

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ULTRA GENİŞ BANT TABANLI KAPALI ALAN  
KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİNDE ZAMAN BÖLMELİ  
ÇOKLU ERİŞİM

Cahit TUZANE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Danışman

Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU

Haziran, 2025

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULTRA GENİŞ BANT TABANLI KAPALI ALAN**  
**KONUMLANDIRMA SİSTEMLERİNDE ZAMAN BÖLMELİ**  
**ÇOKLU ERİŞİM**

Cahit TUZANE tarafından hazırlanan tez çalışması 24.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yalçın ŞADI, Üye  
Kadir Has Üniversitesi

---

---

---

Danışmanım Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Ultra Geniş Bant Tabanlı Kapalı Alan Konumlandırma Sistemlerinde Zaman Bölmeli Çoklu Erişim” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Cahit TUZANE

İmza



*Aileme*

## TEŐEKKÜR

---

Tez alıŐmamn her aŐamasında bana rehberlik eden, değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak projemin Őekillenmesine bŧyŧk katkılarda bulunan danışmanım Prof. Dr. Tansal GŧŐLŧOęLU'na teŐekkŧrlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca bana destek olan ve gerekli ofis ve donanımları kullanmamda yardımcı olan Wipelot Teknoloji Sanayi A.Ő.'ye teŐekkŧrlerimi sunarım. Son olarak hayatım boyunca yanımda olan ve beni destekleyerek bugŧnlere getiren aileme sonsuz teŐekkŧrlerimi sunarım.

Cahit TUZANE

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xv</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Taraması.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Tez Kapsamı ve Sınırlılıkları .....	3
<b>2 SİSTEMİN TEMELLERİ</b>	<b>5</b>
2.1 Konumlandırma .....	5
2.1.1 Dış Mekân Konumlandırma	6
2.1.2 İç Mekân Konumlandırma	7
2.1.3 Mesafe Ölçüm Yöntemleri	8
2.1.4 Konumlandırma Yöntemleri	10
2.1.5 Kablosuz Konumlandırma Teknolojilerinin Karşılaştırılması	14
2.2 UWB Teknolojisi .....	15
2.2.1 UWB Tanımı ve Temel Prensipleri	15
2.2.2 UWB Veri Çerçeve Yapısı	18
2.2.3 UWB Avantajları ve Dezavantajları	20

2.3	TWR Tabanlı Mesafe Ölçüm Yöntemi.....	22
2.3.1	TWR Tanımı ve Çalışma Prensibi	22
2.3.2	TWR Avantajları ve Dezavantajları	25
2.4	TDMA Tekniği .....	26
2.4.1	TDMA Tekniğinin Tanımı ve Çalışma Prensibi	26
2.4.2	TDMA ile Diğer Çoklu Erişim Yöntemlerinin Karşılaştırılması	28
<b>3</b>	<b>UWB ve TDMA TABANLI KONUMLANDIRMA SİSTEMİ</b>	<b>30</b>
3.1	Sistem Mimarisi .....	30
3.2	Sistem Bileşenleri .....	31
3.2.1	UWB Mobil Etiket	32
3.2.2	UWB Sabit Okuyucu	34
3.2.3	UWB Ağ Geçidi	37
3.2.4	Konum Hesaplama Motoru	39
3.3	TDMA Mekanizması .....	39
3.3.1	Yetkili Sabit Okuyucuların Senkronizasyon Süreci	39
3.3.2	Mobil Etiket Zaman Dilimi Talebi ve Lider Seçimi	40
3.3.3	Mobil Etiket Lider Değişirme Mekanizması	42
3.3.4	Konfigürasyon ve Parametre Yönetimi	43
3.4	Veri Akışı ve Haberleşme Yapısı.....	44
3.4.1	Sistem Genelinde Veri Akışı	44
3.4.2	Veri Alışverişinde Kullanılan Haberleşme Kanalları	45
<b>4</b>	<b>TEST SONUÇLARI</b>	<b>47</b>
4.1	Deney Düzeni ve Metodoloji .....	47
4.2	Parametre Değişimlerinin Sistem Performansına Etkileri .....	48
4.2.1	Test Senaryoları ve Ölçüm Yöntemi	49
4.2.2	Parametre Değişimi ve Sisteme Etkileri	49

4.3 Sabit Okuyucu Sayısının Konumlandırma Hassasiyetine Etkisi .....	57
4.4 Sonuçların Analizi ve Değerlendirilmesi .....	58
4.4.1 TDMA ve Rastgele Erişim Sistemin Karşılaştırılması	60
<b>5 SONUÇ</b>	<b>63</b>
5.1 Ana Bulgular .....	63
5.2 Sistem Geliştirme Önerileri .....	63
5.3 Araştırmanın Kısıtlılıkları ve Gelecek Çalışmalar .....	64
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>66</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>69</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

$P_r$	Alıcıdaki sinyal gücü
$\lambda$	Dalga boyu
$\Delta f$	Frekans kayması
$v$	Hareket hızı
$c$	Işık hızı
$d$	Mesafe
$n$	Ortama bağlı yayılım katsayısı
$\Delta t$	Variş zaman farkı
$P_t$	Verici gücü
$t$	Zaman

## KISALTMA LİSTESİ

---

A-GNSS	Yardımcı küresel uydu konumlandırma sistemleri
AoA	Variş açısı
BLE	Düşük enerjili bluetooth
CDMA	Kod bölmeli çoklu erişim
DGPS	Diferansiyel küresel konumlandırma sistemi
FCC	Amerika Birleşik Devletleri federal iletişim komisyonu
FCS	Çerçeve kontrol dizisi
FDMA	Frekans bölmeli çoklu erişim
FDOA	Frekans kayması farkı
GNSS	Küresel uydu konumlandırma sistemleri
GPS	Küresel konumlandırma sistemi
LoRa	Uzun menzil
MAC	Ortam erişim kontrolü
NLOS	Doğrudan görüş hattı olmayan
OWR	Tek yönlü mesafe ölçümü
PHY	Fiziksel katman
RF	Radyo frekans
RFID	Radyo frekansı ile tanımlama
RSSI	Alicı sinyal gücü göstergesi
RTK-GPS	Gerçek zamanlı kinematik küresel konumlandırma sistemi
RTLS	Gerçek zamanlı konumlandırma sistemleri
SDS-TWR	Simetrik iki yönlü mesafe ölçümü
TCP/IP	İletim denetim protokolü / internet protokolü
TDMA	Zaman bölmeli çoklu erişim
TDOA	Variş zamanı farkı
ToF	Uçuş süresi
TWR	İki yönlü mesafe ölçümü
UWB	Ultra geniş bant

WiFi

Kablosuz yerel alan ağı



## ŞEKİL LİSTESİ

---

Şekil 2.1 Üç kenar yöntemi kullanılarak konum belirleme süreci .....	11
Şekil 2.2 UWB sinyalinin zaman ve frekans alanındaki yapısı.....	16
Şekil 2.3 UWB'nin diğer kablosuz teknolojilerle frekans spektrumu üzerinden karşılaştırılması .....	17
Şekil 2.4 UWB çerçeve yapısı .....	19
Şekil 2.5 Simetrik iki yönlü mesafe ölçümü mesaj akışı.....	24
Şekil 2.6 TDMA çerçeve yapısı .....	27
Şekil 2.7 TDMA'nın diğer çoklu erişim yöntemleriyle karşılaştırılması .....	28
Şekil 3.1 UWB tabanlı sistemde donanım bileşenleri arasındaki veri akışı ve haberleşme yapısı.....	32
Şekil 3.2 UWB mobil etiket donanım blok diyagramı .....	33
Şekil 3.3 UWB mobil etiket yazılım akış diyagramı.....	34
Şekil 3.4 UWB sabit okuyucu donanım blok diyagramı .....	35
Şekil 3.5 UWB sabit okuyucu yazılım akış diyagramı.....	36
Şekil 3.6 UWB ağ geçidi donanım blok diyagramı.....	37
Şekil 3.7 UWB ağ geçidi yazılım akış diyagramı .....	38
Şekil 3.8 Yetkili sabit okuyucuların senkronizasyon süreci.....	40
Şekil 3.9 Mobil etiketin lider seçim süreci .....	42
Şekil 4.1 Sık mesafe ölçümü yapılan senaryo için donanım yerleşimi .....	50
Şekil 4.2 Yetkili okuyucular arası senkronizasyon .....	51
Şekil 4.3 Mobil etiketlerin kendilerine atanan zaman dilimlerini kullanımı .....	52
Şekil 4.4 Seçilen bir mobil etiketin periyodik kanal kullanım süreci.....	53
Şekil 4.5 Seyrek mesafe ölçümü yapılan senaryo için donanım yerleşimi .....	54
Şekil 4.6 Mobil etiketlerin zaman dilimi kullanımına ilişkin analiz sonuçları.....	55
Şekil 4.7 Seçilen bir mobil etiketin periyodik kanal kullanımı .....	56
Şekil 4.8 Sabit okuyucu sayısına göre ortalama konumlandırma hassasiyeti .....	58
Şekil 4.9 TDMA ve rastgele erişim sistem karşılaştırma grafiği .....	61

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 2.1</b> Konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması .....	<b>13</b>
<b>Tablo 2.2</b> Konumlandırma teknolojilerinin karşılaştırılması .....	<b>14</b>
<b>Tablo 2.3</b> UWB kanallarının merkez frekansları ve bant genişlikleri .....	<b>18</b>
<b>Tablo 2.4</b> UWB avantaj ve dezavantajları .....	<b>22</b>
<b>Tablo 2.5</b> Kanal erişim yöntemlerinin karşılaştırılması .....	<b>29</b>
<b>Tablo 4.1</b> Sık mesafe ölçen donanımlar için başarı yüzdesi dağılım özeti .....	<b>53</b>
<b>Tablo 4.2</b> Seyrek mesafe ölçen donanımlar için başarı yüzdesi dağılım özeti .....	<b>56</b>
<b>Tablo 4.3</b> Sabit okuyucu sayısına göre konumlandırma hassasiyeti .....	<b>58</b>
<b>Tablo 4.4</b> TDMA ve rastgele erişim sistemin başarı yüzdeleri karşılaştırması .....	<b>61</b>

## **Ultra Geniş Bant Tabanlı Kapalı Alan Konumlandırma Sistemlerinde Zaman Bölmeli Çoklu Erişim**

Cahit TUZANE

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU

Kapalı alanlarda hassas konumlandırma, operasyonel verimlilik, doğruluk ve güvenlik açısından giderek daha önemli ve kritik bir konu haline gelmiştir. Ultra geniş bant teknolojisi, yüksek hassasiyet, düşük gecikme süresi ve güvenilirlik gibi avantajlarıyla bu alanda güçlü ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Ancak aynı ortamda birden fazla cihazın konumlandırılması gerektiğinde, haberleşme kanalının rastgele zamanlarda kullanılması nedeniyle sinyal çakışmaları meydana gelmektedir. Bu durum sistem performansını, konum doğruluğunu ve genel güvenilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, ultra geniş bant tabanlı kapalı alan konumlandırma sistemlerinde sinyal çakışmalarını önlemek, performansı optimize etmek ve sistem doğruluğunu artırmak amacıyla dinamik bir zaman bölmeli çoklu erişim yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yöntem, konumu belirlenmek istenen her bir donanımın yalnızca kendisine tahsis edilmiş belirli bir zaman diliminde haberleşme kanalını kullanmasını sağlayarak sinyal çakışmalarını büyük oranda azaltmaktadır. Zaman dilimlerinin dağıtımı için tüm sahayı kapsayacak şekilde stratejik olarak yerleştirilmiş donanımlar seçilerek yetkilendirilmektedir.

Yetkilendirilmiş donanımlar, kendi arasındaki zaman senkronizasyonunu ve kanalı kullanacak donanımlar için zaman dilimi tahsisini yüksek doğrulukla sağlamaktadır. Kanalı kullanacak donanımların kendilerine atanan zaman diliminde haberleşmesi, mesafe ölçüm sinyallerinin kesintisiz, çakışmasız ve güvenli bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen zaman bölmeli çoklu erişim tabanlı yaklaşım, gerçek zamanlı konumlandırma sistemlerinde yoğun ve karmaşık kapalı alanlarda yüksek doğruluk, güvenilirlik, esneklik ve etkin senkronizasyon sağlayarak, sinyal çakışması ve zaman senkronizasyonu gibi kritik problemlere etkili ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Ultra geniş bant, zaman bölmeli çoklu erişim, iki yönlü mesafe ölçümü, gerçek zamanlı konumlandırma sistemi, kapalı alan konumlandırma

# **Ultra Wideband Based Indoor Positioning Systems With Time Division Multiple Access**

Cahit TUZANE

Department of Electronics and Communication Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU

Precise positioning in indoor environments has become an increasingly important and critical issue in terms of operational efficiency, accuracy, and safety. Ultra wideband technology offers a powerful and effective solution in this domain due to its advantages such as high precision, low latency, and reliability. However, when multiple devices need to be positioned within the same environment, signal collisions may occur due to the random access to the communication channel. This situation negatively affects system performance, positioning accuracy and overall reliability. In this study, a dynamic time division multiple access approach is proposed to prevent signal collisions, optimize performance, and enhance system accuracy in ultra wideband based indoor positioning systems. The proposed method significantly reduces signal collisions by ensuring that each device to be positioned accesses the communication channel only within its assigned time slot. To manage the distribution of time slots, certain devices strategically placed to cover the entire area are designated and authorized. These authorized devices ensure time synchronization among themselves and assign time slots to other devices with high precision. The communication of devices within their assigned time slots ensures that distance measurement signals are transmitted continuously, without collisions, and securely. The developed time division multiple access based approach provides



a scalable and effective solution to critical issues such as signal collisions and time synchronization by offering high accuracy, reliability, flexibility, and efficient synchronization in real-time positioning systems operating in dense and complex indoor environments.

**Keywords:** Ultra wideband, time division multiple access, two way ranging, real time location system, indoor positioning



## 1.1 Literatür Taraması

Günümüzde iç mekân konumlandırma sistemleri, küresel uydu konumlandırma sistemlerinin (GNSS: Global Navigation Satellite System) kapalı alanlardaki yetersizliğini aşmak amacıyla farklı kablosuz haberleşme teknolojilerini kullanmaktadır. Bu kapsamda, radyo frekansı ile tanımlama (RFID: Radio Frequency Identification), WiFi (IEEE 802.11), düşük enerjili bluetooth (BLE: Bluetooth Low Energy), ZigBee, LoRa ve ultra geniş bant (UWB: Ultra Wideband) gibi teknolojilere dayanan çözümler önerilmektedir [1][2]. Bu sistemler çoğunlukla alıcı sinyal gücü göstergesi (RSSI: Received Signal Strength Indicator), varış açısı (AoA: Angle of Arrival) veya varış zamanı farkı (TDOA: Time Difference of Arrival) gibi ölçüm tekniklerini kullanmaktadır. Ancak çok yollu yayılım ve sinyal zayıflaması gibi etkiler, bu yaklaşımların santimetre seviyesinde doğruluk sağlamasını güçleştirmektedir.

Literatürde yer alan birçok çalışma, iç mekân konumlandırma sistemlerinde yüksek doğruluk sağlama hedefiyle çeşitli algoritmalar ve teknolojiler önermektedir [1][2]. Özellikle endüstriyel tesisler, depo otomasyonları ve robot navigasyonu gibi uygulamalarda yüksek konum doğruluğu ihtiyacı, UWB teknolojisinin öne çıkmasına neden olmuştur. UWB'nin geniş bant yapısı, kısa darbe süreleri ve yüksek zaman çözünürlüğü, çok yollu yayılıma karşı dayanıklılığı artırmakta ve uçuş süresi (TOF: Time of Flight) ile TDOA gibi zaman tabanlı ölçüm yöntemlerinin doğruluğunu artırmaktadır [3][4].

UWB teknolojisi, düşük yayılım gücü ve yüksek bant genişliği sayesinde yoğun çok yollu ortamlarda dahi güvenilir ToF hesaplamaları yapabilme kabiliyetine sahiptir. Bu da onu, iç mekân konumlandırma sistemleri açısından en uygun

teknolojilerden biri haline getirmektedir. Özellikle büyük depo alanlarında ve üretim tesislerinde, diğer kablosuz teknolojilere kıyasla daha yüksek hassasiyet sunması nedeniyle tercih edilmektedir.

UWB tabanlı sistemlere ilişkin literatürde, sabit okuyucu yerleşim optimizasyonu [5], görüş hattı dışı (NLOS: Non-Line of Sight) durumlarında sinyal filtreleme [6] ve çok sayıda mobil etiketli sistemlerde konum tahmini doğruluğunun artırılması gibi çeşitli başlıklar altında araştırmalar yapılmıştır. Bu sistemlerde hata payını azaltmak için Kalman filtreleme, maksimum olasılık tahmini ve makine öğrenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. UWB teknolojisinin sunduğu yüksek zaman çözünürlüğü ile santimetre düzeyinde doğruluğa ulaşılabilirdiği birçok çalışmada vurgulanmaktadır [3]. Geniş bant sinyallerin kullanımı, sistemlerin çok yollu yayılım koşullarında dahi kararlı ve hassas çalışmasını mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, çok sayıda cihazın aynı ortamda eş zamanlı olarak çalıştığı sistemlerde ortaya çıkan kanal çakışmaları, sistem verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu sorunu azaltmak için kablosuz haberleşme sistemlerinde zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA: Time Division Multiple Access) yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. TDMA, cihazlara belirli zaman dilimlerinde kanal erişimi vererek çakışmaları önlemekte ve kanal verimliliğini artırmaktadır.

Geleneksel TDMA uygulamaları genellikle merkezi kontrol mekanizmalarına dayanmaktadır. Ancak büyük ölçekli, dinamik iç mekân konumlandırma sistemlerinde bu yapıların ölçeklenebilirliği sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle, son yıllarda tamamen dağıtık çalışan TDMA algoritmalarına yönelik araştırmalar artmıştır. Literatürde, sabit altyapıya gerek kalmadan çakışmasız zamanlama sağlayan dağıtık TDMA algoritmalarının UWB sistemlerine başarıyla entegre edilebileceği gösterilmiştir [2].

Bu tez çalışması, mevcut literatürdeki merkezi TDMA yapılarının sınırlamalarını aşmayı amaçlamakta ve UWB tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri için dağıtık bir TDMA algoritması önermektedir. Geliştirilen sistemde, mobil etiketlerin zaman talepleri yetkili sabit okuyucular tarafından dağıtık biçimde karşılanmakta, farklı mesafe ölçüm periyotlarına sahip çok sayıda mobil etiketin aynı ortamda çakışmadan çalışması sağlanmaktadır. Algoritma, gerçek donanımlar üzerinde uygulanarak sistemin başarımı deneysel olarak değerlendirilmiştir.

## 1.2 Tezin Amacı

Günümüzde UWB teknolojisi, iç mekân konumlandırma sistemlerinde sunduğu yüksek doğruluk nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, çok sayıda varlığın aynı haberleşme kanalını kullanarak haberleşmesi sırasında yaşanan kanal erişim problemleri, mevcut sistemlerin ölçeklenebilirliğini ve güvenilirliğini olumsuz etkilemektedir. Konumlandırma amacıyla çalışan UWB cihazları, haberleşme kanalına rastgele erişim sağladığında, zamanlama çakışmaları (collision), kanal tıkanıklığı ve ölçüm hataları meydana gelebilmektedir. Bu durum, konumlandırma doğruluğunu düşürmekte ve büyük ölçekli sistemlerde senkronizasyon zorluklarına yol açmaktadır.

Bu tezde, çok sayıda mobil etiketin sabit okuyucular ile kesintisiz haberleşmesini sağlayan ölçeklenebilir bir TDMA tabanlı zaman dilimi yönetim algoritması geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen algoritma, farklı periyotlarda konum belirleyen mobil etiketlere dinamik olarak zaman dilimi atayarak haberleşme çakışmalarını önlemekte ve UWB tabanlı iç mekân konumlandırma sistemlerinin verimliliğini artırmaktadır. Bu süreç birden fazla yetkili okuyucu tarafından yönetilen dağıtık bir zaman dilimi tahsis mekanizması ile gerçekleştirilmektedir. Böylece, aynı ortamda birden fazla mobil etiketin kesintisiz ve optimize edilmiş bir şekilde konumlandırılması sağlanmaktadır.

Önerilen yaklaşım, fabrika, depo, hastane ve büyük iç mekânlarda UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinin ölçeklenebilirliğini artırarak, daha güvenilir ve çakışmasız bir konum belirleme altyapısı sunmayı hedeflemektedir. Tez kapsamında geliştirilen yöntem, mevcut TDMA tabanlı çözümlerden farklı olarak, zaman dilimi tahsisini merkezi bir yapı yerine dağıtık bir sistem üzerinden gerçekleştirmekte ve böylece haberleşme sürekliliğini garanti altına almaktadır.

## 1.3 Tez Kapsamı ve Sınırlılıkları

Bu tez kapsamında, UWB tabanlı iç mekân konumlandırma sistemlerinde, aynı frekans bandını paylaşan çok sayıda mobil etiketin haberleşmesini yönetmek amacıyla TDMA tabanlı bir zaman dilimi tahsis algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, mobil etiketlerin sabit okuyucular ile iki yönlü mesafe ölçümü (TWR: Two Way Ranging) gerçekleştirdiği senaryoları temel almakta ve

mobil cihazlara dinamik olarak zaman dilimi atayarak kanal çakışmalarının önlenmesini amaçlamaktadır. Çalışma, UWB tabanlı tüm iç mekân konumlandırma sistemlerinde uygulanabilir olup, belirli bir sektöre veya kullanım alanına özgü değildir. Algoritmanın performansı, öncelikle simülasyon ortamında test edilmiş, ardından gerçek dünya deneyleri ile doğrulanmıştır.

Sistem, konfigürasyona bağlı olarak ölçeklenebilir şekilde tasarlanmıştır. Ancak her mobil etiket, mesafe ölçümü sırasında belirli bir süre boyunca haberleşme kanalını kullanma gerekliliği, konum belirleme periyoduyla birlikte sistemin toplam kapasitesini belirleyen başlıca faktörlerden birini oluşturmaktadır.



# 2

## SİSTEMİN TEMELLERİ

---

Tezin bu bölümünde, çalışmada kullanılan temel teknolojiler detaylı olarak ele alınmaktadır. Öncelikle, konumlandırma kavramı genel çerçevede incelenerek, dış ve iç mekân konumlandırma sistemlerinin çalışma prensipleri ve temel farkları açıklanmaktadır. Sonrasında, konumlandırma teknikleri ele alınarak, nesnelerin veya kişilerin konumlarının belirlenmesi için kullanılan temel matematiksel ve fiziksel yöntemler ayrıntılı olarak incelenmektedir.

Konumlandırma sistemlerinde verimli haberleşmeyi sağlamak için kullanılan çoklu erişim teknikleri kapsamında TDMA yöntemine yer verilmiştir. UWB teknolojisi, sinyal yapısı, frekans kullanımı ve diğer kablosuz haberleşme sistemleri ile karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve kapalı alan konumlandırma uygulamalarındaki üstünlükleri detaylandırılmıştır. Son olarak, TWR yöntemi, UWB tabanlı sistemlerde mesafe belirleme süreçlerinde sağladığı yüksek doğruluk açısından değerlendirilmiş ve diğer mesafe ölçüm yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda sunulan teorik altyapı, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde detaylandırılacak olan UWB tabanlı kapalı alan konumlandırma sistemlerinin tasarım ve uygulama süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

### 2.1 Konumlandırma

Konumlandırma, bir nesnenin, cihazın veya kişinin belirli bir referans çerçevesine göre yerinin tespit edilmesini sağlayan teknik ve yöntemler bütünüdür. Günümüzde konumlandırma sistemleri, navigasyon, nesne takibi, otomasyon, güvenlik ve lojistik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dış mekân konumlandırma sistemleri, genellikle GNSS tabanlı olarak çalışırken, iç mekân

konumlandırma sistemleri, uydu sinyallerine erişiminin kısıtlı olduğu alanlarda alternatif yöntemler kullanarak konum belirleme işlemini gerçekleştirmektedir.

Konum belirleme, belirli matematiksel modeller ve fiziksel prensiplere dayanarak gerçekleştirilmektedir. Üçgenleme (triangulation), üç kenar yöntemi (trilateration), ToF ve TDOA gibi yöntemler, kablosuz haberleşme teknolojileriyle birlikte konum belirleme süreçlerinde sıkça kullanılmaktadır [4]. Bu yöntemlerin doğruluğu, kullanılan teknolojiye, sinyal işleme yöntemlerine ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Kapalı alan konumlandırma sistemlerinde kullanılan teknolojiler arasında BLE, WiFi, RFID, Zigbee ve UWB gibi kablosuz haberleşme protokolleri yer almaktadır. Bunlar arasında UWB teknolojisi, geniş bant spektrumunda çalışması ve yüksek çözünürlüklü mesafe ölçümleri yapabilmesi gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır.

Bu bölümde, dış mekân ve iç mekân konumlandırma sistemleri, kullanılan temel yöntemler ve farklı kablosuz konumlandırma teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları detaylı olarak ele alınacaktır.

### **2.1.1 Dış Mekân Konumlandırma**

Dış mekân konumlandırma, açık alanlarda nesnelerin, araçların veya bireylerin konumlarının belirlenmesini sağlayan sistemler bütünüdür. Bu sistemler, genellikle GNSS tabanlı olarak çalışmakta ve geniş coğrafi alanlarda yüksek doğrulukta konum belirleme imkânı sunmaktadır. GNSS, dünya genelinde kullanılan birçok uydu sistemini içermekte olup en yaygın örnekleri küresel konumlandırma sistemi (GPS: Global Positioning System), Glonass, Galileo ve Beidou olarak sıralanmaktadır. GNSS tabanlı dış mekân konumlandırma sistemleri, üç kenar yöntemi prensibine dayalı olarak çalışmaktadır [8]. Bu yöntemde, en az üç farklı uydudan gelen sinyallerin alıcıya ulaşma süreleri ölçülerek kullanıcının konumu belirlenmektedir. GNSS alıcısı, uydulardan gelen sinyallerin yayılma süresini hesaplayarak mesafeleri belirlemekte ve bu verileri kullanarak kesin bir konum tespiti yapmaktadır. Dış mekân konumlandırma sistemleri, navigasyon, haritalama, lojistik, taşımacılık, afet yönetimi ve otonom araçlar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu sistemler bazı sınırlamalara sahiptir. Binalar, yoğun ağaçlık alanlar veya tüneller gibi sinyalin engellendiği bölgelerde GNSS sinyallerinin zayıflaması veya kaybolması nedeniyle konum doğruluğu

düŖebilmektedir. Bu tür durumlarda, farklı konumlandırma teknikleriyle destekleyici çözümler geliŖtirilerek doğruluk artırılabilir. Son yıllarda, yardımcı GNSS sistemleri (A-GNSS: Assisted Global Navigation Satellite System), diferansiyel GPS (DGPS: Differential Global Positioning System) ve gerçek zamanlı kinematik küresel konumlandırma sistemi (RTK-GPS: Real-Time Kinematic Global Positioning System) gibi teknolojiler kullanılarak konumlandırma hassasiyeti artırılmaktadır. A-GNSS, hücresele ağlardan ek veri sağlayarak konum hesaplamalarının hızlanmasına yardımcı olmaktadır. DGPS, baz istasyonları kullanarak GNSS sinyallerinin doğruluğunu artırırken, RTK-GPS santimetre seviyesinde yüksek hassasiyet sağlayarak özellikle hassas tarım, inŖaat ve haritalama gibi alanlarda kullanılmaktadır. GNSS tabanlı dıŖ mekân konumlandırma sistemleri, geniŖ kapsama alanı ve küresel erişim avantajına sahip olmakla birlikte, kapalı alanlarda ve uydu sinyallerinin engellendiği ortamlarda etkinliğini kaybetmektedir.

### **2.1.2 İç Mekân Konumlandırma**

İç mekân konumlandırma, binalar, fabrikalar, havaalanları, alışveriş merkezleri ve sağlık tesisleri gibi kapalı alanlarda nesne veya kiŖilerin konumlarının belirlenmesini sağlayan teknolojiler bütünüdür. DıŖ mekân konumlandırma sistemleri genellikle GNSS tabanlı olarak çalıŖmakta olup, uydu sinyallerinin kapalı alanlarda zayıflaması veya tamamen kaybolması nedeniyle iç mekanlarda güvenilir bir çözümler sunamamaktadır [9]. Bu durum, GNSS'e alternatif olarak iç mekanlarda kullanılabilir konumlandırma teknolojilerinin geliŖtirilmesini zorunlu hale getirmiŖtir. İç mekân konumlandırma sistemleri, kablosuz haberleşme teknolojilerini kullanarak farklı sinyal işleme yöntemleriyle konum bilgisi elde etmektedir. Bu sistemler, genellikle BLE, WiFi, RFID, Zigbee, UWB ve manyetik alan tabanlı yöntemler gibi çeŖitli teknolojilere dayanmaktadır [4]. Kullanılan teknolojiye bağlı olarak konum belirleme işlemleri, RSSI, ToF, TDOA ve AoA gibi farklı ölçüm teknikleriyle gerçekteşirilmektedir. İç mekân konumlandırma sistemlerinin doğruluğu, kullanılan teknolojinin fiziksel ve teknik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

WiFi ve BLE tabanlı konumlandırma sistemleri mevcut kablosuz ağ altyapısını kullanarak geniŖ bir kapsama alanı sağlayabilirken, UWB tabanlı sistemler yüksek bant geniŖliđi ve düşük sinyal yayılım süresi sayesinde santimetre hassasiyetinde



konum bilgisi sunmaktadır. RFID ve manyetik alan tabanlı konumlandırma yöntemleri ise genellikle kısa mesafelerde düşük maliyetli çözümler olarak tercih edilmektedir. İç mekân konumlandırma sistemlerinin en büyük avantajı, kapalı ortamlarda yüksek doğruluk sunabilmesi ve yerel olarak optimize edilebilmesidir. Bununla birlikte, bazı sistemlerde sinyal yansımaları (multipath), elektromanyetik girişimler ve donanım maliyetleri gibi çeşitli kısıtlamalar bulunabilmektedir. Bu nedenle, uygulama alanına bağlı olarak çoklu erişim teknikleri ve sinyal işleme algoritmaları geliştirilerek sistemlerin güvenilirliği ve ölçeklenebilirliği artırılmaktadır. Son yıllarda, özellikle UWB tabanlı gerçek zamanlı konumlandırma sistemleri (RTLS: Real Time Location System), yüksek hassasiyet ve düşük gecikme süresi avantajlarıyla endüstriyel otomasyon, sağlık, lojistik ve akıllı bina uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. İç mekân konumlandırma sistemleri, GNSS'in sınırlamalarını aşarak kapalı alanlarda konum bilgisi sağlayan önemli teknolojiler arasında yer almakta olup, gelişen kablosuz haberleşme teknolojileriyle birlikte doğrulukları ve etkinlikleri giderek artarak endüstriyel ve ticari uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

### **2.1.3 Mesafe Ölçüm Yöntemleri**

Konum belirleme sistemlerinde varlığın konumunun doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, öncelikle hedef ile bilinen konumdaki referans noktaları arasındaki mesafelerin ölçülmesi gerekmektedir. Mesafe ölçüm yöntemleri, sinyalin yayılım süresi, varış zamanı farkı, frekans kayması ya da alınan sinyal gücü gibi fiziksel parametrelere dayanarak mesafelerin tahmin edilmesini sağlar [4][11]. Bu bölümde, kablosuz haberleşme tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılan temel mesafe ölçüm yöntemleri açıklanmaktadır.

#### **2.1.3.1 ToF Yöntemi**

ToF yöntemi, bir sinyalin kaynaktan hedefe gidip geri dönme süresinin ölçülmesiyle mesafenin belirlenmesini sağlamaktadır. Bir sinyalin hedefe ulaşip geri dönme süresi  $t$  olarak ölçüldüğünde, hedef nesneye olan mesafe  $d$ , ışık hızına  $c$  bağlı olarak şu formülle hesaplanmaktadır:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

Bu yöntem, yüksek doğruluk sunabilmesi nedeniyle UWB ve lazer tabanlı mesafe ölçüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

### 2.1.3.2 TDOA Yöntemi

TDOA yönteminde, farklı konumlara yerleştirilmiş referans noktalarına ulaşan sinyallerin varış zamanlarındaki farklar kullanılarak konum belirlenmektedir. Eğer bir sinyal, iki farklı referans noktasına  $t_1$  ve  $t_2$  zamanlarında ulaşırsa, bu sinyalin varış zamanı farkı  $\Delta t$  şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2.2)$$

Bu varış zamanı farkı, sinyalin iki referans noktası arasındaki mesafe farkına karşılık gelmektedir. Eğer referans noktalarının konumları  $(x_1, y_1)$  ve  $(x_2, y_2)$ , sinyalin yayılma hızı  $c$  (ışık hızı) ve hedefin konumu  $(x, y)$  ise, hedefin bu iki referans noktasına olan mesafe farkı  $\Delta d$  şu denklemlerle ifade edilebilir:

$$\Delta d = c \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

Burada  $\Delta d$ , hedefin ilk referans noktasına olan mesafesi  $d_1$  ile ikinci referans noktasına olan mesafesi  $d_2$  arasındaki farkı göstermektedir ( $\Delta d = d_2 - d_1$ ). Bu fark, hedefin konumunu belirlemek için ek referans noktalarıyla birlikte kullanılır. Böylece, sistemdeki diğer referans noktalarına ait benzer varış zamanı farkları da hesaplanarak, hedefin iki boyutlu veya üç boyutlu konumu üçgenleme veya üç kenar yöntemi prensipleriyle elde edilmektedir.

TDOA yöntemi, kablosuz ağ tabanlı konumlandırma sistemlerinde ve mobil haberleşme altyapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yöntemin avantajı, çok sayıda cihazın aynı anda ölçüm yapabilmesini sağlaması ve yüksek doğruluk sunmasıdır [10]. Ancak, referans noktaları arasında hassas zaman senkronizasyonu gerektirdiği için donanım ve altyapı maliyetleri artabilmektedir.

### 2.1.3.3 FDOA Yöntemi

FDOA, hareketli hedeflerin konumlandırılmasında kullanılan bir tekniktir ve Doppler etkisi prensibine dayanmaktadır. Hedefin hareketine bağlı olarak sinyal frekansında bir kayma meydana gelmektedir. Frekans kayması  $\Delta f$ , hareket hızına  $v$  ve sinyal dalga boyuna  $\lambda$  bağlı olarak şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.4)$$

Özellikle radar sistemleri ve uydu haberleşme teknolojilerinde kullanılan bu yöntem, hareketli nesnelerin konumlandırılması açısından büyük önem taşımaktadır [1].

#### **2.1.3.4 RSSI Yöntemi**

RSSI yöntemi, bir sinyalin belirli bir mesafede kaybettiği gücü ölçerek mesafe tahmini yapılmasını sağlamaktadır. RSSI değeri, sinyal yayılım modeli kullanılarak şu formülle ifade edilmektedir:

$$P_r = P_t - 10n \log(d) \quad (2.5)$$

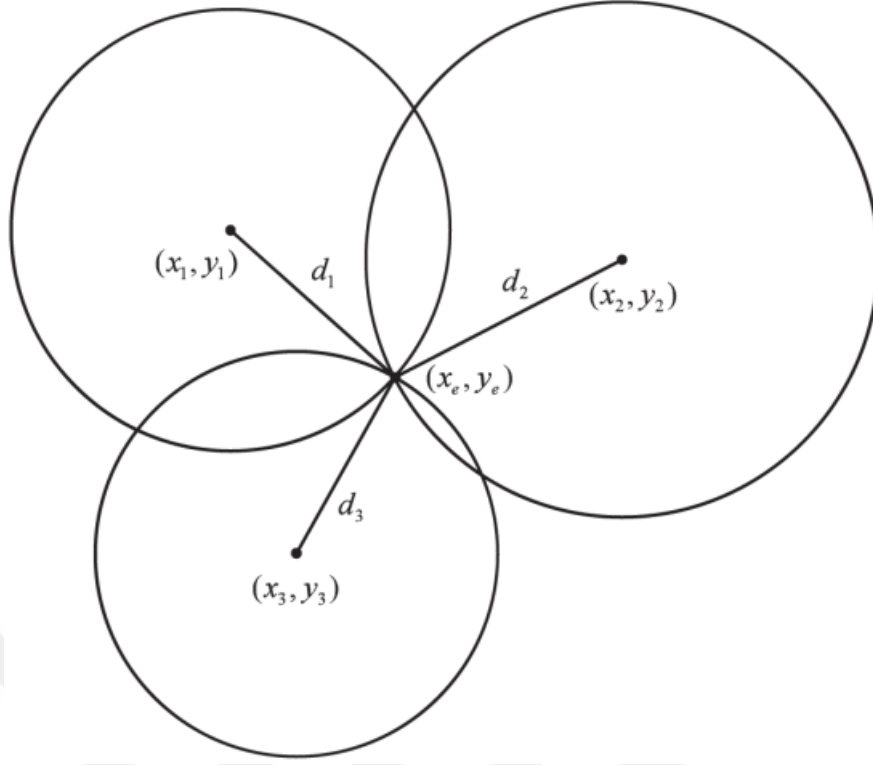
Burada  $P_r$  alıcıdaki sinyal gücünü,  $P_t$  vericinin sinyal gönderim gücünü,  $n$  ortama bağlı yol kaybı katsayısını ve  $d$  mesafeyi ifade etmektedir. RSSI yöntemi, WiFi, BLE ve RFID tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır ancak çevresel faktörlerden etkilenmesi nedeniyle diğer tekniklere kıyasla daha düşük doğruluk sunmaktadır [13].

#### **2.1.4 Konumlandırma Yöntemleri**

Mesafe ölçüm teknikleri kullanılarak hedef ile referans noktaları arasındaki mesafeler belirlendikten sonra, bu mesafeler kullanılarak hedefin kesin konumu hesaplanmaktadır. Konumlandırma yöntemleri, ölçülen mesafeleri veya açıları kullanarak hedefin iki veya üç boyutlu uzaydaki yerini matematiksel olarak belirlemeye yönelik teknikler bütünüdür. Bu bölümde, kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan temel konumlandırma yöntemleri açıklanmaktadır.

##### **2.1.4.1 Üç Kenar Yöntemi**

Üç kenar yöntemi (trilateration), bilinen konumlara sahip en az üç referans noktasından ölçülen mesafelerin kesişim noktası hesaplanarak konum belirleme prensibine dayanmaktadır [14]. Bu yöntemde, Şekil 2.1’de yer alan nesnenin ( $x_e$ ,  $y_e$ ) koordinatlarını belirlemek için, üç sabit referans noktasından alınan mesafe ölçümleri kullanılmaktadır.



**Şekil 2.1** Üç kenar yöntemi kullanılarak konum belirleme süreci

Referans noktalarının koordinatları  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  ve  $(x_3, y_3)$ , hedef nesneye olan mesafeleri de sırasıyla  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  olarak verildiğinde, aşağıdaki denklem sistemi kullanılarak nesnenin konumu hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned}
 (x_e - x_1)^2 + (y_e - y_1)^2 &= d_1^2 \\
 (x_e - x_2)^2 + (y_e - y_2)^2 &= d_2^2 \\
 (x_e - x_3)^2 + (y_e - y_3)^2 &= d_3^2
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Bu denklem sistemi çözülerek hedef nesnenin kesin konumu belirlenmektedir. GNSS tabanlı sistemlerdeki konumlandırma genellikle bu yöntemi kullanmaktadır.

#### **2.1.4.2 Üçgenleme Yöntemi**

Üçgenleme yöntemi (triangulation), hedefin konumunu belirlemek amacıyla mesafe bilgisi yerine sinyalin geliş açılarını kullanan bir tekniktir. Bu yöntemde, konumları bilinen en az iki referans noktası, hedeften gelen sinyalin geliş yönünü belirleyerek konum tahmini yapılmasını sağlar. Her referans noktası için ölçülen açıya karşılık bir doğru tanımlanır ve bu doğruların kesişimi hedefin konumunu verir.

İki referans noktasının koordinatları sırasıyla  $(x_1, y_1)$  ve  $(x_2, y_2)$ , hedefin bu noktalara göre geliş açıları ise  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  olarak biliniyorsa, bu referans noktalarından çıkan doğruların denklemleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned}y - y_1 &= \tan(\theta) \cdot (x - x_1) \\y - y_2 &= \tan(\theta) \cdot (x - x_2)\end{aligned}\tag{2.7}$$

Bu iki doğrusal denklem birleştirilerek çözüm yapıldığında, hedefin  $(x, y)$  koordinatları elde edilir. Hesaplama sonucunda bulunan bu kesişim noktası, hedefin tahmini konumunu ifade eder.

Üçgenleme yönteminin doğru çalışabilmesi için açı ölçümlerinde yüksek hassasiyet gerektirmektedir. Ayrıca, referans noktalarının konumları arasındaki açıklığın yeterli olması ve uygun geometrik yerleşim sağlanması doğruluk açısından kritik öneme sahiptir. Bu yöntem, özellikle optik takip sistemlerinde, radar uygulamalarında ve yönlü sinyal algılayan kablosuz sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [15].

#### **2.1.4.3 AoA Yöntemi**

AoA yöntemi, hedeften yayılan sinyalin, bilinen konumdaki referans noktalarına geliş açısının ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde, birden fazla referans noktasında yer alan alıcılar, sinyalin geliş açılarını tespit ederek hedefin konumunu trigonometrik yöntemler aracılığıyla hesaplamaktadır [16]. Ölçülen açıların geometrik ilişkileri kullanılarak, hedefin iki veya üç boyutlu uzaydaki konumu belirlenmektedir.

Örneğin,  $(x_r, y_r)$  koordinatlarında bulunan bir referans noktasına gelen sinyalin geliş açısı  $\theta$  olarak ölçüldüğünde, hedefin olası konumu, referans noktasından çıkan bir doğru üzerinde yer almakta olup, bu doğrunun denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$y - y_r = \tan(\theta)(x - x_r)\tag{2.8}$$

İki veya daha fazla referans noktasından elde edilen geliş açıları ile tanımlanan doğruların kesişim noktası, hedefin konumunu vermektedir. Daha fazla sayıda ölçüm mevcut olduğunda, hata minimizasyonu amacıyla en küçük kareler yöntemi

gibi istatistiksel teknikler uygulanarak konum tahmini doğruluğu artırılabilir.

AoA yönteminin en önemli avantajı, hedef cihazın aktif sinyal yayımı yapmasına gerek kalmaksızın konum bilgisinin elde edilebilmesidir. Ayrıca, yalnızca iki referans noktasından yapılan ölçümlerle dahi yüksek doğrulukta konum tahmini gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, bu yöntemde hassas geliş açısı ölçümleri gerekmekte olup, genellikle faz farkı veya zaman farkı ölçümlerine dayalı anten dizileri kullanılmaktadır. Bu durum, sistemin donanım karmaşıklığını ve maliyetini artırabilmektedir.

#### 2.1.4.4 Konumlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Konum hesaplama sürecinde kullanılan yöntemler, temel olarak geometrik ilkeler üzerine kurulmakta olup, her bir yöntem belirli varsayımlar ve uygulama koşulları altında farklı performans sonuçları vermektedir. Üç kenar, üçgenleme ve AoA gibi yöntemler; sistemde mevcut olan ölçüm türlerine, senkronizasyon gereksinimlerine, donanım altyapısına ve hedeflenen doğruluk seviyesine göre avantaj ve sınırlamalar barındırmaktadır [17]. Bu nedenle, uygun bir konumlandırma yaklaşımının seçilebilmesi için bu yöntemlerin temel özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Tablo 2.1’de, yaygın olarak kullanılan konum hesaplama yöntemleri temel kriterler açısından karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 2.1** Konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Kriter	Üç Kenar Yöntemi	Üçgenleme Yöntemi	AoA
<b>Gerekli Ölçüm Türü</b>	Mesafe (ToF, TDOA)	Açı ölçümü	Açı ölçümü
<b>Senkronizasyon İhtiyacı</b>	Orta düzey	Yüksek düzey	Yüksek düzey
<b>Donanım Gereksinimi</b>	Düşük–Orta (standart alıcılar)	Orta (açı ölçen donanım)	Yüksek (anten dizisi, yönlü alıcılar)
<b>Konum Doğruluğu</b>	Yüksek	Orta–Yüksek	Yüksek (kısa mesafelerde)
<b>Uygulama Alanları</b>	GPRS, UWB	Optik sistemler, bazı RF çözümleri	BLE, WiFi 6, Radar sistemleri

### 2.1.5 Kablosuz Konumlandırma Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Günümüzde farklı konumlandırma teknolojileri, kullanım alanlarına, doğruluk seviyelerine, sinyal yayılım özelliklerine ve maliyetlerine bağlı olarak çeşitli avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır [18]. Konumlandırma sistemleri temel olarak dış mekân ve iç mekân çözümleri olarak ikiye ayrılmakta olup, bu alanda kullanılan başlıca kablosuz haberleşme protokolleri arasında GNSS, BLE, WiFi, RFID, Zigbee ve UWB yer almaktadır.

Bu teknolojiler, konum belirleme süreçlerinde üç kenar yöntemi, üçgenleme, uçuş süresi, varış zamanı farkı ve alıcı sinyal gücü göstergesi gibi farklı tekniklerden yararlanmaktadır. Kullanılan yöntemler, ölçüm yapılan ortamın fiziksel özelliklerine ve doğruluk gereksinimlerine bağlı olarak değişmekte olup, her bir sistem belirli uygulamalar için avantaj sağlayan özelliklere sahiptir.

Bu bölümde, yaygın olarak kullanılan konumlandırma teknolojileri, doğruluk, kapsama alanı, güç tüketimi, maliyet ve çevresel faktörlere duyarlılık gibi temel kriterler açısından karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.2’de farklı teknolojilerin sunduğu avantajlar ve sınırlamalar özetlenmektedir:

**Tablo 2.2** Konumlandırma teknolojilerinin karşılaştırılması

<b>Teknoloji</b>	<b>Konumlandırma Doğruluğu</b>	<b>Kapsama Alanı</b>	<b>Güç Tüketimi</b>	<b>Maliyet</b>	<b>Çevresel Faktörlere Duyarlılık</b>
<b>GNSS</b>	5-10 metre	Küresel	Orta	Orta	Kapalı alan ve engellerden ciddi şekilde etkilenir
<b>BLE</b>	1-5 metre	Orta	Düşük	Düşük	Elektromanyetik girişime duyarlı
<b>WiFi</b>	5-15 metre	Geniş	Orta	Orta	Engel ve sinyal yansımalarından etkilenebilir
<b>RFID</b>	Santimetre-metre arası	Kısa	Çok düşük	Düşük	Metal ve sıvı yüzeylerden etkilenebilir
<b>Zigbee</b>	2-10 metre	Orta	Düşük	Orta	Diğer kablosuz sistemlerden etkilenebilir
<b>UWB</b>	Santimetre seviyesinde	Orta	Orta	Yüksek	Elektromanyetik girişimden az etkilenir

GNSS tabanlı sistemler geniş kapsama alanı sunmakta ve küresel ölçekte çalışabilmektedir, ancak kapalı alanlarda sinyal kaybı yaşanması nedeniyle iç mekân uygulamaları için yeterli hassasiyet sağlamamaktadır. BLE ve WiFi tabanlı konumlandırma sistemleri, mevcut altyapıları kullanarak iç mekân çözümleri sunmaktadır ancak doğruluk seviyeleri UWB'ye kıyasla daha düşüktür. RFID ve Zigbee tabanlı sistemler, düşük maliyetli çözümler sunmalarına rağmen, sınırlı kapsama alanı nedeniyle büyük ölçekli uygulamalar için uygun değildir. UWB teknolojisi ise santimetre seviyesinde yüksek doğruluk sunması, düşük gecikme süresi ve çevresel faktörlerden daha az etkilenmesi nedeniyle özellikle iç mekân konumlandırma uygulamalarında tercih edilen en güvenilir çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu karşılaştırma, farklı konumlandırma teknolojilerinin uygulama alanlarına ve ihtiyaçlara göre seçilmesi gerektiğini göstermektedir. UWB, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için avantaj sağlarken, BLE ve WiFi tabanlı sistemler düşük maliyetli ve geniş kapsama alanı sunan çözümler olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, kullanım alanına bağlı olarak uygun konumlandırma teknolojisinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

## **2.2 UWB Teknolojisi**

Bu bölümde, öncelikle UWB teknolojisinin tanımı ve temel prensipleri ele alınarak, sinyal yapısı ve çalışma prensibi detaylandırılacaktır. Ardından, UWB teknolojisinin avantajları ve dezavantajları değerlendirilerek, teknolojinin güçlü ve zayıf yönleri açıklanacaktır.

### **2.2.1 UWB Tanımı ve Temel Prensipleri**

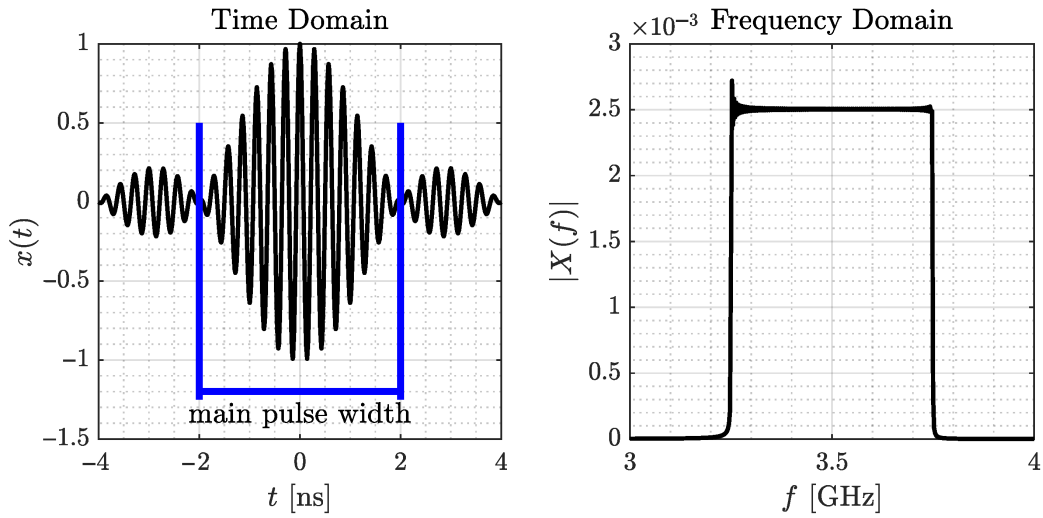
UWB teknolojisi, çok geniş bir frekans spektrumunda düşük güçlü ve kısa süreli darbe sinyalleri ile veri iletimi sağlayan bir kablosuz haberleşme teknolojisidir. UWB, geleneksel dar bant ve geniş bant haberleşme sistemlerinden farklı olarak, en az 500 MHz bant genişliği veya merkez frekansının yüzde 20'si kadar bir spektrum kullanarak çalışmaktadır. Bu geniş bant yapısı, UWB teknolojisinin yüksek veri iletim kapasitesi, düşük güç tüketimi ve hassas zaman ölçümleri yapabilmesini sağlamaktadır.



UWB sinyalleri nanosaniye ölçeğinde çok kısa süreli darbe sinyalleri olarak iletilir. Yüksek zaman çözünürlüğü, mesafe ölçüm doğruluğunu artırır. Bu özellik, iç mekân konumlandırma sistemlerinde santimetre hassasiyetinde konum belirlemeye olanak tanımaktadır. UWB teknolojisinin temel prensibi, sinyalin hedefe ulaşma süresinin ölçülmesi ile mesafe hesaplanmasına dayanmakta olup, bu işlem ToF yöntemi ile gerçekleştirilmektedir [23]. Mesafe hesaplamasında kullanılan denklem (2.1) olarak verilmiştir.

### 2.2.1.1 UWB Sinyalinin Zaman ve Frekans Alanındaki Yapısı

UWB sinyalleri, zaman alanında kısa süreli darbe sinyalleri olarak iletilmekte olup, geniş bant yapısı nedeniyle frekans alanında dikdörtgene yakın bir spektrum oluşturmaktadır. Şekil 2.2’de, UWB sinyalinin zaman alanındaki ve frekans alanındaki karşılığı verilmiştir. Zaman alanında kısa süreli darbe yapısına sahip olan UWB sinyali, frekans alanında geniş bir spektrum kaplamakta olup, dar bant haberleşme sistemlerinden farklı olarak çok düşük güç yoğunluğuna sahiptir [25].



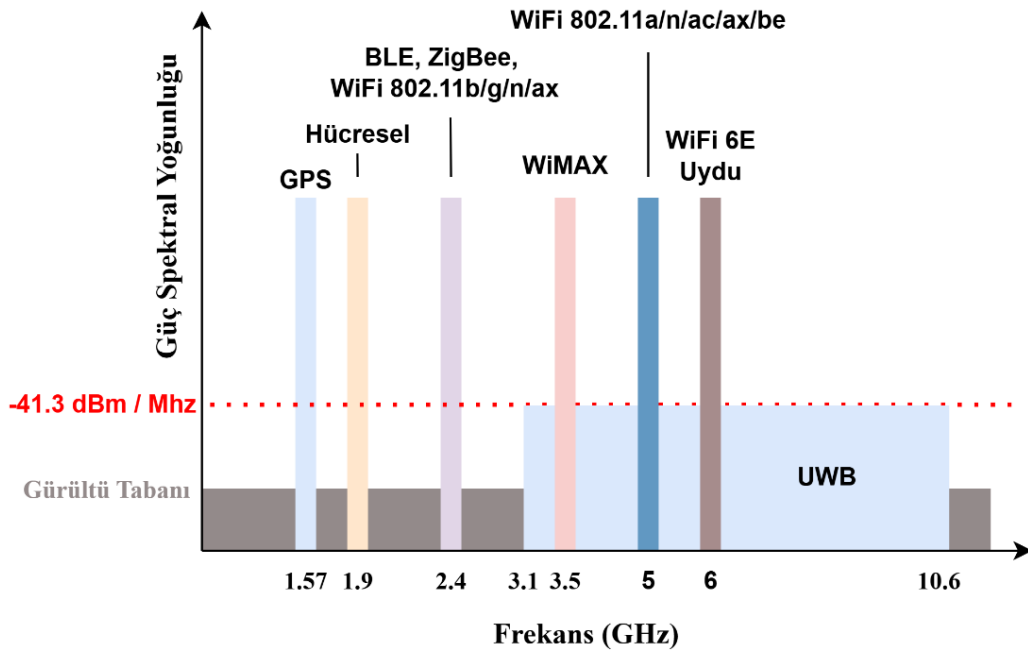
Şekil 2.2 UWB sinyalinin zaman ve frekans alanındaki yapısı

### 2.2.1.2 UWB Frekans Spektrumu ve Kanal Yapısı

UWB, 3.1 GHz ile 10.6 GHz frekans aralığında çalışmakta olup, geniş bant spektrum yapısı sayesinde düşük güçlü ancak yüksek hassasiyetli haberleşme imkânı sunmaktadır. ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC: Federal Communications Commission) tarafından belirlenen sınırlar doğrultusunda, UWB sinyalleri -41.3 dBm/MHz seviyesinde bir güç spektral yoğunluğuna sahiptir. Bu

düşük güç seviyesi, UWB'nin mevcut kablosuz haberleşme sistemleriyle girişim yaratmadan aynı spektrumda çalışabilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 2.3'te, UWB spektrumu ile GPS, hücresel haberleşme, BLE, ZigBee, WiFi 802.11b/g/n/ax, WiFi 6E, WiMAX ve uydu sistemleri gibi diğer kablosuz haberleşme teknolojilerinin kullandığı frekans bantları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Şekilde ayrıca gürültü tabanı seviyesi belirtilmiş olup, UWB'nin geniş bantlı ve düşük güçlü yayın yapısı sayesinde bu sınırın altında girişim oluşturmayacak şekilde tasarlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 2.3 UWB'nin diğer kablosuz teknolojilerle frekans spektrumu üzerinden karşılaştırılması

### 2.2.1.3 UWB Kanalları ve Bant Genişliği

UWB, geniş bant spektrumunda belirli alt kanallara ayrılarak kullanılabilir. FCC tarafından belirlenen UWB spektrumunda, 3.1 GHz ile 10.6 GHz arasındaki frekans aralığı en az 500 MHz bant genişliğine sahip 15 farklı kanala bölünmüştür. Her kanal, geniş bant yapısına uygun şekilde düşük güçlü sinyaller ile veri iletimi gerçekleştirilmektedir. UWB kanallarının merkez frekansları ve bant genişlikleri Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

**Tablo 2.3** UWB kanallarının merkez frekansları ve bant genişlikleri

Kanal Numarası	Merkez Frekans (MHz)	Bant Genişliği (MHz)
1	3494.4	499.2
2	3993.6	499.2
3	4492.8	499.2
4	3993.6	1331.2
5	6489.6	499.2
6	6988.8	499.2
7	6489.6	1081.6
8	7488	499.2
9	7987.2	499.2
10	8486.4	499.2
11	7987.2	1331.2
12	8985.6	499.2
13	9484.8	499.2
14	9984	499.2
15	9484.8	1354.97

### 2.2.2 UWB Veri Çerçeve Yapısı

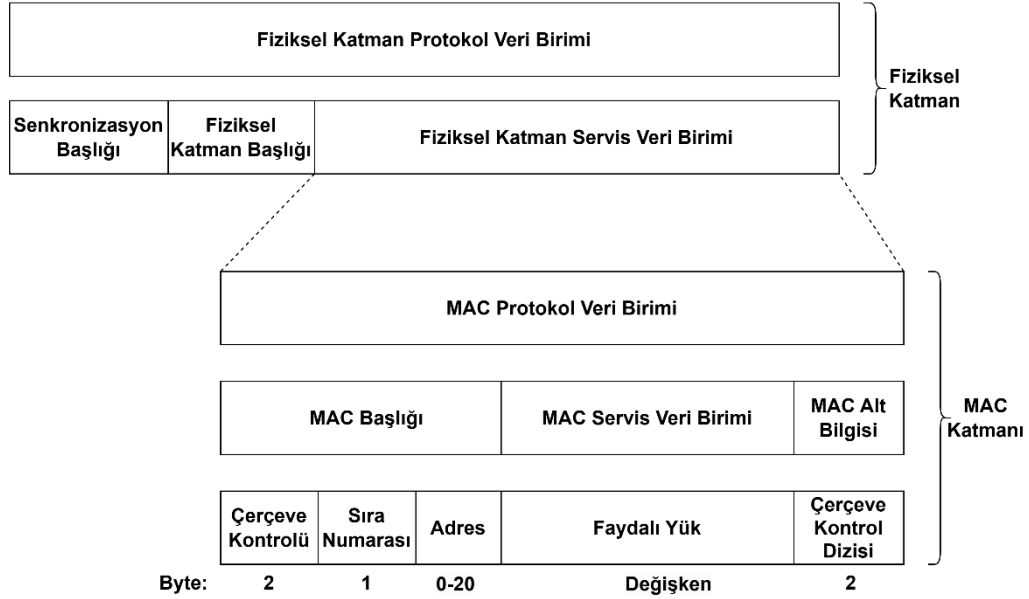
UWB haberleşme sürecinde iletilen tüm veriler, IEEE 802.15.4 standardına uygun bir veri çerçeve yapısı kullanılarak aktarılmaktadır [25]. Bu çerçeve, fiziksel katmanda (PHY: Physical Layer) ve ortam erişim kontrolü (MAC: Medium Access Control) katmanında belirli alanlara ayrılmış olup, her alanın belirli bir işlevi bulunmaktadır. Veri bütünlüğünü sağlamak ve çerçeve içeriğini doğru bir şekilde yorumlamak amacıyla, tüm UWB haberleşmeleri bu standart yapıyı temel almaktadır.

UWB veri çerçevesi, senkronizasyon başlığı (preamble), fiziksel katman başlığı (PHY header), MAC başlığı (MAC header), faydalı yük (payload) ve çerçeve kontrol dizisi (FCS: Frame Check Sequence) olmak üzere beş temel bileşenden oluşmaktadır. Çerçevenin bu bileşenleri, iletilen verinin türüne, boyutuna ve alıcı cihaz tarafından nasıl yorumlanacağına dair kritik bilgiler içermektedir.

Sistem içerisinde zaman senkronizasyonu, mesafe ölçümleri ve veri iletimi gibi farklı haberleşme işlemleri gerçekleştirilse de tüm bu süreçlerde kullanılan veri çerçevesi aynıdır. Haberleşme sırasında verinin içeriği ve uzunluğu değişse de

kullanılan çerçeve formatı standart kalmaktadır. Bu yapı, sistemin farklı bileşenleri arasında tutarlı bir haberleşme mekanizması sağlayarak, veri aktarım süreçlerinin sorunsuz şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Şekil 2.4'te UWB haberleşmesinde kullanılan IEEE 802.15.4 veri çerçeve yapısı detaylı olarak gösterilmektedir. Bu şekil, çerçevenin bileşenlerini ve her alanın veri yapısındaki konumunu açıklamaktadır.



Şekil 2.4 UWB çerçeve yapısı

UWB veri çerçevesi, senkronizasyon başlığı, fiziksel katman başlığı, MAC başlığı, faydalı yük ve çerçeve kontrol dizisi olmak üzere beş temel bileşenden oluşmaktadır. Her bir bileşen, çerçeve içinde belirli bir göreve sahip olup, verinin alıcı tarafından doğru bir şekilde yorumlanmasını sağlamaktadır. UWB çerçeve yapısı içerisinde yer alan alanlar aşağıda açıklanmaktadır.

*Senkronizasyon başlığı (Preamble)*, çerçevenin başlangıcında yer alan bu alan, alıcı cihazın gelen sinyali algılaması, zamanlama bilgilerini senkronize etmesi ve veri çerçevesinin başlangıç noktasını belirlemesi için kullanılır. UWB haberleşmesinde kritik bir rol oynayan senkronizasyon başlığı, genellikle uzun bir diziden oluşarak alıcının sinyali tespit etmesini kolaylaştırmaktadır.

*Fiziksel katman başlığı (PHY header)*, çerçevenin fiziksel katmanına ilişkin bilgileri içeren bu alan, veri aktarım hızını, çerçevenin uzunluğunu ve hata kontrol mekanizmaları için gerekli parametreleri taşımaktadır. Alıcı cihaz, PHY başlığını

yorumlayarak çerçevenin genel özelliklerini belirlemekte ve buna uygun şekilde veri işlemektedir.

*MAC başlığı (MAC header)*, MAC katmanına ait bilgileri içeren bu alan, çerçevenin türünü, kaynak ve hedef adres bilgilerini, paket sırasını ve veri iletimine ilişkin diğer kontrol bilgilerini içermektedir. UWB tabanlı sistemlerde, haberleşen cihazların kimliklendirilmesi ve iletim süreçlerinin yönetilmesi açısından MAC başlığı kritik bir bileşendir.

*Faydalı yük (Payload)*, çerçevenin ana veri taşıyan bölümü olup, zaman senkronizasyonu, mesafe ölçümü veya diğer haberleşme verilerini içerebilmektedir. Faydalı yük alanı, çerçevenin içeriğine bağlı olarak değişken uzunlukta olabilir ve sistem gereksinimlerine göre farklı veri türlerini taşıyabilir.

*Çerçeve kontrol dizisi (FCS)*, veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla kullanılan bu alan, çerçevenin hatalara karşı korunmasını sağlar. Alıcı cihaz, FCS değerini kullanarak iletilen verinin doğruluğunu kontrol eder ve olası hata durumlarında veri paketini yeniden isteme veya hata düzeltme mekanizmalarını devreye sokar.

### **2.2.3 UWB Avantajları ve Dezavantajları**

UWB teknolojisi, birçok avantajı sayesinde iç mekân konumlandırma, nesne takibi, kısa mesafeli yüksek hızlı veri iletimi ve radar sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. UWB teknolojisinin sunduğu yüksek bant genişliği ve hassas zaman ölçümleri, teknolojinin en önemli güçlü yönleri arasında yer almaktadır. Ancak, her kablosuz haberleşme sisteminde olduğu gibi UWB teknolojisinin de belirli sınırlamaları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu bölümde, UWB teknolojisinin avantajları ve dezavantajları sunulmaktadır.

UWB teknolojisinin en büyük avantajlarından biri, yüksek konumlandırma doğruluğu sağlamasıdır. Kısa süreli darbe sinyallerinin kullanımı ve geniş bant spektrumu sayesinde zaman çözünürlüğü çok yüksek olmakta ve bu sayede santimetre seviyesinde hassasiyetle mesafe ölçümü yapılabilmektedir [3]. Bu özellik, özellikle iç mekân konumlandırma ve gerçek zamanlı takip sistemleri için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, UWB sinyalleri düşük güç seviyesinde yayıldığı için, diğer kablosuz haberleşme sistemlerine kıyasla daha az elektromanyetik girişime sahiptir ve mevcut kablosuz ağlarla birlikte çalışabilmektedir [23].

UWB teknolojisinin bir diğere önemli avantajı yüksek veri iletim kapasitesine sahip olmasıdır. Geniş bant spektrumunda çalıştığı için, teorik olarak birkaç Gbps seviyesinde veri iletimi mümkün olabilmektedir [26]. Bu özellik, kısa mesafeli yüksek hızlı veri iletimi gerektiren uygulamalar için UWB teknolojisinin güçlü bir alternatif olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, çok düşük gecikme süresi sayesinde gerçek zamanlı haberleşme gerektiren uygulamalarda yüksek performans sağlamaktadır.

Bununla birlikte, UWB teknolojisinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan ilki, sinyallerin kısa menzilli olmasıdır. UWB sinyalleri geniş bant spektrumuna yayıldığı için güç yoğunluğu düşük olmakta ve bu da sinyallerin uzun mesafelerde zayıflamasına neden olmaktadır [27]. Bu durum, özellikle geniş alanlarda kapsama alanı ihtiyacı olan uygulamalar için UWB teknolojisinin kullanımını sınırlamaktadır. UWB sinyalleri, yüksek frekans bileşenleri nedeniyle bazı katı malzemeler tarafından zayıflatılabilir veya soğurulabilir. Ayrıca, metal yüzeyler gibi yüksek yansıtıcılığa sahip ortamlarda sinyal birden fazla yol üzerinden alıcıya ulaşabilir. Bu durum, zaman tabanlı ölçümlerde sapmalara ve konumlandırma hassasiyetinde düşüğe neden olabilmektedir.

Ayrıca, mevzuat ve spektrum yönetimiyle ilgili kısıtlamalar, UWB teknolojisinin dezavantajları arasında yer almaktadır. UWB teknolojisinin geniş bant spektrumunda düşük güçlü sinyaller yayması, farklı ülkelerde ve bölgelerde farklı düzenlemeler gerektirmektedir. Örneğin, FCC tarafından belirlenen UWB spektrum sınırları ile Avrupa'daki regülasyonlar arasında farklar bulunmaktadır. Bu durum, UWB teknolojisinin küresel ölçekli kullanımını sınırlandırabilmektedir. UWB teknolojisinin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

**Tablo 2.4** UWB avantaj ve dezavantajları

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Santimetre seviyesinde yüksek konumlandırma doğruluğu sağlar.	Kısa menzilli olup geniş alan kapsamı sınırlıdır.
Elektromanyetik girişime karşı dayanıklıdır, diğer kablosuz sistemlerle girişim oluşturmaz.	Metal yüzeyler ve katı cisimlerden sinyal kaybı yaşayabilir.
Geniş bant kullanımı sayesinde yüksek veri iletim kapasitesine sahiptir.	Spektrum yönetimi ve mevzuat gereklilikleri nedeniyle bölgesel sınırlamalar bulunmaktadır.
Çok düşük gecikme süresi ile gerçek zamanlı haberleşmeye uygundur.	Özel donanım ve alıcı-verici modülleri gerektirdiğinden maliyeti yüksektir.
Özel donanım gerektirdiği için yüksek güvenlik sağlar.	Standartlaşma süreci tamamlanmadığı için bazı sistemlerle entegrasyonu zordur.

## 2.3 TWR Tabanlı Mesafe Ölçüm Yöntemi

Bu bölümde, öncelikle TWR tanımı ve çalışma prensibi açıklanarak sistemin temel işleyişi detaylandırılacaktır. Ardından, TWR'nin avantajları ve dezavantajları ele alınarak yöntemin güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilecektir. Son olarak, TWR'nin alternatif mesafe ölçüm yöntemleri ile karşılaştırılması yapılarak, diğer yöntemlere kıyasla sunduğu avantajlar ve kullanım senaryoları incelenecektir.

### 2.3.1 TWR Tanımı ve Çalışma Prensibi

TWR, kablosuz haberleşme sistemlerinde mesafe tespiti yapmak için kullanılan bir zaman tabanlı ölçüm yöntemidir. TWR, bir haberleşme düğümünün (mobil etiket) diğer bir düğümüne (sabit okuyucu) sinyal göndermesi ve bu sinyalin belirli bir süre sonra geri iletilmesi prensibine dayanmaktadır. Sinyalin iletilme ve geri dönüş süresi ölçülerek mesafe hesaplanmaktadır.

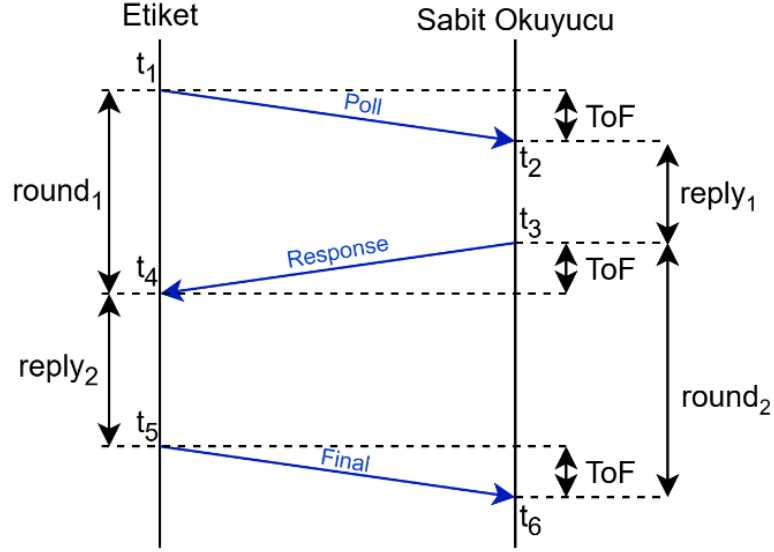
TWR, özellikle UWB tabanlı iç mekân konumlandırma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmekte olup, tek yönlü mesafe ölçüm yöntemlerine kıyasla zaman senkronizasyonuna daha az bağımlıdır [29]. TWR'nin en temel uygulamalarından biri simetrik iki yönlü mesafe ölçümü (SDS-TWR: Symmetrical Double Sided Two Way Ranging) yöntemidir. Bu yöntemde, haberleşme düğümleri arasında poll, response ve final mesajları ile bir zaman ölçümü gerçekleştirilir.

### 2.3.1.1 Simetrik İki Yönlü Mesafe Ölçümü

Simetrik iki yönlü mesafe ölçüm süreci, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, bir etiket ve bir sabit okuyucu arasında gerçekleşen mesaj akışını içermektedir [29][30]. Bu süreç şu şekilde çalışmaktadır:

1. Poll mesajı: Etiket, belirli bir zaman damgası ( $t_1$ ) ile sabit okuyucuya bir poll mesajı gönderir. Bu mesaj, iki yönlü ölçüm sürecini başlatarak, sabit okuyucunun sinyal alım zamanını referans olarak kaydetmesini sağlar.
2. Response mesajı: Sabit okuyucu, poll mesajını aldıktan sonra, belirli bir yanıt süresi ( $t_3 - t_2$ ) sonunda response mesajını etikete geri gönderir. Bu mesaj ile sabit okuyucu, kendi iletim zamanını etikete bildirerek uçuş süresi hesaplamasında kullanılacak ikinci zaman damgasını sağlamış olur.
3. Final mesajı: Etiket, aldığı response mesajından sonra belirli bir gecikme süresi ( $t_5 - t_4$ ) sonunda final mesajını okuyucuya gönderir. Bu mesaj aracılığıyla etiket, kendi iletim zamanını okuyucuya ileterek ölçümün tamamlanmasını ve uçuş süresi hesabının yapılmasını mümkün kılar.
4. Zaman ölçümleri ve hesaplama: Sabit okuyucu, tüm zaman damgalarını kullanarak ToF değerini hesaplar ve buna bağlı olarak mesafeyi belirler.





Şekil 2.5 Simetrik iki yönlü mesafe ölçümü mesaj akışı

### 2.3.1.2 Mesafe Hesaplama Denklemleri

TWR yöntemi ile mesafe hesaplamak için sinyalin ToF kullanılır. Simetrik iki yönlü mesafe ölçümünde, sinyallerin ileri ve geri iletim süreleri birbirine eşit olduğu varsayılır. Uçuş süresi hesaplaması için aşağıdaki denklem kullanılır [31]:

$$ToF = \frac{(T_{round1} - T_{reply1}) + (T_{round2} - T_{reply2})}{4} \quad (2.9)$$

Burada:

- $T_{round1} = t_4 - t_1$ , poll mesajının gönderimi ve response mesajının dönüş süresi,
- $T_{reply1} = t_3 - t_2$ , okuyucunun response mesajını gönderme süresi,
- $T_{round2} = t_6 - t_3$ , response mesajının gönderimi ve final mesajının dönüş süresi,
- $T_{reply2} = t_5 - t_4$ , etiket final mesajını gönderme süresi.

Bu uçuş süresi kullanılarak mesafe ( $d$ ) şu denklem ile hesaplanmaktadır:

$$d = c \cdot ToF \quad (2.10)$$

Burada  $c$  ışık hızıdır ( $3 \times 10^8$  m/s).

### 2.3.2 TWR Avantajları ve Dezavantajları

TWR, kablosuz haberleşme sistemlerinde mesafe belirleme için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, özellikle UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde yüksek doğruluk sağlamaktadır. TWR, uçuş süresi ölçümüne dayandığı için zaman senkronizasyonu gereksinimlerini azaltarak donanım maliyetlerini düşürmekte ve yüksek doğruluklu mesafe hesaplamalarına olanak tanımaktadır [14]. Bununla birlikte, her ölçüm yöntemi gibi TWR'nin de bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu bölümde, TWR'nin güçlü ve zayıf yönleri ele alınarak yöntemin uygulanabilirliği değerlendirilmektedir.

TWR'nin en büyük avantajlarından biri, zaman senkronizasyonuna duyarlılığının düşük olmasıdır. Tek yönlü mesafe ölçüm (OWR: One Way Ranging) yöntemlerinde, verici ve alıcı arasındaki saatlerin yüksek hassasiyetle senkronize olması gerekmektedir. Ancak, TWR yönteminde mesajlar çift yönlü olarak iletiğinden, her düğüm kendi yerel zaman ölçümünü kullanarak mesafe hesabı yapabilmekte ve sistemde mutlak zaman senkronizasyonu ihtiyacı ortadan kalkmaktadır.

Bir diğer önemli avantaj yüksek doğruluk sağlamasıdır. UWB gibi geniş bant teknolojileri ile kullanıldığında, TWR ölçümleri santimetre seviyesinde hassasiyetle gerçekleştirilebilmektedir. SDS-TWR yöntemi kullanılarak, düğümlerin işlem gecikmeleri ve saat kaymaları (clock drift) minimuma indirilmekte, böylece ölçüm hataları önemli ölçüde azaltılmaktadır.

TWR aynı zamanda donanım gereksinimleri açısından daha esnek bir yapı sunmaktadır. Tek yönlü mesafe ölçüm yöntemlerinde hassas zamanlama için yüksek frekanslı osilatörler gerekirken, TWR yönteminde alıcı ve vericinin bağımsız zaman ölçümleri yapabilmesi sayesinde sistemde kullanılan osilatörlerin frekans hassasiyeti daha düşük olabilir. Bu durum, düşük maliyetli donanımlarla yüksek doğruluk elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Ancak, TWR'nin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ölçüm süresi tek yönlü yöntemlere kıyasla daha uzundur. Her ölçümde en az iki yönlü mesaj alışverişi gerektiğinden, tek bir mesafe ölçümünün tamamlanması için geçen süre artmakta ve sistemin tepki süresi gecikebilmektedir. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı yüksek hız gerektiren uygulamalar için bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Bir diğerk sınırlama, radyo kanalındaki tıkanıklık ve çakışma olasılığının artmasıdır. TWR yöntemi, düğümler arasında sürekli çift yönlü mesajlaşma gerektirdiğinden, birden fazla cihazın aynı ortamda eş zamanlı çalıştığı sistemlerde kanal verimliliğini düşürebilmektedir [32].

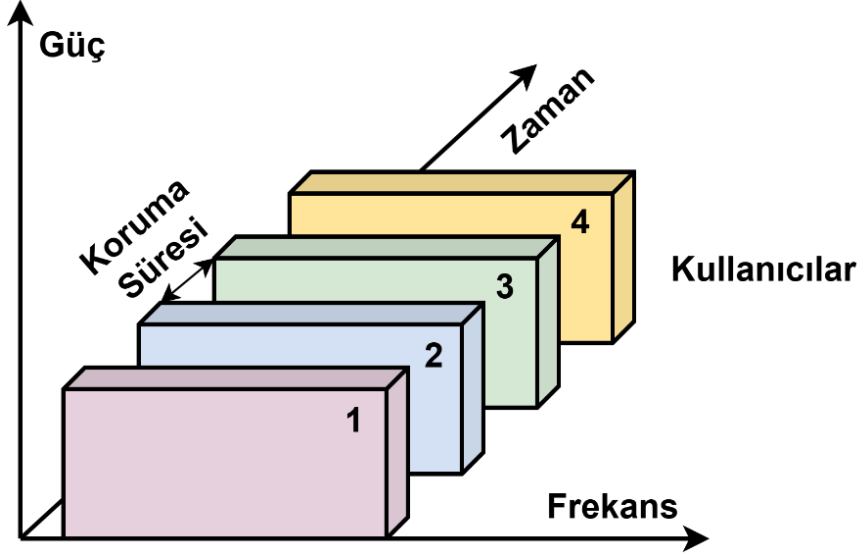
TWR ayrıca sabit işlem gecikmelerine duyarlıdır. Alıcı ve vericinin mesajlara yanıt süresi ölçüm doğruluğunu etkileyebileceğinden, işlem gecikme süreleri (processing delay) değişkenlik gösterdiğinde ölçüm hataları meydana gelebilmektedir. Bu tür hataların önüne geçmek için önceden kalibre edilmiş sabit gecikme değerleri veya sistematik hata düzeltme algoritmaları kullanılmalıdır.

## **2.4 TDMA Tekniğı**

Kablosuz haberleşme sistemlerinde aynı ortamı paylaşan birden fazla kullanıcının sinyal çakışması yaşamadan iletişim kurabilmesi için çeşitli çoklu erişim teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler, belirli bir haberleşme kanalını birden fazla kullanıcı arasında paylaşarak sistem verimliliğini ve iletişim güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir. TDMA, bu çoklu erişim yöntemlerinden biri olup, haberleşme ortamını farklı zaman dilimlerine ayırarak her bir cihazın belirlenen zaman dilimi içinde veri iletmesini sağlamaktadır. Bu bölümde, öncelikle TDMA tekniğinin tanımı ve çalışma prensibi açıklanarak, sistemin temel bileşenleri ve veri iletim süreci detaylandırılacaktır. Ardından, TDMA tekniğinin diğerk çoklu erişim yöntemleriyle karşılaştırılması yapılarak avantajları ve sınırlamaları ele alınacaktır.

### **2.4.1 TDMA Tekniğinin Tanımı ve Çalışma Prensibi**

TDMA, bir haberleşme kanalının farklı zaman dilimlerine bölünerek, her bir kullanıcının belirli bir zaman aralığında veri iletmesine olanak tanıyan bir çoklu erişim yöntemidir. Özellikle kablosuz haberleşme sistemleri, mobil iletişim altyapıları, uydu haberleşmesi ve kapalı alan konumlandırma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TDMA tekniğinin temel prensibi, aynı frekans bandı üzerinde birden fazla kullanıcının ardışık ve çakışmasız zaman dilimlerinde iletişim kurmasını sağlamaktır. Bu yapı sayesinde, kanal kaynakları etkin biçimde kullanılmakta ve sinyal çakışmaları önlenmektedir. TDMA çerçevesinde zaman dilimlerinin nasıl organize edildiğı ve kullanıcılar arasında nasıl paylaşıldığı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



**Şekil 2.6** TDMA çerçeve yapısı

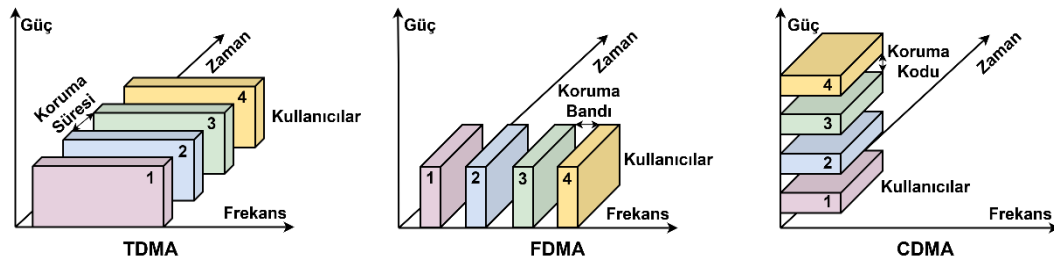
TDMA sistemlerinde veri iletimi, belirli uzunlukta zaman dilimlerine ayrılan bir çerçeve yapısı içerisinde gerçekleştirilir. Her çerçevede, yalnızca tek bir kullanıcıya tahsis edilen bir zaman dilimi bulunur ve kullanıcılar yalnızca bu süre boyunca veri iletimi yapabilir. Zaman dilimi dışında kalan sürelerde kullanıcılar haberleşme kanalını kullanamaz. Bu süreç, sistemin senkronizasyon mekanizması ile yönetilir ve tüm cihazların kendi zaman pencerelerine uyumlu biçimde haberleşmesi sağlanır. TDMA yapılarında, zaman dilimlerinin sonuna genellikle kısa bir koruma süresi (guard time) eklenir. Bu süre, zamanlama kaymalarından veya sinyal gecikmelerinden kaynaklanabilecek olası çakışmaları önlemek amacıyla tanımlanmıştır [7][19].

TDMA sistemlerinde zaman dilimlerinin tahsisi, merkezi bir denetleyici tarafından yönetilebileceği gibi, dağıtılmış senkronizasyon algoritmaları ile cihazlar arası zaman paylaşımı da sağlanabilmektedir. Ayrıca, bazı uygulamalarda dinamik zaman dilimi tahsisi uygulanarak, kullanıcıların trafik yüküne bağlı olarak zaman kaynaklarının daha esnek ve verimli kullanımı hedeflenmektedir.

TDMA tekniğinin başlıca avantajları arasında, kanal kullanım verimliliğinin artırılması, girişim etkilerinin azaltılması ve düzenli veri iletiminin sağlanması yer almaktadır. Bununla birlikte, sistemin doğru çalışabilmesi için hassas zaman senkronizasyonuna ihtiyaç duyulması, zamanlama hatalarına karşı hassasiyet ve iletimler arası gecikme gibi sınırlamalar da TDMA tekniğinin zorlukları arasında yer almaktadır.

## 2.4.2 TDMA ile Diğer Çoklu Erişim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Kablosuz haberleşme sistemlerinde, birden fazla kullanıcının aynı haberleşme kanalını paylaşmasını sağlamak amacıyla çeşitli çoklu erişim teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler, haberleşme ortamının belirli kaynaklarını kullanıcılar arasında paylaştırarak veri iletiminin düzenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. TDMA, bu erişim yöntemlerinden biri olup, kanalın zaman dilimlerine bölünmesi prensibine dayanarak her kullanıcının belirli zaman aralıklarında veri iletmelerini mümkün kılmaktadır. Alternatif çoklu erişim yöntemleri arasında frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA: Frequency Division Multiple Access) ve kod bölmeli çoklu erişim (CDMA: Code Division Multiple Access) gibi yaklaşımlar yer almaktadır [20]. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere bu yöntemlerin her biri, haberleşme kanalının paylaşımı açısından farklı avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır.



Şekil 2.7 TDMA’nın diğer çoklu erişim yöntemleriyle karşılaştırılması

TDMA, zaman dilimi bazlı bir yapı sunduğundan, kanal çakışmalarını önleyerek düzenli bir veri iletim mekanizması oluşturmakta ve girişim etkilerini azaltmaktadır. Ancak, sistemin etkili çalışabilmesi için zaman senkronizasyonunun hassas bir şekilde sağlanması gerekmektedir. FDMA, haberleşme kanalını farklı frekans dilimlerine bölerek kullanıcıların her birine belirli bir frekans bandı tahsis etmektedir [21]. Bu yöntem, senkronizasyon gerektirmemesi açısından avantajlı olsa da sabit frekans tahsisi nedeniyle kanal kapasitesinin verimli kullanılmasını kısıtlayabilmektedir. CDMA, her kullanıcının sinyalini farklı kodlarla modüle ederek aynı frekans bandı içinde eş zamanlı haberleşmesini sağlamaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı, kanal spektrumunu daha etkin kullanabilmesi ve tüm kullanıcıların aynı bantta veri iletmelerine olanak tanmasıdır. Ancak, CDMA tabanlı sistemler, yüksek işlem gücü gerektirdiğinden sinyal ayrıştırma sürecinde karmaşıklık artmakta ve haberleşme süresi uzayabilmektedir [22].

TDMA ile diğer kanal erişim yöntemleri arasındaki temel farklar Tablo 2.5'te özetlenmiştir. Bu tabloda, her yöntemin çalışma prensibi, zaman senkronizasyonu ihtiyacı, spektrum verimliliği, kanal çakışma riski, avantajları ve dezavantajları gibi temel kıyaslama kriterleri ele alınarak sistemlerin güçlü ve zayıf yönleri karşılaştırılmaktadır.

**Tablo 2.5** Kanal erişim yöntemlerinin karşılaştırılması

Özellik	TDMA	FDMA	CDMA
<b>Çalışma prensibi</b>	Kanalı zaman dilimlerine ayırarak her kullanıcının belirli zaman aralıklarında haberleşmesini sağlar.	Kanalı farklı frekans dilimlerine bölerek her kullanıcının kendine ayrılmış frekansta veri iletmelerini sağlar.	Kullanıcılar aynı frekans bandını paylaşır ancak farklı kodlar kullanarak sinyallerini birbirinden ayırır.
<b>Zaman senkronizasyonu</b>	Yüksek hassasiyetle gereklidir.	Gerekli değildir.	Gerekli değildir.
<b>Spektrum verimliliği</b>	Orta seviyede	Düşük	Yüksek
<b>Kanal çakışma riski</b>	Zaman dilimlerinin düzenli yönetilmesiyle çakışma riski azaltılır.	Frekans bandı sabit olduğundan çakışma riski düşüktür.	Kod ayrımı sağlandığında çakışma düşük, ancak karmaşık işleme ihtiyacı doğar.
<b>Avantajları</b>	Girişim az, çoklu erişim düzenli, dinamik zaman tahsisi ile verimlilik artırılabilir.	Sabit tahsis nedeniyle kesintisiz haberleşme sağlar, basit sistem yapısı.	Spektrum verimliliği yüksek, eşzamanlı çoklu kullanıcı desteği sunar.
<b>Dezavantajları</b>	Senkronizasyon ihtiyacı, zaman dilimi bazlı gecikme, çok yol etkilerinin yoğun olduğu ortamlarda semboller arası girişim (ISI) riski	Spektrumun verimli kullanılmaması, kapasite sınırlamaları.	Yüksek işlem gücü gerektirir, sinyal ayrıştırma karmaşıktır.

# 3

## UWB ve TDMA TABANLI KONUMLANDIRMA SİSTEMİ

---

Bu bölümde geliştirilen UWB ve TDMA tabanlı konumlandırma sisteminin temel yapısı ve içeriği genel hatlarıyla ele alınmaktadır. Sistemin tasarımında kullanılan donanım bileşenleri, geliştirilen algoritma ve haberleşme yapısı ilerleyen alt başlıklarda detaylı olarak incelenecektir. Bu kapsamda, sistemin mimari yapısı açıklanacak, içerdiği temel bileşenler tanımlanacak ve sistemin genel işleyişi blok diyagramlar ile desteklenerek ortaya konulacaktır. Ayrıca, sistem içerisindeki veri akışı ve haberleşme yapısı ile TDMA zaman dilimi yönetimi ve senkronizasyon mekanizmasına ilişkin detaylara da yer verilecektir.

### 3.1 Sistem Mimarisi

Bu bölümde geliştirilen sistemin mimari yapısı ele alınmakta ve sistemin genel işleyişi üzerinde durulmaktadır. Sistem, UWB tabanlı bir iç mekân konumlandırma uygulaması olarak tasarlanmış olup, mobil etiketlerin sabit okuyucular ile çakışmasız iletişim kurmasını sağlayan TDMA mekanizmasını entegre eden bir yapıya sahiptir. Sistemin tasarımında, mobil etiketlerin haberleşme kanalını verimli bir şekilde kullanması ve sistem içerisindeki veri akışının optimize edilmesi amaçlanmıştır.

Geliştirilen sistem, donanım bileşenleri arasındaki etkileşimi ve senkronizasyon mekanizmalarını dikkate alarak kanal çakışmalarını önlemeyi hedeflemektedir. Bu yapı, mobil etiketlerin sabit okuyucularla senkronize olarak belirlenen zaman dilimlerinde veri iletilmesini ve konum bilgilerinin doğru şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır.

Sistem mimarisi, bileşenlerin etkileşim mekanizmasını optimize ederek mobil etiketlerin hareket ederken haberleşme kanalını etkili bir şekilde kullanmalarını sağlamaktadır. Bu yapı, büyük ölçekli sistemler için ölçeklenebilirlik sunarken kanal çakışmalarını önlemektedir. Sistemin veri iletim mekanizması, mobil etiketlerin belirli bir zaman referansına göre hareket etmesini sağlayan senkronizasyon süreci ile desteklenmektedir.

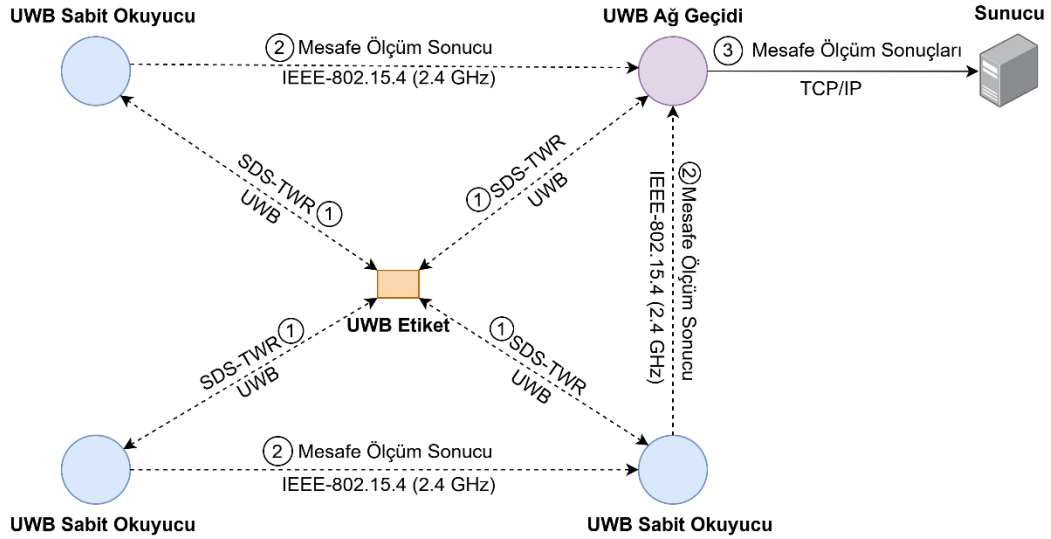
Mobil etiketlerin ilk bağlantı kurma süreci ve yetkili okuyucular tarafından zaman dilimi tahsisi gibi kritik aşamalar sistemin tasarımında dikkate alınmıştır. Bu sayede mobil etiketler ortama entegre olduğu andan itibaren uygun zaman diliminde iletişim kurabilmekte ve kesintisiz veri iletimi sağlanmaktadır. Sistemin esnek yapısı, çok sayıda mobil etiketin farklı zaman dilimlerinde veri iletmeye imkân tanıyarak performans kaybını önlemektedir.

Mobil etiketlerin ve sabit okuyucuların zaman uyumlamasını etkin bir şekilde gerçekleştirmek amacıyla belirli referans noktaları tanımlanmış olup, bu noktalar aracılığıyla zaman bilgisi senkronize edilerek sistemin bütünsel şekilde uyumlu çalışması sağlanmaktadır.

### **3.2 Sistem Bileşenleri**

Bu bölümde geliştirilen sistemin temel donanım bileşenleri ele alınmakta ve her bir bileşenin sistem içindeki rolü detaylı olarak açıklanmaktadır. Geliştirilen sistem, UWB tabanlı kapalı alan konumlandırma uygulamalarında konumu belirlenmek istenen varlık tarafından taşınan mobil etiketlerin etkin şekilde haberleşebilmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, sistemin temel bileşenleri UWB mobil etiket, UWB sabit okuyucu ve UWB ağ geçidinden oluşmaktadır. Şekil 3.1'de sistemin bütün bileşenleri arasındaki veri akışı ve haberleşme yapısı gösterilmektedir. Sistemdeki tüm donanımlarda mikrodenetleyici olarak nRF52833 ve UWB çip olarak DW1000 kullanılmaktadır [33][34].

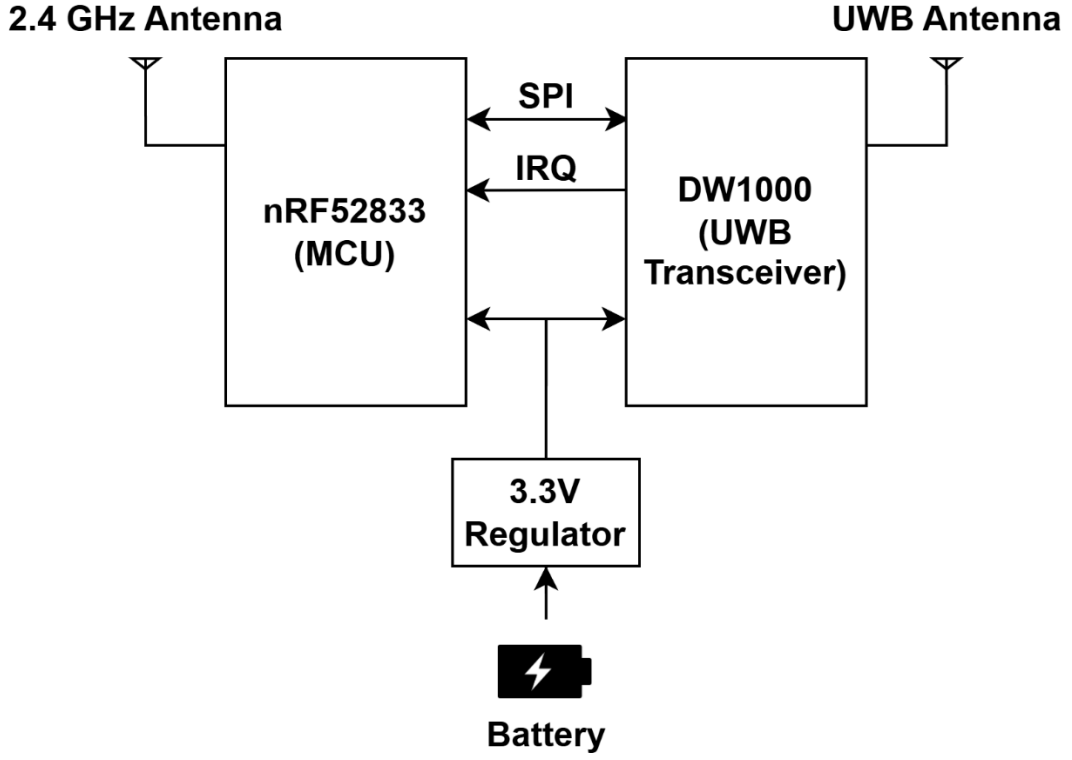




**Şekil 3.1** UWB tabanlı sistemde donanım bileşenleri arasındaki veri akışı ve haberleşme yapısı

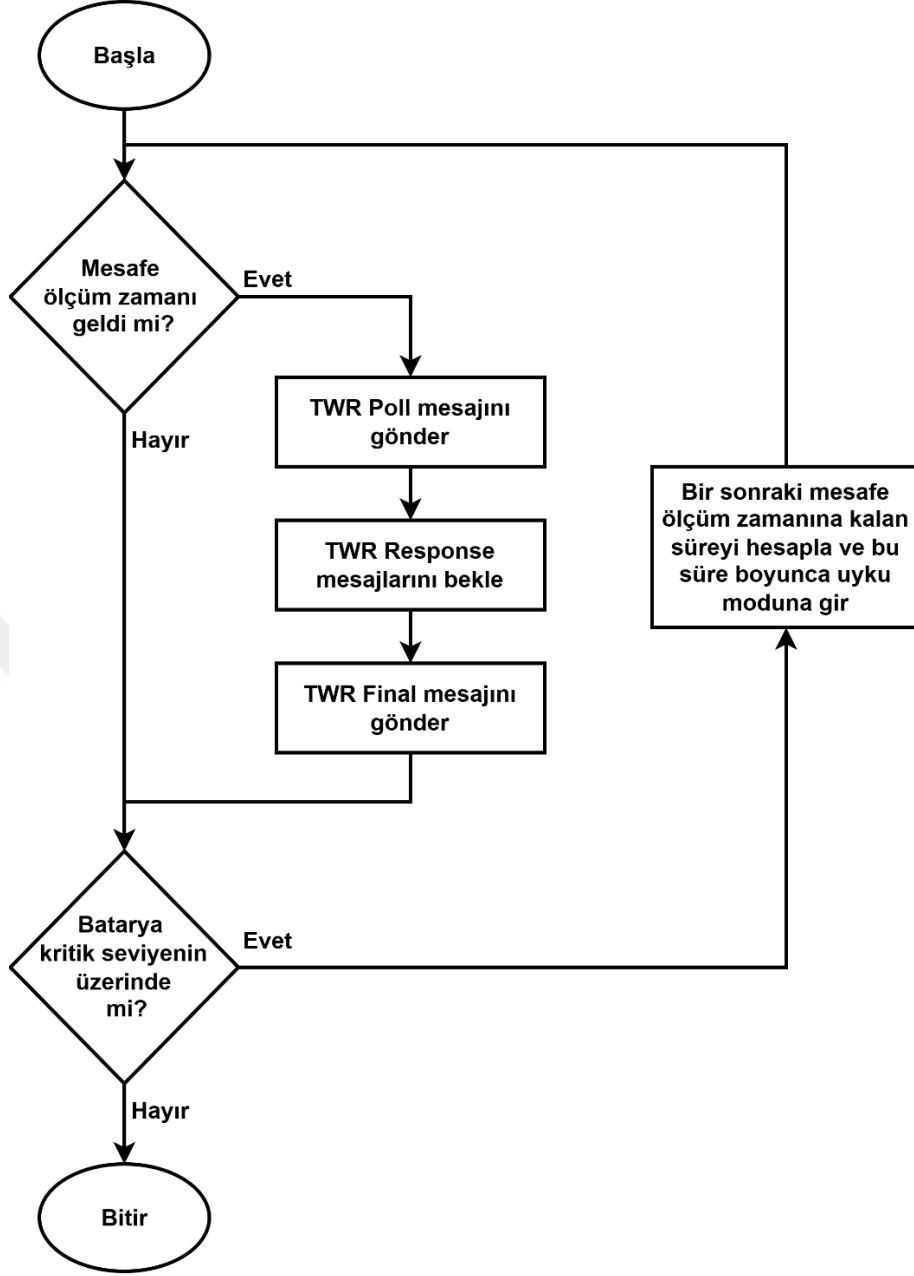
### 3.2.1 UWB Mobil Etiket

UWB mobil etiket (tag), konumu belirlenmek istenen varlık tarafından taşınan donanımlardır. Bu donanımlar, kendilerine atanan zaman dilimlerinde haberleşme kanalını kullanarak UWB sabit okuyucular ile iki yönlü mesafe ölçümü yapmaktadır. Donanımların pilli olması nedeniyle, aktif olarak mesafe ölçümü yapmadığı zamanlarda uyku moduna geçilerek akım tüketimi azaltılmaktadır. UWB mobil etiketin temel donanım bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki bağlantılar **Şekil 3.2**'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2** UWB mobil etiket donanım blok diyagramı

UWB mobil etiketin yazılım akış diyagramı Şekil 3.3'te genel olarak açıklanmaktadır.

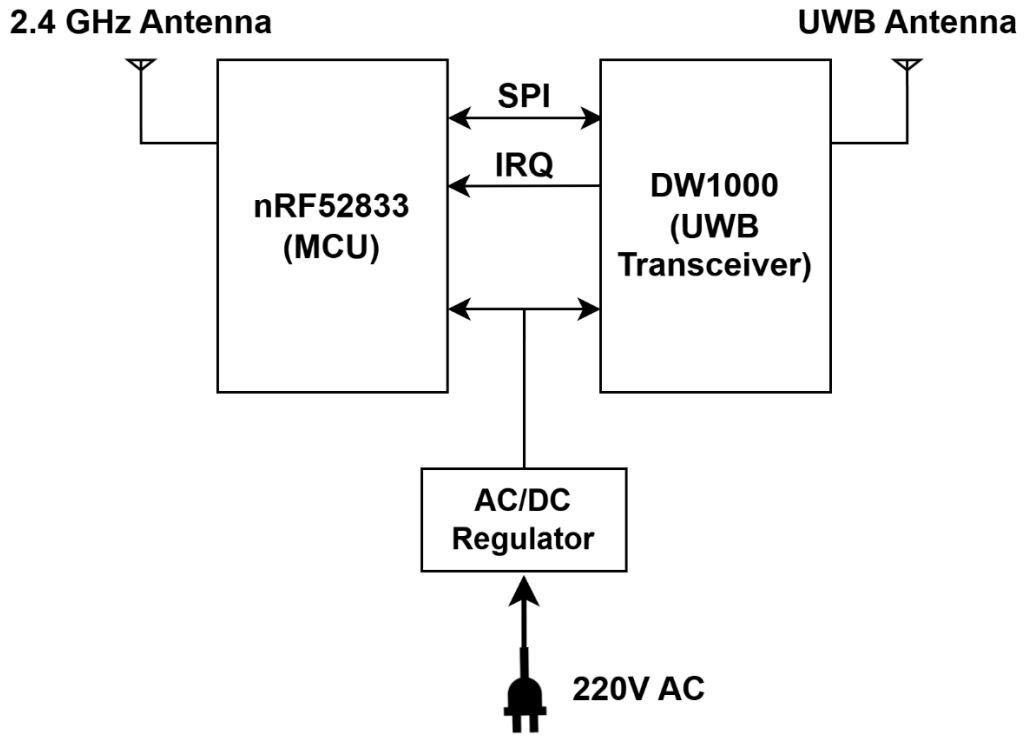


Şekil 3.3 UWB mobil etiket yazılım akış diyagramı

### 3.2.2 UWB Sabit Okuyucu

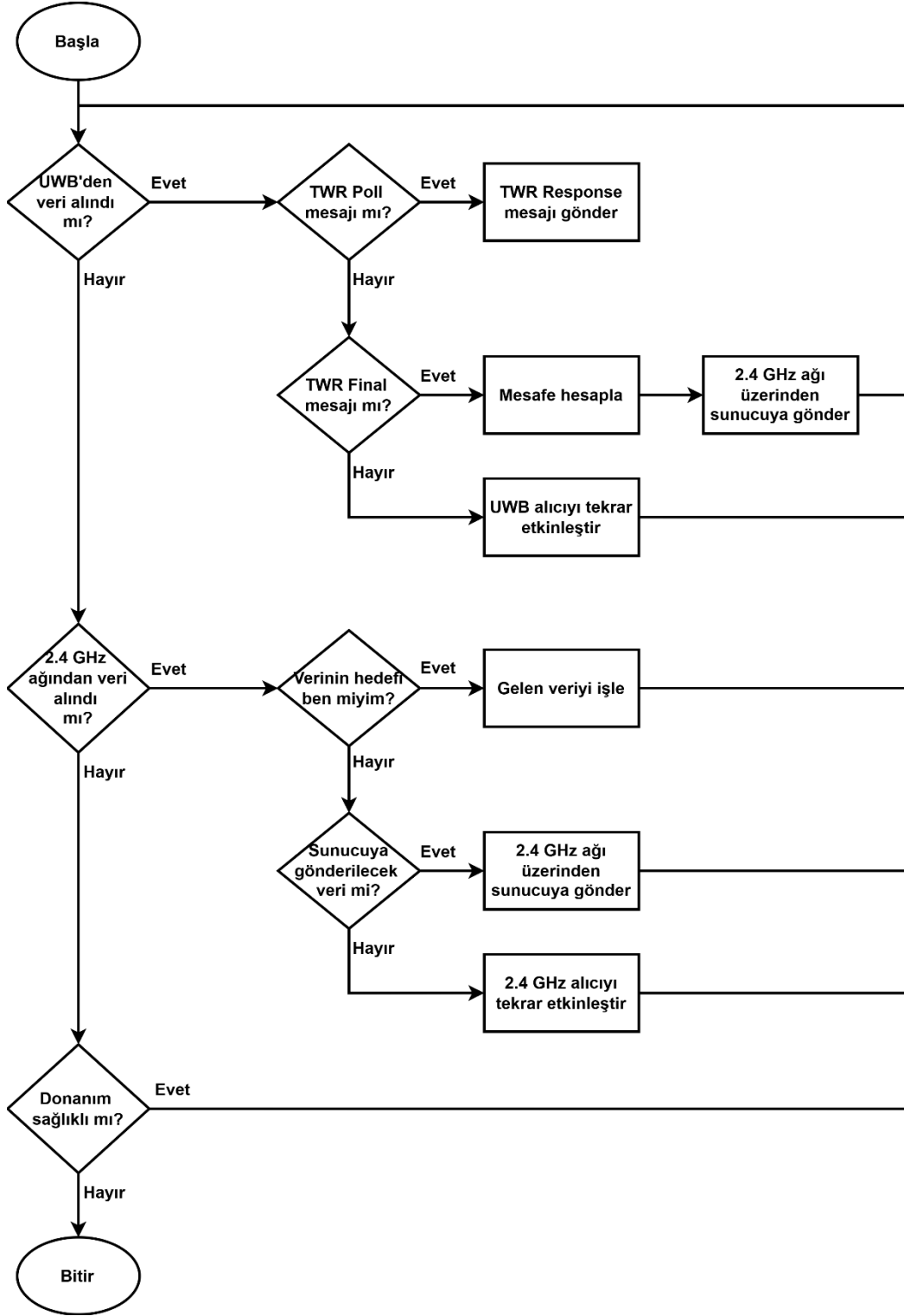
UWB sabit okuyucu (anchor), konum belirlenmek istenen tüm ortamı kapsayacak şekilde stratejik olarak yerleştirilen ve konumu bilinen referans noktaları olup, mobil etiketlerle iki yönlü mesafe ölçümü yaparak mesafe bilgilerini elde etmektedir. Bu bilgiler, sistemin haberleşme yapısında kritik bir rol oynayan 2.4 GHz bandındaki mesh ağ yapısı kullanılarak UWB ağ geçidine aktarılmaktadır. UWB sabit okuyucular, mobil etiketlerden gelen sinyalleri alarak haberleşme kanalını verimli bir şekilde yönetmekte ve ölçüm sonucunu sisteme entegre

etmektedir. UWB sabit okuyucunun temel donanım bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki bağlantılar Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 UWB sabit okuyucu donanım blok diyagramı

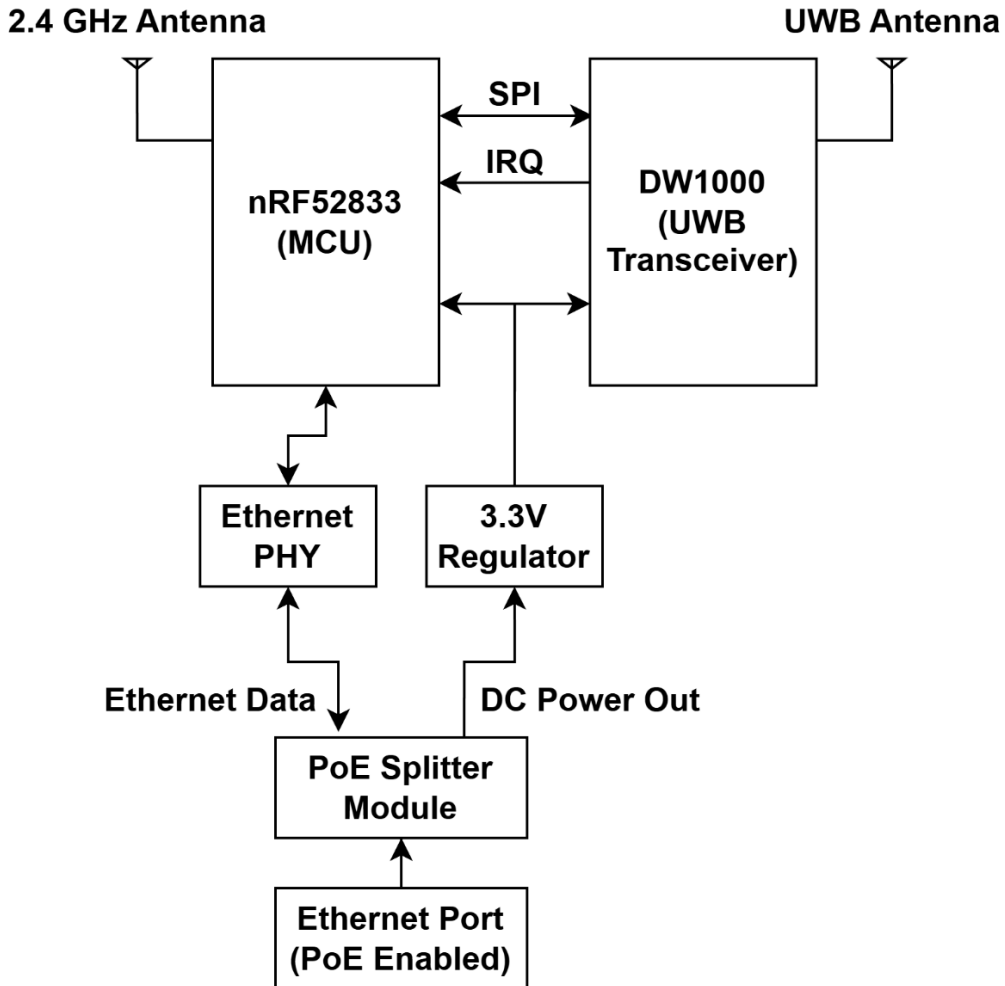
UWB sabit okuyucunun yazılım akış diyagramı Şekil 3.5'te genel olarak açıklanmaktadır.



Şekil 3.5 UWB sabit okuyucu yazılım akış diyagramı

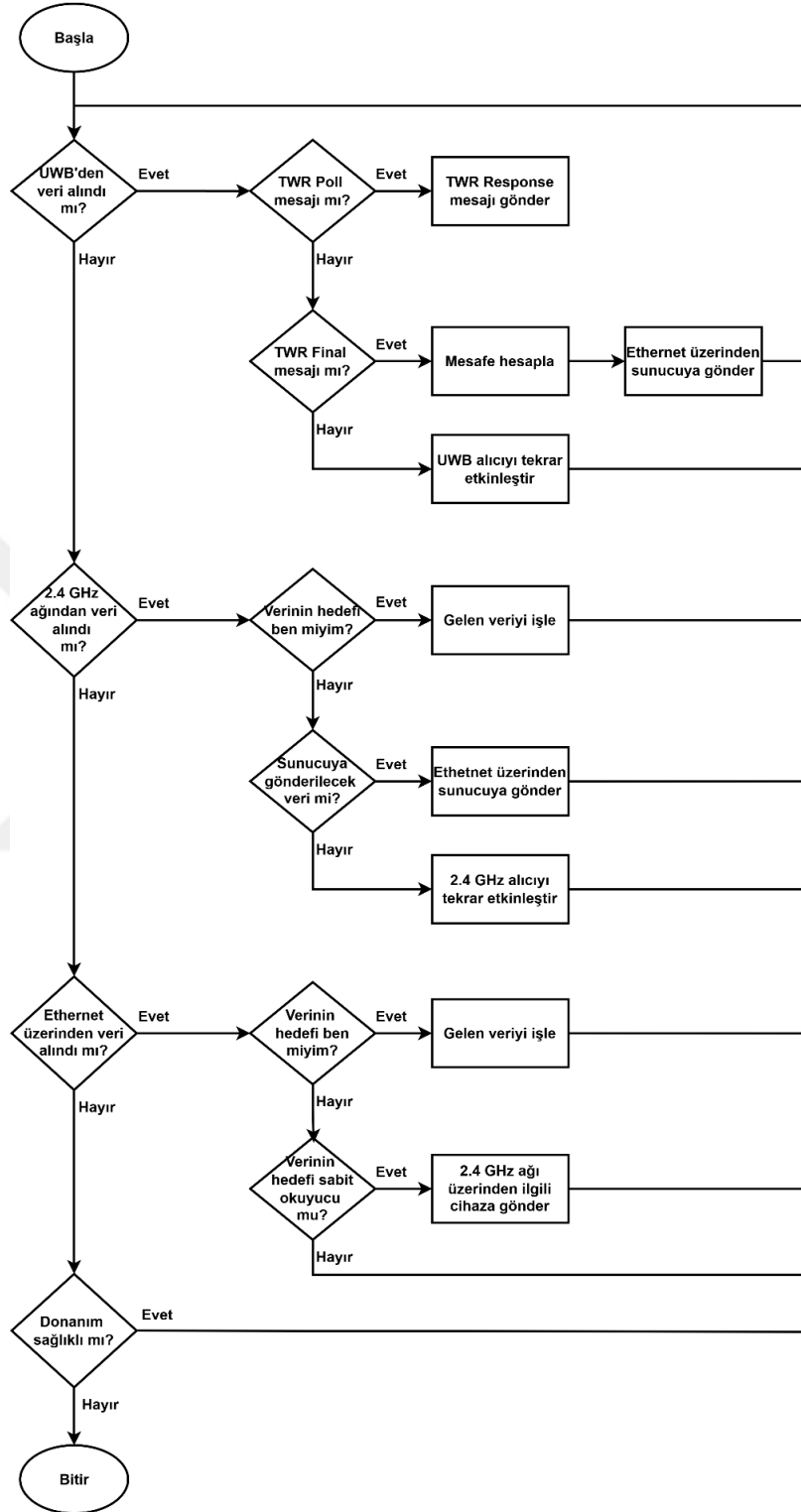
### 3.2.3 UWB Ağ Geçidi

UWB ağ geçidi (gateway), UWB sabit okuyucunun tüm özelliklerine sahip olup, ek olarak 2.4 GHz bandındaki mesh ağ üzerinden kendisine gelen verileri sunucuya TCP/IP (TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol) aracılığıyla iletmektedir. Bu sayede sistem içinde oluşan bütün mesafe verileri merkezileştirilerek konum hesaplama motoruna aktarılmaktadır. Ek olarak konum hesaplama motorundan kendisine gelen parametreleri de işleyerek mesh ağ içerisindeki donanımlara iletimini de sağlamaktadır. UWB ağ geçidi, sistemin zaman senkronizasyon mekanizmasında da rol oynayarak veri iletimini optimize etmektedir. UWB ağ geçidinin temel donanım bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki bağlantılar Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 UWB ağ geçidi donanım blok diyagramı

UWB ağ geçidinin yazılım akış diyagramı Şekil 3.7'de genel olarak açıklanmaktadır.



Şekil 3.7 UWB ağ geçidi yazılım akış diyagramı

### **3.2.4 Konum Hesaplama Motoru**

Sunucu tarafında çalışan konum hesaplama motoru, UWB ağ geçidinden kendisine gelen mesafe bilgilerini işleyerek mobil etiketlerin kesin konumunu hesaplamaktadır. Konum hesaplama motorunda sahadaki tüm UWB sabit okuyucu ve UWB ağ geçitlerinin tam konumu bulunmaktadır. Kendisine gelen mesafe verilerini kullanarak mobil etiketin konum kestirimini yapmaktadır. Buna ek olarak donanımlara konfigürasyon ya da farklı mesajların gönderimi için gerekli yapıyı kurmaktadır, ilgili mesajları UWB ağ geçidi donanımlar üzerinden ilgili donanımlara göndermektedir.

### **3.3 TDMA Mekanizması**

Bu bölümde, sistemde haberleşme verimliliğini artırmak ve sinyal çakışmalarını önlemek amacıyla geliştirilen TDMA mekanizması detaylı olarak açıklanmaktadır. Geliştirilen yapı, mobil etiketlerin sabit okuyucular ile belirli zaman dilimlerinde senkronize bir şekilde haberleşmesini sağlayarak, haberleşme kanalının daha etkin ve çakışmasız kullanılmasına imkân tanımaktadır. Bölüm kapsamında, yetkili sabit okuyucuların senkronizasyon süreci, mobil etiketlerin zaman dilimi talebi ve lider seçimi, lider değiştirme mekanizması ile konfigürasyon ve parametre yönetimi süreçleri sırasıyla ele alınacaktır. Sunulan bu mekanizma, sistemin ölçeklenebilirliğini artırmak ve yoğun ortamlarda dahi güvenilir konumlandırma performansı elde etmek amacıyla tasarlanmıştır.

#### **3.3.1 Yetkili Sabit Okuyucuların Senkronizasyon Süreci**

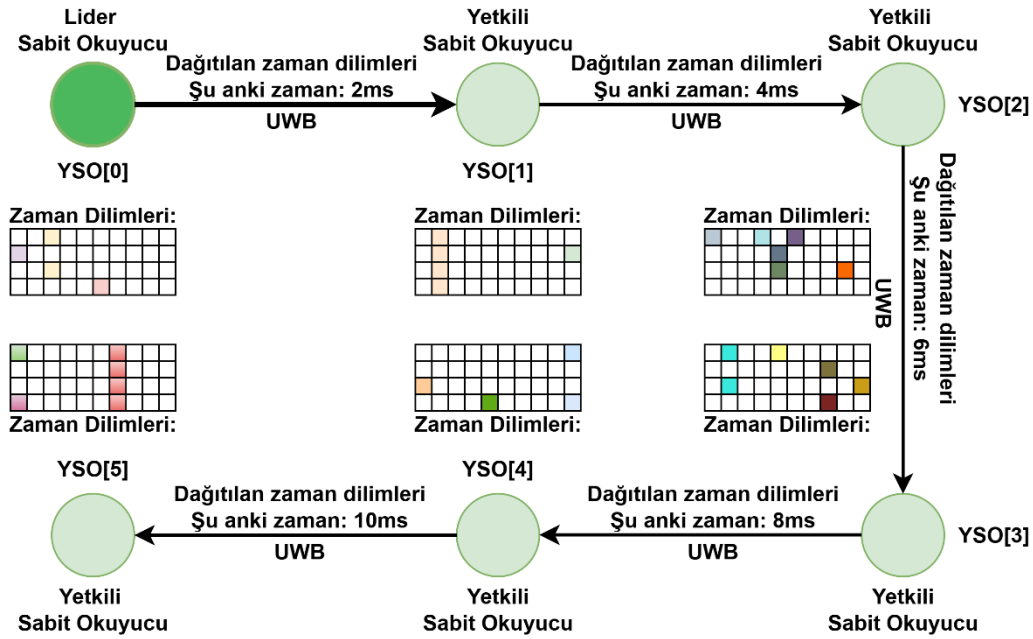
TDMA sisteminin kurulumu sırasında ilk olarak zaman dilimi dağıtımı için UWB ağ geçidi ve UWB sabit okuyucu donanımlar arasından yetkili donanımlar belirlenmektedir. Bu donanımlar seçilirken cihazların UWB menziline hem tüm alanı kapsamaması hem de birbirleri ile olabildiğince az kesişmesi sağlanmaktadır. Donanımlar belirlendikten sonra aralarındaki senkronizasyon mesajlarının yayılması için belirli bir rota belirlenir. Belirlenen yetkili sabit okuyucular her periyodun başında kendi aralarında senkronize olmaktadır. Bu senkronizasyon süreci yetkili sabit okuyucular arasında zaman bilgisi tutarlılığının sağlanması, zaman dilimi tahsisinde çakışmaları önlemek ve sistemin ölçeklenebilirliğini



artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu senkronizasyon süreci, TDMA lideri olarak adlandırılan ve rotanın ilk sırasında yer alan donanım tarafından başlatılmaktadır.

TDMA lideri, her periyodun başında mevcut zaman bilgisi ve atamış olduğu zaman dilimi bilgilerini içeren bir senkronizasyon mesajı üretir. Bu mesaj, önceden belirlenen rota üzerindeki yetkili sabit okuyucular tarafından sırayla kendi bilgilerini içerecek şekilde güncellenerek yayın yapılmaktadır. Bu mekanizma sayesinde, her yetkili sabit okuyucu, güncel sistem zamanını takip edebilir ve komşularıyla paylaşılan zaman dilimlerini senkronize ederek çakışmaların önüne geçer.

Şekil 3.8’de TDMA liderinden başlanarak rotadaki yetkili donanımların senkronizasyon süreci gösterilmektedir. Burada yetkili sabit okuyucular aynı ortamda olduğu için komşular tarafından verilen zaman dilimlerinin diğer yetkili sabit okuyucular tarafından kullanılmadığı görülmektedir, ek olarak her bir mobil etikete tahsis edilen zaman dilimi farklı renk ile gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Yetkili sabit okuyucuların senkronizasyon süreci

### 3.3.2 Mobil Etiketın Zaman Dilimi Talebi ve Lider Seçimi

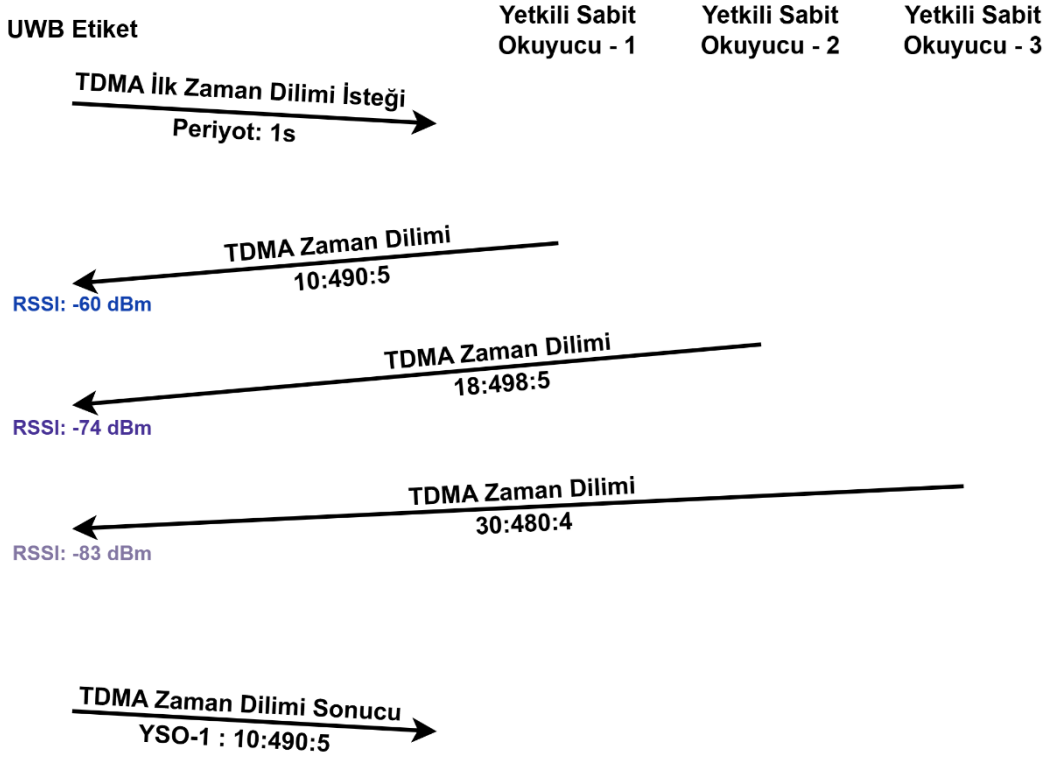
Mobil etiket, ilk kez açıldığında ya da ortama ilk kez girdiğinde UWB kanalında haberleşmek için henüz bir zaman dilimi bulunmadığından, 2.4 GHz üzerinden bir zaman dilimi talebinde bulunur. Bu talebi alan yetkili donanımlar, mevcutta atadığı

zaman dilimlerini ve yetkili olan komşu donanımların atadığı zaman dilimlerini analiz ederek mobil etikete uygun bir zaman dilimi belirlemeye çalışır.

Mobil etiketin zaman dilimi isteği sırasında haberleşme periyodu da belirtilir ve yetkili sabit okuyucular, bu periyoda uygun şekilde boş zaman dilimlerini değerlendirir. Eğer istenen periyoda uygun bir zaman dilimi bulunamazsa, mevcut zaman dilimlerinin dağılımı göz önünde bulundurularak istenen periyoda en yakın zaman diliminde atama yapılır. Bu süreçte, zaman dilimi ataması yalnızca tek bir zaman dilimini değil, belirli bir periyoda karşılık gelecek şekilde düzenli aralıklarla yerleştirilmiş birden fazla zaman dilimini içerecek şekilde yapılır. Atama bilgisi mobil etikete, ilk ve son zaman dilimleri ile birlikte bu aralıkta kaç adet zaman diliminin bulunduğunu belirten üçlü bir yapı hâlinde iletilir. Böylece mobil etiket, kendisine tahsis edilen zaman dilimi dizisini hesaplayarak farklı ölçüm zamanlarına karşılık gelen tüm zaman dilimlerini bağımsız olarak kullanabilir. Bu yapı, özellikle farklı periyotlarda çalışan mobil etiketlerin ağda senkronize biçimde çalışabilmesine olanak tanır.

Mobil etiket, kendisine gelen zaman dilimi tahsis mesajlarını değerlendirerek ilk lider okuyucu seçimini gerçekleştirir. Bu aşamada 2.4 GHz üzerinden alınan mesajların RSSI değeri kullanılarak kendisine en yakın donanımı, yani en güçlü sinyali göndereni daha avantajlı olacak şekilde değerlendirerek lider donanımı belirler. Lider seçimi sonrasında, mobil etiket seçtiği lider donanımı ve zaman dilimi bilgisini paylaşır. Ardından tahsis edilen zaman dilimini kullanarak UWB haberleşme kanalını kullanmaya başlar.

Şekil 3.9'da mobil etiketin ilk açılış sürecinde UWB haberleşmesine başlamadan önce yetkili donanımlardan zaman dilimi talep etmesi, her okuyucudan alınan sinyal gücüyle birlikte olası zaman dilimi seçeneklerini değerlendirmesi ve bu bilgiler doğrultusunda lider okuyucu seçim süreci şematik olarak gösterilmektedir. Bu örnekte mobil etiket, en güçlü sinyal seviyesine sahip Yetkili Sabit Okuyucu - 1'i lider olarak seçmiş ve bu okuyucudan 10:490:5 biçiminde ifade edilen zaman dilimi bilgisini almıştır. Bu yapı sayesinde mobil etiket, 10, 130, 250, 370 ve 490 numaralı zaman dilimlerinde haberleşme kanalını kullanacak şekilde çalışmasını senkronize biçimde sürdürebilmektedir.



Şekil 3.9 Mobil etiketin lider seçim süreci

### 3.3.3 Mobil Etiketın Lider Değiştirme Mekanizması

Mobil etiket, başlangıçta belirlediği lider okuyucu ile haberleşmesini sürdürse de hareket ettikçe çevresindeki yetkili sabit okuyucuların konumları ve sinyal kalitesi değişebileceğinden, haberleşmenin kesintisiz devam edebilmesi için belirli koşullar altında lider okuyucusunu değiştirmektedir. Bu süreç, mobil etiketin her mesafe ölçümünden sonra mevcut lider okuyucusunu ve diğer yetkili okuyucularla olan ölçümlerini tekrar değerlendirmesiyle gerçekteşmektedir. Mobil etiket, mevcut lider okuyucusundan belirli bir eşik değerden daha yakın mesafede bulunan başka bir yetkili sabit okuyucu ile ardışık mesafe ölçümleri gerçekteştirirse, yeni lider okuyucuya geçiş yapmaktadır.

Lider değişim süreci yalnızca mesafe bazlı olarak gerçekteşmemektedir. Mobil etiket, mevcut lider okuyucusuyla belirli bir süre boyunca haberleşemezse veya zaman dilimi tahsisinde tutarsızlık yaşanırsa, çevresindeki diğer yetkili sabit okuyucuları değerlendirerek yeni bir lider seçmektedir. Böylece haberleşme sürecinde meydana gelebilecek kesintiler önlenerek konum belirleme işleminin sürekliliği sağlanmaktadır. İlk lider seçiminde mobil etiket RSSI değerlerini

kullanarak lider belirlerken, lider değişim sürecinde RSSI yerine daha hassas bir veri olan TWR yöntemiyle elde edilen mesafe ölçümlerini kullanmaktadır.

Lider değişimi tamamlandığında, mobil etiket yeni lider okuyucusunu ve zaman dilimi bilgisini yayınlar, böylece ilgili mobil etikete zaman dilimi vermiş diğer yetkili donanımlar zaman dilimlerini tekrar kullanılabilir hale getirmektedir. Böylece zaman dilimlerinin daha verimli kullanımı sağlanmaktadır.

Dinamik lider değiştirme mekanizması sayesinde, mobil etiketlerin hareketli ortamlarda bile zaman dilimi tahsisinde kesintisizlik sağlanarak UWB tabanlı haberleşme kanalının etkin kullanımı desteklenmektedir.

### **3.3.4 Konfigürasyon ve Parametre Yönetimi**

Sistemin çalışmasını düzenleyen çeşitli parametreler, sistemin ilk kurulumu sırasında lider donanıma yüklenmekte ve sistem çalışırken de gerektiğinde lider cihaz üzerinden güncellenebilmektedir. Parametrelerin değişimi, lider cihazın her periyodun başında güncel değerleri yetkili sabit okuyuculara ilemesiyle sağlanmaktadır. Bu iletim süreci sayesinde, tüm sistem bileşenleri senkronize bir şekilde çalışarak güncellenen parametreleri kullanabilmektedir.

Mobil etiketler, zaman dilimi tahsisi sürecinde kendi lider cihazdan gelen güncel parametreleri dikkate alarak haberleşmelerini sürdürmektedir. Sisteme yeni bir cihaz eklendiğinde, kendisine gelen güncel parametreleri alarak mevcut yapı ile uyumlu şekilde çalışmaya başlar.

Sistemin performansı, bu parametrelerin optimum seviyede belirlenmesine bağlıdır. Zaman dilimi süresinin artırılması, mobil etiketlerin aynı periyotta daha fazla sabit okuyucu ile ölçüm yapmasını sağlarken, aynı ortamda birlikte çalışabilecek mobil etiket sayısını azaltmaktadır.

Sistemde yer alan parametreler aşağıda açıklanmaktadır.

*TDMA periyodu*, TDMA kapsamında bir periyodun toplam süresini belirler. Bu süre, yetkili sabit okuyucuların senkronizasyonu için ayrılan süre ve mobil etiketler için ayrılan zaman dilimlerinin toplamını oluşturmaktadır. Sisteme katılmak isteyen bir mobil etiket maksimum bu periyotta zaman ölçümü yapabilir.

*Yetkili sabit okuyucu rota uzunluğu*, yetkili sabit okuyucular arasında her bir periyodun başında iletişim kurulan maksimum rota uzunluğunu tanımlar, sahada bu sayının üzerinde zaman dilimi dağıtımı için yetkilendirilmiş donanım olamaz.

*Yetkili sabit okuyucular arası zaman aralığı*, yetkili sabit okuyucuların her bir periyodun başında gönderdiği senkronizasyon paketleri arasındaki zaman aralığını belirler. Her bir yetkili sabit okuyucu rotada kendinden önceki indeksten sonra bu süre kadar bekleyerek kendi verilerini gönderir.

*Toplam zaman dilimi sayısı*, mobil etiketler için ayrılan toplam zaman dilimi sayısını ifade eder.

*Zaman dilimi süresi*, her bir mobil etikete tahsis edilen zaman diliminin süresini ifade eder.

### **3.4 Veri Akışı ve Haberleşme Yapısı**

Bu bölümde, geliştirilen sistemde veri akışının nasıl gerçekleştiği ve haberleşme yapısının temel bileşenleri ele alınmaktadır. Mobil etiketlerin sabit okuyucular ile haberleşmesi, ölçüm sonuçlarının iletilmesi ve bu süreçte kullanılan veri iletim mekanizmaları açıklanacaktır.

Sistemde veri akışı, mobil etiketlerin sabit okuyucular ile gerçekleştirdiği mesafe ölçümlerinin toplanması ve bu bilgilerin UWB ağ geçidi üzerinden sunucuya ulaştırılması sürecini içermektedir.

#### **3.4.1 Sistem Genelinde Veri Akışı**

Sistem genelinde veri akışı, mobil etiketler, UWB sabit okuyucular, UWB ağ geçidi ve sunucu bileşenleri arasında gerçekleşmektedir. Bu yapı, mobil etiketlerin konumlarının belirlenmesi için gerekli mesafe ölçümlerinin gerçekleştirilmesini ve bu ölçümlerin işlenmek üzere sunucuya aktarılmasını içermektedir. Sistem bileşenleri arasındaki veri akışı, belirli bir hiyerarşi doğrultusunda düzenlenmiş olup, her bir bileşenin veri iletim sürecindeki rolü açıkça tanımlanmıştır.

Mobil etiketler, kendilerine atanan zaman dilimleri içerisinde yakınındaki sabit okuyucular ile UWB kanalından TWR gerçekleştirmektedir. Bu süreç, sistemdeki veri akışının ilk aşamasını oluşturmaktadır. Mobil etiketler, belirlenen zaman dilimlerinde birden fazla sabit okuyucu ile ölçüm yaparak konum hesaplaması için

gerekli olan mesafe bilgilerinin oluşmasını sağlamaktadır. Periyodik olarak gerçekleştirilen bu ölçümler, mobil etiketlerin hareketli ortamlarda konum takibini sürdürebilmesini sağlamakta ve sistemin dinamik yapısının korunmasına katkıda bulunmaktadır.

Sabit okuyucular, ölçüm sürecinin tamamlanmasının ardından elde ettikleri mesafe bilgilerini 2.4 GHz bandında çalışan mesh ağı üzerinden UWB ağ geçidine iletmektedir. Ayrıca, bir sabit okuyucu mesh ağı üzerinden başka bir sabit okuyucunun mesafe ölçüm verisini alırsa, bu veriyi de aynı ağ üzerinden iletmektedir. Bu yapı, sabit okuyucuların konumlarına bağlı olarak veri iletiminde çoklu aktarım mekanizmasının kullanılmasını ve sistemin haberleşme altyapısının esnekliğini artırmaktadır.

UWB ağ geçidi, kendi yaptığı mesafe ölçümlerinin yanı sıra mesh ağı üzerinden kendisine ulaşan verileri herhangi bir işleme tabi tutmadan doğrudan TCP/IP aracılığıyla sunucuya aktarmaktadır. Ağ geçidinin veriyi işlemeden yalnızca yönlendirmesi, sistemin düşük gecikme süresi ile çalışmasını sağlamakta ve haberleşmenin sürekliliğini sağlamaktadır.

### **3.4.2 Veri Alışverişinde Kullanılan Haberleşme Kanalları**

Sistem genelinde veri alışverişinin düzenli ve kesintisiz bir şekilde sağlanabilmesi için UWB ve 2.4 GHz haberleşme kanalları birlikte kullanılmaktadır. Bu iki kanalın aynı sistem içinde entegre edilmesi, haberleşme yükünün dengeli bir şekilde dağıtılmasını ve sistemin kesintisiz bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Haberleşme süreçleri, veri türüne, zamanlama gereksinimlerine ve sistemin genel işleyişine bağlı olarak farklı iletişim protokollerinin kullanımını gerektirmektedir.

Sistem bileşenleri arasındaki veri alışverişi, zaman açısından kritik olan ve olmayan haberleşme işlemleri göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. UWB kanalı, düşük gecikme, yüksek doğruluk ve hassas zamanlama gerektiren haberleşme işlemleri için tercih edilmektedir. Özellikle mobil etiketlerin sabit okuyucular ile gerçekleştirdiği TWR ölçümleri ve yetkili sabit okuyucular arasında gerçekleştirilen senkronizasyon paketleri, UWB kanalı üzerinden yapılmaktadır. Böylece, UWB tabanlı konumlandırma sisteminin zaman duyarlı operasyonları düşük gecikmeyle gerçekleştirilmektedir.

Buna karşın, sistem içinde zaman açısından kritik olmayan haberleşme süreçleri 2.4 GHz bandı üzerinden gerçekleştirilmekte ve böylece UWB haberleşme kanalında gereksiz yük oluşumu engellenmektedir. Bu doğrultuda, sabit okuyucular tarafından elde edilen mesafe ölçüm verileri 2.4 GHz haberleşme ağı üzerinden UWB ağ geçidine aktarılmakta ve buradan sunucuya iletilmektedir. Bu yöntem, sistem içinde haberleşmenin iki ayrı kanala bölünerek yönetilmesine ve genel performansın artırılmasına olanak tanımaktadır.

Mobil etiketlerin haberleşme sürecine başlamadan önce kendilerine ilk zaman dilimlerinin tahsis edilmesi işlemi, UWB kanalının kontrolsüz şekilde kullanılmasını önlemek amacıyla 2.4 GHz bandı üzerinden gerçekleştirilir. Böylece, mobil etiketlerin UWB kanalında rastgele veri iletimi yapmasının ve zaman dilimi çakışmalarına yol açmasının önüne geçilmektedir. Zaman tahsis işleminin ardından, mobil etiketler UWB kanalına entegre edilerek TDMA tabanlı haberleşme sistemine dahil olmaktadır.

Ayrıca, sistemin haberleşme güvenliğini sağlamak amacıyla mesh ağı üzerinden iletilen veriler şifrelenerek gönderilmektedir. Bu sayede, veri bütünlüğü korunarak sistem içindeki haberleşme süreçlerinin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Öte yandan, haberleşme sürecinde herhangi bir veri kaybı yaşanması durumunda, sistem tekrarlı deneme mekanizmasını devreye alarak iletilmeyen verinin yeniden iletilmesini sağlamaktadır. Bu yapı, özellikle geniş ölçekli ortamlarda sistemin güvenilirliğini ve performansını artıran temel bir mekanizma olarak çalışmaktadır.

Sonuç olarak, sistemin genel veri akışı, farklı haberleşme kanallarının belirli işlevlere atanmasıyla optimize edilmiştir. UWB kanalı, yüksek hassasiyet ve düşük gecikme gerektiren süreçler için ayrılırken, 2.4 GHz kanalı daha az zaman duyarlılığı gerektiren veri iletim işlemlerini üstlenmektedir. Böylece, sistem bileşenleri arasındaki veri iletimi etkin bir şekilde yönetilerek haberleşme altyapısının güvenilirliği ve verimliliği artırılmaktadır.

# 4

## TEST SONUÇLARI

---

Bu bölümde, geliştirilen sistemin performans değerlendirmesi ve doğrulama süreçleri ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı, sistemin gerçek dünya koşullarında ölçeklenebilirliğini, zaman senkronizasyon doğruluğunu ve haberleşme sürekliliğini test etmektir. Bu kapsamda, algoritmanın fiziksel test alanında farklı senaryolar altında nasıl çalıştığı incelenmiştir.

İlk olarak, sistemin deney düzeneği ve kullanılan metodoloji açıklanacak, ardından değişken parametrelerin sistem üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Son olarak, test sonuçları analiz edilerek geliştirilen yaklaşımın performansı detaylandırılacaktır. Testler sırasında mobil etiketlerin zaman dilimi tahsisi, lider okuyucu değişim süreçleri, haberleşme gecikmeleri ve sistemin genel işleyişi gözlemlenmiş, elde edilen veriler sistemin doğruluğunu ve kararlılığını belirlemek amacıyla analiz edilmiştir.

Test süreci boyunca, sistemin parametre bazlı yönetilebilirliği değerlendirilmiş ve çeşitli senaryolar altında zaman dilimi yönetiminin etkinliği ölçülmüştür. Bu kapsamda, farklı mesafe ölçüm periyotlarına sahip mobil etiketlerin aynı ortamda haberleşme sürecindeki uyumu ve sistemin ölçeklenebilirliği incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, sistemin belirlenen parametreler doğrultusunda nasıl performans gösterdiği ortaya konulmuştur.

### 4.1 Deney Düzeni ve Metodoloji

Bu bölümde, geliştirilen sistemin gerçek dünya testleri için kurulan deney düzenekleri ve kullanılan metodoloji açıklanmaktadır. Algoritmanın doğruluğunu ve performansını değerlendirmek amacıyla testler kontrollü bir ofis ortamında gerçekleştirilmiş ve farklı senaryolar altında sistemin çalışması incelenmiştir. Testler sırasında mobil etiketlerin zaman dilimi tahsisi, lider okuyucu değişim süreçleri, haberleşme gecikmeleri ve sistemin genel işleyişi gözlemlenmiş, elde



edilen veriler sistemin doğruluğunu ve kararlılığını belirlemek amacıyla analiz edilmiştir.

Deneyler, mobil etiketler, UWB sabit okuyucular, UWB ağ geçidi ve merkezi sunucu bileşenlerini içeren bir test ortamında gerçekleştirilmiştir. Testlerin amacı, geliştirilen TDMA tabanlı zaman yönetim mekanizmasının ölçeklenebilirliğini değerlendirmek ve farklı parametre değişikliklerinin sistem üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu bağlamda, belirlenen senaryolar doğrultusunda mobil etiketlerin TWR periyotları, zaman dilimi süreleri ve sistemdeki toplam etiket sayısı değiştirilerek sistemin farklı koşullardaki davranışı gözlemlenmiştir.

Sistemin performansını değerlendirmek için UWB ve 2.4 GHz haberleşmesini izlemek amacıyla paket yakalama (sniffer) donanımları kullanılmıştır. Bu donanımlar, UWB ve 2.4 GHz kanallarındaki paketleri her şeyi dinleme (promiscuous) modunda dinleyerek zaman dilimi tahsisi ve haberleşme sürelerinin doğrulanmasını sağlamıştır. Toplanan veriler, Wireshark programında Python ve Lua programlama dilleri ile özel olarak geliştirilen analiz yazılımları kullanılarak işlenmiş, her bir etiketin haberleşme zamanlamaları detaylı olarak gözlemlenmiştir.

Test süreci boyunca çeşitli senaryolar uygulanmış ve sistemin performansı ölçülebilir metrikler üzerinden analiz edilmiştir. Bu senaryolar altında, haberleşme gecikmeleri, lider okuyucu değişim süreçleri ve zaman senkronizasyon doğruluğu detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, mobil etiketlerin hareket durumuna bağlı olarak zaman dilimi taleplerini güncelleme mekanizması test edilerek, sistemin değişken koşullar altında nasıl performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

## **4.2 Parametre Değişimlerinin Sistem Performansına Etkileri**

Bu bölümde, sistemin farklı konfigürasyon parametreleri altında nasıl çalıştığı incelenmektedir. Mobil etiketlerin mesafe ölçüm periyotları, zaman dilimi süreleri ve toplam mobil etiket sayısındaki değişimlerin sistem performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Özellikle, haberleşme başarısı, zaman senkronizasyon doğruluğu ve sistem ölçeklenebilirliği gibi kritik faktörler değerlendirilmiştir.

Testler sırasında, mobil etiketlerin zaman dilimi tahsis sürecinde başarılı olup olmadığı gözlemlenmiş ve her bir etiketin toplamda yapması gereken mesafe ölçümü sayısı ile gerçekleştirdiği mesafe ölçümü sayısı oranlanarak başarı yüzdesi

hesaplanmıştır. Bu başarı yüzdesi, veritabanında saklanan ölçüm sonuçları analiz edilerek elde edilmiştir.

Ayrıca, Wireshark ile yapılan analizlerde senkronizasyon paketlerinin iletim düzeni, mobil etiketlerin belirlenen zaman dilimlerinde kanalı doğru şekilde kullanıp kullanmadığı ve farklı periyotlarla çalışan mobil etiketlerin haberleşme sürekliliği incelenmiştir. Farklı test senaryolarında yapılan değişikliklerin sistem üzerindeki etkileri hem istatistiksel veriler hem de gerçek zamanlı paket analizleri üzerinden değerlendirilmiştir.

#### **4.2.1 Test Senaryoları ve Ölçüm Yöntemi**

Bu bölümde, sistemin performans analizini gerçekleştirmek için uygulanan test senaryoları ve kullanılan ölçüm yöntemleri ele alınmaktadır. Testler, kapalı bir ofis ortamında gerçekleştirilmiş olup, mobil etiketlerin zaman dilimi tahsisi ve haberleşme sürekliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Farklı senaryolarda, TDMA periyodu, zaman dilimi süresi ve mobil etiket sayısı gibi parametreler değiştirilerek sistemin farklı koşullarda nasıl çalıştığı incelenmiştir. Bu süreçte, haberleşme doğruluğu, zamanlama tutarlılığı ve sistem ölçeklenebilirliği temel değerlendirme kriterleri olarak belirlenmiştir.

Ölçümler, Wireshark üzerinden elde edilen UWB ve 2.4 GHz veri paketleri analiz edilerek gerçekleştirilmiştir. Test sürecinde, mobil etiketlerin zaman dilimi tahsis süreci ve haberleşme zamanlamaları incelenmiş, yetkili sabit okuyucuların senkronizasyon süreçleri değerlendirilmiştir.

Ayrıca, her test senaryosunda mobil etiketlerin yapması gereken toplam mesafe ölçüm sayısı ile gerçekleştirdiği mesafe ölçüm sayısı oranlanarak sistem başarı yüzdesi hesaplanmıştır.

#### **4.2.2 Parametre Değişimi ve Sisteme Etkileri**

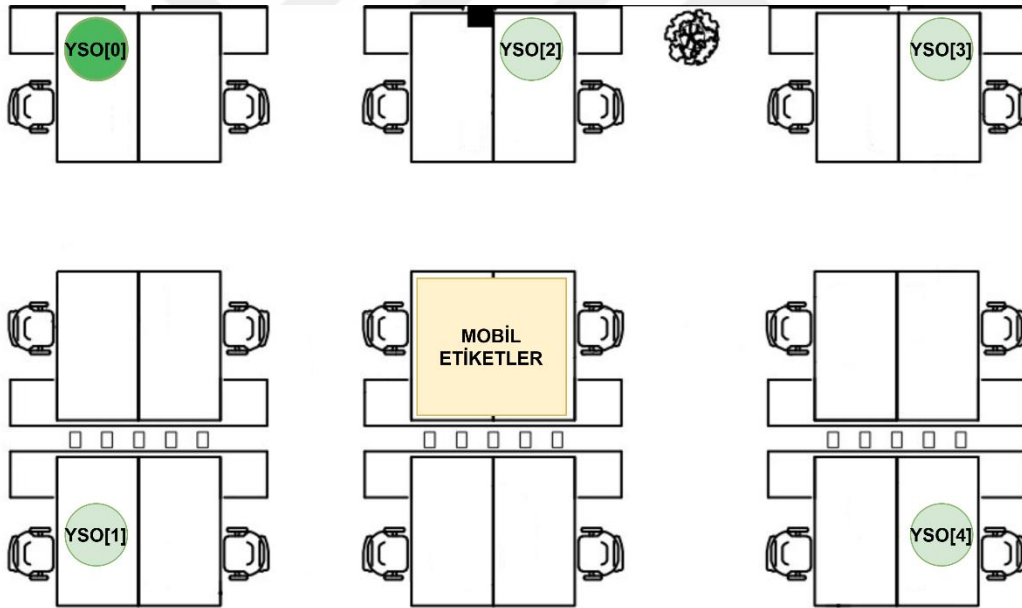
Bu bölümde, sistemin farklı parametrelerle çalıştığı senaryolar ele alınarak haberleşme sürekliliği, zaman senkronizasyonu ve başarı yüzdesi analiz edilmiştir. Testler sırasında belirlenen TDMA periyodu, zaman dilimi süresi ve toplam zaman dilimi sayısı gibi parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Her senaryoda, Wireshark üzerinden alınan veri paketleri analiz edilmiş, mobil etiketlerin zaman dilimi kullanım süreleri doğrulanmış ve veritabanı üzerinden elde edilen başarı yüzdesi hesaplanarak tablo halinde sunulmuştur.

#### 4.2.2.1 Sık Mesafe Ölçümü Yapan Mobil Etiketlerin İncelenmesi

Bu senaryoda sistem, 200 milisaniyelik mesafe ölçüm periyoduna sahip 30 adet mobil etiketin birlikte çalışabilmesi için konfigüre edilmiştir. Bu doğrultuda sistem konfigüre edildikten sonra mobil etiketler sıralı olarak çalıştırılarak toplanan veriler incelenmiştir.

Senaryoda kullanılan donanımlar şunlardır: 1 adet UWB ağ geçidi, 4 adet UWB sabit okuyucu ve 30 adet mobil etiket. Hem UWB ağ geçidi hem de sabit okuyucular, zaman dilimi tahsisi yapabilecek şekilde konfigüre edilmiştir. Böylece tüm donanımlar zaman dilimi yönetiminde aktif rol alabilmiştir. Test ortamındaki donanım yerleşimi ve mobil etiketlerin konumları Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 4.1** Sık mesafe ölçümü yapılan senaryo için donanım yerleşimi

Test Konfigürasyonu;

- TDMA Periyodu: 4.1 saniye
- Yetkili Sabit Okuyucu Rota Uzunluğu: 39
- Yetkili Sabit Okuyucular Arası Zaman Aralığı: 2.5 milisaniye
- Zaman Dilimi Süresi: 6.6 milisaniye

Bu senaryoda ilk olarak periyodun başında yer alan yetkili sabit okuyucuların senkronizasyon süreci incelenmiştir. Burada Wireshark üzerinden toplanan veriler Şekil 4.2'de gösterildiği üzere, her 4.1 saniyelik TDMA periyodunun başında lider okuyucudan başlayarak diğer yetkili okuyucuların sıralı şekilde senkronizasyon mesajı gönderdiği gözlemlenmiştir. Konfigurasyonda yetkili sabit okuyucuların senkronizasyon mesajları arasındaki zaman farkı 2.5 milisaniye olarak belirlenmiş ve paketlerin rota doğrultusunda bu zaman aralığıyla ilerlediği doğrulanmıştır.

Time	Time Diff	Source	Destination	Length	Current Time (ms)	Packet Info
15:17:23.378314	4.089909	1523	65535	127	2.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:23.380815	0.002501	237	65535	127	5.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:23.383315	0.002500	239	65535	127	7.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:23.385815	0.002500	354	65535	127	10.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:23.388316	0.002501	355	65535	127	12.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:27.478225	4.089909	1523	65535	127	2.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:27.480725	0.002500	237	65535	127	5.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:27.483225	0.002500	239	65535	127	7.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:27.485726	0.002501	354	65535	127	10.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:27.488226	0.002500	355	65535	127	12.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:31.578135	4.089909	1523	65535	127	2.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:31.580636	0.002501	237	65535	127	5.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:31.583136	0.002500	239	65535	127	7.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:31.585636	0.002500	354	65535	127	10.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:31.588136	0.002500	355	65535	127	12.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:35.678002	4.089866	1523	65535	127	2.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:35.680502	0.002500	237	65535	127	5.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:35.683002	0.002500	239	65535	127	7.50	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:35.685502	0.002500	354	65535	127	10.00	TDMA Sync Msg - Slot Info
15:17:35.688003	0.002501	355	65535	127	12.50	TDMA Sync Msg - Slot Info

**Şekil 4.2** Yetkili okuyucular arası senkronizasyon

Mobil etiketlerin UWB kanalını kullanımına ilişkin analizde, her bir mobil etiketin kendisine ayrılan zaman dilimlerinde TWR poll paketlerini sıralı olarak gönderdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.3'te yetkili okuyucular arasındaki senkronizasyon sonrasında mobil etiketlerin kendilerine verilen zaman dilimlerine uygun olarak her bir TWR poll paketi arasındaki sürenin yaklaşık olarak 6.6 milisaniye olduğu ve sistemin zaman dilimi planlamasına uygun şekilde çalıştığını görülmektedir.

Time	Time Diff	Source	Destination	Length	TDMA Leader	TDMA First Slot	TDMA Last Slot	TDMA Slot Count
15:17:56.177510	0.048988	1523	65535	127				
15:17:56.180010	0.002500	237	65535	127				
15:17:56.182510	0.002500	239	65535	127				
15:17:56.185010	0.002500	354	65535	127				
15:17:56.187511	0.002501	355	65535	127				
15:17:56.275138	0.087627	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:56.281721	0.006583	44014	65535	91	355	1	571	20
15:17:56.288303	0.006582	44085	65535	91	1523	2	572	20
15:17:56.294903	0.006600	44024	65535	91	1523	3	573	20
15:17:56.301513	0.006610	44099	65535	91	1523	4	574	20
15:17:56.308113	0.006600	44088	65535	91	1523	5	575	20
15:17:56.314723	0.006610	44069	65535	91	237	6	576	20
15:17:56.321327	0.006604	44091	65535	91	1523	7	577	20
15:17:56.327924	0.006597	44076	65535	91	239	8	578	20
15:17:56.334520	0.006596	44050	65535	91	239	9	579	20
15:17:56.341096	0.006576	44035	65535	91	239	10	580	20
15:17:56.347732	0.006636	44097	65535	91	1523	11	581	20
15:17:56.354337	0.006605	44071	65535	91	1523	12	582	20
15:17:56.360931	0.006594	44005	65535	91	239	13	583	20
15:17:56.367527	0.006596	44095	65535	91	354	14	584	20
15:17:56.374145	0.006618	44042	65535	91	355	15	585	20
15:17:56.380710	0.006565	44009	65535	91	239	16	586	20
15:17:56.387328	0.006618	44016	65535	91	237	17	587	20
15:17:56.393895	0.006567	44053	65535	91	239	18	588	20
15:17:56.400516	0.006621	44072	65535	91	355	19	589	20
15:17:56.407128	0.006612	44084	65535	91	355	20	590	20
15:17:56.413742	0.006614	44066	65535	91	354	21	591	20
15:17:56.420334	0.006592	44037	65535	91	237	22	592	20
15:17:56.426937	0.006603	44047	65535	91	1523	23	593	20
15:17:56.433517	0.006580	44018	65535	91	239	24	594	20
15:17:56.440095	0.006578	44040	65535	91	1523	25	595	20
15:17:56.446726	0.006631	44045	65535	91	1523	26	596	20
15:17:56.453320	0.006594	44083	65535	91	1523	27	597	20
15:17:56.459962	0.006642	44007	65535	91	237	28	598	20
15:17:56.466503	0.006541	44049	65535	91	354	29	599	20
15:17:56.473049	0.006546	44059	65535	91	1523	0	570	20

**Şekil 4.3** Mobil etiketlerin kendilerine atanan zaman dilimlerini kullanımı

Şekil 4.4'te sistemde seçilen bir mobil etiketin kendisine verilen zaman dilimlerine uygun olarak yaklaşık 198 milisaniyelik periyotla TWR poll paketini gönderdiği görülmektedir. Mobil etiketin zaman dilimi isteğinde 200 milisaniyelik periyotla zaman dilimi istemesine karşın, yapılan konfigürasyon doğrultusunda 200 milisaniye değeri tam olarak karşılanamadığı için yetkili okuyucu bu değere yakın olan 198 milisaniyelik aralıklarla zaman dilimi ataması yapmıştır.

Time	Time Diff	Source	Destination	Length	TDMA Leader	TDMA First Slot	TDMA Last Slot	TDMA Slot Count
15:17:56.177510	0.240381	1523	65535	127				
15:17:56.180010	0.002500	237	65535	127				
15:17:56.182510	0.002500	239	65535	127				
15:17:56.185010	0.002500	354	65535	127				
15:17:56.187511	0.002501	355	65535	127				
15:17:56.275138	0.087627	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:56.473049	0.197911	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:56.671043	0.197994	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:56.869041	0.197998	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:57.067039	0.197998	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:57.265033	0.197994	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:57.463033	0.198000	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:57.661032	0.197999	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:57.859032	0.198000	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:58.057029	0.197997	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:58.255024	0.197995	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:58.453053	0.198029	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:58.651050	0.197997	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:58.849052	0.198002	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:59.047048	0.197996	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:59.245044	0.197996	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:59.443040	0.197996	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:59.641039	0.197999	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:17:59.839035	0.197996	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:18:00.037035	0.198000	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:18:00.277420	0.240385	1523	65535	127				
15:18:00.279920	0.002500	237	65535	127				
15:18:00.282420	0.002500	239	65535	127				
15:18:00.284921	0.002501	354	65535	127				
15:18:00.287421	0.002500	355	65535	127				
15:18:00.375046	0.087625	44059	65535	91	1523	0	570	20
15:18:00.572954	0.197908	44059	65535	91	1523	0	570	20

#### Şekil 4.4 Seçilen bir mobil etiketin periyodik kanal kullanım süreci

Belirlenen konfigürasyon sonrasında 200 milisaniye periyotla mesafe ölçümü yapan 30 adet mobil etiket bir saat aynı ortamda çalıştırılarak veri toplanmıştır. Veritabanına kaydedilen veriler incelendiğinde farklı mobil etiketler için hesaplanan başarı yüzdelerinin dağılım özeti Tablo 4.1’de yer almaktadır.

**Tablo 4.1** Sık mesafe ölçen donanımlar için başarı yüzdesi dağılım özeti

Başarı Yüzdesi Aralığı (%)	Mobil Etiket Sayısı	Ortalama Başarı Yüzdesi (%)
97-98	1	97.83
98-99	4	98.68
99-99.5	17	99.41
99.5-100	8	99.55
<b>Toplam</b>	<b>30</b>	<b>99.30</b>

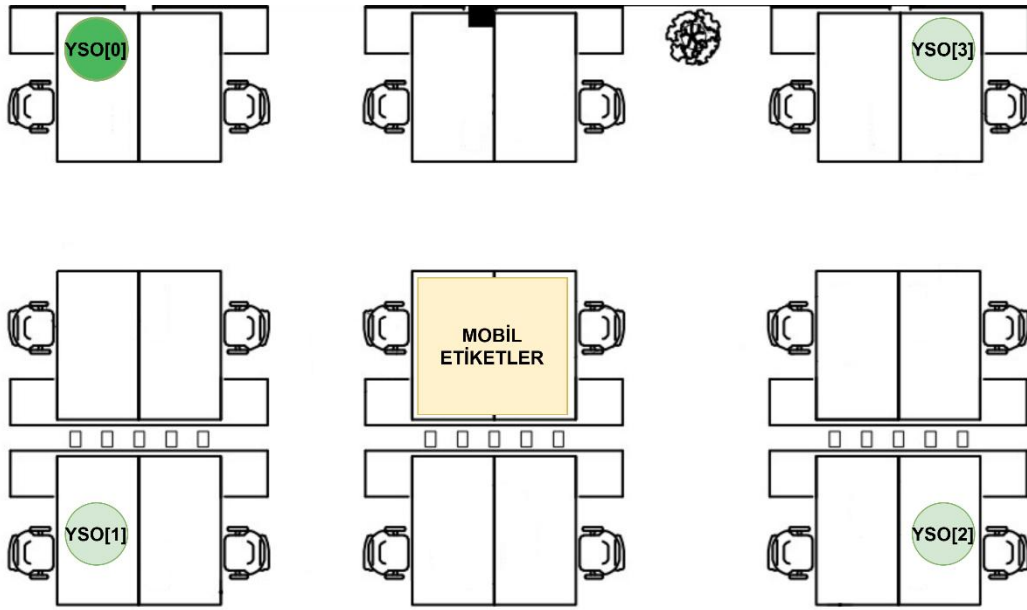
#### 4.2.2.2 Seyrek Mesafe Ölçümü Yapan Mobil Etiketlerin İncelenmesi

Bu senaryoda sistem, 15 saniyelik mesafe ölçüm periyoduna sahip mobil etiketlerin aynı ortamda haberleşmesini sağlayacak şekilde konfigüre edilmiştir. Bu doğrultuda sistem konfigüre edildikten sonra mobil etiketler sıralı olarak

çalıştırılarak haberleşme sürekliliği ve zaman dilimi kullanım performansı değerlendirilmiştir.

Bu senaryoda kullanılan donanımlar: 1 adet UWB ağ geçidi, 3 adet UWB sabit okuyucu ve 56 adet mobil etiket şeklindedir. Senaryoda yer alan tüm sabit cihazlar, tıpkı ilk senaryoda olduğu gibi zaman dilimi dağıtımını yapabilen yetkili donanımlar olarak atanmıştır. Bu yapı sayesinde zaman dilimi talepleri tüm sabit donanımlar tarafından karşılanabilmiştir.

Test ortamındaki donanım yerleşimi ve mobil etiketlerin konumları Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



**Şekil 4.5** Seyrek mesafe ölçümü yapılan senaryo için donanım yerleşimi

Test Konfigürasyonu;

- TDMA Periyodu: 15.1 saniye
- Yetkili Sabit Okuyucu Rota Uzunluğu: 10
- Yetkili Sabit Okuyucular Arası Zaman Aralığı: 3 milisaniye
- Zaman Dilimi Süresi: 23.8 milisaniye

Mobil etiketlerin kendilerine tahsis edilen zaman dilimlerinin kullanımını değerlendirmek amacıyla, Wireshark üzerinden toplanan veriler analiz edilmiştir. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, mobil etiketlerin her biri TWR poll paketlerini yaklaşık olarak kendilerine atanan zamanda göndermiştir. Veriler, ardışık zaman dilimine sahip etiketlerin TWR poll paketleri arasındaki sürenin 23.8 milisaniye

olduğunu ve zaman dilimi tahsis sürecinin planlandığı şekilde uygulandığını göstermektedir.

Time	Time Diff	Source	Destination	Length	TDMA Leader	TDMA First Slot	TDMA Last Slot	TDMA Slot Count
20:41:40.087630	1.196529	555	65535	127				
20:41:40.090630	0.003000	355	65535	127				
20:41:40.093630	0.003000	282	65535	127				
20:41:40.096630	0.003000	45466	65535	127				
20:41:40.615557	0.518927	46015	65535	91	555	21	21	1
20:41:40.758384	0.142827	46027	65535	91	45466	27	27	1
20:41:40.805959	0.047575	46009	65535	91	282	29	29	1
20:41:41.067738	0.261779	46048	65535	91	355	40	40	1
20:41:41.091565	0.023827	46037	65535	91	355	41	41	1
20:41:41.757925	0.666360	46047	65535	91	282	69	69	1
20:41:41.805563	0.047638	46036	65535	91	282	71	71	1
20:41:41.829339	0.023776	46023	65535	91	45466	72	72	1
20:41:42.614723	0.785384	46018	65535	91	555	105	105	1
20:41:42.757548	0.142825	46040	65535	91	282	111	111	1
20:41:42.781334	0.023786	46025	65535	91	555	112	112	1
20:41:42.805167	0.023833	46059	65535	91	282	113	113	1
20:41:42.924160	0.118993	46044	65535	91	282	118	118	1
20:41:43.067183	0.143023	46052	65535	91	355	124	124	1
20:41:43.090770	0.023587	46046	65535	91	355	125	125	1
20:41:43.614324	0.523554	46016	65535	91	555	147	147	1
20:41:43.757147	0.142823	46050	65535	91	282	153	153	1
20:41:43.804754	0.047607	46003	65535	91	282	155	155	1
20:41:43.828573	0.023819	46021	65535	91	282	156	156	1
20:41:44.090374	0.261801	46045	65535	91	355	167	167	1
20:41:44.613905	0.523531	46004	65535	91	555	189	189	1
20:41:44.756981	0.143076	46053	65535	91	282	195	195	1
20:41:44.828141	0.071160	46006	65535	91	45466	198	198	1
20:41:45.613511	0.785370	46032	65535	91	555	231	231	1
20:41:45.756220	0.142709	46035	65535	91	282	65535	65535	1
20:41:45.827723	0.071503	46005	65535	91	45466	240	240	1
20:41:46.613099	0.785376	46010	65535	91	555	273	273	1
20:41:46.755855	0.142756	46051	65535	91	45466	279	279	1
20:41:46.779726	0.023871	46008	65535	91	555	280	280	1
20:41:46.803561	0.023835	46029	65535	91	282	281	281	1
20:41:46.827383	0.023822	46056	65535	91	282	282	282	1
20:41:47.089126	0.261743	46020	65535	91	355	293	293	1
20:41:47.731676	0.642550	46002	65535	91	555	320	320	1
20:41:47.755741	0.024065	46049	65535	91	45466	321	321	1
20:41:47.779317	0.023576	46019	65535	91	555	322	322	1
20:41:47.803128	0.023811	46039	65535	91	45466	323	323	1
20:41:47.826912	0.023784	46024	65535	91	282	324	324	1
20:41:47.993485	0.166573	46017	65535	91	555	331	331	1
20:41:48.088726	0.095241	46028	65535	91	355	335	335	1
20:41:48.612268	0.523542	46060	65535	91	555	357	357	1
20:41:48.778938	0.166670	46054	65535	91	555	364	364	1
20:41:48.802734	0.023796	46007	65535	91	45466	365	365	1
20:41:48.826520	0.023786	46011	65535	91	282	366	366	1
20:41:49.754755	0.928235	46041	65535	91	282	405	405	1
20:41:49.802323	0.047568	46013	65535	91	282	407	407	1
20:41:49.826111	0.023788	46012	65535	91	282	408	408	1
20:41:50.087885	0.261774	46031	65535	91	355	419	419	1
20:41:50.825682	0.737797	46014	65535	91	282	450	450	1
20:41:51.777659	0.951977	46038	65535	91	45466	490	490	1
20:41:51.896633	0.118974	46055	65535	91	45466	495	495	1
20:41:52.729622	0.832989	46001	65535	91	555	530	530	1
20:41:52.753675	0.024053	46033	65535	91	45466	531	531	1
20:41:52.824842	0.071167	46034	65535	91	45466	534	534	1
20:41:52.848625	0.023783	46043	65535	91	45466	535	535	1
20:41:53.776777	0.928152	46042	65535	91	555	574	574	1
20:41:53.991011	0.214234	46022	65535	91	555	583	583	1

**Şekil 4.6** Mobil etiketlerin zaman dilimi kullanımına ilişkin analiz sonuçları

Şekil 4.7’de ise sistemde seçilen bir mobil etiketin, kendisine verilen zaman dilimlerine uygun olarak 15.1 saniyelik periyotlarla TWR poll paketi gönderdiği görülmektedir.



Time	Time Diff	Source	Destination	Length	TDMA Leader	TDMA First Slot	TDMA Last Slot	TDMA Slot Count	Packet Info
00:21:22.285098	14.571942	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:22.288099	0.003001	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:22.291099	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:22.294099	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:22.813029	0.518930	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:21:37.384972	14.571943	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:37.387972	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:37.390972	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:37.393972	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:37.912898	0.518926	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:21:52.484845	14.571947	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:52.487845	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:52.490845	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:52.493845	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:21:53.012798	0.518953	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:22:07.584718	14.571920	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:07.587718	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:07.590718	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:07.593718	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:08.112640	0.518922	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:22:22.684591	14.571951	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:22.687591	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:22.690591	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:22.693592	0.003001	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:23.212542	0.518950	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:22:37.784508	14.571966	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:37.787508	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:37.790508	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:37.793509	0.003001	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:38.312454	0.518945	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:22:52.884381	14.571927	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:52.887381	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:52.890382	0.003001	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:52.893382	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:22:53.412325	0.518943	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:23:07.984254	14.571929	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:07.987254	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:07.990254	0.003000	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:07.993255	0.003001	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:08.512197	0.518942	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:23:23.084127	14.571930	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:23.087127	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:23.090128	0.003001	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:23.093128	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:23.612066	0.518938	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll
00:23:38.184000	14.571934	555	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:38.187000	0.003000	355	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:38.190001	0.003001	282	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:38.193001	0.003000	45466	65535	127					TDMA Sync Msg
00:23:38.711937	0.518936	46015	65535	91	555	21	21	1	TWR Poll

**Şekil 4.7** Seçilen bir mobil etiketin periyodik kanal kullanımı

Belirlenen konfigürasyon sonrasında 15 saniye periyotla mesafe ölçümü yapan 56 adet mobil etiket bir saat aynı ortamda çalıştırılarak veri toplanmıştır. Veritabanına kaydedilen veriler incelendiğinde farklı mobil etiketler için hesaplanan başarı yüzdelerinin dağılım özeti Tablo 4.2’de yer almaktadır.

**Tablo 4.2** Seyrek mesafe ölçen donanımlar için başarı yüzdesi dağılım özeti

Başarı Yüzdesi Aralığı (%)	Mobil Etiket Sayısı	Ortalama Başarı Yüzdesi (%)
98-99	3	98.71
99-99.5	25	99.32
99.5-100	28	99.62
<b>Toplam</b>	<b>56</b>	<b>99.44</b>

### 4.3 Sabit Okuyucu Sayısının Konumlandırma Hassasiyetine Etkisi

UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde elde edilen konum doğruluğu, yalnızca zamanlama ve haberleşme protokollerine değil, aynı zamanda ortamda yer alan sabit okuyucu sayısına da doğrudan bağlıdır. Sabit okuyucular, mobil etiketin bulunduğu konuma ilişkin mesafe ölçümlerini gerçekleştiren referans noktalarıdır ve bu ölçümler üzerinden yapılan üçgenleme işlemi sonucunda mobil etiketin konumu belirlenmektedir. Bu nedenle sabit okuyucu sayısının artırılması, farklı noktalardan alınan mesafe verileri sayesinde konumlandırma hesaplamalarının daha hassas yapılmasına olanak tanır.

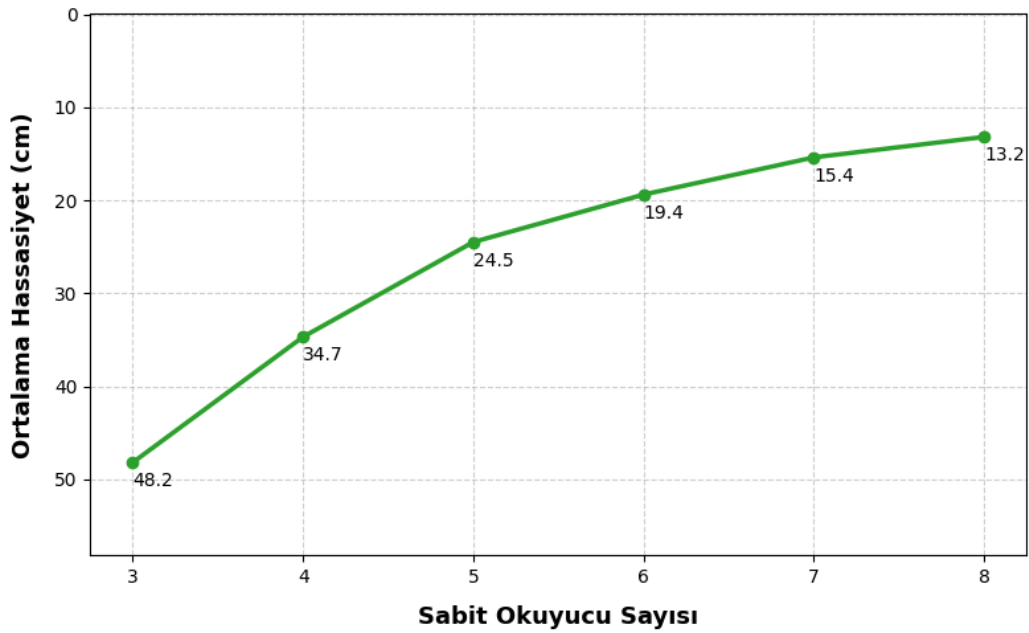
Bu başlık altında, sabit okuyucu sayısının konum belirleme hassasiyetine etkisi incelenmiştir. Aynı mobil etiketin konumu, sırasıyla 3 ile 8 arasında değişen sabit okuyucu sayılarıyla hesaplanmış ve elde edilen konumların gerçek konuma olan ortalama uzaklığı değerlendirilmiştir. Özellikle üç sabit okuyucu ile yapılan ölçümlerde, sistemin temel üçgenleme ihtiyacını karşıladığı görülmekle birlikte, bu yapıdaki hata payının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Okuyucu sayısının beş ve üzerine çıkarılmasıyla birlikte sistemin konumlandırma hassasiyetinde anlamlı bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen veriler Tablo 4.3'te sunulmuştur. Tablo, sabit okuyucu sayısı ile konumlandırma hassasiyeti arasındaki ilişkiyi ortaya koymakta; artan okuyucu sayısının ortalama hata mesafesini düşürdüğünü açıkça göstermektedir. Özellikle beş okuyucudan itibaren, hata payı giderek azalmakta ve sistemin konumsal kararlılığı belirgin şekilde artmaktadır. Bununla birlikte, sekiz okuyucu kullanımına kadar hassasiyet artışı sürmekle birlikte, artış oranı daha sınırlı hale gelmektedir. Bu durum, sistem tasarımında yalnızca hassasiyet değil, maliyet, enerji tüketimi ve veri işleme yükü gibi unsurların da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

**Tablo 4.3** Sabit okuyucu sayısına göre konumlandırma hassasiyeti

Sabit Okuyucu Sayısı	Ortalama Hassasiyet (cm)
3	48.2
4	34.7
5	24.5
6	19.4
7	15.4
8	13.2

Bu veriler ışığında, sabit okuyucu sayısı ile ortalama konumlandırma hassasiyeti arasındaki ilişki Şekil 4.8’de grafiksel olarak sunulmuştur. Grafik, artan okuyucu sayısının ortalama hassasiyeti nasıl artırdığını görsel olarak da açık bir biçimde ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.8** Sabit okuyucu sayısına göre ortalama konumlandırma hassasiyeti

#### 4.4 Sonuçların Analizi ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde, geliştirilen TDMA tabanlı zaman dilimi yönetim algoritmasının farklı senaryolarda elde ettiği performans sonuçları analiz edilmiştir. Önceki bölümlerde açıklanan iki farklı senaryo doğrultusunda sistemin ölçeklenebilirliği, zamanlama hassasiyeti ve haberleşme başarı oranları değerlendirilmiş, ardından rastgele erişim mantığıyla çalışan sistemle karşılaştırma yapılmıştır.

İlk senaryoda sistem, 200 milisaniyelik TWR periyoduna sahip 30 adet mobil etiketin aynı ortamda çalışabileceği şekilde konfigüre edilmiştir. TDMA periyodu 4.1 saniye olarak belirlenmiş, her bir zaman dilimi süresi 6.6 milisaniye olarak atanmıştır. Bu senaryoda yapılan testler sonucunda, zaman dilimlerinin çakışmadan dağıtıldığı, mobil etiketlerin kendilerine atanan zaman aralıklarında haberleşme kanalını başarıyla kullandığı gözlemlenmiştir. Wireshark analizleri, zamanlama açısından mikrosaniye seviyesinde sapmalar dışında ciddi bir düzensizlik olmadığını ortaya koymuş, sistemin %99'un üzerinde haberleşme başarımı sağladığı belirlenmiştir.

İkinci senaryoda ise sistem, 15 saniyelik mesafe ölçüm periyoduna sahip mobil etiketlerin aynı ortamda çalışmasını destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu senaryoda TDMA periyodu 15.1 saniye, zaman dilimi süresi 23.8 milisaniye olarak ayarlanmıştır. Tüm mobil etiketler 15 saniyede bir mesafe ölçümü gerçekleştirecek şekilde çalışmıştır. Wireshark verileri, her bir etiketin zamanında haberleştiğini ve zaman dilimi planlamasının başarılı olduğunu göstermiştir. Veritabanı analizlerinde ise, tüm mobil etiketlerin planlanan periyotlar içerisinde ölçüm gerçekleştirdiği ve sistemin tam kapasiteyle dahi kararlı çalıştığı doğrulanmıştır.

Her iki senaryo da sistemin ölçeklenebilirliği ve zamanlama doğruluğu açısından başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. İlk senaryoda, kısa periyotlarla çalışan mobil etiketlerin yüksek yoğunlukta bile çakışmasız haberleşme yapabildiği; ikinci senaryoda ise, daha seyrek periyotlarla çalışan çok sayıda mobil etiketin aynı anda çalışabildiği görülmüştür. Bu durum, geliştirilen algoritmanın farklı ihtiyaçlara göre esnek bir yapı sunduğunu ve sistem kaynaklarını etkin biçimde kullandığını göstermektedir.

İlk senaryo için yapılan ön testlerde başarı yüzdesinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun temel nedeni, zaman dilimi süresinin kısa tutulması nedeniyle zaman dilimleri arasında yeterli koruma süresi sağlanamaması ve buna bağlı olarak zamanlama çakışmalarının meydana gelmesidir. Bu sorunu gidermek amacıyla TDMA parametreleri içerisindeki zaman dilimi süresi artırılarak zaman dilimleri arasındaki koruma süresi genişletilmiş, böylece farklı mobil etiketlerin aynı anda haberleşme kanalına erişim ihtimali azaltılmıştır. Bu iyileştirme sonrasında sistemdeki girişim seviyesi düşmüş ve haberleşme güvenilirliği anlamlı ölçüde artmıştır. Bu düzenlemeyle birlikte elde edilen verilerde ortalama başarı

oranı %99'un üzerine çıkmış ve senaryonun genel performansı büyük ölçüde iyileştirilmiştir. İkinci senaryoda ise başlangıçtan itibaren uzun zaman dilimi süreleri kullanıldığından, bu tür bir girişim problemi gözlenmemiş ve benzer bir parametre değişikliğine ihtiyaç duyulmamıştır.

Buna ek olarak, sabit okuyucu sayısının konumlandırma hassasiyeti üzerindeki etkisi de ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Aynı ortamda sabit okuyucu sayısı artırıldığında, mobil etiketin belirlenen konumunun gerçek konuma olan ortalama uzaklığında anlamlı bir azalma gözlemlenmiştir. Üç okuyucu ile yapılan konum hesaplamalarında hata payı oldukça yüksek seviyelerdeyken, dört ve üzeri sayılarda sistemin kararlılığı belirgin biçimde artmıştır. Sekiz okuyucuya kadar olan artışlarda doğruluk seviyesindeki yükseliş sürmekle birlikte, bu iyileşmenin artan oranda değil giderek azalan katkı sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar, sistem tasarımında sadece haberleşme protokolü değil, aynı zamanda fiziksel yerleşim ve sabit cihaz sayısının da doğruluk üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

#### **4.4.1 TDMA ve Rastgele Erişim Sistemin Karşılaştırılması**

Bu bölümde, geliştirilen TDMA tabanlı zaman dilimi yönetim algoritması ile rastgele erişim mantığıyla çalışan sistemin haberleşme başarımı açısından karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma, sistemin yüksek yoğunluklu mobil etiket ortamlarında nasıl bir avantaj sunduğunu ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

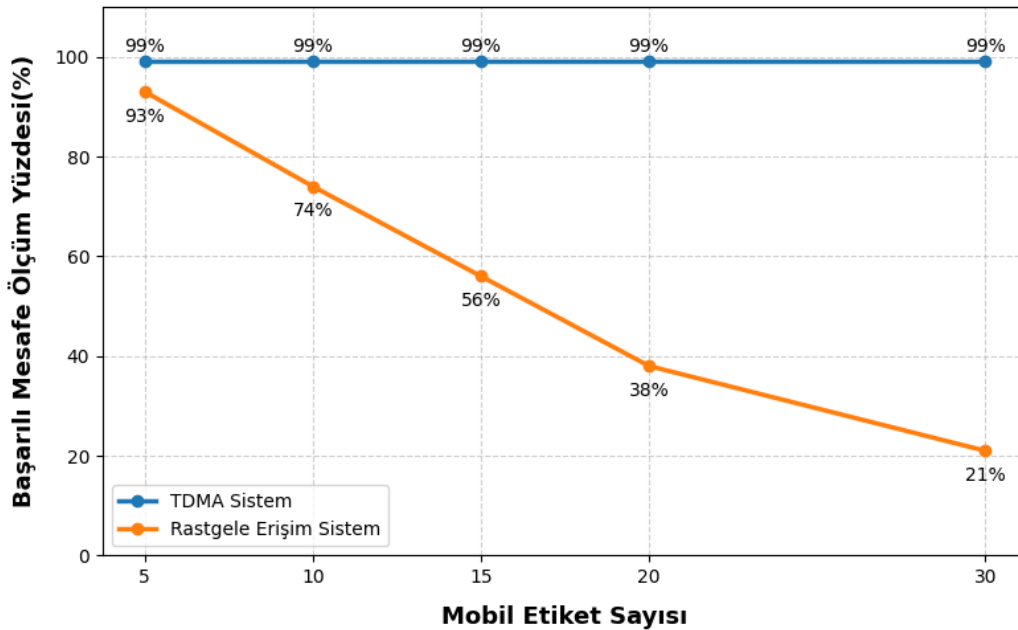
Karşılaştırma, 200 milisaniyelik mesafe ölçüm periyoduna sahip mobil etiketler üzerinden yapılmıştır. Bu test ortamında TDMA mekanizması uygulanmadan sistem çalıştırıldığında, etiketler rastgele zamanlarda mesafe ölçümü gerçekleştirmiştir. Rastgele erişim sistemde, etiketlere zaman tahsisi yapılmadığı için aynı anda birden fazla mobil etiketin kanal kullanımını nedeniyle çakışma olmakta ve bu da artan etiket sayısı ile birlikte ölçüm başarımını ciddi oranda düşürmektedir.

Tablo 4.4'te, TDMA kullanılan sistem ve rastgele erişim sistem için farklı mobil etiket sayılarında elde edilen mesafe ölçümü başarı oranları verilmiştir. Sonuçlar, TDMA mekanizmasının sistemin ölçeklenebilirliğini ve haberleşme güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

**Tablo 4.4** TDMA ve rastgele erişim sistemin başarı yüzdeleri karşılaştırması

Mobil Etiket Sayısı	TDMA Sistem Başarı Oranı (%)	Rastgele Erişim Sistem Başarı Oranı (%)
5	99	93
10	99	74
15	99	56
20	99	38
30	99	21

Bu ilişki, Şekil 4.9’da grafiksel olarak da sunulmuştur. Grafikte, TDMA sistemde mobil etiket sayısı artsa bile %99’luk sabit başarı oranının korunduğu, buna karşın rastgele erişim sistemde başarı yüzdesinin etiket sayısındaki artışla birlikte keskin şekilde azaldığı açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.9** TDMA ve rastgele erişim sistem karşılaştırma grafiği

Verilerden görüldüğü üzere, rastgele erişim sistemde mobil etiket sayısı arttıkça haberleşme başarısı keskin şekilde düşmektedir. Buna karşın, TDMA uygulandığında mobil etiketler farklı zaman dilimlerinde haberleşme kanalını kullandıkları için yüksek doğrulukta mesafe ölçümü gerçekleştirebilmektedir.

Ek olarak, rastgele erişim sistemde zamanlama düzensizlikleri, kanalın gereksiz kullanımına ve enerji verimliliğinde düşüşe neden olmaktadır. Etiketler, kanalın

müsait olmadığı zamanlarda da mesafe ölçümü girişiminde bulunduğu için bu girişimler başarısız olmakta bu girişimler sonucunda gereksiz enerji tüketimi oluşmaktadır. TDMA sistemi ile ise her bir mobil etiket yalnızca kendisine ayrılan zaman diliminde haberleştiği için kanal kullanımını düzenli ve enerji açısından daha verimli olmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen TDMA sistemi yalnızca haberleşme başarısını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda sistem kaynaklarının etkin kullanımını sağlayarak çok cihazlı ortamlarda veri güvenilirliğini ve verimliliği artırmaktadır.



### 5.1 Ana Bulgular

Bu çalışma kapsamında geliştirilen TDMA mekanizması, UWB tabanlı kapalı alan konumlandırma sistemlerinde haberleşme kanalının daha verimli kullanılmasını sağlamıştır. Sunulan yapı sayesinde mobil etiketler, kendilerine tahsis edilen zaman dilimleri doğrultusunda senkronize bir şekilde haberleşerek çakışmasız veri iletimi gerçekleştirmiştir. Bu durum, sistemin genel işleyişinde yüksek bir haberleşme başarı oranına ulaşılmasına olanak tanımıştır.

Geliştirilen TDMA algoritmasının sunduğu zaman yönetimi yaklaşımı sayesinde, kanal kullanımında düzenlilik sağlanmış ve eşzamanlı çalışan çok sayıda mobil etiketin haberleşme yükü yönetilebilir hale getirilmiştir. Ayrıca, zaman dilimi planlamasının mikrosaniye düzeyinde bir hassasiyetle uygulanması, senkronizasyon doğruluğu açısından sistemin güvenilirliğini artırmıştır.

Yapılan testler ve analizler sonucunda, sistemin farklı konfigürasyonlarla ölçeklenebilir bir yapıda çalışabildiği ve kaynak yönetimi açısından etkin sonuçlar üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın en önemli çıktısı, sınırlı bir fiziksel haberleşme kanalının zaman yönetimiyle çok sayıda cihaz tarafından çakışmasız olarak kullanılabilmesinin mümkün kılınmış olmasıdır.

### 5.2 Sistem Geliştirme Önerileri

Geliştirilen sistem, UWB tabanlı konumlandırma altyapılarında TDMA yaklaşımı ile yüksek haberleşme başarı oranı sunmakla birlikte, bazı yönleriyle daha da geliştirilebilir potansiyele sahiptir. Özellikle zaman senkronizasyon hassasiyetinin artırılması, sistemin genel performansı açısından öncelikli bir geliştirme alanıdır. Mevcut yapıda zaman senkronizasyonu mikrosaniye düzeyinde başarıyla gerçekleştirilmiş olsa da senkronizasyon mesajlarının iletiminde yaşanabilecek minimal gecikmeler zamanlama sapmalarına neden olabilmektedir. Bu sapmaların



azaltılması için daha hassas senkronizasyon algoritmaları veya ek zaman düzeltme mekanizmaları sistemde değerlendirilebilir.

Bununla birlikte, sistemin daha geniş alanlara uygulanması durumunda, yetkili sabit okuyucuların birbirlerinin UWB sinyallerini algılayamadığı sınır bölgelerde zaman dilimi çakışmaları meydana gelebilmektedir. Bu tür durumlar, mobil etiketlerin her iki bölgeden zaman dilimi alması sonucunda oluşabilecek potansiyel çakışmaları beraberinde getirebilir. Bu bağlamda, okuyucular arası örtüşme bölgelerinde zaman dilimi tahsisinin daha kontrollü yapılabilmesini sağlayacak ilave algoritmik çözümler geliştirilebilir.

Sistemin performansını artırmak üzere önerilebilecek bir diğer gelişim alanı ise yetkili sabit okuyucuların otomatik olarak belirlenmesidir. Konum belirlenecek ortamda yer alan UWB ağ geçitleri ve UWB sabit okuyucular, yazılım tarafından analiz edilerek; hem konum bilgileri hem de aralarındaki UWB haberleşme uygunlukları dikkate alınarak zaman dilimi dağıtımından sorumlu olacak yetkili cihazlar otomatik olarak seçilebilir. Bu seçim sürecinin yapay zekâ destekli bir algoritmayla gerçekleştirilmesi, sistemin daha büyük ölçekli sahalarda da etkili bir şekilde ve kolay kurulumla çalışmasını sağlayacaktır. Ayrıca bu yöntem sayesinde, sınır bölgelerdeki çakışmalar en aza indirilecek, aynı zamanda senkronizasyon rotasının daha verimli yapılandırılması mümkün olacaktır.

Son olarak, sistemin adaptif bir yapıya kavuşturularak farklı kullanım senaryolarına göre kendini yeniden yapılandırması önerilebilir. Örneğin, mobil etiket yoğunluğuna, TWR periyotlarına veya ortamın dinamiklerine göre zaman dilimi süresi ve periyot uzunluğu gibi parametrelerin otomatik olarak ayarlanması, sistemi daha esnek ve uyarlanabilir hale getirecektir.

### **5.3 Araştırmanın Kısıtlılıkları ve Gelecek Çalışmalar**

Bu çalışma, UWB tabanlı kapalı alan konumlandırma sistemlerinde TDMA yaklaşımının uygulanabilirliğini ve etkinliğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak her bilimsel çalışmada olduğu gibi, bu tez çalışmasının da belirli sınırlılıkları bulunmaktadır.

İlk olarak, sistemin performansı yalnızca kapalı bir ofis ortamında test edilmiştir. Farklı yapı malzemelerine, duvar kalınlıklarına veya sinyal yansımalarının daha

belirgin olduğu daha karmaşık kapalı alan ortamlarında sistemin nasıl performans göstereceği bu çalışmada ele alınmamıştır. Ayrıca, kullanılan tüm donanımların aynı üreticiye ait olması ve birbirleriyle tam uyumlu çalışması, sistemin heterojen donanım altyapılarında vereceği performansın değerlendirilmesini sınırlandırmıştır.

Bununla birlikte, zaman senkronizasyon mekanizması mikrosaniye düzeyinde yüksek hassasiyet sağlamış olsa da bu hassasiyetin farklı donanım türleri veya daha geniş alan uygulamaları için sürdürülebilirliği test edilmemiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, sistemin farklı fiziksel ortamlarda ve daha geniş alanlarda test edilmesi önerilmektedir. Bu testler sayesinde, sistemin çok katlı binalarda, alışveriş merkezleri veya depo ortamlarında nasıl bir performans sergileyebileceği değerlendirilebilir. Ayrıca, farklı kristal hassasiyetlerine sahip cihazlar arasındaki zaman senkronizasyon problemleri de araştırılabilir.

Buna ek olarak, mevcut sistemde zaman dilimi dağıtımını yalnızca merkezi olarak tanımlanan yetkili sabit okuyucular tarafından yapılmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, dinamik olarak kendi aralarında yetki devri yapabilen sabit okuyucuların kullanımıyla, sistemin esnekliği artırılabilir. Ayrıca, yapay zekâ destekli zaman dilimi yönetim algoritmaları ile hem lider seçimi hem de zaman dilimi dağıtımını süreçlerinin otonom hale getirilmesi mümkün olabilir.

Bu tez kapsamında geliştirilen sistemin temel mimarisi, farklı uygulama alanları için bir başlangıç noktası olarak değerlendirilebilir. Geliştirilecek yeni yazılım ve donanım bileşenleriyle, sistemin enerji verimliliği, güvenliği ve kullanıcı sayısı açısından daha ileri seviyelere taşınması mümkündür.

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007, doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [2] M. Youssef and A. Agrawala, "The Horus WLAN Location Determination System," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, Seattle, WA, USA, 2005, pp. 205–218.
- [3] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. A. Al-Ammar and H. S. Al-Khalifa, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 707, 2016. doi: 10.3390/s16050707.
- [4] F.Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, thirdquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [5] J. Tiemann, F. Schweikowski and C. Wietfeld, "Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments," 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Banff, AB, Canada, 2015, pp. 1-7, doi: 10.1109/IPIN.2015.7346960.
- [6] C. Jiang, J. Shen, S. Chen, Y. Chen, D. Liu and Y. Bo, "UWB NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method," in *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 10, pp. 2226-2230, Oct. 2020, doi: 10.1109/LCOMM.2020.2999904.
- [7] Y. Cao, C. Chen, D. St-Onge and G. Beltrame, "Distributed TDMA for Mobile UWB Network Localization," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 17, pp. 13449-13464, 1 Sept.1, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3066243.
- [8] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006, pp. 123–127.
- [9] A. M. Ladd, K. Bekris, A. Rudys, G. Marceau, L. Kavraki and D. S. Wallach, "Robotics-Based Location Sensing Using Wireless Ethernet," *Wireless Networks*, vol. 11, no. 1–2, pp. 189–204, Jan. 2005. doi: 10.1007/s11276-004-4755-8.
- [10] M. Ridolfi, S. Van de Velde, H. Steendam and E. De Poorter, "Analysis of the scalability of UWB indoor localization solutions for high user densities," *Sensors*, vol. 18, no. 6, p. 1875, 2018, doi: 10.3390/s18061875.

- [11] C. Yang and H. -r. Shao, "WiFi-based indoor positioning," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 150-157, March 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7060497.
- [12] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti and M. Z. Win, "Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 404-426, Feb. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2008.2008846.
- [13] S. Gezici, "A survey on wireless position estimation," *Wireless Personal Communications*, vol. 44, no. 3, pp. 263–282, Feb. 2008, doi: 10.1007/s11277-007-9371-1.
- [14] Z. Yang and Y. Liu, "Quality of Trilateration: Confidence Based Iterative Localization," 2008 The 28th International Conference on Distributed Computing Systems, Beijing, China, 2008, pp. 446-453, doi: 10.1109/ICDCS.2008.59.
- [15] A. Prorok and A. Martinoli, "Accurate indoor localization with ultra-wideband using spatial models and collaboration," *International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 4, pp. 547–568, 2014. doi: 10.1177/0278364913519934.
- [16] M. Girolami, F. Mavilia, F. Furfari and P. Barsocchi, "An Experimental Evaluation Based on Direction Finding Specification for Indoor Localization and Proximity Detection," in *IEEE Journal of Indoor and Seamless Positioning and Navigation*, vol. 2, pp. 36-50, 2024, doi: 10.1109/JISPIN.2023.3345268.
- [17] A. K. Paul and T. Sato, "Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey on Algorithms, Measurement Techniques, Applications and Challenges," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 6, no. 4, p. 24, 2017. doi: 10.3390/jsan6040024.
- [18] C. Mendoza-Silva, J. Torres-Sospedra and J. Huerta, "A meta-review of indoor positioning systems," *Sensors*, vol. 19, no. 20, p. 4507, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19204507>.
- [19] Y. Xu, K. -W. Chin and S. Soh, "A Novel Distributed Pseudo-TDMA Channel Access Protocol for Multi-Transmit-Receive Wireless Mesh Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 3, pp. 2531-2542, March 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2764050.
- [20] M. Haddad, P. Muhlethaler, A. Laouiti, R. Zagrouba and L. A. Saidane, "TDMA-Based MAC Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey, Qualitative Analysis, and Open Research Issues," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2461-2492, Fourthquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2440374.
- [21] S. Ramanathan, "A unified framework and algorithm for (T/F/C)DMA channel assignment in wireless networks," *Proceedings of INFOCOM '97*, Kobe, Japan, 1997, pp. 900-907 vol.2, doi: 10.1109/INFCOM.1997.644573.
- [22] I. Rhee, A. Warriar, J. Min and L. Xu, "DRAND: Distributed Randomized TDMA Scheduling for Wireless Ad Hoc Networks," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 10, pp. 1384-1396, Oct. 2009, doi: 10.1109/TMC.2009.59.

- [23] Z. Sahinoglu, S. Gezici and I. Guvenc, *Ultra-wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*, Cambridge University Press, 2008.
- [24] S. O. Schmidt, M. Cimdins, F. John and H. Hellbrück, "SALOS—A UWB Single-Anchor Indoor Localization System Based on a Statistical Multipath Propagation Model," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2428, 2024, doi: 10.3390/s24082428.
- [25] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," in *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, vol., no., pp.1-314, 5 Sept. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6012487.
- [26] H. Nikookar and R. Prasad, *Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications*. Springer, 2009.
- [27] M. G. Di Benedetto and P. M. Djuric, Eds., *Ultra-Wide Band Wireless Communications*. CRC Press, 2003.
- [28] C. L. Sang, M. Adams, T. Hörmann, M. Hesse, M. Pörrmann and U. Rückert, "Numerical and Experimental Evaluation of Error Estimation for Two-Way Ranging Methods," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 616, 2019, doi: 10.3390/s19030616.
- [29] D. Neiryneck, E. Luk and M. McLaughlin, "An alternative double-sided two-way ranging method," 2016 13th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC), Bremen, Germany, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/WPNC.2016.7822844.
- [30] P. Rathje and O. Landsiedel, "Precise Ranging: Modeling Bias and Variance of Double-Sided Two-Way Ranging with TDoA Extraction under Multipath and NLOS Effects," arXiv preprint arXiv:2410.12826, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2410.12826>.
- [31] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses and N. S. Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 54-69, July 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458287.
- [32] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, First Quarter 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090103.
- [33] Nordic Semiconductor, "nRF52833 - Advanced Bluetooth multiprotocol SoC," [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/nRF52833>. [Accessed: 24 Jun. 2025].
- [34] Qorvo, "DW1000 datasheet," [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007946>. [Accessed: 24 Jun. 2025].

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### Konferans Bildirileri

1. C. Tuzane and T. Güçlüoğlu, "UWB Tabanlı Kapalı Alan Konumlandırma Sistemlerinde TDMA Kullanımı," 14. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, pp. 233-241, 2024.

