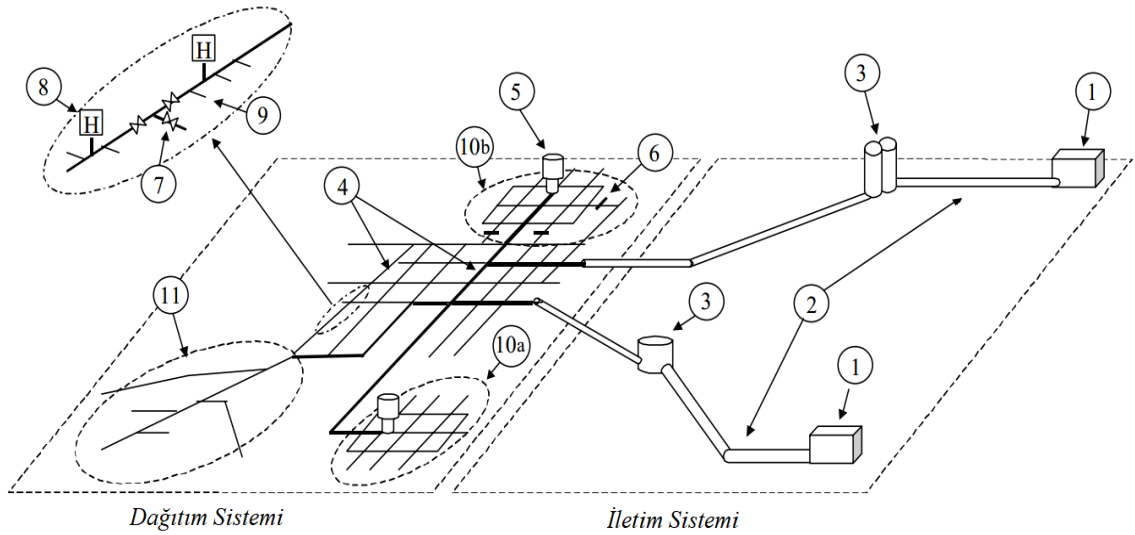
τ	Presesyon torku
mg	Yerçekimi kuvveti
r	Dönme merkezi uzunluğu
L	Açısal momentum
ω_p	Presesyon açısal hızı
α	Referans/global koordinat sistemi
β	Nesne/sensör koordinat sistemi
γ	Çözümleyici koordinat sistemi
φ, θ, ψ	Roll, pitch ve yaw açıları
$ i $	Birim vektörün normu
${}_{\beta}^{\alpha}R$	β 'dan α 'ya dönüşüm matrisi
$\left({}_{\alpha}^{\beta}R\right)^T$	Dönüşüm matrisinin transpozu
$\left({}_{\alpha}^{\beta}R\right)^{-1}$	Dönüşüm matrisinin tersi
$\hat{\cdot}$	Birim uzunluklu normalize vektör
${}_{\beta}^{\alpha}\hat{q}$	β koordinat sisteminden α koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan kuaterniyon
${}_{\alpha}^{\beta}\hat{q}^*$	Konjüge kuaterniyon
$\otimes$	Kuaterniyon çarpımı
x_t	Durum vektörü
z_t	Ölçüm vektörü
$\hat{x}_{t t-1}$	Tahmin edilen durum vektörü
$\hat{x}_{t-1 t-1}$	Önceki zaman adımına ait düzeltilen durum vektörü
Q_t	Gürültü kovaryans matrisi
$P_{t t-1}$	Tahmini kovaryans matrisi
$P_{t t}$	Düzeltilen kovaryans matrisi
$P_{t-1 t-1}$	Önceki adımda düzeltilen kovaryans matrisi
$S_{t t-1}$	z_t ölçüm değerlerinin tahmini kovaryansı
K_t	Kalman kazancı
M	z_t ölçüm değerinin tahmini dağılım ortalaması
R	Kovaryans matrisi
$\hat{x}_{t t}$	Düzeltilen durum vektörü

$z_t - M$	Ölçüm inovasyon değeri
${}^S_G\dot{q}$	Kuaterniyon türevi
${}^S\omega$	Jiroskop sensöründen okunan veri
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Jiroskop sensöründen okunan X,Y,Z eksenlerine ait açısal değişim değerleri
${}^S_G\hat{q}_{est,t-1}$	Bir önceki adımda tahmin edilen kuaterniyon değeri
Δt	Sensor veri okuma periyodu
F_t	Jacobian geçiş matrisi
${}^G\hat{g}$	Yerçekimi koordinat sistemi
$\min_{{}^S_G\hat{q}} f()$	Minimize edilecek amaç fonksiyonu
${}^S\hat{a}$	İvmeölçer sensöründen okunan veri
J	Jacobian matrisi
${}^G\hat{h}$	Manyetik alan yönü
${}^G\hat{b}$	Referans manyetik alan yönü
${}^S\hat{m}$	Manyetik alan ölçer sensöründen okunan veri
AMR	İzotop Olmayan Manyetik Direnç (Anisotropic Magnetic Resonance)
AWWA	Amerikan Su İşleri Birliği (American Water Works Association)
DCM	Koordinat Dönüşüm Matrisi (Direction Cosine Matrix)
DOF	Serbestlik derecesi (Degrees of Freedom)
EKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)
EPA	Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
HRG	Yarı-Küresel Rezonatörlü Jiroskop (Hemispherical Resonator Gyroscope)
IMU	Atalet Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
INS	Atalet Seyir Sistemi (Inertial Navigation System)
IWA	Uluslararası Su Birliği (International Water Association)
MEMS	Mikro Elektro-Mekanik Sistem (Micro Electro Mechanical System)
MSCL	Çimento Astarlı Hafif Çelik boru (Mild Steel Cement Lined)
OTDR	Optik Zaman Domeni reflektometrisi (Optical Time Domain Reflectometer)
PIG	Boru Hattı Gözlem Aleti (Pipeline Inspection Gauge)
PCCPs	Öngerilmeli Beton Silindir Boru (Prestressed Concrete Cylinder Pipe)
QMG	Dört Kütleli Jiroskop (Quadruple Mass Gyroscope)
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

1. GİRİŞ

Su, insanlar başta olmak üzere yaşayan bütün canlılar için hayati önem arz etmektedir. Bulunduğu bölgede su kaynakları tükenme noktasına gelen insanoğlu yeni yerleşim yerleri arayışına girmiş ve zamanla içilebilir su kaynaklarının yakınında şehirleşmeye başlamıştır. Sonraki nesiller ise sanayinin gelişmesi ile dağıtım şebekelerini kurarak suyu bütün hanelere ulaştırmıştır. Sanayileşme beraberinde çevre kirliliğini de getirerek su kaynaklarını kirlletmiş, son yıllarda iklim şartlarının olumsuz yönde değişmesi, nüfus artışı ve su kaynaklarına ulaşımında artan maliyetler birçok ülkenin sınırlı su kaynaklarıyla mücadelesini başlatmıştır. Birçok ülkede su dağıtım idareleri ve özel firmalar kullanım ve içme suyunun azalmasına neden olan problemleri tespit etmek için su dağıtım sistemlerini yönetme politikaları geliştirmişlerdir [1]. Su dağıtım sistemlerinden kaynaklanan kayıplar, sadece gelişmekte olan ülkelerde değil, gelişmiş ülkelerde de giderek artan bir problem haline gelmiştir.

Su dağıtım sistemleri çok sayıda farklı yapıya ve karmaşıklığa sahip olmalarına rağmen, çalışma prensipleri “suyun arıtma tesisinden tüketiciye iletilmesi” ilkesine dayanmaktadır. Su dağıtım sistemleri, vanalar, bağlantı parçaları, pompalar, rezervuarlar ve bağlantı boruları gibi parçalardan oluşmaktadır. Temel olarak bütün su şebekesi iletim ve dağıtım sistemleri olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır [2]. İletim sistemleri, suyu kaynaktan alarak dağıtım sistemine getiren, uzun mesafede büyük miktarda su taşıyan sistemlerdir. Arıtma tesisi ve depo rezervuarlarından oluşan sistem, büyük miktarda su taşıdığından çok az bağlantıya sahiptir. Bazı bölgelerde arıtılan suyun farklı uzaklıklardaki farklı dağıtım sistemlerine iletilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yeraltında ve yerüstü iletim hatları farklı uzunluklarda olabilmektedir. Dağıtım sistemleri ise suyun yerleşim alanlarına taşınmasından sorumludur. Son tüketiciye su dağıtımını bu sistem üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kentsel dağıtım sistemleri döngülü ve dallanmış topolijelerin birleşiminden oluşmaktadır. Ana dağıtım boruları oldukça büyük olmalarına rağmen, mahalle ve sokak bazlı dağıtımlarda giderek küçülmekte ve servis noktalarında mülklere bağlanarak sonlanmaktadır. Şekil 1.1’de genel su tedarik sistemi ve bileşenleri verilmiştir.



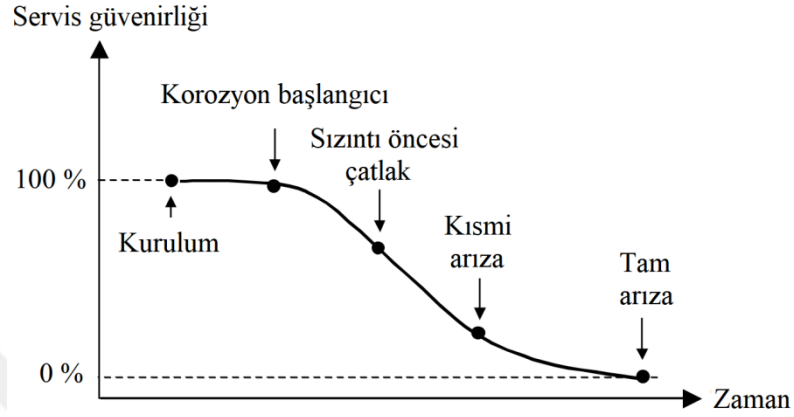
Şekil 1.1. Su tedarik sistemi ve bileşenleri 1. Su arıtma tesisi; 2. İletim sistemi boru hattı; 3. Rezervuar; 4. Ana dağıtım boruları; 5. Su Kulesi; 6. Kalıcı olarak kapalı vana; 7. İzolasyon vanası; 8. Yangın musluğu; 9. Servis bağlantısı; 10. Ölçüm alanı; 11. Devam eden dağıtım hattı [2].

İletim ve dağıtım sistemlerindeki su kaybının en büyük nedeni su borularının zamanla yaşlanmasıdır [2]. Su dağıtım şebekelerinde meydana gelen arızalar birçok bölgede su kaybına neden olmaktadır. Ani basınç artışının neden olduğu ve zayıf boru çatlaklarında meydana gelebilecek büyük çaplı patlamalar ise yollarda çökmelere neden olarak ciddi zararlar verebilmektedir.

1.1. Boru Türleri ve Yapısal Bozunum Süreci

İletim sistemleri, dağıtım sistemleri ve servis hatlarında kullanılan borular birçok farklı malzeme ve teknoloji kullanılarak üretilmektedir. Kullanılan malzeme, kurulum yılındaki teknoloji ve boru çapına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Servis bağlantı borularında yaygın olarak çelik, plastik ve kurşun malzeme kullanılmaktadır [3]. Çapları 300 milimetreyi geçen iletim hatlarında ise çelik, çimento astarlı hafif çelik (Mild Steel Cement Lined – MSCL) veya ön gerilmeli beton silindir borular (Prestressed Concrete Cylinder Pipe – PCCPs) kullanılmaktadır. Daha eski dağıtım sistemlerinde ise dökme demir veya asbestli çimento borular kullanılmıştır. Su boru hatlarında, günümüzde yaygın olarak hem maliyetinin az olması hem de sağlıklı olması açısından plastik borular tercih edilmektedir [2]. İster plastik ister çimento olsun, zaman içerisinde borular yapısal

bozunuma uğrayarak su kaybına neden olacak arızalara neden olmaktadır. Borunun bozularak işlevsiz hale gelmesi kurulum, korozyon başlangıcı, kaçak öncesi çatlak, kısmi arıza ve tam arıza süreçlerinden oluşmaktadır. Şekil 1.2’de kurulumdan sonra zaman içerisinde oluşabilecek hataları gösteren yapısal bozulma süreci verilmiştir.



Şekil 1.2. Yapısal bozunum süreci [2].

Boru bozulma süreci sağlam bir borunun kurulumunun tamamlanması ile başlamaktadır. Bir süre sağlam bir şekilde su iletimini yapan boruda korozyon süreci başlamakta ve borunun iç ve dış yüzeylerinde aşınma meydana gelmektedir. Korozyonun aşındırması sonucu borularda kaçak oluşmadan önce çatlaklar ve korozyon çukurları meydana gelmektedir. Giderek büyüyen bu çukurlar boru duvarının direncini kırarak boru duvarında kaçağa neden olmaktadır. Bu aşamadan itibaren boru kısmi olarak arızalıdır. Şebeke basıncında neredeyse hiçbir değişiklik olmadığından bu çaptaki kaçaklar dışarıdan tespit edilememektedir. Son aşamada ise boru tamamen patlayarak yüzeye büyük miktarda su çıkmasına neden olmaktadır. Tam arıza durumlarında ise şebeke basıncı tamamen düşmektedir [2].

1.2. Dağıtım Sistemi Arızaları

Dağıtım sistemindeki arızalar doğal afetler, kazı işlemleri sonucu borunun bilinmeden delinmesi, borularda zamanla iç ve dış korozyon, şebeke basıncının yüksek oranda ve aniden artıp azalması, malzeme üretimindeki kusurlar ve kurulum hatalarından dolayı boru ve bağlantı parçalarında meydana gelen kırık ve çatlaklardan kaynaklanmaktadır [4]. Dağıtım sistemlerindeki boru arızaları yapısal bozulma ve iç yüzey bozulmasından kaynaklanmaktadır. Yapısal bozulma, borunun

yapısal esnekliğini kaybederek farklı stres türlerine dayanma kabiliyetinin azalmasına neden olmaktadır. İç yüzey bozulması ise birim saatte pompalanan su miktarında azalma, dışarıdan boru içerisine sızan toprak sonucu su kalitesinin azalması ve aşırı korozyon sonucu borunun kırılarak işlevini tamamen yitirmesi ile sonuçlanmaktadır [5]. Temel olarak borulardaki kırılmalar, korozyon, aşırı yük, imalat hataları ve insan kaynaklı hatalardan meydana gelmektedir.

Korozyon: Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency – EPA)’na göre bilinen korozyon türleri korozyon çukurları, bakteriyolojik korozyon, toprak korozyonu ve grafitik korozyondur [6]. Döküm ve demir borularda boru dış yüzeyindeki koruyucu metal tabakanın elektro-kimyasal olarak bozulması ile korozyon çukurları ortaya çıkmaktadır [7]. Korozyon çukurları, metal aşınması ile uzun vadede borunun kırılmasına neden olmaktadır. Dökme ve demir borularda ortaya çıkan grafitik korozyonda ise, toprakta gömülü boruya ait ferrit taneleri çözücü etkiden dolayı çözünerek, yerini mekanik dayanımını kaybetmiş, grafit ve pastan oluşan, boşluklu bir yapıya bırakmaktadır. Bu tür borular zamanla çalışma basıncını taşıyamayarak en ufak bir darbeye kırılacak seviyeye gelmektedir. Plastik borular ise zamanla kimyasal aşınmaya maruz kalarak dış yüzeyde çatlak ve kırıklar sonucu işlevsiz hale gelmektedir [2]. Aşındırıcı toprak altındaki boruların korozyondan korunması için katodik koruma uygulanmaktadır. Su dağıtım sistemindeki dış korozyon etkisini kontrol etmek için, magnezyum bazlı anot ana su hattına bağlanarak bir miktar akım verilmektedir. Bu yöntemde su hattı yerine anot paslandırılarak demirden yapılmış ana servis hattının ömrü uzatılmaktadır [8] (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Katodik koruma uygulaması [8].

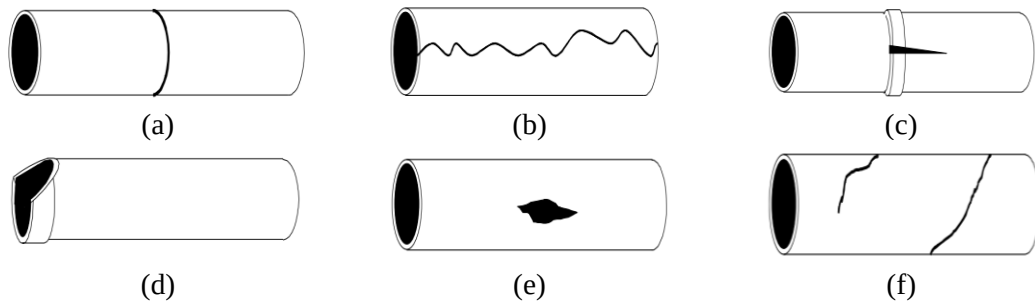
Aşırı yük: Boru içi su sıcaklığı değişimine bağlı termal daralma, deprem sonucu hareket eden toprak nedeniyle borularda bükülme, iklim değişikliği sonucu büzülen borunun zayıflamasının sonucu olarak su boru hatları üzerinden geçen trafik yoğunluğuna veya ağır üst toprak tabakasına dayanamayıp çatlamaktadır [9].

İmalat hataları: Demir döküm borularındaki en yaygın üretim hatası gözenekliliktir. Boru duvar kalınlığının gözenekli kısımlarda zayıflaması sonucu basınç artışı özellikle bu noktalarda çatlaklara neden olmaktadır. Ayrıca üretim maliyetlerini düşürmek için metal boruya fosfor eklenmektedir. Ortaya çıkan demir fosfid bileşiği zayıf olduğundan borunun dayanımını azaltmaktadır [2].

İnsan kaynaklı hatalar: Boruların nakliyesi sırasında verilen zararlar, kurulum yapılacağı alanda boruya zarar verecek operasyonel hareketler, dış kaplamanın kazara zarar görmesi gibi kurulum sürecindeki hatalar ile kurulum sonrasında bölgede yapılan kazı sonucu borunun delinmesi gibi hatalardır.

1.3. Boru Kırılma Tipleri

Boru kırılma tipi, boruların nereden ve nasıl kırıldıklarını tanımlamaktadır. Arızalar, borunun üretildiği madde ve boru çapına bağlı olarak farklılık göstermektedir. 2001 yılında Makkar et al. tarafından [7] (a) çevresel çatlama, (b) boylamasına çatlama, (c) bağlantı noktasında kırılma, (d) bağlantı yerinde kesim, (e) korozyon çukuru, (f) spiral kırılma tipleri tanımlanmıştır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Boru kırılma tipleri.

Şebeke basıncının az olduğu küçük çaplı borularda uzunlamasına kırılmalar gözlenirken, büyük çaplı borularda yüksek basınca bağlı olarak bağlantı noktalarında ve uzunlamasına çok büyük çatlaklar meydana gelmektedir [7]. Büyüklüğüne bakılmaksızın tespit edilen bütün çatlaklar raporlanmaktadır. Dağıtım sistemindeki arızalardan kaynaklanan içme ve kullanım suyunun hızla tükendiğini belgeleyen raporların sonucu olarak, doğal yaşam kaynağını kaybetmemek için bütün dünya genelinde giderek artan yaptırımlar uygulanmaya başlanmıştır. Suyun daha etkin kullanılabilmesi ve kayıpların azaltılması için Uluslararası Su Birliği (International Water Association – IWA) ve Amerikan Su İşleri Birliği (American Water Works Association - AWWA) tarafından Standart Su Denetim Yöntemi oluşturularak dünya genelinde su kayıp ve kaçaklarının kontrol altına alınması hedeflenmiştir.

1.4. IWA/AWWA Standart Su Denetim Yöntemi ve Su Dengesi

İçme suyu, dağıtım sistemindeki kaçaklardan ve tüketici sıhhi tesisatındaki problemlerden dolayı, arıtma tesislerinden tüketicilere ulaştırılınca kadar önemli miktarda kayba uğramaktadır. Nüfusa bağlı olarak artan su talebini karşılamak için su idareleri finansal olarak günden güne zorlanmaktadır. Araştırmalar su kayıplarının tespiti ve giderilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Dünya genelinde bütün dağıtım sistemlerinde farklı oranlarda da olsa mutlaka su kaybı yaşanmaktadır. IWA tarafından yürütülen araştırma raporunda, gelişmekte olan ülkelerin büyük şehirlerinde dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızalardan dolayı içme suyunun %40'ının kaybedildiği bildirilmektedir [10]. Dağıtım sistemindeki kayıplar, sistemdeki boru ve depolarda kaçaklar sonucu oluşan fiziki (gerçek) kayıplardır. Servis hattından mülke giriş noktasından sonra son tüketici tarafında da kayıplar olmaktadır. Tüketici tesisatındaki kayıplar, faturalandırılmamış su tüketimi, sayacın bilerek hatalı okunması, hileli sayaç kullanımı gibi gelire dönüşemeyen idari (görünür) kayıplardır [4]. Şekil 1.5'de fiziki ve idari kayıp örnekleri gösterilmiştir. Faturalandırılmadan tüketilen su, fiziki ve idari su kayıpları toplamı IWA tarafından “gelire dönüşmeyen su” olarak tanımlanmıştır [10].



(a)

(b)

Şekil 1.5. Su kayıpları (a) fiziki [11] (b) idari [12].

IWA ve AWWA, su kayıpları ile ilgili terimlerin standartlaştırılması amacıyla Standart Su Denetim Yöntemini tanımlamıştır [13]. Bu yöntemle göre su dengesi sistemi, suyun kaynağı ve işlendiği alandan başlayarak dağıtım şebekesi vasıtasıyla içme suyunu tüketiciye ulaştırma adımlarını raporlamaktadır. Üretilen ve şebekede dağıtılan su miktarının, tüketilen, idari ve fiziki kayıp toplamına eşit olması beklenmektedir. Çizelge 1.1’de 2016 yılında güncellenen AWWA Su Dengesi sistemi verilmiştir [14]. Sisteme ait bütün bileşenler kontrol altında tutularak kayıp su hacminin saptanması hedeflenmektedir. Çizelge 1.1’e göre bileşenler:

Sistem Giriş Hacmi: Yerel su kaynağından ve dışarıdan temin yoluyla arıtma tesisine getirilerek şebeke sistemine verilen yıllık su miktarıdır. Sistem giriş hacminin, tedarik edilen ve ihraç edilen toplam su hacmine eşit olması beklenmektedir.

İzinli Tüketim: Kayıtlı tüketiciler, su tedarikçisi ve yetkilendirilmiş kişiler tarafından tüketilen 1 yıllık ölçülen ve ölçülmeyen su hacmidir. Faturalandırılmış ve faturalandırılmamış izinli tüketim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Faturalandırılmış İzinli Tüketim: Faturalandırılması ve ölçümü yapılmış su tüketimi ile faturalandırılmış fakat ölçümü yapılmamış toplam tüketimden oluşur.

Faturalandırılmış Ölçülmüş Tüketim: Su dağıtım sisteminden sorumlu idareye abone kaydı bulunan, sayaç üzerinden düzenli olarak tükettiği suyun ölçülerek faturalandırılması yapılan abonelerin kullandığı su miktarını ifade etmektedir.

Çizelge 1.1. AWWA Su Dengesi bileşenleri [14].

Yerel su kaynağı hacmi	Sistem giriş hacmi	Dışarıya taşıma hatları ile ihraç edilen su	Faturalandırılarak ihraç edilen su			Gelire dönüşen su
		Tedarik edilen su	İzinli tüketim	Faturalandırılmış izinli tüketim	Faturalandırılmış ölçülmüş tüketim	Gelire dönüşen su
Faturalandırılmamış ölçülmemiş tüketim						
Su kayıpları	Faturalandırılmamış izinli tüketim		Faturalandırılmamış ölçülmüş tüketim	Gelire dönüşmeyen su		
			Faturalandırılmamış ölçülmemiş tüketim			
	İdari kayıplar		İzinsiz tüketim			
			Tüketici sayacındaki ölçüm hatası			
Sistematik veri işleme hataları						
Dışarıdan taşıma hatları ile ithal edilen su hacmi			Su kayıpları	Fiziki kayıplar	İletim ve dağıtım şebekesinde kaçak	
					Tesisin depolama tanklarındaki kaçak ve taşmalar	
					Tüketici sayacından önceki bir noktada servis bağlantısında kaçak	

Faturalandırılmış Ölçülmemiş Tüketim: Belirli standartlara göre veya tahmini olarak hesaplanmış ve faturalandırılmış tüketim miktarını ifade etmektedir.

Faturalandırılmamış İzinli Tüketim: İzinli olarak faturalandırılmadan ölçülmüş ve ölçülmemiş tüketim miktarlarının toplamıdır.

Faturalandırılmamış Ölçülmüş Tüketim: Sorumlu su idaresinde abone kaydı bulunan ve sayaç üzerinden su tüketim ölçümleri yapılan, ancak idare tarafından izinli olarak faturalandırma yapılmayan abonelerin kullandığı su miktarını ifade etmektedir. Camiler ve mezarlıklar tarafından tüketilen su bu gruba girmektedir.

Faturalandırılmamış Ölçülmemiş Tüketim: Su idaresince şebekeye bağlantısı yapılan fakat ölçüm ve faturalandırması yapılmayan toplam su miktarını ifade etmektedir. Park ve bahçe sulamada kullanılan su ile itfaiyenin yangın söndürmede kullandığı su bu gruba girmektedir.

Su Kayıpları: Sistem giriş hacmi ve izinli tüketim arasındaki farktır. Fiziki ve idari su kayıplarının toplamından oluşmaktadır.

İzinsiz Tüketim: Su idaresinden habersiz olarak yasadışı ek bağlantılar ve sayaçların çalışmasını elektronik veya mekanik olarak bozma yolu tüketilen su miktarını ifade etmektedir.

Tüketici Sayacındaki Ölçüm Hatası: Hatalı sayaç üretimi, sayaçta mekanik yaşlılık, standartlara uymayan sayaçların kullanımının sürdürülmesi, sayaçtan su tüketim bilgisinin yanlış okunması sonucu ortaya çıkan toplam su miktarını ifade etmektedir.

Sistemik Veri İşleme Hataları: Su idaresi bilişim merkezindeki fatura sisteminde ait fatura sisteminde meydana gelen teknik arızalar, bilgisayar başında işlem yapan görevlinin yanlış bilgi girmesi, bilişim sistemi altyapısına hatalı müdahale sonucu teknik olarak ortaya çıkan toplam su miktarını ifade etmektedir.

İletim ve Dağıtım Şebekesinde Kaçak: Su altyapısında tespit edilen veya tespit edilemeyen kaçaklar ile büyük çaplı patlamalar, borularda meydana gelen belirsiz su kaçakları ve boru çatlaklarından kaynaklı toplam kayıp su miktarını ifade etmektedir.

Tesisin Depolama Tanklarındaki Kaçak ve Taşmalar: Ana dağıtım tankı ve dağıtım sistemi üzerindeki servis depolarında kaçak ve taşmalardan kaynaklanan toplam kayıp su miktarını ifade etmektedir.

1.5. Fiziksel Arızaların Çevreye ve Toplum Sağlığına Etkisi

Dağıtım şebekelerinin çoğunlukla yeraltına gömülü yapıda olması arızaların anında tespit ve onarımını zorlaştırmaktadır. Uzun süre tamir edilmeyen arızalar ciddi oranda su kaybının yanında, boru içerisindeki suya topraktan yabancı maddeler karışması sonucu içme suyunun kirlenmesine, suyun pompalanması için ihtiyaç duyulan enerjinin artması sonucu artan karbon salınımına ve çevresel zarara neden olmaktadır [15]. Günümüzde içme ve kullanım suyuyla ilgili hastalıklardan dolayı her 90 saniyede 1 çocuk, susuzluğa bağlı elverişsiz sağlık koşulları ve hijyen yetersizliğinden ise her yıl 1 milyon insan hayatını kaybetmektedir [16].

1.6. Dünya Geneline Gelire Dönüşmeyen Su Kayıpları

Dünya Bankası (World Bank)'nın yapmış olduğu bir çalışmaya göre, kabul edilebilir su kayıp oranı %10 olarak belirlenmiş olmasına rağmen, gelişmiş ülkelerde sistem giriş hacminin %15'i gelire dönüşmeyen su olarak tespit edilmiştir. Bu %15'lik kaybın %80'i fiziksel kayıp ve %20'si idari kayıptır [17]. Çizelge 1.2'de dünya genelinde gelişmiş ülkeler, yeni sanayileşen ülkeler ve gelişmekte olan ülkelere ait gelire dönüşmeyen yıllık su hacimleri verilmiştir. Üç ülke grubu için de fiziksel su kaybı en büyük dilime sahiptir. Gelire dönüşmeyen yıllık 48,6 milyar metreküp suyun 32,7 milyar metrekübünün fiziksel kayıp olması, fiziksel onarım ve altyapı çalışmalarının su kaynaklarının kaybını en aza indirmek açısından ne derece gerekli olduğunu gözler önüne sermektedir. Aynı rapora göre dünya genelinde her yıl ortalama 14,6 milyar dolar değerinde gelire dönüşmeyen su kaybı yaşanmaktadır [17]. Fiziksel kaybın verdiği maddi zarar 8,1 milyar dolardır. Bu bağlamda kaçak konumunun erken dönemde tespiti ve hatalı boru hattının onarılması önemli miktarda su ve gelir kaybının önüne geçecektir.

Çizelge 1.2. Dünya genelinde gelire dönüşmeyen su kayıp oranları.

	Gelire Dönüşmeyen Su (Sistem giriş hacmine göre %)	Fiziksel Kayıplar (%)	İdari Kayıplar (%)	Fiziksel Kayıplar (*)	İdari Kayıplar (*)	Toplam (*)
Gelişmiş Ülkeler	15	80	20	9.8	2.4	12.2
Yeni Sanayileşen Ülkeler	30	70	30	6.8	2.9	9.7
Gelişmekte Olan Ülkeler	35	60	40	16.1	10.6	26.7
				32.7	15.9	48.6

(*)= milyar metreküp / yıl

Günümüzde en az 663 milyon insanın su fakiri bölgelerde yaşamını devam ettirmeye çalıştığı tespit edilmiştir [16]. Dünya Bankası raporuna göre mevcut su politikaları kontrol altına alınmadığı takdirde 2025 yılında dünya nüfusunun üçte birinin susuz kalacağı tahmin edilmektedir [18].

1.7. Türkiye’de Gelire Dönüşmeyen Su Kayıpları

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2014 yılı içerisinde barajlar, kuyular, kaynaklar, akarsular, göller, göletler ve denizlerden çekilerek içme ve kullanma suyu şebekesine pompalanan su miktarı 5,2 milyar metreküptür [19]. Belediyelere ölçümü yapılarak verilen toplam su miktarı ise 2014 yılı içerisinde 3,4 milyar metreküp olarak hesaplanmıştır. TÜİK 2012 verilerine göre Türkiye’deki kayıp su oranı %43,6’dır. Gelire dönüşmeyen suyun Türkiye ekonomisine yıllık zararı 6 milyar ₺’dir. 2014 yılı verilerine göre ise toplam gelire dönüşmeyen su oranı ve ne kadarının idari ne kadarının fiziksel kayıp olduğuna dair hesapsal çalışmalar devam etmektedir.

Türkiye’de su kayıpları ile ilgili yasal düzenlemelere, 2013 yılı Nisan ayında düzenlenen Su Kayıp-Kaçakları Çalıştayı ile başlanmıştır. Türkiye Belediyeler Birliği’nin desteğiyle gerçekleştirilen çalıştaya, Orman ve Su İşleri Bakanlığı’na bağlı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Devlet Su İşleri, Türkiye Su Enstitüsü, Türkiye Belediyeler Birliği, büyükşehir belediyelerine bağlı su ve kanalizasyon idareleri, sulama birlikleri, sulama kooperatifleri ve kalkınma ajansları katılmıştır. Çalıştayda akademisyenlerin de desteği ile taslak yönetmelik hazırlanmıştır. Katılımcı kurum görüşleri doğrultusunda revize edilen yönetmelik 8 Mayıs 2014 tarih ve 28994 sayılı Resmi Gazete’de “İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği” adı altında yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Yönetmeliğin 9. maddesine göre büyükşehir ve il belediyeleri ile diğer belediyelerde toplam su kayıp oranı 2023 yılına kadar azami %25 seviyesine çekilmek zorundadır. Bu bağlamda 2015-2023 yılları arasında içme suyu kayıplarını azaltmak için gerekli yatırım ihtiyacının 29 milyar 126 milyon ₺ olarak hesaplanmıştır.

Belediyeler yıllık su kayıp oranlarını raporlamaya devam etmektedirler. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü’nün resmi sitesinden alınan 2015 yılı içerisindeki belediye bazında kayıplar Çizelge 1.3’de verilmiştir [20]. Malatya ilinde su kayıp oranının %69 oranında olduğu ve kaybın %58’inin fiziksel kayıp olduğu tespit edilmiştir. Temin ve dağıtım hatları ile depolarda meydana gelen kaçaklardan dolayı oluşan fiziksel kaybın “tespit edilemediği” raporlarda belirtilmektedir. Mardin ilinde kayıp su oranının %73 olması, bu ilin yakın vadede susuz kalma riskiyle karşılaşacağını işaret etmektedir.

Çizelge 1.3. 2015 yılı Türkiye il belediyeleri bazında su kayıp oranları [20].

Belediye/Su idaresi	Sisteme Giren Su (m3/yıl)	İzinli Tüketim		Su Kaybı	
		m3/yıl	%	m3/yıl	%
Adana	140.891.780	8.456.944	60,03	56.322.136	39,97
Bursa - BUSKİ	107.017.250	82.752.490	77,3	24.264.760	22,7
Eskişehir	39.832.961	28.860.293	72	10.972.668	28
Gaziantep	152.394.742	80.113.725	52,6	72.281.017	47,4
İSKİ - İstanbul	965.155.404	732.635.874	75,91	232.519.530	24,09
İzmir - İZSU	196.306.981	134.768.979	68,65	61.538.002	31,35
Kahramanmaraş	93.031.200	37.894.074	41	55.137.126	59
Kayseri	73.664.840	59.817.809	81,2	13.847.031	18,8
Kocaeli - İSU	151.720.339	96.584.539	63,66	55.135.800	36,34
Konya	83.851.173	59.240.183	71	24.610.990	29
Malatya	113.569.776	35.676.531	31	77.893.245	69
Mardin	62.904.244	16.762.295	27	46.141.949	73
Sakarya	113.764.770	46.997.451	41	66.767.319	59
Samsun - SASKİ	56.133.200	34.514.349	61,49	21.618.851	38,51

1.8. Tezin Amacı

Su dağıtım sistemleri uzun şebeke boruları ve sonlandırma valflerinden oluşmaktadır. Boru hattı sistemlerinde sızdırmazlık tespiti ve kaçak konumunun tespiti için birçok teknik önerilmiştir. Günümüzde kaçak tespit yöntemlerinin baz aldığı fiziksel büyüklükler az da olsa değişmesine rağmen geliştirilen yöntemlerin çoğu bugün hala kullanılmaktadır. Bununla birlikte, teknolojik alandaki gelişmeler, bu yöntemlerin birçoğunu daha etkili hale getirmiştir. Bunlardan bir tanesi boru hatlarındaki geçici olaylarla ilgili bilgi kullanımı ve kaçağın varlığını saptamak ve kaçak yerini belirlemek için kullanılan sinyal işleme teknikleridir. Genellikle, boru hattı sisteminde pek çok bileşen vardır ve bir dağıtım ağı içindeki geçici birçok kaynaktan sinyaller yansıyabilir ve bu da problemin tanımlanmasını zorlaştırır. Ölçümle ilişkili yüksek orandaki bir gürültü, sinyali analiz etmeyi daha karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, gürültülü ortamlarda dahi etkin çalışabilecek, orijinal

sinyali kaybetmeden konumu tespit edebilecek bir teknik geliştirilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, önerilen yöntem, test sırasında tüketiciye su dağıtımına devam etmeli, boru hattının su pompalaması engellenmemelidir.

Bu tezin amacı, su dağıtım borularında suyun akış hareketi ile ilerleyen tek bir ses algılama robotu kullanılarak elde edilen ses sinyalinin analizi yoluyla boru hattındaki kaçak konumunu saptamak için ileri sinyal işleme tekniklerini kullanmaktır. Yürütülen tez çalışmasında geliştirilen sistem, konum tespitini sadece atalet sensörleri ile bulmakta ve sensör maliyetini azaltmaktadır. Hatalı konum tespitinden doğacak kazı maliyetlerinin en aza indirgenmesi ve hızlı bir şekilde kaçak konumu saptanarak, anında arızalı kısmın onarım sürecinin başlatılması esas alınmıştır. Ayrıca Türkiye’de hem belediye sayısının fazla olması (1397 belediye [21]) hem de fiziksel su kayıp oranının yüksek olmasına rağmen yerel olarak üretilmiş ve etkin olarak konumu saptayabilen kaçak tespit robotunun olmaması bu tezin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

1.9. Tezin Organizasyonu

Bölüm 2’de kaçak tespitinde kullanılan yöntemler, basınç değişimi, ses değerlendirme ve toprakta ısı değişim sınıflarına ayrılarak detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca kaçak tespit yöntemlerinden esinlenerek ticari olarak üretilen kaçak tespit robotları çalışma yeteneklerine göre analiz edilmiştir.

Bölüm 3’de su içerisinde hareket eden robotun konumunu bulmak için füzyona tabi tutulan IMU sensörlerinden ivmeölçer, jiroskop ve manyetik alan sensörleri hakkında kısa bilgi verilmiştir.

Bölüm 4’de tez çalışmasında kullanılan atalet seyir koordinat sistemleri ve bu sistemler arasında dönüşümü sağlayan koordinat dönüşüm matrisi, Euler açıları ve kuaterniyon konularına değinilmiştir.

Bölüm 5’de Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanılarak geliştirilen sensör füzyonu sistemi hakkında bilgi verilerek, konumun nasıl hesaplandığına dair temel formüller verilmiştir.

Bölüm 6’da geliştirilen yöntemin benzetim çalışmaları ve sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde sonraki çalışmalarda kullanılacak yöntemler belirlenmiştir.

Bölüm 7’de tez çalışmalarından elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Ayrıca elde edilen kazanımlar ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi ve önerilere yer verilmiştir.



2. SU KAÇAĞI KONUM TESPİT YÖNTEMLERİ ve ROBOTLARI

2.1. Giriş

Gelişmiş ve gelişmekte olan toplumlarda, içme ve kullanım suyunun tüketiciye dağıtımını sağlayan hatlarda meydana gelen arızalar ekonomik zarara, enerjinin verimsiz kullanılmasına, çevresel zarara ve insan sağlığını tehdit eden hastalıklara neden olabilmektedir. Arızalar, zaman içerisinde yaşanan borularda korozyon oluşması ve şebeke basıncındaki ani değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Boru yaşlandıkça, mevcut dağıtım hattı boyunca ortaya çıkan arıza sayısı da artmakta ve onarım için konum tespiti yapmak gerekmektedir. Fiziki su kaybını giderme çalışmalarında kaçak konumunun tam keşfi, kazı çalışmaları ve arızalı boruların yenilenmesi, onarım maliyetlerini ciddi oranda artırmaktadır [22]. Kapsamlı boru bakımı: (a) borulardaki su kaybı oranlarının tespiti, (b) su kaybının olduğu borularda çatlakların konum tespiti, (c) çatlak bölgelerin onarılması ve (d) şebeke basıncının ayarlanması olmak üzere dört adımda gerçekleştirilmektedir. Birinci adımda su kaybı oranı tespit edilirken, tüketilen güncel suya karşılık faturalandırılmış su kullanım miktarı eşleştirilerek kayıp hakkında tahminler yapılır. İkinci adımda, su borusundan elde edilen basınç, ses ve sıcaklık gibi verilerin analizi sonucu çatlak konumu tespit edilir. Üçüncü adımda çatlakların olduğu kaçak yapan boru bölgesi onarılır veya yenisiyle değiştirilir. Dördüncü adımda ise şebeke basıncı ayarlanarak boruların yüksek basınç nedeniyle deforme olması engellenir [23]. Su kayıplarının onarılarak azaltılması, su dağıtımından sorumlu idarelerin tüketici taleplerini karşılamak için dağıtım sistemine ilettikleri su miktarının azalmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak doğal su kaynaklarının daha uzun süre kullanımı sağlanmaktadır.

2.2. Su Kaçağı Tespit Yöntemleri

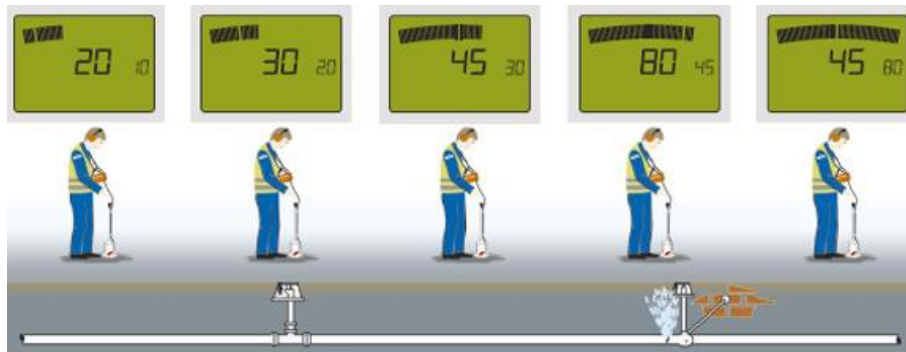
Dağıtım sistemi borularında kaçak olması durumunda, su basıncının değişmesi, olağanın dışında farklı bir ses oluşması, toprak ıslaklığından dolayı ısıнын farklılaşması ve su akış vektörünün değişmesi beklenmektedir. Bununla birlikte boru hatlarının büyük bir kısmı yer altında gömülü olduğundan boru kaçakları yüzeyden kolaylıkla tespit edilememektedir. Giderek artan su talebini karşılamak ve hem kayıp su miktarını hem de boru kaçaklarının varlığını ve konumunu tespit etmek için, mühendisler ve araştırmacılar farklı verileri kullanan birçok kaçak tespit yöntemi

geliştirmişlerdir. Çizelge 2.1’de farklı kaçak tespit ve konum belirleme yöntemleri tarihsel olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kaçak tespit ve konum belirleme yöntemlerinin gelişimi [24].

1850	1880	1920	1930	1965	1978	1980	1990	2001	2002	2006
Manuel Sondaj	Deacon Metre Kayıp Su Ölçüm Cihazı	Sarmal Valf	Step Testi	Yer Mikforonları	Kaçak Sesi Bağdaştırıcısı	Elektronik Step Test Cihazı	Akustik Kayıtlar Yer Radarları	Birleştirilmiş Kayıtlı ve Bağdaştırıcı	Dijital Bağdaştırıcı	İç Ses Kaçak Göstergesi

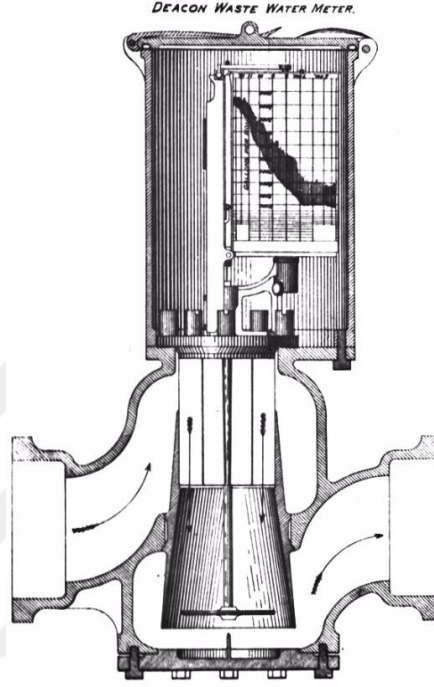
Bilinen ilk kaçak tespit yöntemi 1850’lerden beri kullanılan manuel sondajdır [24]. İlk yöntem tahta bir çubuğun, boru üzerine konularak gelen sesin dinlenmesi prensibine dayanmaktadır. Boruda kaçak olduğunda basınç değişimine bağlı olarak sesin de değiştiği tespit edilmiş ve stetoskop benzeri bir alet geliştirilmiştir. Şekil 2.1’de günümüzde kullanılan manuel sondaj yer üstü dinleme uygulaması gösterilmektedir [25]. Manuel sistemler ortam gürültüsünden ciddi şekilde etkilendiği için hata eğilimi yüksek sistemlerdir. Bu sistemlerde dış ortamdan gelen sesler, borudan gelen zayıf çatlak sesinin duyulmasını engelleyeceğinden dinleme işleminin geceleri sesin az olduğu saatlerde yapılması tercih edilmektedir. Sistem maliyeti düşük olan manuel sistemlerde kaçak konumu tam olarak tespit edilemediğinden, bu tür sistemler yaygın olarak kullanılmamaktadır.



Şekil 2.1. Sewerin Aquaphon-200 kaçak tespit sistemi [25].

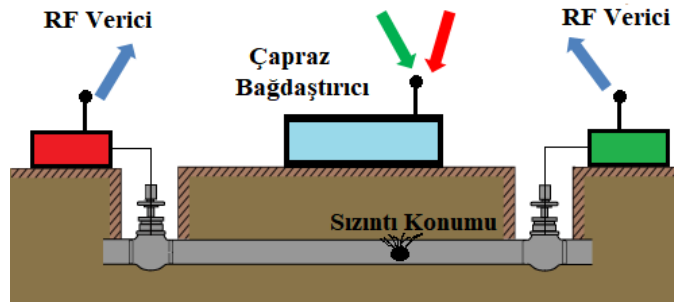
1880-1889 yılları arasında geliştirilen Deacon kayıp su ölçüm cihazı, aşağı ve yukarı yönde geliştirilen koninin hareketine bağlı bir kalemin şerit halinde kayan

kağıt üzerine saatlik pompalanan su miktarını çizmesi prensibine dayanmaktadır. Oluşan raporda düz çizgi varsa, su pompalanmadığını, akış olmaması gereken herhangi bir anda oluşan paralel bir çizgi ise su kaçağı olduğunu göstermektedir. Kaçağın olmaması durumunda birbiriyle oldukça benzer raporlar elde edilmektedir [26]. Şekil 2.2’de Deacon metre verilmiştir.



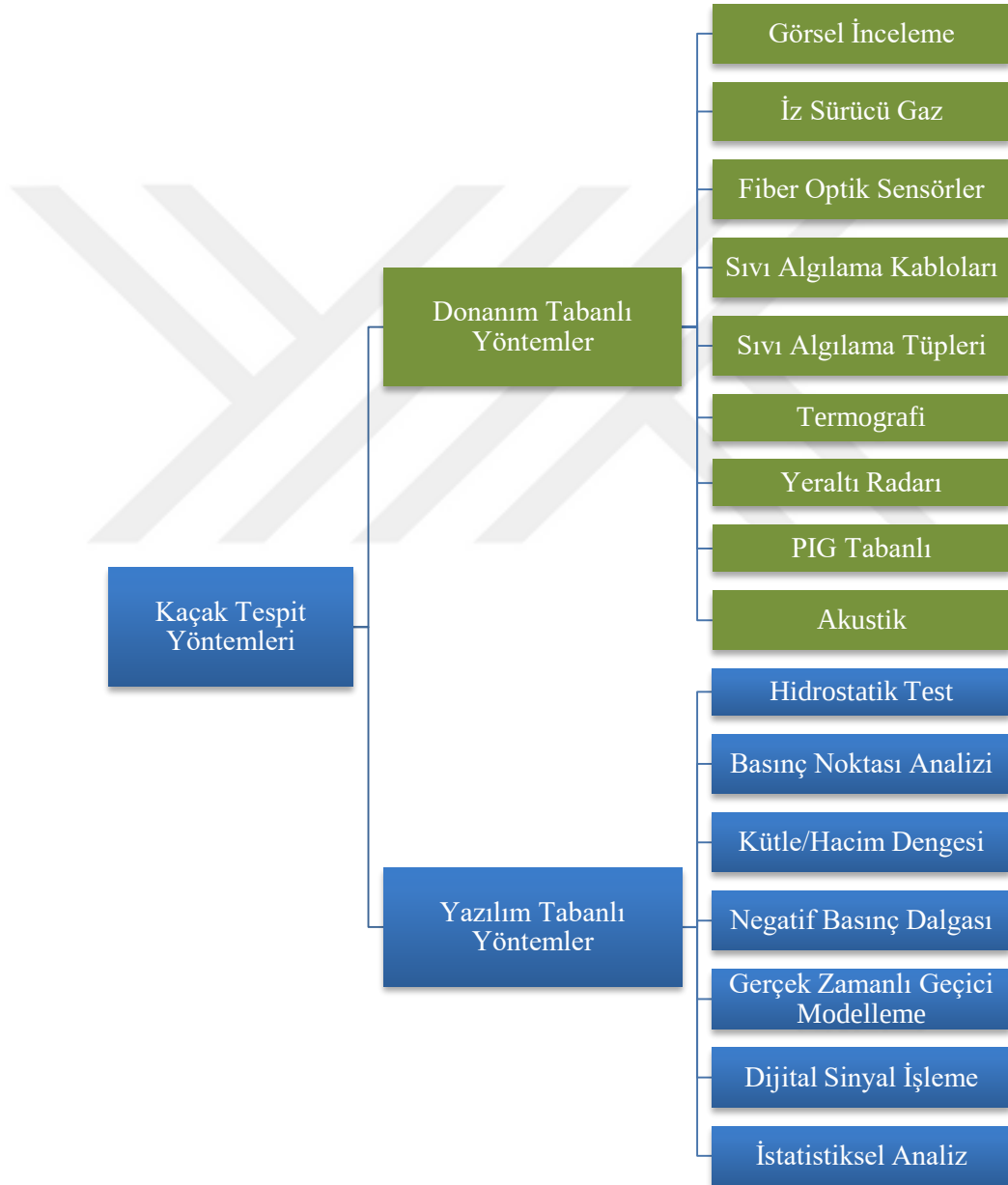
Şekil 2.2. Deacon kayıp su ölçüm cihazı [27].

1970’lerin sonlarına doğru, su kaçağı ses bağdaştırıcısının icadı ile konum tespiti önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Manuel sondaj sisteminden ayrılan özelliği, gömülü boruda, kaçağın her iki tarafına yerleştirilen sensörler tarafından verinin toplanmasıdır. İki sensör arasındaki su kaçağının oluşturduğu gürültünün zaman gecikmesi, boru malzemesi, çap ve uzunluk bilgileriyle birleştirildiğinde kaçağın konumu tespit edilmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Su kaçağı ses bağdaştırıcısı [28].

1980’li yıllara gelindiğinde su kaçakları geliştirilen sistemlerle kayıt ve takip altına alınmaya başlanmıştır. Her bir dağıtım sistemi belirli sayılarda bağlantıları kapsayan sektörlerle ayrılarak sayaç alanları oluşturulmuştur [24]. Bölgelerin başlangıç noktalarında kurulan ana akış sayaçları, geceleri bölgelere su pompalayarak ana depoları doldurmaktadır. Su tüketiminin yoğun olduğu gündüz vakitlerinde ise aynı bölgedeki tüketicilerin toplam sayaç değerleri ile ana sayaç değerleri kıyaslanarak kaçak su miktarının tespiti hedeflenmiştir.



Şekil 2.4. Su kaçağı tespit yöntemleri.

Kaçak tespitinde kullanılan sistemlerin düşük maliyet, kolay kurulum ve kısa sürede sonuç verme yeteneklerine sahip olması istenmektedir. Sonuç olarak ortaya çıkan sistemler yüzeysel ses dinleme sistemlerinden başlayarak, hassas ölçüm aletleri ve iyi eğitilmiş personel kullanılan sistemlere, devam eden zamanda boru içerisinde hareket ederek kaçak konumunu tespit edebilecek otonom robot sistemlerine gelişerek günümüze kadar ulaşmıştır. Mevcut kaçak tespit yöntemleri teknik yaklaşımlarına göre donanım tabanlı yöntemler ve yazılım tabanlı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [29]. Bu iki grup aynı zamanda sırasıyla harici yöntemler (external) ve dâhili yöntemler (internal) olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.4’de literatür taraması sonucu güncellenen genişletilmiş su kaçağı tespit yöntemleri verilmiştir.

2.2.1. Donanım tabanlı kaçak tespit yöntemleri

Harici yöntemler olarak da adlandırılan donanım tabanlı yöntemler, boru hattının dışından gelen kaçakları görsel gözlem veya uygun ekipman kullanarak tespit eder. Bu tür yöntemler, kaçak yeri tespitinde oldukça etkin olmalarına rağmen yazılım tabanlı yöntemlere kıyasla pahalıdır ve donanımsal kurulum gerektirmektedir. Görsel inceleme, iz sürücü gaz, fiber optik sensörler, sıvı algılama kabloları, sıvı algılama tüpleri, termografi, yeraltı radarı, akustik kaçak algılama ve PIG tabanlı yöntemler donanım tabanlı sınıfa girmektedir.

2.2.1.1. Görsel inceleme

Su kaçaklarının tespiti için kullanılan en basit yöntem görsel incelemedir. Eğitimli bir personel boru hattı boyunca ilerleyerek boru hattında gözlemleyebildiği olağandışı durumları saptar. Boru hattının yakınına giderek kaçaktan gelen sesi dinler ve kaçağı tespit eder. Yöntemin etkinliği boru hattının denetim periyoduna, personel deneyimine ve su kaçağının büyüklüğüne bağlıdır [30].

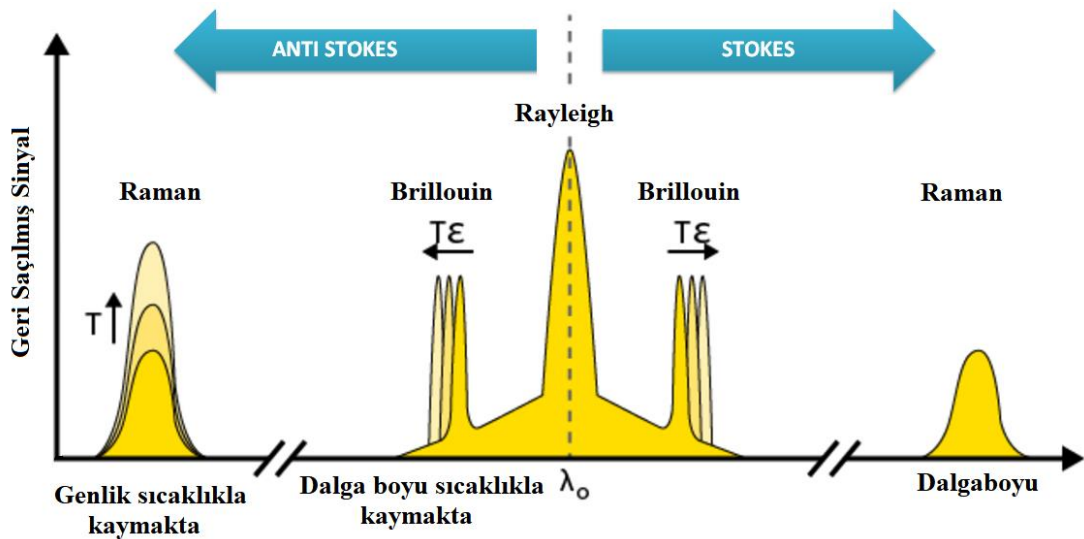
2.2.1.2. İz sürücü gaz

Bu yöntem ucuz, zehirli olmayan, suda çözünemeyen, helyum veya hidrojen gibi havadan hafif bir gazın boru hattına enjekte edilerek kaçağın tespiti ilkesine dayanmaktadır. Uçucu özelliğinden dolayı kaçak olan noktada boru hattından yüksek basınçla çıkarak, gaz dedektörleri ile kaçak noktasının varlığı ve konumu tahmin

edilebilir. Bu yöntem küçük çaplı kaçakları tespit edebilmesine rağmen sisteme aralıksız gaz enjekte edilmesi dezavantajıdır. Bu durum yüksek maliyet ve zaman kaybını da beraberinde getirmektedir. Ayrıca toprak altına gömülü olmayan boru hatları üzerinde uygulanabilir değildir [31]–[33].

2.2.1.3. Fiber optik sensör

Raman Efektı veya Optik Zaman Domeni Reflektometrisi (OTDR), fiber kablonun içerisine gönderilen lazer dalganın moleküler titreşiminin sıcaklık değişimi sonucu değişip değişmediğini, uçtan uca yaptığı ölçümler arasındaki farka dayandırarak tespit etme yöntemidir. Bu sayede sıcaklık bilgisi geri saçılmış lazer dalga ile fiber kablo boyunca taşınabilmektedir. Fiber optik sensör yöntemi Raman Efectini kullanmaktadır. Bu yöntemde su kaçağı olduğunda, boru hattı içerisine baştan sona döşenen fiber optik kablo ile özel bir madde temasa geçerek kablonun sıcaklığını değiştirmektedir [34]. Yöntemin dezavantajı geri saçılmış ışığın genliğinin saçılma sonucu değişmesidir. Brillouin dağılımı ise yayılım optik sinyalleri ile termal ve akustik dalgalar arasındaki etkileşime bağlı olarak gerçekleşmekte ve frekansı kaydırılmış bileşenlerin sayısı artmaktadır. Brillouin tabanlı teknikler sıcaklık ve gerilme bilgisini direk taşıyabilmektedir. Raman efekti geri saçılmış ışığın genliğini değiştirdiğinden Brillouin uzun vadede daha doğru ve kararlı çalışmaktadır. Şekil 2.5’de Raman ve Brillouin tabanlı tekniklerin dalgayı nasıl analiz ettiği verilmiştir [35]. Mevcut gömülü hatlar için her iki sistemin uygulanabilir olmaması fiber optik sensör yöntemini kullanışsız hale getirmektedir.



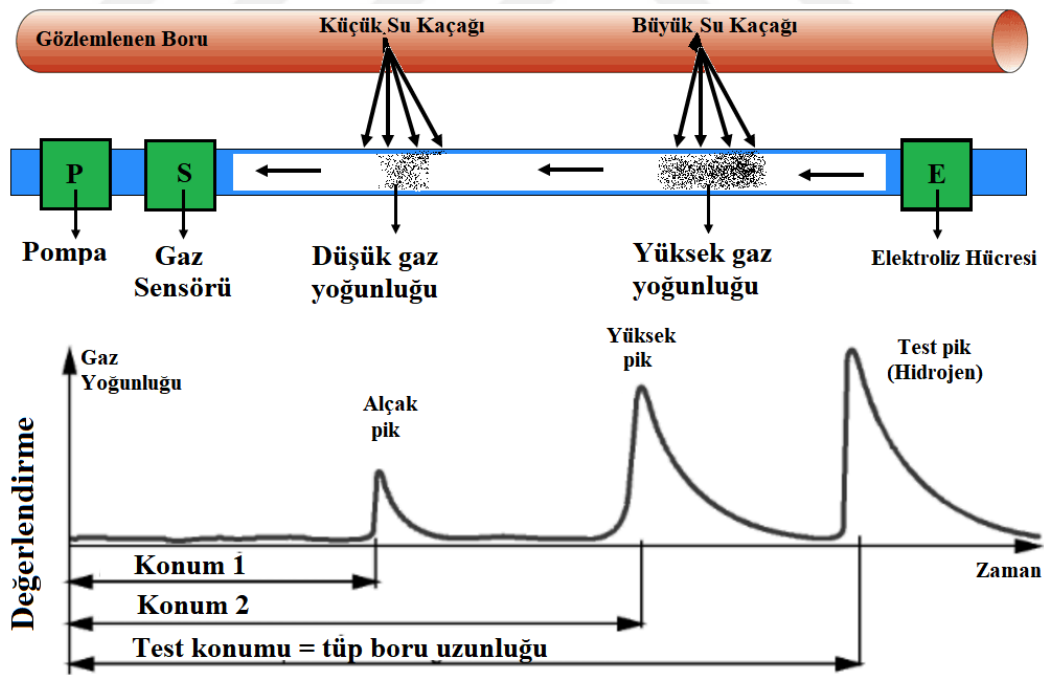
Şekil 2.5. Fiber optik kablolarda geri saçılmış sinyalin şematik gösterimi [35].

2.2.1.4. Sıvı algılama kabloları

Sıvı algılama kabloları yer altına döşenen boru hattının dış yüzeyine yakın bir bölgeye yerleştirilmektedir. Bu kablo üzerinden belirli aralıklarda elektriksel sinyal gönderilmekte ve kaçak olmayan boru hattı bilgisi kaydedilmektedir. Kaçak olması halinde kablounun yüzeyine temas ederek kabloyu ıslatan su, empedans değerlerinin değişmesine neden olmaktadır. Başlangıçta kaydedilen değerlerle kaçak sonrası oluşan giriş ve çıkış sinyal değerleri arasındaki zaman gecikmesi kullanılarak kaçağın konumu tespit edilmektedir. Bu yöntem, kısa boru hatlarında çoklu konum tespitinde iyi sonuçlar vermektedir [36].

2.2.1.5. Sıvı veya buhar algılama tüpleri

Bu yöntem teknik olarak sıvı algılama kablolarına benzemektedir. Boru hattının dış yüzeyine hat boyunca atmosfer basıncında hava içeren tüp boru hattı döşenmektedir. Tüp boru hattının baş kısmında bir hava pompası, hemen yanında gaz sensörü son kısmında ise bir elektroliz hücresi bulunmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sıvı veya buhar algılama tüpleri ile kaçak tespiti [36].

Belirli aralıklarla pompa bir miktar havayı elektroliz hücresine iterek tekrar geri çekmektedir. Su boru hattında kaçak olmaması durumunda tüpte hidrojen miktarında

da artış olmayacaktır. Boruda kaçak oluştuğunda ise dışarı sızan sıvı, tüp içerisine nüfuz edecektir. Tüp içerisinde biriken sıvı elektroliz hücresine pompalanarak hidrojen ve oksijene ayrılacaktır. Tüpte oluşan hidrojen yoğunluğu, kaçak yoğunluğuna eşittir. Bu yöntemin dezavantajı, kaçak tespit süresinin çok uzun olmasıdır. Buna ek olarak, donanım maliyetinin çok yüksek olmasından dolayı boru hatlarında uygulanması pratik değildir. Buhar algılama tüplerinin diğer dezavantajı, zemin üzerindeki veya derin bölgelerdeki boru hatlarındaki uygulamalarının zor olmasıdır [36].

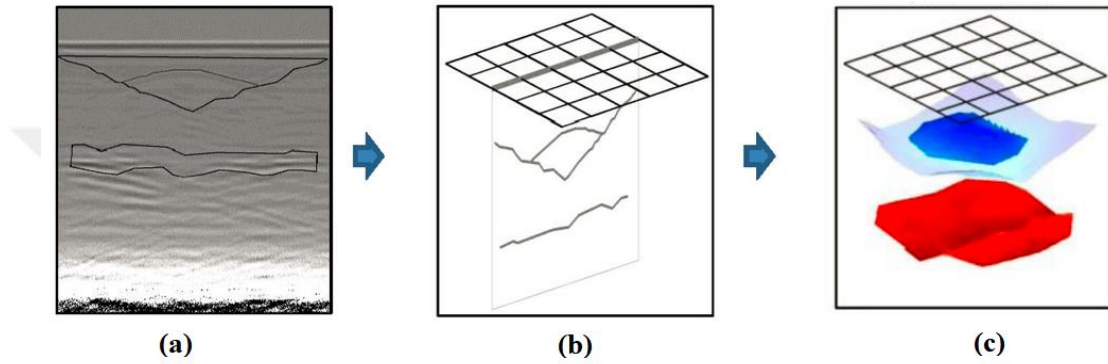
2.2.1.6. Termografi

Termografi yöntemine dayalı çalışmalarda, kızılötesi kamera veya tarayıcı ile boru hattı helikopterler veya dronlarla izlenmektedir. Yer altında bulunan su dağıtım boruları ile çevresi arasındaki ısı değerler tespit edilmektedir. Boruda kaçak olması durumunda, kaçağın olduğu noktadan sızan su çevresindeki toprak ısını değiştirir. Kızılötesi tarayıcılar, normal olmayan ısı farkları tanımlamak için kullanılmaktadır [32]. Bu görüntüler daha sonra bilgisayar analizleriyle işlenerek işlem doğruluğu ve hızı artırmak için mevcut veri tabanı görüntüleriyle kıyaslanmaktadır. Bu tekniğin avantajlarından biri kazı yapılmadan çok geniş alanlarda su kaçağı tespiti yapılabilmesidir. Sadece sıcak su boru hattı sistemleri gibi çevre sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa sahip olan sıvı boru sistemleri için kullanılabilirliği dezavantajıdır. Standart şehir dağıtım şebekeleri için bu yöntem uygun değildir. Güneş ışımları sonucu oluşan radyasyon, bulutlar, su borularının yağışlı alan altında kalması, iklimsel ani değişimler gibi çeşitli nedenler sistem etkinliğini ciddi oranda azaltmaktadır [37].

2.2.1.7. Yeraltı radarı

Yeraltına gömülü boru hatlarının yüzeyden radar vasıtasıyla tespiti ilkesine dayanmaktadır [38], [39]. Dalganın yansıma süreci, yeraltındaki değişime bağlıdır. Radardan yayılan elektromanyetik dalga boruda kaçak olmaması durumunda yansıyarak belirli bir hızda yüzeye dönmektedir [40]. Su kaçağının olması durumunda dalganın yansıma süresi değişmektedir. Yeraltındaki borunun konumuna göre radarın anten seçimi yapılmaktadır. Eğer tespit edilecek boru hattı yüzeye yakın ise yüksek frekanslı, yüzeye uzak derin bir konumdaysa düşük frekanslı anten

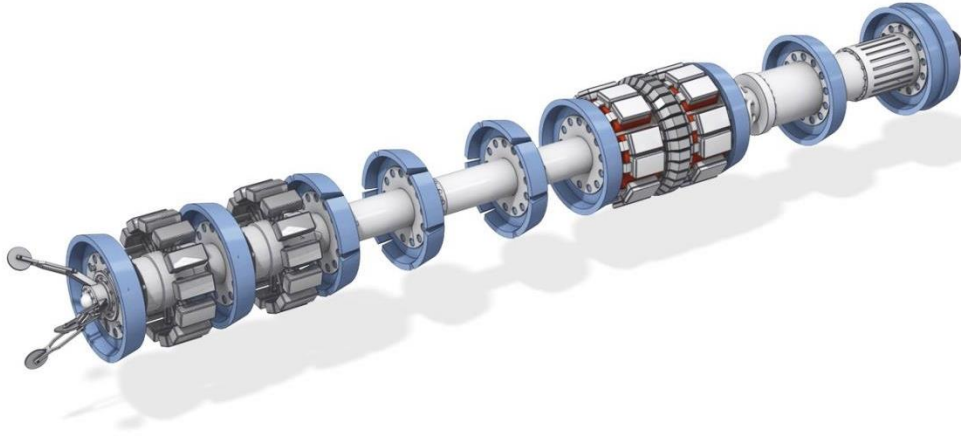
kullanılmaktadır. Metalik ve metalik olmayan boru hatları için etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda yeraltı radarı zaman alıcı olarak tanımlanmasına rağmen [38] yakın tarihli çalışmalarda daha hızlı çalışan sistemler geliştirilmiştir [22], [41], [42]. Yöntemin dezavantajı, farklı toprak tiplerinde farklı tepkiler verdiği için doğru frekans seçiminin zorluğudur. Buna ek olarak, boru dışındaki metal nesneler yanlış alarmlara neden olabilmektedir. Şekil 2.7’de yeraltı radarından alınan veriler sonucu üç boyutlu model inşası verilmiştir.



Şekil 2.7. Yeraltı radarı (a) radardan alınan işlenmemiş veri; (b) Kontör çıkarımı; (c) 3D model inşası [42].

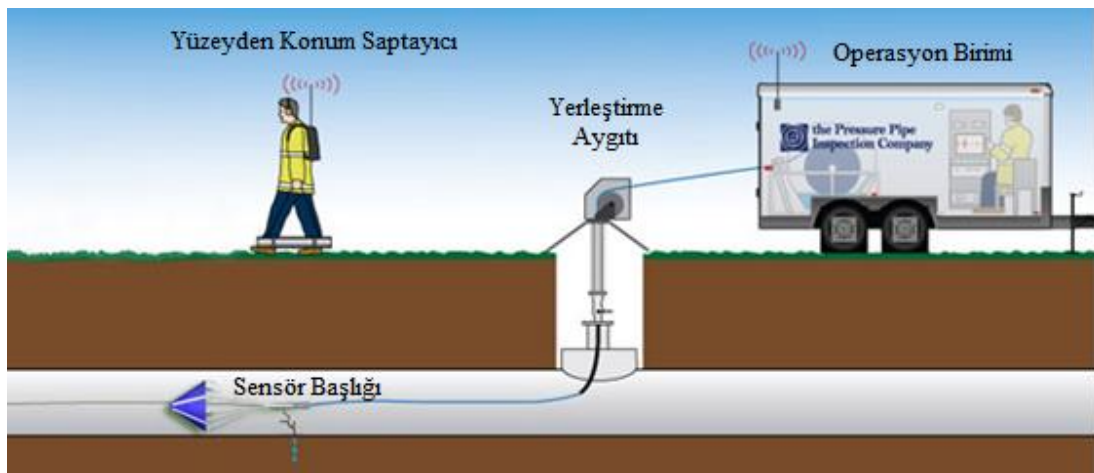
2.2.1.8. PIG tabanlı yöntemler

Boru hattı gözlem aleti (pipeline inspection gauge – PIG), boru içerisinde serbest olarak hareket eden aletlerin genel adıdır. Petrol ve doğalgaz boru hatlarında temizlik ve gözlem amaçlı kullanılmaktadır [43]. Şekil 2.8’de Nord Stream AG’ye ait Intelligent PIG cihazı verilmiştir [44]. Rusya’nın Portovaya kentindeki boru hatlarının başlangıcından Almanya Lubmin’e giden gaz akışıyla birlikte gideceği boru hatlarına sokularak boru hatlarının dâhili kontrolü için kullanılmaktadır. Herhangi bir korozyon belirtisini tespit ederek bu boru hattının iç boyutlarını ölçmekte ve korozyon konumunu hassas olarak bulmaktadır.



Şekil 2.8. Nord Stream AG Intelligent PIG [44].

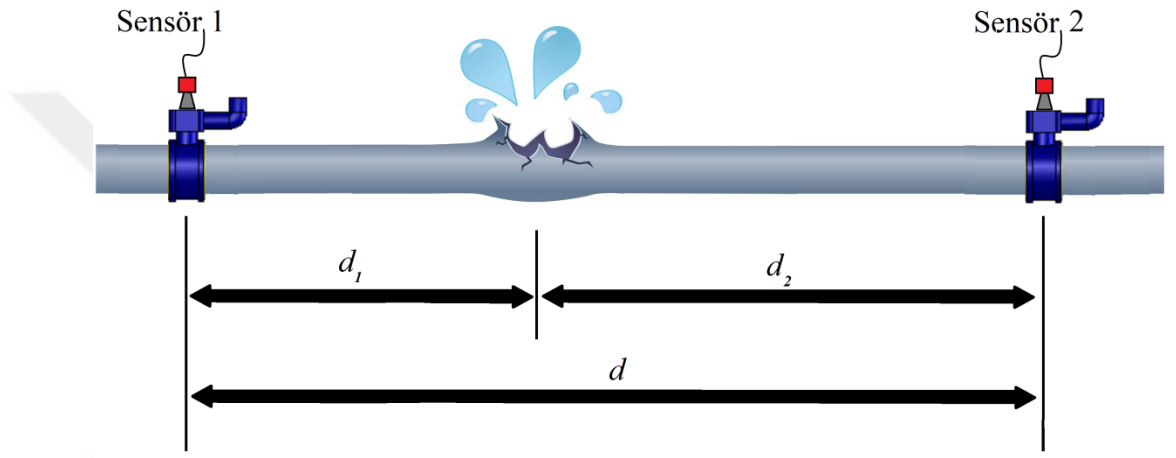
Su boru hatlarındaki kaçakların tespiti için benzer bir yöntem ilk olarak Chastain-Howley [45] ve Mergelas [46] tarafından Sahara Sistemi olarak tanımlanmıştır. Günümüzde Pure Technologies'in geliştirmeye devam ettiği Sahara Kaçak Tespit Sistemi Şekil 2.9'da verilmiştir [47]. Sahara sisteminde, yüksek hassasiyetteki akustik dedektör ünitesi doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Borunun ölçüsü, imal edildiği malzeme, yeraltına gömülü olduğu toprak tipi gibi diğer faktörlerden etkilenmeden doğrudan kaçak konumu tespit edilmektedir. Yerleştirilen sensör suyun akışıyla birlikte boru hattı boyunca ilerlemektedir. Sensör, bir kablo ile dâhili bir izleme cihazına bağlanarak sensörün konumunun eş zamanlı izlenmesine izin vermektedir. Kaçak konumlarında sensör durmakta ve tam olarak konum tespiti yapılmaktadır. Bu sistemin dezavantajı en fazla 2 km uzunluğundaki boru hattına uygulanabilir olmasıdır. Ayrıca cihazı satın almak ve çalıştırmak maliyetlidir.



Şekil 2.9. Pure Technologies Sahara PIG sistemi [47].

2.2.1.9. Akustik yöntemler

Bu yöntemde, hattın iki ucuna akustik sensörler kurularak kaçak olmayan boru hattı için bir gürültü taban çizgisi oluşturulmaktadır (Şekil 2.10). Algılayıcı sensörler, gürültülü olmadığı sürece yol yüzeyine veya yangın hidrantları gibi belirli noktalara yerleştirilmektedir. Boru hattında kaçak meydana geldiğinde kaçak çevresinde oluşan düşük frekanslı akustik sinyal algılanmaktadır. Sinyal değeri gürültü taban değerinden farklıysa boru hattında kaçak olduğuna dair bir alarm etkinleştirilmektedir [48].



Şekil 2.10. Akustik sensörler kullanılarak kaçak konum tespiti.

Kaçak yeri, sesin yayılım hızı, zaman gecikmesi ve algılama noktaları arasındaki mesafeye dayalı olarak tanımlanmaktadır. Sesin yayılım hızı, sensörler arası mesafe ve algı süreleri kullanılarak kaçak konumu hesaplanmaktadır (Denklem 2,1).

$$d_1 = \frac{d - ct_{peak}}{2} \quad (2,1)$$

Boru hattındaki kaçak ile sensör 1 ve sensör 2 arasındaki mesafe sırasıyla d_1 ve d_2 'dir. İki sensör arası mesafe d , ses dalgasının yayılım hızı c ve her iki sensör özdeş ses frekanslarını gelme süreleri arasındaki fark t_{peak} ile tanımlanmıştır. Bu yöntemin performansı sensörler arasındaki mesafeye ve operatör becerisine bağlıdır. Kısa mesafeli olarak konumlandırılan sensörlerin başarımı yüksektir.

2.2.2. Yazılım tabanlı kaçak tespit yöntemleri

Dâhili yöntem olarak da adlandırılan yazılım tabanlı yöntemler basınç, sıcaklık ve akış gibi iç boru hattı parametrelerinin hidrolik koşulların ölçülmesine yönelik araçlarla izlenmesine dayanmaktadır [49]. Hidrostatik test, basınç noktası analizi, kütle/hacim dengesi, negatif basınç dalgası, gerçek zamanlı geçici modelleme, dijital sinyal işleme ve istatistiksel analiz yöntemleri yazılım tabanlı sınıfa girmektedir. Dâhili yöntemlerin etkinliği genellikle sistemin özellikleri, çalışma koşulları ve toplanan verilerle ilgili belirsizliklere bağlıdır.

2.2.2.1. Hidrostatik test

Hidrostatik test yöntemi çelik boruların bütünlüğünü test etmek için su, petrol ve gaz endüstrilerinde kullanılmaktadır [50]. Bu yöntemde boruların her iki bölümü de kapatılarak borulara yüksek basınçta su verilir. Genellikle 24 saatlik belirli bir süre boyunca, basınç ve sıcaklık ölçülmesi gerekmektedir. Boruya daha önce yerleştirilen basınç sensörleri tarafından basınç göstergesinde herhangi bir azalma olması boru hattında kaçak varlığına işaret etmektedir. Bu yöntemin tek problemi, ağların bazı bölümlerinin kapatılması gerektiğinden, boru hattının devamındaki bölgelere su verilememesidir. Ayrıca kapalı bir sistem haline gelen boru hattındaki sıcaklık değişimi basıncı etkileyeceğinden boru bölgelerinde kazı yapılması gerekmektedir.

2.2.2.2. Basınç noktası analizi

Bu yöntem, mevcut basınç sinyalini, basınç ve akış izleme cihazları vasıtasıyla boru hattı boyunca bir süre boyunca alınan istatistiksel eğilim ile karşılaştırarak kaçakların varlığını tespit etmektedir [51]. Yöntem, boru hattında kaçak olması durumunda basıncın düşüşünün izlenmesi ilkesine göre çalışmaktadır. Yeni verilerin ortalaması ile eski verilerin ortalaması arasındaki fark büyükse kaçak oluştuğuna dair bir alarm üretilmektedir. Bu yöntem kaçağın varlığını tanımlayabilir, fakat küçük çaplı oluşan kaçakları kesin olarak saptayamamaktadır. Basınç düşüşü kaçak imzası olarak kullanıldığından, kaçak olmasa bile şebeke basıncı her düştüğünde yanlış alarm verilmektedir [52] .

2.2.2.3. K t le/hacim dengesi

K t le ve hacim dengesi kütlenin korunması ilkesine dayanan bir yöntemdir [53], [54]. Normal şartlarda boru içerisine giren sıvı miktarı ile son uçta borudan çıkan sıvı miktarı aynı olmak zorundadır. Standart boru hattı ağlarında, borulara giren ve çıkan akış miktarı  l  lelebilmektedir. Sıvı kütlesi boru boyutu sabiti ve hacimsel akış hızı, sıcaklık, basınç gibi değişkenler kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Yukarı akış ve a a ı akış yönlerindeki ölçümler arası fark, belirlenmiş e ik değerinden fazla ise hatta kaçak olduğu belirlenmektedir [29], [55]. Bu yöntem boru hattı ölçüm aletlerinin do rulu una çok duyarlıdır. K t le dengesi yönteminin temel zayıflığı, kararlı durum varsayımıdır. Bu varsayımın bir sonucu olarak, sahte alarmları önlemek için algılama süresi arttırılmalıdır. Bu nedenle, ka a a müdahale süresi geciktirilir. Bu durum istenmeyen bir durumdur. Hatta oluşan %1’lik bir ka a ın tespit edilmesi yaklaşık 1 saat gerektirmektedir [29]. K t le denge metodunun en önemli dezavantajı kaçak yerinin bilinmemesidir. Sonuç olarak, gerçek uygulamada ka a ın yerini saptamak için bu yöntemle hatta kaçak olduğu tespit edildikten sonra tam olarak konumu bulmak için diğer yöntemler gerekmektedir [52].

2.2.2.4. Negatif basınç dalgası

Boru hattında kaçak olu tu unda, akışkan basıncı kaçak konumunda aniden düşmekte ve negatif basınç dalgası üretmektedir. Bu negatif basınç dalgası belirli bir hızda boru hattının yukarı ve a a ı yönlerine doğru iletilir. Boru hattının başlangıç ve son noktalarına iki basınç sensörü takılmaktadır. Her uçtaki negatif dalganın varış zamanları arasındaki süre farkı ile kaçak konumu tespit edilmektedir [56]. Mashford et al. [57] 2002 yılında negatif basınç dalgası metodu ve dalgalanmaları saptamak ve bulmak için dalgacık algoritmasını tanıtmi tır. Basıncı sensörlerinden gelen verileri analiz etmek ve borudaki kaçak varlığı konusunda karar vermek için destek vektör makinesi [58] kullanılmıştır. Bu çalışmada, negatif basınç dalgası tespiti, “dalga var” ve “dalga yok” olmak üzere ikili örüntü sınıflandırma olarak d   n lm  t r. SVM formülasyonu ile doğrusal olmayan bir sınıflandırıcı, basınç eğrisinde dalganın varlığını otomatik olarak tespit etmek için denetimli öğrenme yoluyla e itilmektedir.

Negatif basınç dalgasıyla birlikte yaygın olarak kullanılan başka bir sinyal işleme yöntemi Li et al. [59] tarafından geliştirilen dalgacık dönüşümüdür. İzleme

sistemi, boru hattının iç parametrelerini SCADA sisteminden edinmektedir. Bu yöntemle kaçak tespiti için bildirilen zaman gecikmesi 2 dakikadır ve kaçak lokalizasyonu için tahmini hata %2 olarak belirtilmiştir. Marco Ferrante [60] borudaki herhangi bir arıza nedeniyle anormallik eğilimi gösteren çıkarılmış basınç sinyallerine dayanan geçici bir kaçak saptama prosedürü geliştirmiştir. Dalgacık dönüşümü ile bu basınç sinyalleri işlenerek hassas özellikler çıkarılmaktadır. Basınç sinyalleri genliği kaçak büyüklüğüne, yansıyan sinyalin varış zamanı ise kaçak konumuna bağlıdır. Henrique V. da Silva [61] kümeleme ve sınıflamaya dayanan kaçak tespit yöntemini geliştirmiştir. Basıncı algılayacak dört transduser bir bilgisayara bağlanarak boru hattı boyunca farklı yerlerde kaçak simüle edilmiştir. Konum, negatif dalgaın transdüserlere varış süresini ve dalga hızının bilgisini tahmin ederek hesaplanmaktadır. Metodun dezavantajı, kaçak yerinin tam olarak tespit edilememesidir.

2.2.2.5. Gerçek zamanlı geçici modelleme

Bu kaçak tespit yöntemi, momentum, kütle ve enerjinin korunumu denklemleri kullanılarak inşa edilen boru akış modellerine dayanmaktadır. Boru hattında ölçülen nicelik değeri ile akışın tahmini değeri arasındaki fark, kaçakların varlığını belirlemek için kullanılmaktadır. Boru hattının her iki ucunda basınç ve sıcaklık ölçümleri yapılması gerekmektedir. Yanlış kaçak alarmları oluşmaması için gürültü seviyesi sürekli denetlenmelidir [29]. Model tabanlı kaçak tespiti ve tahmini üzerinde yapılan çalışmada, ikinci dereceden kayma modunu kullanan boru hatlarında kaçak konumunun tespiti için bir çerçeve tasarlanmıştır [62]. Tek bir kaçağın olması durumunda sonlu zaman içerisinde kaçak konumunu ve akışını belirleyen bir algoritma çalıştırılmaktadır. Aamo [63], sıvı akışının iki birleştirilmiş kısmi diferansiyel denklemlerinde uyarlanmış bir Luenberger tipi gözlemci tabanlı sistem kullanan bir algılama sistemi tasarlamıştır. Bu yöntemin en büyük avantajı, çok küçük kaçakları (akışın %1'inden daha azını) tespit etme yeteneğine sahip olması ve kaçak boyutunu doğru bir şekilde tahmin edebilmesidir. Buna ek olarak kaçak tespit gecikmesi önemsizdir. Öte yandan, büyük veri kümeleri ile hesaplama yapılması gerektiğinden bu yöntem büyük işlem gücü gerektirmektedir [29].

2.2.2.6. Dijital sinyal işleme

Kaçak tespiti için bir diğer yöntem de dijital sinyal işleme teknikleridir. Bu yöntem, boru hattının bilinen bir girdiye tepkisinin belli bir süre boyunca ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Elde edilen ölçüm sonraki ölçümlerle karşılaştırılır. Sinyalin frekans yanıtı veya dalgacık dönüşümü katsayıları gibi özelliklerinin karşılaştırılmasına dayanarak bir kaçak alarmı üretilmektedir. Bu metodun dezavantajı mevcut kaçakları tespit edememesi, sadece boru hattı kurulumu ilk tamamlandığı andan itibaren kaçağın oluşumunu tespit edilebilmesidir [29]. Mevcut kaçaklar için daha önce kurulmadığı bir boru hattında tespit yapamamaktadır.

2.2.2.7. İstatistiksel analiz

İstatistiksel bir kaçak tespit sistemi, bir boru hattının akış hızı, basınç ve sıcaklık ölçümlerini analiz etmek için ileri istatistiksel tekniği kullanır. İlk olarak istatistiksel tekniği kullanan Shell [64] tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, karmaşık boru sistemi için uygundur, çünkü hat ve akış/basınç aletlerindeki sürekli değişimler için sürekli olarak izlenebilir [29]. Buna ek olarak, bu teknik kaçak lokalizasyonu için de kullanılabilir. Bu sistemin ana amacı yanlış kaçak alarmı oranını en aza indirmektir. Aynı zamanda gerçek zamanlı uygulama için de uygundur ve petrol boru hattı sistemlerinde başarıyla test edilmiştir [64]. İstatistiksel kaçak algılamanın temel dezavantajı, gürültünün istatistiksel analizlerde parazit oluşturması ve bazı kaçakların, algılanmalarını engelleyen gürültüye gizlenmiş olmasıdır.

2.2.2.8. Frekans analizi

Frekans alanında akustik sinyal analizi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmalarda ses sinyali FFT yöntemiyle frekans ortamına taşındıktan sonra normal ses akışını bozan harmonikler tespit edilmektedir [65]. FFT dönüşümü sonrası zaman bilgisinin kaybolması, hesaplanan çatlak konumunun doğruluğunu azalttığından, bu alandaki araştırmacılar zaman-frekans bilgisinin beraber işlenebileceği yöntemlere yönelmişlerdir [66]. Dalgacık dönüşümü (wavelet) zaman-frekans bilgisinin birlikte işlenmesine imkân verdiği için akustik veri işleminde kullanılmıştır (Ridao vd. [67]). Ridao vd., çalışmalarında wavelet kullanarak sinyalin farklı ölçeklerde dönüşümlerini elde etmiş ve sinyalin kurtosis grafiğini oluşturmuştur. Kurtosis

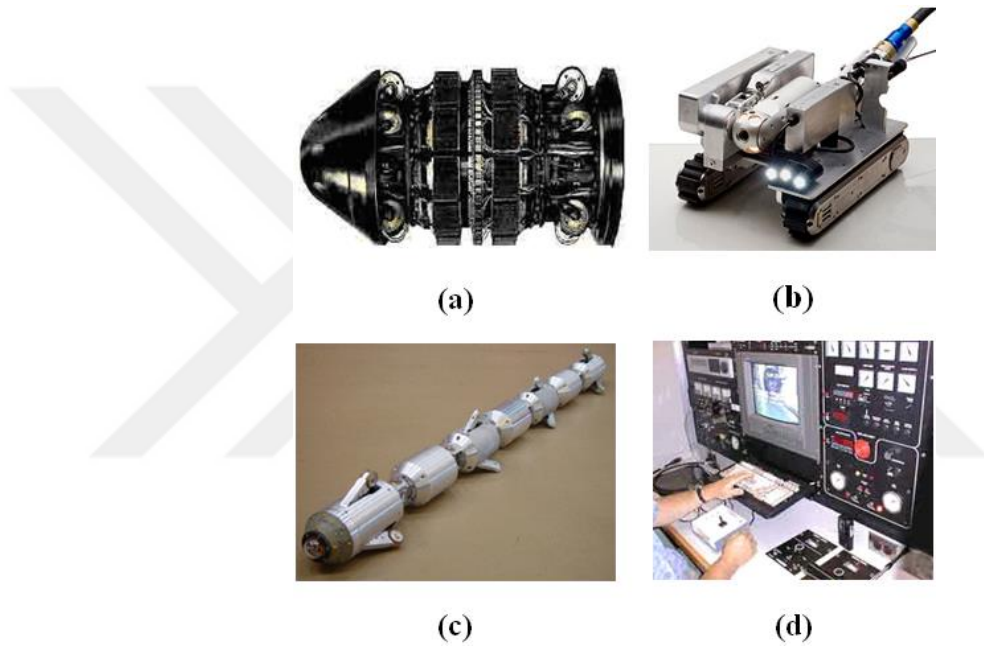
grafiği farklı ölçeklerde frekans değişimlerini ifade etmektedir ve maksimum değişimin olduğu nokta, çatlak sesinin konumuna işaret etmektedir. Nokta tespit edildikten sonra ters dönüşüm yapılarak konum tahmini gerçekleştirilmektedir. Çatlak konumunun zaman domaininde tespiti, frekans alanı çalışmalarının yanında korelasyon tekniğiyle de yapılmaktadır [68]. Bu yöntem yüksek doğruluğa sahiptir. Fakat hesaplama maliyetinin yüksek olması bu yöntemin dezavantajıdır. Bu dezavantajı ortadan kaldıran başka bir çalışmada DSP+FPGA kullanımı ile korelasyon tekniğinin hızlanması sağlanmaktadır [69].

2.3. Kaçak Tespit Robotları

Su ve gaz borularını inceleyerek bakım ve denetim işlemlerini gerçekleştiren birçok robot bulunmaktadır. Bu robotlardan Şekil 2.11-a'da verilen PIG robotu, ultrasonik sensör ile boru içerisinden yankı sesleri toplayarak boru duvar kalınlığını hesaplamaktadır [70]. Kullanılan borunun et kalınlığı bilindiğinden, eldeki verilerle cihaz verisi kıyaslanarak çatlayan bölge ve boru içinde yabancı maddelerin biriktiği bölge tespit edilmektedir [71]. Oynar başlıklı kamerası yardımıyla boru iç yüzeyinin birçok açıdan görüntülenmesini sağlayan VersaTrax modüler boru muayene robotu Şekil 2.11-b'de verilmiştir [72]. Şekil 2.11-c'de ise uzaktan kontrol edilebilen ilk doğalgaz denetim robotu olan NREC görülmektedir [73]. Bu robot ön tarafında bulunan kamera yardımıyla boru içerisini görüntülerken, dış kısmında bulunan akustik sensörler ile boru içi sesi dinleyerek kaçak konumunu tahmin etmektedir. Çoğunlukla yer altında ve erişimin zor olduğu su, gaz, beton [74] ve deniz suyu borularının [75] uzak mesafelerden denetiminin yapılabilmesi kullanıcı için kolaylık sağlamaktadır (Şekil 2.10-d). Fakat bu robotlar sadece geniş çaplı su ve gaz borularında gezinebilmektedir. İleri teknolojik sensörlerle donatılan robotların büyük boyutlarda olması dar çaplı borularda kullanımlarını engellemektedir. Bu çalışmada önerilen robot küçük boyutlarda tasarlanarak bu robotların giremediği dar çaplı borulara girebilecektir.

Pure Technologies tarafından geliştirilen SmartBall bilinen en güncel kaçak tespit robotudur [76]. Sünger ile kaplanmış alüminyum bir top içerisinde bulunan mini bilgisayar ile boru hattı içerisinde gözlem yapan bu robot ticari olarak piyasada mevcuttur (Şekil 2.12). Dibe batarak dış yüzeyinde bulunan sünger sayesinde su akışı ile hareket eden bu robot, sensörlerden elde ettiği verileri kablosuz olarak kontrol

bilgisayarına aktarmakta ve veriler online olarak değerlendirilmektedir. SmartBall her ne kadar ihtiyacı tam olarak karşılıyor gibi görünse de dezavantajlara sahiptir. Dış ortama kablosuz olarak veri aktarırken boru içerisinde bulunduğu konumu tespit sürecinde dış ortamda bulunan iki adet GPS alıcısını kullanmaktadır. Sonuç olarak sistem bileşen sayısının artmasına ve maliyetin yükselmesine neden olmaktadır. Bir diğer dezavantajı 2.5 inch (6.35cm) çapına sahip olan SmartBall en az 6 inch genişliğe sahip borularda gezinebilmektedir. Son olarak konum doğruluğunun yaklaşık 10 feet (3 m) olması, kilometrelerce uzunluğa sahip boru içerisinde çok iyi bir sonuç olmasına rağmen geliştirmeye açıktır.



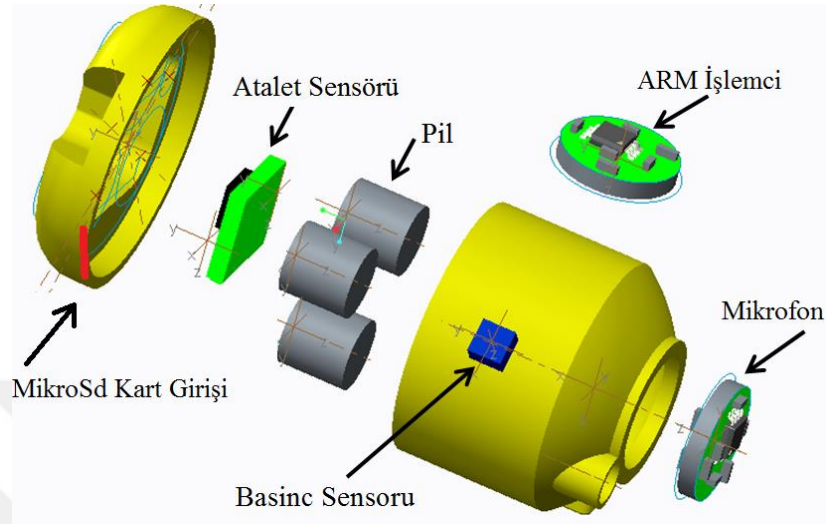
Şekil 2.11. Kaçak tespit robotları; **(a)** PIG **(b)** VersaTrax **(c)** NREC **(d)** Görüntüleme ve kontrol aracı



Şekil 2.12. Pure Technologies tarafından geliştirilen SmartBall.

2.4. Kaçak Tespit Robotu

Tez çalışması kapsamında tasarlanıp üretilen robotun mekanik bileşenleri Şekil 2.13’de verilmiştir. Şekil 2.14’de ise üretimi tamamlanan robot verilmiştir.



Şekil 2.13. Kaçak tespit robotunun bileşenleri.



Şekil 2.14. Üretilen kaçak tespit robotu.

Hafif ve su geçirmez bir yapıda üretilen robot, mikrofon, basınç sensörü, ARM-işlemci, lityum şarj edilebilir batarya ve mikro SD kart bileşenlerine sahiptir.

Üretilen robot küre şeklindedir, Şekil 2.14. Boru içerisinde seyahat etmek üzere tasarlanan robotun çatlak bölgesindeki ses ve basınç değişimini algılayabilmesi için üzerinde bir adet mikrofon ve basınç sensörü bulunmaktadır. Robotun dönme ve pozisyon verisi, üzerine yerleştirilecek atalet sensör verilerinin işlenmesi sonucu elde edilmektedir. Tüm sensörlerden elde edilen veriler eş zamanlı SD karta yüklenerek daha sonra bu veriler hem robot konumunun tahmininde hem de kaçak konumunun tespitinde kullanılarak bahsedilen algoritmaların geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Robot, şarj edilebilir lityum bataryalar ile güçlendirilecektir. Kaçak tespit robotunun ön çalışması olan bu tez çalışmasında sadece ses verileri boru dışı ortamda değerlendirilmiştir. Robotun dış koruma katmanı ve diğer boyut indirgeme işlemleri için çalışmalar devam etmektedir.

2.5. Özet

Bu bölümde, boru hattında kaçak oluşum tespiti ve kaçak konumunun saptanması farklı yöntemler ve kaçak tespitinde kullanılan sistemler anlatılmıştır. Su kaçağı tespit yöntemleri iki ana kategoriye ayrılmaktadır, donanım tabanlı yöntemler ve yazılım tabanlı yöntemler. Donanım tabanlı yöntemler, bazı durumlarda maliyetin çok yüksek olduğu belirli aygıtları kullanarak borunun dışından gelen kaçakları tespit etmektedir. Yazılım tabanlı yöntemler boruda kaçak oluştuğunda basınç, sıcaklık, akış hızı veya diğer boru hattı parametrelerinin durumunu izlemek için algoritmaları sürekli olarak uygulamaktadır. Yazılım tabanlı yöntemler düşük maliyeti nedeniyle araştırmacıların en fazla yöneldiği yöntemdir. Donanım tabanlı kaçak tespit sistemleri yazılıma ek olarak ekipman ve daha fazla personel gerektirdiğinden pahalı olabilmektedir. Bu tür donanımları, PIG sistemlerinde olduğu gibi yüzlerce kilometreyi aşan boru hatları boyunca çalıştırmak, kilometrelerce kablo gerektirdiğinden belirli bir mesafeden sonra gerçekleştirim ve etkinliği kısıtlamaktadır. Önerilen kaçak tespit robotu su içerisinde suyun akışıyla hareket edeceğinden sistemin durdurulmasına gerek kalmamakta ve metrelerce uzunlukta kabloya ihtiyaç duyulmamaktadır.

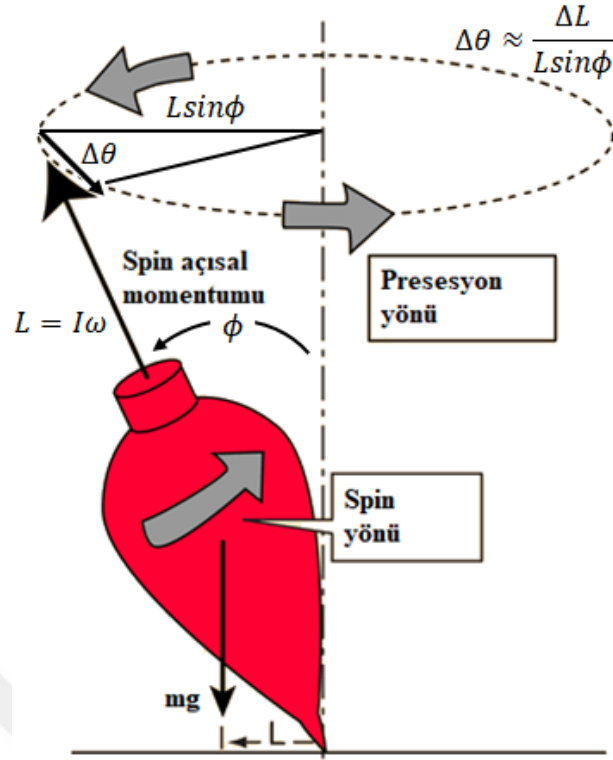
3. MEMS ATALET SENSÖRLERİ

Elektriksel ve mekanik büyüklükleri ölçme yeteneği olan, boyutları 0.02 mm ve 2 mm arasında değişen sensörlerin tek bir yonga içerisinde bir araya gelerek oluşturduğu sisteme Mikro Elektro-Mekanik Sistem (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems) denilmektedir. Bu sensörler yalıtkan üzerine silisyum (SOI – Silicon-insulator) [77] teknolojisiyle üretilmektedir. MEMS yüksek frekanslarda çalışabilme, hassas ölçme, küçük boyut, dış sinyallerden etkilenmeme, düşük maliyet ve güç tüketimine sahip olduğundan otomotiv, medikal, havacılık, savunma sanayisi, uzay araçları, telekomünikasyon sektörü gibi birçok alanda ve sanal gerçeklik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hareketinden dolayı kinetik enerjiye sahip bir cismin ivme değeri, yönelimindeki anlık açısal değişimi ve kutuplara göre manyetik yönelimi MEMS içerisinde bulunan sensörlerle ölçülebilmektedir. Termodinamiğin I. yasası olan enerjinin korunumu yasasına göre enerji ne yoktan var edilebilir ne de var olan enerji yok edilebilir, enerji sadece bir formdan başka bir forma dönüşebilir [78]. Bu iki cümleden hareketle “MEMS, enerji türleri arasında dönüşüm sağlayarak dış ortama ait fiziksel büyüklüklere matematiksel anlam kazandıran cihazlardır” diyebiliriz. Bu cihazlar uygulama alanına göre MEMS aktuatörleri ve MEMS sensörleri [79] olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Bu bölümde çalışmamızda kullanılan MEMS sensörlerinin tarihsel gelişimi ve genel özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.1. Jiroskop

İlk mekanik jiroskop yüksek bir açısal hızla dönen disk şeklinde üretilmiştir. Jiroskop dikey eksen etrafında döndürüldüğünde diskin uzunlama eksen çevresinde dönmesi sonucu oluşan ve dönme hızı ile doğru orantılı torka presesyon torku denilmektedir. Presesyon torku yerçekimine maruz kaldığında bırakıldığı zemin üzerinde yerçekimi vektörüyle belirli bir açı yaparak vektör etrafında dönmeye başlamaktadır. Aynı sonucu ip sarılarak yere atmak suretiyle oynanan topaçlarda da görmek mümkündür. Şekil 3.1’de presesyon torku verilmiştir.



Şekil 3.1. Presesyon torku örneği [80].

Yerçekimi kuvveti (mg), dönme merkezi uzunluğu (r) ve açısal momentum (L) kullanılarak presesyon torku hesaplanmaktadır, Denklem (3,1).

$$\tau = mgr \sin \phi = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (3,1)$$

Presesyon açısal hızı:

$$\Delta \theta \approx \frac{\Delta L}{L \sin \phi} \quad (3,2)$$

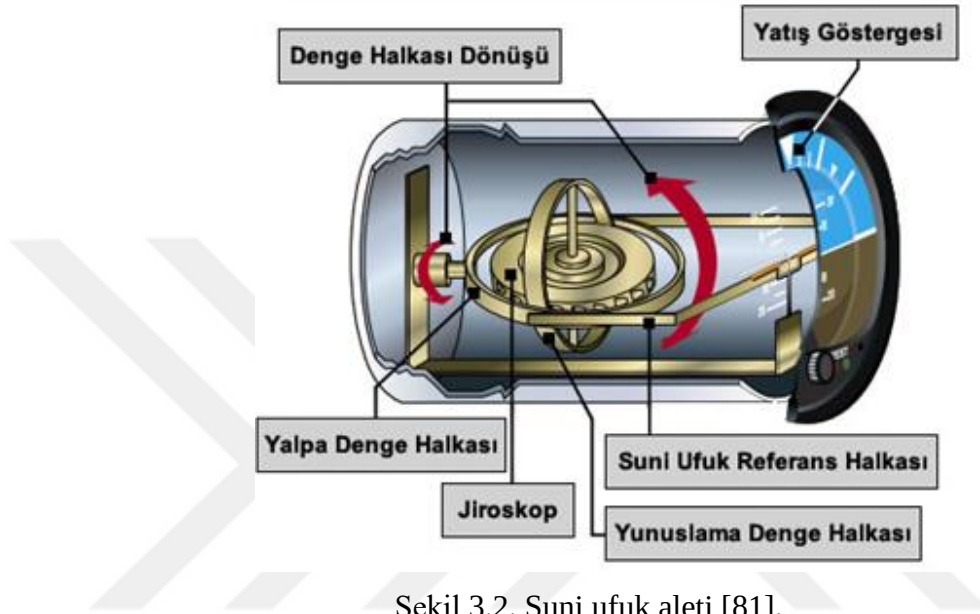
$$\omega_p = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (3,3)$$

Denklem (3,3)'de $\Delta \theta$ yerine Denklem (3,2) konulduğunda açısal hız elde edilmektedir.

$$\omega_p = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{\Delta t L \sin \phi} = \frac{\tau}{L \sin \phi} = \frac{mgr \sin \phi}{L \sin \phi} = \frac{mgr}{I \omega} \quad (3,4)$$

Eğer dönme eksenini yerçekimi vektörüyle dik bir açı oluşturacak şekilde döndürülürse presesyon torku da açısal momentum torkuna dik olacaktır. Mekanik

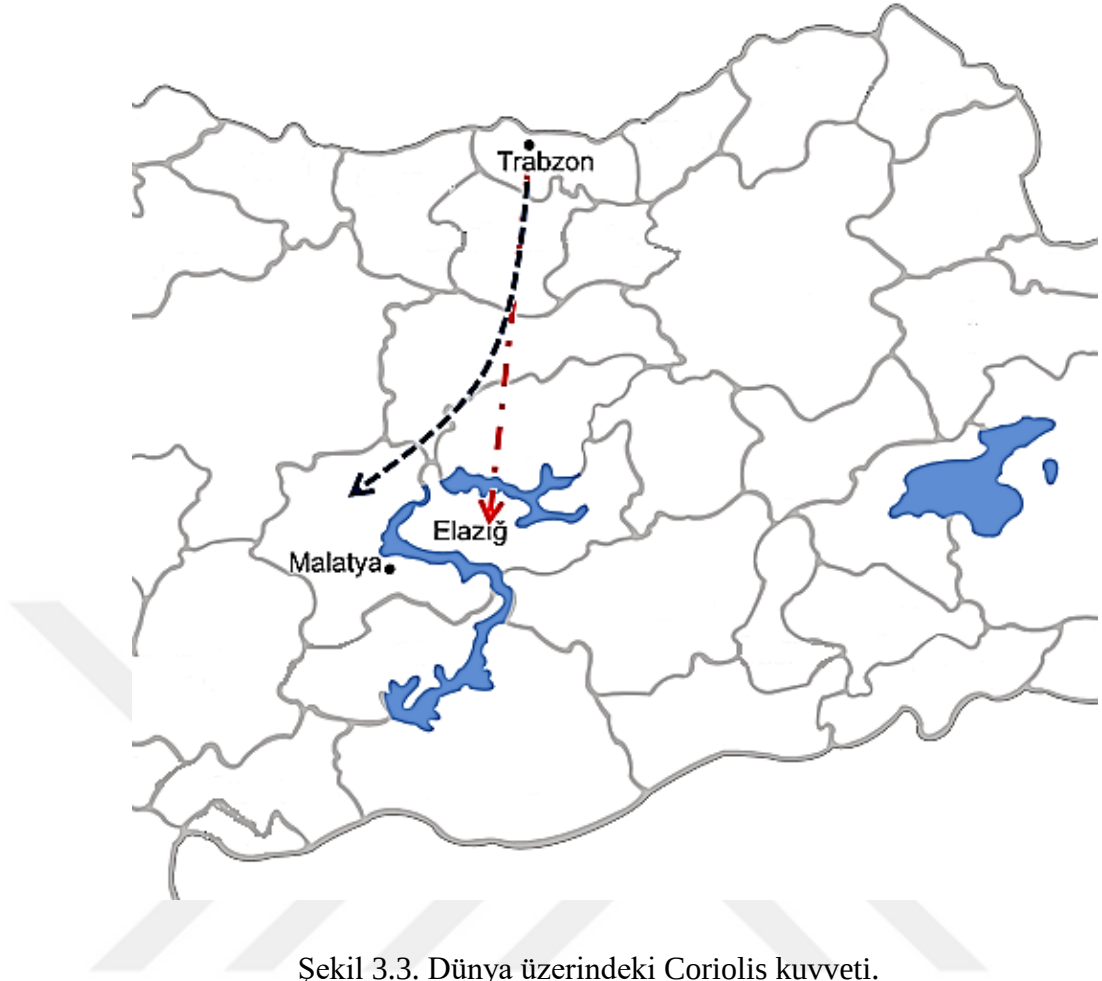
jiroskoplar birçok aviyonik araçta bulunmaktadır. Presesyon torku, manyetik kumpaslardaki dalgalanmaları azaltmak ve uçaklar için dönüş oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Gerçek ufuk çizgisine göre irtifayı göstermede kullanılan suni ufuk aleti, bir çubuk üzerine monte edilen ve herhangi bir eksen etrafında rahatça dönebilen jiroskoptan oluşmaktadır. Bu sayede jiroskop atalet referans sisteminde sabit kalmaktadır. Şekil 3.2’de suni ufuk aleti verilmiştir.



Şekil 3.2. Suni ufuk aleti [81].

Dönen bir platformda merkezden geçmek şartıyla karşı tarafa ulaşmaya çalışan biri, ulaşmak istediği tarafa doğru dik açıyla kendisine etki eden kuvveti hisseder. Bu dik kuvvete Coriolis kuvveti denilmektedir. Aynı etkiyi dünya üzerinde görmek de mümkündür. Trabzon’dan havalanarak Elazığ şehrine rotasını manuel ve direk olarak yönelten bir uçak pilotu, dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesinden dolayı bir müddet sonra Malatya’ya doğru gidiyor olacaktır (Şekil 3.3).

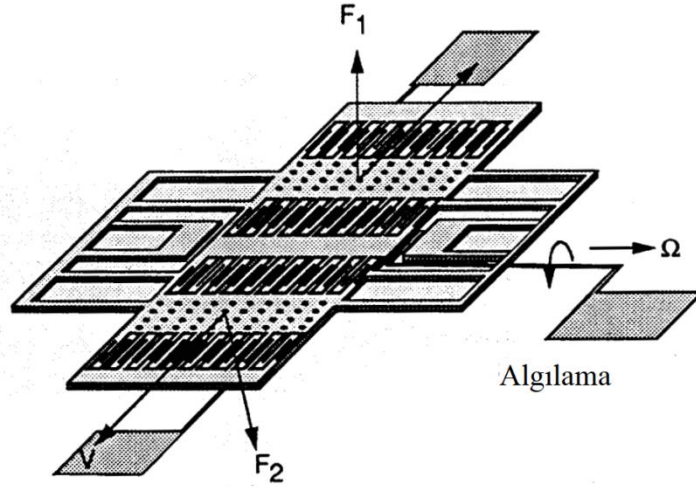
Bütün MEMS jiroskoplar Coriolis kuvvetinden [82] faydalananarak üretilmiştir. Bir MEMS jiroskop, sabit eksenlerin kendi etrafındaki dönme oranını ölçmektedir. Jiroskoplar düşük maliyetli olduklarından birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Üç boyutlu ortamda hareket eden bir nesneye ait üç eksenindeki roll, pitch ve yaw açıları jiroskop tarafından ölçülmektedir.



Şekil 3.3. Dünya üzerindeki Coriolis kuvveti.

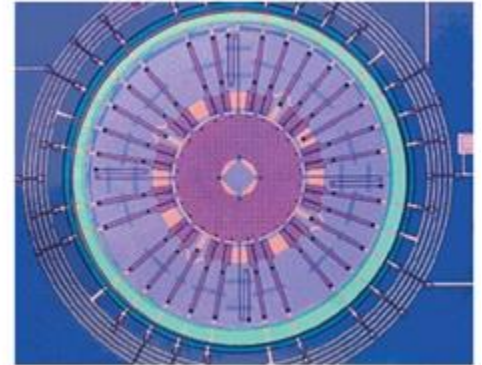
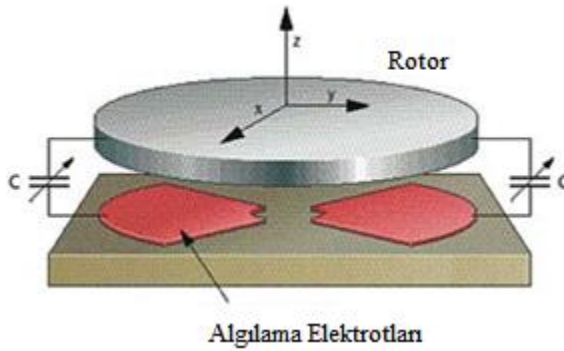
Literatürde farklı tiplerde MEMS jiroskoplarına rastlanmaktadır. Bu jiroskoplar çalışma şekli olarak çoğunlukla ayar çatallı (tuning-fork) jiroskop [83], titreşen tekerlekli (oscillating wheels) jiroskop [84], yarı-küresel rezonatörlü jiroskop (HRG, hemispherical resonator gyro) [85] veya Foucault sarkaçları [86] sınıfına girmektedir.

Ayar çatallı jiroskoplar [83] eşit genlikli fakat zıt yönlerde titreşime yönlendirilen bir kütleden oluşmaktadır. Jiroskop döndüğünde, Coriolis kuvveti tarafından ortogonal bir titreşim meydana gelmektedir. Dönme sonucunda kütleler düzlem dışına doğru titreşir ve bu hareket özel bir CMOS ASIC ile kapasitif olarak algılanarak elektriksel büyüklüklere dönüştürülür. Şekil 3.4.'de Draper Lab. tarafından üretilen ayar çatallı jiroskoba ait şema görülmektedir.



Şekil 3.4. Ayar çatallı jiroskop şeması [87].

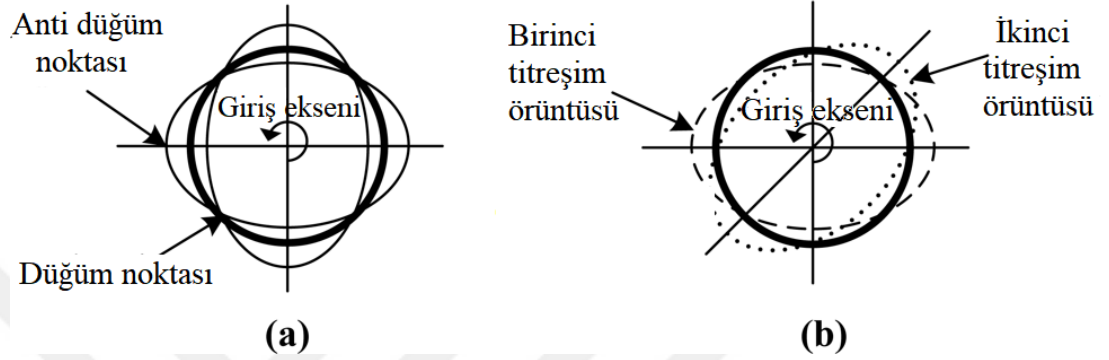
Titreşen tekerlek jiroskoplarda [84], üzerinde elektrotlar bulunan simetrik bir alt tabaka bulunmaktadır. Dönme sırasında tekerlek simetri ekseninde titreştiğinde tekerlek altındaki kapasitif elektrotlarla açısal değişim hesaplanmaktadır. Tek bir titreşim tekerleği ile iki eksendeki anlık açısal değişimi algılamak mümkündür. Şekil 3.5’de Bosch firması tarafından üretilen, X ve Y eksenlerinde çalışan örnek jiroskop görülmektedir.



Şekil 3.5. Bosch tarafından üretilen titreşen tekerlekli jiroskop [84].

Yarı-küresel rezonatörlü jiroskoplarda [85] hareketli parça yoktur. Doğruluk değerinin yüksek olması (<0.01 derece/saat) ve aşınmayan parçalardan oluşması uzay araçları ve hava araçları navigasyonu, uydu stabilizasyonu ve gezegen araştırma alanlarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır [88]. Şekil 3.6.(a)’da verilen dört düğümlü ve antinodlara sahip durağan bir dalga, elektrotların sürülmesi sonucu rezonatör üzerinde tutulmaktadır. Rezonatör döndürüldüğünde, ince silisyumdan

oluşan üst tabaka alttaki elektrotlara titreşim göndererek enerjinin titreşim modunun birincilden ikincile doğru değişmesine neden olmaktadır. Bu durumda antinodlar Şekil 3.6.(b)'de gösterildiği gibi orijinal desen düğümleri ile çakışmaktadır. Çakışan bu düğümlerin, birincil ve ikincil titreşim dalgası arasındaki değişim, harekete bağlı anlık açısal değişimi vermektedir. Şekil 3.7'de 58mm çapa sahip Block 30 tipi yarı-küresel rezonatörlü jiroskop verilmiştir.



Şekil 3.6. Yarı-küresel rezonatörlü jiroskop (a) Durağan haldeki antinode noktası ve düğüm noktası; (b)Başlangıçta durağan olan birincil titreşim dalgası ve hareket sonucu oluşan ikincil titreşim dalgası [85].



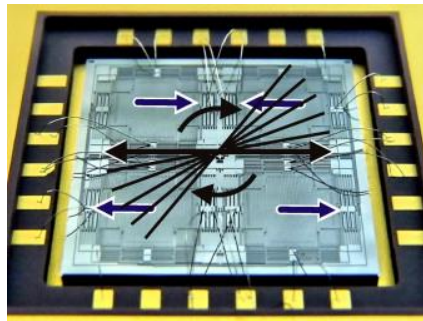
Şekil 3.7. Block 30 tipi 58mm HRG [85].

Foucault sarkacı Fransız fizikçi Léon Foucault tarafından Dünya'nın dönüşünü deneysel olarak göstermek için tasarlanmıştır [86]. Halka açık ilk sergi Şubat 1851'de Panthéon-Paris'deki gözlemesinde gerçekleşmiştir, Şekil 3.8.



Şekil 3.8. Foucault Sarkacı (Panthéon, Paris) [89].

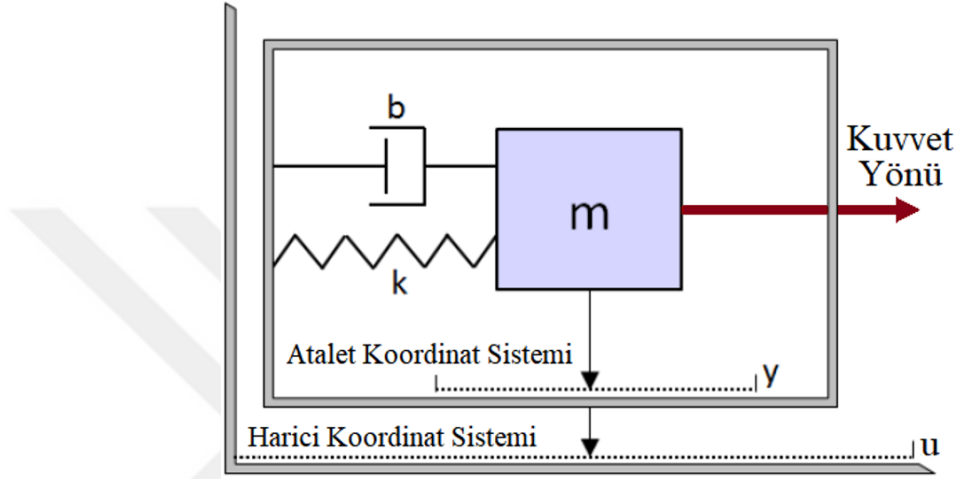
Tavana bağlı bir sarkaca ilk hareket verildikten sonra sarkacın salınım yörüngesinin değişmediği bilinmektedir. Fakat uzun süre bu durumu gözlemleyen gözlemciler sarkacın yörüngesinin saat başına yaklaşık 11.3° değiştiğini gözlemlemişlerdir. Gerçekte ise bu değişim sarkacın salınım değişiminden değil, Dünya'nın dönmesi sonucu oluşmaktadır. Sonuç olarak meydana gelen Coriolis kuvveti ve sarkacın salınım değişikliği prensibinden yararlanılarak dörtlü (Quadruple Mass Gyroscope) Foucault Pendulum MEMS jiroskoplar üretilmiştir (Şekil 3.9). Bu jiroskoplarda kullanılan ve dönme sonucu birbirine kuvvet uygulayan sarkaç modeli açısal hızı ve açığı ölçebilen dört adet titreşimli jiroskop dinamiği ile çalışmaktadır.



Şekil 3.9. 100µm kalınlığında SOI Foucault jiroskop (QMG) [90].

3.2. İvmeölçer

Bir ivmeölçer, bir nesnenin serbest düşmeye göre özgül kuvvetini yerçekimi kuvvetinin birimleri cinsinden ölçmek için kullanılan bir sensördür. Bu kuvvet Newton'un hareket yasası $F = ma$ tarafından sağlanan ivme oranına orantılı olarak ölçülmektedir. İvme ile orantılı bir kuvveti ölçmek için kullanılan yay-kütle-damper modeli referans alınarak aşağıda gösterilen sistem analiz edilmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. İvmeölçer için yay-kütle-damper diyagramı [91].

Sistemin çalışması için, hareketli bir kütle ile sabit bir çerçeve arasındaki göreceli konumu ölçmek gerekmektedir. Koordinat sistemine göre x yer değiştirme değeri ($x = y - u$)'ya eşit olarak tanımlanmaktadır.

$$k(y - u) + b(\dot{y} - \dot{u}) + m\ddot{x} = -m\ddot{u} \quad (3,5)$$

$$\ddot{x} + \frac{b}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = -\ddot{u} = -a(t) \quad (3,6)$$

Pozitif x yönündeki bir kuvvet sönümleyici, negatif x yönünde bir kuvvet üretmekte ve anlık değişim oranı $b\dot{x}$ olarak tanımlanmaktadır. Burada x hızı temsil etmektedir. İkinci bir kuvvet ise yay tarafından negatif x yönünde üretilen, yay sabiti ile yer değişiminin çarpımına eşit olan kx kuvvetidir. Yay sabiti ve yerdeğişimi açısından ivme ifade edilmek istendiğinde sistemin frekans tepkisi analiz edilerek denklemin daha da basitleştirilmesi gerekmektedir [92]. Frekans tepkisini bulmak için $x(t)$ ve $a(t)$ 'nin Laplace dönüşümü alınarak $\frac{Lx(s)}{La(s)}$ değeri hesaplanmaktadır.

$$s^2X(s) - sx(0) - \dot{x}(0) + \frac{b}{m}sX(s) - x(0) + \frac{k}{m}X(s) = -A(s) \quad (3,7)$$

Başlangıç değerleri sıfıra eşitlenerek ($\dot{x}(0) = 0$ ve $x(0) = 0$) Denklem (3,8) elde edilmektedir.

$$s^2X(s) + \frac{b}{m}sX(s) + \frac{k}{m}X(s) = -A(s) \quad (3,8)$$

$$H(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = -\frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (3,9)$$

Sistem frekans cevabı ω_n ile tanımlanır ve $\omega_0 \ll \omega_n$ olacak şekilde sistem sınırlanırsa, sistem genliği frekanstan bağımsız olacaktır. Sistem basitleştirildiğinde:

$$H(0) \approx H(s) = -\frac{1}{0 + 0 + \frac{k}{m}} = -\frac{m}{k} \quad (3,10)$$

İvme, kütle, yay sabiti ve yer değiştirmenin fonksiyonu olarak hesaplanırsa:

$$a(t) = -\frac{m}{k}x(t) \quad (3,11)$$

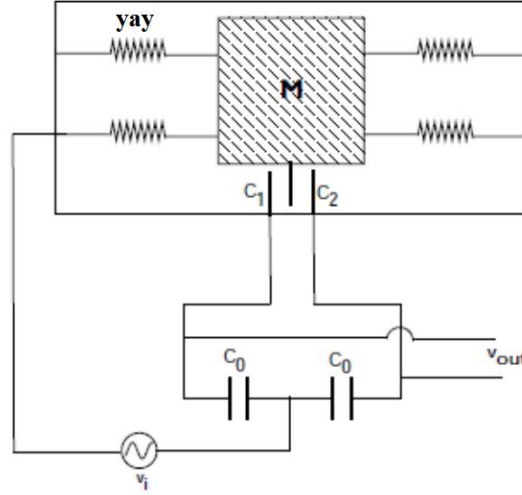
Çoğu MEMS ivmeölçerinde imalatı daha basit olduğu için kapasitif algılama yaklaşımı kullanılmaktadır. Hızlanma sırasında kondansatör plakasının geometrisi değişmektedir. A elektrot alanı, x iki plaka arasındaki mesafe ve ϵ_r dielektrik sabiti olmak üzere paralel plaka kondansatörü için Denklem (3.8) verilmiştir. Şekil 3.11’de verilen basit ivmeölçer şemasına göre, kütle ivme kazandığında paralel plaka arasındaki kütle voltaj çıkışında değişime neden olacak ve böylece hareket değeri elektriksel olarak çıkışta ölçülmüş olacaktır.

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{x} = \epsilon_r \frac{A}{x} \quad (3,12)$$

$\delta = \frac{x}{x_0}$ olmak üzere, Şekil 3.11’de verilen paralel plakalara ait C_1 ve C_2 kondansatörleri hesaplanırsa:

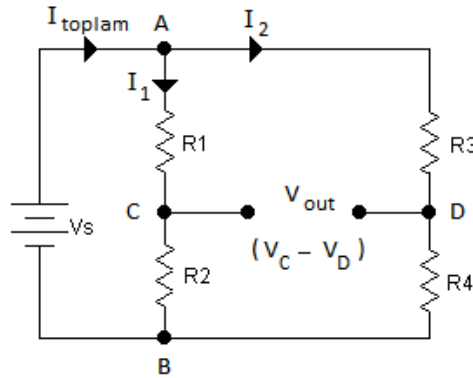
$$C_1 = \epsilon_r \frac{A}{x_0 + x} = \epsilon_r \frac{A}{x_0(1 + \frac{x}{x_0})} = \frac{C_0}{1 + \delta} \quad (3,13)$$

$$C_2 = \epsilon_r \frac{A}{x_0 - x} = \epsilon_r \frac{A}{x_0(1 - \frac{x}{x_0})} = \frac{C_0}{1 - \delta} \quad (3,14)$$



Şekil 3.11. Paralel plaka kondansatörlü ivmeölçer [91].

Paralel plaka ile çalışan ivmeölçerdeki kondansatörler yerine direnç konulduğunda Wheatstone köprüsü ortaya çıkmaktadır. Wheatstone köprüsünde C_1 yerine R_1 , C_2 yerine R_3 ve C_0 yerine $R_2 - R_4$ dirençleri getirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Wheatstone köprüsü.

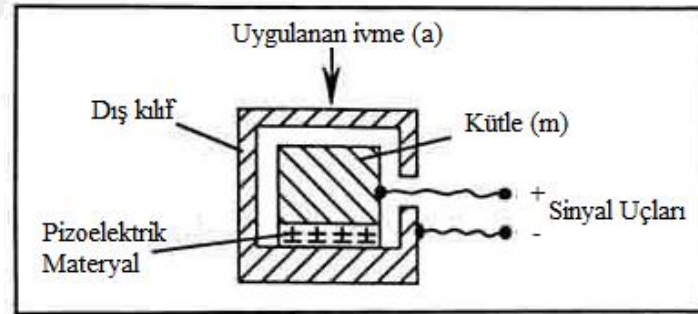
Eğer $\delta \ll 1$ sınır şartı konulursa giriş-çıkış denklemi ve voltajın bir fonksiyonu olarak ivme değeri Denklem (3,15-3,17) ile hesaplanmaktadır. Bu denklemler, voltajın bir fonksiyonu olarak verilen yer değiştirmeye eşit zamanın bir fonksiyonu olarak ivmeyi vermektedir.

$$V_{out} = \frac{1}{2} \delta V_{in} \quad (3,15)$$

$$a(t) = -\frac{m}{k} x_0 \delta \quad (3,16)$$

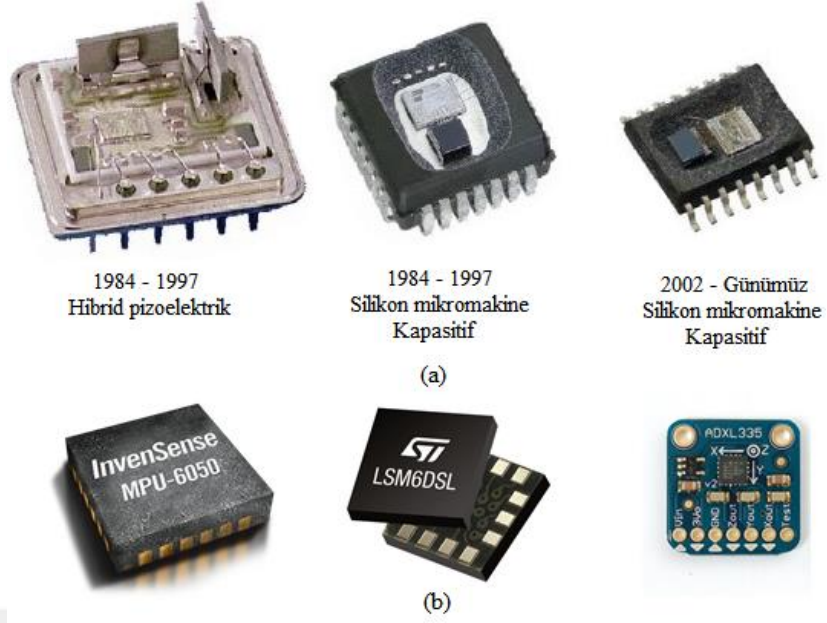
$$a(t) = -\frac{m}{k} x_0 \left(2 \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = -2x_0 \frac{m}{k} A \quad (3,17)$$

Ölçülen ivme değeri, hem durağan bir sensöre etki eden yerçekimi kuvveti gibi statik bir kuvvet, hem de sensörün hareket ettirilmesi veya bazı durumlarda titreşime maruz kalması sonucu oluşabilen dinamik bir kuvvet olabilir. Bu kuvvetleri ölçmek için geliştirilen ilk ivmeölçer 1979 yılında Stanford Üniversitesi tarafından tasarlanmıştır. İlk prototipin makul fiyat ve yeterli küçüklüğe, kabul edilebilir ölçme hata payı ile kullanılabilir hale gelmesi 15 yıllık bir zamana yayılmıştır [93]. İlk prototip (Şekil 3.13) pizo-elektrik materyale dayanan, hareketin büyüklüğüne göre sismik kütle ile muhafaza kılıfı arasındaki sinyal değişiminden ivmeyi ölçmek üzere tasarlanmıştır.



Şekil 3.13. Piezoelektrik ivmeölçer [94].

Bu ilk prototip büyük boyutlu ve kullanışsız olduğundan zamanla gelişen yarı iletken teknolojisi sonucu yerini MEMS ivmeölçerlere bırakmıştır. 90'lı yıllara gelindiğinde MEMS ivmeölçerlerin otomotiv sektöründe kullanılması ile otomobil hava yastığı ve emniyet kemeri kontrol sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır [95]. Şekil 3.14'de Bosch tarafından üretilen ve hava yastıklarında kullanılan üç nesil ivmeölçer ve günümüze ait bir ivmeölçer sensörü gösterilmektedir. Otomotiv sektörüne ek olarak günümüzde adım sayar, deprem tespit cihazları, oyun konsolları, hard disk çarpma koruma sistemleri, kamera stabilizasyonu gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [96].



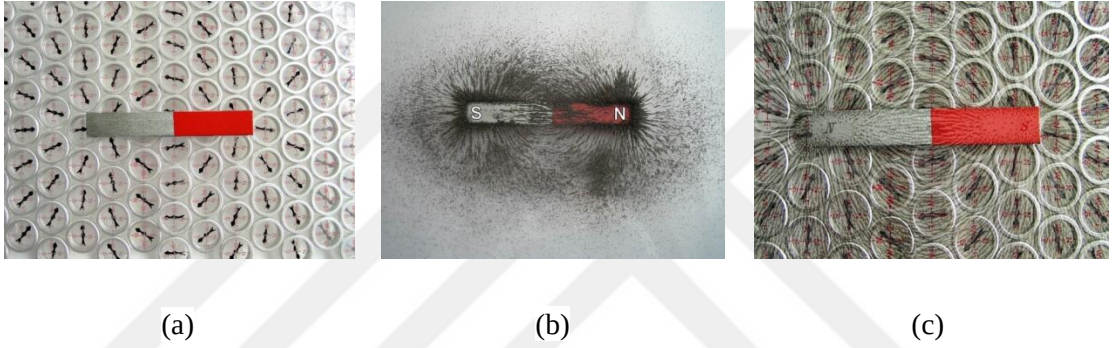
Şekil 3.14. Farklı ivmeölçerler; a) Bosch tarafından üretilen üç nesil ivmeölçer [97];
b) TDK, ST ve Analog Devices firmalarına ait MEMS ivmeölçerler [98].

3.3. Manyetik Alan Sensörü

Manyetik alan sensörleri navigasyon ve pusula sistemlerinde [99] tek başına veya ivmeölçer ile birlikte kullanılan ve giderek artan bir talebe sahiptir. Ticari olarak piyasada bulunan birçok manyetik alan sensörü izotrop olmayan manyetik direnç (anisotropic magneto-resistance, AMR) veya Hall etkisine göre çalışmaktadır. AMR sensörler Hall etkisi sensörlerine göre daha yüksek hassasiyete, daha geç ısındığından daha iyi ısı kararlılığına sahiptir [100]. Hall etkisi sensörleri ise daha geniş bant genişliğine ve AMR performansını sınırlayan histerezise karşı bağışıklığa sahiptir. Her iki durumda da oluşan sınırlılıkları kaldırmak için araştırmacılar Lorentz kuvveti ile çalışan MEMS manyetik alan sensörleri geliştirmişlerdir.

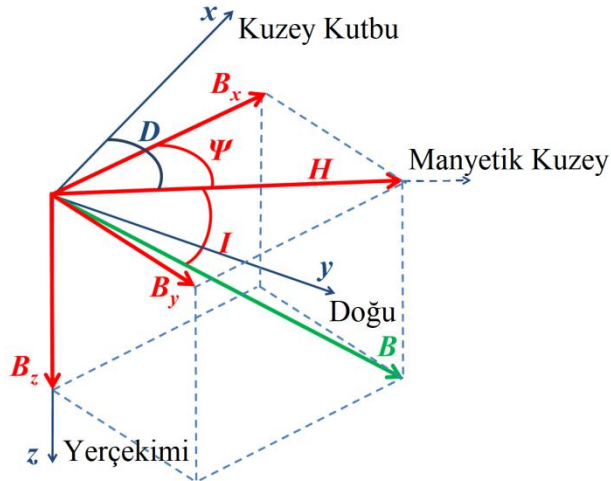
Lorentz kuvveti akım ve manyetik alanın etkileşimi sonucu meydana gelmektedir. MEMS sensörlerde kullanılan bu kuvvet titreşimlerin bükülme [101], [102, p.] ve burulma [103] modlarını açığa çıkarmak için kullanılmaktadır. Sensörün mekanik olarak hareketi elektronik veya optik olarak algılanmaktadır. Maksimum çıkış sinyalini elde etmek için mekanik yapı genellikle rezonansa yönlendirilmektedir. Piezoresistif ve elektrostatik iletme yöntemleri elektronik algılamada kullanılmaktadır.

Bir mıknatısın altında çok sayıda pusula yerleştirdiğimizi düşünelim. Bu pusulalar mıknatısın bir kutbundan diğerine olan manyetik alan çizgilerinin yönünde hareket ederek sabitlenecektir (Şekil 3.15.a). Cam bir yüzeye demir tozu serpildikten sonra bu camın alt yüzeyine mıknatıs sabitlendiğinde, demir tozunun manyetik alan çizgileri boyunca hareket ettiği gözlemlenmektedir (Şekil 3.15.b). Her iki şekil üst üste bindirildiğinde hem demir tozunun hem de pusulaların manyetik alan çizgileri yönündeki hareketi açıkça görülmektedir (Şekil 3.15.c). Manyetik alanı bozmayacak gürültüsüz bir ortamda en büyük manyetik alan çizgileri Dünya'ya ait olduğundan MEMS manyetik alan sensörleri Lorentz kuvvetini kullanarak elektriksel olarak her zaman kuzey kutbunu sıfır/başlangıç noktası olarak göstermektedir.



Şekil 3.15. Elektromanyetik alan çizgilerinin gösterimi [104].

Dünya'nın kuzey-güney yönünde bir adet dikey olarak tanımlı ve ekvatorial yönde yatay olarak tanımlı toplamda iki adet manyetik eksenli vardır, Şekil 3.16. Manyetik alan sensörü Kuzey yönünü ve ekvatorial çizgiyi referans olarak alacak şekilde Dünya'nın manyetik alanını gösteren bir pusula gibi çalışmaktadır.



Şekil 3.16. Dünya'nın manyetik alan eksenleri [105].

4. ATALET SEYİR ve KOORDİNAT SİSTEMİ

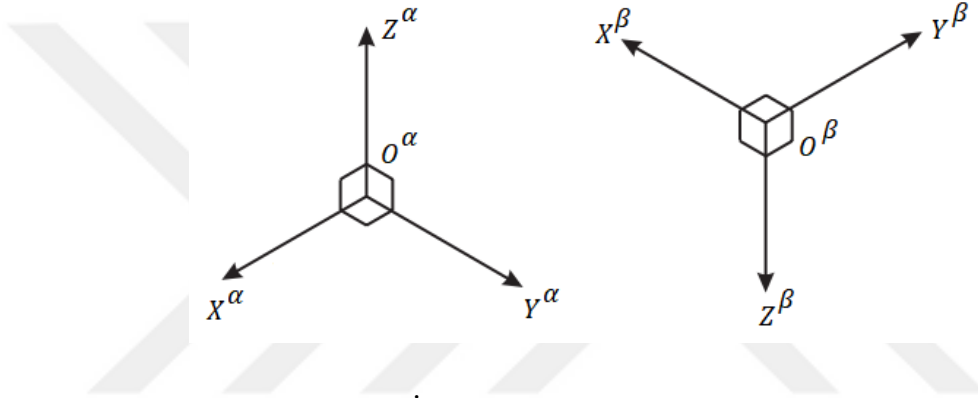
Bu çalışmada önerilen kaçak tespit robotunda, mevcut konum tahmini problemine bir çözüm yolu olarak Atalet Seyir Sisteminin (Inertial Navigation System - INS) kullanılması önerilmiştir. INS, temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır: a) hareket sonucu oluşan ivme, açısal değişim gibi büyüklükleri veriye dönüştüren sensörler; b) bu sensörlerden alınan veriyi işleyip konum tahminini yapacak bir işlemci/yazılım sistemi. Konum, hız ve yönelim zaman değişkenli fonksiyonlardır. Hareketini tamamlamış veya hareket etmekte olan bir cismin herhangi bir zamanda tam olarak nerde bulunduğu ve ne tarafa yöneldiği bu üç fonksiyonla belirlenmektedir. INS, navigasyon tahmininde gerekli olan manyetik kuvvet, ivme ve açısal hız verilerini Atalet Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit – IMU) adı verilen mikro elektronik sensör paketi ile toplamaktadır [106]. Standart bir IMU, manyetik alan sensörü (magnetometer), ivmeölçer (accelerometer) ve jiroskop sensörlerinden (gyroscope) oluşmaktadır. Bu bölümde navigasyon koordinat sistemleri, açısal yönelim hesaplamaları ve koordinat sistemlerinin birbirine dönüşümünün nasıl gerçekleştiği formülleri ile birlikte verilmiştir.

4.1. Atalet Koordinat Sistemleri

Bir kişinin kara aracıyla aralarında 100km mesafe bulunan A şehrinden B şehrine seyahat ettiği varsayalım. Sürücü, A şehrinde arabayı hareket ettirmeden hemen önce kilometre sayacını sıfırlamışsa, B şehrine vardığında sayaç katedilen mesafeyi 100km olarak göstermelidir. Karasal mekanik sistemlerde bu prensip doğru olarak çalışmaktadır. Araç üzerinde hareket ettiği kara dolayısıyla yerküre ile temas halinde olduğundan Dünya'nın dönüşü hesaba katılmamaktadır. Fakat aynı aracın sahibi GPS cihazına baktığında aldığı mesafenin farklı olduğunu görmektedir. Navigasyon Dünya'nın dönüşünü de dikkate alarak konum hesabını yapmaktadır. Atalet sensörleri de hareketlerini atalet koordinat sistemine göre ölçmektedirler. Bu yönleriyle atalet sensörleri, basit mekanik sistemlerden ayrılmaktadır [107].

Navigasyon sisteminin doğru çalışması için farklı koordinat sistemleri oluşturulması ve bu sistemler arasında dönüşüm yapılması gerekmektedir. Ortogonal üç boyutlu bir koordinat sisteminde birbirine dik X, Y, Z eksenleri ve bu eksenlerin kesiştiği merkez olan O noktası bulunmaktadır. Her bir eksenin dönüştürülmek

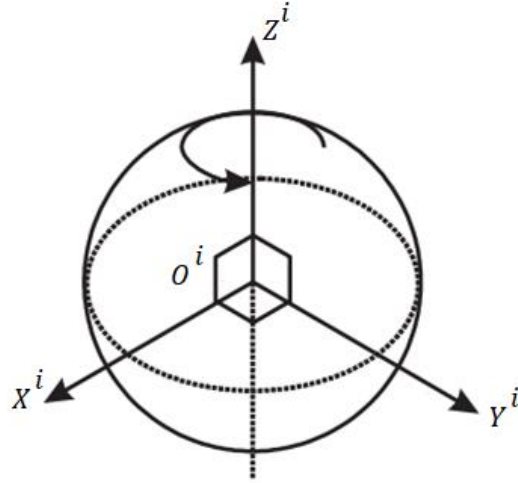
istenen koordinat sistemine göre tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle hareket halindeki herhangi bir nesneye ait navigasyon problemi çözülürken, referans ve nesne olmak üzere en az iki koordinat sistemi gerekmektedir. Nesne koordinat sistemi, konumu değişen sensörü veya sensörün takılı olduğu gövdeyi tanımlarken, referans koordinat sistemi bu nesnenin hareket değişikliğinin görelisi olarak baz alınacağı bir diğer nesneyi, genellikle Dünya'yı, tanımlamaktadır. Şekil 4.1'de birbirinden farklı iki dik koordinat sistemi verilmektedir. Soldaki sistemde $+X$, $+Y$, $+Z$ eksenleri, sağdaki sistemde $-Y$, $-X$, $-Z$ olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.1. İki farklı ortogonal koordinat sistemi.

4.1.1. Dünya merkezli atalet koordinat sistemi (i)

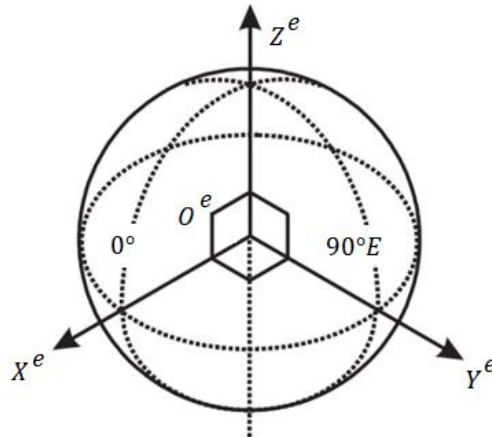
Dünya merkezli atalet koordinat sistemi boşlukta hareketsiz olmayı veya sabit bir hızda hareket etmeyi temel almaktadır. Bu koordinat sistemi i harfi ile temsil edilmektedir. Bütün atalet sensörleri ölçümleri merkezi Dünya olan bu sisteme göre yapılmakta ve sensor koordinat sisteminde değerlere dönüşmektedir. Şekil 4.2'de Z eksenini Dünya merkezinden kuzey kutbuna doğru ilerleyen dönme eksenini temsil etmektedir. X ve Y eksenleri ise ekvator çizgisi hizasında yer almaktadır. Her üç eksen de atalet halinde olduğundan Dünya ile birlikte dönmemektedir [108].



Şekil 4.2. Dünya merkezli atalet koordinat sistemi (i -koordinat sistemi)

4.1.2. Dünya-merkezli dünya-sabit koordinat sistemi (e)

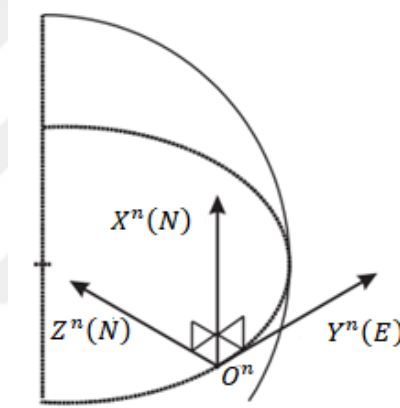
Bu koordinat sistemi kısaltılarak Dünya koordinat sistemi olarak da kullanılmaktadır. Bu koordinat sistemi e harfi ile temsil edilmektedir. Dünya merkezli atalet sistemi ile arasındaki tek fark, e koordinat sisteminin i koordinat sistemine göre Dünya'nın kendi eksenini etrafındaki dönüş hızında Z eksenini etrafında hareket etmesidir. Eksenlerin Dünya ile birlikte hareket etmesi, Dünya'ya göre bu eksenlerin sabit olmasıdır. X eksenini, Dünya merkezini baz alarak 0° boylam ile ekvatorun kesiştiği noktadan geçmektedir. Y eksenini ise 90° doğu boylamı ile ekvatorun kesiştiği noktadan geçmektedir, Şekil 4.3. Dünya'ya göre hareketimizi hesaplayabilmek için Dünya koordinat sistemi bütün navigasyon sistemlerinin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 4.3. Dünya-merkezli dünya-sabit koordinat sistemi.

4.1.3. Navigasyon/global koordinat sistemi (n veya g)

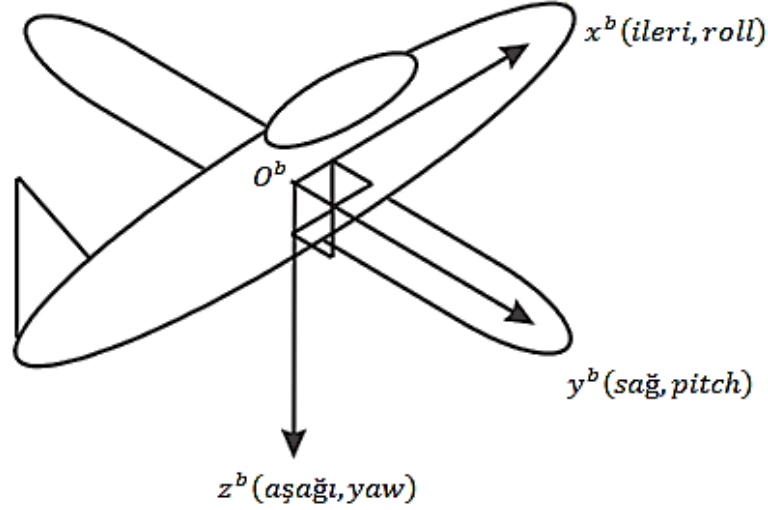
Bu koordinat sistemi yerel navigasyon, yerel seviye navigasyon, global veya jeodezik koordinat sistemi olarak da tanımlanmakta, n veya g harfi ile temsil edilmektedir. Sistemin merkezi, atalet sensörünün üzerinde bulunduğu navigasyon sisteminin konumudur. Şekil 4.4’de verilen koordinat sisteminin X eksenini kuzeyi, Y eksenini doğuyu göstermektedir. Z eksenini ise yerçekimi vektörüyle çakışiktır ve Dünya’nın merkezine doğrudur. Bazı kaynaklarda eksen yapısı bozulmadan, X güney, Y batı, Z aşağı veya X doğu, Y kuzey, Z yukarı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada ise X kuzeyi, Y batıyı Z eksenini ise yukarı yönünü göstermektedir. Navigasyon koordinat sistemi, hareket halindeki nesnenin kuzey, doğu ve aşağı yönlerine göre yönelimini hesaplamada kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. Navigasyon/global koordinat sistemi.

4.1.4. Gövde/nesne/sensör koordinat sistemi (b veya s)

Gövde koordinat sistemi, navigasyon çözümü aranan nesnenin merkezi ve yönünü içermektedir. Başka bir ifadeyle, gezinmekte olan nesneyi tanımlamaktadır. Bu koordinat sistemine sensör koordinat sistemi de denilmektedir. b veya s harfi ile temsil edilmektedir. Şekil 4.5’de gösterilen koordinat sisteminde doğrusal hareket için X eksenini ileri, Y eksenini sağ, Z eksenini aşağı yönü temsil etmektedir. Açısal hareket için ise X eksenini roll eksenini, Y eksenini pitch eksenini, Z eksenini ise yaw eksenini olarak tanımlanmaktadır. Navigasyon koordinat sisteminden ayrıldığı nokta, eksenlerin gövde ile birlikte hareket etmesidir.



Şekil 4.5. Gövde veya sensör koordinat sistemi.

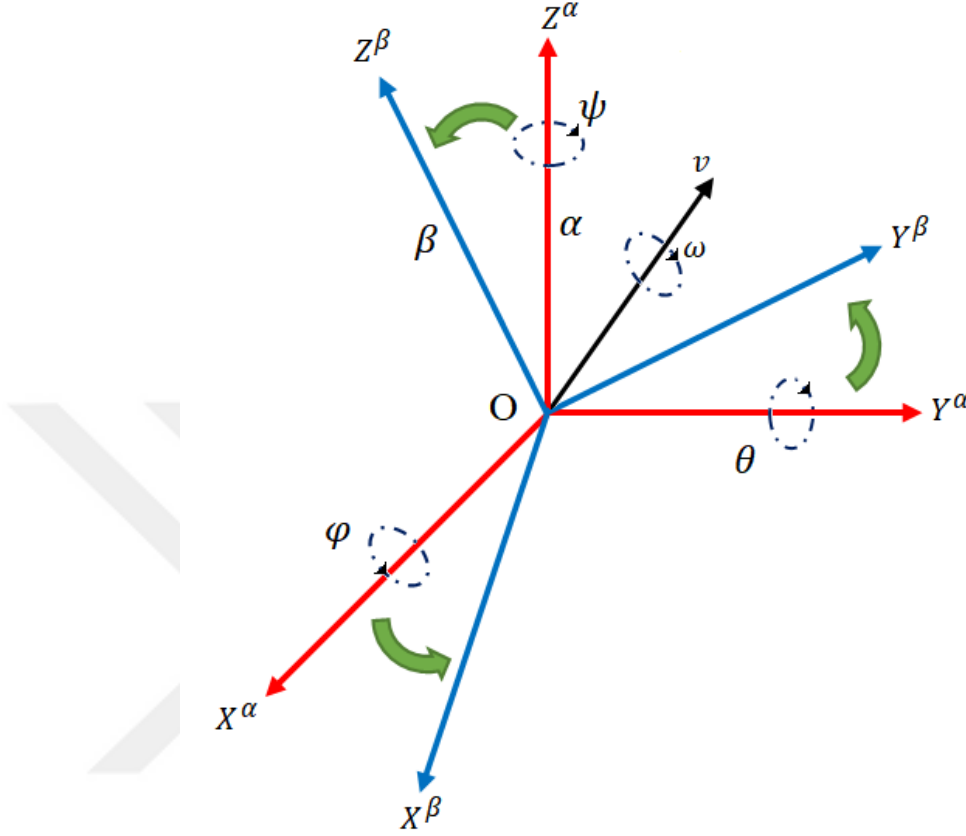
4.2. Koordinat Sistemleri Arasında Dönüşüm

Açısal yönelim, hareket eden bir nesnenin koordinat sistemi eksenlerinin kendi etrafında dönmesi sonucu meydana gelmektedir. Hareket sonucu oluşan yeni konumu hesaplamak için yaygın olarak koordinat dönüşüm matrisi (Direction Cosine Matrix – DCM), Euler Açılar ve kuaterniyon gösterimleri kullanılmaktadır [109]. Navigasyon sistemlerinde bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre doğrusal ve açısal hareketi tanımlanmalıdır. Pozisyon, hız, ime ve açısal değişim gibi birçok büyüklük temel olarak üç koordinat sistemini içermektedir [110]:

- Nesnenin görelî hareket ettiği *referans (global) koordinat sistemi*, α ,
- Hareketi tanımlanan nesneye ait *nesne (sensör) koordinat sistemi*, β ,
- Bütün hareketin temsil edildiği eksenlerden oluşan *çözümleyici koordinat sistemi* γ .

Referans koordinat sistemi α ve nesne koordinat sistemi β birbirinden farklı olmak zorundadır, aksi durumda hareket asla olmaz. Çözümleyici koordinat sistemi ise nesne veya referans koordinat sistemi olabileceği gibi bu iki sistemden farklı üçüncü bir koordinat sistemi olabilir. β nesne koordinat sisteminden α referans koordinat sistemine dönüşüm işlemi, DCM için ${}^{\alpha}R_{\beta}$ [109] ve kuaterniyon için ${}^{\alpha}\hat{q}_{\beta}$ [111] ile temsil edilmektedir. α referans koordinat sistemine çakıştırılmış β nesne koordinat sistemindeki birim v vektörü ω açısı kadar kendi etrafında

döndürüldüğünde referans sisteme göre Euler değişim açıları elde edilir. Bu açılar X, Y, Z eksenlerindeki değişimi φ, θ, ψ sembolleri ile simgelenen roll, pitch ve yaw açılarıdır, Şekil 4.6.



Şekil 4.6. Global (kırmızı) ve sensör (mavi) koordinat sistemleri.

4.2.1. Koordinat dönüşüm matrisi (Direction cosine matrix – DCM)

Yönelim bilgisi, sensör koordinat sisteminin global koordinat sistemine göre değişim bilgisini içermektedir. Şekil 4.6’da daha önce gösterildiği gibi sensör ve global koordinat sistemlerinin merkezleri çakışıktır. Sensör koordinat sisteminde $X^\beta, Y^\beta, Z^\beta$ eksenleriyle eş yönlü i, j ve k birim vektörleri ve global koordinat sisteminde $X^\alpha, Y^\alpha, Z^\alpha$ eksenleriyle eş yönlü I, J ve K birim vektörleri tanımlanmış olsun. Bu durumda birim vektörler global ve sensör koordinatları olarak Denklem (4,1) ve Denklem (4,2)’deki gibi tanımlanmaktadır [112].

$$I^\alpha = [1 \ 0 \ 0]^T, J^\alpha = [0 \ 1 \ 0]^T, K^\alpha = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (4,1)$$

$$i^\beta = [1 \ 0 \ 0]^T, j^\beta = [0 \ 1 \ 0]^T, k^\beta = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (4,2)$$

i, j ve k vektörleri global koordinat sisteminde tanımlanmak istenirse:

$$i^\alpha = [i_{X^\beta}^\alpha \quad i_{Y^\beta}^\alpha \quad i_{Z^\beta}^\alpha]^T, j^\alpha = [j_{X^\beta}^\alpha \quad j_{Y^\beta}^\alpha \quad j_{Z^\beta}^\alpha]^T, \\ k^\alpha = [k_{X^\beta}^\alpha \quad k_{Y^\beta}^\alpha \quad k_{Z^\beta}^\alpha]^T \quad (4,3)$$

$i_{X^\beta}^\alpha$ koordinatı, i vektörünün global X^α eksenine projeksiyon uzunluğu olarak tanımlanmaktadır. Böylece X^α , Y^α ve Z^α eksenleri için, $\cos(I, i)$ I ve i vektörleri arasında kalan açının kosinüsü, $|i|$ birim vektörün normu olmak üzere Denklem (4,4) elde edilmektedir.

$$i_{X^\beta}^\alpha = |i| \cos(X^\alpha, i) = \cos(I, i), \quad i_{Y^\beta}^\alpha = |i| \cos(Y^\alpha, i) = \cos(I, i), \\ i_{Z^\beta}^\alpha = |i| \cos(Z^\alpha, i) = \cos(I, i) \quad (4,4)$$

$|i| = |I| = 1$ olduğundan, $I \cdot i$ nokta çarpım olmak üzere,

$$i_{X^\beta}^\alpha = \cos(I, i) = |I||i| \cos(I, i) = I \cdot i, \\ i_{Y^\beta}^\alpha = J \cdot i, \quad i_{Z^\beta}^\alpha = K \cdot i, \quad (4,5)$$

Bütün bu değerler kullanılarak,

$$[i^\alpha \quad j^\alpha \quad k^\alpha] = \begin{bmatrix} I \cdot i & I \cdot j & I \cdot k \\ J \cdot i & J \cdot j & J \cdot k \\ K \cdot i & K \cdot j & K \cdot k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(I, i) & \cos(I, j) & \cos(I, k) \\ \cos(J, i) & \cos(J, j) & \cos(J, k) \\ \cos(K, i) & \cos(K, j) & \cos(K, k) \end{bmatrix} \quad (4,6)$$

sensör ve global vektörlerin bütün kombinasyonlarını içeren DCM elde edilmiş olur.

α koordinat sisteminden β koordinat sistemine hareket olduğu durumda, $\beta \rightarrow \alpha$ 'ya dönüşümü tanımlayan DCM, 3x3 boyutunda ${}^\alpha_\beta R$ matrisi ile temsil edilmektedir.

$${}^\alpha_\beta R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (4,7)$$

DCM'deki her bir R_{ij} elemanı, α koordinat sistemindeki i . eksen ve β koordinat sistemindeki j . eksen arasında kalan açının kosinüs değerini temsil etmektedir.

Sonuç olarak β koordinat sistemindeki bir v^β vektörünün α koordinat sistemindeki karşılığı olan v^α vektörü Denklem (4,8) ile tanımlanmaktadır.

$$v^\alpha = {}^\alpha_\beta R v^\beta \quad (4,8)$$

4.2.2. Euler Açıları

α koordinat sistemi sırasıyla $X - Y - Z$ eksenlerinde φ, θ, ψ açıları kadar döndürülerek β koordinat sistemi elde edilmiş olsun. β koordinat sisteminden α koordinat sistemine dönüşüm yapılmak istendiğinde $Z - Y - X$ eksenlerinde ψ, θ, φ açıları kadar ters yönde döndürme işlemi yapılmalıdır.

Euler Açıları → DCM: Her bir döndürme işleminde kullanılan Euler açılarının DCM türünden formülasyonu Denklem (4,9-11)'da verilmektedir.

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4,9)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4,10)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4,11)$$

α koordinat sisteminden β koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan DCM:

$${}^\beta_\alpha R = ({}^\alpha_\beta R)^T = R_3 R_2 R_1 \quad (4,12)$$

$$\begin{aligned} &= {}^\beta_\alpha R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & \sin\varphi\cos\theta \\ \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\sin\theta\cos\psi & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Hesaplanan bütün koordinat sistemleri ortogonal sistemler olduğundan, dönüşüm matrisinin tersi transpozuna eşit olmaktadır, Denklem (4,13).

$${}^{\alpha}_{\beta}R = \left({}^{\beta}_{\alpha}R\right)^{-1} \rightarrow {}^{\alpha}_{\beta}R = \left({}^{\beta}_{\alpha}R\right)^T \quad (4,13)$$

Denklem (4,13)'e göre β koordinat sisteminden α koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan koordinat dönüşüm matrisi, Denklem (4,12)'nin transpozudur. Euler Açıları kullanılarak oluşturulan koordinat dönüşüm matrisine ait formül Denklem (4,14)'de verilmektedir.

$${}^{\alpha}_{\beta}R = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4,14)$$

DCM→Euler Açıları: Denklem (4,14) ile tanımlanan koordinat dönüşüm matrisi kullanılarak her bir Euler açısı tekrar elde edilebilmektedir.

$$\phi = \arctan \frac{\sin\phi}{\cos\phi} = \arctan \frac{R_{32}}{R_{33}} \quad (4,15)$$

$$\theta = \arctan \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \arctan \frac{-R_{31}}{\sqrt{R_{32}^2 + R_{33}^2}} \quad (4,16)$$

$$\psi = \arctan \frac{\sin\psi}{\cos\psi} = \arctan \frac{R_{21}}{R_{11}} \quad (4,17)$$

Çok küçük açıların sinüs değerlerinin yaklaşık olarak kendilerine, kosinüs değerlerinin ise yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu bilinmektedir [109]. Bu durumda Denklem (4,14) antisimetrik forma dönüşmektedir.

$${}^{\alpha}_{\beta}R = \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (4,18)$$

Yukarıdaki ifade küçük açısal değişimlerin olması durumunda işlem karmaşıklığını giderdiğinden konum hassasiyeti gerektirmeyen uygulamalarda kullanılmaktadır.

4.2.3. Kuaterniyon

$\mathbb{R}^3$ uzayında Euler açısına bağlı döndürme vektörü tekillik (singularity) problemine sahip olduğundan [112], bu çalışmada hesapsal etkinliği artırmak ve tekillikten kaçınmak için Euler açıları yerine $\mathbb{R}^4$ uzayındaki kuaterniyon vektörü kullanılmıştır.

Kuaterniyon, bir skalar ve üç boyutlu bir vektörden oluşan, gövdenin veya koordinat sisteminin yönelimini temsil eden dört boyutlu karmaşık sayıdır. Şekil 4.6'da β koordinat sisteminden α koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan kuaterniyon, ${}^\alpha\hat{q}$ ile temsil edilmektedir. $\hat{\cdot}$ işareti birim uzunluklu normalize vektörü temsil etmektedir. Denklem (4,19)'da verilen v_x, v_y, v_z değerleri v vektörünün kendi eksenleri etrafında ω açısı kadar döndürülmesi sonrasında $X - Y - Z$ eksenlerindeki bileşenleridir. α referans koordinat sistemine ait başlangıç pozisyonundaki kuaterniyon $q = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ olarak tanımlanmaktadır.

$${}^\alpha\hat{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3] = \left[\cos \frac{\omega}{2} \quad -v_x \sin \frac{\omega}{2} \quad -v_y \sin \frac{\omega}{2} \quad -v_z \sin \frac{\omega}{2} \right] \quad (4,19)$$

Hatırlayalım ki, Euler açıları kullanılarak koordinat sistemleri arasında dönüşüm yapılmak istendiğinde koordinat dönüşüm matrisinin transpozunun alınması dönüşüm işlemini tersine çevirmektedir, Denklem (4,13). Kuaterniyon kullanılarak ters dönüşüm yapılmak istendiğinde ise $*$ ile simgelenen konjüge kuaterniyon kullanılmaktadır. ${}^\beta\hat{q}$, α koordinat sisteminden β koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan ${}^\alpha\hat{q}$ 'nın konjüge kuaterniyonu [110] olarak tanımlanmaktadır, Denklem (4,20).

$${}^\beta\hat{q}^* = {}^\beta\hat{q} = [q_0 \ -q_1 \ -q_2 \ -q_3] \quad (4,20)$$

Ardışıl olarak gerçekleşen dönme hareketleri için kuaterniyon çarpımı, $\otimes$, kullanılmaktadır. α , γ ve β koordinat sistemlerinin ardışıl iki dönme hareketi sonucu oluştuğunu farzedelim. β koordinat sisteminden α koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan kuaterniyon, β koordinat sisteminden γ koordinat sistemine ve γ koordinat sisteminden α koordinat sistemine kuaterniyon değerlerinin çarpımıdır, Denklem (4,21). γ , ara işlemlerde çözümleyici koordinat sistemi olarak kullanılmaktadır.

$${}^{\alpha}\hat{q} = {}^{\gamma}\hat{q} \otimes {}^{\alpha}\hat{q} \quad (4,21)$$

p ve r iki kuaterniyon olmak üzere, bu iki kuaterniyon çarpımı Hamilton kuralına göre yapılmaktadır [113], Denklem (4,22).

$$\begin{aligned} p \otimes r &= [p_0 \ p_1 \ p_2 \ p_3] \otimes [r_0 \ r_1 \ r_2 \ r_3] \\ &= \begin{bmatrix} p_0 r_0 - p_1 r_1 - p_2 r_2 - p_3 r_3 \\ p_0 r_1 + p_1 r_0 + p_2 r_3 - p_3 r_2 \\ p_0 r_2 - p_1 r_3 + p_2 r_0 + p_3 r_1 \\ p_0 r_3 + p_1 r_2 - p_2 r_1 + p_3 r_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4,22)$$

v^{α} ve v^{β} , α ve β koordinat sistemlerindeki döndürülmüş v vektörüdür. ${}^{\alpha}\hat{q}$ ve ${}^{\beta}\hat{q}^*$ kuaterniyonları ile v^{α} ve v^{β} vektörleri arasındaki ilişki Denklem (4,23) ile tanımlanmaktadır.

$$v^{\beta} = {}^{\alpha}\hat{q} \otimes v^{\alpha} \otimes {}^{\beta}\hat{q}^* \quad (4,23)$$

Kuaterniyonlar hakkında verilmesinde fayda görüleceğine inandığımız bir diğer özellik bütün elemanlarının karelerinin toplamının 1'e eşit olmasıdır, Denklem (4,24).

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (4,24)$$

Kuaternion, Euler açıları ve koordinat dönüşüm matrisi arasındaki ilişki Şekil 4.7 ile gösterilmektedir. Kuaternion ve Euler açıları birbirine direk olarak dönüşmemekte, ara işlem olarak koordinat dönüşüm matrisine çevrilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.7. Açısal yönelim sistemlerinin dönüşümleri.

Kuaterniyon→Koordinat Dönüşüm Matrisi: Kuaterniyon ${}^\alpha_\beta \hat{q}$ ile tanımlı yönelim bilgisini ${}^\alpha_\beta R$ koordinat dönüşüm matrisine dönüştürmek için Denklem (4,25) kullanılmaktadır [110].

$${}^\alpha_\beta R = \begin{bmatrix} 2q_0^2 - 1 + 2q_1^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2q_0^2 - 1 + 2q_2^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 2q_0^2 - 1 + 2q_3^2 \end{bmatrix} \quad (4,25)$$

Kuaterniyon→Euler Açıları: Kuaterniyon ${}^\alpha_\beta \hat{q}$ ile tanımlı yönelim bilgisini Euler Açıları'na dönüştürmek için önce kuaterniyon koordinat dönüşüm matrisine çevrilir. Euler açıları, Denklem (4,25)'de ${}^\alpha_\beta R$ matrisinin $R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{32}$ ve R_{33} elemanları kullanılarak hesaplanmaktadır [114], Denklem (4,26).

$$\varphi = \text{atan2} \frac{R_{32}}{R_{33}}$$

$$\theta = -\text{atan} \left(\frac{R_{31}}{\sqrt{1 - (R_{31})^2}} \right)$$

$$\psi = \text{atan2} \frac{R_{21}}{R_{11}}$$

Koordinat Dönüşüm Matrisi →Kuaterniyon: Koordinat dönüşüm matrisi kuaterniyona dönüştürülürken en etkin hesaplama Bar-Itzhack [115] tarafından, her bir elemanı koordinat dönüşüm matrisi elemanlarının aritmetik işlemlerinden oluşan 4×4 boyutundaki K matrisinin normalize edilmiş en büyük özdeğerinin hesaplanması olarak formüle edilmiştir, Denklem (4,27-28).

$$K = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} R_{11} - R_{22} - R_{33} & R_{21} + R_{12} & R_{31} + R_{13} & R_{23} - R_{32} \\ R_{21} + R_{12} & R_{22} - R_{11} - R_{33} & R_{32} + R_{23} & R_{31} - R_{13} \\ R_{31} + R_{13} & R_{32} + R_{23} & R_{33} - R_{11} - R_{22} & R_{12} - R_{21} \\ R_{23} - R_{32} & R_{31} - R_{13} & R_{12} - R_{21} & R_{11} + R_{22} + R_{33} \end{bmatrix} \quad (4,27)$$

$$E = \text{eigen}(K), \quad {}^\alpha_\beta \hat{q} = [e_3 \quad e_0 \quad e_1 \quad e_2] \quad (4,28)$$

5. SENSÖR FÜZYONU ve IMU KULLANILARAK KONUM TESPİTİ

Standart bir IMU, ivmeölçer (accelerometer), jiroskop (gyroscope) ve manyetik alan sensöründen (magnetometer) oluşmaktadır. Her bir sensörün kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. İvmeölçer düşük frekansta doğru çalışmasına rağmen yüksek frekanslarda gürültüden etkilenmektedir. Temel olarak, ivmeölçer ve manyetik kuvvetölçer gürültülü yönelim bilgisine sahiptir. Jiroskop anlık açısal değişimi hesaplamaktadır. Başlangıç konumundan itibaren gerçekleşen toplam açısal değişimi hesaplamak için açısal hızlar integral işlemine tabi tutulmaktadır. Jiroskop yüksek frekansta iyi çalışarak ivmeölçerin hatasını düzeltirken düşük frekansta giderek artan sapma hatasına (drift error) neden olmaktadır. Atalet sistemindeki bu hata, konum ve yönelimi hesaplamak için ivmeölçer ve jiroskoptan gelen verilerin zamanda integral işlemine tabi tutulması sonucu oluşmaktadır. İvmeölçer ve manyetik kuvvetölçerde ise sapma hatası olmamaktadır. Birbirinin dezavantajını yok eden sensör verileri birleştirilerek etkin sonuçlar elde etmek mümkündür. Manyetik kuvvetölçer, ivmeölçer ve jiroskop gibi farklı sensörlerden elde edilen verilerin birleştirilerek en az hataya sahip ölçüm bilgisini elde etme işlemine *sensör füzyonu* denilmektedir [116]. Kalman filtresi sensör füzyonunda etkin olarak kullanılmaktadır [117]–[120]. Bu bölümde Kalman Filtresi hakkında kısa bilgi verildikten sonra çalışmamızda kullanılan Kuaterniyon tabanlı Genişletilmiş Kalman Filtresi adımları ve kuaterniyon hesaplama formülleri verilmiştir.

5.1. Kalman Filtresi

Kalman filtresi 1960 yılında Macar asıllı Amerikan vatandaşı matematiksel sistem teoristi Rudolf Kalman [121] tarafından bulunmuştur. İlk olarak doğrusal sistemler geliştirilen Kalman filtresi ağırlıkları dinamik olarak her bir adımda güncellenen, özyinelemeli, en küçük kareler algoritmasıdır. Kalman filtresinin doğrusal olmayan bir sisteme uygulanabilmesi için Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter – EKF) geliştirilmiştir [122].

Genel olarak Kalman filtresi, dinamik bir sistemin $t - 1$ anındaki giriş ve çıkış bilgilerini kullanarak bu sistemin t anındaki durumlarını tahmin edebilen bir filtredir. Kalman Filtresi Denklem (5,1) ve Denklem (5,2) ile tanımlanmaktadır [123]. Denklem (5,1)'de verilen x durum vektörünü, u kontrol vektörünü, w proses gürültüsünü, A

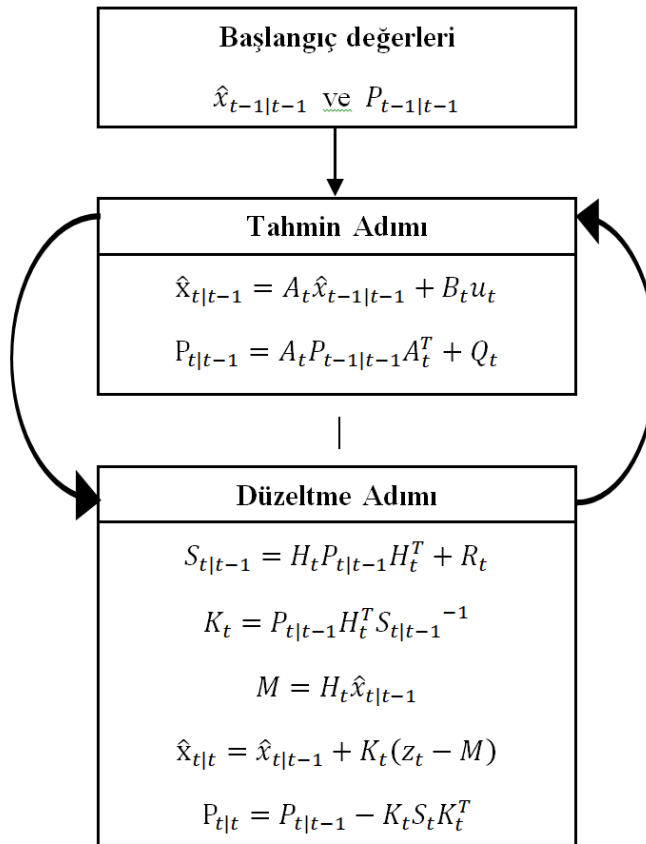
durum geçiş matrisini, B kontrol giriş matrisini temsil etmektedir. Denklem (5,2)'de verilen z ölçüm vektörünü, H durum vektörü parametrelerini ölçüm bölgesine haritalayan dönüşüm matrisini (gözlemlenebilirlik matrisi), v ise ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir.

$$x_t = A_t x_{t-1} + B_t u_t + w_t \quad (5,1)$$

$$z_t = H_t x_t + v_t \quad (5,2)$$

5.1.1. Standart Kalman filtresi

Standart Kalman filtresi iki adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar zaman güncellemesinin yapıldığı tahmin (prediction) ve ölçüm güncellemesinin yapıldığı düzeltme (estimation) adımlarıdır. Tahmin adımı, bir sonraki gelecek duruma ait tahminler elde etmek için mevcut durum ve hata kovaryansını hesaplamaktadır. Düzeltme adımı ise sistem geri beslemesi yaparak durum ve kovaryans matrisini güncellemektedir. Şekil 5.1'de ayrık zamanlı standart Kalman filtresine ait algoritma akış şeması verilmiştir [124].



Şekil 5.1. Ayrık zamanlı standart Kalman Filtresi akış diyagramı.

$\hat{x}_{t|t-1}$, tahmin edilen durum, $\hat{x}_{t-1|t-1}$ önceki zaman adımına ait düzeltilen durum, tahmin adımıdaki Q_t , gürültülü kontrol giriş değerlerine ilişkin gürültü kovaryans matrisi, $P_{t|t-1}$ tahmini kovaryans matrisi, $P_{t-1|t-1}$ önceki adımda düzeltilen kovaryans matrisidir. Düzeltme adımıdaki $S_{t|t-1}$, z_t ölçüm değerinin tahmini kovaryansı, K_t tahmini kovaryans matrisini en aza indirgeyen Kalman kazancıdır. M değeri z_t ölçümünün tahmini dağılım ortalaması, $\hat{x}_{t|t}$ düzeltilen durum, $z_t - M$ değeri ölçüm inovasyon değeri, $P_{t|t}$ ise düzeltilen kovaryans matrisidir.

5.1.2. Genişletilmiş Kalman filtresi

Birçok sistemde durum dinamikleri doğrusal değildir, Denklem (5,3) ve Denklem (5,4). Bu durumda Kalman kazancı hesaplanamadığından standart Kalman filtresi uygulanamamaktadır. Sisteme ait durum dinamiklerini ve ölçüm fonksiyonunu doğrusallaştırmak için fonksiyonların Jacobian değerleri hesaplanarak standart Kalman filtresi uygulanır. İlk olarak sistem durum dinamikleri doğrusallaştırılır, hemen takip eden adımda ölçüm (sistem dinamikleri) güncellemesi uygulanır. Üçüncü adımda ölçümler doğrusallaştırılır ve son adımda zaman güncellenerek tekrar birinci adıma dönlür. Bu işlemler sonucunda Kalman filtresi, Genişletilmiş Kalman Filtresine dönüşmüştür. Birinci adım sonucunda doğrusallaştırılan durum ve ölçüm vektörleri Denklem (5,3)-(5,4)'de verilmiştir.

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t, w_t) \quad (5,3)$$

$$z_t = h(x_t, u_t, v_t) \quad (5,4)$$

Genişletilmiş Kalman Filtresi adımları:

Adım 1: Ölçümleri doğrusallaştır:

$$H_t = \left. \frac{\partial h(x, u)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{t|t-1}} \quad (5,5)$$

Adım 2: Ölçümleri güncelle (düzeltme):

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (5,6)$$

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t(z_t - H_t\hat{x}_{t|t-1}) \quad (5,7)$$

$$P_{t|t} = P_{t|t-1} - K_t H_t P_{t|t-1} \quad (5,8)$$

Adım 3: Sistem dinamiklerini doğrusallaştır:

$$F_t = \left. \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{t|t}} \quad (5,9)$$

Adım 4: Zamanı güncelle (tahmin) ve Adım1'e dön.

$$\hat{x}_{t+1|t} = f(\hat{x}_{t|t}, \hat{u}_t) \quad (5,10)$$

$$P_{t+1|t} = F_t P_{t|t} F_t^T + Q_t \quad (5,11)$$

5.2. Kuaterniyon Tabanlı Genişletilmiş Kalman Filtresi

Bu çalışmada kaçak konum tespitinde kullanılan yöntemde, 3DOF jiroskop tarafından ölçülen açısal değişimi düzeltmek için 3DOF manyetik alan sensörü ve 3DOF ivmeölçer sensörleri tamamlayıcı sensör olarak kullanılmış ve sensör füzyonu işlemi gerçekleştirilmiştir. Açısal yönelim tahmini algoritmaları temel olarak üç adıma sahiptir [125]: entegrasyon, vektör gözlemlene ve Kalman filtresi. Entegrasyon adımı F_t geçiş matrisinin ve $P_{t|t-1}$ tahmini hata kovaryans matrisinin kullanılarak kuaterniyon vektörünü tahmin eden zaman güncelleme adımıdır. Vektör gözlemlene adımı ise manyetik alan sensörü ve ivmeölçer verilerine ait sistem durum dinamiklerinin optimize edildiği adımdır. Son aşamada uygulanan Kalman filtresi ile hata kovaryansı en aza indirilerek ölçümleri düzeltme adımı tamamlanmaktadır.

Oluşturulan filtre sistemine ait durum vektörü Denklem (5,12)'da tanımlanmaktadır. Kuaterniyona ait q_0 reel, q_1, q_2 ve q_3 sanal bileşenlerdir.

$$x = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] \quad (5,12)$$

5.2.1. Jiroskop açıları ile kuaterniyon hesabı – entegrasyon adımı

Jiroskop sensörü koordinat sistemindeki X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen açısal değişimi rad/sn cinsinden ölçmektedir. Her bir ekseninde meydana gelen

değişim sırasıyla $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ile temsil edilmektedir. ${}^S\omega$ değişkeniyle sensör koordinat sisteminin bütün eksenlerinde ölçülen jiroskop vektörünü temsil etmektedir, Denklem (5,13). Global koordinat sisteminden sensör koordinat sistemine değişim miktarını veren kuaterniyon türevin (${}^S_G\dot{q}$) hesaplanabilmesi için Denklem (5,14) kullanılmaktadır [126].

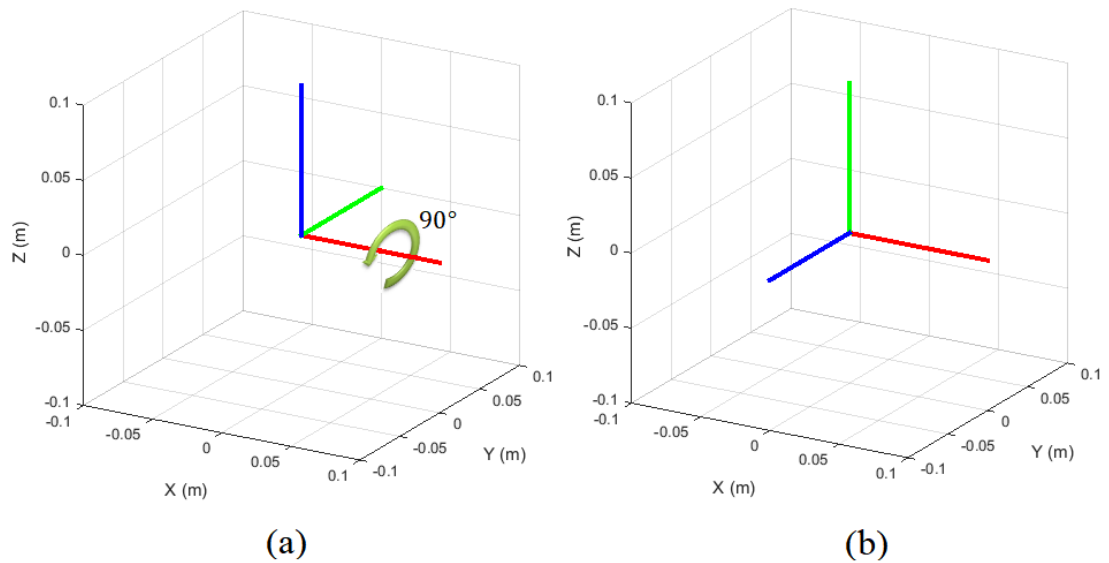
$${}^S\omega = [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z] \quad (5,13)$$

$${}^S_G\dot{q} = \frac{1}{2} {}^S_G\hat{q} \otimes {}^S\omega \quad (5,14)$$

$t - 1$ anında tahmin edilen kuaterniyon değeri ile t anında jiroskop sensöründen okunan değerlerin çarpımı sonucu kuaterniyon türevi Denklem (5,15)'de verilmektedir. ${}^S\omega_t$, t anında jiroskoptan okunan veriyi, ${}^S_G\hat{q}_{est,t-1}$ ise bir önceki kuaterniyonu temsil etmektedir. Bu türevler, sensör veri okuma periyodu Δt ile çarpılıp önceki değerle toplandığında nihai yönelim bilgisini içeren kuaterniyon elde edilmektedir, Denklem (5,16).

$${}^S_G\dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S_G\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S\omega_t \quad (5,15)$$

$${}^S_Gq_{\omega,t} = {}^S_G\dot{q}_{\omega,t}\Delta t + {}^S_G\hat{q}_{est,t-1} \quad (5,16)$$



Şekil 5.2. X ekseninde saat yönünün tersinde 90° döndürülmesi.

Sensörün 50Hz frekansında okuma yaptığını farzedelim. Bu durumda Δt periyot değeri 0.02 olacaktır. Her 0.02 saniyede, sensörden gelen ${}^S\omega_t$ jiroskop değeri ile mevcut kuaterniyon vektörü çarpılarak anlık kuaterniyon değeri elde edilmektedir. Hesaplanan kuaterniyon değerinin 1 saniyelik toplam periyoda etkisi 0.02 olacağından bu değerle çarpılarak, bir önceki adımda hesaplanan vektörle toplanmaktadır. Şekil 5.2’de başlangıç kuaterniyonun $[1 \ 0 \ 0 \ 0]$, X ekseninde 90° döndürüldükten sonraki görünüşü verilmiştir.

Durum denklemine jiroskop proses gürültüsü de eklendiğinde sisteme ait genel durum denklemi Denklem (5,17)’de verilmiştir. w_t değeri jiroskop sensörüne ait kovaryans matrisi Q ile tanımlanan proses gürültüsüdür.

$$x_t = f(x_{t-1}) + w_t \quad (5,17)$$

Prensip olarak Q kovaryans matrisi ve w_t aynıdır. Formülasyon olarak optimizasyon formüllerinde w_t , Kalman Filtresi adımlarında ise Q ile temsil edilmektedir. Q kovaryans matrisi sensörden sensöre farklılık göstermektedir. Bir sensörün hareketsiz halde iken, dış gürültülerden dolayı sıfır değerinden farklı olarak değerler üretmektedir. Bütün bu değerlerin belirli bir süre okunduktan sonra aritmetik ortalaması alınarak sensöre ait offset değeri hesaplanmaktadır, Denklem (5,18). Bu çalışmada kullanılan jiroskop sensörünün offset değeri varyans tahmin algoritmasına sokularak sensöre ait varyans vektörü hesaplanmıştır, Denklem (5,19). Varyans vektörü Q kovaryans matrisinin inşasında kullanılmaktadır, Denklem (5,20).

$$Offset = [-0.1342 \ -0.0553 \ 0.1455] \quad (5,18)$$

$$var = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z] = [0.0705 \ 0.0732 \ 0.0663] \quad (5,19)$$

Denklem (5,16)’da ${}^S\dot{q}_{\omega,t}$ ifadesi yerine Denklem (5,15) yazıldığından temel kuaterniyon hesaplama denklemi elde edilmektedir, Denklem (5,21).

$${}^S q_{\omega,t} = \frac{1}{2} ({}^S \hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S \omega_t) \Delta t + {}^S \hat{q}_{est,t-1} \quad (5,21)$$

Tahmin edilmeye çalışılan denklem Kalman filtresinde durum denklemi olarak tanımlandığından t anında tahmin edilen x_t aynı zamanda bir önceki adımda tahmin edilen ${}^S \hat{q}_{est,t-1}$ değeridir. Bütün bu denklem sistemleri birleştirildiğinde

Kuaterniyon tabanlı Kalman filtresi durum denklemi tanımlanmaktadır, Denklem (5,22). t anındaki durum denklemi ise Denklem (5,23)'de verilmektedir.

$$f(x_{t-1}) = \frac{1}{2}(x_{t-1} \otimes {}^s\omega_t)\Delta t + x_{t-1} \quad (5,22)$$

$$x_{t|t-1} = f(x_{t-1|t-1}) \quad (5,23)$$

x_t 'ye ait $f(x_t)$ fonksiyonunun doğrusal olmadığı açıkça görülmektedir. Bu durumda Kalman Filtresi kalman kazancını hesaplayamayacağından Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanılarak F_t geçiş matrisi kullanılmalıdır. Bölüm 4'de Denklem (4,22)'de verilen kuaterniyon çarpımı $x_{t-1} \otimes {}^s\omega_t$ için uygulanırsa:

$$\begin{aligned} x_{t-1} \otimes {}^s\omega_t &= [x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3] \otimes [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z] \\ &= \begin{bmatrix} x_0 \cdot 0 - x_1\omega_x - x_2\omega_y - x_3\omega_z \\ x_0\omega_x + x_1 \cdot 0 + x_2\omega_z - x_3\omega_y \\ x_0\omega_y - x_1\omega_z + x_2 \cdot 0 + x_3\omega_x \\ x_0\omega_z + x_1\omega_y - x_2\omega_x + x_3 \cdot 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5,24)$$

Denklem (5,24), (5,22)'de yerine konulduğunda elde edilen $f(x_{t-1})$ fonksiyonuna ait Jacobian F_t geçiş matrisi:

$$\begin{aligned} F_t &= \left. \frac{\partial f(x_t)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{t-1|t-1}} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -\Delta t/2 \cdot \omega_x & -\Delta t/2 \cdot \omega_y & -\Delta t/2 \cdot \omega_z \\ \Delta t/2 \cdot \omega_x & 1 & \Delta t/2 \cdot \omega_z & -\Delta t/2 \cdot \omega_y \\ \Delta t/2 \cdot \omega_y & -\Delta t/2 \cdot \omega_z & 1 & \Delta t/2 \cdot \omega_x \\ \Delta t/2 \cdot \omega_z & \Delta t/2 \cdot \omega_y & -\Delta t/2 \cdot \omega_x & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5,25)$$

Başlangıç kuaterniyon değeri F_t ile çarpılarak tahmini kuaterniyon vektörü elde edilmektedir, Denklem (5,26).

$$x_{t|t-1} = F_t x_{t-1|t-1} \quad (5,26)$$

Entegrasyon adımında yapılacak son işlem EKF'ye ait dördüncü adımda verilen Denklem (5,11)'e göre tahmini kovaryans matrisinin ($P_{t|t-1}$) hesaplanmasıdır.

5.2.2. Vektör gözlemlleme adımı

Gözlemlleme adımı yardımcı sensörler kullanılarak kuaterniyon vektörünün optimize edildiği adımdır. Optimize işleminin sonucunda minimize edilmiş kuaterniyon vektörü olan z_t gözlem vektörü elde edilmektedir. ${}^S\hat{q}$ sensör yönelimi, ${}^G\hat{d}$ Dünya üzerinde herhangi bir yönde ön tanımlı referans yönü ve ${}^S\hat{s}$ sensörden okunan veri olmak üzere minimize edilecek amaç fonksiyonu Denklem (5,27) ile tanımlanmaktadır [127]:

$$\min_{{}^S\hat{q}} f({}^S\hat{q}, {}^G\hat{d}, {}^S\hat{s}) \rightarrow f({}^S\hat{q}, {}^G\hat{d}, {}^S\hat{s}) = {}^S\hat{q}^* \otimes {}^G\hat{d} \otimes {}^S\hat{q} - {}^S\hat{s} \quad (5,27)$$

Gradient Descent yöntemi ile μ adım büyüklüğünde çözülecek kuaterniyon denklemi ve hatanın yönünü gösteren fonksiyona ait Jacobian matrisi Denklem (5,28) ve (5,29)'de verilmektedir. ∇ , amaç fonksiyonunun Gradient Descent yöntemi ile çözüldüğünü göstermek için kullanılmaktadır.

$${}^S\hat{q}_{k+1} = {}^S\hat{q}_k - \mu \frac{\nabla f({}^S\hat{q}_k, {}^G\hat{d}, {}^S\hat{s})}{\|\nabla f({}^S\hat{q}_k, {}^G\hat{d}, {}^S\hat{s})\|} \quad (5,28)$$

$$\nabla f({}^S\hat{q}_k, {}^G\hat{d}, {}^S\hat{s}) = J^T({}^S\hat{q}_k, {}^G\hat{d}) f({}^S\hat{q}_k, {}^G\hat{d}, {}^S\hat{s}) \quad (5,29)$$

Hesaplamalarda kullanılacak koordinat dönüşümünü sağlayan kuaterniyon vektörü Denklem (5,30) ile formüle edilmektedir. Global koordinat sisteminde ön tanımlı ve yönü değişmez yerçekimi vektörünün Z eksenini tanımladığı düşünüldüğünde, ivmeölçerden gelen bilgi ile yerçekimi vektörü arasındaki açısal değişimi referans alan modelin gerçekleştirilebilirliği ispatlanmıştır. Bu durumda amaç fonksiyonunda ${}^G\hat{d}$ olarak tanımlanan referans sistem ${}^G\hat{g}$ olarak güncellenecektir, üst simge global koordinat sistemini $\hat{g}$ ise yerçekimini tanımlamaktadır, Denklem (5,31). Kuaterniyon güncellemesinde yalnızca ivmeölçer kullanılacaksa, ${}^S\hat{a}$ Denklem (5,29), Denklem (5,27)'ye göre kurulacak optimizasyon sistemine ait amaç fonksiyonu ve Jacobian matrisi Denklem (5,33) ve (5,34)'de verilmiştir. Bu yöntemde yönelim kuaterniyonu sadece ivmeölçer ve jiroskop verileri ile hesaplanmaktadır. Referans alınacak global koordinat sisteminin Z eksenini bu denklem seti ile tanımlanmaktadır.

$${}^S\hat{q} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] \quad (5,30)$$

$${}^G\hat{g} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (5,31)$$

$${}^S\hat{a} = [0 \quad a_x \quad a_y \quad a_z] \quad (5,32)$$

$$f_g({}^S\hat{q}, {}^S\hat{a}) = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) - a_x \\ 2(q_0q_1 + q_2q_3) - a_y \\ 2\left(\frac{1}{2} - q_1^2 - q_2^2\right) - a_z \end{bmatrix} \quad (5,33)$$

$$J_g({}^S\hat{q}) = \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 0 & -4q_1 & -4q_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5,34)$$

İvmeölçer ile hesaplanacak kuaterniyon sadece yerçekimi vektörü ile yapılan açıyı düzeltereğinden açısal yönelim bilgisinin her üç ekseninde güncellenmesini engellemektedir. Yerçekimine ek olarak global koordinat sisteminin X ve Y eksenlerini tanımlayan yatay ve dikey yönde var olan manyetik eksenler kullanıldığında birbirine ortogonal üç eksen tanımlanmış ve üç boyutlu açısal yönelim bilgisi etkin olarak hesaplanmış olacaktır. Denklem (5,35)'da referans alınacak manyetik alan koordinat eksenleri, ${}^G\hat{b}$, Denklem (5,36)'da ise manyetik alan sensör verisi, ${}^S\hat{m}$, verilmektedir.

$${}^G\hat{b} = [0 \quad b_x \quad 0 \quad b_z] \quad (5,35)$$

$${}^S\hat{m} = [0 \quad m_x \quad m_y \quad m_z] \quad (5,36)$$

Manyetik alan sensörleri, mıknatıs ve elektrikli ev aletleri gibi dış ortamda bulunan bütün manyetik alan bozuculardan etkilenerek hatalı sonuçlar üretebilmektedir [128]. Sensör etrafında bozucu etki oluşturan bu tür dalgalar, *hard iron bias* [129] olarak adlandırılmaktadır. Manyetik alan sensörü çıkışının etkinliğini artırmak için ortam gürültüsünü en düşük seviyeye indirmek adına sensörün kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu kalibrasyon işleminde tahmin edilen kuaterniyon değeri sensörden okunan veriyle kuaterniyon çarpımına tabi tutularak manyetik alan yönü ${}^G\hat{h}$ ölçülmekte, Denklem (5,37), sonraki adımda ise algoritmaya ait referans manyetik alan ${}^G\hat{b}$ ile kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmektedir, Denklem (5,38).

Böylece hatanın sadece tahmin edilen kuaterniyon yönelimiyle sınırlı kalması ve genele yayılmaması sağlanmaktadır [130].

$${}^G\hat{h}_t = [0 \quad h_x \quad h_y \quad h_z] = {}^S\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^Sm_t \otimes {}^S\hat{q}_{est,t-1}^* \quad (5,37)$$

$${}^G\hat{b}_t = [0 \quad \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \quad 0 \quad h_z] \quad (5,38)$$

Global koordinat sisteminin X-Y eksenlerini tanımlayan ikinci amaç fonksiyonu ve bu fonksiyona ait Jacobian matrisine ait denklemler ise Denklem (5,39) ve (5,40)'de tanımlanmaktadır.

$$f_b({}^S\hat{q}, {}^G\hat{b}, {}^Sm) = \begin{bmatrix} 2b_x(0.5 - q_2^2 - q_3^2) + 2b_z(q_1q_3 - q_0q_2) - m_x \\ 2b_x(q_1q_2 - q_0q_3) + 2b_z(q_0q_1 + q_2q_3) - m_y \\ 2b_x(q_0q_2 + q_1q_3) + 2b_z(0.5 - q_1^2 - q_2^2) - m_z \end{bmatrix} \quad (5,39)$$

$$J_b({}^S\hat{q}, {}^G\hat{b}) =$$

$$\begin{bmatrix} -2b_zq_2 & 2b_zq_3 & -4b_xq_2 - 2b_zq_0 & -4b_xq_3 + 2b_zq_1 \\ -2b_xq_3 + 2b_zq_1 & 2b_xq_2 + 2b_zq_0 & 2b_xq_1 + 2b_zq_3 & -2b_xq_0 + 2b_zq_2 \\ 2b_xq_2 & 2b_xq_3 - 4b_zq_1 & 2b_xq_0 - 4b_zq_2 & 2b_xq_1 \end{bmatrix} \quad (5,40)$$

Yerçekimi veya manyetik eksenlere göre hesaplanan açısal değişim değerleri tek başlarına sensöre ait yönelim bilgisini vermemektedir. Denklem (5,33) ve (5,39) ile tanımlanan amaç fonksiyonlarının birleştirilerek tek bir çözüm yüzeyi oluşturulması gerekmektedir. Denklem (5,41) ve (5,42) ile amaç fonksiyonları ve Jacobian matrisleri bir araya getirilmektedir.

$$f_{g,b}({}^S\hat{q}, {}^S\hat{a}, {}^G\hat{b}, {}^Sm) = \begin{bmatrix} f_g({}^S\hat{q}, {}^S\hat{a}) \\ f_b({}^S\hat{q}, {}^G\hat{b}, {}^Sm) \end{bmatrix} \quad (5,41)$$

$$J_{g,b}({}^S\hat{q}, {}^G\hat{b}) = \begin{bmatrix} J_g^T({}^S\hat{q}) \\ J_b^T({}^S\hat{q}, {}^G\hat{b}) \end{bmatrix} \quad (5,42)$$

Optimize edilecek denklem sistemi tanımlandıktan sonra Denklem (5,43) ile kullanılacak sensör fonksiyonu seçilmektedir. Sonraki adımda Denklem (5,44) ile kuaterniyon değeri her üç eksen için optimize edilmekte ve vektör gözlemleme adımı tamamlanmaktadır. μ değeri Denklem (5,45) ile belirlenen adım büyüklüğüdür. Bir sonraki adımda kullanılacak olan z_t ölçüm gözlem vektörü bu adımda Denklem

(5,46) ile hesaplanmaktadır. H gözlemlenebilirlik matrisini, v_t ise gözlem gürültüsünü temsil etmektedir. z_t kuaterniyon bilgisini barındırdığından H matrisi birim matrisdir, $I_{4 \times 4}$.

$$\nabla f = \begin{cases} J_g^T(\hat{q}_{est,t-1}) \cdot f_g(\hat{q}_{est,t-1}, \hat{a}_t) \\ J_{g,b}^T(\hat{q}_{est,t-1}, \hat{b}) \cdot f_{g,b}(\hat{q}_{est,t-1}, \hat{a}_t, \hat{b}, \hat{m}_t) \end{cases} \quad (5,43)$$

$$\hat{q}_{\nabla,t} = \hat{q}_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (5,44)$$

$$\mu_t = \alpha \|\hat{q}_{\nabla,t}\| \Delta t, \quad \alpha > 1 \quad (5,45)$$

$$z_t = Hx_t + v_t = \frac{\hat{q}_{\nabla,t}}{\|\hat{q}_{\nabla,t}\|} \quad (5,46)$$

Şekil 5.3’de çalışmamızda kodlaması gerçekleştirilen, manyetik gürültüden etkilenmeyen, Gradient Descent yöntemini kullanan, Kuaterniyon Tabanlı Genişletilmiş Kalman Filtresi’ne ait entegrasyon adımı verilmiştir. Şekil 5.4’de ait Kalman filtresi işlemleri ve Şekil 5.5’de vektör gözlemlleme adımına ait blok diyagram verilmiştir.

5.2.3. Kalman filtresi adımı

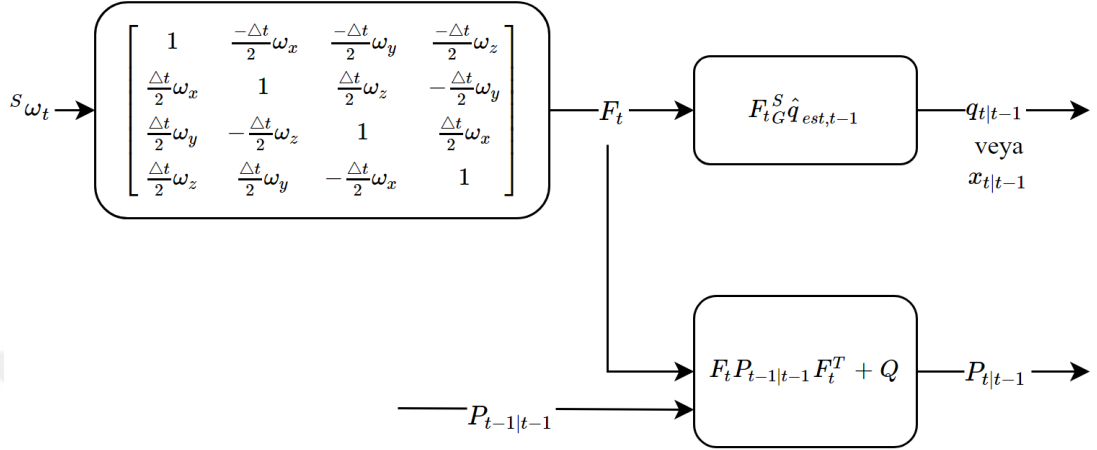
Entegrasyon ve vektör gözlemlleme adımları tamamlandıktan sonra Kalman Filtreleme adımına geçilmektedir. Bu adımda EKF Adım 2’de daha önce bahsedilmiş olan Kalman kazancı, entegrasyon adımında hesaplanan tahmini kovaryans matrisi, H gözlemlenebilirlik matrisi ve R kovaryans matrisi kullanılarak hesaplanmaktadır, Denklem (5,47). Hesaplanan Kalman kazancı ile durum düzeltilmesi ve kovaryans matrisi düzeltilmesi yapılmaktadır, Denklem (5,48) ve (5,49).

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (5,47)$$

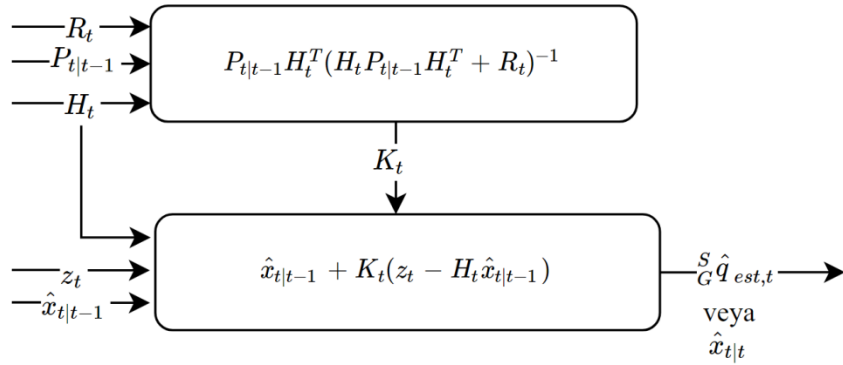
$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t (z_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}), \quad \hat{q}_{est,t} = \hat{x}_{t|t} \quad (5,48)$$

$$P_{t|t} = P_{t|t-1} - K_t H_t P_{t|t-1} \quad (5,49)$$

Bu adımdan sonra ilk aşama olan entegrasyon adımına gidilerek tahmini kovaryans matrisi ve tahmini durum güncellemesi yapılmış, ikinci aşamada Gradient Descent algoritması kullanılarak z_t ölçüm vektörü hesaplanmış ve tekrar üçüncü adımda Kalman filtresi uygulanmıştır.

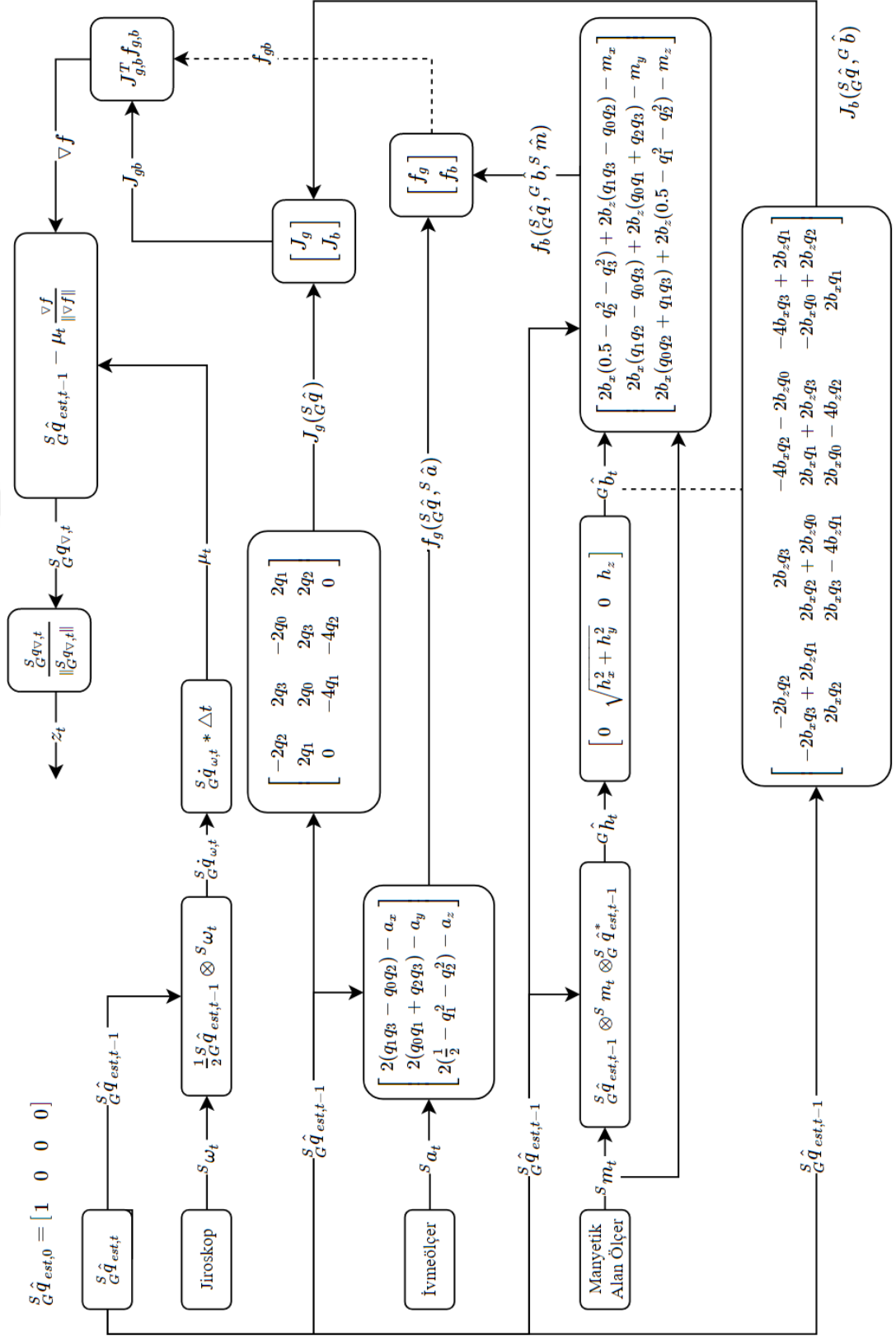


Şekil 5.3. Entegrasyon adımı blok şeması.



Şekil 5.4. Kalman filtresi adımı blok şeması.

Vektör gözlemlleme adımı sonrasında sensör füzyonu işlemi bitmektedir. İvmeölçer, jiroskop ve manyetik alan ölçer sensörleri kullanılarak katerniyon verisi hesaplanmıştır. Sonraki adımda elde edilen katerniyon konumun hesaplanmasında kullanılmıştır.



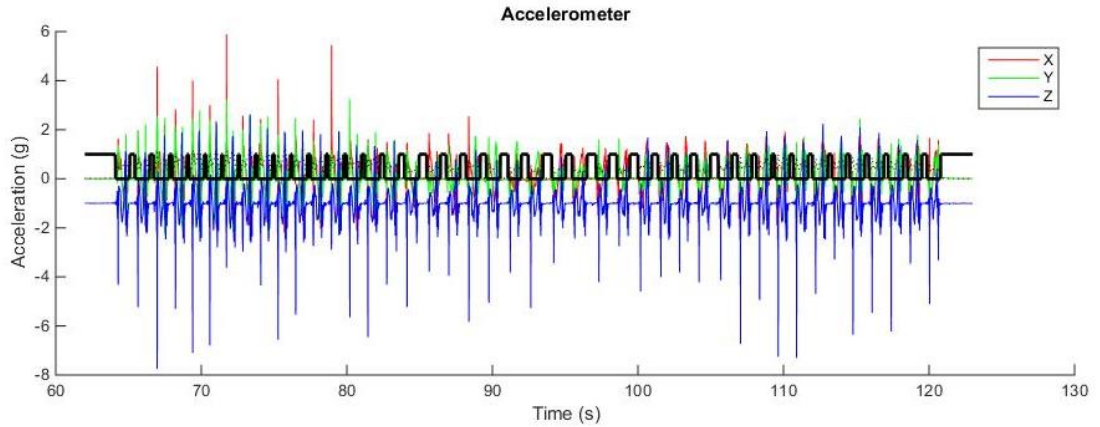
Şekil 5.5. Vektör gözlemlleme adımı blok şeması.

5.3. Kuaterniyon ve İvmeölçer Kullanarak Konum Tahmini

Şekil 5.5’de elde edilen z_t değeri hesaplanan nihai kuaterniyon vektörüdür. Konumun doğru olarak hesaplanabilmesi için sensör füzyonu işlemi ile kuaterniyon vektörü hesaplandıktan sonra ivmeölçerdeki hatanın giderilmesi gerekmektedir. İlk olarak kuaterniyon değerleri kullanılarak sensör koordinat sistemindeki ivmeölçer değerlerinin dünya koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir, Denklem (5,50).

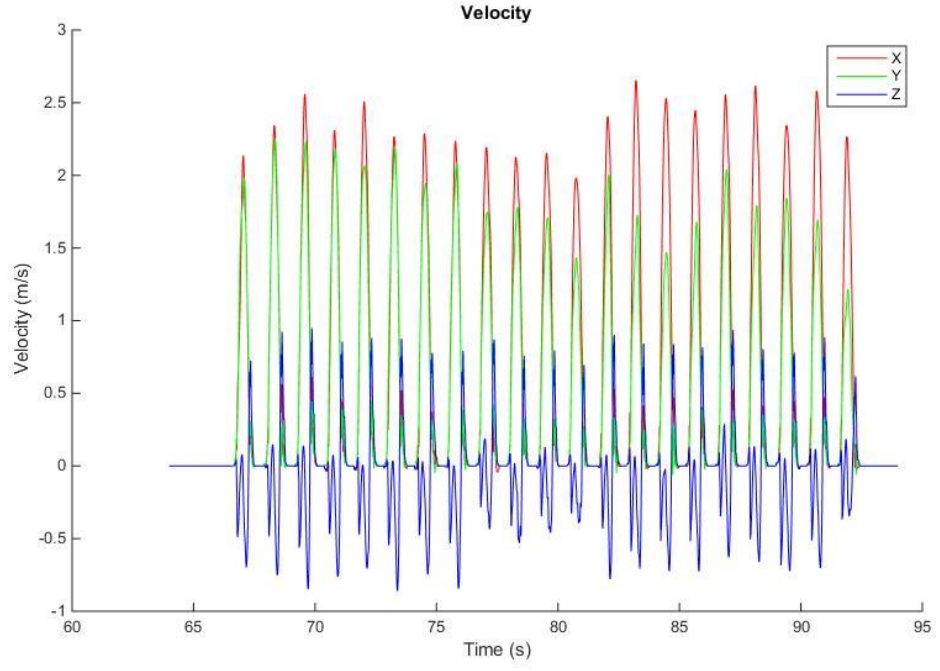
$${}^G\hat{a} = ({}^S\hat{q} \otimes [0 \ a_x \ a_y \ a_z]) \otimes \hat{q}^* \quad (5,50)$$

Bu işlemden sonra sensörün hareketsiz noktalarının tespiti ve konum kaymasının en aza indirgenebilmesi için ivmeölçer verisine Butterworth filtresi uygulanmıştır. Butterworth filtresi Chebyshev ve Eliptik filtreyle karşılaştırıldığında daha doğrusal bir frekans tepkisine sahip olduğundan tercih edilmiştir [131]. Şekil 5.6’da Butterworth filtresi uygulanan ivmeölçer verisi verilmiştir. Siyah renkle belirtilen filtrede 0 olan bölgeler hareketli kısımları 1 olan bölgeler ise durağan bölgeleri göstermektedir.



Şekil 5.6. Butterworth filtresi kullanarak ivmeölçer durağan bölge tespiti.

Durağan bölgeler tespit edildikten sonra ivmeölçer değerinin durağan olmayan bölgelerde integrali alınarak hız hesaplanmıştır. Hesaplanan hız değeri tekrar durağan olmayan bölgelerde integral işlemine tabi tutularak konum bilgisi hesaplanmıştır. Şekil 5.7’de hesaplanan sensör hızı verilmiştir.



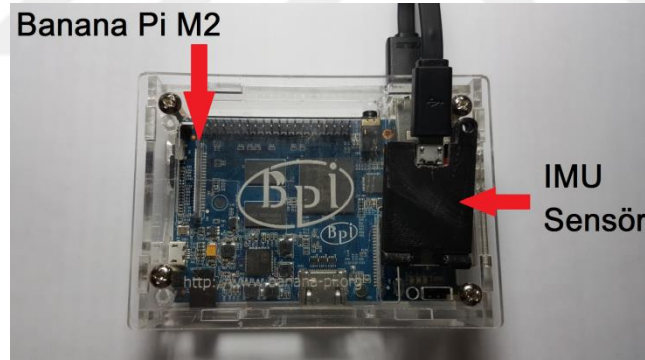
Şekil 5.7. İvmeölçer integrali sonucu elde edilen sensör hız grafiği.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

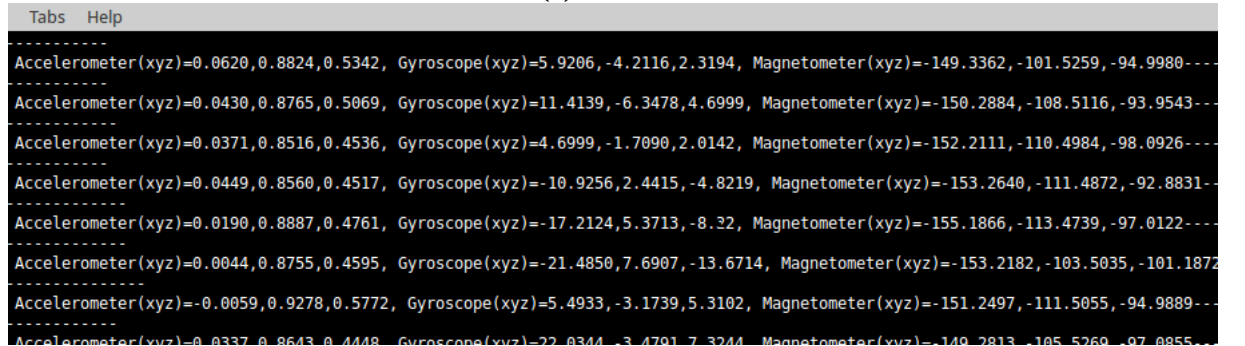
Bu bölümde kuaterniyon hesaplanması için geliştirilen Genişletilmiş Kalman Filtresi ve konum tespit sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm 4 ve 5’de verilen çalışmaların sonucu analiz edilmiştir. Bu çalışmalar aşağıda listelenmektedir:

1. Jiroskop sapma hatasının Genişletilmiş Kalman filtresi ile düzeltilmesi uygulaması,
2. İvmeölçer, jiroskop ve manyetik alan ölçer sensörleri kullanılarak 9DOF sensör füzyonu ile kuaterniyon hesabı,
3. Elde edilen kuaterniyon bilgisi ile kaçak konum tespit uygulamaları – (13, 45 ve 50 metrelik gezinti senaryoları).

Uygulama çalışmalarının tamamında IMU sensör verilerinin okunma işlemi Şekil 6.1-a’da gösterilen Banana Pi-M2 bilgisayarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bilgisayar yardımıyla alınan veriler Intel I7 işlemci ve 8GB ram belleğe sahip bilgisayarda Matlab 2014b ortamında off-line olarak işlenmiştir. Şekil 6.1-b’de 100Hz frekansında sensörden okunan anlık sensör verileri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.1. Veri toplama sistemi (a) Banana Pi M2 kartı ve IMU sensör; (b) IMU verilerini toplayan gömülü yazılımın ekran görüntüsü.

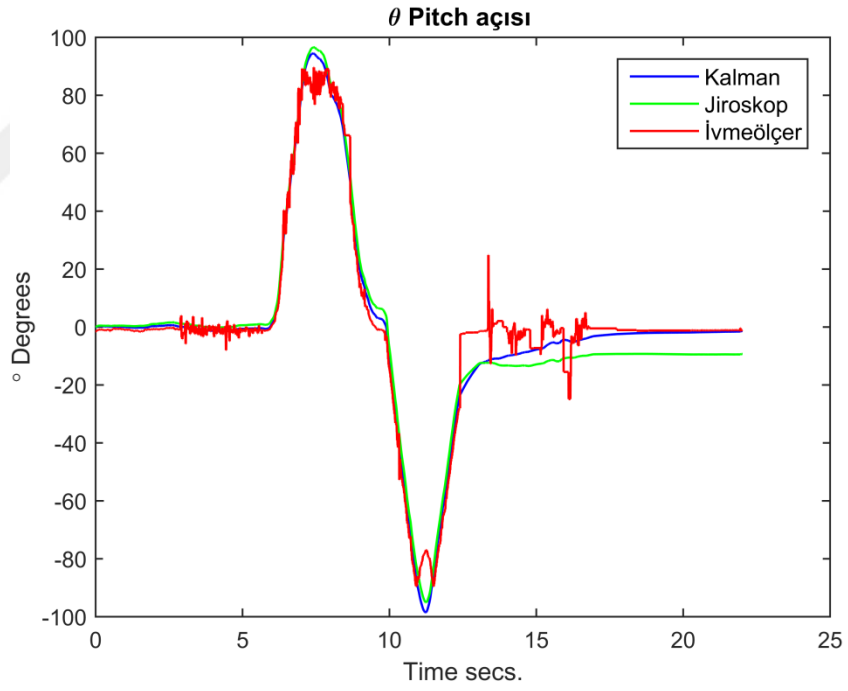
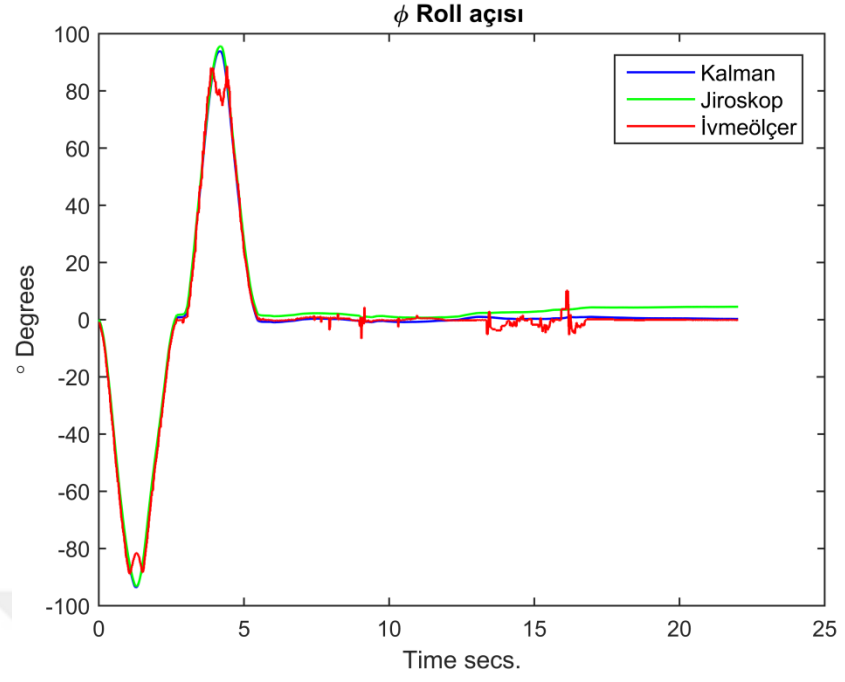
6.1. Kalman Filtresi Kullanılarak Jiroskop Sensörü Drift Gözlemlenmesi

Yönelim açısı farklı yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Standart bir IMU sensörde yönelim bilgisi jiroskoptan elde edilen açısal değişimlerin integrasyonu sonucu hesaplanmaktadır. Fakat bu yöntemde jiroskop sensöründe meydana gelen açısal kayma sonucu zaman içerisinde giderek artan bir hata oluşmaktadır. Sadece ivmeölçer kullanılarak hesaplanan açı değeri X ve Y eksenleri için doğru sonuç vermesine rağmen Z ekseninde yerçekiminin varlığından dolayı yaw açısını vermemektedir. En sağlıklı yöntem Kalman Filtresi ile ivmeölçer-jiroskop sensörlerinin füzyona tabi tutulmasıdır.

Şekil 6.2’de Kalman filtresi uygulanması sonucu elde edilen roll ve pitch açı değerleri verilmiştir. İlk olarak X ekseninde -90° döndürme işlemi yapılmış ve tekrar başlangıç konumuna geçilerek sensör aynı ekseninde $+90^\circ$ döndürülmüştür. Aynı işlemler Y eksenini için de gerçekleştirilmiştir. Şekillerde kırmızı renk ile gösterilen açılar ivmeölçer verileri kullanılarak Denklem (6,1) ve (6,2) ile hesaplanan roll (φ) ve pitch (θ) açılarıdır. Yeşil renk jiroskoptan okunan açısal değerlerin integrale tabi tutulmuş kümülatif şeklindedir. Buradan jiroskobun giderek artan sapma hatası açıkça görülmektedir. Ayrıca pitch açısının verildiği şekilde 13-17. saniyeler arasında ivmeölçerden gelen verideki hatanın da Genişletilmiş Kalman filtresi tarafından düzeltildiği ve sensör füzyonunun gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra sensör füzyonunun açısal hatayı küçülttüğü gözlemlenmiş ve 9DOF sensör füzyonunun uygulanmasına karar verilmiştir.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (6,1)$$

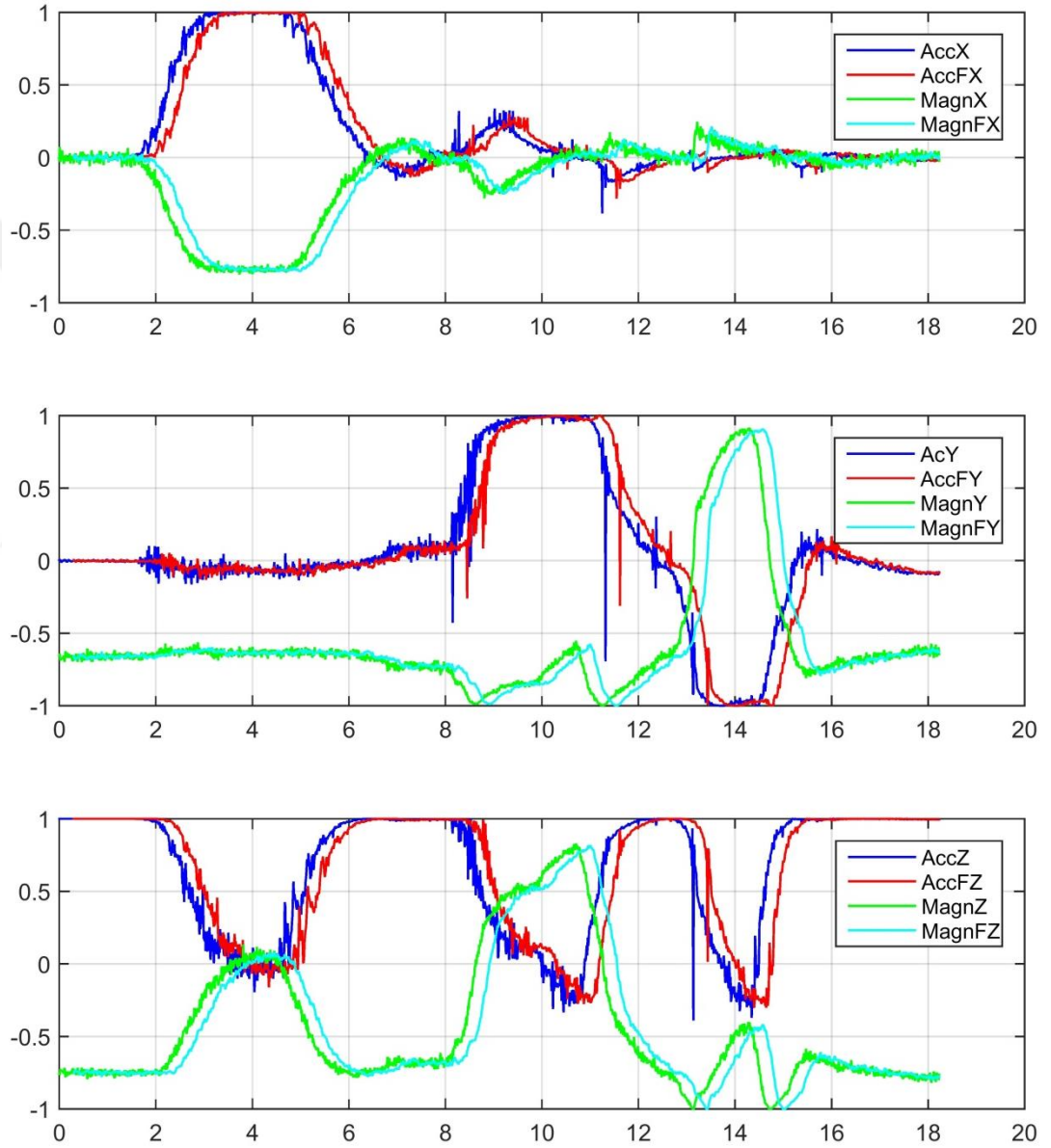
$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (6,2)$$



Şekil 6.2. Jiroskop sapma hatasının Kalman filtresi ile düzeltilmesi.

6.2. Kuaterniyon Tabanlı EKF Sonucu

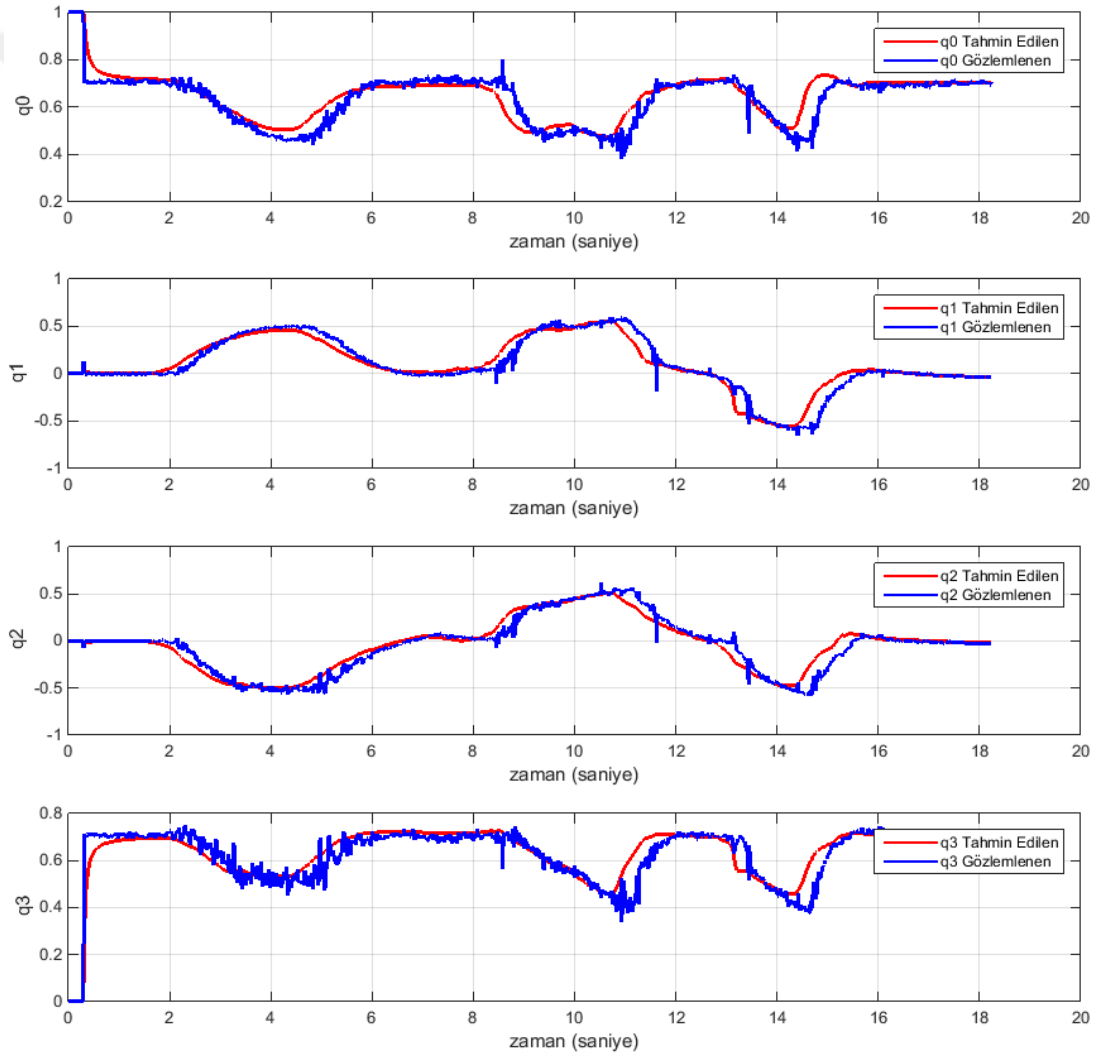
İlk olarak ivmeölçer ve manyetik alan ölçer sensörleri filtrelenmiştir. Filtreleme işleminde yaygın olarak kullanılan Butterworth filtresi kullanılmıştır. Her iki sensör de hareketsiz durumlarda ölçüme devam ettiğinden offset değeri filtrelenerek hesaplanmıştır. Şekil 6.3’de filtrelenmiş ivmeölçer ve manyetik alan ölçer verileri verilmiştir.



Şekil 6.3. Filtrelenmiş ivmeölçer ve manyetik alan ölçer verileri.

Jiroskop ile sensör füzyonuna tabi tutulacak ivmeölçer ve manyetik alan ölçer verilerinin filtrelenmesinin ardından bölüm 5.1’de verilen entegrasyon adımı çalıştırılarak jiroskop açıları ile başlangıç kuaterniyonu tahmin edilmiştir. Bölüm 5.2’de ivmeölçer ve manyetik alan ölçer sensörlerinin filtrelenmiş verileri ile gözlemlenmiş kuaterniyon değerleri hesaplanmıştır. Son olarak bölüm 5.3’de verilen Kalman filtresi adımı ile tahmin edilen kuaterniyon değeri hesaplanmıştır.

Şekil 6.4’de X ekseninde önce $+90^\circ$ derece döndürüldükten sonra başlangıç konumuna getirilerek Y ekseninde önce $+90^\circ$ sonra -90° ve tekrar başlangıç açısına getirilmesi sonucu elde kuaterniyon vektörleri verilmiştir.



Şekil 6.4. EKF ile gözlemlenen ve tahmin edilen kuaterniyon değerleri.

6.3. Kaçak Konum Tespit Deneyleri

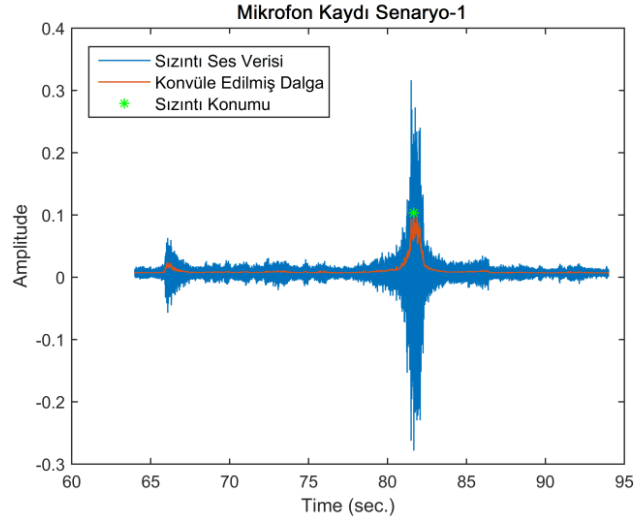
Bu bölümde, önerilen kaçak tespit sistemi (mini bilgisayar, SD kart, IMU, mikrofon, kayıt ve tespit yazılımları) ile gerçek ortamda yapılan test çalışmaları ve elde edilen sonuçlar verilecektir. Test aşaması iki bağımsız işlemi içermektedir:

- 1) Kayıt (veri toplama);
- 2) Tespit (veri işleme).

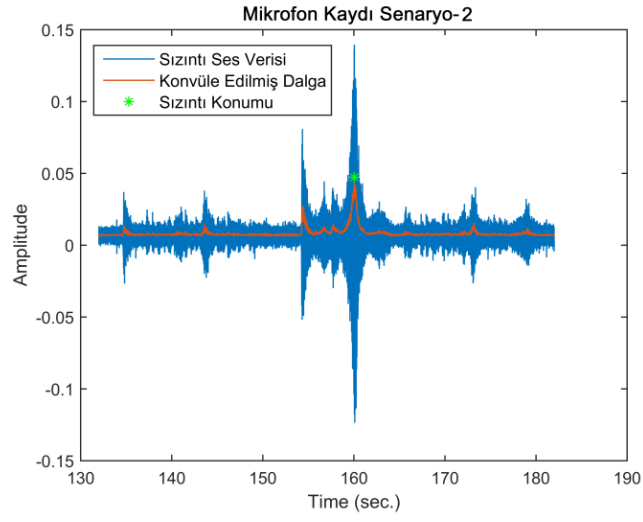
Normalde kayıt işlemi, yer altında, boru içerisinde ve suyun itme kuvvetiyle hareket eden düzenek içerisinde elde edilmelidir. Ancak bu çalışmada veri kayıt işlemi yer altında değil yer üstünde yapılan bir gezintiden elde edilmiştir. Çünkü ön aşama olarak gerçekleştirilen bu çalışmada birinci öncelik, Genişletilmiş Kalman Filtresi tabanlı gezinti konumu tahmin algoritmasının doğru olarak çalışmasıdır. Bu nedenle üç farklı gezinti senaryosu belirlenmiş ve kayıt cihazı belirlenen bu konumlarda manuel olarak hareket ettirilmiştir. Gezinti güzergâhı üzerinde belirli noktalarda su akışı sağlanarak çatlak sesinin elde edebilmesi sağlanmıştır. Böylece ortam sesini sürekli kaydeden kayıt cihazı bu noktaların yanından geçerken su akış sesini de kaydetmiş olacaktır.

Kapalı bir ortamda gerçekleştirilen deneylerde üç farklı gezinti senaryosu gerçekleştirilmiştir. Gömülü bilgisayar yardımıyla geliştirilen sistemde Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanılarak her bir senaryodaki sanal kaçak konumları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Birinci senaryoda gezinti güzergâhının toplam uzunluğu 23,45 metre olarak belirlenmiş ve sağa sola sapma olmadan yaklaşık olarak 45°'lik bir açıyla kuzey-doğu yönünde kayıt sisteminin hareketi sağlanmıştır. Çatlak konumu başlangıç noktasından 13,4 metre uzaklıktadır. İkinci senaryoda toplamda 45,77 metrelik kapalı bir sistem tasarlanmıştır. Çatlak konumu hareket başlangıç noktasından 25,23 metre uzaklıktadır. Üçüncü senaryoda ise toplamda 50 metre gidilmiş ve çatlak konumu 35,165 metre uzaklıktadır.

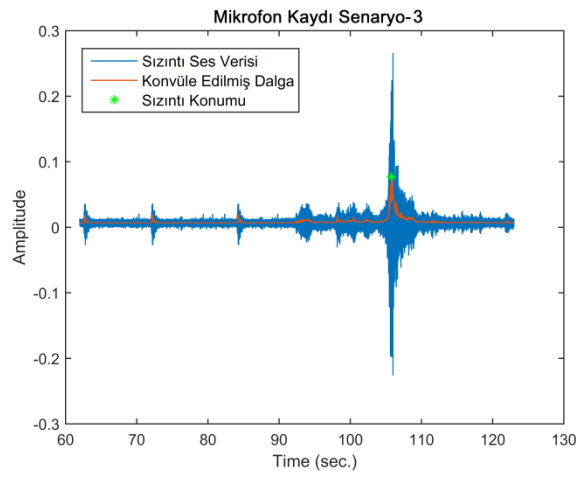
Tüm senaryolarda ilk olarak ses verisi işlenmiş ve kaçağın saniye cinsinden konumu tespit edilmiştir. Şekil 6.5'de mavi renkli sinyal boru içerisinde mikrofondan alınan su sesini, kırmızı renkli sinyal konvüle edilmiş sesi, yeşil nokta ise kaçağın olduğu noktayı saniye cinsinden temsil etmektedir.



(a)



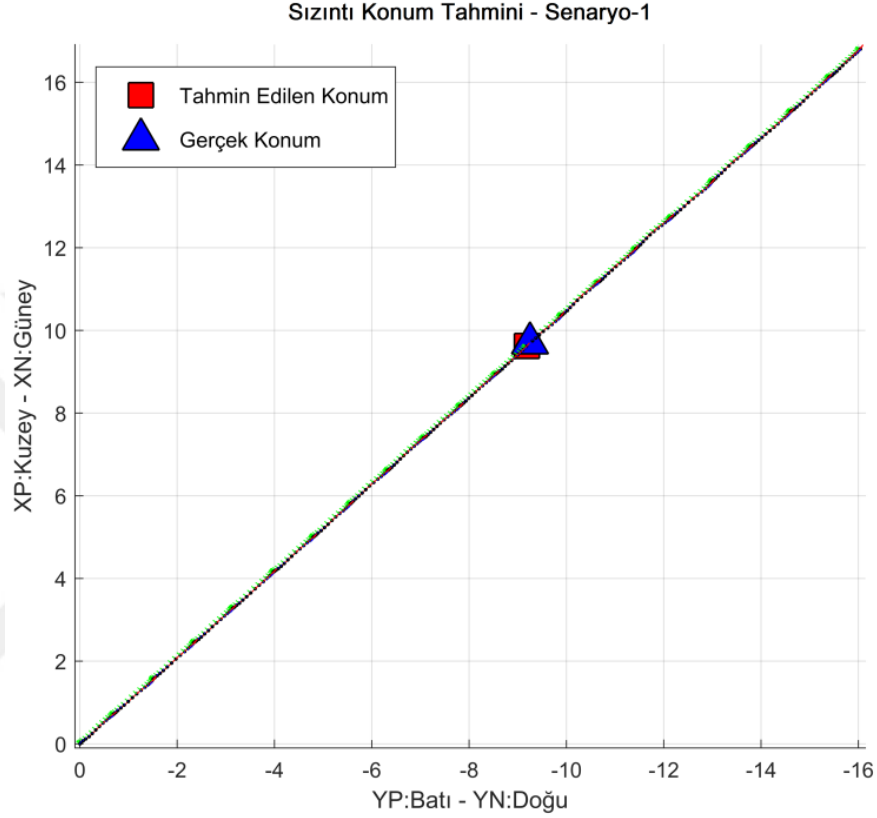
(b)



(c)

Şekil 6.5. Ses verisi kullanılarak kaçak konumunun tespit edilmesi: (a) Senaryo-1, (b) Senaryo-2, (c) Senaryo-3.

Şekil 6.6’da gerçek konum mavi üçgenle tahmin edilen kaçak konumu ise kırmızı kare ile verilmiştir. Boru içerisindeki IMU sensör hareketinin kuzey-doğu yönünde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum sensör koordinat sisteminden global koordinat sistemine geçişin doğru olarak gerçekleştiğini ve konumun doğru hesaplandığını ispatlamaktadır.



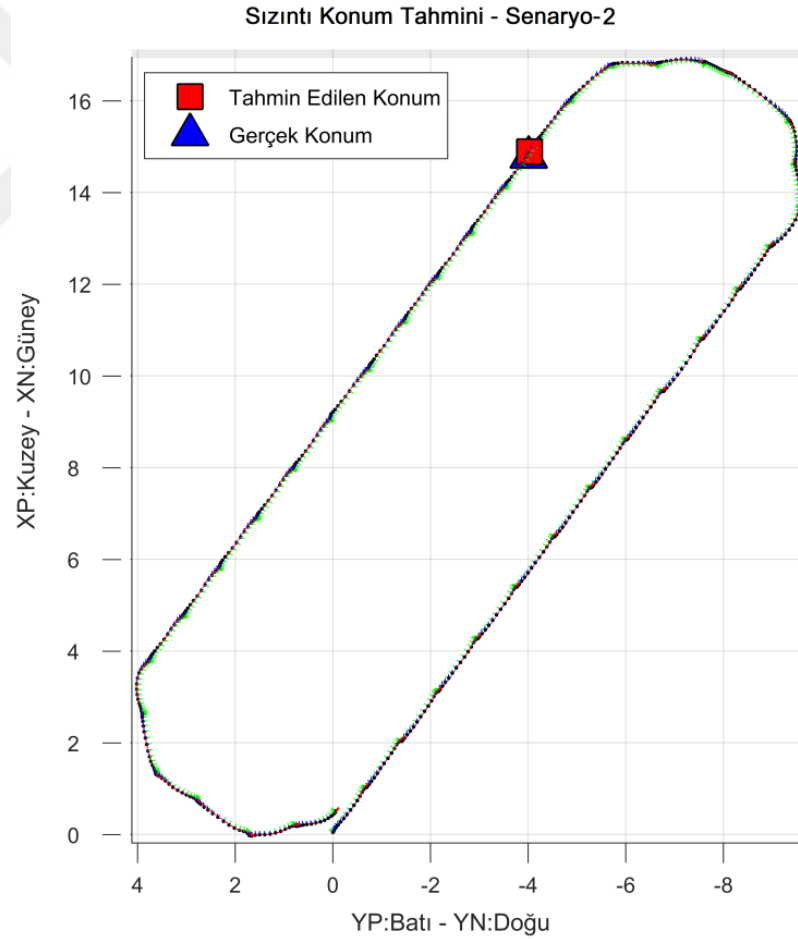
Şekil 6.6. Gerçek ve tahmin edilen kaçak konumu, Senaryo-1

Çizelge 6.1’de oluşturulan senaryolara ait gerçek ve hesaplanan konum bilgileri verilmektedir. Genişletilmiş Kalman Filtresi ile tasarlanan sistemin hatasının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

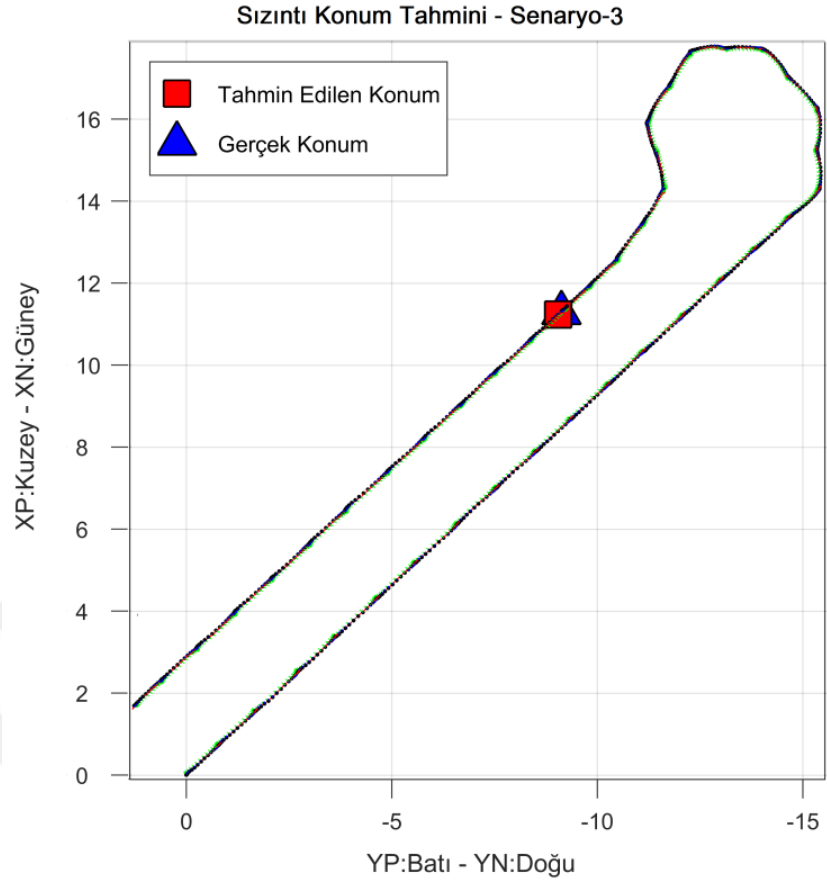
Çizelge 6.1. Kaçak senaryolarına ait gerçek ve tahmin edilen konum değerleri

Senaryo	Gidilen Toplam Mesafe (m.)	Kaçak Konumu (m.)	Hesaplanan Konum (m.)	Hata (m.)
Senaryo1	23,45	13,4	13,307	0,093
Senaryo 2	45,77	25,23	25,161	0,069
Senaryo 3	50	35,165	35,270	-0,105

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de ikinci ve üçüncü senaryoya ait gerçek ve tahmin edilen kaçak konumları verilmiştir.



Şekil 6.7. Gerçek ve tahmin edilen kaçak konumu, Senaryo-2.



Şekil 6.8. Gerçek ve tahmin edilen kaçak konumu, Senaryo-3.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Su boru hatlarındaki kaçakların varlığını ve konumunu tespit etmek için farklı yöntemler ve sistemler geliştirilmiştir. Günümüzde donanım tabanlı ve yazılım tabanlı olarak gruplandırılan konum tespit sistemleri mevcut olmasına rağmen, kullanıcı kaynaklı birçok hatadan dolayı kaçak varlığı ve konumu tespit edilememektedir. Özellikle boru içerisinde otonom olarak hareket ederek, GPS gibi dış sensörlerden bağımsız çalışan bir sistem bulunmamaktadır. Sistemin otonom tasarımı kullanıcıdan kaynaklanan hataların ortadan kaldırılmasını hedeflemektedir. Bu noktadan hareket ile tez çalışmasında suyun akışı ile boru içerisinde hareket eden su kaçağı konum tespit sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem üç farklı senaryo üzerinde çalıştırılarak elde edilen sonuçlarla sistemin başarımı ortaya konulmuştur.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar TÜBİTAK 3501–Kariyer Projeleri programı tarafından 215E075 proje numarası ile desteklenmiştir. Proje ve tez çalışmaları kapsamında gerekli mini bilgisayar, IMU sensör ve hidrofon donanımları temin edilerek konum tespit çalışmaları yapılmıştır.

Literatürde mevcut olan kaçak konumu tespit çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde birçok çalışmanın PIG tabanlı veya yazılımsal olarak basınç değişimine dayanan çalışmalar olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle boru içerisinde suyun akışıyla hareket eden su kaçağı konum tespit çalışmaları oldukça azdır.

Günümüze kadar yürütülmüş olan tüm çalışmalara bakıldığında, geliştirilen konum tespit çalışmalarının birçoğundaki ana dezavantaj kaçak konum tespiti yapılacak bölgede su pompalama sisteminin bir süre çalışmasının durdurulması gerekliliğidir. Bu çalışmada önerilen yöntemde ise bölgede kesinlikle su kesintisine gerek kalmamaktadır. Ayrıca çalışmalarda kullanılan yöntemler genellikle boru hattının hemen yanında ve boru hattı boyunca başka bir sistemin gerekliliğidir. Bu durum ciddi maliyetlere neden olmaktadır.

Oluşturulan farklı kaçak ve kayıp tespit senaryolarında, gerçekleştirme aşamasına geçildiğinde ARM işlemcili bir bilgisayar kullanılarak IMU sensör verisi ile eş zamanlı olarak ses kaydı yapılmıştır. Elde edilen sensör verileri ve ses kaydı ikinci bir bilgisayara aktararak veri toplama adımı bitirilmiştir. Bu adımdan sonra

tez çalışmasında uygulanan yöntem genel olarak iki temel aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada Genişletilmiş Kalman Filtresi temeline dayanan sensör füzyonu metodu ile sensör verileri kullanılarak kabul edilebilir hata oranına sahip kuaterniyon vektörleri elde edilmiştir. Jiroskop sensöründen elde edilen açısal değerler hataya sahip olduğundan tek başına yönelim bilgisini içermemektedir. Yardımcı sensör olarak ivmeölçer sensörünün kullanılması durumunda yerçekimi devreye girmekte ve Z eksenindeki yaw açısı tahmin edilememektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için manyetik alan sensörü de devreye sokularak X,Y ve Z eksenlerindeki açısal yönelim kuaterniyon vektörü cinsinden hesaplanmıştır. Tez çalışmasının ikinci aşamasında kaçak konum tespiti işlemine geçilmiştir. Gerçek zamanlı olmayan çalışmalar Matlab programı ile kodlanarak geliştirilmiştir.

GPS sinyallerinden bağımsız olarak sadece IMU sensör ile çalışan sistemde sensör maliyeti azaltılmıştır. Gelecek çalışmada su altına inilerek hidrofona yardımıyla alınan ortam sesinin incelenmesi ve fiziksel olarak tamamlanacak robotla kaçak konumunun tespiti planlanmıştır.

8. KAYNAKLAR

- [1] R. McKenzie and C. Seago, *Assessment of real losses in potable water distribution systems: some recent developments*, **Water Sci. Technol. Water Supply**, 5:1 (2005) 33–40.
- [2] Dalius Misiunas. “*Failure monitoring and asset condition assessment in water supply systems*” PhD Thesis, Lund University Sweden, 2005.
- [3] D. Weimer, *Water Loss Management and Techniques*, Technical report, DVGW, The German Technical and Scientific Association for Gas and Water, (2001).
- [4] L. S. Mcneill and M. Edwards, *Review of iron pipe corrosion in drinking water distribution systems*, **J. Am. Water Works Assn.**, 93:7 (2001) 88–100.
- [5] Y. Kleiner, B. J. Adams and J. S. Rogers, *Water distribution network renewal planning*, **J. Comput. Civil Eng.**, 15:1 (2001) 15–26.
- [6] U.S. Environmental Protection Agency, *Deteriorating buried infrastructure management challenges and strategies*, Technical report, American Water Works Service Co., Inc. Engineering Dept. Washington, DC, USA, (2002).
- [7] J. Makkar, R. Desnoyers and S. McDonald, “*Failure modes and mechanisms in gray cast iron pipe*”, Underground Infrastructure Research; Municipal, Industrial and Environmental Applications, Kitchener, Ontario, Canada, Jun. 10-13, (2001), pp.1–10.
- [8] Cathodic protection prolonging life of iron watermain, Daily Commercial News. (2009). <http://prod5.dailycommercialnews.com/article/id34052> (on-line access on 13 Apr, 2017).
- [9] B. Rajani and S. Tesfamariam, *Uncoupled axial, flexural and circumferential pipe-soil interaction analyses of partially supported jointed water mains*, **Can. Geotech. J.**, 41:6 (2004) 997–1010.
- [10] H. Alegre, J. M. Baptista and E. C. Jr, *Performance Indicators for Water Supply Services*, 3rd Revised edition, IWA Publishing, 2016.
- [11] A. Hewitt, California water agencies don’t know how much their pipes leak, UCLA report finds, UCLA Newsroom. (2015). <http://newsroom.ucla.edu/releases/california-water-agencies-dont-know-how-much-their-pipes-leak-ucla-report-finds> (on-line access on 09 Jun, 2017).
- [12] Anadolu’da Bugün. (2015). <http://www.anadoludabugun.com.tr/konyada-kacak-su-kullanimi-var-mi-56423h.htm> (on-line access on 09 Jun, 2017).
- [13] IWA/AWWA Water Audit Method, AWWA. (2012). <http://www.awwa.org/portals/0/files/resources/water%20knowledge/water%20loss%20control/iwa-awwa-method-awwa-updated.pdf> (on-line access on 10 Jun, 2017).
- [14] A. W. W. Association, *Water Audits and Loss Control Programs(M36): AWWA Manual of Practice*, 4th edition. Denver: American Waterworks Association, 2016.
- [15] Andrew F. Colombo and Bryan W. Karney, *Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture*, **J. Water Resour. Plann. Manage.**, 128:6 (2002) 441–450.

- [16] WHO Progress on sanitation and drinking water, WHO. (2015). http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/jmp-2015-update/en/ (on-line access on 09 Jun, 2017).
- [17] P. Marin, B. Kingdom and R. Liemberger, *The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries - how the private sector can help: a look at performance-based service contracting*, The World Bank, 39405, (2006).
- [18] S. M. Hooda, *Rajasthan Water Assessment: Potential for private sector interventions*, International Finance Corporation New Delhi, World Bank, (2017).
- [19] Türkiye İstatistik Kurumu, Belediye Su İstatistikleri, 2014. (2014). <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18779> (on-line access on 11 July, 2017).
- [20] Su Kayıplarının Önlenmesi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı - Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Ankara, (2016).
- [21] M. YAKAR, Türkiye Belediyeler Birliği - Genel İstatistikler. (2016). <http://www.tbb.gov.tr/belediyelerimiz/istatistikler/genel-istatistikler/> (on-line access on 13 Jun, 2017).
- [22] R. Puust, Z. Kapelan, D. A. Savic and T. Koppel, *A review of methods for leakage management in pipe networks*, **Urban Water J.**, 7:1 (2010) 25–45.
- [23] O. Hunaidi, A. Wang, M. Bracken, T. Gambino and C. Fricke, “Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe networks,” in *International Conference on Water Demand Management*, May 30-June 3, (2004), pp.1–14.
- [24] R. Pilcher, *Leak location and repair guidance notes and the never ending war against leakage*, **Proc. Water Loss 2**, (2007).
- [25] Sewerin AQUAPHON A 200 Leak-Survey-Tool. (2017). <http://muinin.com/aquaphon-a-200/> (on-line access on 14 Jan, 2017).
- [26] F. Trentmann, *Empire of Things: How We Became a World of Consumers, from the Fifteenth Century to the Twenty-First*, Penguin, UK, (2016).
- [27] Deacon Meter. (2017). <https://www.digitalcommonwealth.org/search/commonwealth:g732dh77b> (on-line access on 18 Jun, 2017).
- [28] FUJI TECOM INC. (2010). <http://www.fujitecom.com/howto/LC2500.html> (on-line access on 17 Jun, 2017).
- [29] P. S. Murvay and I. Silea, *A survey on gas leak detection and localization techniques*, **J. Loss Prev. Process Ind.**, 25:6 (2012) 966–973.
- [30] J. Zhang, *Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system*, **Pipes Pipelines Int.**, 42:1 (1997) 20-26.
- [31] W. E. Lowry, S. D. Dunn, R. Walsh, D. Merewether and D. V. Rao, *Method and system to locate leaks in subsurface containment structures using tracer gases*, US Patent 6035701A, March 2000.
- [32] O. Hunaidi, A. Wang, M. Bracken, T. Gambino and C. Fricke, *Detecting leaks in water distribution pipes*, **Arab Water World**, 29:4 (2005) 52–55.

- [33] W. A. Heitbrink, G. S. Earnest, R. L. Mickelsen, K. R. Mead and J. B. D'Arcy, *Evaluation of leakage from a metal machining center using tracer gas methods: a case study*, **Am. Ind. Hyg. Assoc. J.**, 60:6 (1999) 785–788.
- [34] A. Mishra, “*Leakage detection using fiber optics distributed temperature sensing*”, 6th Pipeline Technology Conference, Hannover, Germany, Apr.04-05, (2011).
- [35] P. Rajeev, J. Kodikara, W. K. Chiu and T. Kuen, *Distributed optical fibre sensors and their applications in pipeline monitoring*, **Key Eng. Mater.**, 558 (2013) 424–434.
- [36] G. Geiger, *State-of-the-art leak detection and localization*, **Oil Gas Eur. Mag.** 32:4 (2006) 193.
- [37] S. Burn, D. DeSilva, M. Eiswirth, O. Hunaidi, A. Speers and J. Thornton, *Pipe leakage - future challenges and solutions*, **Pipes Wagga Wagga**, (1999) 1–18.
- [38] A. Stampolidis, P. Soupios, F. Vallianatos and G. N. Tsokas, “*Detection of leaks in buried plastic water distribution pipes in urban places - a case study*” in Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, May (2003), pp.120–124.
- [39] S. Y. Hyun, Y. S. Jo, H. C. Oh and S. Y. Kim, “*An experimental study on a ground-penetrating radar for detecting water-leaks in buried water transfer pipes*” in 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Proceedings, New Orleans, Oct. (2003), pp.596–599.
- [40] S. Hamilton and D. Hartley, *Misconceptions around acoustic leak detection*, **Water21 Magazine Int. Water Assoc. IWA Publ.**, (2010) 54–56.
- [41] S. Demirci, E. Yigit, I. H. Eskidemir and C. Ozdemir, *Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method*, **NDT and E Int.**, 47 (2012) 35–42.
- [42] D. Ayala–Cabrera, M. Herrera, J. Izquierdo, S. J. Ocaña–Levario and R. Pérez–García, *Gpr-based water leak models in water distribution systems*, **Sensors**, 13:12 (2013) 15912–15936.
- [43] T. Guibin, Z. Shimin, Z. xiaoxiao, S. Liyun and Z. Qingbao, “*Research on Bypass-valve and its Resistance Characteristic of Speed Regulating PIG in Gas Pipeline*” in 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Jan. (2011), 2, pp.1114–1117.
- [44] Nord Stream AG - Intelligent PIG. (2012). https://www.nord-stream.com/media/picture_library/rgb_small/en/2011/11/pig_3255_20111107.jpg (on-line access on 20 Jun, 2017).
- [45] A. Chastain-Howley, *Transmission main leakage - how to reduce the risk of a catastrophic failure*, **Leakage**, (2005).
- [46] B. Mergelas and G. Henrich, *Leak locating method for pre-commissioned transmission pipelines: North American case studies*, **Leakage**, (2005).
- [47] Sahara Leak Det. Pure Technologies, (2015). <https://www.puretechltd.com/technologies-brands/sahara/sahara-leak-detection> (on-line access on 20 May, 2017).

- [48] H. V. Fuchs and R. Riehle, *Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis*, **Appl. Acoust.**, 33:1 (1991) 1–19.
- [49] H. A. Warda, I. G. Adam and A. B. Rashad, “A practical implementation of pressure transient analysis in leak localization in pipelines” in International Pipeline Conference, Oct. (2004), pp.2193–2200.
- [50] J. E. Hough, *Leak testing of pipelines uses pressure and acoustic velocity*, **Oil Gas J.**, 86:47 (1988).
- [51] Mohd Fairusham Ghazali. “Leak detection using instantaneous frequency analysis” PhD Thesis, University of Sheffield, United Kingdom, 2012.
- [52] R. S. Whaley, J. Van Reet and R. E. Nicholas, *A tutorial on computer based leak detection methods*, **PSIG Annual Meeting**, (1992).
- [53] C. P. Liou, *Mass imbalance error of waterhammer equations and leak detection*, **J. Fluids Eng.**, 116:1 (1994) 103–109.
- [54] B. Parry, R. MacTaggart and C. Toerper, “Compensated volume balance leak detection on a batched LPG pipeline”, in Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (1992) pp.501–507.
- [55] H. A. S. E. Staff and M. Stafford, *Pipeline Leak Detection Study*, HSE Books, (1996).
- [56] C. X. Hou and E. H. Zhang, *Pipeline Leak Detection Based on Double Sensor Negative Pressure Wave*, **Appl. Mech. Mater.**, 313–314 (2013) 1225–1228.
- [57] J. Mashford, D. D. Silva, D. Marney and S. Burn, “An approach to leak detection in pipe networks using analysis of monitored pressure values by support vector machine” in Proceedings of the 2009 Third International Conference on Network and System Security, Washington, DC, USA, 2009, pp.534–539.
- [58] H. Chen, H. Ye, C. LV and H. Su, “Application of support vector machine learning to leak detection and location in pipelines” in Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510), May (2004), 3, pp.2273–2277 Vol.3.
- [59] J. Zhao, D. Li, H. Qi, F. Sun and R. An, “The fault diagnosis method of pipeline leakage based on neural network” in 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Aug. (2010), 1, pp.322–325.
- [60] Marco Ferrante, Bruno Brunone and Silvia Meniconi, *Wavelets for the Analysis of Transient Pressure Signals for Leak Detection*, **J. Hydraul. Eng.**, 133:11 (2007) 1274–1282.
- [61] H. V. da Silva, C. K. Morooka, I. R. Guilherme, T. C. da Fonseca and J. R. P. Mendes, *Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system*, **J. Pet. Sci. Eng.**, 49:3 (2005) 223–238.
- [62] M. T. Angulo and C. Verde, “Second-order sliding mode algorithms for the reconstruction of leaks” in 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), Oct. (2013), pp.566–571.

- [63] O. M. Aamo, A. Smyshlyaev, M. Krstic and B. A. Foss, *Output feedback boundary control of a Ginzburg ndash; Landau model of vortex shedding*, **IEEE Trans. Autom. Control**, 52:4 (2007) 742–748.
- [64] J. Zhang, *Statistical pipeline leak detection for all operating conditions*, **Pipeline Gas Journal**, 228:2 (2001) 42–45.
- [65] M. Daneti, “On using double power spectral density information for leak detection” in 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Feb. (2013), 1162–1167.
- [66] A. Kadri, A. Abu-Dayya, R. Stefanelli and D. Trincherro, “Characterization of an acoustic wireless sensor for water leakage detection in underground pipes” in 2013 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), Feb. (2013), pp.1–5.
- [67] P. Ridao, M. Carreras, D. Ribas and R. Garcia, *Visual inspection of hydroelectric dams using an autonomous underwater vehicle*, **J. Field Rob.**, 27:6 (2010) 759–778.
- [68] A. Cataldo, G. Cannazza, E. D. Benedetto and N. Giaquinto, *A new method for detecting leaks in underground water pipelines*, **IEEE Sens. J.**, 12:6 (2012) 1660–1667.
- [69] L. Zhang, Y. Wu, L. Guo and P. Cai, *Design and implementation of leak acoustic signal correlator for water pipelines*, **Information Technology Journal**, 12:11 (2013) 2195–2200.
- [70] Pipeline Inspection. (2017). <https://www.nde-ed.org/AboutNDT/SelectedApplications/PipelineInspection/PipelineInspection.htm> (on-line access on 21 Jan, 2017).
- [71] O. A. Barbian and Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, “*Handbook automated ultrasonic testing systems*”, Düsseldorf: DVS Media, 2008.
- [72] Inuktun - World-class Remotely Controlled Camera Robotic Pipe Inspection Systems and Robotic Crawlers. (2017). <http://www.inuktun.com/crawler-vehicles/> (on-line access on 21 Jan, 2017).
- [73] Pipeline Explorer Overview. (2017). <http://www.nrec.ri.cmu.edu/projects/explorer/> (on-line access on 21 Jan, 2017).
- [74] A. Ahrary, L. Tian, S. Kamata and M. Ishikawa, “An autonomous sewer robots navigation based on stereo camera information” in 17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI’05), Nov. (2005), 6, p.633.
- [75] A. Mazumdar and H. H. Asada, *Pulse width modulation of water jet propulsion systems using high-speed coanda-effect valves*, **J. Dyn. Syst. Meas. Contr.**, 135:5 (2013) 051019-051019-11.
- [76] Purdue University Smart Ball. (2017). http://wpvcemweb02.itap.purdue.edu/ect/links/technologies/mechanical/SmartBall_LeakDetection.aspx (on-line access on 21 Jan, 2017).

- [77] Y. Hao, W. Yuan, J. Xie, Q. Shen and H. Chang, *Design and verification of a structure for isolating packaging stress in soi mems devices*, **IEEE Sens. J.**, 17:5 (2017) 1246–1254.
- [78] R. A. Serway, C. Vuille and J. S. Faughn, “*College Physics, 8th Edition*” 8th edition. Belmont, CA: Cengage Learning, 2008.
- [79] P. F. Partnership, *An Introduction to MEMS*, PRIME Faraday Partnership, 2003.
- [80] Gyroscopic motion (2017). <http://ryono.net/appphysics/rotation/nutations.pdf> (on-line access on 05 Jul, 2017).
- [81] Jiroskop uçuş göstergeleri (2015). <http://www.caneracarbay.com/jiroskopik-ucus-gostergeleri-1/> (on-line access on 02 Jul, 2017).
- [82] VilleKaajakari, *Practical Mems: Design of Microsystems Accelerometers Gyroscopes RF Mems Optical Mems and Microfluidic Systems*, SmallGearPublishing, 2009.
- [83] Y. Chen, J. Jiao, B. Xiong, L. Che, X. Li and Y. Wang, *A novel tuning fork gyroscope with high Q-factors working at atmospheric pressure*, **Microsyst. Technol.**, 11:2–3 (2005) 111–116.
- [84] C. Song, “*Commercial vision of silicon based inertial sensors*” in International Conference on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97 Chicago, Jun. (1997), 2, pp.839–842 vol.2.
- [85] D. M. Rozelle, *The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets*, (2009).
- [86] L. Foucault, Sur un nouvelle demonstration experimentale du mouvement de la terre fondee sur la fixite du plan de rotation, **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, 35 (1852) 421.
- [87] J. Bernstein, S. Cho, A. T. King, A. Kourepenis, P. Maciel and M. Weinberg, “*A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope*” in Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Feb. (1993), 143–148.
- [88] G. I. Dzhandzhgava, K. A. Bakhonin, G. M. Vinogradov and A. V. Trebukhov, *Strapdown inertial navigation system based on a hemispherical resonance gyro*, **Gyroscopy Navigation**, 1:2 (2010) 91–97.
- [89] Fizika i umetnost (2016). <https://svejefizika.wordpress.com/category/fizika-i-umetnost/> (on-line access on 02 Jun, 2017).
- [90] I. P. Prikhodko, S. A. Zotov, A. A. Trusov and A. M. Shkel, *Foucault pendulum on a chip: rate integrating silicon MEMS gyroscope*, **Sens. Actuators Phys.**, 177 (2012) 67–78.
- [91] NISTICO Andrea.pdf. (2013). http://engineering-sciences.uniroma2.it/MENU/DOWNLOAD/TESI/2013/2013_tesi%20NISTICO%20Andrea.pdf (on-line access on 10 June, 2017).
- [92] Mass-Spring-Damper System - Physics - Serendipedia. (2013). http://serendipedia.org/serendipedia/index.php?title=Mass-Spring-Damper_System_-_Physics (on-line access on 03 Jul, 2017).

- [93] I. Lee, G. H. Yoon, J. Park, S. Seok, K. Chun and K.-I. Lee, *Development and analysis of the vertical capacitive accelerometer*, **Sens. Actuators Phys.**, 119 8–18.
- [94] Accelerometers (2008). <https://www.pc-control.co.uk/accelerometers.htm> (on-line access on 02 Jun, 2017).
- [95] N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi, Micromachined inertial sensors, **Proc. IEEE**, 86:8 (1998) 1640–1659.
- [96] K. Maenaka, “MEMS inertial sensors and their applications” in 5th International Conference on Networked Sensing Systems, Jun. (2008), pp.71–73.
- [97] MEMS @ BOSCH (2010). <http://www.findmems.com/bosch/mems-bosch-automotive-applications-and-beyond> (on-line access on 02 Jun, 2017).
- [98] MPU-6050 (2017). <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> (on-line access on 02 Jun, 2017).
- [99] V. T. Rouf, M. Li and D. A. Horsley, *Area-efficient three axis mems lorentz force magnetometer*, **IEEE Sens. J.**, 13:11 (2013) 4474–4481.
- [100] J. G. Webster, “*The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*,” 1st edition, Boca Raton, CRC Press, 1998.
- [101] C. I. Chang, M. H. Tsai, Y. C. Liu, C. M. Sun and W. Fang, “*Development of multi-axes CMOS-MEMS resonant magnetic sensor using Lorentz and electromagnetic forces*” in 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Jan. (2013), 193–196.
- [102] G. Langfelder and A. Tocchio, *Operation of lorentz-force mems magnetometers with a frequency offset between driving current and mechanical resonance*, **IEEE Trans. Magn.**, 50:1 (2014) 1–6.
- [103] M. Li, V. T. Rouf, G. Jaramillo and D. A. Horsley, “*MEMS Lorentz force magnetic sensor based on a balanced torsional resonator*” in Transducers Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers Eurosensors XXVII), Jun. (2013), 66–69.
- [104] Magnetic Fields (2012). <http://twistedsifter.com/2012/05/visualizing-magnetic-fields-compasses-iron-filings/> (on-line access on 02 Jun, 2017).
- [105] M. H. Afzal, V. Renaudin and G. Lachapelle, *Use of Earth’s Magnetic Field for Mitigating Gyroscope Errors Regardless of Magnetic Perturbation*, **Sensors**, 11:12 (2011) 11390–11414.
- [106] K. Parsa, T. A. Lasky and B. Ravani, *Design and implementation of a mechatronic, all-accelerometer inertial measurement unit*, **IEEE/ASME Trans. Mechatron.**, 12:6 (2007) 640–650.
- [107] K. R. Britting, *Inertial Navigation Systems Analysis*. Boston: Artech House Print on Demand, (2010).
- [108] A. Noureldin, T. B. Karamat and J. Georgy, *Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration*, Springer Science & Business Media, (2012).

- [109] P. G. Savage, “*Strapdown analytics*”, Strapdown Associates, 2000.
- [110] J. B. Kuipers, *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality*, Princeton, N.J.: Princeton University Press, 2002.
- [111] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Pearson New International Edition: Mechanics and Control*, 3rd edition, Pearson, (2013).
- [112] A. Alaimo, V. Artale, C. Milazzo, A. Ricciardello, T. Simos, G. Psihoyios and C. Tsitouras, *Comparison between Euler and quaternion parametrization in UAV dynamics*, **AIP Conf. Proc.**, 1558:1 (2013) 1228–1231.
- [113] S. L. Altmann, *Rotations, Quaternions, and Double Groups*, Mineola, NY: Dover Publications, (2005).
- [114] M. Wang, Y. Yang, R. R. Hatch and Y. Zhang, “Adaptive filter for a miniature MEMS based attitude and heading reference system” in PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556), Apr. (2004), pp.193–200.
- [115] I. Y. Bar-Itzhack, New Method for Extracting the Quaternion from a Rotation Matrix, **Journal of Guidance, Control and Dynamics**, 23:6 (2000) 1085–1087.
- [116] Wilfried Elmenreich. “*Sensor Fusion in Time-Triggered Systems*” PhD Thesis, Vienna University of Technology, Austria, 2002.
- [117] C. Li, C. Yang, J. Wan, A. S. Annamalai and A. Cangelosi, *Teleoperation control of Baxter robot using Kalman filter-based sensor fusion*, **Systems Science & Control Engineering**, 5:1 (2017) 156–167.
- [118] T. Zhang and Y. Liao, *Attitude measure system based on extended Kalman filter for multi-rotors*, **Comput. Electron. Agric.**, 134 (2017) 19–26.
- [119] Y. Liu, S. Gong and Y. Lu, “Estimation of inertial/magnetic sensor orientation for human-motion-capture system” in 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Apr. (2017), pp.175–179.
- [120] S. Qiu, Z. Wang, H. Zhao, K. Qin, Z. Li and H. Hu, *Inertial/magnetic sensors based pedestrian dead reckoning by means of multi-sensor fusion*, **Information Fusion**, 39 (2018) 108–119.
- [121] R. Kalman, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, **J. Basic Eng.**, 82 (1960) 35–45.
- [122] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, 2nd edition. Wiley-Interscience, (2001).
- [123] G. Bishop and G. Welch, *An Introduction to the Kalman Filter*, University of North Carolina, SIGGRAPH. ACM Inc., (2001).
- [124] R. Faragher, *Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation*, **IEEE Signal Process Mag.**, 29:5 (2012) 128–132.

- [125] H. P. Bruckner, C. Spindeldreier, H. Blume, E. Schoonderwaldt and E. Altenmuller, “*Evaluation of Inertial Sensor Fusion Algorithms in Grasping Tasks Using Real Input Data: Comparison of Computational Costs and Root Mean Square Error*”, in 9th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, May (2012), pp.189–194.
- [126] N. Trawny and S. I. Roumeliotis, *Indirect Kalman filter for 3d attitude estimation a tutorial for quaternion algebra multiple autonomous robotic systems laboratory*, Technical report, University of Minnesota, Dept. of Comp. Sci. and Eng., 2005-002, (2005).
- [127] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison and R. Vaidyanathan, “*Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*” in 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Jun. (2011), pp.1-7.
- [128] W. H. K. de Vries, H. E. J. Veeger, C. T. M. Baten and F. C. T. van der Helm, *Magnetic distortion in motion labs, implications for validating inertial magnetic sensors*, **Gait Posture**, 29:4 (2009) 535–541.
- [129] C. Wang, X. Qu, X. Zhang, W. Zhu and G. Fang, *A fast calibration method for magnetometer array and the application of ferromagnetic target localization*, **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, 66:7 (2017) 1743–1750.
- [130] A. M. Sabatini, *Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing*, **IEEE Trans. Biomed. Eng.**, 53:7 (2006) 1346–1356.
- [131] Butterworth Filtresi. (2017). https://tr.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filtre (on-line access on 04 Jul, 2017).

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Abdullah Erhan AKKAYA

Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya – 08.09.1983

Adres : İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü / MALATYA

E-Posta : abdullahakkaya@gmail.com / erhan.akkaya@inonu.edu.tr

Lisans : Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü – Elazığ (2007)

Yüksek Lisans : Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü – Kayseri (2012)

Mesleki Deneyimler : İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi (2011 – Devam ediyor)

Yayın listesi:

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

AKKAYA A.E. , TALU M.F., “Su Boru Hatlarında Sızıntı Konum Tespiti İçin Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı IMU Sensör Füzyonu Uygulaması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, (Kabul aldı).

TEZDEN TÜRETİLMEYEN YAYINLAR/SUNUMLAR

AKKAYA A.E. , TALU M.F., “Nesne Modelleme: Video İmgeleri Kullanılarak F-Matrisinin Hesaplanması”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 48 (3), pp. 9-20, Eylül 2014.

DANACI M., ÇELİK M., **AKKAYA A.E.**, “Veri Madenciliği Yöntemleri Kullanılarak Meme Kanseri Hücrelerinin Tahmin ve Teşhisi”, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU2010)*, Kayseri & Kapadokya, Haziran 2010, pp. 9-12.

AKKAYA A.E. , TALU M.F., “Nesne Görüntülerinden 3D Model İnşası İçin Etkin F-matrisi Hesaplanma Yöntemleri”, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU2014)*, Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, 2014. (*En İyi Bildiri Ödülü*), pp. 6-11.

AKKAYA A.E., TALU M.F., “Durağan Ortamda Gözlemci Konum Tahmini Yöntemlerinin Başarım Değerlendirmesi”, *IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU2015)*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2015. pp. 2462-2465. IEEE Xplore DOI:10.1109/SIU.2015.7130382.

AKKAYA A.E., “Protein Katlanması Problemine Genetik Algoritma Yaklaşımı”, *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP 2016)*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2016, pp. 69-72.

AKKAYA A.E., “Dijital Görüntü Dengeleme Yöntemlerinin Kıyaslanması”, *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP 2016)*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2016, pp. 352-355.