



# Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile Kapalı Alanlarda Konum Belirleme

## *Indoor Positioning System Based on Ultra-Wide-Band Technology*

İbrahim Alışkan<sup>1</sup> , Arif Şahin<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

### Öz

Bu makalede iç mekânlarda iki boyutlu uzayda (x, y) hassas konum kestirim sistemi tasarlanması ve uygulanması hedeflenmiştir. Kapalı alanlarda ve iç mekânlarda konum belirlemede kullanılan birçok teknoloji mevcuttur. Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), Ultra Geniş Bant (UWB), Wi-Fi, ZigBee ve Bluetooth söz konusu teknolojiler arasında bulunmaktadır. Ultra Geniş Bant teknolojisi diğer teknolojilerle maliyet, kapsama alanı, konum kestiriminde yüksek doğruluk gibi kriterler baz alınarak kıyaslanmış ve ilerleyen bölümlerde ayrıntılarıyla açıklanan avantajlarından dolayı bu projede kullanılmıştır. Oluşturulan sistem temel olarak bir hedef nesne (Tag), üç adet sabit referans alıcı modül (Anchor) ve elde edilen dataları işleyerek simüle eden bir ana bilgisayardan oluşmaktadır. Projede mesafe ölçümleri için Varış Zaman Farkı (TDoA) metodu seçilmiş ve çalışmada uygulanmıştır. Matematiksel konum belirleme tahmin metodu olarak Çember Kesişimi (Trilateration) uygulanmıştır. Hedef nesnenin anlık konum kestirimi yapılmış ve Gerçek Zamanlı Konum Belirleme Sistemi (RTLS) gerçekleştirilmiştir. Konum kestiriminde tespit edilen hatalar irdelenmiş, hataların azaltılabilmesi için Kalman filtresi uygulanmıştır. Ayrıca sabit referans alıcıların dikey pozisyonda, eşit yükseklikte ve dar açılı üçgen oluşturacak şekilde deney ortamına yerleştirildiklerinde konum kestirimindeki doğruluğun arttığı saptanmıştır. Filtre uygulaması ve sabit referans alıcı modüllerin optimum pozisyonlara yerleştirilmesiyle en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kapalı alan konumlandırma, Ultra geniş bant sensor, TDoA, Trilaterasyon, Kalman filtresi

### Abstract

In this article, it is aimed to design and implement a system that can make precise position estimation on two-dimensional space (x, y) for indoor areas. There are many technologies used for solution in determining location indoor areas. Technologies such as Radio Frequency Identification (RFID), Ultra Wide Band (UWB), Wireless Fidelity (Wi-Fi), ZigBee and Bluetooth are among these solutions. Ultra Wide Band technology was compared with other technologies on the basis of criteria such as cost, coverage area, high accuracy in location estimation, and was used in this project due to its advantages explained in detail in the following sections. The created system basically consists of the target object (Tag), three fixed reference receiver modules (Anchor) and a main PC that processes and simulates the obtained data. In the project, the Time Difference of Arrival (TDoA) method was chosen for distance measurements and applied in the study. Trilateration was applied as a mathematical positioning estimation method. The location estimation of the target object was made continuously and Real Time Location System (RTLS) was performed and simulated on the PC. Errors in position estimation were examined and Kalman filter was applied to increase accuracy. In addition, it has been determined that the accuracy in position estimation is increased when the fixed reference receivers are placed in the experimental environment in a vertical position, equal height and forming an acute-angled triangle. The best results were obtained by applying filters and placing the fixed reference receiver modules in optimum positions.

**Keywords:** Indoor positioning, Ultra-wide band sensors, TDoA, Trilateration, Kalman filter

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: arif.sahin40@gmail.com

İbrahim Alışkan [orcid.org/0000-0003-3901-4955](https://orcid.org/0000-0003-3901-4955)

Arif Şahin [orcid.org/0000-0003-2237-0574](https://orcid.org/0000-0003-2237-0574)



## 1. Giriş

Gelişen teknoloji ile beraber günümüzde nesne, araç ve kişi konumlarını belirlemek artık mümkündür. Konum belirlemede çeşitli matematiksel hesaplamalar, teknolojiler ve bunlar ışığında geliştirilmiş birçok uygulama yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasında en çok bilinen ve kullanılan ise Küresel Konumlama Sistemi (GPS)'dir. GPS sistemi, açık alanlarda çok kullanışlı olmakla birlikte bina, tünel vb. kapalı alanlarda ve yeraltında radyo sinyallerinin zayıflaması, bozulması, iletilmemesi gibi nedenlerden dolayı yeterli seviyede çalışmamaktadır (Sheikh vd. 2021, Yıldırım 2022). Kapalı alanlarda ve iç mekânlarda konum belirlenmesi için bazı lokal çözümler aranmaktadır. Bu çözümler arasında Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), Ultra Geniş Bant (UWB), Wi-Fi, ZigBee ve Bluetooth gibi teknolojiler bulunmaktadır. RFID tabanlı uygulamalar düşük maliyet ve kolay matematiksel algoritmalar ile ölçüm sonuçları elde edilebildiğinden çok tercih edilmektedir. Ancak RFID tabanlı uygulamalarda 3 ila 5 metrelik hassasiyetlerde konum belirlemek mümkün olabilmektedir. Daha yüksek hassasiyet için okuyucu sayısını artırmak gerekmektedir bu da oluşturulacak sistemin maliyeti artırmaktadır.

UWB sensörlerinin güç tüketimleri diğer teknolojiler ile kıyaslandığında daha düşüktür (Kopta vd. 2017). Ayrıca maliyet, kapsama alanı, doğruluk ölçüleri vb. kriterler esas alınarak diğer teknolojiler ile kıyaslandığında yüksek hassasiyette konum kestirimine olanak sağlayan UWB teknolojisinin iç mekân konumlandırma için uygun yöntem olduğuna karar verilmiştir.

Literatürde, UWB haberleşme teknolojisini farklı biçimlerde kullanan fazla sayıda konum belirleme tahmin yöntemi mevcuttur (Liu vd. 2007). Bu teknikler arasında en çok tercih edilenler; Parmak İzi Yöntemi (Fingerprinting), Yakınlık Yöntemi (Proximity), Üçgenleştirme Yöntemi (Triangulation), Çember Kesişimi Yöntemi (Trilateration) ve Hiperbol Kesişimi Yöntemi (Multilateration) incelenmiştir. Söz konusu konum tahmin yöntemleri arasında Çember Kesişimi (Trilateration) metodu seçilmiş ve bu çalışmada uygulanmıştır.

Konum tahmin yöntemleri kartezyen koordinat sistemi üzerinde aranan nesnenin konumunu matematiksel olarak hesaplamaya ve tahmini konumu belirlemeye olanak sağlar. Matematiksel hesaplamalar için aranan nesne ile referans alıcılar arasındaki mesafeler ve referans alıcıların konumları bilinmelidir.

Radyo sinyalleri ile mesafe ve açı ölçümlerinin farklı teknik ve metodları mevcuttur. Mesafe ölçme tabanlı algoritmalarda iki sinyal düğümü arasında iletilen sinyalin gücü ya da düğümler arası iletişim zamanı veya düğümler arasındaki açı gibi fiziksel büyüklükler kullanılmaktadır. Varış Zamanı (ToA - Time of Arrival), Varış Zamanı Farkı (TDoA - Time Difference of Arrival), Geliş Açısı Yöntemi (AoA- Angle of Arrival), Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI - Received Signal Strength Indication) ve Parmak izi (Finger Printing) algoritmaları uzaklık ölçme tabanlıdır (Deak vd. 2012, Cui vd. 2018). Wifi, Bluetooth, RFID gibi çoğu yaklaşım sinyal gücünü baz alan RSSI ölçüm tekniklerini kullanırken, Ultra Geniş Bant teknolojisinde zamanı baz alan mesafe ölçüm metodları ile başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu proje için zamanı baz alan TDoA metodu seçilmiş ve çalışmada uygulanmıştır. Oluşturulan sistemin döngüler halinde sürekli devam etmesiyle Gerçek Zamanlı Konum Belirleme Sistemi (RTLS- Real Time Location System) gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca modüller tarafından gerçekleştirilen mesafe ölçüm değerlerinin doğruluğunun artırılması ve konum tahminlerin iyileştirilmesi için sisteme filtrasyon entegre edilmiştir. Bu kapsamda literatürde yer alan Wiener Filtresi, Alçak Geçiren Filtre (Low-Pass Filter), Kalman Filtresi, Gaussian Filtresi, Butterworth Filtresi, Alpha-Beta Filtresi ve Yüksek Geçiren Filtre (High-Pass Filter) filtre uygulamaları incelenmiştir. Burada Kalman filtresi uygulanmıştır. Filtreleme işlemleri sayesinde mesafe ölçümünde kullanılan sinyallerdeki parazitler minimize edilerek konumlardaki keskinlik artırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışma ile kapalı alan konum belirleme sistemlerine farklı filtre kombinasyonları dahil edilerek konum kestirimindeki doğruluğun artırılması yönündeki ileri çalışmaların önü açılmıştır. Ayrıca sabit referans alıcıların deney ortamındaki yerleşmelerinin optimum pozisyona ulaşılması ile ilgili edinilen tecrübeler ve sunulan öneriler diğer araştırmacılara ışık tutacaktır.

Çalışmanın devamında Bölüm 2'de metodlar ve donanım altyapısı sunulmuştur. Bölüm 3'te ise uygulama sonuçları analiz edilmiştir.

## 2. Gereç ve Yöntemler

Bu bölümde sırası ile kullanılan algoritmalar, donanım sistemi ve uygulama sonuçları sunulmuştur.

## 2.1 Ultra Geniş Bant Teknolojisi (UWB - Ultra Wide Band)

UWB kısa mesafelerde iletişim kurmak için yüksek bant genişliğine sahip bir iletişim teknolojisidir (Engström ve Helander 2015). Kapalı alanlarda konum belirlenebilmesi için yaygınlaşmış tek bir yöntem söylemek zordur. Genellikle Wi-Fi, Kızılötesi, RFID, UWB, Li-Fi, ZigBee, WLAN ve Bluetooth gibi teknolojiler GPS ile kıyaslandığında kapalı alanlarda konumlandırmada daha başarılıdır (Lee vd. 2018). Bir kablosuz iletişim teknolojisi olan UWB, mevcut dar bant veya yayılmış spektrumlu kablosuz iletişim mimarisinden tamamen farklıdır. Diğer birçok yöntemden farklı olarak Ultra Geniş Bant (UWB), ultra kısa darbelerin (saniyede 1-2 Giga darbesi) kullanılması sonucu yüksek hacimli veri hızına (1 Gbps'ye kadar) sahip bir radyo tekniğidir (Zhao 2007). Şekil 1'de gösterildiği üzere UWB radyo frekans spektrumunda geniş bir çalışma aralığına sahiptir (3.1GHz ila 10.6 GHz) (Kopta vd. 2017).

UWB teknolojisi çok kısa darbelerin iletilmesine dayanır ve radyo enerjisinin (geniş bir frekans bandı üzerinde) çok düşük bir güç spektral yoğunluğu ile yayılmasına olanak sağlayan teknikler kullanır (Cheng 2012). UWB sensörlerinin güç tüketimleri, diğer konum belirleme teknolojileri ile karşılaştırıldığında daha düşüktür (Kopta vd. 2017).

İç mekân konumlandırma sistemleri (IPS-Indoor positioning systems) çeşitli çok yollu senaryolarla başa çıkmak zorundadır. UWB çok yollu çözünürlük sunma noktasında oldukça başarılıdır (De Santis vd. 2010). UWB darbelerinin düşük frekansı, sinyalin duvarlar ve nesnelere gibi engellerden etkili bir şekilde geçmesini sağlayarak doğruluğu artırır.

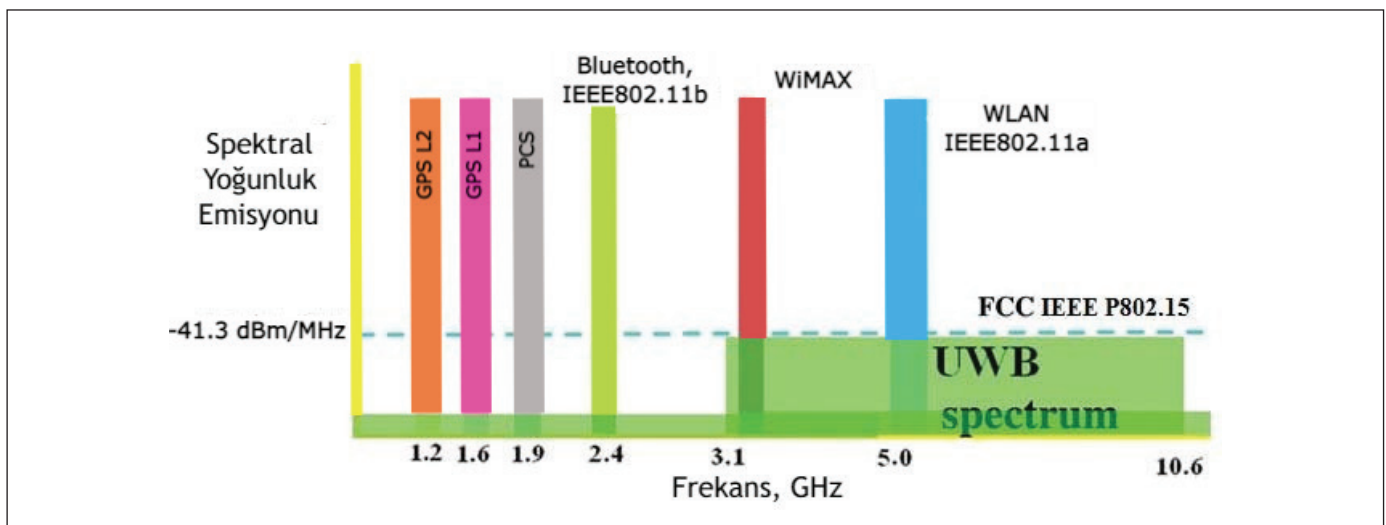
Bu sayede UWB, konumlandırma ve ölçüm mesafelerindeki hatayı santimetre (cm) seviyesine indirebilen yüksek bir doğruluk oranı sağlar (Alarifi vd. 2016). Bu nedenle UWB teknolojisi, yüksek doğrulukta sonuçlar gerektiren kritik konumlandırma uygulamaları için en uygun seçeneklerden biri olarak kabul edilir.

## 2.2. Konumlandırma Matematiksel Tekniği - Çember Kesişimi (Trilateration)

Literatürde, UWB haberleşme teknolojisini farklı biçimlerde kullanan fazla sayıda matematiksel konum belirleme tahmin yöntemi mevcuttur (Liu vd. 2007). Bu teknikler arasında en çok tercih edilenler; Parmak İzi Yöntemi (Fingerprinting), Yakınlık Yöntemi (Proximity), Üçgenleştirme Yöntemi (Triangulation), Çember Kesişimi Yöntemi (Trilateration) ve Hiperbol Kesişimi Yöntemi (Multilateration)'dir. Çember Kesişimi tekniği konumu bilinen üç referans sinyal alıcı Anchor ile konumu bilinmeyen bir hedef Tag arasında çemberler oluşturup, bu çemberlerin geometrik özelliklerini uygulayarak hedef Tag'ın konumunun tahmini hesaplaması için kullanmasıdır (Artunç 2017). Bu çalışmada Çember Kesişimi tekniği kullanılmış olup konumlandırma iki boyutlu uzayla sınırlıdır.

Koordinat sistemi üzerinde konum hesabı için Çember Kesişimi yönteminin kullanımı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Koordinat sisteminde referans alıcıların ( $A_1, A_2, A_3$ ) bilinen koordinatları sırası ile  $(0, 0)$ ,  $(d, 0)$ ,  $(i, j)$ , hedef nesnenin bilinmeyen koordinatları  $(x, y)$  ve referans alıcıların ölçülebilir yarıçapları  $r_1, r_2, r_3$  olmak üzere;



Şekil 1. İç mekân yayılımı için UWB frekans aralığı (Fayadh vd. 2014).

$$x^2 + y^2 = r_1^2 \quad (1)$$

$$(x - d)^2 + y^2 = r_2^2 \quad (2)$$

$$(x - i)^2 + (y - j)^2 = r_3^2 \quad (3)$$

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (4)$$

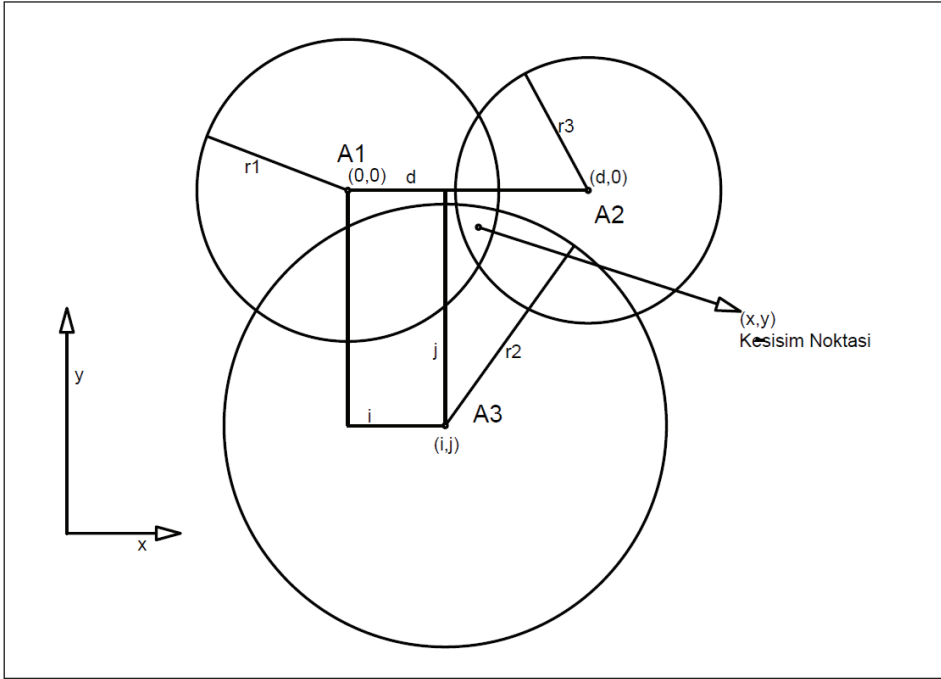
Şekil 2’de gösterildiği gibi, A1 ve A3 numaralı referans alıcıların oluşturduğu çemberlerin birden fazla kesişim noktası olduğu varsayılırsa;  $d - r_1 < r_2 < d + r_2$  eşitliklerden (3) ve (4) kullanıldığında;

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - (x - i)^2 + j^2}{2j} \quad (5)$$

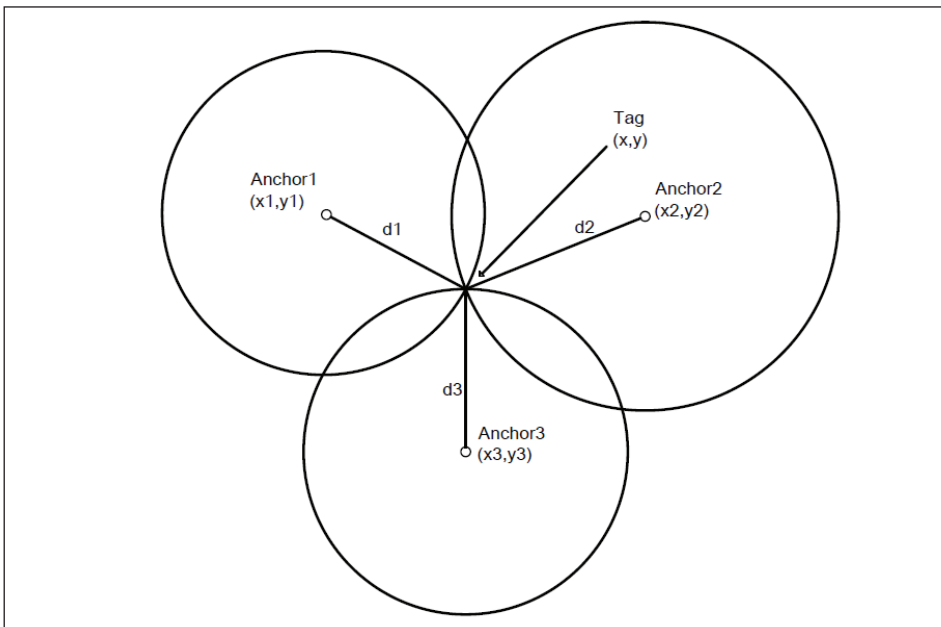
Elde edilmektedir.

İki boyutlu serbest uzayda  $(x, y)$  çember kesişimi yöntemi kullanılarak konum kestirimi gerçekleştirilmesi örneği Şekil 3’te sunulmuştur.

Şekil 3’e göre serbest uzayda konumları bilinen referans alıcıların (Anchor1, Anchor2, Anchor3) bilinen koordinatları



Şekil 2. Koordinat sisteminde çember kesişimi yöntemi.



Şekil 3. İki boyutlu serbest uzayda çember kesişimi tekniği.

sırası ile  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ , hedef nesnenin bilinmeyen koordinatları  $(x, y)$  ve referans alıcıların ölçülebilen mesafeleri  $d_1, d_2, d_3$  olmak üzere;

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (6)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (7)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (8)$$

Bu ikinci dereceden denklem sistemini basitleştirmek için, eşitlik (8) iki doğrusal denklem oluşturacak şekilde diğer iki denklemde ikame edildiğinde;

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (9)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (10)$$

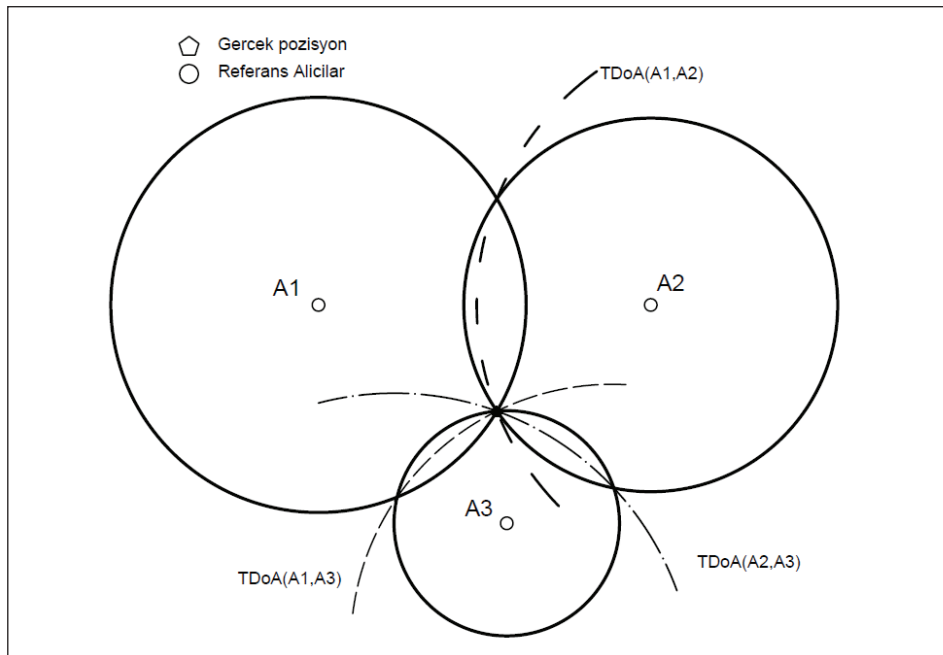
X ve Y koordinatları, Cramer kuralını kullanarak denklem (9) ve denklem (10)'u çözümlenir;

$$x = \frac{\begin{vmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) & 2(y_2 - y_1)y \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & 2(y_3 - y_1)y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (11)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (12)$$

### 2.3. Mesafe ve Açık Ölçüm Metodu – TDoA (Varış Zamanı Farkı)

Konumlandırmanın matematiksel hesaplamalarının yapılabilmesi için sinyal düğüm noktaları arasındaki açı, mesafe gibi fiziksel ölçülerin bilinmesi gereklidir. Ancak gerçek bir iç mekân ortamı solma, soğrulma, yansıma, etkileşim ve girişim gibi RF dalgalarının gücünü, yönünü ve dağılımını etkileyen unsurlar barındırır. Bu nedenle RF sinyalinin yayılım varyasyonunu kolayca modellemek zordur. Modellemenin yapılabilmesi için mesafe ölçüm algoritması gereksinimi duyulmaktadır. İki sensör düğümü arasındaki fiziksel mesafeyi hesaplamak için kullanılacak birçok ölçüm metodu vardır (Contractor 2008). Bunlar arasında Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI), Varış Açısı (AoA), Varış Zamanı (ToA), Varış Zamanı Farkı (TDoA) gibi ölçüm yöntemleri bulunmaktadır (Dardari vd. 2009). TDoA metodunda, alıcı çiftlerin sinyalleri alış zamanları farkı kullanılmaktadır (Xiong 2010). TDoA metodu uygulamalarında oluşturulan bütün sistem bileşenlerinin zamanlarının tam olarak senkronize olmasına gerek duymadan sadece sinyal alıcı ve verici çiftleri kendi aralarında senkronize olması yeterlidir. Şekil 4'te gösterildiği gibi, sinyal varış zaman farkları iletilen referans alıcı nokta için hiperbollerle temsil edilir ve bu hiperbollerin kesişimi bilinmeyen noktanın konumunu işaretler. TDoA, çeşitli iç ve dış mekân uygulamaları için kullanılmaktadır (Sheikh vd. 2021). Benzer şekilde üstünlükleri nedeni ile bu çalışmada da TDoA metodu tercih edilmiştir.



Şekil 4. TDoA-Varış zamanı farkı ölçüm prensibi.

Mesafeyi hesaplamak için, TDoA sadece sinyallerin yayıldığı iki baz istasyonu arasındaki sinyal varış zamanı farkını kullanır.

Nesnenin pozisyonu;  $x, y$

Referans alıcılar; A1, A2 ve A3

Referans alıcı mesafeleri;  $\ell_1, \ell_2$  ve  $\ell_3$ ,

$TDoA(A1-A2)$  ve  $TDoA(A1-A3)$  sabit olan iki hiperbolik eğridir.

Referans alıcı numarası;  $n$

Sinyal iletim süresi;  $t$

TDoA'yı temsil eden bir simge;  $k$

$C = 3 \times 10^5$  km/sn

Olmak üzere;

$$TDoA A1 - n = |t1 - tn| = k1n \quad (13)$$

$$|\ell_1 - \ell_n| = C \cdot k1n \quad (14)$$

Eşitlikleri kullanılarak Anchor ile Tag arasındaki mesafe hesaplanır.

Örneğin, Christian Núñez Álvarez ve Cristian Crespo Cintas (2010)'a göre Bayesian Çıkarımına dayanan maksimum *posteriori* yaklaşımıyla aşağıdaki gibi bir yöntem sunmuştur.

$$P(x, y | TDoA_{ij}) = \frac{P(TDoA_{ij} | x, y) * P(x, y)}{P(TDoA_{ij})} \quad (15)$$

(15) numaralı denklem iki referans alıcı arasındaki TDoA hesaplaması sonucunda, hedef nesnenin  $(x, y)$  koordinatlarında bulunma olasılığını gösterir. Yukarıdaki eşitlikte TDoA<sub>ij</sub> iki baz istasyon  $i$  ve  $j$  arasındaki TDoA,  $P(x, y)$  önceki pozisyon dağılımı ve  $P(TDoA_{ij})$  veri olasılığıdır (Álvarez ve Cintas 2010).

#### 2.4. Kalman Filtresi (Kalman Filter (KF))

Kalman Filtresi, durum uzayı modeli ile gösterilen dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edilebilen bir filtredir. Kalman Filtresi (KF), en ünlü Bayesian filtre teorilerinden biri olarak kabul edilir (Woods ve Radewan 1977). Yaygın kullanılan veri işleme algoritmalarından birisi olan Kalman Filtresi, karmaşık olmayan hesaplama özelliği, tekrar tekrar uygulanabilir yapısı ve Gauss hata dağılımlı lineer sistemlere uyumlu olması nedeniyle, iç mekân konumlandırma sistemlerinde ortamdaki gürültüyü filtrelemek için çok başarılı bir algoritmadır.

Kalman filtresini en basit şekilde yazacak olursak:

$$\widehat{X}_k = K_k \cdot Z_k + (1 - K_k) \cdot \widehat{X}_{k-1} \quad (14)$$

Eşitlikteki parametreler

$\widehat{X}_k$  = Hesaplanan kalman değeri

$K_k$  = Kalman Kazancı

$Z_k$  = Ölçüm sonucu elde edilen değer

$\widehat{X}_{k-1}$  = Bir önceki hesaplanan Kalman değeri

Olarak sunulur.

Kalman filtresinin uygulamasında iki aşama mevcuttur. Bunlar tahmin ve düzeltmedir. Bu iki aşama aynı zaman diliminde yani “ $k$ ” değerinde hesaplanır (Her  $k$  değeri için). Filtrenin kullanımı Şekil 5 ile özetlenmiştir.

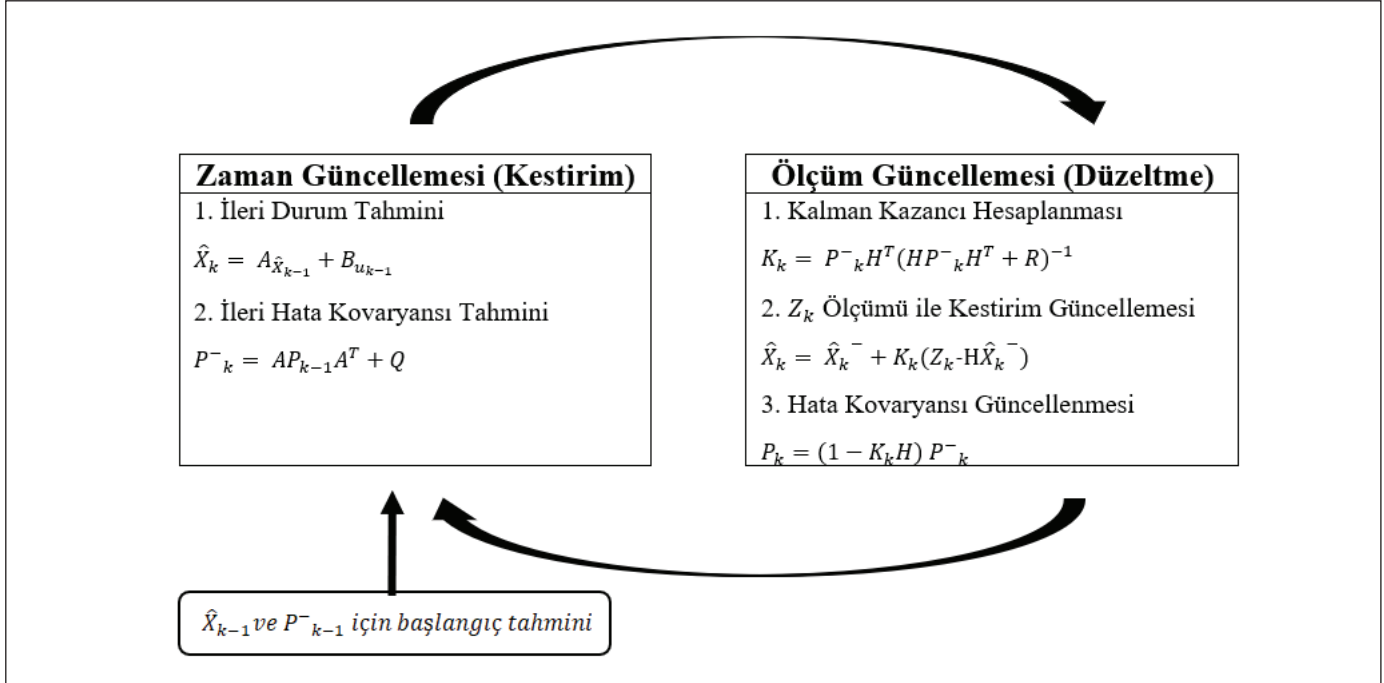
Her bir  $k$  değeri için hesaplanan çıktı,  $k+1$  sonraki adım için girdi olacaktır. Ölçüm güncelleme aşamasındaki denklemlerde gerçek değeri bulunur. Bu değer  $x'$  in  $k$  anındaki değeridir (Çayıroğlu 2012 ve Bai 2016).

#### 2.5. Sistem Genel Mimarisi

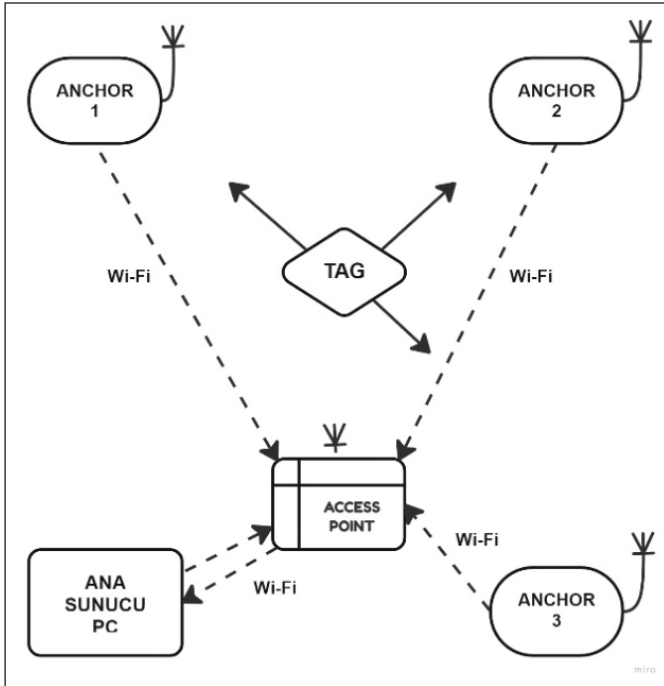
Oluşturulan sistem temel olarak aranan nesne, üç adet sabit referans alıcı ve elde edilen dataları işleyerek simüle eden bir bilgisayardan (PC) oluşmaktadır. Üzerinde UWB uyumlu kablosuz sinyal alıcı-verici modül (DecaWave's DWM1000) ve modüllerin ana PC ile haberleşmesini sağlayacak Wi-Fi (ESP8266-7) modülü bulunan üç adet referans alıcı kapalı alan içerisine sabitlenmiştir. Konumu belirlenecek hareketli nesne üzerine yine UWB modülü yerleştirilmiştir. Referans sinyal alıcılar ile aranan nesne arasında radyo sinyalleri ile haberleşme sağlanmıştır. Ayrıca TDoA metodu ile her bir referans sinyal alıcı ile aranan nesne arasındaki mesafelerin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen mesafe verileri Çember Kesişimi konum belirleme tahmin tekniği ile işlenerek konum kestirimi yapılmıştır. Bu işlemlerin milisaniye mertebesinde döngüler halinde sürekli devam etmesiyle gerçek zamanlı konum belirleme sistemi gerçekleştirilmiştir. PC'ye aktarılan sinyal verileri Python programlama dili kullanılarak oluşturulmuş platformda işlenerek görselleştirilmiştir. Matematiksel hesaplamalar için Python üzerine MATLAB dosya ve kütüphaneleri hazırlanarak entegre edilmiştir. Oluşturulan sistem Şekil 6 ile görselleştirilmiştir.

#### 2.6. Haberleşme ve Veri Akışı

UWB sensörü ve Wi-Fi modülü olan ESP8266-7'nin fiziksel bağlantıları yapıldıktan sonra PCB kart bağlantı



Şekil 5. Kalman filtresinde denklemlerin kullanımı.



Şekil 6. Sistem mimarisi.

pinleri vasıtalıyla FTDI Programlama Kartı kullanılarak USB-TTL UART dönüşümü sağlanarak seri bağlantı oluşturulmuş ve ESP modülü programlanmıştır. Sonrasında seri programlayıcı olan ST-LINK/V2 kullanılarak Arduino IDE yazılım platformu üzerinde hazırlanmış olan program

STM32F103C mikro çipine yüklenmiştir. Sistemde sabit referans sinyal alıcıların ana PC ile haberleşebilmesi için bir erişim noktası (AP) ile lokal ağ kurulmuş ve ana sunucu ile referans sinyal alıcılara statik IP ataması yapılmıştır. Ana sunucu PC ile diğer sistem bileşenleri arasında veri paketi gönderimi UDP protokolü ile sağlanmıştır. Sisteme ilişkin özet veri akışı Şekil 7'de sunulmuştur

## 2.7. Donanım Bileşenleri

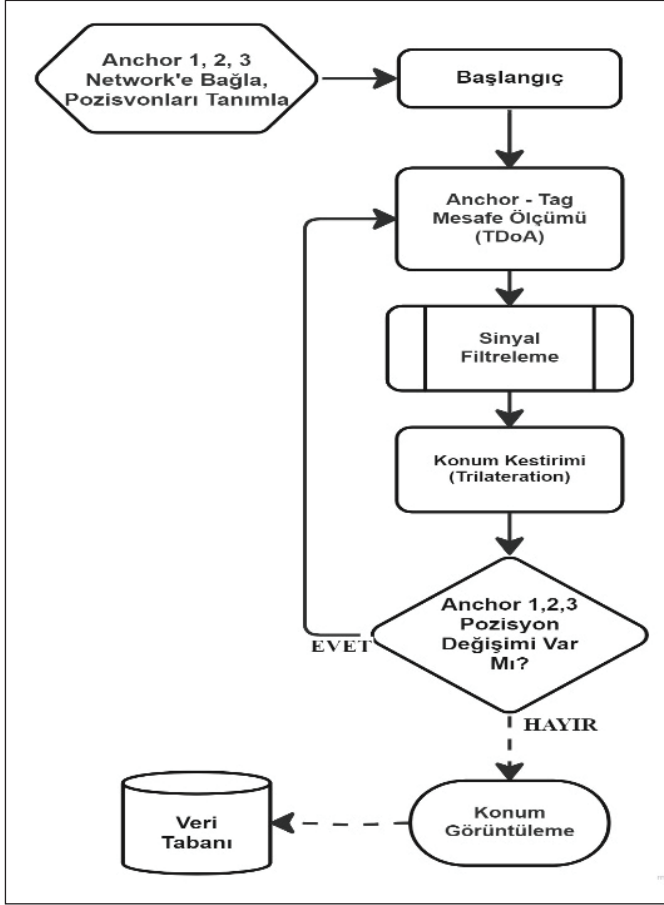
Üzerinde UWB uyumlu kablosuz sinyal alıcı-verici modül (DecaWave's DWM1000) ve modüllerin ana PC ile haberleşmesini sağlayacak Wi-Fi(ESP8266-7) modülü bulunan üç adet referans sinyal alıcı oluşturulmuştur. PCB kart üzerinde STM32F103C mikro çipi bulunmakta olup UWB sensörü ve ESP modülünü entegre çalışabilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 8 sabit referans alıcı alt sisteminde kullanılan elemanlara ait basit görselleri sunmaktadır.

## 2.8. Dene Ortamı

Şekil 9 ile hareketli ve sabit nesnenin 2 boyutlu (x, y) uzayda konum kestirimindeki hataların analizi için oluşturulan 3 m x 3 m ölçülerindeki test ortamı sunulmuştur. Test alanı 0.5 m x 0.5 m'lik gridlere ayrılmıştır. Test ortamını tamamen kapsayacak şekilde üç adet referans alıcı; Anchor1( $x_1, y_1$ ), Anchor2( $x_2, y_2$ ), Anchor3( $x_3, y_3$ ) sırasıyla (0,0), (0,3) ve (3,0) metrik düzenle yerleştirilmiştir.

## 2.9. İç Mekân Konum Kestirim Sonuçları

Her bir sabit referans alıcı ile hedef nesne arasındaki mesafeler TDoA algoritmasıyla çok sayıda ölçüm yapılarak konum kestiriminin hata seviyeleri incelenmiştir. Sisteme Kalman filtresi uygulanmış olup filtreli ve filtresiz mesafe



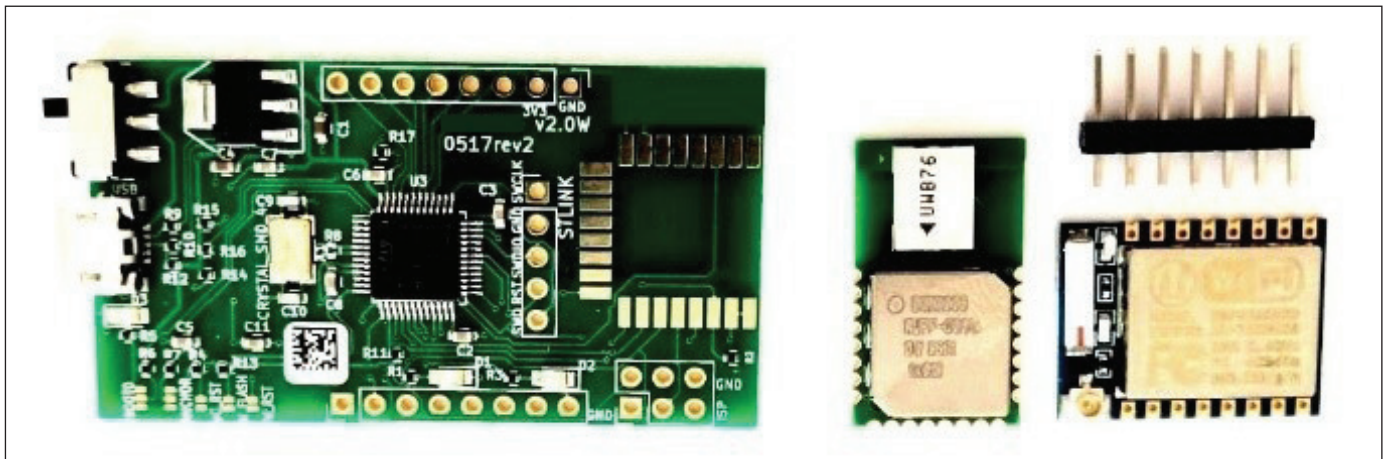
Şekil 7. Sistem algoritmasının akış şeması

ölçümleri kıyaslanmıştır. Hedef nesnenin sabit pozisyonlarında yapılan filtresiz ölçümlerde ortalama 24.69 cm'lik pozisyon hatası tespit edilmiştir. Kalman filtresi uygulanan verilerle elde edilen pozisyonlarda hata ortalamasının 15.45 cm olduğu saptanmıştır. Filtreleme yöntemi ile hata mesafesi 9.24 cm azaltılarak %37.42'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Filtresiz ölçümlerde hata ortalamasının 24.69 cm olduğu gözlemlenmiş olup, ortalama konum kestirim hatasında %9.55'lik bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Sistemde en az pozisyon hatası ölçümü referans alıcıların optimum pozisyonu ve Kalman filtresi uygulanması sonucunda sağlanmış olup ortalama hata mesafesinin 24.69 cm'den 12.82 cm'ye düştüğü ve ortalama konum kestirim hatasında %48.07'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11 ile yukarıdaki açıklamaların/analizlerin temeli oluşturulan pozisyon hata değişimi ve konum kestirim kıyas grafikleri sunulmuştur.

## 2.10. Literatür Karşılaştırması

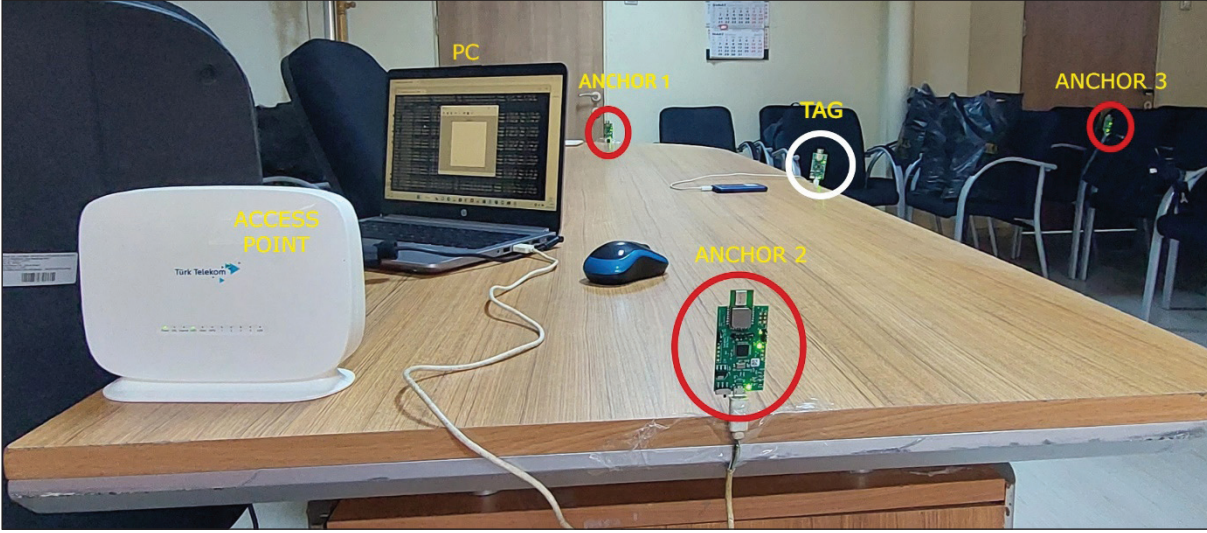
Literatürde, kapalı alanlarda ve iç mekânlarda konum belirlenmesi konusunda yapılan bazı çalışmalar ile bu çalışmada kullanılan yöntemlerin kısa bir karşılaştırması Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Tabloda belirtilen çalışmalar incelendiğinde ultra geniş bant teknolojisinin kapalı alan konumlandırma konusunda başarılı olduğu görülmektedir. Mesafe ölçüm teknikleri arasında zaman bazlı TDoA, konum kestirim yöntemleri arasında ise geometrik tabanlı Trilateration ön plana çıkmaktadır. Mevcut

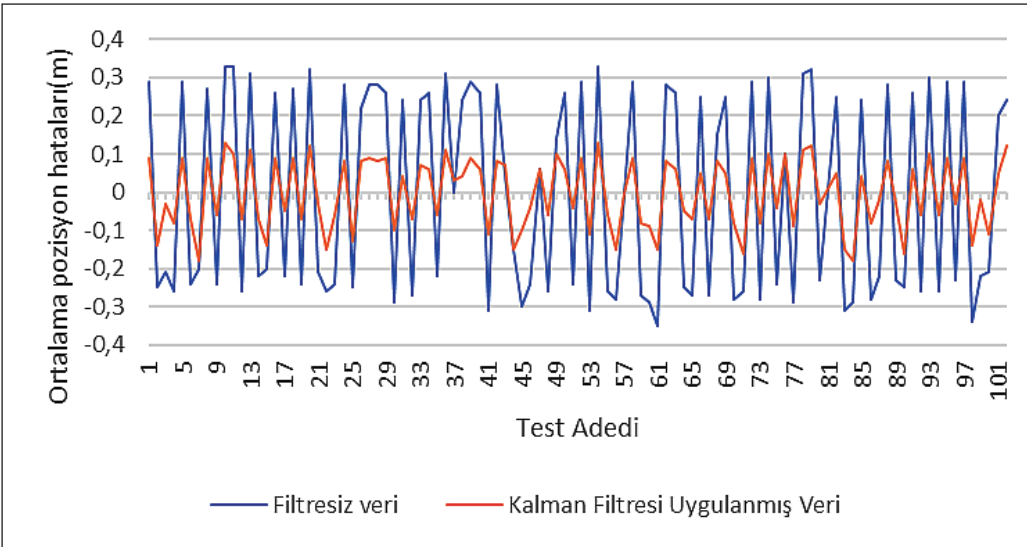


Şekil 8. Sabit referans alıcı bileşenleri.

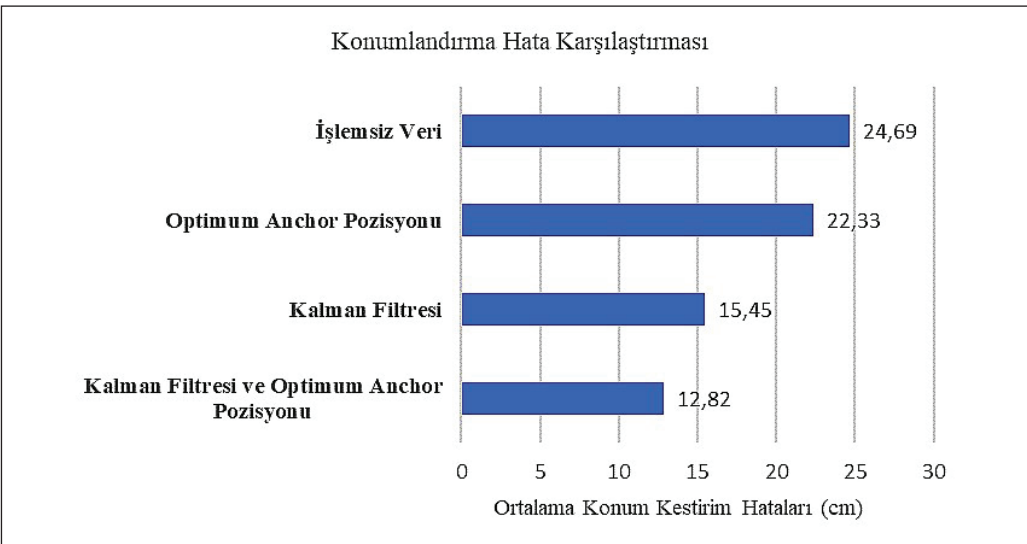




Şekil 9. Test ortamı görseli.



Şekil 10. Filtrelenmemiş ve Kalman filtresi uygulanmış verilerin ortalama pozisyon hataları.



Şekil 11. Ortalama konum kestirim hataları kıyaslaması.

**Çizelge 1.** Literatür Karşılaştırması

Kaynak	Kullanılan Teknoloji	Konum Kestirim Yöntemleri	Mesafe Ölçüm ve Filtrasyon Teknikleri	Ortalama Konum Hata Mesafeleri (cm)
(Yılmaz 2010)	ZigBee	Triangulation	RSSI ve ToF	100 ila 500 cm
(Wu 2012)	RFID	Trilateration	RSSI	156 cm
(Küçük 2016)	UWB	Trilateration	TWR	30 cm
(Küçük 2017)	UWB	Trilateration	AoA ve TDoA, ilaveten HDOP, LS, NLR uygulamaları	Senaryo 1: 32 cm Senaryo 2: 23 cm
(Xu vd. 2017)	RFID	k-Nearest Neighbor ve Bayesian Olasılığı	RSSI, k-NN Algoritması, Gauss Filtresi,	±15 cm
(Artunç 2017)	UWB	Trilateration	TDoA ilaveten Median filtresi	20 cm
(Kurnaz 2019)	UWB	Trilateration	TDoA	30 cm
(Hameez 2019)	UWB	Trilateration	ToF, Makine Öğrenme Algoritmaları, Kalman Filtresi	11.27 cm
(Tekbaş vd. 2020)	ZigBee	YSA tabanlı parmak izi yöntemi (Fingerprint)	RSSI	Senaryo 1: 18.2 cm Senaryo 2: 24.2 cm
(Sheikh vd. 2021)	Wi-Fi -VLC	Trilateration	TDoA	±28.42 cm
Mevcut Çalışma	UWB	Trilateration	TDoA, Kalman Filtresi	15.45 cm

çalışma literatürde yer alan diğer çalışmalarla örtüşmekle birlikte ortalama konum hata mesafelerine göre iyi bir noktada olduğu söylenebilir.

### 3. Sonuçlar ve Öneriler

Yukarıda UWB teknolojisiyle kapalı alanlarda konum belirleme üzerine yapılmış uygulamalı bir çalışmasının sonuçları paylaşılmıştır. Çalışma kapsamında mesafe ölçüm yöntemi olarak TDoA ve konum tahmin yöntemi olarak Çember Kesişimi metodu seçilmiş ve uygulanmıştır. Bu işlemlerin milisaniye mertebesinde döngüler halinde sürekli devam etmesiyle gerçek zamanlı konum belirleme sistemi (RTLS) gerçekleştirilmiştir.

TDoA algoritmasıyla çok sayıda ölçüm yapılarak konum kestiriminin hata seviyeleri incelenmiştir. Belirlenen hata seviyesinin düşürülmesi ve konum kestiriminin iyileştirilmesi için sisteme Kalman filtresi uygulanmıştır. Kalman filtresi uygulanmadan elde edile konum kestirimleri ve filtre uygulanarak elde edilen konum kestirimleri kıyaslanmış Kalman filtresinin ortalama pozisyon hatasında %37,42' lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Ayrıca sabit referans alıcıların kapalı alandaki yerleşkeleri ve duruş pozisyonlarının konum kestirimini etkilediği an-

laşıldığından farklı senaryolar test edilmiştir. Oluşturulan prototip sistemde sabit referans alıcıların dikey pozisyonda, eşit yükseklikte ve dar açılı üçgen oluşturacak şekilde deney ortamına yerleştirildiklerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sabit referans alıcıların optimum pozisyonda olması durumunda ortalama konum kestirim hatasında %9.55'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Sistemde en az pozisyon hatası ölçümü referans alıcıların optimum pozisyonu ve Kalman filtresi uygulanması sonucunda sağlanmış olup ortalama hata mesafesi 24.69 cm'den 12.82 cm'ye düştüğü ve ortalama konum kestirim hatasında %48.07'lik bir iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

İleride mevcut sisteme farklı filtre kombinasyonları dahil edilerek konum kestirimindeki doğruluğun artırılması planlanmaktadır. Ayrıca sabit referans alıcıların sayıları artırılarak daha hassas konum kestirimi üzerinde çalışılabilir. Bu alanda üç boyutlu uzayda konum kestirimi yapılması da ihtimal dahilindedir.

### 4. Teşekkürler

Bu çalışmaya yaptığı değerli katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

## 5. Kaynaklar

- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrani, S., Al-Ammar, M. A., & Al-Khalifa, H. S. 2016.** Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances, *Sensors*, 16(5), 707; 2-36. <https://doi.org/10.3390/s16050707>
- Álvarez, C. N., Cintas, C. C. 2010.** Accuracy evaluation of probabilistic location methods in UWB-RFID systems, *Master Thesis*, Aalborg University, Department of Electronic Systems, Aalborg, 57-58.
- Artunç, T. C. 2017.** The design and application of an uwb-based indoor positioning system, *M. Sc. Thesis*, Istanbul Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechatronics Engineering, İstanbul, 11-13.
- Bai, Yuntian B. 2016.** Development of a Wi-Fi and RFID based indoor location and mobility tracking system, *Doctoral Thesis*, RMIT University, School of Mathematical and Geospatial Sciences, College of Science, Engineering and Health, Melbourne, 51-64.
- Cheng, G. 2012.** Accurate TOA-based UWB localization system in coal mine based on WSN. *Physics Procedia*, 2012(24): 534-540. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.078>
- Contractor, B. 2008.** Two dimensional localization of passive UHF RFID tags, *Doctoral Dissertation*, Wright State University, Master of Science in Computer Engineering, Dayton, 14-15.
- Cui, W., Zhang, L., Li, B., Guo, J., Meng, W., Wang, H., & Xie, L. 2018.** Received signal strength based indoor positioning using a random vector functional link network, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14 (5): 1846-1855. DOI: 10.1109/TII.2017.2760915
- Çayıröglü, İ. 2012.** Kalman filtresi ve programlama, *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı*, 2012(1): 2-4.
- Dardari, D., Conti, A., Ferner, U., Giorgetti, A. & Win, M. Z. 2009.** Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments, *Proceedings of the IEEE*, 97(2): 404-426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008846>
- Deak, G., Curran, K., Condell, J. 2012.** A survey of active and passive indoor localization systems, *Computer Communications*, 35(16): 1939-1954. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2012.06.004>
- DeSantis, V., Feliziani, M., Maradei, F. 2010.** Safety assessment of UWB radio systems for body area network by the (FDTD)-T-2 method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(8): 3245-3248. <https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2010.2046478>
- Engström, H., Helander, F. 2015.** Evaluation and testing of techniques for indoor positioning, *Master's Thesis*, Department of Electrical and Information Technology, Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Lund, Sweden, 17s.
- Fayadh, Rashid A., Fadhil, Hilal A., Abdullah, Farah S., Malek, F., Dawood, Sameer, A. 2014.** Selective update euclidean direction search algorithm for adaptive filtering in indoor wireless rake-receiver, *IEEE 2014 International Conference on Computer, Communication, and Control Technology(I4CT 2014)*, 2-4 September 2014, Langkawi, Malaysia, 329-332. <https://dx.doi.org/10.1109/I4CT.2014.6914199>
- Hameez, M. M. Noori. 2019.** Improving the accuracy of indoor positioning system, *Master's Thesis*, Kadir Has University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul, 45-51.
- Kopta, V., Farserotu, J., Enz, C. 2017.** FM-UWB: Towards a robust, low-power radio for body area networks, *Sensors*, 17(5): 1043-1063. <https://doi.org/10.3390/s17051043>
- Kurnaz, M. 2019.** UWB ile varış zamanı farkına dayalı konum kestirimi, *Yüksek Lisans Tezi*, T.C. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı 4-23.
- Küçük, K. 2016.** UWB haberleşme ile kapalı alanda konum tespiti, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 43-45.
- Küçük, K. 2017.** Geniş bant konum belirleme sistemi performans analizi ve iyileştirilmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1): 26-33. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.64863>
- Lee, K., Nam, Y., Min, S. D. 2018.** An indoor localization solution using Bluetooth RSSI and multiple sensors on a smartphone, *Multimedia Tools and Applications*, 77, 1-20. doi:10.1007/s11042-017-4908-2
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., Liu, J. 2007.** Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *IEEE Tran. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 37(6): 1067-1080. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905750>
- Sheikh, S. M., Asif, H. M., Raahemifar, K., Al-turjman, F. 2021.** Time difference of arrival based indoor positioning system using visible light communication, *IEEE Access*, 9, 52113-52124. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069793>
- Tekbaş, A., Tuncer, T., Erdem, E., 2020.** RSSI sinyalleri kullanarak iç ortamda parmak izi tabanlı YSA ile konum tespitinin gerçekleştirilmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi* 11(3): 925-931. <https://doi.org/10.24012/dumf.692444>
- Woods, J., Radewan, C. 1977.** Kalman filtering in two dimensions. *IEEE Transactions on Information Theory*, 23(4): 473-482. <https://doi.org/10.1109/TIT.1977.1055750>
- Wu, J., 2012.** Three-dimensional indoor RFID localization system, *Doctoral Thesis*, University of Nebraska, The Graduate College at the University of Nebraska, Department of Engineering, Lincoln, 5-19.

- Xiong, H., 2010.** A novel indoor localization scheme, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(3): 287-295.
- Xu, H., Ding, Y., Li, P., Wang R., Li, Y., 2017.** An RFID indoor positioning algorithm based on bayesian probability and k-nearest neighbor, *Sensors (Basel)*, 17 (8): 1806. <https://dx.doi.org/10.3390/s17081806>
- Yıldırım, M. E. 2022.** RSSI based indoor localization with reduced feature dimension, *Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering*, 10(1): 106-109. doi:10.17694/bajece.956866
- Yılmaz, O. 2010.** Kablosuz teknolojilerle kapalı alanda konum belirleme, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 29-46.
- Zhao, L. 2007.** Design and performance of ultra-wideband localization systems, *M. Sc. Thesis*, University of Nebraska, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Lincoln, NE. 4-9.