

KÜRESEL CİSİMLERİN POZİSYON KESTİRİMİNDE KUATERNİYON YAKLAŞIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ - SIZINTI TESPİT TOPU UYGULAMASI

Ersan YAZAN¹, M. Fatih TALU^{2*}

¹Adiyaman Üniversitesi, Besni Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Adiyaman, 02100, Türkiye

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, 044040, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 18.03.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 11.09.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1089972

ÖZET

Su kaynaklarının azalması sebebiyle alınan önlemlerden biri su iletim hattında oluşan sızıntı konumlarının doğru tespittir. Bu nedenle sızıntı tespiti ile ilgili çalışmalar önem arz etmektedir. Bu çalışmada, su borularındaki sızıntı olan bölgelerin tespitinde kullanılmak üzere küre şeklinde bir top üretilmiş ve bu topun gezinti esnasında anlık konum bilgisinin en doğru hesaplanabileceği yöntemler araştırılmıştır. Xsens firmasının IMU sensörünü içeren topun belirli hareket güzergâhlarında gezintisi sağlanmış ve anlık ivme, açısal hız ve kuaterniyon verileri toplanmıştır. Kuaterniyon değerinin pozisyon üzerindeki etkisini analiz edebilmek için iki farklı Kuaterniyon hesaplama yaklaşımının (Madgwick ve Mahony) sonuçları değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar, pozisyon tahmin doğruluğunun tatmin edici düzeyde olduğunu ve yapılan çalışmanın sızıntı tespit sistemlerinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Kuaterniyon, imu, madgwick, mahony, pozisyon takibi, sızıntı tespiti*

EVALUATION OF QUATERNION APPROACHES IN ESTIMATING THE POSITION OF SPHERICAL BODIES- LEACK DETECTION BALL APPLICATION

ABSTRACT

One of the measures taken due to the decrease in water resources is the accurate detection of leakage locations in the water transmission line. For this reason, studies on leak detection are important. In this study, a spherical ball was produced to be used in the leak detection areas in the water pipes and the methods by which the instant position information of this ball can be calculated most accurately were investigated. The ball containing the IMU sensor of Xsens company was provided to travel on certain movement paths and instantaneous acceleration, angular velocity and quaternion data were collected. In order to analyze the effect of quaternion on position, the results of two different Quaternion calculation approaches (Madgwick and Mahony) were evaluated. Experimental studies show that the position estimation accuracy is satisfactory and the study can be used in leak detection systems.

Keywords: *Quaternion, imu, madgwick, mahony, position tracking, leak detection*

1. Giriş

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada, özellikle küresel ısınmaya bağlı olarak yaşanan mevsimsel değişimler neticesinde yağışların azalmasıyla birlikte, giderek artan nüfus oranı mevcut su kaynaklarının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Dünya Bankası bu konuda 2017 yılında hazırlamış olduğu raporda

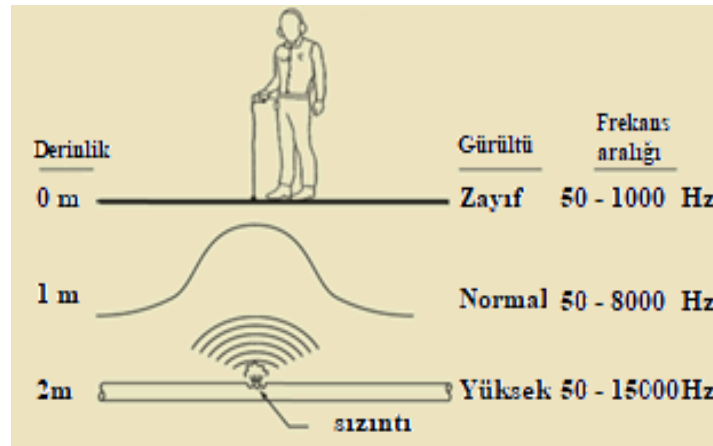
e-posta¹ : eyazan@adiyaman.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3315-241X> (Sorumlu Yazar)

* e-posta² : mfatihaltu@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1166-8404>

mevcut su politikalarında bir düzenleme olmadığı takdirde 2025 yılında dünya nüfusunun üçte ikisinin susuz kalacağı tahmininde bulunmuştur [1].

Birçok ülkede kaynakların yetersizliği sebebiyle su kaynaklarının daha verimli kullanılması, gereksiz kullanımların ve su kayıplarının önüne geçilmesine yönelik politikalar geliştirilmeye başlanmıştır. Bu bağlamda bu alanda birçok çalışma yapılmış ve hala yapılmaktadır. Su kayıplarının önlenmesi bu çalışmaların başında gelmektedir.

Sızıntı tespiti ile ilgili bilinen en eski ve klasik yöntem, yer altındaki boru hattının yer üzerinde uzman bir kişi tarafından dinlenerek çatlaktan sızan suyun sesini bulmaya çalışmasıdır [2]. Dış ortamdan kaynaklanan sesler, borudaki çatlaktan gelen sesi bastırabileceği için, dinleme işleminin dış ortam gürültüsünün az olduğu gece saatlerinde yapılması tercih edilir. Çatlaktan gelen ses borunun yapıldığı malzeme, borunun boyutu, çatlağın büyüklüğü ve suyun basıncı gibi faktörlere göre değişmektedir. Bu nedenle yöntemin başarısı dinleme yapan kişinin yeteneğine bağlıdır. Bu yöntem düşük maliyetli olmasına karşılık sızıntının hızlı tespit edilememesi ve tahmin doğruluk oranının düşük olması sebebiyle etkili bir yöntem değildir.

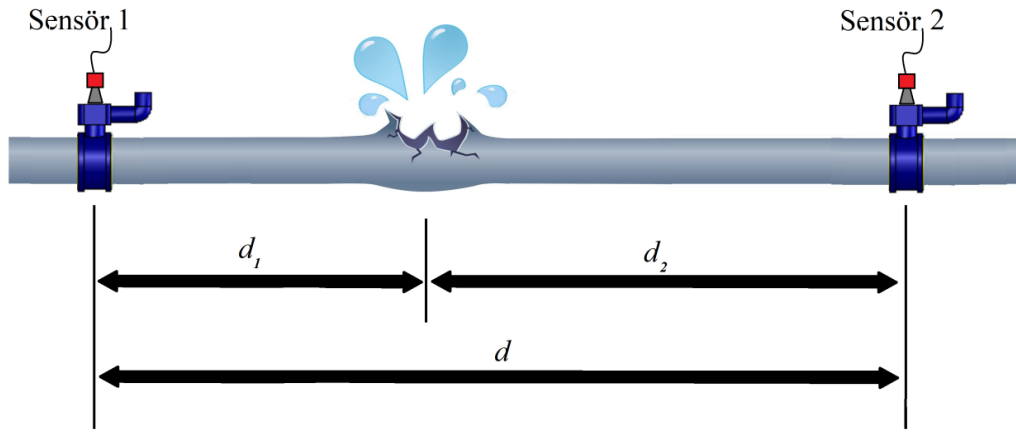


Şekil 1. Geleneksel yer üstü kaçak tespit yöntemi [3]

Yer üzerinden dinlemenin çok verimli olmaması sebebiyle farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İz sürücü gazların kullanımı bu yöntemlerden birisidir [4]. Bu yöntemde zehirli olmayan ve suda çözünemeyen, havadan hafif hidrojen veya helyum gibi bir gaz boru hattına enjekte edilir ve bu gaz, sızıntının olduğu noktada yüksek basınçla dışarı çıkar. Gaz detektörleri ile sızıntı noktasının konumu tahmin edilebilir. Küçük sızıntıların tespitinde kullanılabilen yöntemin yüksek maliyetli olması ve uzun sürede sızıntıyı tespit etmesi gibi dezavantajları vardır [5]. Fiber optik kablo kullanımı ise bir başka yöntemdir [6]. Boru hattı içerisine döşenen fiber optik kablo ile özel bir madde teması geçerek kablonun sıcaklığını değiştirmesi neticesinde sızıntı tespiti yapılmaktadır. Kızıl ötesi ve termal kameralar da sızıntı tespitinde kullanılmaktadırlar [5]. Boruda sızıntı olması durumunda, sızıntının olduğu noktadan sızan su, çevresindeki toprak ısınımsını değiştirmektedir. Isı farkı bu kameralarla tespit edilebilmektedir. Yöntemin dezavantajı, termal kameraların özelliğinden dolayı, çevre sıcaklığından daha yüksek olan sıcak su boru hatları için kullanılabilmesidir. Bu nedenle şehir şebekelerindeki sızıntıların tespiti için kullanılamazlar. Radar sistemleri de sızıntı tespitinde kullanılan bir diğer yöntemdir [7]. Radardan yayılan elektromanyetik dalganın yansiyarak yüzeye dönme hızı sızıntının olduğu yerle sızıntı olmayan yer arasında farklılık göstermektedir. Bu özellik sayesinde sızıntılar tespit edilir. Boru dışındaki metal nesnelere yöntemin başarımını etkilemektedir. Bu yöntemde bir diğer dezavantaj ise farklı toprak türlerinde farklı frekansların seçilmesi gerektiğinden doğru frekansın seçim zorluğudur.

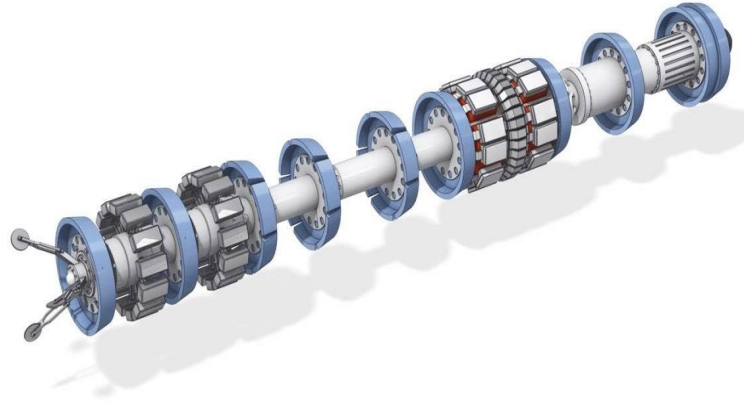
İletim borularında meydana gelen sızıntı neticesinde; suyun basıncında değişme, sızan suyun toprakta neme sebebiyet vermesi ve ısı farklılığı, iletim borularında titreşim ve normalden farklı bir ses meydana gelmesi gibi farklı durumlar meydana gelir [8]. Sızıntıların tespitine yönelik çalışmalarda genelde bu farklılıklardan yola çıkılarak çeşitli yöntemler öne sürülmüştür. Çatlak bölgesinden boru

dışına suyun sızması sonucunda toprak nemlenir ve ısı kaybeder. Yapılan bir çalışmada ısı değişimi gözlenerek sızıntının konumu hesaplanmaya çalışılmıştır [9]. Boru hattındaki sızıntı suyun basıncında bir düşüğe sebep olur. Bu ilkeye dayanarak sızıntı tespit eden sistemler de geliştirilmiştir [10]. Bu yöntemlerde, boru hattının belirli yerlerinden basınç ve akış bilgisi alınarak kaydedilir. Alınan basınç bilgileri eski bilgilerle karşılaştırılır ve arada belirli bir eşik değerinin üzerinde fark tespit edilirse sızıntı olduğu kararına varılır. Bu yöntem küçük çaplı sızıntılarda kesin sonuç vermeyebilir. Ayrıca sızıntı olmaması durumunda da şebeke basıncının düştüğü durumlarda sistemin bunu sızıntı olarak algılaması yöntemin bir diğer dezavantajıdır [11]. Titreşim ve ses verileri kullanılarak sızıntı konumu tahmin eden yöntemler de öne sürülmüştür. Bu yöntemlerde iletim borusu üzerinde iki farklı noktaya sensörler yerleştirilerek bu sensörlerden alınan veriler ile sızıntının konumu hesaplanır. Şekil 2.'de temsili resmi verilen yöntemde sensörler tarafından algılanan titreşim veya ses verisi gsm, gprs, rfid gibi farklı yöntemlerle merkezi birime iletilir. Sensörlerden toplanan bu veriler farklı tekniklerle işlenerek sızıntının olduğu nokta tahmin edilir.



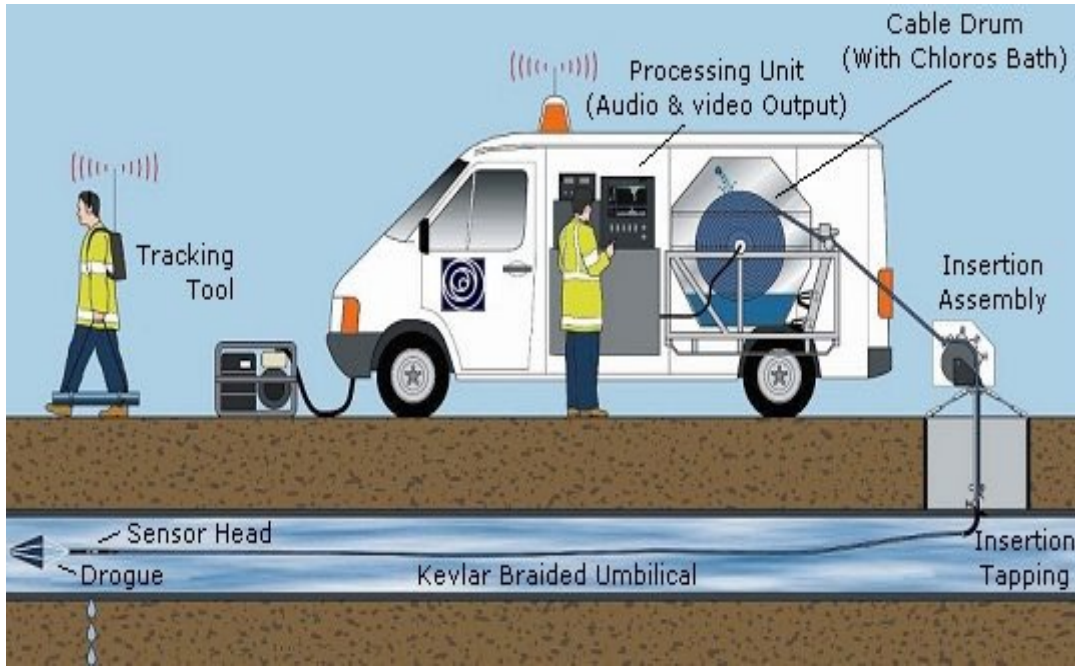
Şekil 2. Titreşim ve akustik sensörlerle sızıntı tespiti

Bu yöntemlerin sızıntı tespitindeki temel prensibi, sinyalin iki sensöre de geliş süreleri üzerinde konum tahminin yapılmasıdır. Bu tekniğe dayalı çalışmalar, temel prensibe bağlı olarak sızıntı konumunu tahmin etme yöntemleri açısından farklılık göstermektedirler. Bazı çalışmalarda [12].iki farklı sensörden gelen veriler çapraz korelasyon tekniği ile işlenerek sızıntı konumu tahmin edilmeye çalışılırken, frekans analizini kullanan çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda sensörlerden alınan sinyal önce Fast Fourier Transform (FFT) tekniği ile frekans ortamına taşındıktan sonra normal ses harmonisinin dışında kalan kısımlar tespit edilerek sızıntı olarak nitelendirilmektedir [13]. FFT dönüşümü ile zaman bilgisi kaybolduğundan dolayı frekans ve zaman bilgisinin birlikte kullanıldığı Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) gibi yöntemler de sızıntı tespit çalışmalarının da kullanılmıştır [14, 15]. Literatürde, bu yöntemlerin sızıntı tahminindeki başarımlarını arttırmak amacıyla çeşitli filtrelerle birlikte bu yöntemlerin uygulandığı çalışmalar da yer almaktadır [16, 17]. Bu iki yöntemin dışında makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak sızıntı konumunu tahmin edildiği çalışmalar da gerçekleştirilmiştir [18, 19]. Bu yöntemlerin genel olarak en büyük dezavantajı birden fazla sızıntının olduğu durumlarda başarımlarının düşük olmasıdır. Bu dezavantajı gidererek boru içerisinde gezinen özel robotlar yardımıyla sızıntıdan kaynaklanan basınç, titreşim ve ses gibi veriler ölçülerek sızıntı lokasyonunun tahminine yönelik cihazlar geliştirilmiştir. Bu çalışmalar daha çok ticari amaçlı geliştirilen çalışmalardır. Boru içerisinde serbest olarak hareket eden bu cihazlar boru hattı gözlem aleti (Pipeline Inspection Gauge – PIG) olarak nitelendirilirler [20, 21]. Sızıntı tespiti haricinde temizlik ve gözlem amaçlı olarak da geliştirilmiş PIG tabanlı cihazlar mevcuttur [22]. Şekil 3.'te Nord Stream AG firmasının geliştirdiği PIG cihazı gösterilmiştir.



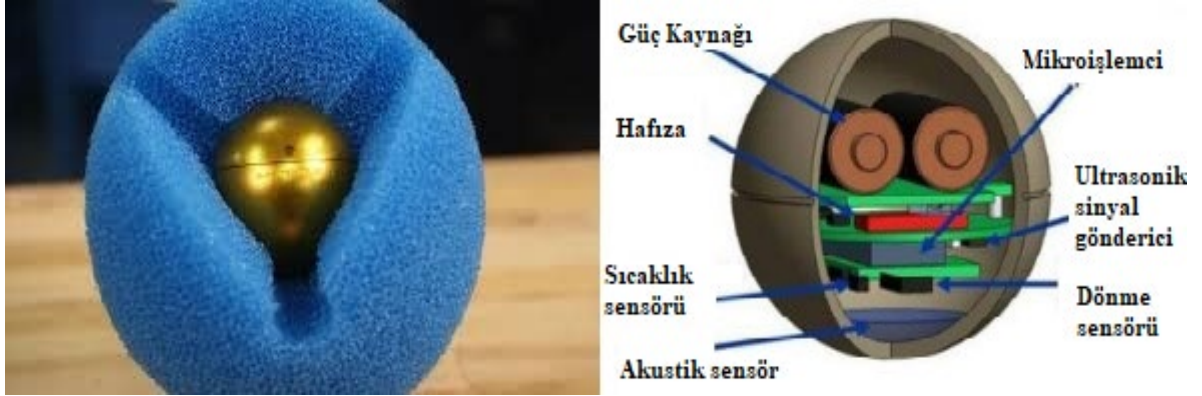
Şekil 3. Nord Stream AG firmasına ait Intelligent PIG

Boru hattı içerisinde gezinerek tespit yapan bir diğer sistem, İngiltere Su Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen ve Şekil 4’te şematiği gösterilen Sahara sistemidir.



Şekil 4. Sahara sisteminin şeması [20]

Bu sistemde akustik sensör bir kablo ile merkezi izleme cihazına bağlı olacak şekilde boru hattı içerisine bırakılır. Böylelikle sensör boru hattı içerisinde gezinirken sensörün konumu aynı anda izlenebilmektedir. Borunun üretildiği malzeme, çapı, yüzeydeki toprak tipi gibi faktörlerin önemsiz olduğu bu sistem diğer sistemlere göre pahalı bir sistemdir. Ayrıca kablo ile kullanıldığından dolayı boru hattı içerisinde belirli bir mesafeye kadar gidebilir. Bir diğer sızıntı tespit cihazı Pure Technologies tarafından geliştirilmiş ve SmartBall adını vermişlerdir [23]. Sudan ağır bir malzemeden üretilen ve dış yüzeyi süngerle kaplanan top şeklindeki cihaz boru hattına bırakılarak suyun akışıyla boru içerisinde ilerler. İçerisinde yerleştirilen akustik mikrofon ile ses dinlemesi yaparak merkezi birime kablosuz veri aktarımı yapmaktadır. Merkezi birimde sesler işlenerek sızıntı olup olmadığı tespit edilir. Aynı zamanda iki ayrı GPS alıcısı ile topun bulunduğu konum sürekli hesaplanmakta ve bu sayede sızıntının hangi konumda meydana geldiği tahmin edilmektedir. Pahalı bir sistem olan SmartBall’un çok küçük sızıntıları tespit edebilmesi ise en büyük avantajıdır.



Şekil 5. Pure Technologies firmasının geliştirdiği Akıllı Top (SmartBall)

Şebeke borularındaki su kaçağlarının tespiti konusunda gerçekleştirilen literatür taraması göstermiştir ki, boru hattı içerisine girerek su kaçağının konumunu tespit eden sistemler, borunun iki ucuna sabit monte edilerek titreşim dinleyen veya yer üzerinde yapılan tespit sistemlerinden daha etkilidirler.

Boru içi tespit sistemlerinde iki önemli yazılımın gerekli olduğu görülmektedir. Birincisi, boru içerisinde ilerleyen robotun konum bilgisini hassas bir şekilde tespit edilebilme yazılımı (navigasyon), ikincisi ise boru kaçak noktasından çıkan ses ile diğer tüm sesleri (suyun akıntısı, robotun yuvarlamasından veya çarpmasından oluşacak sesler) birbirinden ayırabilme yazılımı. Yapılan bu çalışmada henüz gerçek su boruları kullanılmadığı için sadece hassas konum tespiti yapabilen bir yaklaşım sunulmuştur. Bu nedenle bu çalışmada su dağıtım borularında meydana gelen sızıntıların konumunu, dağıtım şebekesinin işleyişine engel olmadan tespit edebilecek şekilde düşük maliyetli bir çözüm önerisi sunulmuştur.

Bu kapsamda makalenin ikinci bölümünde önerilen sistem için uygulanan metot hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde gerçekleştirilen deneyler ve çıktıları gösterilmiş son bölümde ise çalışmanın genel sonuçları hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

2. Materyal ve Metod

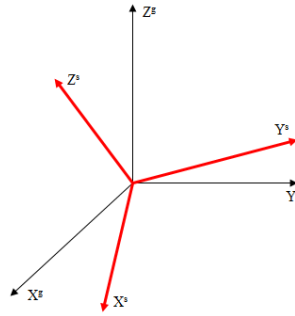
İvme değeri ile pozisyon hesabı yapılırken ivme değerlerinin iki defa integrali alındığından dolayı üstel hata artışına sebep olmaktadır [24]. Bu nedenle bu çalışmada gayro değeri ile pozisyon hesabı yapılmış, ivme değeri ise gyro sürüklenmesinden (gyro drift) kaynaklanan hatayı minimize etmek için kullanılmıştır.

Çalışmada boru içerisinde kaçakları tespit edebilecek top şeklinde cihazların konum tespiti için bir yöntem önerilmiştir. Bu nedenle öncelikle boru hatlarında gezebilecek top şeklinde bir cihaz yapılmıştır. Suyun itme kuvvetiyle borunun bir ucundan diğer uca hareketlenecek bu topun sürekli dönme hareketi gerçekleştireceği düşüncesiyle yer üzerinde yapılan konum tespit çalışmalarında dönme hareketini sağlayacak aparatlar kullanılmıştır. Boruda dönerek ilerleyecek topun içerisinde mikrofon bulunacak ve ortam sesinin kaydedilmesini sağlayacaktır. Gezinti sonrasında kaydedilen ses verisinin analiziyle kaçak bölgesinden çıkan sesin diğer ortam seslerinden ayıklanma işlemi gerçekleştirilecektir. Bununla birlikte top içerisindeki Inertial Measurement Unit (IMU – Atalet Ölçü Birimi) sensöründen alınan verilerin işlenmesiyle de topun gezindiği bölgenin grafiksel olarak haritalandırılması düşünülmüştür.

Bu çalışma kapsamında sadece pozisyon takibi yapılmış olup sonraki aşamada mikrofon ve IMU sensöründen alınan veriler zaman bilgisi ile birlikte kaydedilip, topun gezdiği bölge grafiği üzerinde sızıntı konumu gösterilmesi hedeflenmektedir.

Bir nesnenin anlık konumunun takip edilmesi amacıyla farklı teknikler uygulanmış ve farklı yöntemler öne sürülmüştür. Bu çalışmada da iletim hattındaki boru içerisinde yuvarlanarak hareket eden bir topun içerisinde yer alan IMU sensörü kullanılarak topun konumunun takip edilmesine yönelik bir yöntem önerilmiştir. IMU, içerisinde genel olarak ivmeölçer ve jiroskop barındıran ve bu cihazlar sayesinde ivme ve açısal hız bilgisi ölçen elektronik bir cihazdır. Bazı IMU çeşitlerinde manyetometre de yer almaktadır. IMU, konumlandırma, anlık pozisyon takibi, hareket/yön analizi ve bunların haricinde birçok alanda kullanılmıştır.

IMU ile pozisyon takibi çalışmalarında genel olarak ivmeölçer ile alınan ivme bilgisi kullanılmıştır. Anlık ivme verilerinin integrali alınarak hız bilgisi elde edilmiş ve hız bilgisi ile de yer değiştirme miktarı bulunarak pozisyon takibi yapılmıştır. Bunun için öncelikle üç ekseninde (x, y, ve z) alınan ve sensör koordinat sistemi üzerinde olan ivme bilgisi global koordinat sistemine dönüştürülür ve işlemler global koordinat sisteminde gerçekleştirilir. Sensör koordinat sisteminde X eksenini ileri yönünü, Y eksenini sağ ve Z eksenini de aşağı yönü temsil eder.



Şekil 6. Global ve sensör koordinat sistemlerinin temsili gösterimi

Şekil 6'da temsili olarak Global (dünya) ve sensör koordinat sistemleri gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere sensör (s) ve global (g) koordinat sistemlerinin merkezleri aynı noktadadır. Koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm genel olarak Koordinat Dönüşüm Matrisi (Direction Cosine Matrix – DCM), Euler Açılımları veya Kuaterniyon ile gerçekleştirilmektedir [25].

2.1. Koordinat Dönüşüm Matrisi (Direction Cosine Matrix - DCM)

Sensör koordinat sisteminden global koordinat sistemine dönüşüm yapılmak istendiğinde kullanılan 3X3 boyutundaki DCM eşitlik.1'de yer alan gR_s matrisi ile temsil edilir.

$${}^gR_s = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Eşitlik.1'de gösterilen her bir R_{ij} elemanı; sensör koordinat sistemindeki i. eksenini ve global koordinat sistemindeki j. eksen arasındaki açının kosinüs değerini temsil eder. DCM ile sensör koordinat eksenindeki bir vektörün global koordinat sistemine dönüşümü eşitlik.2'de verilen denklem ile gerçekleştirilir.

$$a^g = {}^gR_s \cdot a^s \quad (2)$$

2.2. Euler Açılımları (Euler Angels)

Bir koordinat sisteminden sırayla üç ayrı ekseninde sırayla ϕ, θ, ψ açıları kadar döndürme işlemi yapılarak başka bir koordinat sistemine geçiş yapılabilir. Dolayısıyla ilk eksene tekrardan dönüş yapılmak istendiğinde bu sefer sırayla ψ, θ, ϕ açıları kadar ters yönde döndürülmesi gerekecektir. İki

koordinat sistemi arasında dönüşümü sağlayan her bir eksenindeki bu açılara euler açıları denir. Sensör koordinat sisteminden global koordinat sistemine euler açıları ile dönüşüm yapılmak istendiğinde dönüşüm matrisi eşitlik.3 kullanılarak elde edilir.

$${}^g_sR = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\theta\cos\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3. Kuaterniyon (Quaternion)

Kuaterniyon bir koordinat sisteminin açısal konumunu başka bir referans koordinat sistemiyle ilişkilendiren bir değerdir. Bir skalar ve üç boyutlu karmaşık sayı vektöründen oluşan dört boyutlu bir vektördür. Sensör koordinat sisteminden global koordinat sistemine dönüşüm için tanımlanan kuaterniyon vektörü q ile gösterilir. Eşitlik.4'te gösterilen v_x , v_y ve v_z değerleri v vektörünün kendi ekseninde α açısı kadar döndürülmesi neticesinde X, Y ve Z eksenlerindeki bileşenleridir.

$$q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] = [\cos\frac{\alpha}{2} \quad -v_x\sin\frac{\alpha}{2} \quad -v_y\sin\frac{\alpha}{2} \quad -v_z\sin\frac{\alpha}{2}] \quad (4)$$

Kuaterniyon kullanılarak dönüşüm yapılmak istendiğinde öncelikle konjüge kuaterniyon değeri hesaplanır. Bu değer q^* ile gösterilir ve eşitlik.5' te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$q^* = [q_0 \quad -q_1 \quad -q_2 \quad -q_3] \quad (5)$$

Kuaterniyon vektörünün konjüge değeri bulunduğundan sonra sensör koordinat sistemindeki v^s vektörünün global koordinat sisteminde v^g vektörüne dönüşümü için eşitlik.6 kullanılır.

$$v^g = q \otimes v^s \otimes q^* \quad (6)$$

Eşitlik.6'da yer alan \otimes işlemi kuaterniyon çarpımını ifade eder. Eşitlik.7'de iki kuaterniyon vektörü p ve q için kuaterniyon çarpımı gösterilmiştir.

$$p \otimes q = [p_0 \quad p_1 \quad p_2 \quad p_3] \otimes [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] = \begin{bmatrix} p_0q_0 - p_1q_1 - p_2q_2 - p_3q_3 \\ p_0q_1 + p_1q_0 + p_2q_3 - p_3q_2 \\ p_0q_2 - p_1q_3 + p_2q_0 + p_3q_1 \\ p_0q_3 + p_1q_2 - p_2q_1 + p_3q_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Euler açıları ile dönüşüm matrisi hesaplandığı gibi kuaterniyon vektörü ile de dönüşüm matrisi hesaplanabilir. Böylelikle koordinat sistemleri arasında dönüşüm işlemi dönüşüm matrisi ile gerçekleştirilebilir. Kuaterniyon vektöründen dönüşüm matrisinin hesaplanması eşitlik.8'de gösterildiği gibidir.

$${}^g_sR = \begin{bmatrix} 2q_0^2 - 1 + 2q_1^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2q_0^2 - 1 + 2q_2^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & 2q_0^2 - 1 + 2q_3^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Yukarıda izahı verilen üç yöntemden herhangi birisi kullanılarak sensör koordinat sisteminden global koordinat sistemine dönüşüm yapılabilir. Konum bulma ve pozisyon takibi gibi işlemler bu dönüşüm işleminden sonra global koordinat sisteminde gerçekleştirilirler.

Bu çalışmada önce kuaterniyon değeri hesaplanmış sonrasında ise dönüşüm matrisi ile global koordinat sistemine dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Kuaterniyon vektörü eşitlik.9'da yer alan denklem kullanılarak hesaplanır.

$$q_{t+1} = q_t \otimes [0, w_{t+1}]^T \quad (9)$$

Sensörden alınan gyro değerleri gürültülü olduğu için kuaterniyon vektörü doğru bir şekilde hesaplanamayacaktır. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışmada, bu gürültüyü azaltmak amacıyla iki ayrı filtre kullanılmıştır. Bunlardan birisi Mahony[26] diğeri ise Madgwick [27] filtresidir. Mahony filtresi PI (Proportional-Integra) tabanlı bir yöntemdir. İvmeölçerden elde edilen veriler ile gyro değeri güncellenir sonrasında quaterniyon değeri Eşitlik.9'a göre hesaplanır. Mahony filtresinin genel fikri ivmeölçerden alınan ivme verileri ile jiroskoptan elde edilen gyro verilerini kombine ederek kullanmaya dayalıdır. Aşağıdaki eşitliklerde bu yöntemle quaternion hesabı gösterilmiştir.

$$v = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) \\ 2(q_2q_4 - q_1q_3) \\ q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$e_{t+1} = a_{t+1} X v \quad (11)$$

$$e_{t+1} = a_{t+1} X v \quad (12)$$

$$w_{t+1} = w_{t+1} + K_p e_{t+1} + K_i e_{i,t+1} \quad (13)$$

$$q_{w,t+1} = \frac{1}{2} q_{est,t} \otimes [0, w_{t+1}]^T \quad (14)$$

$$q_{est,t+1} = q_{est,t} + q_{w,t+1} \Delta t \quad (15)$$

Eşitlik 13'te PI yönteminin nasıl uygulandığı görülmektedir. Bu adımda jiroskop'tan alınan gyro değerleri üzerinde bir düzeltme yapılarak Eşitlik.9'da yer alan denklem kullanılarak o adımdaki quaternion değeri hesaplanmıştır.

Madgwick yöntemi ile quaternion hesabı üç temel adımda izah edilebilir. Birinci adım, acc bilgisine dayalı quaternion değerinin bulunması, ikinci adım, gyro bilgisine dayalı quaternion değerinin bulunması, son adım ise, bu iki değerlerin birleştirilmesi. Bu adımlar, aşağıda yer alan eşitliklerde gösterilmiştir.

$$F = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) - a_x \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) - a_y \\ 2(0.5 - q_2^2 - q_3^2) - a_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$J = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$q_{acc,t+1} = -\beta \frac{J^T * F}{\|J^T * F\|} \quad (18)$$

$$q_{w,t+1} = \frac{1}{2} q_{est,t} \otimes [0, w_{t+1}]^T \quad (19)$$

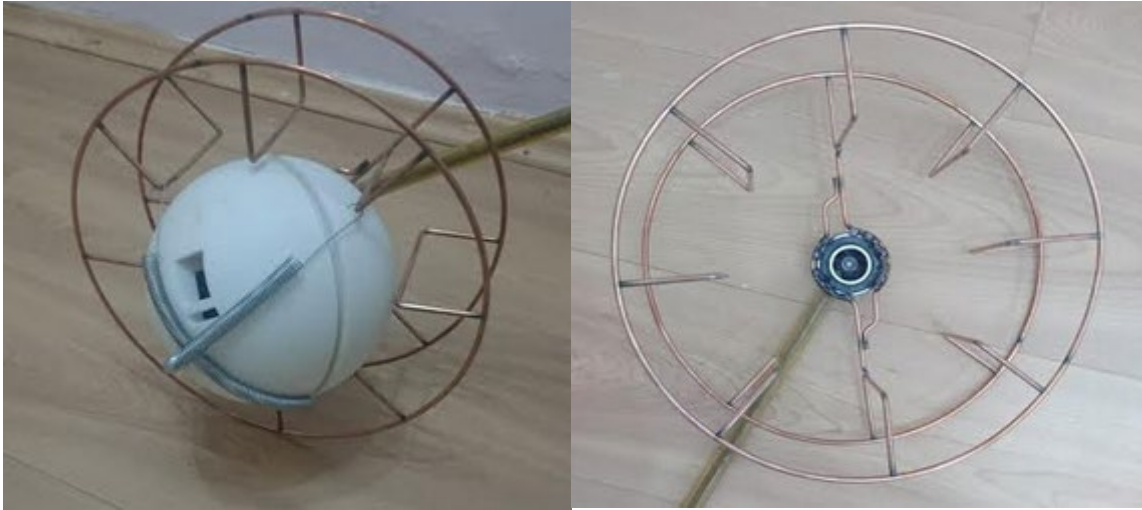
$$q_{est,t+1} = q_{est,t} + (q_{acc,t+1} + q_{w,t+1}) * \Delta t \quad (20)$$

Eşitlik 16, 17 ve 18’de ivme bilgisine dayalı quaternion değerinin hesaplanması, Eşitlik 19’da gyro bilgisine dayalı quaternion hesabı ve Eşitlik 20’de de bu iki quaternion değerinin nasıl birleştirildiği gösterilmiştir.

3. Bulgular

Bu çalışmada iletim boru hattı içerisindeki topun hareketini benzer şekilde gerçekleştirecek düzener kurulmuş ve bu düzener sayesinde top yuvarlanarak hareket ettirilmiştir. Şekil 7.a ve 7.b’de sırayla sensörün yer aldığı top ve bu topu yuvarlayarak hareket ettirmek için kullanılan düzener gösterilmiştir.

Topun içerisinde Raspberry Pi 3 kartı, Xsens MTW2 kartı ve güç kaynağı yer almaktadır. Çalışma offline olarak gerçekleştirilmiştir. Verilerin kaydedilip işleme hızı online çalışma için uygundur. Gerekli donanımsal ekipmanlar sağlanarak online olarak da gerçekleştirilmesi mümkündür. Xsens sensöründen alınan anlık ivme, açısal hız ve quaternion bilgileri Raspberry Pi üzerinde kaydedilmiştir. Sonrasında bilgisayar ortamına aktarılan bilgiler MATLAB ortamında işlenerek topun gezdiği alan grafik üzerinde gösterilmiştir.

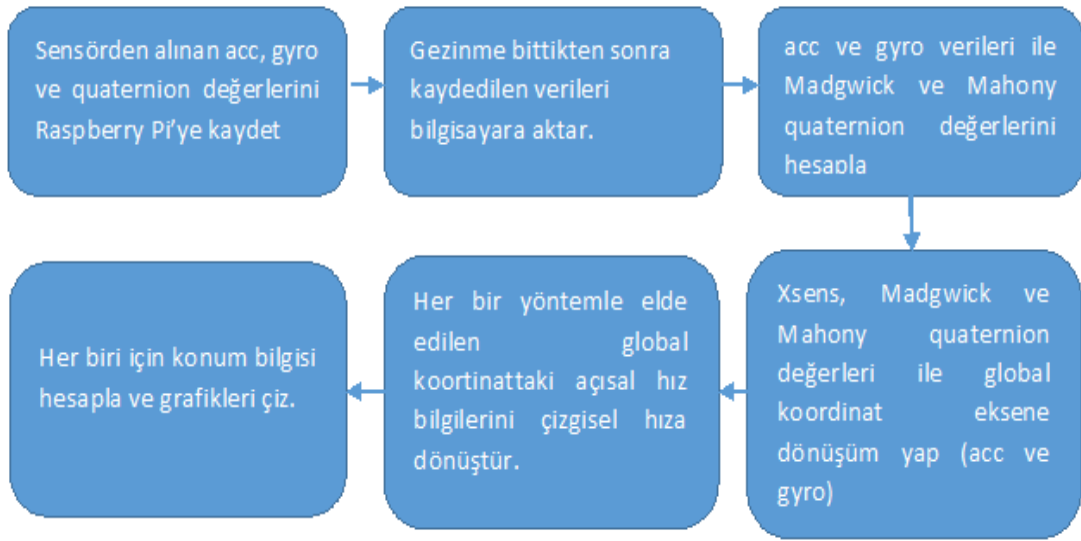


Şekil 7.a) konum tespiti için kullanılan top **b)** Topu yuvarlayarak hareket ettirecek düzener

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada pozisyon takibi için ivme (acc) yerine açısal hız (gyro) bilgisi kullanılmıştır. Bunun için sensörden alınan anlık açısal hız bilgisi önce çizgisel hıza dönüştürülmüş sonrasında da konum hesabı yapılmıştır. Sensör koordinat sisteminden global koordinat sistemine dönüşüm işlemleri için kullanılan kuaterniyon vektörü birisi IMU sensöründen alınan değerler olmak üzere üç farklı şekilde elde edilmiştir. Diğer iki kuaterniyon değeri ise bir önceki bölümde izah edildiği şekilde Madgwick ve Mahony’nin önerdiği filtreler ile elde edilmiştir. Bu filtrelerde kuaterniyon hesabında gyro ile birlikte acc değerlerinin kullanılmasıyla gyro değerlerinin kullanımından kaynaklanan gyro sürüklenmesini (gyro drift) minimize edilmektedir. Her bir kuaterniyon değeri ile global koordinat sistemine dönüşüm yapıldıktan sonra elde edilen pozisyon bilgilerinin karşılaştırılması yapılarak, bu yöntemlerin başarımları ve kullanılabilirliği gözlemlenmiştir.

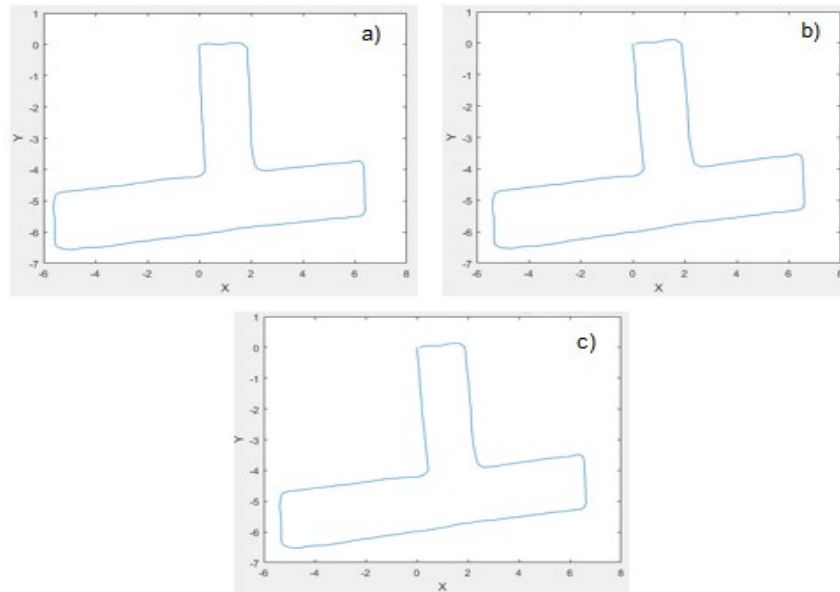
Sensörden alınan kuaterniyon verisi Kalman filtresi ile sensör üzerinde hesaplanarak üretilmektedir. Bu nedenle çalışma bu açıdan Madgwick ve Mahony filtreleri ile Kalman filtresi kıyaslaması olarak da değerlendirilebilmektedir.

Şekil.8’de verilerin alınmasından pozisyon çıkarımına kadar yapılan işlemlerin işlem şeması yer almaktadır.



Şekil 8. Pozisyon takibi sürecinin işlem şeması

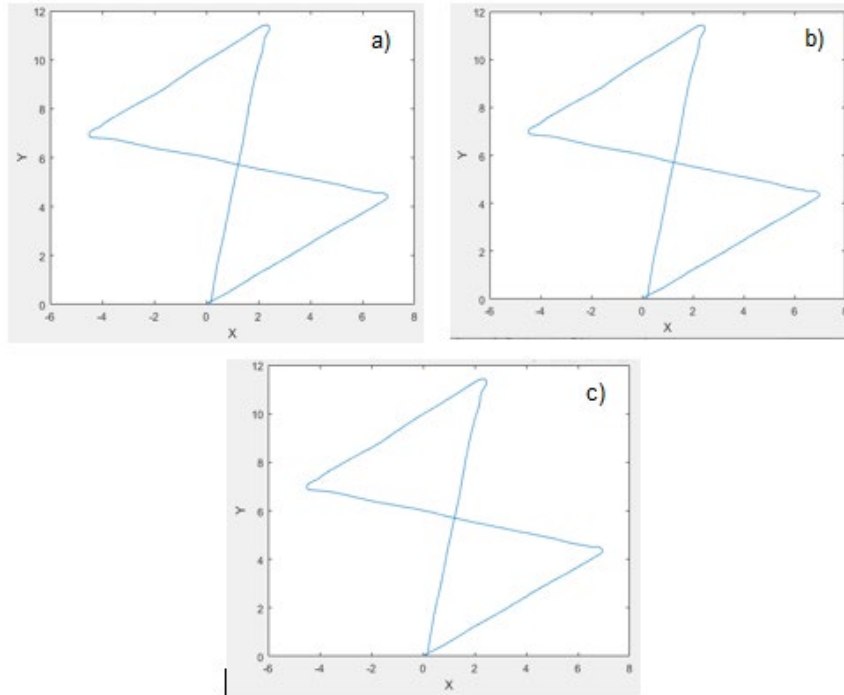
İşlem şemasından da görüldüğü üzere IMU sensöründen alınan anlık acc ve gyro verileri ile iki farklı şekilde kuaterniyon değeri hesaplanmıştır. Bu iki yöntem kullanılarak hesaplanan kuaterniyon değerleri ile yine sensörden alınan kuaterniyon değeri kullanılarak 3 farklı şekilde elde edilen global sistemdeki açısai hız bilgileri çizgisel hıza dönüştürülmüş sonrasında da her bir çizgisel hız değeri ile konum hesaplaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Farklı yöntemlerle elde edilen kuaterniyon değerleri kullanılarak hesaplanan konum grafikleri (Deney 7) **a)** Xsens **b)** Madgwick **c)** Mahony

Deneyisel çalışma kapsamında başlangıç ve bitiş noktaları aynı olacak şekilde 14 farklı gezinme senaryosu gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 a, b ve c'de bir gezinme senaryosu için üç farklı yöntemle elde edilen kuaterniyon değeri kullanılarak elde edilen konum bilgisinin grafikleri gösterilmiştir.

Bir diğer gezinme senaryosu sonucunda elde edilen grafikler Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Farklı yöntemlerle elde edilen kuaterniyon değerleri kullanılarak hesaplanan konum grafikleri (Deney 8) **a)** Xsens **b)** Madgwick **c)** Mahony

Her iki senaryo için gösterilen grafiklerden de görüldüğü gibi pozisyon değerleri birbirine yakın olarak hesaplanmıştır. Sonuçların daha net anlaşılabilmesi için her bir gezinme senaryosu için toplam uzunluk ile her bir kuaterniyon hesaplama yöntemi için metre ve yüzde cinsinden hata oranları çizelge haline getirilerek Çizelge 1’de gösterilmiştir. Hata oranlarının doğru hesaplanabilmesi için tüm gezinme senaryoları başlandığı noktada sonlandırılmış bu yüzden başlangıç ve bitiş arası mesafe 0’dır.

Kuaterniyon yöntemlerine göre elde edilen sonuçların metre ve yüzde cinsinden hata oranları çizelge 1’de belirtilmiş ve her bir deney için daha küçük hata değerine sahip olan yöntemler koyu renkte gösterilmiştir. Çizelge 1 incelendiğinde farklı gezinme senaryolarında farklı yöntemlerin daha başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı uzunlukta ve aynı şekilde gezinme senaryosuna sahip olan Deney 7 ve Deney 12 sonucunda daha az hata oranına sahip olan yöntemler de farklı çıkmıştır. Sensörden alınan verilerin gürültülü olması ve bu gürültülerin de doğrusal olmaması sebebiyle bu durum beklenen bir sonuç olmuştur. Deneyler sonucunda gözlemlenen bir diğer sonuç; tüm gezime senaryolarından elde edilen hesaplamaların ortalamasında Mahony’nin kuaterniyon yönteminin daha başarılı olmasıdır. İkinci olarak ise Madgwick yöntemi gelmektedir. Deneyler sonucunda hesaplanan hata oranlarına bakıldığında, bazı deneylerde %1 üstünde sonuç alınmış olsa da genel olarak %1’in altında olduğu görülmüştür. Bu oranlar sızıntı tespit çalışmaları için kabul edilebilir bir orandır.

Literatürde IMU kullanan birçok çalışma mevcut olup bu çalışmalarda pozisyon hesabı için ivme (acc) değeri kullanılmıştır. [28] nolu çalışmada da gyro değeri ile pozisyon tahmini iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. 1 metrelik yuvarlanarak gezinme sonucunda yöntemlerin birisi ile 0.5 m (%50), diğer bir yöntem ile de 0.02 m (%2) hata ile pozisyon hesaplanmıştır. Bu sonuçlarla kıyaslandığında bu çalışmada elde edilen sonuçların çok daha uzun mesafede daha küçük hataya sahip olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak Mahony ve Madgwick yöntemleri ile elde edilen kuaterniyon değerlerinin sızıntı tespiti uygulamasında veya benzeri şekilde küresel cisimlerin hareketinde pozisyon kestirimi için kullanılabilirliği görülmektedir.

Çizelge 1. Farklı gezinme senaryoları sonucunda elde edilen pozisyon bilgilerinin hata oranları

	Gerçek Değerler		Hata Değerleri (Gerçek – Tahmin)					
	Toplam Mesafe	Başlangıç-Bitiş Uzaklığı	Xsens (Kalman)		Madgwick		Mahony	
			(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)
Deney1 (Dikdörtgen)	72	0	0.4190	0.5819	1.1146	1.1908	0.8240	0.8803
Deney2 (Dikdörtgen)	93	0	0.6873	0.7343	0.4465	0.4770	0.4917	0.5253
Deney3 (L şekli)	50.4	0	0.1427	0.2832	0.2998	0.5949	0.1992	0.3952
Deney4 (üçgen)	20.28	0	0.0656	0.3232	0.0417	0.2057	0.0470	0.2320
Deney5 (E şekli)	45.6	0	0.2568	0.5632	0.3119	0.6840	0.3834	0.8408
Deney6 (T şekli)	15.6	0	0.2524	1.6179	0.2235	1.4328	0.2239	1.4353
Deney7 (T şekli)	36	0	0.0691	0.4431	0.1017	0.6516	0.1649	1.0571
Deney8 (Üçgenler)	56.4	0	0.1589	0.2818	0.1561	0.2767	0.1656	0.2936
Deney9 (U şekli)	58.8	0	0.8567	1.4060	0.2678	0.4043	0.2169	0.3178
Deney10 (F şekli)	40.8	0	0.7686	1.8839	0.5155	1.2636	0.3486	0.8544
Deney11 (A şekli)	46.8	0	0.3439	0.7349	0.4932	1.0538	0.4197	0.8969
Deney12 (T şekli)	36	0	0.4733	4.0117	0.3930	1.0916	0.5268	1.4633
Deney13 (H şekli)	55.2	0	1.2172	2.2051	0.9580	1.7356	0.9078	1.6445
Deney14 (Kare)	48	0	0.6895	1.4365	0.1895	0.3949	0.3475	0.7240
Ortalama	48.206	0	0.457	0.948	0.394	0.817	0.376	0.78

4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada iletim boru hattı içerisinde sızıntı tespiti için kullanılacak bir akıllı top önerisi sunulmaktadır. Bu topun boru içerisindeki hareketi dış ortamda taklit edilmiştir. Pozisyon takibini gerçekleştirebilmek amacıyla yapılan topun içerisinde anlık ivme, açısal hız ve kuaterniyon bilgilerini almak için Xsens Mtw2 IMU sensörü kullanılmıştır. Bu sensörün kullanılma amacı, sensörün Kalman filtresi ile kuaterniyon hesaplamasındaki doğruluk oranının çok yüksek olması ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bilgilerin kıyaslanabilecek bir dayanak noktası olarak kullanılabilir olmasıdır. Çalışmada sensörden alınan açısal hız ve anlık ivme verileri kullanılarak Madgwick ve Mahony'nin önermiş oldukları yöntemlere göre kuaterniyon değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler ve sensörden alınan kuaterniyon değeri ile ayrı ayrı global koordinat sistemine dönüşüm yapılmış sonrasında da topun gezindiği süreç için pozisyon çıkarımı yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda hata oranları çizelge 1'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre pozisyon çıkarımında %1'in altında bir hata oranı elde edilmiştir. Bu oran sızıntı tespiti için kabul edilebilir bir orandır. Ayrıca her iki yöntemin başarı oranı sensörden alınan kuaterniyon değerine göre daha yüksektir. Bu sonuçlar, Madgwick ve Mahony'nin yöntemlerinin sızıntı tespitinde veya benzer şekilde hareket eden küresel cisimlerin pozisyon çıkarımı için kullanılabilir yöntemler olduğunu göstermiştir.

Çalışmayı önemli kılan bir nokta da literatürde açılmal hız (gyro) değeri ile pozisyon kestirimi yapan çalışmaların azınlıkta olmasıdır. Gerçekleştirilen çalışma bu konuda literature katkı sağlamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Hooda SM. Rajasthan Water Assessment: Potential for Private Sector Interventions, International Finance Corporation, World Bank, New Delhi, 2017.
- [2] Pilcher, R. Leak location and repair guidance notes and the never ending war against leakage, Proc. Water Loss 2, 2007.
- [3] Lowry WE., Dunn SD, Walsh R, Merewether D, Rao DV. Method and system to locate leaks in subsurface containment structures using tracer gases, US Patent 6035701A, March 2000.
- [4] Hunaidi O, Wang A, Bracken M, Gambino T, Fricke C, Detecting leaks in water distribution pipes, Arab Water World 2005; 29:4 52–55
- [5] Mishra A, Leakage detection using fiber optics distributed temperature sensing. 6th Pipeline Technology Conference 2011.
- [6] Demirci S, Yigit E, Eskidemir IH, Ozdemir C. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method NDT and E Int. 2012; 47 35–42.
- [7] Akkaya AE, Talu MF. Su boru hatlarında sızıntı konum tespiti için genişletilmiş kalman filtresi tabanlı IMU sensör füzyonu uygulaması. Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University 2017; 32(4): 1393-1404
- [8] Begovich O, Pizano-Moreno A, Garcia-Malacara E, Besancon G. How can the temperature affect the performance of a classical pipeline model when plastic pipes are used?. 2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control 2011; 1-6.
- [9] Ghazali MF. Leak detection using instantaneous frequency analysis PhD Thesis, University of Sheffield 2012.
- [10] Whaley RS, Reet JV, Nicholas RE, A tutorial on computer based leak detection methods, PSIG Annual Meeting 1992.
- [11] Zhang L, Wu Y, Guo L, Cai P, Design and implementation of leak acoustic signal correlator for water pipelines, Information Technology Journal, 2013; 12:11: 2195–2200.
- [12] Kousiopoulos GP, Papastavrou GN, Karagiorgos N, Nikolaidis S, Efstathiadis T, Kalfas A. Pip[eline Leak Localization Techniques. 2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET) 2019; 1-4.
- [13] Srirangarajan S, Allen M, Preis A, Iqbal M, Lim HB, Whittle AJ. Wavelet-based burst event detection and localization in water distribution systems. Journal of Signal Processing Systems, 2013; 72(1): 1-16.
- [14] Tang X, Liu Y, Zheng L, Ma C, Wang H. Leak detection of water pipeline using wavelet transform method. 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology 2009; 2; 217-220
- [15] Kousiopoulos GP, Papastavrou GN, Karagiorgos N, Nikolaidis S, Efstathiadis T, Kalfas A. Pip[eline Leak Localization Techniques. 2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET) 2019; 1-4.
- [16] Zhonghu L, Meili G, Wentao L, Luling W. Research of adaptive algorithm in water supply pipeline leak location. In 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC) 2017; 1-5.
- [17] El-Abbasy MS, Mosleh F, Senouci A, Zayed T, Al-Derham H. Locating leaks in water mains using noise loggers. Journal of Infrastructure Systems 2016; 22(3).

- [18] Abdulla MB, Herzallah RO, Hammad MA. Pipeline leak detection using artificial neural network: Experimental study. In 2013 5th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC) 2013; 328-332.
- [19] Guibin T, Shimin Z, Xiaoxiao Z, Liyun S, Qingbao Z. Research on Bypass-valve and its Resistance Characteristic of Speed Regulating PIG in Gas Pipeline, 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011; 2:1114–1117.
- [20] Chastain-Howley A. Transmission main leakage: how to reduce the risk of a catastrophic failure. Leakage 2005; 12-14.
- [21] Mergelas B, Henrich G. Leak locating method for precommissioned transmission pipelines: North American case studies. Leakage, 2005; 12-14
- [22] <https://puretechltd.com/technology/smartball-leak-detection/> (Erişim: 2022)
- [23] Thong YK, Woolfson MS, Crowe JA, Hayes-Gill BR and Jones DA. Numerical double integration of acceleration measurements in noise. Measurement, 36(1):73–92, 2004
- [24] Altmann S. L., Rotations, Quaternions, and Double Groups, Mineola, NY: Dover Publications, (2005)
- [25] Mahony R, Hamel T, Pflimlin JM. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. IEEE Transactions on automatic control 2008; 53(5): 1203-1218.
- [26] Madgwick SO, Harrison AJ, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In 2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics 2011; 1-7
- [27] Zevering J, BredenbeckA, Arzberger F, Borrmann D, and Nuechter A. IMU-based pose-estimation for spherical robots with limited resources. In 2021 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI) 2021; 1-8.