



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KAPALI ALANLARDA BEACON TABANLI
KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN
DOĞRULUK VE KULLANILABİLİRLİK
YÖNÜNDEN İNCELENMESİ**

Recep ÇAKIR

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Recep ÇAKIR tarafından hazırlanan “Kapalı Alanlarda Beacon Tabanlı Konum Belirleme Yöntemlerinin Doğruluk ve Kullanılabilirlik Yönünden İncelenmesi” adlı tez çalışması 23/10/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Serkan DOĞANALP
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
(Gebze Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Berkant KONAĞOĞLU
(Amasya Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Recep ÇAKIR

Tarih: 23.10.2024

ÖZET**DOKTORA TEZİ****KAPALI ALANLARDA BEACON TABANLI KONUM BELİRLEME
YÖNTEMLERİNİN DOĞRULUK VE KULLANILABİLİRLİK YÖNÜNDEN
İNCELENMESİ****Recep ÇAKIR****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Doç. Dr. Serkan DOĞANALP****2024, 135 Sayfa****Jüri****Doç. Dr. Serkan DOĞANALP
Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ
Prof. Dr. Ekrem TUŞAT
Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
Doç. Dr. Berkant KONAĞOĞLU**

Kapalı alanlarda konumlandırma için birçok teknoloji geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Bu teknolojilerden biri de BLE (Bluetooth Low Energy) alt yapısına sahip Beacon teknolojisidir. Bu tez çalışma kapsamında Beacon teknolojisinin, GNSS (Küresel Konum Belirleme Sistemi) teknolojisinin yetersiz kaldığı kapalı alanlarda konumlandırma performansı incelenmiştir.

Kapalı alanlarda konumlandırma ile ilgili yapılacak çalışmalarda kullanılacak donanım ile birlikte konumlandırma yönteminin seçimi, uygulanması ve konumlandırma performansı oldukça önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında kapalı alanlarda kullanılabilen konumlandırma yöntemlerinden yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yöntemi Beacon teknolojisiyle birlikte yakından incelenmiştir. Çalışma kapsamında tek katlı kapalı bir alanda Beacon tabanlı basit navigasyon uygulaması ve bu uygulamanın geliştirilmiş hali olan çok katlı kapalı alanlarda Beacon tabanlı navigasyon uygulaması tasarlanmış ve test edilmiştir. Testler sonucunda, çok katlı kapalı alanlarda Beacon tabanlı navigasyon uygulaması için belirlenen hedefe ulaşma durumu dikkate alındığında %95 başarı sağlanmıştır.

Kapalı alanlarda kullanılan konumlandırma yöntemlerinden yakınlık yöntemi için Beacon'lardan otomatik olarak elde edilen mesafe değerleriyle ortam şartlarına göre hesaplanıp elde edilen mesafe değerleri bu tez çalışması kapsamında karşılaştırılmıştır. Ortam şartlarına göre hesaplanıp elde edilen mesafe değeri için polinom enterpolasyonu ve YSA (Yapay Sinir Ağları) ile Beacon sinyallerindeki gürültüyü elemine etmek için Kalman filtresi kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafe değerlerinin ortalaması 6. dereceden polinom enterpolasyonu kullanılarak ortalama 0.95 m doğrulukla hesaplanmıştır. Bu işlem sonucunda elde edilen veriler Kalman filtresiyle değerlendirildiğinde Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafe değerlerinin ortalaması 0.82 m doğrulukla hesaplanmıştır. Aynı mesafe değerleri, Beacon'lardan otomatik olarak elde edilen mesafe değeri kullanılarak 1.73 m doğrulukla hesaplanmıştır.

Kapalı alanlarda kullanılan konumlandırma yöntemlerinden üçgenleme yöntemi için iki farklı kapalı alanda testler gerçekleştirilmiştir. İlk kapalı alanda gerçekleştirilen testlerde Beacon dizilimleri dikkate alınıp altı farklı konumlandırma taslağına göre konum hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda klasik üçgenleme yöntemi (en güçlü üç Beacon sinyalinin kullanıldığı) ve EKK (En Küçük Kareler) ile üçgenleme yöntemi (Beacon sinyal sayısı üçün üzerinde olduğunda) kullanılmıştır. Testlerde üçgenleme yönteminde, Beacon'lardan otomatik olarak elde edilen mesafe değeriyle ortam şartlarına göre hesaplanıp elde edilen mesafe değeri kullanılarak konum hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda 3x3 m ve 4x4 m olan kare

taslaklarda, karenin içerisinde kalan test noktaları için en fazla 1.01 m hata ile konum hesaplanmıştır. İkinci kapalı alanda ve 4x6 m bir alanda üçgenleme yöntemi için gerçekleştirilen testlerde; klasik üçgenleme yöntemi, EKK ile üçgenleme yöntemi, Kalman filtresi kullanılarak üçgenleme yöntemi ve Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafenin elde edilme yöntemleri de dahil olmak üzere sekiz farklı kombinasyonla konum hesaplanmıştır. En iyi konum doğruluğunu Kalman filtresiyle birlikte Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafe için A ve n değerinin (ortam koşullarına göre hesaplanan mesafe değeri için kullanılan parametreler) hesaplanıp kullanıldığı üçgenleme yöntemi 1.98 m ortalama konum hatasıyla vermiştir.

Kapalı alanlarda kullanılan konumlandırma yöntemlerinden parmak izi yöntemi için birçok durum göz önünde bulundurularak konum hesaplanmıştır. Bu durumlar kapalı alanın büyüklüğüne göre parmak izi yöntemi için kullanılacak Beacon sayısı, veri toplama yönü, veri toplama aralıkları, veri toplama yükseklikleri, veri toplama noktalarının sayısı, kullanılacak sınıflandırma yöntemleri, Beacon sinyallerindeki gürültüyü elemine etmek için Kalman filtresinin kullanımı gibi faktörlerden oluşmaktadır. Parmak izi yöntemi için yapılan çalışmalarda sınıflandırma yöntemi olarak NN (En Yakın Komşu), KNN (K-En Yakın Komşu), WKNN (Ağırlıklandırılmış K-En Yakın Komşu) ve YSA kullanılmıştır. Parmak izi yöntemi için yapılan testlerde, konum doğruluklarının ortalamaları baz alındığında en iyi performansı Kalman filtresi kullanılarak 1.77 m konum hatasıyla YSA yöntemi vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Beacon, Kapalı alanlarda konum belirleme, Yakınlık yöntemi, Üçgenleme yöntemi, Parmak izi yöntemi.



ABSTRACT**PhD THESIS****INVESTIGATION OF BEACON-BASED LOCATION DETERMINATION
METHODS INDOOR IN TERMS OF ACCURACY AND USABILITY****Recep ÇAKIR****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering****Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan DOĞANALP****2024, 135 Pages****Jury****Assoc. Prof. Dr. Serkan DOĞANALP****Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ****Prof. Dr. Ekrem TUŞAT****Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT****Assoc. Prof. Dr. Berkant KONAĞOĞLU**

Many technologies are being developed and used for positioning in indoor. One of these technologies is Beacon technology with BLE (Bluetooth Low Energy) infrastructure. Within the scope of this thesis, the performance of Beacon technology for positioning purposes in indoor where GNSS (Global Navigation Satellite Systems) technology is insufficient was investigated.

In studies on positioning in indoor spaces, the selection of the positioning method, its implementation and positioning performance along with the equipment to be used are very important. In the scope of this thesis, proximity, trilateration and fingerprinting methods, which can be used for indoor positioning are closely examined together with Beacon technology. Within the scope of the study, a simple Beacon-based navigation application in a single-storey indoor and a Beacon-based navigation application in multi-storey indoor which is an improved version of this application, were designed and tested. As a result of the tests, 95% success was achieved in multi-storey indoor spaces, considering the target reaching situation determined for the Beacon-based navigation application.

For the proximity method which is one of the positioning methods used in indoor, distance values obtained automatically from beacons and distance values calculated and obtained according to the ambient conditions were compared within the scope of this thesis. Polynomial interpolation and ANN (Artificial Neural Networks) were used for the distance value calculated according to the ambient conditions and Kalman filter was used to eliminate the noise in the Beacon signals. As a result of the tests, the average distance values between the Beacon and the user were calculated with an average accuracy of 0.95 *m* using 6th degree polynomial interpolation. When the data obtained as a result of this process was evaluated with the Kalman filter, the average distance values between the Beacon and the user were calculated with an accuracy of 0.82 *m*. The same distance values were calculated with an average accuracy of 1.73 *m* with the distance value obtained automatically from the Beacons.

For the trilateration method, one of the positioning methods used in indoor, tests were carried out in two different indoor. In the first indoor tests, the location was calculated according to six different positioning schemes, taking into account the Beacon sequences. In these calculations, the classical trilateration method (using the three strongest Beacon signals) and the least squares trilateration method (when the number of Beacon signals is above three) were used. In the tests, the position was calculated by trilateration method using the distance value obtained automatically from the Beacons and the distance value calculated according to the ambient conditions. As a result of the study, the position was calculated with a maximum error of 1.01 *m* for the test points within the square for 3x3 *m* and 4x4 *m* square schemes.

In the tests performed for the trilateration method in the second indoor and in a $4 \times 6 \text{ m}$ area, the location was calculated with eight different combinations, including the classical trilateration method, the trilateration method with LSQ (Least Squares), the trilateration method using the Kalman filter, and the method of obtaining the distance between the Beacon and the user. The trilateration method, in which A and n values (parameters used for the distance value calculated according to ambient conditions) for the distance between the Beacon and the user are calculated and used together with the Kalman filter, gave the best location accuracy with an average location error of 1.98 m .

For the fingerprint method, which is one of the positioning methods used indoors, the position was calculated by considering many situations. These situations consist of factors such as the number of Beacons to be used for the fingerprint method according to the size of the indoor, data collection direction, data collection intervals, data collection heights, number of data collection points, classification methods to be used, the use of Kalman filter to eliminate noise in Beacon signals. NN (Nearest Neighbors), KNN (K-Nearest Neighbors), WKNN (Weighted K-Nearest Neighbors) and ANN were used as classification methods in the studies conducted for the fingerprint method. In the tests conducted for the fingerprint method, the ANN method gave the best performance with a location error of 1.77 m using the Kalman filter, based on the average location accuracies.

Keywords: Beacon, Indoor positioning, Proximity method, Trilateration method, Fingerprint method.



ÖNSÖZ

GNSS teknolojisinin sinyal yapısının geliştirilmesi, yeni teknolojilerin ortaya çıkması, konumlandırma yöntemlerinin doğruluklarının arttırılması gibi durumlar göz önüne alındığında kapalı alanlarda konumlandırma sorununun ileride büyük ölçüde giderileceği düşünülmektedir. Beacon teknolojisi gibi birçok teknolojinin de bu duruma katkı sunacağı aşıkardır. Bu tezin yapısı içerisinde yer alan BLE Beacon teknolojisi; akıllı telefonlar, nesnelerin interneti, kapalı alanlarda konumlandırma yöntemleri gibi kavramların ileride bu tip çalışmalara altlık olacağı düşüncesi bu tez çalışmasını hazırlamamda beni motive etmiştir.

BLE Beacon teknolojisi de tıpkı bir zamanlar GNSS teknolojisinin de tecrübe ettiği gibi metre hassasiyetiyle konum belirlemektedir. Ancak ilerleyen zamanlarda geliştirilen yapısıyla birlikte çok daha hassas konum belirleyeceği bilinen bir gerçektir. Böylelikle hassasiyet gerektiren çalışmalarda bu teknolojiyle birlikte gerçek zamanlı olarak akıllı bir mobil telefon veya benzer bir cihazla konum belirlenebilecektir. Bu fikrin sadece kapalı alanlarla sınırlı kalmayıp açık alanlarda hassas konum belirleyebileceği düşüncesi bu tezi yazarken beni ayrıca heyecanlandırmıştır.

Tüm bu düşünceler ışığında tezimde bana yardımcı olan, desteklerini ve tecrübelerini benden esirgemeyen ve bana her daim yol gösteren tez danışmanım Sayın Hocam, Doç. Dr. Serkan DOĞANALP'e:

Bilgi ve birikimiyle tez çalışmalarımda bana yardımcı olan, yol gösteren Sayın Hocam, Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ'ye:

Bilimsel bakış açısı ve tavsiyeleriyle tezime yön vermemde yardımcı olan Sayın Hocam, Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT'e:

Desteklerini her zaman hissettiğim ve farklı bilimsel alanları keşfetmemde beni yönlendiren Sayın Hocam, Prof. Dr. Ekrem TUŞAT'a:

Bilgisine başvurduğumda her daim yardımcı olan ve değerli görüşlerini aktaran Sayın Hocam, Doç. Dr. Berkant KONAKOĞLUNA:

Doktora sürecimde birçok aşama ve detayda bana yardımcı olan Arş. Gör. İrem KÖZ'e:

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliğinin değerli öğretim elemanlarından Prof. Dr. Sezai TOKAT'a, Dr. Öğr. Üyesi Fatmana ŞENTÜRK'e, Arş. Gör. Behlül SARIKAYA'ya ve öğrencileri Murat TANRIVERDİ'ye:

Navigasyon projesindeki takım arkadaşlarım Çağrı ÇİÇEKDEMİR'e, Hasan ERYILMAZ'a, Ramazan ÖZDAŞ'a, Abdullatif BİRSİN'e:

Navigasyon projesindeki destekleri için Pamukkale Üniversitesi Yönetimine:

Varlıklarını ve desteklerini her zaman hissettiğim babama, anneme ve kardeşlerime:

Beni her zaman destekleyen, motive eden, yanımda olan değerli eşim Merve ORUÇ ÇAKIR'a ve biricik oğlum Arel Selim ÇAKIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Recep ÇAKIR
KONYA-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT.....	3
ÖNSÖZ	5
İÇİNDEKİLER.....	7
ŞEKİLLER VE ÇİZELGELER LİSTESİ	9
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	11
1. GİRİŞ.....	12
1.1. Tezin Temel Hedefleri ve Bilime Katkısı.....	13
1.2. Literatür Taraması.....	14
2. MATERYAL VE YÖNTEM	37
2.1. Bluetooth, BLE ve Beacon Kavramları	37
2.1.1. Bluetooth.....	37
2.1.2. BLE (Bluetooth Low Energy).....	38
2.1.3. Beacon Teknolojisi	39
2.1.3.1. Çalışmada kullanılan Beacon.....	41
2.2. Konumlandırma Yöntemleri	42
2.2.1. Yakınlık yöntemi	43
2.2.2. Üçgenleme yöntemi	43
2.2.3. Parmak izi yöntemi	45
2.3. RSSI Mesafe İlişkisi	45
2.4. Çalışmadaki Kısıtlamalar ve Matematiksel Modeller	46
2.4.1. K-en yakın komşu (KNN) ve ağırlıklandırılmış en yakın komşu (WKNN). ..	48
2.4.2. Yapay sinir ağları (YSA)	49
2.4.3. Kalman filtreleme (KF)	53
2.4.4. Polinomlarla enterpolasyon	54
2.4.5. Dijkstra algoritması	54
2.4.6. İki boyutlu benzerlik dönüşümü	55
2.4.7. En Küçük Kareler yöntemi (EKK)	57
3. UYGULAMA VE TEST ÇALIŞMALARI.....	59
3.1. Tek Katlı Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Navigasyon Uygulaması	59
3.1.1. Ön test aşaması	60
3.1.2. Navigasyon uygulaması.....	64
3.2. Çok Katlı Kapalı Alanlarda Beacon Tabanlı Navigasyon Uygulaması.....	66
3.3. Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Üçgenleme Yöntemiyle Konumlandırma.....	72
3.3.1. A ve n değerlerinin belirlenmesi	73
3.3.2. Üçgenleme yönteminin belirlenen farklı mesafe tiplerine göre test edilmesi ..	75
3.4. Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Konumlandırma Uygulaması	85

3.4.1. Parmak izi yöntemiyle Beacon tabanlı konumlandırma	86
3.4.1.1. Beacon sayısının konumlandırma doğruluğuna etkisi	90
3.4.1.2. Veri toplama yönünün konum doğruluğuna etkisi	92
3.4.1.3. Veri toplama aralıklarının konum doğruluğuna etkisi	94
3.4.1.4. Veri toplama yüksekliklerinin konum doğruluğuna etkisi	95
3.4.1.5. Konumlandırma doğruluğunun iyileştirilmesi.....	97
3.4.2. Beacon tabanlı konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması	98
3.4.2.1. Yakınlık yöntemi	99
3.4.2.2. Üçgenleme yöntemi	105
3.4.2.3. Parmak izi yöntemi	110
3.4.2.4. Konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması	112
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	114
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	116
5.1 Sonuçlar	116
5.2 Öneriler	119
KAYNAKLAR	123

ŞEKİLLER VE ÇİZELGELER LİSTESİ

Şekiller Listesi

Şekil 2.1. Dünya’da Bluetooth özellikli cihazların yıllık bazda sevkiyatı, birim:milyar (URL-2).	38
Şekil 2.2. Dünya’da Bluetooth, BLE ve Bluetooth Dual-Mode özellikli cihazların yıllık bazda sevkiyatı, birim:milyar (URL-2).	39
Şekil 2.3. Beacon iletişim değerleri.....	41
Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan Beacon ve özellikleri (URL-4).	41
Şekil 2.5. Kapalı alan konumlandırma teknikleri ve teknolojileri (Deng ve diğ., 2022).	42
Şekil 2.6. Yakınlık yöntemi.....	43
Şekil 2.7. Üçgenleme yöntemi (Çakır ve Doğanalp, 2024).....	44
Şekil 2.8. Parmak izi yönteminin genel taslağı (Safwat ve diğ., 2023).....	45
Şekil 2.9. YSA modeli (Elsheikh ve diğ., 2019).	50
Şekil 2.10. ÇKA yapısı (Elsheikh ve diğ., 2019).	51
Şekil 2.11. Dijkstra algoritmasına ait pseudocode (Dijkstra, 1959).....	55
Şekil 3.1. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Çakır ve diğ., 2024).....	59
Şekil 3.2. Ön testler için uygulama alanı.....	60
Şekil 3.3. Ön test aşamasında gerçekleştirilen üçgenleme yöntemi için test planları. ...	61
Şekil 3.4. Üçgenleme yöntemi için test planlarına göre elde edilen konumlar.	62
Şekil 3.5. Yakınlık yöntemi için test planı.	64
Şekil 3.6. Test alanının, hedef noktaların ve örnek testin mobil uygulama görüntüsü. .	65
Şekil 3.7. Başarısızlıkla sonuçlanan test noktası ve Beacon’ın konumu.....	66
Şekil 3.8. Pamukkale Üniversitesi Hastaneleri.....	67
Şekil 3.9. Hastane haritalarının koordinatlandırılması.	67
Şekil 3.10. Hastane kat haritası çizim örneği.	68
Şekil 3.11. Mobil navigasyon uygulamasında harita görüntüsü.....	69
Şekil 3.12. Hastane katları için Beacon yerleşim planı örneği.....	70
Şekil 3.13. Kapalı alan içerisindeki yansıtıcı yüzeyler (Çakır ve diğ., 2024).	72
Şekil 3.14. Üçgenleme yöntemi için kullanılan çalışma alanı (Çakır ve Doğanalp, 2024).	73
Şekil 3.15. RSSI değerlerinin metre bazlı değişimleri.	74
Şekil 3.16. Üçgenleme yöntemi için konumlandırma taslağı (Çakır ve Doğanalp ,2024).	76
Şekil 3.17. Uygulama alanı.	85
Şekil 3.18. Parmak izi yöntemi için veri toplama noktaları.	87
Şekil 3.19. Parmak izi yöntemi için veri toplama yönleri.	87
Şekil 3.20. Parmak izi yöntemi için veri toplama yazılımı.	88
Şekil 3.21. Parmak izi yöntemi için test noktaları.....	89
Şekil 3.22. Parmak izi yöntemi için Beacon yerleşim taslağı.	90
Şekil 3.23. Eğitim ve test noktaları	94
Şekil 3.24. Konumlandırma taslağı.	99
Şekil 3.25. RSSI sinyallerinin farklı Q değerlerinde değişimleri.....	102
Şekil 3.26. RSSI sinyallerinin KF sonrası değişimleri.	103
Şekil 3.27. Test noktalarında elde edilen RSSI sinyallerinin KF sonrası değişimleri..	103

Çizelgeler Listesi

Çizelge 2.1. Aktivasyon fonksiyonları ve formülleri (Haykin, 2009).....	50
Çizelge 3.1. Birinci yerleşim planına göre test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).....	62
Çizelge 3.2. İkinci yerleşim planında göre test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).	63
Çizelge 3.3. Mobil navigasyon uygulaması test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).....	65
Çizelge 3.4. Mobil navigasyon uygulaması test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).....	71
Çizelge 3.5. Mobil navigasyon uygulaması test sonuçları (Çakır ve Doğanalp, 2024). 74	
Çizelge 3.6. 3x3 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).	78
Çizelge 3.7. 3x3 m konumlandırma sonuçları.	78
Çizelge 3.8. 4x4 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).	79
Çizelge 3.9. 4x4 m konumlandırma sonuçları (Çakır ve Doğanalp, 2024).	79
Çizelge 3.10. 5x5 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).	80
Çizelge 3.11. 5x5 m konumlandırma sonuçları (Çakır ve Doğanalp, 2024).	81
Çizelge 3.12. 6x6 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).	81
Çizelge 3.13. 6x6 m konumlandırma sonuçları.	82
Çizelge 3.14. 7x7 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).	83
Çizelge 3.15. 7x7 m konumlandırma sonuçları.	83
Çizelge 3.16. 8x8 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).	84
Çizelge 3.17. 8x8 m konumlandırma sonuçları.	84
Çizelge 3.18. Sınıflandırma yöntemleri için girdi ve çıktı verisi.	89
Çizelge 3.19. Beacon sayısına göre NN,KNN ve WKNN için test sonuçları.	91
Çizelge 3.20. Beacon sayısına göre YSA için test sonuçları.....	92
Çizelge 3.21. Veri toplama yönlerine göre NN,KNN ve WKNN için test sonuçları....	93
Çizelge 3.22. Veri toplama yönlerine göre YSA için test sonuçları.....	93
Çizelge 3.23. Veri toplama aralıklarına göre NN,KNN ve WKNN için test sonuçları..	95
Çizelge 3.24. Veri toplama aralıklarına göre YSA için test sonuçları.	95
Çizelge 3.25. Veri toplama yüksekliklerine göre NN, KNN ve WKNN test sonuçları. 96	
Çizelge 3.26. Veri toplama yüksekliklerine göre YSA için test sonuçları.....	96
Çizelge 3.27. KF kullanımında NN, KNN ve WKNN için test sonuçları.....	97
Çizelge 3.28. KF kullanımında YSA için test sonuçları.....	98
Çizelge 3.29. Polinom enterpolasyonuyla belirlenen A ve n değerinin test sonuçları..	101
Çizelge 3.30. YSA kullanılarak belirlenen A ve n değerleri için test sonuçları.	101
Çizelge 3.31. Polinom enterpolasyonu ve KF kullanımı için test sonuçları.....	104
Çizelge 3.32. Üçgenleme yöntemi için test sonuçları.	106
Çizelge 3.33. EKK ile üçgenleme yöntemi için test sonuçları.	107
Çizelge 3.34. KF ile üçgenleme yöntemi için test sonuçları.	108
Çizelge 3.35. EKK ve KF ile üçgenleme yöntemi için test sonuçları.	109
Çizelge 3.36. Üçgenleme yöntemleri için genel test sonuçları.....	110
Çizelge 3.37. Verilerin ham hali kullanılarak NN,KNN ve WKNN test sonuçları.....	111
Çizelge 3.38. KF ile NN,KNN ve WKNN için test sonuçları.	111
Çizelge 3.39. YSA için test sonuçları.....	112
Çizelge 3.40. KF ile YSA için test sonuçları.....	112
Çizelge 3.41. Konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

BLE	: Bluetooth Low Energy
BLM	: Beacon Library Model
CGAN	: Conditional Generative Adversarial Network
CNN	: Convolutional Neural Networks
ÇKA	: Çok Katmanlı Algılayıcılar
dBm	: Decibels Relative to Milliwatt
EKF	: Extended Kalman Filter
EKK	: En Küçük Kareler
EUÖ	: Elektronik Uzunluk ve Açık Ölçer
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
IEKF	: Iterated Extended Kalman Filter
IFFT	: Inverse Fast Fourier Transform
IMU	: Inertial Measurement Unit
IoT	: Internet of Things
IPS	: Indoor Positioning System
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
İBSA	: İleri Beslemeli Sinir Ağı
JOSM	: Java OpenStreetMap Editor
KNN	: K-Nearest Neighbor
KF	: Kalman Filter /Kalman Filtresi
LM	: Levenberg-Marquardt
LSTM	: Long Short-Term
MSE	: Mean Squared Error
MMSE	: Minimum Mean Square Error
MPower	: Measured Power
NB	: Naïve Bayes
NN	: Nearest Neighbor
PLM	: Path Loss Model
RF	: Radio Frequency
RFID	: Radio Frequency Identification
RMSE	: Root Mean Squared Error
RSSI	: Received Signal Strength Indicator
SIG	: Special Interest Group
SDK	: Software Development Kit
SSD	: Sum of Squared Difference
SVM	: Support Vector Machines
SVR	: Support Vector Regression
TUSAGA	: Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı
UTM	: Universal Transverse Mercator
UUID	: Universally Unique Identifier
UWB	: Ultra-Wideband
YSA	: Yapay Sinir Ağları
Wi-Fi	: Wireless Fidelity
WKNN	: Weighted K-Nearest Neighbors

1. GİRİŞ

Günümüzde konum belirleme teknolojilerinin en başında kuşkusuz GNSS (Global Navigation Satellite Systems, Küresel Konum Belirleme Sistemi) teknolojisi gelmektedir. Kullanıcılar, herhangi bir yer ve zamanda GNSS alıcısının yeteri kadar uydu görmesi halinde konum belirleyebilmektedirler. Bu teknolojiinden insanlar, gündelik yaşamın birçok alanda direkt veya dolaylı olarak faydalanabilmektedirler. GNSS teknolojisinin konum belirleme amaçlı tercih edilen, kullanışlı, güvenilir ve daha birçok yönden avantajlı özelliklere sahip olmasının yanı sıra bazı dezavantajlı tarafları da vardır. Bunlardan biri de kullanıcıların kapalı alanlarda GNSS sinyallerine erişememesinden dolayı doğru konum belirleyememesidir. GNSS teknolojisinin zaman içerisinde kendisini yenilemesiyle birlikte bu sorunun aşılacağı düşünülmektedir. Mevcut aşamada ise bu durum kapalı alanlarda konum belirleme amaçlı geliştirilen teknolojilerle aşılmaya çalışılmaktadır. Bu teknolojilere RFID (Radio Frequency Identification), WiFi (Wireless Fidelity), Beacon, ZigBee, UWB (Ultra-Wideband) tabanlı çözümlerin yanı sıra ivmeölçer, kamera, adımsayar gibi birçok sensörün veya özelliğin birlikte kullanıldığı hibrit çalışma ve teknolojiler örnek olarak gösterilebilir.

Kapalı alanlar, insanların vakitlerinin önemli bir bölümünü geçirdiği lokasyonlardır. Hastaneler, havaalanları, terminaller, gemiler, metrolar, müzeler, alışveriş merkezleri, maden ocakları ve daha birçok kapalı alan özelliklerini taşıyan yapılarda insanlar gündelik programlarını gerçekleştirmektedirler. Özellikle kapalı alanlarda internet alt yapısının sağladığı teknolojik imkanlar akıllı telefonlarla birleştirildiğinde insanlar belirli bir zaman içerisinde birçok işi yapma olanağına sahip olmaktadır. Bu duruma katkı sunan yapıların başında IoT (Internet of Things, Nesnelerin İnterneti) kavramı gelmektedir. IoT uygulamalarıyla aynı anda nesneler birbirleriyle senkronize olup veri toplama, analiz yapma, aktarım yapma gibi birçok özelliğe sahip olabilmektedirler. İnsanların hayatlarını önemli ölçüde etkileyen ve kolaylaştıran bu kavram içerisinde konum bilgisi de yer almaktadır. Bilhassa kapalı alanlarda, GNSS teknolojisinin yetersiz kalması konum bazlı IoT uygulamaları için yeni teknoloji ve konumlandırma algoritmalarının gelişimine olanak sağlamaktadır. Özellikle IPS (Indoor Positioning System, Kapalı Alan Konumlandırma Sistemi) kavramı da IoT uygulamalarının işlevliğinin artırılması konusunda katkı sunmaktadır. Kapalı bir alanda gidilecek yere en kısa mesafe kullanılarak navigasyon hizmeti sağlama, bir fabrikadaki işçilerin konumlarının takibi, bir müzede kimseye ihtiyaç duymadan gezinebilme, bir fuar

alanında objelerin otomatik olarak tanıtılması, bir alışveriş merkezinde nesnelerin takibi, engelli bireylerin kapalı alanlarda rahat ve güvenli hareket edebilmesi, acil durumlarda kapalı alanlarda yönlendirme ve daha birçok konum bazlı problemin çözümü için IPS kavramının içerisinde daha az maliyetle kullanışlı, pratik çözümler geliştirilmektedir. Kapalı alanlarda konum bazlı karşımıza çıkan bu problemler ve çözümleri için Dünya’da önemli ölçüde yatırımlar yapılmakta ve ekonomik olarak büyük bir pazar oluşmaktadır. Fortune Business Insights’ın yayınladığı rapora göre IoT cihaz pazarının 2032’ye kadar 4 trilyon doları geçmesi beklenmektedir (URL-1). Bu bağlamda kapalı alanlarda konum belirleme amaçlı kullanılabilen ve IoT uygulamalarıyla entegre olabilen Beacon teknolojisi son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir. Beacon teknolojisinden konum bazlı yararlanmak için proximity (yakınlık), trilateration (üçgenleme), fingerprint (parmak izi) gibi konumlandırma yöntemleri kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Kapalı alanın büyüklüğü, Beacon sinyallerindeki düzensizlikler, ortam koşulları gibi birçok nedenden dolayı tek bir konumlandırma yöntemi kullanılmamakla birlikte kesin matematiksel bir model ve çözümde karar kılınamamıştır.

1.1. Tezin Temel Hedefleri ve Bilime Katkısı

Bu tez çalışmasında BLE (Bluetooth Low Energy) tabanlı Beacon teknolojinin kapalı alanlarda konum bazlı kullanılabilirliği araştırılmıştır. Beacon teknolojisi ve gelişimi son 10-15 yıl içerisinde önemli derecede yol almıştır. Dolayısıyla Dünya’da son yıllarda bu konu ile ilgili araştırmalarda artış gözlemlenmektedir. Ülkemizde de bu alanla ilgili çalışmalar yapılmakta ancak oldukça azdır. Özellikle jeodezik bir bakış açısı ile Beacon teknolojisinin konum bazlı kullanımına yönelik çalışmaların sayısı ülkemizdeki bu alanda yapılan çalışmaların çok az bir kısmını oluşturmaktadır. Ülkemizde yapılan bilimsel çalışmaların çoğu bilgisayar ve elektrik-elektronik mühendisliği ağırlıklı olmaktadır. Ekim 2024 itibarıyla Yükseköğretim Kurulu Tez Merkezi verilerine göre “Beacon”, “Bluetooth” ve “BLE” kelimesi ile taranan ve konumlandırmayla ilgili olan tez sonuçlarına baktığımızda on sekiz lisansüstü tez karşımıza çıkmaktadır. Bu tezler bir yönetim bilişim sistemleri, bir mekatronik mühendisliği, bir mimarlık, bir biyomedikal mühendisliği, bir malzeme mühendisliği, bir elektronik mühendisliği, iki elektronik ve haberleşme mühendisliği, üç elektrik-elektronik mühendisliği, yedi bilgisayar mühendisliği olmak üzere farklı alanlarda yapılmıştır. Bu veriler ışığında bu tezin temel hedeflerinden biri jeodezik bir bakış açısı ile harita mühendisliği alanında Bluetooth

tabanlı Beacon teknolojinin konum bazlı kullanılabilirliğini araştırmak, geliştirmek ve literatüre katkı sunmaktır. Bu tezin temel hedeflerinden bir tanesi de bu tez yazımı itibarıyla GNSS teknolojisinin yetersiz kaldığı kapalı alanlarda Beacon teknolojinin konum bazlı kullanılabilirliğine katkı sunmaktır. Beacon tabanlı konumlandırma m mertebesinde konum hassasiyeti sağlamaktadır. Ancak ilerleyen zamanlarda farklı donanım ve yazılım desteğiyle bu hassasiyetin artacağı düşünülmektedir. Gelecek yıllarda daha da önemli hale gelecek bu alanla ilgili yapılacak çalışmalara ışık tutmak, araştırmacılara ilham vermek, ülkemizde bu alanda bilimsel farkındalığı arttırmak bu tez çalışmasının amaçlarından biridir.

1.2. Literatür Taraması

Bu çalışmada literatür araştırması kısmında yerli veya yabancı kaynak ayrımı yapılmamıştır. Araştırmalarda daha çok, bu tez çalışmasının ana ögesi olan BLE Beacon tabanlı konumlandırma üzerine yoğunlaşmıştır. Kaynaklar çok genel hatlarıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Genel hatlarıyla verilen kaynaklarda yer alan Raspberry Pi, ESP32 gibi donanımlar yerine Beacon cihazı ön planda tutulmaya çalışılmıştır.

Bisdikian (2001) yaptığı çalışmada, Bluetooth teknolojinin tanıtmaktadır. Çalışma Bluetooth teknolojinin birçok yönüyle ele almakla birlikte bu teknolojinin tarihine ve gelişimine ışık tutmaktadır.

Wang ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, konumlandırma yöntemlerini inceleyerek RSSI (Received Signal Strength Indicator, Alınan Sinyalin Güç Göstergesi) tabanlı Bluetooth konumlandırma üzerinde çalışmışlardır. RSSI tabanlı Bluetooth konumlandırmayla mesafe tahmini için alıcıyla verici arasındaki uzaklığı tahmin etmede kullanılan matematiksel ifadedeki A ve n değerlerini belirleyerek matematiksel model oluşturmuşlardır. Bu modeli kullanarak RSSI tabanlı Bluetooth konumlandırmayı; EKK (En Küçük Kareler, Least Square), üçgenleme ve merkezi konumlandırma yöntemini kullanarak test etmişlerdir. İki farklı test sonucuna göre EKK yöntemi kullanılarak yapılan konumlandırma diğerlerine nazaran daha iyi sonuç vermiştir. Çalışmalarında ayrıca insan vücudunun RSSI okumaları üzerindeki etkilerini de test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre insan vücudu mobil telefonun sinyal almasını engellediğinde sinyalin zayıfladığını ve RSSI okumalarının yaklaşık 6-8 dBm düştüğünü göstermektedir.

Anagnostopoulos ve Deriaz (2014) yaptıkları çalışmada, Beacon tabanlı kapalı alan navigasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak ağırlıklı

ortalama yöntemini kullanmışlardır. Bu yönteme ek olarak en yakın Beacon cihazlarının seçimiyle birlikte RSSI sinyallerinin ortalamasını kullanmışlardır. Ayrıca çalışmalarında 0 ile 5 m mesafe tahminlerindeki dalgalanmaların çok fazla olmasından dolayı A ve n değerlerini belirleyerek bu aralıktaki mesafe değerlerinin tespiti için kullanmışlardır. Uygulamalarını bir koridorda test ederek 0.97 m konum doğruluğu elde etmişlerdir.

Jianyong ve diğ. (2014) çalışmalarında, kapalı alanlarda Bluetooth tabanlı konumlandırma yöntemi önermişlerdir. Konumlandırma aşaması çevrimdışı eğitim ve çevrimiçi konumlandırma olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Çevrimdışı eğitim aşamasında RSSI sinyallerini Gauss filtresinden geçirdikten sonra yayılma modelinin eğitimi için log-normal dağılım modeli tabanlı piecewise fitting (parçalı regresyon) kullanmışlardır. Çevrimiçi aşamada ise sinyal dalgalanmalarını azaltmak için weighted sliding window (ağırlıklı kayan pencere) modelini kullanmışlardır. Yine çevrimiçi aşamada RSSI anomalilerini azaltmak ve konumlandırma doğruluğunu arttırmak için üçgenler arası ilişkiler teoremine dayalı mesafe ağırlıklı filtre önermişlerdir. Konum hassasiyetini arttırmak için de Taylor serisi genişlemesine dayalı işbirlikçi konumlandırma algoritması kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemin test sonuçlarında ise 1.5 m'den az hata bulma oranı %80'nin üzerindedir.

Kajioka ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, kapalı bir alanda BLE Beacon tabanlı parmak izi konumlandırma yöntemini kullanarak konum tahmini gerçekleştirmişlerdir. Bu işlem için 10.5 x 15.6 m bir odanın içerisine ve etrafına yirmi iki adet Beacon cihazı yerleştirilmiştir. Eşleştirme algoritması olarak ise SSD (Sum of Squared Difference) kullanılmıştır. 5800'den fazla alınan Beacon sinyalinin test sonuçlarına göre 0,966 (%96,6) konum doğruluk oranı elde etmişlerdir.

Kohne ve Sieck (2014) yaptıkları çalışmada, havaalanlarında yolcuların bagajlarına ne zaman ulaşacağını gösteren BLE Beacon tabanlı bagaj izleme sistemi tasarlamışlardır. Sistemin testini havaalanı alanında yapmışlardır. Testlerde bavullarını check-in işlemi için verdikten bir dakika sonra, bavullarının bölgeden ayrıldığını gösteren bir bilgi mesajı almışlardır. Daha sonra bavullarını almak için bagaj bekleme bandlarının olduğu yerde beklediklerinde, sistemin gösterdiği mesafeden ve zamandan daha erken sürede bavullarını almışlardır. Erken gerçekleşen bu durumu, tasarladıkları sistemin zayıf tarafı olarak çalışmalarının sonucunda belirtmişlerdir.

Yavuz (2014) yaptığı doktora tez çalışmasında, BLE Beacon ve WiFi teknolojisi kullanarak konum bazlı mobil pazarlama uygulaması yapmıştır. Konumlandırma algoritması olarak BLE Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen hazır mesafe

bilgilerini yakınlık yöntemiyle kullanmıştır. Tasarladığı uygulaması ile ilgili kullanıcı anketleri yapmış ve görüşlerini paylaşmıştır.

Çankaya (2015) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda navigasyon amaçlı kullanılabilen iOS tabanlı mobil uygulama geliştirmiştir. Uygulamasında akıllı telefonun bünyesinde yer alan ivmeölçer, pusula, kamera gibi donanımları kullanarak artırılmış gerçeklik teknolojisiyle harmanlanmıştır. Çalışmasını kapalı bir alanda test etmiştir. Beacon cihazlarını ise test çalışmalarının anlık konum doğrulamaları için kullanmıştır. Doğrulama testlerinde %90 başarı sağlamıştır.

Güleryüz (2015) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda Bluetooth tabanlı konum belirlemiştir. Çalışmasında yeni donanım tasarımları mevcut olup bu tasarımlarda yönlü ve yönsüz antenler kullanmıştır. Çalışmasını ofis ortamında, statik ve dinamik durum olmak üzere iki aşamada test etmiş ve sonuçlarını benzer uygulamalarla kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda güç tüketimi, güvenlik, erişilebilirlik ve maliyet açısından güçlü yönleri olan bölge tayini ve sınır algılama yapabilecek hassasiyette bir sistem geliştirdiğini belirtmiştir.

Palumbo ve diğ. (2015) çalışmalarında, kapalı alanlar için Beacon'lardan gelen Bluetooth sinyallerini kullanarak mesafe tabanlı stigmerjik yöntemini önermişlerdir. Bu yaklaşımda Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafeyi hesaplamak için A ve n değerlerini belirleyerek kullanmışlardır. Çalışmalarında, Beacon konumları ile tahmin edilen mesafeleri ilişkilendiren ve popüler bir konumlandırma algoritması olan min-max yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda önerdikleri stigmerjik yaklaşımın, Beacon sinyallerinin yansıması ve sönümlenmesi gibi etkilere bir çözüm önerisi getirdiğini belirtmişlerdir.

Rida ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada üçgenleme algoritması kullanarak kapalı alanlar için Beacon tabanlı konumlandırma algoritması geliştirmişlerdir. BLE 4.0 ile uyumlu Beacon'lardan gelen Bluetooth sinyallerinden, en güçlü üç sinyali üçgenleme yönteminde kullanmışlardır. Çalışmalarının test sonuçlarına göre 0.50 m ile 1 m arasında konum doğruluğu yakalamışlardır.

Allurwar ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon teknolojisini detaylı olarak ele almışlardır. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak yakınlık yönteminin kullanarak tüketiciye yönelik tanıtım, reklam, pazarlama vb. amaçlı kullanabilen bir mobil uygulama geliştirmişlerdir. Uygulamalarını amaca yönelik basit bir deneyle başarılı bir şekilde test etmişlerdir.

Assissi ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada; Beacon kimlik bilgilerine dayalı, iOS işletim sistemiyle çalışabilen, konum bazlı takip yapabilen ve kullanıcı belirli bir konuma geldiğinde veya ayrıldığında hatırlatma ve uyarma işlevi olan Beaconholic adlı bir mobil uygulama geliştirmişlerdir. Uygulama, konum takibiyle birlikte daha önce uygulamaya girilen hatırlatıcıları kullanıcılara sunmaktadır.

Gülağız ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, belirli mesafeler için nesnelerin yerini tespit edebilecek BLE Beacon tabanlı uygulama geliştirmişlerdir. Uygulamalarını kapalı ve açık alanda test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre uygulamaları, açık alanda daha iyi sonuç vermiştir. Çalışma sonucunda 3 m mesafeden sonra yapılacak konum tespitlerinde Beacon sinyallerinin azaldığını ve bu teknolojinin daha uzak mesafeler için geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Kaczmarek ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı konum belirlemede SensorTag CC2650 Beacon cihazının kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Yaptıkları testlerde kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafeyi hassas bir şekilde bulmak için RSSI değerlerini analiz etmeyi ve mesafe bazlı kalibre etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın testlerini bir evin içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, RSSI değerlerindeki düzensizlikler nedeniyle mesafe ölçümlerinde tek bir RSSI değeri kullanmak yerine aynı noktada toplanan yirmiden fazla RSSI değerinin ortalamasının alınmasının daha sağlıklı olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca daha fazla ölçümle daha iyi sonuçlar bulmak için logaritmik yol kaybı modelinin parametrelerini bularak bu modelin kullanılabileceğini önermişlerdir.

Paek ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlardaki uygulamalar için kullanılabilen BLE Beacon teknolojisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada bu teknolojiyle ilgili birçok konuyu testler yaparak ele almışlardır. Bu testler arasında; farklı işletim sistemlerine sahip telefonların veri alma durumları, ortama göre Beacon cihazlarının kurulum yüksekliklerinin etkisi, farklı firmalar tarafından üretilen Beacon'ların performansları arasındaki farklar, Beacon sinyallerinin iletim gücündeki değişiklikler, iç mekân ve dış mekânlara göre Beacon performansı, WiFi sinyallerinin Beacon sinyallerine etkisi, ortamdaki engellerin Beacon sinyallerine etkisi ve eğri yüzeyi kullanarak mesafe tahmini yer almaktadır. Ayrıca çalışmalarında Beacon tabanlı otomatik yoklama sistemi uygulaması geliştirmişlerdir.

Subedi ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirleme uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak

ağırlıklı merkezi konumlandırma yöntemini kullanmıştır. Ayrıca çalışmalarında, A ve n değerleri belirleyerek KF (Kalman Filter, Kalman Filtresi) ve hareketli ortalama filtresini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda ağırlıklı merkezi konumlandırma yönteminde 0.5 derecede en iyi sonuçları elde ettiklerini ve 1.58 m-2.45 m değişen ortalama hatayla konum doğruluğu elde ettiklerini belirtmişler.

Sung (2016) yaptığı çalışmada, BLE Beacon cihazı vericisi ile bir noktadaki alıcı arasındaki mesafeyi tahmin etmek için bir sistem önermiştir. Bu yapı çevrimdışı ve çevrimiçi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Çevrimdışı aşama, belirli mesafeler için maksimum ve minimum RSSI sinyallerini belirlemek için ölçüm işlemi, logaritmik mesafe revizyonu ve KF'den oluşmaktadır. Çevrimiçi aşama ise çevrim dışı aşamada belirlenen maksimum ve minimum RSSI sinyallerine dayanan RSSI tabanlı mesafe ölçümü, logaritmik mesafe revizyonu, KF ve göreceli mesafe tahmininden oluşmaktadır. Önerdikleri sistem çevrim dışı aşamada ölçülen Beacon sinyallerini, çevrim içi aşamada BLE Beacon cihazı vericisiyle bir noktadaki alıcı arasındaki gerçek mesafeyle orantılı sinyallere dönüştürmüştür. Bu aşamada KF'yi sinyaldeki gürültüyü minimize etmek için kullanmıştır. Maksimum ve minimum mesafeleri ise göreceli mesafeleri tahmin etmek için kullanmıştır. Sistemin performansını; verici tarafından gönderilen RSSI sinyallerinin alıcıda değerlendirilmesi sırasında darbe gürültüleri iyileştiren RSSI filtresi (RF-III)'nin sonuçlarıyla, KF'nin sonuçlarını kıyaslayarak yapmıştır. Çalışma sonucunda biriken hatalar baz alındığında iki filtrenin gerçek mesafelerin belirlenmesinin kullanımında, KF'nin RF-III filtresine göre %8 daha az hata ürettiğini ortaya koymuştur.

Toprak (2016) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konumlandırmayla ilgili uygulama gerçekleştirmiştir. Çalışması için dört farklı Beacon'ı incelemiş ve içlerinden bir tanesini çalışmasında kullanmıştır. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Uygulamasını kapalı bir alanda 1.8 m, 3.6 m, 5.4 m ve 7.2 m konum hassasiyetine (Beacon arası mesafeler) göre KNN (K-Nearest Neighbors, K-En Yakın Komşu) sınıflandırma algoritmasıyla birlikte Öklid mesafesini kullanarak değerlendirmiştir. Çalışma sonucuna göre 1.8 m konum hassasiyetinde %70, 3.6 m için %88, 5.4 m için %98 ve 7.2 m konum hassasiyeti için tam doğruluk elde etmiştir.

Zhuang ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, Beacon tabanlı kapalı alan mobil navigasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak polinom regresyon modeli, parmak izi, aykırı değer tespiti ve genişletilmiş KF'yi bünyesinde barındıran bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri algoritmayı testler

gerçekleştirerek desteklemişlerdir. Sonuç olarak önerdikleri algoritmanın seyrek Beacon dağılımı olan ortamlarda, ekstra donanım maliyeti olmadan konum hassasiyetini arttırmak için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Başak (2017) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konumlandırma çalışması yapmıştır. Çalışmasında konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Tasarladığı parmak izi yöntemiyle konum tespitinde; KF, genetik algoritma, kestirim hesapları gibi birçok aşama mevcuttur. Tasarladığı yöntemi üçgenleme ve basit parmak izi yöntemleriyle kıyaslamıştır. Çalışmasını kapalı bir alanda test ederek %57 olasılıkla 1.5 m ve % 95 olasılıkla 3 m konum doğruluğu elde etmiştir.

De Blas ve López-de-Ipiña (2017) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda kullanılabilen BLE Beacon tabanlı konumlandırma yöntemlerinden üçgenleme yönteminin sonuçlarını iyileştirmek için bir düzeltme fonksiyonu kullanmışlardır. Çalışmalarını test ederek RSSI bazlı mesafe tahminlerinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

De Blasio ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, kapalı alan özelliğini taşıyan bir otobüs terminalinde WiFi ve Beacon tabanlı konum belirleyerek sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmışlardır. Parmak izi yönteminde KNN'yi sınıflandırma algoritması olarak kullanmışlardır. Kullandıkları sınıflandırma algoritmanın uzaklık yöntemi olarak Öklid ve Mahalanobis mesafesini kullanmışlardır. Testler sırasında WiFi için üç erişim noktasından Beacon için ise dört erişim noktasından veri elde etmişlerdir. Farklı senaryolara göre yapılan test sonuçlarına göre Beacon tabanlı konum belirleme WiFi'ye göre daha iyi sonuç vermiştir.

De Oliveira ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, tekerlekli sandalye kullanıcıları için kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı artırılmış gerçekliğe sahip mobil navigasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda gönüllü iki engelli bireyle test etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda tasarladıkları uygulamanın fiziksel engelli bireylere yönelim ve hareket konusunda yardımcı olacağını belirtmişlerdir.

Hoshi ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı konumlandırmada, statik ve hareketli engellerin RSSI sinyalleriyle etkileşiminin konumlandırmaya etkisini azaltacak olasılık tabanlı yöntem önermişlerdir. Yöntemlerini bir mağazaya gelen otuz yedi kişinin rotalarını kaydederek simüle etmişlerdir. Çalışma

sonucunda önerdikleri yöntemin kablosuz sinyal yayılım modeline göre konum hatasını 1.20 m azalttığını belirtmişlerdir.

Memon ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı konumlandırma çalışması yaparak personel takip uygulaması geliştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak en güçlü Beacon'dan gelen RSSI sinyallerini kullanıcı ile eşleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmayı kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda 1000 ms tarama aralığında %96 konum doğruluğu elde etmişlerdir.

Xiao ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı üç boyutlu konumlandırma yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntemlerinde parmak izi algoritmasının veri tabanını üç boyutlu oluşturup Beacon sinyallerindeki gürültü için derin öğrenme tabanlı otokodlayıcı (autoencoder) kullanmışlardır. Algoritmalarının tahmin kısmında ise KNN yer almıştır. Çalışmalarını bir konferans salonunda test edip sonuçlarını farklı tasarımları olan iki konumlandırma algoritmasıyla kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda geliştirdikleri yöntemin, kıyasladıkları yöntemlerden daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Arsan (2018) yaptığı çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı parmak izi yöntemi kullanarak konumlandırma çalışması yapmıştır. Çalışmasında büyük patlama – büyük çöküş optimizasyonu, Öklid uzaklık eşleştirme yöntemi ve KF kullanmıştır. Çalışmasını kapalı bir alanda dört Beacon ve on iki veri alma noktası kullanarak test etmiştir. Çalışma sonucunda konum doğruluğunu uyguladığı yöntemle %26.62'den %75.69'a çıkardığını, ortalama hatayı da 180 cm 'den 86 cm 'ye düşürdüğünü belirtmiştir.

Aydalka (2018) yaptığı tez çalışmasında, BLE Beacon tabanlı müze eser tanıtım uygulaması yapmıştır. Konumlandırma prensibi olarak en yakın Beacon sinyalinin analiz edilmesini baz almıştır. Çalışmasında elde edilen konum bilgisine, görsel içerikler yönlendirmiştir.

Casareo ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirleme uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında konum tahmini için EKK yöntemini, mesafe tahmini için ise A ve n değerlerinin belirlenmesini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda üç farklı durum için test etmişlerdir. Çalışma sonucunda mesafe ölçümlerinde RSSI sinyallerinin çok fazla dalgalanıyor olmasının konum hassasiyetine olumsuz etki ettiğini ve başka çözümler bulunması gerektiğini belirtmişlerdir.

Hatipoğlu (2018) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemiştir. Konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini, EKK ve Newton Raphson iterasyon yöntemiyle birlikte kullanmıştır. Çalışmasını kapalı alan özelliklerine sahip bir laboratuvarında test etmiştir. Çalışma sonucunda olması gereken gerçek konumla hesaplanan konum arasındaki farkın $0.11\ m$ ile $2.2\ m$ arasında değiştiğini belirtmiştir.

Jeon ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon teknolojisini birçok yönden detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Bu teknolojinin zayıf ve güçlü yönleriyle ilgili görüşlerini belirtmişlerdir.

Lin ve Lin (2018) yaptıkları çalışmada, BLE teknolojisine dayalı interaktif konumlandırma ve takip sistemi geliştirmişlerdir. İnternet bağlantısı olmadan da kullanıcı tarafında sistem çalışmaktadır. Çalışmalarında Beacon ağındaki Beacon'ların kimlik bilgilerini (UUID, major, minör) mevcuttaki Beacon konumları ile eşleştirerek konum takibi gerçekleştirmişlerdir.

Liu ve Hsieh (2018) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda kullanılan BLE Beacon teknolojisinin kullanıcılara konum bazlı bilgilerin; hızlı ve etkili nasıl kullanıldığının aktarılmasını, bu teknolojinin mevcut durumuyla birlikte daha birçok özelliğini anlatmışlardır.

Masmanacı (2018) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda kendi geliştirdiği konumlandırma yöntemiyle BLE Beacon tabanlı konum belirlemiştir. Çalışmasını dikdörtgen oda ve düz koridor özelliklerine sahip iki kapalı alanda test ederek sonuçlarını üçgenleme, tulip, cramer rao ve ağırlıklı ortalama yöntemi ile kıyaslamıştır. Çalışma sonucuna göre ortalama hata miktarları baz alındığında geliştirdiği yöntemin daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir.

Molina ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, havaalanları için Android ve iOS tabanlı konumlandırma sistemi kurmuşlardır. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmışlardır. Donanım olarak WiFi ve Beacon cihazlarından yararlanmışlardır. Sistemlerini Palma de Mallorca ve Berlin-Tegel havaalanlarında test ederek öneriler sunmuşlardır.

Murase ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, doğal afetlerde BLE Beacon teknolojisine dayalı insan yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde tasarlanan akıllı telefon uygulaması ve bulut tabanlı yönetim sistemi sayesinde her personelin konumunu, afet yardım faaliyetlerini optimize etmek için kullanmışlardır. Akıllı telefon uygulaması Beacon sinyallerini toplayarak Beacon kimlik bilgilerini kullanıp bulut sistemine konum

bilgisini göndermektedir. Acil durum yönetim merkezi, bulut sistemindeki konum bilgilerine göre afet durumunda yapılacak çalışmaları optimize etmektedir.

Spachos ve Mackey (2018) yaptıkları çalışmada, Beacon'ların enerji verimliliğini arttırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için güneş enerjisi ile çalışan Beacon'ların performansını incelemişlerdir. Çalışmalarında güneş enerjisi ile çalışan Beacon'lar ile pille çalışan Beacon'ların performansını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, minimum enerji ile yüksek doğruluk gerektiren çalışmalar için güneş enerjisi ile çalışan Beacon'ların gelecek vaat eden bir çözüm olduğunu vurgulamışlardır.

Ruan ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, kapalı alan konumlandırma; yüksek konumlandırma doğruluğu sağlamak için üçgenleme yöntemi genelinde kullanılacak optimum Beacon sayısını ve Beacon yerleşimlerini sağlayan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, kapalı alanın yapısıyla birlikte kullanıcı dağılımının özellikleri göz önünde bulundurularak genetik algoritmayla Beacon cihazlarının sayısı ve konumunu üretebilen bir optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Çalışmalarında önerdikleri yöntemin doğruluğunu test ederek kanıtlamışlardır.

Torii ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda konum belirleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Çalışmalarında SVM (Support Vector Machines, Destek Vektör Makineleri) öğrenme algoritmasıyla KF kullanmıştır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, kullandıkları yöntemin geçerliliğini ispat ettiğini belirtmişlerdir.

Turgut (2018) yaptığı doktora tez çalışmasında, kapalı alanlarda konum belirleme çalışması yapmıştır. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Kullandığı parmak izi yönteminin yapısında; WiFi, BLE Beacon, Dünya'nın manyetik alan verileri ve Dünya'nın düzenlenmiş manyetik alan verilerini gibi birçok veri yer almaktadır. Bu verileri $4 m^2$ aralıklı, açık ofis özelliğini taşıyan kapalı alanlardan elde etmiştir. Çalışmasında KF, parçacık filtresi ve her ikisinin de kullanıldığı başlangıç aşamasıyla birlikte sınıflandırıcı olarak derin öğrenmeyi kullanmıştır. Yöntemini farklı veri kümesi üzerinde KNN, YSA (Yapay Sinir Ağları, Artificial Neural Network) gibi sekiz sınıflandırma algoritmasının zaman isterleriyle kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda önerdiği derin öğrenme yönteminden daha hızlı sınıflandırıcıların bulunduğunu ancak yüksek doğruluk ve verilerin eğitilmesi gibi durumlarda baz alındığında diğer sınıflandırıcılardan daha iyi performans verdiğini belirtmiştir.

Zhang ve Cai (2018) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konumlandırmada algoritmalarından parmak izi yönteminin çevrim dışı aşamasındaki veri toplama aralıklarını, çok değişkenli polinom enterpolasyonu ile tahmin etmişlerdir. Çalışmalarındaki verileri; enterpolasyon kullanmadan, linear enterpolasyon ve çok değişkenli polinom enterpolasyonu kullanarak üç farklı şekilde simüle etmişlerdir. Üç yöntem içinde parmak izi yönteminde, sınıflandırma algoritması olarak WKNN (Weighted K-Nearest Neighbors, Ağırlıklandırılmış K-En Yakın Komşu) kullanmışlardır. Çalışma sonucunda önerdikleri yöntemin, çevrimdışı aşamada ölçme yükünü azaltarak konum doğruluğunu arttırabileceğini belirtmişlerdir.

Ağaya (2019) yaptığı tez çalışmasında; endüstri tesislerindeki personelin giriş-çıkışını, belirli bir alanda ne kadar vakit geçirdiğini tespit etme gibi durumlarını takip etmek için BLE tabanlı bir takip sistemi geliştirmiştir. Bu sistemin testlerini, bir işyerinde personele verdikleri akıllı bileklerle gerçekleştirmiştir. Konumlandırma işlemini ise çalışma alanını bölgelere ayırarak sinyal bazlı yapmıştır. Çalışma sonucunda personelin işyerinin hangi bölümünde ne kadar zaman geçirdiğini tespit etmiştir.

Altın (2019) yaptığı tez çalışmasında, hastane içerisindeki kişi ve nesnelerin takibini gerçekleştirebilen bir konumlandırma uygulaması tasarlamıştır. Ayrıca hastane takip ve konumlandırma uygulamasının bir bölümü olarak kullanıcıların, acil durumlar başta olmak üzere birçok durumda yararlanabileceği bir iletişim sistemi gerçekleştirmiştir. Çalışmasını özel bir hastanenin acil katında test etmiştir. Çalışma sonucunda tasarladığı uygulamanın konum doğruluğunun 2-3 m olduğunu belirtmiştir.

Arslan (2019) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda WiFi ve BLE tabanlı konumlandırma çalışması yapmıştır. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Parmak izi yönteminin sınıflandırma kısmında YSA ve KNN algoritmasını kullanmıştır. Çalışmasını kapalı alan özelliklerine sahip bir çiftlikte test etmiştir. Test sonuçlarında WiFi ve BLE tabanlı konumlandırmayla YSA ve KNN algoritmasının performansının, veri alma noktalarına göre kombinasyonları yer almıştır. Çalışmasında en iyi sonucu 0.94 m konum hatasıyla WiFi tabanlı KNN algoritmasıyla elde ettiğini belirtmiştir.

Bayar (2019) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı mobil konumlandırma uygulaması tasarlamıştır. Çalışmasında konumlandırma algoritması olarak üçgenleme ve parmak izi yöntemini kullanıp sonuçlarını kıyaslamıştır. Ayrıca Beacon sinyallerindeki gürültüleri elemine etmek için KF kullanmıştır. Mobil

uygulamasını mühendislik fakültesinin bir katında test etmiştir. Çalışma sonucunda parmak izi yönteminin daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Eroğlu ve Doğan (2019) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı navigasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Uygulamanın testlerini Antalya Büyükşehir Belediyesi Ana Hizmet Binası'nda görme ve işitme engelli bireylerle gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, tasarladıkları navigasyon uygulamasının performansını olumsuz yönde etkileyecek önemli bir sorunla karşılaşmadıklarını belirtmişlerdir.

Handojo ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada; müzedeki ziyaretçilerin konum tespitinden hangi alanda ne kadar zaman geçirdiklerini, hangi eserlere daha çok ilgi duyduğunu ve buna benzer durumların tespiti için BLE Beacon tabanlı konum belirleme uygulaması yapmışlardır. Konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemiyle KF'yi bir arada kullanmışlardır. Uygulamalarını bir müzede test etmişlerdir. Çalışma sonucunda 114.35 cm ortalama hatayla konum tespiti yaptıklarını belirtmişlerdir.

Leng ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, görme engelliler için kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı navigasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak EKK birlikte üçgenleme ve yakınlık yöntemini kullanmışlardır. Uygulamalarını ise başarıyla test etmişlerdir.

Nakano ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, parmak izi yöntemini parçacık filtresiyle birleştiren BLE Beacon tabanlı kapalı alan konumlandırma uygulaması önermişlerdir. Uygulamalarını kapalı bir alanda üç Beacon kullanarak test etmişlerdir. Test sonuçlarını KNN sınıflandırma algoritmasıyla kıyaslayarak sunmuşlardır. Çalışma sonucunda tasarladıkları konumlandırma uygulamasının 1.71 m konum hatasıyla KNN algoritmasına göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Karabtcev ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı navigasyon uygulaması tasarlamışlardır. Çalışmalarında KF'yi üçgenleme yöntemiyle birlikte kullanmışlardır. Ayrıca kullanıcı ile Beacon arası mesafenin hesabı için A ve n değerlerini belirleyerek kullanmışlardır. Uygulamalarını iki Beacon'dan sinyal aldığı anda bölge bazlı, en güçlü RSSI değerini sahip üç Beacon'dan sinyal aldığı anda üçgenleme yöntemiyle konum belirleyecek şekilde tasarlamışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda başarıyla test etmişlerdir.

Liu ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada; BEH diye tanımladıkları bir sistem olan, pillere ihtiyaç duymadan sürekli çalışan, kapalı alanlarda bir Beacon enerji sistemi

tasarlamışlardır. Bu sistem için ilk olarak sistemde toplanan RF (Radio Frequency, Radyo Frekansı)'nin verimliliğini arttırmak için dört yöntem önermişlerdir. Bu dört yöntemin, Beacon enerji ihtiyaç seviyesini minimize ettiğini belirtmişlerdir. BEH sistemini, BLE ve RF enerjisi toplayan cihazları kullanarak test etmişlerdir. Testlerin $16 m^2$ bir odada Beacon cihazlarının hareketli ve sabit olarak ömür boyu, sürekli çalışacağını gösterdiğini belirtmişlerdir.

Sadowski ve Spachos (2019) yaptıkları çalışmada; kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konumlandırma çalışmalarında, doğru konumlandırma için kullanılabilecek Beacon sayısını optimize etmişlerdir. Çalışmalarında, konumlandırma yöntemi olarak üçgenleme ve doğrusal olmayan EKK yöntemini KF ve hareketli ortalama filtresiyle kullanmışlardır. Ayrıca çalışmalarında kullanıcı ile Beacon arası mesafeyi tahmin etmek için A ve n değerini belirlemişlerdir. Çalışmalarını kapalı bir alanda otuz test yaparak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda en az konum hatasını, $1.149 m$ konum hatasıyla ortamda altı Beacon'nın olduğu ve alıcıya en yakın üç Beacon'nın kullanıldığı hareketli ortalama filtresiyle kullanılan doğrusal olmayan EKK yönteminin verdiğini belirtmişlerdir.

Taşkan (2019) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda yer alan nesnelerin BLE Beacon tabanlı konum belirlemedeki olumsuz etkilerini gidermeye yönelik bir algoritma geliştirmiştir. IP-PPFONM isimli geliştirdiği bu algoritmada birkaç filtreleme yöntemini bir arada kullanmıştır. Geliştirdiği algoritmayı kapalı bir alanda farklı durum kombinasyonlarında test etmiştir. Çalışma sonucunda parmak izi yönteminde $2.29 m$ 'lik konum doğruluğu elde etmiştir.

Yadav ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı hibrit bir konumlandırma uygulaması yapmışlardır. Konumlandırma yöntemi olarak parmak izi yöntemini IMU (Inertial Measurement Unit) sensör verileriyle birleştirerek KNN ve Bayes algoritmasıyla kullanmışlardır. Konum tahmini aşamasında ise bulanık mantıkla desteklenen KF'yi kullanmışlardır. Çalışmaları için laboratuvar ve koridorda olmak üzere iki test gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda kullandıkları konumlandırma yöntemi, mevcut KNN ve IMU destekli yapılan çalışmalardan %25'den fazla doğruluk sağladığı klasik KF'ye kıyasla da %15-20 oranında konum doğruluğu iyileştirmeleri gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir.

Ture ve Hatipoglu (2019) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı konum belirleme uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak kullanıcı ile Beacon'lar arası mesafeyi tahmin etmek için kullanılan A ve n değerleri belirleyerek

üçgenleme yöntemiyle doğrusal EKK yöntemini kullanmışlardır. Buldukları sonuçları Newton Raphson yöntemiyle optimize etmişlerdir. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda elde ettikleri doğruluğun $0.11\ m$ ile $2.2\ m$ arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

Alexandr ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı üçgenleme ve min-max konumlandırma yönteminin kapalı alanlardaki performanslarını kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda; herhangi bir Beacon'dan gelen veri diğerlerinden fazla olduğunda, kapalı alanda çok fazla radyo sinyali yayan ekipman olduğunda ve kapalı alana çok fazla insan girdiğinde konumlandırma performanslarının olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir.

Aydemir (2020) yaptığı çalışmada, koronavirüs salgının etkilerini dikkate alarak topluma açık kapalı alanlarda dezenfektan işlemi için BLE Beacon tabanlı bir uygulama geliştirmiştir. Çalışmasında görüntü işleme, insanları izleme, personel takibi, riskli durumlarda uyarı gibi birçok durum yer almaktadır. Geliştirdiği uygulamasında, kapalı alanlarda belirlenen insan yoğunluğunu görüntülerden analiz edip riskli görülen bölgelere dezenfektan işlemi için personel yönlendirilmesi yer almaktadır. Uygulamada personel bu işlemi geciktirdiğinde sistem uyarı vermekte, işlemi tamamladığında ise görev veri tabanına işlenmektedir. Personelin izlenmesi ve takibi kapalı alan içerisine yerleştirilen Beacon'larla yapılmaktadır.

Bai ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda üçgenleme ve parmak izi yöntemini kullanarak BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Çalışmalarını ev ortamında test etmişlerdir. Testlerinde; görüş hattı deneyini (üçgenleme yönteminde kullanıcıyla Beacon arasındaki mesafenin belirlenmesi için), birçok sınıflandırıcının kullanıldığı parmak izi yöntemini, farklı giyilebilir Beacon cihazlarının performanslarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca RSSI değerlerindeki gürültü işlemleri için KF kullanmışlardır. Çalışma sonucunda testlerde; iyi bir konumlandırma doğruluğu elde ettiklerini, parmak izi yönteminde düşük maliyetli Beacon cihazlarıyla bile %90'nın üzerinde doğruluk yakaladıklarını belirtmişlerdir.

Dinh ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı mobil konumlandırma uygulaması tasarlamışlardır. Uygulamalarında akıllı telefonun ivmeölçer, manyetometre gibi sensörlerini konum hesaplarında kullanmışlardır. Çalışmalarında A ve n değerlerini belirleyerek kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafeyi tahmin etmişlerdir. Bu mesafe değerini üçgenleme ve medyan filtresiyle birlikte kullanıp başlangıç konumunu hesaplamışlardır. Sonraki konumlandırma işlemleri için parmak izi

yöntemiyle birlikte parçacık filtresini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışmalarının sonuç kısmında beş referans noktasıyla ortalama konum hatasının 0.80 m olduğunu, bu hataların %70'inin 1 m 'den az olduğunu belirtmişlerdir.

Kluge ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada; BLE Beacon tabanlı üçgenleme, parmak izi ve ağırlıklı merkezi konumlandırma yöntemlerinin, konumlandırma performanslarını incelemişlerdir. Çalışmalarının testlerini bir fuar alanında ziyaretçilerin olmadığı ve ziyaretçilerin olduğu sıralarda yaparak her iki durumu karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucuna göre kalabalık alanlarda ağırlıklı merkezi konumlandırma yönteminin, kalabalık olmayan alanlarda parmak izi yönteminin en doğru sonucu verdiğini belirtmişlerdir.

Mackey ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı yakınlık tahmininin doğruluğunu arttırmak için KF, parçacık filtresi ve parametrik olmayan bilgi filtresi olmak üzere üç filtreyi kullanan bir mobil uygulama geliştirmişlerdir. Bu uygulamanın testlerini iki farklı kapalı alanda üç farklı Beacon cihazı modeli ile test etmişlerdir. Çalışmalarında mesafe tahminleri için A ve n değerlerini test ederek belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda özellikle parçacık filtresi ve parametrik olmayan bilgi filtresinin yakınlık tahminlerinde önemli bir iyileştirme sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca kullanıcı ile Beacon arasındaki 3 m 'lik mesafede hata payını 0.27 m 'ye kadar düşürmüşlerdir.

Pakanon ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı üçgenleme yönteminin doğruluk hassasiyetini araştırmışlardır. Kullanıcı ile Beacon arası mesafenin hesabı için A ve n değerlerini belirleyip kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Test sonuçlarını bir ölçüm, beş ve on ölçümün ortalamalarıyla değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda ölçü sayısı arttıkça doğruluğun artacağını ifade etmişlerdir.

Phutcharoen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konumlandırma algoritmalarından parmak izi yönteminin doğruluğunu arttırmak için bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Test verilerini çevrim dışı aşamada, her bir noktada bir ve beş ölçüm yaparak elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda, beş ölçümün ortalamasıyla elde edilen sonuçların bir ölçüme kıyasla ortalama hatayı 0.86 m azalttığını belirtmişlerdir.

Shen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirleme uygulaması yapmışlardır. Çalışmalarında ön aşama için KF, tahmin aşamasında ise parçacık filtresi kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda iki farklı

durum için test etmişlerdir. Çalışma sonucunda geleneksel kapalı alan konumlandırma yöntemlerine göre %24 daha iyi konum doğruluğu elde ettikleri belirtmişlerdir.

Sümer (2020) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemiştir. Çalışmasında kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafenin belirlenmesiyle ilgili yol kayıp modellerini incelemiş A ve n parametrelerini belirlemiştir. Konumlandırma algoritması olarak filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma yöntemini önermiş, klasik üçgenleme yöntemiyle sonuçlarını kıyaslamıştır. Konumlandırma işlemlerini kapalı bir alanda altı farklı kombinasyonla test etmiştir. Test sonuçlarına göre filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma yönteminin diğer senaryolara göre daha başarılı olduğunu belirtmiştir.

Tanrıöven ve Taşdelen (2020) yaptıkları çalışmada, bir depodaki malzeme takibi için BLE Beacon tabanlı izleme uygulaması tasarlamışlardır. Uygulamanın çalışma alt yapısı, depodaki kutulara yerleştirilen Beacon modüllü cihazlardan yararlanılarak depo dışına çıkarılan kutuların izlenmesi ve tespit edilmesine dayanmaktadır.

Uttraphan ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, Beacon tabanlı kapalı alan navigasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemin veri toplama aralığını $1\ m$ olarak belirlemişlerdir. Kapalı alan olarak seçtikleri üniversite içerisindeki konferans salonu kompleksinin haritasını JOSM (Java OpenStreetMap Editor) kullanarak çıkarmışlardır. Çalışmanın test sonuçlarına göre tasarladıkları uygulamanın, kullanıcıları belirledikleri hedeflere doğru bir şekilde ulaştırdığını belirtmişlerdir.

Vadivukkarasi ve Kumar (2020) yaptıkları çalışmada, konum doğruluğunu arttırmak amacıyla konum tahmini ve hedef izleme yapabilen, KF ile kullanılabilen hem iç hem de dış mekânda uygulanabilen MoteTrack InOut sistemini önermişlerdir. MoteTrack InOut sistemi birçok aşamadan oluşmakla birlikte Beacon'lardan elde edilen RSSI verileriyle gerçek zamanlı mesafe tahminleri için A ve n değerlerini tespit edip aşama aşama ilerlemektedir. Yaptıkları çalışma sonucuna göre hareketli hedefler için konum hatalarını, log-normal gölgeleme modeliyle elde edilen konuma göre hem iç mekân hem de dış mekânda yaklaşık %75 azalttıklarını belirtmişlerdir.

Bilbao-Jayo ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, kapalı bir alanda BLE Beacon tabanlı konum belirleme sistemi geliştirmişlerdir. Bu işlem için akıllı bir telefonla akıllı bir saati kullanıp performansları karşılaştırmışlardır. Ayrıca konumlandırma algoritması olarak giriş modülü, dikkat mekanizması, sıra özelliği çıkarıcı ve konum tahmin modülü olmak üzere dört aşamalı bir konumlandırma sistemi tasarlamışlardır. Bu konumlandırma

algoritmasını, KNN birlikte hareket sistemini tanımlayan gizli Markov modeliyle kıyaslamışlardır. Çalışmalarının testlerini beş oda ve bir koridora sahip Beacon'lar bulunan bir evin içinde, üç farklı testle akıllı telefon ve akıllı saat kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre en iyi konumlandırma performansını akıllı telefona nazaran akıllı bir saatle elde etmişlerdir. Ayrıca tasarladıkları konumlandırma sisteminin, kıyasladıkları konumlandırma sistemlerine göre daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Daniş (2021) yaptığı doktora tez çalışmasında, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı konum belirleme çalışması yapmıştır. Çalışmasında içeriğinde filtreleme, Markov modeli, enterpolasyon, arttırılmış gerçeklik gibi birçok yaklaşım yer almaktadır. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Uygulamasını kapalı alan özelliklerine sahip ev ve ofis ortamı olmak üzere iki alanda test etmiştir. Test sonuçlarını; KNN, YSA gibi sınıflandırma algoritmalarıyla elde edilen sonuçlarla kıyaslamıştır. Çok yönlü olarak gerçekleştirdiği çalışmasıyla ilgili öneriler sunmuştur.

Duong ve Dinh (2021) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı üçgenleme yönteminin konum doğruluğunu arttırmak için bir yöntem önermişlerdir. Yöntemlerinde mobil telefonun Beacon sinyallerini alma durumunu dikkate alıp KF'yi kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemin mesafe tahminlerinde, 3 m'den az 70 dBm'den büyük bir RSSI değerini tekabül eden bir RSSI aralığı kullanmışlardır. Uygulamanın testlerini üniversitede bir binanın katında dört Beacon'la gerçekleştirmişlerdir. Yöntemin konumlandırma doğruluğunu arttırdığını ifade etmekle birlikte dört Beacon'ın aynı anda kullanılmasıyla daha hassas sonuçlar elde edilebileceğini açıklamışlardır.

Duong ve Dinh (2021) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini, sınıflandırma algoritması olarak da KNN yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Test sonuçlarını KNN algoritmasının K değeri ve Beacon sayısına göre değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda K'nın üç olduğu durumlarda 1.49 m doğrulukla konum tahmini yaptıklarını ve Beacon sayısının artışının konum doğruluğunu olumlu etkilediğini belirtmişlerdir.

Haznedar (2021) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda WiFi ve BLE Beacon tabanlı hibrit bir konumlandırma uygulaması geliştirmiştir. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında KF, doğrusal olmayan EKK yöntemi, KNN algoritması, SVM algoritması gibi birçok aşama ve bileşen yer almaktadır. Çalışmasını kapalı alan özelliklerini taşıyan bir odada farklı durum ve kombinasyonlarda

iki farklı plana göre test etmiştir. Test alanı birinci durumda on bölgeye, ikinci durumda yirmi beş bölgeye bölünmüş ve doğrusal olmayan EKK ve Levenberg-Marquardt algoritmasıyla değerlendirmiştir. Test sonuçlarını literatürde yer alan benzer çalışmalarla kıyaslamış ve doğruluk oranları açısından yakın sonuçlar bulunduğunu belirtmiştir.

Nagah Amr ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı konumlandırma yöntemi önermişlerdir. Yöntemlerinde, logaritmik yol kaybı modeline dayalı düzeltme parametreleriyle birlikte konum hesabını yapan gelişmiş merkez konumlandırma algoritması uygulamışlardır. Uygulamalarını kapalı bir alanda test ederek sonuçlarını klasik üçgenleme yöntemiyle kıyaslamışlardır. Test sonuçlarına göre tasarladıkları yöntem, üçgenleme yöntemine nazaran ofis tipi odada %80.97 koridorda ise %67.51 doğruluk sağlamıştır. Algoritmanın dezavantajlı tarafları ise konumlandırmayı gerçek zamanlı yapabilmesi için RSSI örneklemelerinin elliden fazla olmasıyla birlikte oda seviyesinde küçük ve orta ölçekli kapalı alanlara hitap ediyor olması olarak belirtmişlerdir.

Sophia ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE tabanlı konum belirlemişlerdir. Konum belirleme algoritması olarak üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test edip ortalama hata miktarını %13.708 bulmuşlardır.

Gao ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, gemi içindeki kabinler için hiyerarşi alan bölünmesine dayalı BLE Beacon tabanlı konumlandırma algoritması geliştirmişlerdir. Algoritmalarını Şanghai Denizcilik Üniversitesi'nin otomatik gemi kabini laboratuvarında dokuz Beacon'la test etmişlerdir. Konumlandırma işlemi yapılacak alanı, Beacon konumlarına göre sekiz alana bölmüşlerdir. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini ve bu yöntemin sınıflandırma algoritmasını da KNN algoritması olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda tasarladıkları konumlandırma algoritmasını geleneksel KNN algoritmasıyla kıyasladıklarında daha iyi sonuçlar elde ettiklerini ve algoritmalarının konumlandırma doğruluğunun %80'nin üzerinde olduğunu belirtmişlerdir.

Gao ve Li, (2022) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda konum belirlemek için kullanılan BLE Beacon tabanlı üçgenleme yönteminin doğruluğuna, ortamdaki farklı cins duvarların etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarını kapalı ortam özelliklerini taşıyan her biri farklı duvar yapısına sahip (ahşap, alçıpan ve cam) üç farklı odada gerçekleştirmişlerdir. Her bir odadaki test için A ve n değerlerini hesaplamışlardır.

Çalışma sonucunda konumlandırma performansı olarak en iyi sonucu alçıpanlı duvar yapısına sahip odadaki testlerde elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Ji ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada; mevcut kablosuz kapalı alan konumlandırma yöntemlerini, BLE Beacon tabanlı mesafe bazlı ve mesafeden bağımsız kapalı alan konumlandırma yöntemleriyle birlikte parmak izi yöntemini inceleyip tanıtmışlardır. Çalışmalarında parmak izi yönteminin hala çözülmesi gereken sorunları olduğunu belirtmişlerdir.

Ndebugre (2022) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirleme çalışması yapmıştır. Çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, RSSI sinyallerini görüntüleri dönüştüren ve bu aşamada verilerin eğitilmesi için kullanılan CNN (Convolutional Neural Networks, Evrişimli Sinir Ağları)'yi içine alan oyun teorisi yaklaşımı ve Markov karar süreciyle konum ilişkisidir. Çalışmasında, bir kütüphanenin birinci katında elde edilen verileri kullanmıştır. Ayrıca çalışma alanını on üç bölgeye sınıflandırmış ve tek bölgeye nazaran daha iyi sonuç aldığını belirtmiştir.

Shiraki ve Shioda (2022) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konumlandırmayla ilgili iki yöntem önermişlerdir. Birinci yöntem kişilerle Beacon arasındaki mesafeye dayalı çoklu üçgenleme yöntemi olduğunu, ikinci yöntem ise birinci yöntemin geliştirilmiş hali olup sadece kişi ile Beacon'lar arası mesafeyi dikkate almadığını diğer kişilerle olan mesafesini de dikkate aldığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında A ve n değerleri de hesaplanmışlardır. Önerdikleri yöntemleri hem gerçek cihazlarla deneyip hem de simüle edip sonuçlarını parmak izi yöntemiyle ve mesafe bazlı konumlandırma yöntemleriyle kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda önerdikleri yöntemin ortam koşulları değişse bile güçlü performans verdiğini ve mevcut yöntemlerle kıyaslanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Zhuang ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, Bluetooth konumlandırmayı birçok yönüyle ele alarak araştırmış ve gelecekteki durumuyla ilgili görüşlerini belirtmişlerdir.

Assayag ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlar için BLE Beacon tabanlı konum belirleme sistemi önermişlerdir. Sistem genel olarak sahadaki Beacon'ların kimlik ve koordinatlarının sisteme tanıtılması, kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafenin belirlenmesi ve EKK yöntemiyle konum tahmininden oluşmaktadır. Sistemlerini bir okulun ikinci katında test etmişlerdir. Çalışma sonucunda 2.93 m konum doğruluğu elde etmişlerdir.

Dhanalakshmi ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE tabanlı konum belirleyerek personel takibi yapmışlardır. Ayrıca BLE teknolojinin

konumlandırmadaki verimliliğini incelemişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak RSSI sinyallerinin yakınlık prensibini baz almışlardır. Çalışma sonucunda, bu teknolojinin minimum enerji gereksinimi ve daha az maliyetli olmasından dolayı birçok sektörde avantajlı hale gelebileceğini belirtmişlerdir.

Emer (2023) yaptığı tez çalışmasında, işitme ve görme engeli bireyler için BLE Beacon tabanlı mobil navigasyon uygulaması tasarlamıştır. Çalışmasının konumlandırma prensibini, en yakın Beacon'dan gelen RSSI sinyallerinin analizine dayandırarak belirlemiştir.

Görmez ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Çalışmalarında üçgenleme yöntemini makine öğrenimi yöntemlerinden NB (Naïve Bayes), KNN, lojistik regresyon, SVM, JOSM ve YSA ile hibritleşirmişlerdir. Çalışmalarını üç farklı büyüklüğe sahip kapalı alanda kolay, orta, zor diye sınıflandırdıkları durumlara göre test etmişlerdir. Çalışma sonucunda en iyi sonucu KNN algoritması vermesine rağmen bu algoritmanın diğerlerine nazaran en yavaşı olmasından dolayı lojistik regresyon modelini önermişlerdir.

Maaloul ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada; kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı, sınıflandırma alt yapıli konumlandırma çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında makine öğrenimi sınıflandırıcıları (Karar Ağaçları, (Decision Tree), KNN, Rastgele Orman (Random Forest)...) kullanmışlardır. Çalışmanın testlerini kapalı bir alanda gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında en iyi konumlandırma performansını Ekstra Ağaçlar (Extra Tree) sınıflandırıcısının verdiğini belirtmişlerdir.

Pyt ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, üniversite kampüsündeki engelli bireyler için BLE Beacon tabanlı kapalı alan navigasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Uygulamalarında Beacon seçimleri, sistemin enerji gereksinimleri, Beacon cihazlarının mevcut güç ayarları ve Beacon sinyallerinin yayınlama aralıkları üzerine ayrıca yoğunlaşmışlardır. Beacon sinyallerinin gücünün kullanıcıya en optimum şekilde ulaşmasını test ederek uygulamalarını düzenlemişlerdir. Beacon sinyal gücüne etki eden birçok faktörden dolayı Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafenin belirsiz olması nedeniyle yalnızca yaklaşık konum belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Ancak tasarlanan uygulamayı ek konumlandırma algoritmalarıyla birlikte desteklemenin, IoT sisteminde faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Safwat ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini kullanmışlardır. Sınıflandırma algoritması ise KNN ve WKNN kullanmışlardır.

Çalışmalarını eşya, araç-gereçlerin bulunduğu iki farklı kapalı ortamda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda en iyi konum sonuçlarını WKNN algoritmasının verdiğini belirtmişlerdir.

Shu ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Çalışmalarında üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemin mesafe tahmini için IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, Ters Hızlı Fourier Dönüşümü) ile faza dayalı mesafe tahmini yöntemini önermişlerdir. Ayrıca EKK yöntemine de çalışmalarında yer vermişlerdir. Teorik olarak gerçekleştirdikleri testlerde konum tahmini için mutlak hata oranının 1 m 'nin altında olduğunu belirtmişlerdir.

Thi ve Duong (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Çalışmalarında harita verisi olarak Google Haritalar SDK Software Development Kit)'sını, konumlandırma algoritması olarak parmak izi yöntemini, sınıflandırma algoritması olarak ise KNN ve WKNN kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda; en iyi konumlandırma performansı olarak WKNN kullanımını, ham RSSI değerlerinin filtrelenmesini, önerdikleri sistemin WiFi, RFID, UWB veya 5G sistemi içinde uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Wibowo ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, BLE Beacon tabanlı kapalı alanlarda konum belirlemişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak üçgenleme ve EKK yöntemini kullanarak sonuçlarını kıyaslamışlardır. Çalışmalarını birbirinden farklı iki ortama sahip bir müzenin iki odasında alıcıyı üç ayak üzerine sabitleyerek ve el kavraması durumuna göre iki farklı şekilde test etmişlerdir. Çalışma sonucunda üçgenleme ve EKK yöntemleriyle sırasıyla üç ayak üzerinde 8.54 m ve 5.82 m , el kavraması durumuna göre de 12.69 m ve 6.11 m hata oranı ile konum belirlemişlerdir.

Wu ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı mesafe tahminlerini modellemişlerdir. Çalışmalarında SVR (Support Vector Regression, Destek Vektör Regresyonu) ve RSSI sinyallerindeki gürültüleri azaltmak için KF kullanmışlardır. Çalışmalarını iki farklı kapalı ortamda farklı durumları göz önünde bulundurarak test etmişlerdir. Çalışma sonucunda SVR'nin; geleneksel yol kaybı modellerinden daha iyi performans gösterdiğini, çalışma tezgahlarının konum testinde 0.752 m ortalama mutlak hata yakaladıklarını ve iş yeri ortamındaki testlerde konum tanımlama doğruluğunun %99.93'ten yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Bouse ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, akıllı saat donanımıyla kapalı alanlarda BLE tabanlı konum belirlemişlerdir. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak

parmak izi yöntemini kullanarak test etmişlerdir. Kullandıkları parmak izi yöntemi içerisinde hareketli ortalamalar filtresi ve KNN algoritması yer almaktadır. Ayrıca parmak izi yönteminin kullanımında Beacon-bölge eşleştirmesi yapıp ağırlıklandırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda genel olarak %92.1'lik doğruluk oranı yakaladıklarını belirtmişlerdir.

Gülbağ (2024) yaptığı tez çalışmasında, kapalı alanlarda RSSI tabanlı konum belirlemiştir. Çalışmasında donanım tasarımları mevcut olup konumlandırma yöntemi olarak üçgenleme ve parmak izi yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında konumlandırmaya etki eden farklı durumların tespiti için çeşitli uygulama ve testler gerçekleştirmiştir. Elde ettiği verileri filtreleme işlemine tabi tutarak EKK yöntemi ve farklı matematiksel modellerin tahmin algoritmalarıyla değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda uygun bir alanda düşük maliyetli uygulanabilir bir konumlandırma sistemi geliştirdiğini ifade ederek öneriler sunmuştur.

Girolami ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, müzedeki ziyaretçiler için BLE Beacon tabanlı yakınlık algılama CrowdSensing (kalabalık algılama) yöntemini önermişlerdir. Çalışmalarını bir müzede durgun ve kalabalık durumuna göre farklı marka akıllı telefonlarla test edip farklı yöntemlerle kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda önerdikleri yöntemin kalabalık ortamda daha iyi performans verdiğini belirtmişlerdir.

Janczak ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, tahliye denetim sistemi için BLE tabanlı konum belirleme uygulaması yapmışlardır. Uygulamalarında Bluetooth sinyallerini akıllı bileklik yoluyla almalarından dolayı akıllı bileklik ile Bluetooth vericileri arasındaki mesafeyi belirlemek için ortalama filtre kullanmışlardır. Konumlandırma algoritması olarak ise üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda; hata miktarında ortalama RSSI tahmin edicisiyle elde edilen konumlarda, ham RSSI verilerinin kullanıldığı duruma göre yaklaşık iki kat azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Junoh ve Pyun (2024) yaptıkları çalışmada; kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı parmak izi yöntemiyle gerçekleştirilen konumlandırmada, konumlandırma doğruluğunu arttıracak bir yöntem geliştirmişlerdir. Parmak izi yönteminde konum doğruluğunun artmasını sentetik veri üreterek sağlamışlardır. Parmak izi yönteminin veri arttırımı için CGAN (Conditional Generative Adversarial Network, Üretken Çekişmeli Ağ)-LSTM (Long Short-Term Memory, Uzun Kısa Süreli Bellek) modelinden yararlanmışlardır. Parmak izi yönteminin konum tahmininde KNN ile Öklid mesafesini kullanmışlardır. Yöntemlerini bir laboratuvar ve koridordan oluşan kapalı bir alanda test edip farklı

kombinasyonlarda tahmin algoritmalarıyla kıyaslamışlardır. Test sonuçlarına göre veri arttırımı olmaksızın yapılan parmak izi konumlandırmasına göre tasarladıkları yöntemin konumlandırma doğruluğunu %15.74 arttırdığını belirtmişlerdir. Önerdikleri yöntemi Gauss süreci regresyon, ters mesafe ağırlıklandırma ve doğrusal enterpolasyon yöntemleriyle de kıyaslayıp konum doğruluğu açısından daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Madleňák ve Skýpalová (2024) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı mesafe tahminini ön planda tutan konumlandırma çalışması yapmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir alanda hareketli bir Beacon vericisi ve üç alıcıyla altı farklı konuma göre test etmişlerdir. Çalışma sonucunda tek bir alıcı cihazın 76.23 m^2 'lik bir odaya etki ettiğini, kapalı alan konumlandırmada sadece mesafe değil aynı zamanda diğer faktörlerinde dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Shi ve Gong (2024) yaptıkları çalışmada, Bluetooth kapalı alan konumlandırma konusunu ayrıntılı bir şekilde ele almışlardır. Bu alandaki konumlandırma tekniklerini, karşılaşılan zorlukları, diğer sistemlerle olan kıyaslamalarını, gelecekteki yerini ve daha birçok durumu araştırmışlardır. Çalışma sonucunda bu teknolojinin, RSSI sinyallerindeki düzensizlikler ve çoklu yol etkisinin üstesinden gelmesi gereken ana konu olduğunu belirtmişlerdir.

Shin ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, kapalı otoparklarda araçların konumunu takip eden BLE Beacon tabanlı konumlandırma çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak parmak izi temelli yüzey korelasyonunu (surface correlation) yöntemini kullanmışlardır. Yöntemin parmak izi yönteminden farkının; konum tahmini kısmında vektörel dizi kullanarak konum tahmini yapması olduğu belirtmişlerdir. Çalışmalarının testlerini kapalı bir otoparkta farklı telefonlar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda sistemin aktif olarak kullanıldığı belirtmişlerdir.

Singh ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, görme engelliler için BLE Beacon tabanlı “VirtualEYE” adlı mobil uygulama geliştirmişlerdir. Konumlandırma algoritması olarak yakınlık prensibini baz alıp mesafe tahminleri için A ve n değerlerini belirlemişlerdir. Çalışmalarını kapalı bir ortamda farklı durum ve değerlendirme parametrelerine (kullanıcı deneyi, zaman, gezinme kolaylığı...) göre test etmişlerdir. Çalışmada bu uygulamanın engelli bireylerin yaşam kalitesine arttıracağını belirtmişlerdir.

Roy ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, hastane içerisinde hasta ve doktorları izlemek için BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Testlerde izleme algoritması

olarak PLM (Path Loss Model, Yol Kaybı Modeli) ile BLM (Beacon Library Model, Beacon Kütüphane Modelini) kullanarak sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda PLM'nin, BLM'ye göre daha iyi performans verdiğini belirtmişlerdir.

Wu ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, kapalı alanlarda BLE Beacon tabanlı konum belirlemişlerdir. Konumlandırma işleminde parmak izi yönteminde sık kullanılan KNN, WKNN, NB, RSSI tabanlı sinir ağlarının yanı sıra önerdikleri CNN'ni kullanmışlardır. Çalışmalarını kapalı bir ortamda test etmişlerdir. Çalışma sonucunda beş sınıflandırma algoritmasının da 2 m'nin altında ortalama hatayla performans verdiğini ve içlerinden en iyi performansı CNN algoritmasının 1.28 m'lik ortalama hatayla verdiğini belirtmişlerdir.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında kapalı alanlarda kullanılan BLE Beacon tabanlı konumlandırma algoritmalarından yakınlık yöntemi, üçgenleme yöntemi ve parmak izi yöntemi birçok yönüyle incelenmiştir. Çalışmada Bluetooth, BLE ve Beacon kavramları açıklanmış kapalı alanlarda incelenen konumlandırma yöntemleriyle ilgili testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde konumlandırma yöntemlerinin doğruluğunu arttırmak, zayıf ve güçlü yönlerini belirlemek, farklı koşullarda performansını incelemek ve daha birçok durum için farklı matematiksel modeller kullanılmıştır.

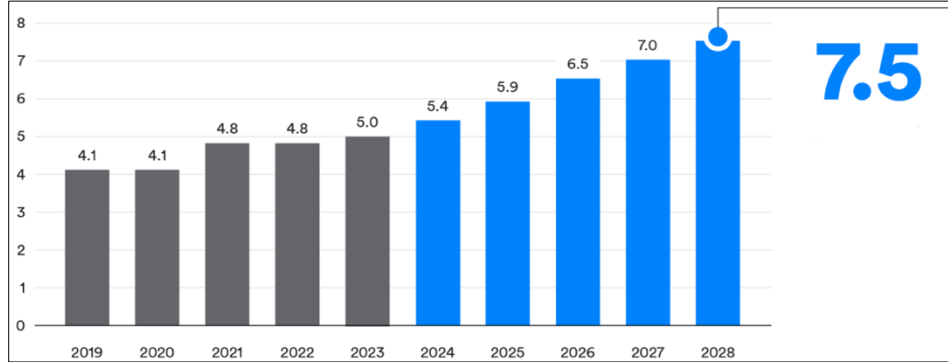
2.1. Bluetooth, BLE ve Beacon Kavramları

Bluetooth, BLE ve Beacon kavramları birçok alanda birbirinin yerine kullanılmaktadır. Bu kavramların aralarında farklılıklar olmakla birlikte temelde bir bütünün birer parçası ve tamamlayıcısıdır.

2.1.1. Bluetooth

Bluetooth kavramı gündelik yaşamda pek çok yerde karşımıza çıkmaktadır. Bluetooth teknolojisi dizüstü bilgisayarlarda, mobil cihazlarda, klavyelerde, kulaklıklarda ve bağlantı kabloları yerine diğer birçok tüketici elektroniğinde kısaca gündelik yaşamda her yerde bulunmaktadır (Paek ve diğ., 2016). Bu teknolojinin insanlarla buluşması doksanlı yılların başlarına dayanmaktadır. Bu teknoloji Ericsson tarafından 1994 yılında icat edilmiştir. İlk olarak teknolojik cihazlar arasında sınırsız iletişim için bir dizi ilkeyi birleştirmek ve elektronik cihazların bazen birlikte çalışmaması gibi rahatsız edici bir sorunu çözmek için tasarlanmıştır (Shi, 2022). Yapılan bu çalışma birçok büyük şirket tarafından ilgi görmüş ve desteklenmiştir. Bu ilgi ve destek büyük cep telefonu üreticileri olan IBM, Nokia, Intel, Ericsson ve Toshiba'yı 1997 yılında SIG (Bluetooth Special Interest Group) çatısı altında bir araya getirmiştir (Lyatuu, 2022). Bu büyük şirketlere ilerleyen sürçlerde 3COM, Microsoft, Lucent ve Motorola'da katılmıştır (Zeadally ve diğ., 2019; Lyatuu, 2022). SIG'nin kuruluş amacı kısa menzilli kablolu teknolojiler için açık bir spesifikasyon oluşturmaktır (Bisdikian, 2001; Zeadally ve diğ., 2019). SIG kurulduğu günden bugüne Dünya'da sürekli artan Bluetooth özellikli cihaz ihtiyacını karşılamıştır (Zeadally ve diğ., 2019). 2028'de 7.5 milyar cihazın piyasaya

sürüleceği öngörülmektedir. Şekil 2.1’de önceki ve öngörülen yıllardaki Bluetooth cihazlarının sevkiyatı yıllık bazda gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Dünya’da Bluetooth özellikli cihazların yıllık bazda sevkiyatı, birim:milyar (URL-2).

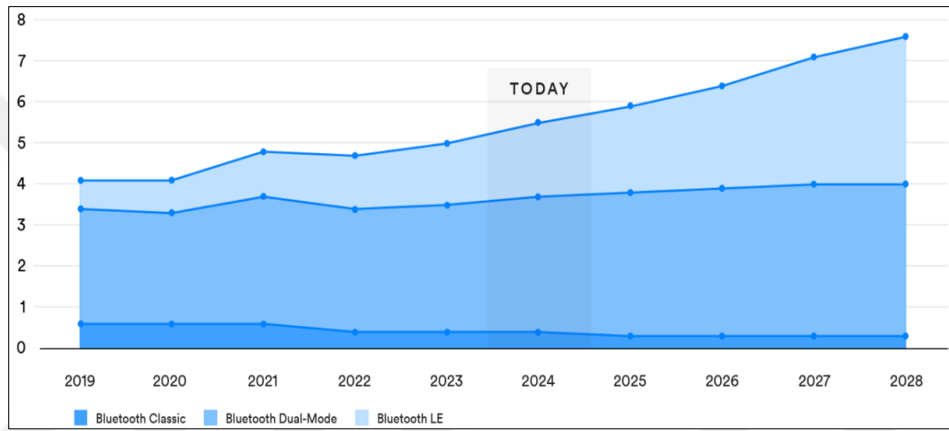
Bluetooth teknolojisi yıllar içerisinde farklı versiyonlarla gelişimini sürdürmüştür. 1999 yılından günümüze Bluetooth teknolojisinin 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 ve 5.0 versiyonları yayınlanmıştır (Liu ve diğ., 2021; Lyatuu, 2022). Bunun yanı sıra bu versiyonların 4.1, 4.2 gibi ara sürümleri de mevcuttur. Bu tez çalışmasının hazırlanışı itibariyle Bluetooth 5.4 sürümünün kullanımı gündemdedir (URL-3). Bluetooth 1.0’dan 3.0’a kadar olan tüm versiyonlar klasik Bluetooth olarak bilinir (Zhuang ve diğ., 2022).

2.1.2. BLE (Bluetooth Low Energy)

Bluetooth teknolojisinin 4.0 versiyonuyla BLE kavramı kullanılmaya başlanmıştır. BLE, klasik Bluetooth teknolojisinin yetersiz kaldığı durumlar için özel olarak tasarlanmıştır (Zeadally ve diğ., 2019). Hem klasik Bluetooth’u tamamlayıcı bir teknoloji hem de tasarlanıp üretilebilecek en düşük güç tüketimine sahip, kablosuz olma özelliğinde yeni bir teknolojidir (Heydon, 2012). BLE; düşük güçte, düşük maliyetli, kısa menzilli kablosuz iletişim sağlayan 4.0 sürümündeki Bluetooth standardının bir uzantısıdır (Paek ve diğ., 2016). BLE, mevcut veri hızlarını artırmak yerine, ultra düşük güç tüketimi için optimize edilmiştir. Bu durum muhtemelen yüksek veri hızları elde edilemeyeceğini hatta bir bağlantının saatlerce veya günlerce sürdürülemeyeceğini gösterir (Heydon, 2012). BLE’nin iletim gücü 0,01 mW (−20 dBm) ile 10 mW (+10 dBm) arasında değişmektedir, bu durum klasik Bluetooth’tan yaklaşık olarak 10–20 kat daha düşüktür. BLE alt yapısına sahip cihazlar enerji tasarrufu için aktif çalışmadıklarında derin uyku moduna geçer (Zhuang ve diğ., 2022). BLE’nin ana amacı ses ve veri akışı

uygulamaları için etkin bir yüksek veri hızı sağlamakla beraber zamanla BLE; enerji açısından verimli, düşük veri hızına sahip bir teknolojiye evrilerek enerjisi kısıtlı IoT uygulamalarına uygun bir seçenek haline gelmiştir (Jeon ve diğ., 2018). Tüm bu özellikler, BLE'yi az miktarda verinin seyrek veya periyodik olarak iletilmesi gerektiren uygulamalar için ideal hale getirmektedir; bu nedenle çok çeşitli tıbbi, endüstriyel ve tüketici uygulamalarında kullanılabilir (Paek ve diğ., 2016).

Hem klasik Bluetooth hem de BLE alt yapısına sahip cihazlar Bluetooth Dual-Mode olarak adlandırılmakta ve kullanılmaktadır. Yapılan araştırmaya göre 2028'e kadar Bluetooth cihazlarının %97'sinin BLE içermesi bekleniyor.



Şekil 2.2. Dünya’da Bluetooth, BLE ve Bluetooth Dual-Mode özellikli cihazların yıllık bazda sevkiyatı, birim:milyar (URL-2).

2.1.3. Beacon Teknolojisi

Beacon'lar, Bluetooth sinyalleri yayan küçük radyo vericileridir. Farklı boyut ve şekillerde tasarımları mevcuttur (Bilbao-Jayo ve diğ., 2021). Beacon’lar bir düğme pil, piller veya harici bir güç kaynağı aracılığıyla çalıştırılabilen BLE altyapısına sahip küçük cihazlardır (Kohne ve Sieck, 2014). Beaconlar, bu özelliklerinden dolayı çeşitli uygulamalar için uygun hale gelir ve herhangi bir ortama göze çarpmadan kolayca entegre edilmelerini sağlar (Kajioka ve diğ., 2014; Bilbao-Jayo ve diğ., 2021).

Beacon teknolojisi düşük enerji tüketimi ve düşük veri hızı gerektiren IoT uygulamaları için temel teknolojilerden biri olarak yaygın olarak benimsenmiştir (Jeon ve diğ., 2018; Liu ve diğ., 2019). Çeşitli Beacon şemaları arasında BLE Beacon, kapalı alan uygulamaları için en umut verici sistemlerden biridir. Başlıca avantajları düşük enerji tüketimi ve kolay uygulanmasıdır (Liu ve diğ., 2019). Düşük enerji tüketimi sayesinde,

bir BLE Beacon cihazı madeni para büyüklüğündeki bir pille ile birkaç yıldan daha uzun süre çalışabilir (Kajioka ve diğ., 2014; Kohne ve Sieck 2014). Özellikle hazır BLE Beacon'lar ve akıllı telefonlar arasındaki entegrasyonun kolaylığı, insan müdahalesinin az olduğu çeşitli IoT kullanım durumlarını teşvik etmiştir. Bu sebeple IoT geliştirmeye odaklanarak BLE Beacon altyapısının güçlendirilmesi hem akademide hem de endüstride çok fazla araştırma ilgisi uyandırmış ve heterojen ekosistemlerin ihtiyaçlarını karşılamak için IoT yenilenmesinde ve geliştirilmesinde sınırsız fırsatlara yol açmıştır.

BLE Beacon'ları alışveriş deneyimini geliştirmek, müze rehberliği, kapalı alan konum belirleme ve izleme, görme engellilere veya engellilere yardım etme, enerji tasarruflu akıllı ofisler, akıllı evler ve depoları yönetme, konumlandırma algoritması kullanarak BLE cihazlarını bulma gibi geniş bir yelpazede IoT yeniliklerinde kullanılmaktadır (Jeon ve diğ., 2018).

Bir Beacon'la iletişim kurmanın tek yolu Beeacon kimlik bilgilerini bilmektir. Bu bilgiler UUID (Universally Unique Identifier, Evrensel Benzersiz Tanımlayıcı), major, minor ve MPower (Measured Power, Ölçülen Güç Değeri) değeridir. Beacon kimlik bilgileri tasarlanacak projeler için yapılandırılabilir (Kohne ve Sieck 2014).

UUID: Beacon'ların bulunduğu tüm ağ benzersiz şekilde tanımlamak için kullanılan 128 bitlik bir tanımlayıcıdır. Ağdaki her bir Beacon, kendine özgü UUID değerine sahiptir.

Major: Ağ içinde belirli bir bölgeyi veya grubu tanımlamak için kullanılan 16 bitlik bir veri parçasıdır.

Minör: Tanımlanan ağ içerisinde bulunan belirli bir bölge veya grup içerisinde daha küçük kısımları tanımlamak için kullanılan 16 bitlik bir veri parçasıdır.

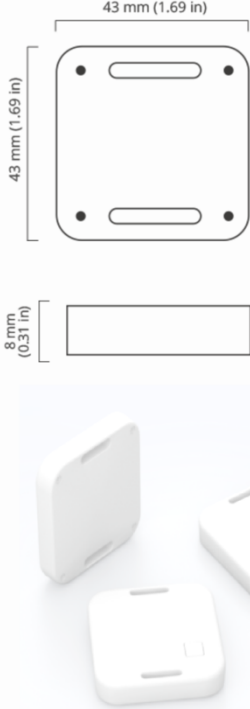
MPower: Kullanıcıların, Beacon cihazlarıyla olan mesafelerini hesaplamak için kullanılır. Beacon üreticisi firma tarafından belirlenen sabit bir değer olup 1 m'lik mesafe için beklenen RSSI değerini tanımlamaktadır (Kohne ve Sieck 2014; Allurwar ve diğ., 2016; Assissi ve diğ., 2016; Lin ve Lin, 2018). Beacon iletişim örneği Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

2,30 m			
UUID 62754563-a0f5-4300-8d7c-a79fd8a3dea1			
Major	Minor	RSSI	TX
60304	6383	-96 dBm	-77 dBm

Şekil 2.3. Beacon iletişim değerleri.

2.1.3.1. Çalışmada kullanılan Beacon

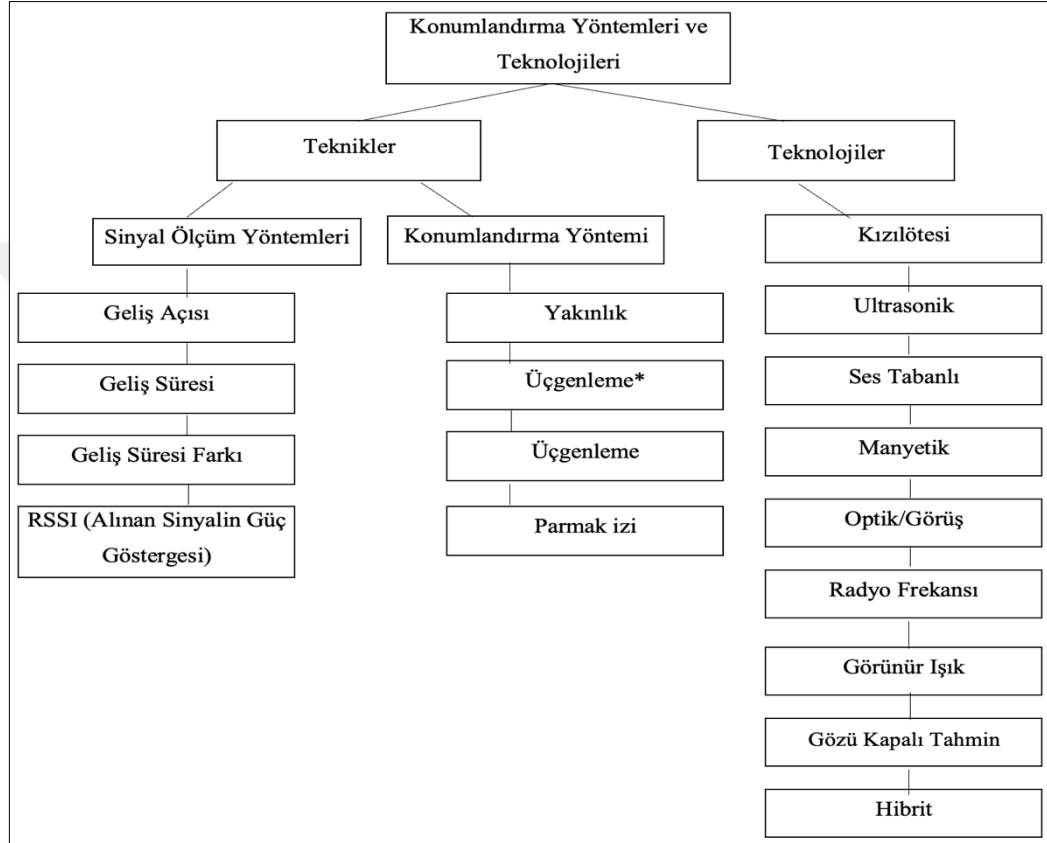
Dünya’da birçok üretici firma tarafından çeşitli özelliklerde Beacon’lar üretilmektedir. Bu çalışmada yapılan tüm testlerde Kontakt.io firmasının üreticisi olduğu Bluetooth 4.2 ve 5 uyumlu Asset Tag Beacon cihazları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Beacon cihazı ve özellikleri Şekil 2.4’te gösterilmiştir.

		Boyutlar ve ağırlık	
		Yükseklik	43 mm (1,69 inç)
		Genişlik	43 mm (1,69 inç)
		Derinlik	8 mm (0,31 inç)
		Ağırlık	19 gr (0,67 oz)
		Elektronik	
		Mikrodenetleyici	İskandinav Yariletken nRF52832
		Bağlantı	
		Bluetooth	Bluetooth 4.2 uyumlu, Bluetooth 5 uyumlu
		Menzil	50 metreye kadar
		Mevcut iletim güç seviyeleri	1 (-20dBm), 2 (-16dBm), 3 (-12dBm), 4 (-8dBm), 5 (-4dBm), 6 (0dBm), 7 (4dBm)
		Hassasiyet	-96dBm
		Pil ve güç	
		Örnek	CR2450
		Tip	Lityum Manganiz Dioksit Düşme Pil
		Toplam Kapasite	620mAh
		Değiştirilebilir	Evet
		Pil ömrü (Tx=-12dBm; aralık: 350ms)	15 aya kadar

Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan Beacon ve özellikleri (URL-4).

2.2. Konumlandırma Yöntemleri

Kapalı alan konumlandırma ile ilgili birçok konumlandırma yöntemi ve teknolojisi vardır. Bu yöntem ve teknolojilerin hangi sinyal ölçüm yöntemleriyle kullanılacağı önemlidir. Şekil 2.5'te kapalı alan konumlandırma yöntemleri, sinyal ölçme yöntemleri ve kapalı alan konumlandırmada kullanılan teknolojiler yer almaktadır.

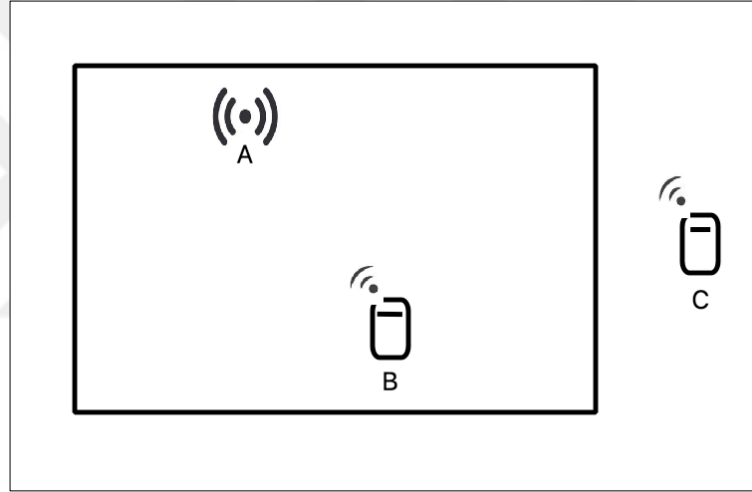


Şekil 2.5. Kapalı alan konumlandırma teknikleri ve teknolojileri (Deng ve diğ., 2022).

Şekil 2.5'e göre bu tez çalışmasında sinyal ölçme yöntemi olarak RSSI, konumlandırma teknolojisi olarak RF kullanılmıştır. Konumlandırma yöntemleri olarak da yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca üçgenleme yönteminin Türkçe çevirisini karşılayan triangulation ve trilateration yöntemi literatürümüzün çoğunda “üçgenleme” şeklinde yer almaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken durum triangulation ile trilateration konumlandırma yöntemlerinin aynı yöntemler olmadığıdır. Triangulation yöntemi açı tabanlı bir yöntem olduğundan bu tez çalışması kapsamında değerlendirilmemiştir.

2.2.1. Yakınlık yöntemi

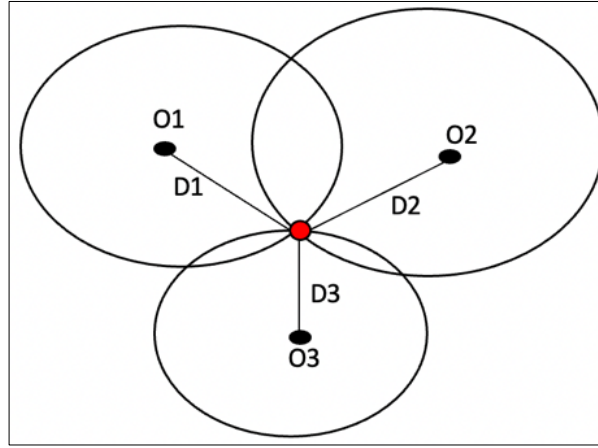
Yakınlık yönteminin konumlandırma mantığı oldukça basittir. Sinyal yayan vericiler konumu bilinen noktalara yerleştirilir. Kullanıcı vericiden gelen sinyali aldığı anda kullanıcının konumu, vericinin bulunduğu konumda veya alanda kabul edilir. Kullanıcı bulunduğu bölgeden birden fazla vericiden sinyal alırsa en güçlü sinyali gönderen vericinin bulunduğu konumda veya alanda kabul edilir (Liu ve diğ., 2007; Al Nuaimi ve Kamel, 2011). Yakınlık yöntemine göre Şekil 2.6’da B kullanıcısı A vericisinden sinyal alması durumunda A vericisinin yakınlık alanında kabul edilir. C kullanıcısı ise A vericisinden sinyal alamadığından A vericisinin yakınlık alanının dışında kabul edilir (Khudhair ve diğ., 2016).



Şekil 2.6. Yakınlık yöntemi.

2.2.2. Üçgenleme yöntemi

Bu yöntem, koordinatları bilinen üç referans noktasındaki vericiyle hedef noktada bulunan kullanıcı arasındaki mesafenin bilinmesi ilkesine dayanır.



Şekil 2.7. Üçgenleme yöntemi (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Şekil 2.7’de O1, O2 ve O3 noktasında bulunan ve konum koordinatları sırasıyla x_1, y_1, x_2, y_2 ve x_3, y_3 olan Beacon’lara; D_1, D_2, D_3 mesafede bulunan ve konum koordinatları x, y olan kullanıcının konumu Denklem (2.1)-(2.3)’teki gibi eşitlikler yardımıyla hesaplanır (Rida ve diğ., 2015 ; Kaczmarek ve diğ., 2016; De Blas ve López-de-Ipiña, 2017; Sophia ve diğ., 2021).

$$D_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (2.1)$$

$$D_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (2.2)$$

$$D_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (2.3)$$

Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3) basitleştirilirse Denklem (2.4)-(2.10) elde edilir. x ve y ’nin koordinatları ise Denklem (10) ve (11) ile bulunur.

$$A = (-2x_1 + 2x_2) \quad (2.4)$$

$$B = (-2y_1 + 2y_2) \quad (2.5)$$

$$C = (D_1^2 - D_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2) \quad (2.6)$$

$$D = (-2x_2 + 2x_3) \quad (2.7)$$

$$E = (-2y_2 + 2y_3) \quad (2.8)$$

$$F = (r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2) \quad (2.9)$$

$$x = \frac{CE - FB}{EA - BD} \quad (2.10)$$

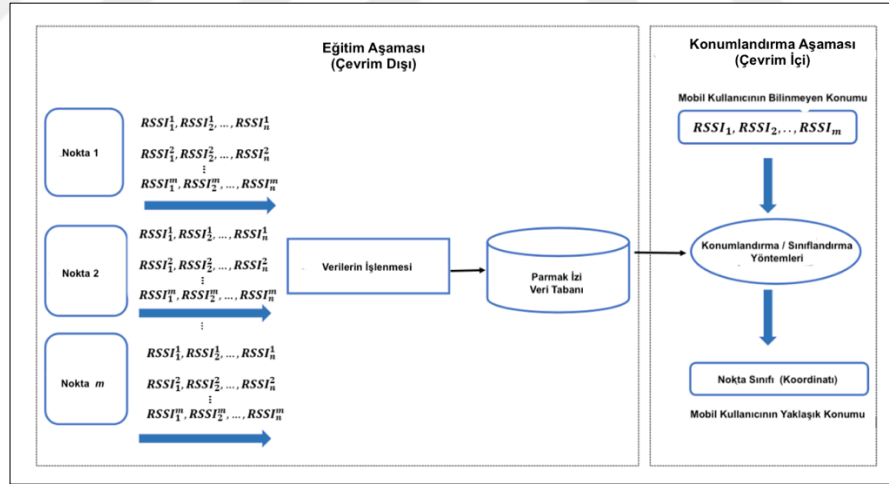
$$y = \frac{CD - AF}{BD - AE} \quad (2.11)$$

Teoride üçgenleme yönteminde konumu bilinen üç Beacon’dan alınan sinyallerin tek bir noktada kesiştiği kabul edilse de Beacon sinyallerindeki düzensizlikler, Beacon sinyallerinin yansıması, ortam şartları gibi nedenler dolayı uygulamada bu durum çok mümkün olmamaktadır (Ruan ve diğ., 2018; Pakanon ve diğ., 2020).

2.2.3. Parmak izi yöntemi

Parmak izi yönteminde, kullanıcı Beacon'larla donatılmış bir alanda bulunurken mevcut sinyal gücü ölçülür ve kullanıcının konumunu belirlemek için daha önce veri tabanına kaydedilen Beacon'ların konum bazlı sinyalleriyle karşılaştırılır (Uttraphan ve diğ., 2020).

Bu yöntem, kapalı alan konumlandırmada yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve iki adımdan oluşur. İlk adım, tüm alanı kapsayan her konumun parmak izlerini toplamak için konum bazlı sinyal toplayıp bunu bir veri tabanına kaydetmektir. Bu adıma çevrim dışı veya eğitim aşaması da denir. İkinci adımsa kullanıcının konumunu tahmin etmektir. Bu adıma da çevrim içi veya konumlandırma aşaması denir. Bu aşamada kullanıcının aldığı sinyal kaydedilir ve ölçülen sinyal veri tabanındaki çevrim dışı aşamada kayıt altına alınan konum bazlı sinyallerle eşleştirilir. Veri tabanındaki sinyallere (parmak izlerine) en yakın ölçülen sinyalin sahip olduğu konum, kullanıcının konumu olarak tahmin edilir (Kluge ve diğ., 2020; Phutcharoen ve diğ., 2020; Junoh ve Pyun, 2024). Şekil 2.8'de parmak izi yönteminin genel akışı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Parmak izi yönteminin genel taslağı (Safwat ve diğ., 2023).

2.3. RSSI Mesafe İlişkisi

RSSI değeri, Beacon'lardan yayılan sinyalin güç seviyesinin bir göstergesidir. RSSI değeri, dBm (decibel-mill watt) birimi ile ifade edilir. Radyo dalgaları ters kare yasasına göre yayıldığından verici ile alıcı arasındaki mesafe, yaklaşık olarak iletilen ve alınan sinyal gücü arasındaki ilişkiye göre hesaplanabilir. Ancak başka hata kaynakları,

yaklaşık olarak belirlenen bu mesafe değerine etki etmediği sürece bu mesafe belirlenebilir (Kaczmarek ve diğ., 2016).

Beacon'lardan yayılan sinyaller kullanıcıya ulaşınca kadar güç kaybeder. Bu güç kaybından yola çıkılarak logaritmik yol kaybı modeline göre Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafe Denklem (2.12)'ye göre belirlenebilir.

$$RSSI = -10n \cdot \log(d) + A \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) düzenlenirse:

$$d = \frac{A - RSSI}{10n} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) elde edilir. Denklem (2.13)'te d alıcı ile verici arasındaki mesafeyi, RSSI anlık algılanan Beacon sinyalinin güç göstergesi değerini, A (MPower) 1 m mesafe için hesaplanan RSSI değerini, n ise ortam koşullarına bağlı yol kaybı katsayısını temsil eder (Anagnostopoulos ve Deriaz, 2014; Rida ve diğ., 2015; Casareo ve diğ., 2018). Kullanıcılara; Beacon üreticisi firmalar tarafından belirlenen standartlarda, Beacon'la kullanıcı arasında mesafe değeri Beacon yazılım kütüphaneleri sayesinde direkt olarak sunulmaktadır. Ancak kullanıcılar, A ve n değerlerini ortam koşullarına göre belirleyip bu mesafe değerini kendileri de hesaplayabilmektedirler. Bu çalışmada farklı matematiksel modeller kullanılarak ortam koşullarına göre Beacon tabanlı mesafe belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

2.4. Çalışmadaki Kısıtlamalar ve Matematiksel Modeller

Kapalı alanlarda Beacon tabanlı konum belirlemede karşılaşılan çok fazla zorluk vardır. RSSI tabanlı mesafe belirlemede alınan sinyal gücü önemli bir rol oynar. Bunun dışında belirli bir zaman ve mekânda alınan RSSI değeri, alıcı ve vericinin göreceli mesafesinden başka birçok unsura bağlıdır. Alıcı ve vericinin konum ve yönelimindeki en küçük değişiklikler bile RSSI değerinde önemli değişikliklere dolayısıyla alıcı ile verici arasındaki mesafenin belirlenmesinde önemli değişikliklere neden olabilir (Anagnostopoulos ve Deriaz, 2014; De Blas ve López-de-Ipiña, 2017). Kapalı alanlardaki insanların ve nesnelerin hareketi genellikle RSSI sinyalleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ayrıca RSSI sinyalleri özellikle kapalı alanlarda çoklu yol (sinyal yansıması) etkilerine karşı açıktır (Ruan ve diğ., 2018; Karabtcev ve diğ., 2019). Sıcaklık ve nem koşulları gibi faktörler RSSI sinyallerinin yayılmasını etkileyebilir (Anagnostopoulos ve Deriaz, 2014). Beacon sinyallerini aynı noktada alan farklı cihazlarda farklı RSSI

değerleri elde edilebilir. Bu durum da aynı noktada farkı konum değerleri elde edilmesine sebep olabilir (Zhuang ve diğ., 2022). Seçilecek konumlandırma algoritmasıyla birlikte kapalı alana yerleştirilecek Beacon yükseklikleri, farklı firmalar tarafından üretilen Beacon'ların performansları, Mpower/TX Power değerinin belirlenmesi (enerji verimliliği) gibi durumlarda kapalı alan konumlandırmada çözülmesi gereken sorunlardandır (Paek ve diğ., 2016).

Beacon tabanlı kapalı alan konumlandırmada, konumlandırma yöntemleriyle ilgili çözülmesi gereken birçok sorun vardır. Kapalı alanlarda konum belirlemede konumlandırma yönteminin seçimi, Beacon'ların yerleşimi, konum doğruluğunun iyileştirilmesi başta olmak üzere kullanılacak matematiksel modellerin belirlenmesi bu sorunlardan birkaçıdır. Bu tez çalışması kapsamında da Beacon tabanlı kapalı alan konumlandırmada kısıtlamalara neden olan durumlar için deneyler yapılmış, matematiksel modeller kullanılarak çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan matematiksel modellerin hangi durumlar için kullanıldığı aşağıda belirtilmiştir.

NN, KNN ve WKNN: Parmak izi yönteminde sınıflandırma algoritması olarak kullanılmıştır.

Dijkstra algoritması: Yakınlık yöntemi kullanarak yapılan navigasyon uygulamasında konumlar arası gidilecek en kısa yolu belirlemek için kullanılmıştır.

KF: Beacon sinyallerindeki gürültüyü elemine etmek için kullanılmıştır.

Polinomlarla enterpolasyon: Kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafeyi belirlemek için kullanılan logaritmik yol kaybı modelinin matematiksel ifadesindeki A ve n değerlerinin, ortam koşullarına göre hesaplanmasında kullanılmıştır.

EKK: Üçgenleme yönteminde kullanılan Beacon sayısı üçten fazla olduğu durumlarda konum hesaplamak için kullanılmıştır.

YSA: Kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafeyi belirlemek için kullanılan logaritmik yol kaybı modelinin matematiksel ifadesindeki A ve n değerlerinin, ortam koşullarına göre hesaplanmasında ve parmak izi yönteminde sınıflandırma algoritması olarak kullanılmıştır.

İki boyutlu benzerlik dönüşümü: Yakınlık yöntemi kullanarak yapılan navigasyon uygulamasında kapalı alanın projesini belirli bir datum ve projeksiyonda koordinatlandırmak için kullanılmıştır.

2.4.1. K-en yakın komşu (KNN) ve ağırlıklandırılmış en yakın komşu (WKNN)

KNN algoritması sınıflandırma işlevinde iyi bilinen basit bir yöntemdir ve literatürdeki önemi bu durumu desteklemektedir (Wu ve diğ., 2024). KNN algoritmasında temel amaç ilgi nesnesinin alınan verilerini kullanarak tüm eğitim veri kümesindeki en yakın komşuları belirlemek ve daha sonra Beacon sinyali en yakın komşular arasında en sık temsil edilen sınıfa (konuma) atamaktır (Pawlovsky, 2018; Dewi ve Arbawa, 2019; Wu ve diğ., 2024). KNN algoritması, Beacon sinyal verilerinin konumunu belirlemek için bir oylama aşaması kullanır. Bu belirli bir K için en çok oyu alan konumun, bir giriş veri noktası için konumlandırma tahminini belirlediği anlamı taşır. K değeri oylama sürecinde eşitliği kırmak adına genelde tek sayı alınır. K=1 ise Beacon sinyallerinin konumu yalnızca en yakın komşusu tarafından belirleneceği anlamına gelir (Saini, 2022). K en yakın komşunun belirlenmesi yeni gözlem ile tüm öğrenme verileri arasındaki benzerliğin (veya farklılığın) hesaplanmasına dayanır. Benzerliğin hesaplanması ise bir mesafe fonksiyonuna dayanır (El Haji ve diğ., 2014). KNN algoritması için kullanılan birçok mesafe belirleme formülü vardır. Bu çalışmada Öklid mesafe formülü kullanılmış ve Denklem (2.14)'te gösterilmiştir.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2.14)$$

Denklemlerde x ve y özellik vektörleri, x_i ve y_i veri noktalarını, n ise boyutu temsil etmektedir.

KNN algoritmasının doğruluğunu artırmak için en yakın komşuların gerçek konumdan, uzaklıklarının değişkenliğinden etkilenebileceği düşüncesiyle WKNN yöntemi geliştirilmiştir. WKNN'de, en yakın komşulara uzaklıklarıyla orantılı ağırlıklar atanır; daha yakın komşular uzak komşulara nazaran daha fazla ağırlık alır. Bu yaklaşım, daha uzak komşuların nihai tahmin üzerindeki etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Uzaklık listesi sıralandıktan sonra, WKNN'de mevcut konumun koordinatları, K en yakın komşunun koordinatlarının ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanır (Dewi ve Arbawa, 2019; Wu ve diğ., 2024). Öklid mesafesini baz alan KNN yöntemi Denklem (2.15)'te gösterilmiştir.

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^R (s_i - r_j^i)^2} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15)'de s_i konumu bulunmak istenen RSSI gücünü, r_j^i veri tabanındaki RSSI sinyal gücünü temsil etmektedir. WKNN ağırlık hesaplama formülü Denklem (2.16)'da gösterilmiştir.

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i + \varepsilon}}{\sum_{j=1}^k \frac{1}{d_j + \varepsilon}} \quad (2.16)$$

Ağırlık hesaplama formülünde d_i , Öklid mesafesini temsil eder. ε ise 0'a yakın küçük pozitif bir sayıdır ve görevi Öklid mesafesi sıfır olduğunda bile ağırlık formülünün çalışmasını sağlamaktır. Konumu bulunmak istenen noktanın formülü ise Denklem (2.17)'de gösterilmiştir (Hu ve diğ., 2019).

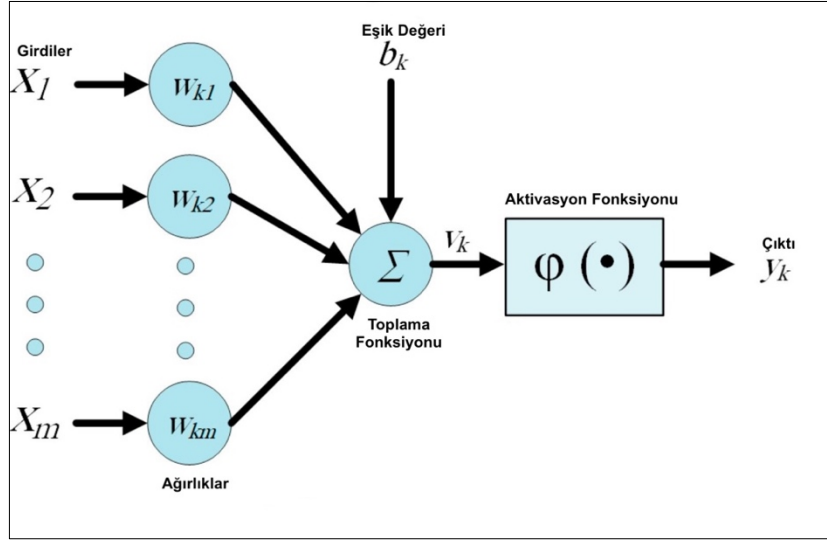
$$(\bar{x}, \bar{y}) = \sum_{i=1}^k w_i (x_i, y_i) \quad (2.17)$$

2.4.2. Yapay sinir ağları (YSA)

YSA, kendi kendine öğrenme yetenekleri ve yüksek tahmin doğruluğu nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Tarmanini ve diğ., 2023). İlk defa McCulloch ve Pitts (1943) tarafından önerilmiştir. YSA, insan beyninin işleyiş konseptine dayalı olarak çeşitli sosyal hedefler için ikame bir yöntem olarak araştırılmış ve oluşturulmuştur (Kumar ve diğ., 2022). Bir sinir ağı, nöron adı verilen birkaç tekil işlem elemanına sahip biyolojik olarak esinlenilmiş bir sistemdir (Kurani ve diğ., 2023).

YSA; yüksek hızlı bilgi işleme, haritalama yetenekleri, hata toleransı, uyarlanabilirlik, genelleştirme ve dayanıklılık gibi mükemmel özellikler sergiler. Bu özellikler; YSA'yı farklı mühendislik sistemlerinin performansının modellenmesi, tahmin edilmesi ve optimize edilmesi konusunda güçlü ve akıllı bir araç haline getirmiştir. Bu nedenle Dünya'da karmaşık, doğrusal olmayan farklı mühendislik problemlerine uygulanarak önemli ölçüde maliyet ve zaman tasarrufu sağlamıştır (Elsheikh ve diğ., 2019).

Genel olarak birçok YSA modelinin tasarımında kullanılan nöron modeli, sinaps adı verilen bir grup bağlantıdan oluşur ve her birinin kendi ağırlığı vardır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. YSA modeli (Elsheikh ve diğ., 2019).

Şekil 2.9’da tek bir yapay nöronun nasıl çalıştığını gösterilmektedir. İlk olarak farklı giriş değerleri ağırlıklarla (w_i) ölçeklendirilir ve transfer fonksiyonu girişleri bir eşik değeriyle (b) toplanır. Elde edilen değer, aktivasyon fonksiyonu tarafından işlenir ve sonuç bağlı nöronlara yayılır. w_i ve b eğitim süreci tarafından belirlenen YSA parametrelerini temsil eder (Haykin 2009; Elsheikh ve diğ., 2019; Guilloid ve diğ., 2020). YSA modelinin matematiksel alt yapısı Denklem (2.18)’de gösterilmiştir.

$$y_i = \varphi(\sum_{j=1}^m (w_{kj} + b_k)) \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)’de k ve j sırasıyla nöron ve sinaps sayısını ifade etmektedir (Haykin 2009; Elsheikh ve diğ., 2019). Açıklanan YSA modelinde kullanılan birçok aktivasyon fonksiyonu vardır. Farklı aktivasyon modelleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

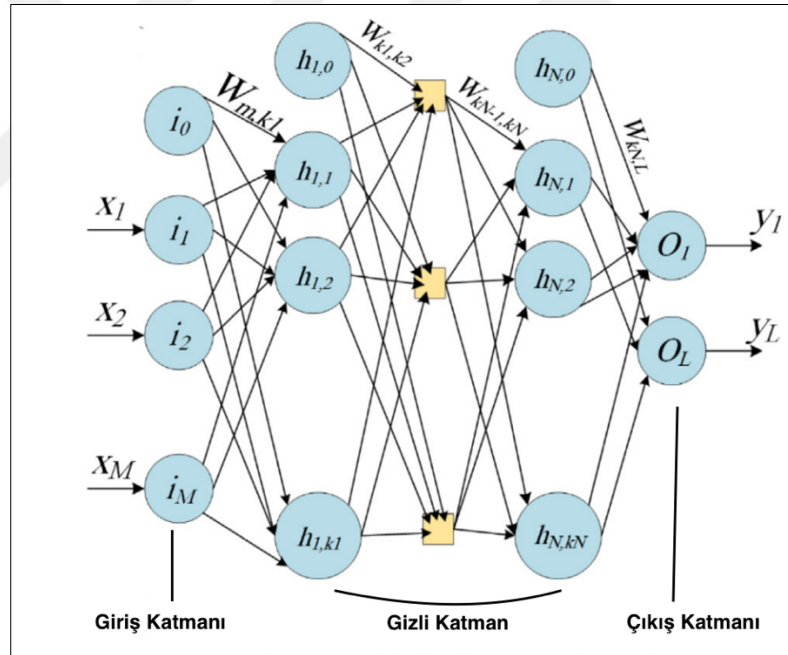
Çizelge 2.1. Aktivasyon fonksiyonları ve formülleri (Haykin, 2009)

Aktivasyon Fonksiyonu	Formülü
Sigmoid	$\varphi(w_k) = \frac{1}{1+e^{-v_k}}$
Hiperbolik Tanjant	$\varphi(w_k) = \frac{e^{w_k} + e^{-w_k}}{e^{w_k} - e^{-w_k}}$
Gauss	$\varphi(w_k) = e^{-v_k^2}$

Bu tez çalışmasında hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu, YSA yapısı içerisinde kullanılmıştır. YSA için birçok özellik baz alındığında farklı şekillerde

sınıflandırılabilir. Yapılarına göre sınıflandırma baz alındığında İBSA (İleri Beslemeli Sinir Ağları, Feed Forward Neural Networks), RNN (Recurrent Neural Networks), SNN (Spiking Neural Networks) olarak sınıflandırılabilir (Silvestrini ve Lavagna, 2022). Bu tez çalışmasında İBSA'dan, ÇKA (Çok Katmanlı Algılayıcılar, Multilayer Perceptron) kullanılmıştır.

ÇKA, YSA'da kullanılan en yaygın ve pratik yapılardan biridir (Heidari ve diğ., 2016). ÇKA yapısı, YSA'nın genel sınıfına ait olan İBSA olarak bilinir. İBSA hem sürekli hem de integrallenebilir fonksiyonları yaklaşık olarak modelleyebilen temel bir sinir ağı türüdür (Ali ve diğ., 2017). Doğrusal fonksiyonları tahmin etmede tek bir katmandan oluşan bir algılayıcı yeterli olabilirken doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde, giriş ve çıkış katmanı arasında gizli katmanlara sahip olan ileri beslemeli çok katmanlı algılayıcılar kullanılmaktadır (Öztemel, 2012; Ataseven, 2013). ÇKA yapısı Şekil 2.10'da gösterilmiştir



Şekil 2.10. ÇKA yapısı (Elsheikh ve diğ., 2019).

ÇKA yapısında her katmanın nöronları, takip eden katmanın nöronlarıyla bağlantılıdır ancak aynı katmandaki nöronlar birbirleriyle bağlantılı değildir. Giriş katmanının nöronları verileri alır ve çıktı katmanına ulaşana kadar, takip eden katmana iletir. M giriş katmanındaki bir dizi nöron olmak üzere k_1 . nöron, x_i girişini alır ve bu

nöronun çıkışı O_{1,k_1} tarafından verilir. Bu durumun matematiksel ifadesi Denklem (2.19)'da gösterilmiştir.

$$O_{1,k_1} = f\left(\sum_{m=0}^M w_{mk_1} x_m\right), \quad k_1 = 1, \dots, K_1 \quad (2.19)$$

Sonrasında bu çıktı, gizli katmana girdi olarak kullanılabilir ve gizli katmandaki herhangi bir nöronun çıkışı Denklem (2.20) ile gösterilir.

$$O_{h,k_h} = \varphi\left(\sum_{k_{h-1}=0}^{K_{h-1}} w_{k_{h-1},k_h} O_{h-1,k_{h-1}}\right), \quad k_h = 2, \dots, K_h, \quad h = 1, \dots, N_h \quad (2.20)$$

Denklem (2.20)'de $\varphi(\cdot)$, aktivasyon fonksiyonunu ifade eder. w_{0,k_h} , $k_h = 1, \dots, K_h$ sırasıyla giriş ve gizli katmanın eşik değerlerini temsil eder. w_{k_m, k_h} ise giriş ve gizli katmandaki nöronlar arasındaki ağırlıkları temsil eder. M giriş katmanındaki nöron sayısını, K_h ; h . gizli katmandaki nöronların sayısını ifade eder. N_h ise gizli katmanlarda bulunan nöron sayısını temsil eder. Çıkış nöronu, son gizli katmandaki nöronların tüm ağırlıklı çıkışlarının toplanmasıyla hesaplanır. Denklem (2.21)'de matematiksel olarak bu durum ifade edilmiştir.

$$y_l = \sum_{k_N=0}^{K_N} w_{k_N,l} O_{N,k_N} \quad l = 1, \dots, L \quad (2.21)$$

Denklem (2.21)'de L çıkış katmanında kullanılan nöronların sayısını, $w_{k_h,l}$ ile $k_1 = 1, \dots, K_h$ ise gizli ve çıkış katmanlarındaki nöronları birbirine bağlayan bağlantıların ağırlıklarını temsil eder (Haykin 2009; Elsheikh ve diğ., 2019).

YSA'da önemli aşamalardan biri de ağı eğitilmesidir. ÇKA yapısında birçok öğrenme algoritmasının bu ağı eğitmede kullanılabilir olması ÇKA yapısının tercih edilme sebeplerinden biridir (Ataseven, 2013). Bu çalışmada eğitim algoritması olarak LM (Levenberg-Marquardt) algoritması kullanılmıştır. LM, bir hata geri yayılım algoritması olarak YSA'da yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Huzir ve diğ., 2024). Doğrusal olmayan fonksiyonların hata kareleri toplamını en aza indirmek için tasarlanmış olup Newton yönteminden türetilmiştir (Lv ve diğ., 2017). LM, en dik iniş ve Gauss-Newton yöntemlerinin avantajlarının kombinasyonu olan bir yöntemdir (Nguyen ve diğ., 2021; Huzir ve diğ., 2024). Bu algoritma, her yön için uygun adım ve boyutların belirlenmesinde son derece önemlidir ve nispeten düzgün bir yakınsama sağlar. Bununla birlikte etkinliği, hata fonksiyonunun ikinci dereceden yaklaşımının optimizasyon süreci boyunca makul kaldığı varsayımına dayanmaktadır (Huzir ve diğ., 2024).

YSA'da tasarlanan yapının performansını ölçmek için *MSE* (Mean Squared Error, Ortalama Kare Hatası) kullanılmıştır.

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i^n (e_i^2) \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'de e_i , hedef değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farkı temsil etmektedir.

2.4.3. Kalman filtreleme (KF)

1960'ların başında Wiener (1949)'daki çalışmasına dayanan öncü bir çalışmada Rudolf Kalman; ayrık zamanda, zamanla değişen sistemlere uygulanabilen *MMSE* (Minimum Mean Square Error, Minimum Ortalama Kareysel Hata) tahmin edicisi olarak tanıtmıştır (Revach ve diğ., 2022). KF, *MMSE* ölçütü baz alınarak türetilen, doğrusal Gauss sistemleri için iyi bilinen bir durum tahmincisidir. Gauss gürültüleri içeren doğrusal olmayan sistemler için, EKF (Extended KF, Genişletilmiş KF), IEKF (Iterated Extended KF, Yinelemeli Genişletilmiş KF), UKF (Unscented KF, Kokusuz KF) gibi farklı Kalman tipi filtreleme algoritmaları geliştirilmiştir (Tao ve Yau, 2023).

KF, sensör verilerini birleştirme ve konum tahmini için en yaygın kullanılan filtredir. Sistemin tahmini durumunu ve varyansını takip eder. Ayrıca, makul bir hesaplama gücü ile son zamanlarda kullanılan diğer filtrelerle kıyaslandığında titiz sonuçlar sağlar (Yadav ve diğ., 2019). Kapalı alanlarda hesaplanan mesafeler gürültüden etkilenir. Bir KF, sinyal tahmini esnasında önceki sinyallere dayanarak bir sinyaldeki ani değişiklikleri filtreleme yeteneğine sahiptir (Sung, 2016). Basitleştirilmiş bir KF yapısı, zaman güncelleme Denklem (2.23)-(2.24)'leri ve ölçüm güncelleme Denklem (2.25)-(2.27)'leri olarak gösterilmiştir.

$$\hat{x}_{\bar{k}} = \hat{x}_{k-1} \quad (2.23)$$

$$P_{\bar{k}} = P_{k-1} + Q \quad (2.24)$$

$$K_k = \frac{P_{\bar{k}}}{P_{\bar{k}} + 1} \quad (2.25)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{\bar{k}} + K_k (z_k - \hat{x}_{\bar{k}}) \quad (2.26)$$

$$P_k = (1 - K_k)P_{\bar{k}} \quad (2.27)$$

Denklemlerde $\hat{x}_{\bar{k}}$ ve $\hat{x}_{k-1}$ sırasıyla öncelikli ve sonradan gelen durum tahminidir. Benzer şekilde R ölçüm varyansı, Q işlem varyansı, P_k ve $P_{\bar{k}}$ öncelikli ve sonradan gelen hata varyansı, z_k ölçüm çıktısıdır. K_k ise k anındaki Kalman kazancıdır (Subedi ve diğ., 2016; Bai ve diğ., 2020).

Daha önce literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve tez kapsamında yapılan saha çalışmalarıyla birlikte denemeler yapılarak R değeri 0.02 ve Q değeri 0.04 olarak belirlenmiş ve bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

2.4.4. Polinomlarla enterpolasyon

Polinom enterpolasyonu yüzey modellemede oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde çalışılan yüzey, tek bir fonksiyonla ifade edilir (İnal ve Yiğit, 2004; Arıkan ve diğ., 2021). Polinom enterpolasyonunda, yüzeyi en iyi tanımlayan temel verilerden yararlanılarak kullanılan dayanak verileriyle bölge içinde istenilen veriyi (RSSI değeri) tahmin etmek için fonksiyonun bilinmeyen sabitlerini belirlenmektedir (Özer, 2003). Genellikle yüzey, n . dereceden ortogonal veya ortogonal olmayan iki değişkenli polinomlar kullanılarak ifade edilebilir.

Denklem (2.28)'de ortogonal yüzeylerde kullanılan matematiksel model gösterilmiştir.

$$RSSI = (x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{j=k-i}^n a_{ij} x^i y^j \quad (2.28)$$

Denklem (2.29)'da ortogonal olmayan yüzeylerde kullanılan matematiksel model gösterilmiştir.

$$RSSI = (x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (2.29)$$

Burada,

a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayılarını

n : Yüzeyin derecesi

i, j : (x, y) değerlerinin üssü olan pozitif tamsayıları göstermektedir. 1. derece ortogonal bir polinomun matematiksel ifadesi Denklem (2.30)'da gösterilmiştir.

$$RSSI(x, y) = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x \quad (2.30)$$

1. derece ortogonal olmayan bir polinomun matematiksel ifadesi Denklem (2.31)'de gösterilmiştir (Yılmaz, 2019).

$$RSSI(x, y) = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{11}xy \quad (2.31)$$

Ortogonal polinomlarda n değeri 1, 2, 3 için sırasıyla yüzey; lineer, quadratik, kübik ortogonal olmayan polinomlarda n değeri 1, 2, 3 için sırasıyla; bi-lineer, biquadratik, bi-kübik olarak adlandırılır. Polinomlarla enterpolasyon yönteminde yüzeyin derecesinin artması elde edilecek doğruluğun artması anlamı taşımaz (İnal ve Yiğit, 2004).

2.4.5. Dijkstra algoritması

Dijkstra'nın algoritması, bilgisayar bilimci Edsger W. Dijkstra tarafından 1956'da formüle edilen ve 1959'da yayınlanan oldukça bilinen en kısa yol algoritmalarından biridir (Candra ve diğ., 2020). Dijkstra algoritmasıyla ilgili çok noktalı yönlendirme,

ölçme ve haritalama bilimi, lojistik ve taşımacılığın en kısa yolu, akıllı ulaşım sistemi, otoyol ağı ücret toplama gibi daha birçok alanda araştırma yapılmıştır (Shu-Xi, 2012).

Bu algoritmanın çalışma altyapısı, ilk olarak başlangıç noktasından gidilebilecek tüm noktalar için maliyetler (mesafeler) hesaplanır ve başlanılan noktayla bağlantısı olmayan noktalara sonsuz değeri atanır. Bir sonraki aşama ise başlangıç noktasından gidilebilen ve maliyeti en az olan noktaya giden yol tercih edilir. İlk aşamada maliyeti en az olan ve tercih edilen noktaya gelindiğinde yine bu noktaya komşu olan noktalar arasındaki maliyetler güncellenerek hesaplanır ve aralarından en düşük maliyetli olan yol tercih edilir. Bu aşamalar hedef noktaya varıncaya kadar devam etmektedir (Makariye, 2017; Gunawan ve diğ., 2019). Dijkstra algoritmasına ait pseudocode Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

```

1 function Dijkstra(Graph, source):
2
3   for each vertex v in Graph.Vertices:
4     dist[v] ← INFINITY
5     prev[v] ← UNDEFINED
6     add v to Q
7   dist[source] ← 0
8
9   while Q is not empty:
10    u ← vertex in Q with min dist[u]
11    remove u from Q
12
13    for each neighbor v of u still in Q:
14      alt ← dist[u] + Graph.Edges(u, v)
15      if alt < dist[v]:
16        dist[v] ← alt
17        prev[v] ← u
18
19  return dist[], prev[]

```

Şekil 2.11. Dijkstra algoritmasına ait pseudocode (Dijkstra, 1959).

2.4.6. İki boyutlu benzerlik dönüşümü

İki boyutlu dönüşümler, yatay koordinatların iki farklı datum arasındaki dönüşümünü tanımlar ve bu dönüşüm işlemi yatay datum olarak da isimlendirilir. Özetle bir noktanın birinci sistemdeki koordinatlarının (x_1, y_1) , ikinci sistemdeki koordinatlarına (X_1, Y_1) dönüşümü iki boyutlu dönüşüm olarak adlandırılmaktadır. İki boyutlu

dönüşümde kullanılan başlıca yöntemler olarak benzerlik dönüşümü, afin dönüşümü ve projektif dönüşüm sayılabilir (Kahveci ve diğ., 2022).

Helmert dönüşümü olarak da bilinen iki boyutlu benzerlik dönüşümünden sonra gerçek şekil korunur ve genellikle ayrı referans sistemlerinde gerçekleştirilen ölçümlerin ortak bir referans sistemine dönüştürülmesinde tercih edilir (Hüsrevoğlu ve Tuşat, 2018). Benzerlik dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi için dört parametreye ihtiyaç vardır. Bunlar iki referans sisteminin başlangıç noktalarının farklılığı nedeniyle 2 öteleme (c, d), iki sistem arasındaki 1 dönüklük (ε) ve 1 ölçek (m) faktörüdür. Noktanın birinci sistemdeki koordinatları x_1, y_1 ikinci sistemdeki koordinatları X_1, Y_1 olmak üzere bu noktanın her iki sistemdeki koordinatları arasında Denklem (2.32)-(2.33) bağıntısı vardır.

$$X = x \cos(\varepsilon) - y \sin(\varepsilon) + c \quad (2.32)$$

$$Y = x \sin(\varepsilon) + y \cos(\varepsilon) + d \quad (2.33)$$

$a = m \cos(\varepsilon)$ ve $b = m \sin(\varepsilon)$ eşitlenirse Denklem (2.34)-(2.37) elde edilir.

$$X = ax - by + c \quad (2.34)$$

$$Y = ay + bx + d \quad (2.35)$$

$$m = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.36)$$

$$\tan(\varepsilon) = \frac{a}{b} \quad (2.37)$$

Koordinatların düzeltme eşitlikleri Denklem (2.38)-(43)'te gösterilmiştir.

$$ax_1 - by_1 + c = X_1 + V_{X_1} \quad (2.38)$$

$$ay_1 + bx_1 + d = Y_1 + V_{Y_1} \quad (2.39)$$

$$ax_2 - by_2 + c = X_2 + V_{X_2} \quad (2.40)$$

$$ay_2 + bx_2 + d = Y_2 + V_{Y_2} \quad (2.41)$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$ax_n - by_n + c = X_n + V_{X_n} \quad (2.42)$$

$$ay_n + bx_n + d = Y_n + V_{Y_n} \quad (2.43)$$

Dönüşüm için gerekli olan parametrelerin hesabı için kullanılacak dönüşüm matrisleri Denklem (2.44)'te gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & -y_1 & 1 & 0 \\ y_1 & x_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & -y_n & 1 & 0 \\ y_n & x_n & 0 & 1 \end{bmatrix}_{2n \times 4} \quad X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad l = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad V = \begin{bmatrix} V_{x_1} \\ V_{y_1} \\ \vdots \\ V_{x_n} \\ V_{y_n} \end{bmatrix}_{2n \times 1} \quad (2.44)$$

Bilinmeyenler matrisi için X , Denklem (2.45)'deki eşitliklerden yola çıkılarak hesaplanır.

$$N = A^T P A \text{ ve } n = A^T P l \text{ olmak üzere } X = N^{-1} n \quad (2.45)$$

Koordinatların ortalama hatası Denklem (2.46)'daki eşitliklerden hesaplanır.

$$m_0 = m_x = m_y = \pm \sqrt{\frac{V_X^2 + V_Y^2}{2n-4}} \quad (2.46)$$

Bir p noktasının konum hatası, Denklem (2.47)'deki eşitliklerden hesaplanır (Başçıftçi ve İnal, 2008; Hüsrevoğlu ve Tuşat, 2018).

$$m_p = \pm m_0 \sqrt{2} = \pm \sqrt{\frac{V_X^2 + V_Y^2}{n-2}} \quad (2.47)$$

2.4.7. En Küçük Kareler yöntemi (EKK)

EKK yöntemi hedefin konumunu, tahmini mesafeler ve erişim noktalarının koordinatları kullanılarak bir kısıtlamayla problemi doğrusallaştırarak tahmin edebileceğimiz; üçten fazla erişim noktasının kullanıldığı bir üçgenleme yöntemidir (Ture ve Hatipoglu, 2019). EKK algoritmasında hesaplama süreci, her bir koordinatın karekökünü alarak mesafeyi hesaplamayı içerir (Wibowo ve diğ., 2023). Beacon noktalarının koordinatları ile seçilen Beacon noktası koordinatlarının arasındaki farkın doğrusallaştırılması için A matrisi oluşturulur. A matrisi Denklem (2.48)'de gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

i . ve j . Beacon noktalarının koordinatları arasındaki mesafe d_{ij} olarak gösterilir. j , ise referans Beacon noktası numarasıdır. d_{ij} mesafesi, Denklem (2.49)'da gösterilmiştir.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.49)$$

n sayıda Beacon noktası için $n-1$ sayıda denklemden oluşan doğrusal bir sistem olacaktır.

Denklem (2.49)-(2.50), vektör hesaplamasında kullanılır.

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{31} \\ \vdots \\ b_{n1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(r_1^2 - r_2^2 + d_{21}^2) \\ \frac{1}{2}(r_1^2 - r_3^2 + d_{31}^2) \\ \vdots \\ \frac{1}{2}(r_1^2 - r_n^2 + d_{n1}^2) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Hedefin tahmini koordinatları Denklem (2.51)'de, $\vec{x}$ vektörünün çözülmesiyle elde edilir (Ture ve Hatipoglu, 2019).

$$A^T A \vec{x} = A^T \vec{b} \quad (2.51)$$



3. UYGULAMA VE TEST ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışması kapsamında kapalı alanlarda Beacon tabanlı konumlandırmayla ilgili birçok test ve uygulama gerçekleştirilmiştir. Konumlandırma yöntemleri baz alınarak yapılan uygulamalarda, kapalı alan özelliklerini kısmen taşıyan dört farklı test alanı kullanılmıştır. Yapılan uygulamalarda birden fazla konumlandırma yönteminin kullanılması, aynı matematiksel modelin farklı uygulamalarda yer alması, bir uygulama alanında birden çok yöntemin test edilmesi gibi pek çok durum gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda elde edilen sonuçların analizleri doğrultusunda birbirini tamamlayıcı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan uygulamalar; Beacon tabanlı tek katlı kapalı alanda navigasyon uygulaması, Beacon tabanlı çok katlı kapalı alanlarda navigasyon uygulaması, kapalı alanda Beacon tabanlı yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yönteminin incelenmesidir.

3.1. Tek Katlı Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Navigasyon Uygulaması

Tez çalışması kapsamında yapılan ilk uygulama Şekil 3.1’de yer alan Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin giriş katında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı kapalı alanlarda Beacon tabanlı navigasyon uygulaması için konumlandırma yöntemlerinin seçimiyle birlikte navigasyon uygulamasının gerçekleştirilmesi ve Beacon tabanlı kapalı alan konumlandırmada karşılaşılan zorlukların tespit edilmesidir.



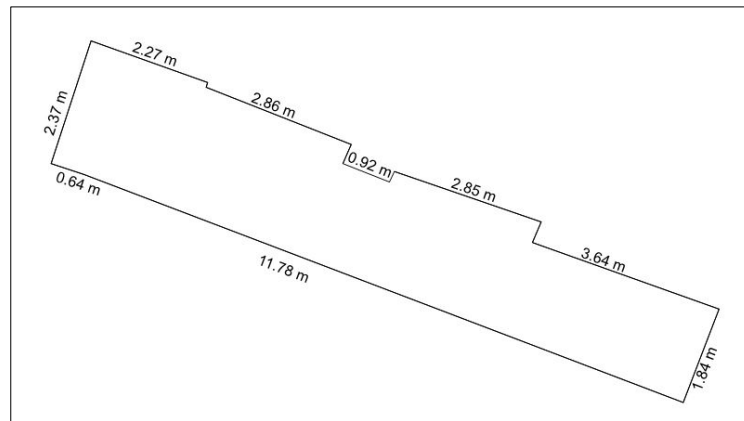
Şekil 3.1. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Çakır ve diğ., 2024).

Yapılan çalışma kapsamında, ilk olarak navigasyon uygulamasında kullanılacak konumlandırma yönteminin belirlenmesiyle ilgili ön test aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada; yapılan literatür araştırması, kapalı alanın fiziki durumu ve envanterdeki malzeme ve donanımlar göz önünde bulundurularak yakınlık ve üçgenleme yöntemlerinin kullanımına karar verilmiş ve bu yöntemler, kapalı alanda bir koridorda teste tabi tutulmuştur. Sonrasında test sonucu belirlenen konumlandırma yöntemi kullanılarak navigasyon uygulamasının testleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada kullanılan kapalı alanların haritası, kapalı alanın dışarısından içerisine sabit nokta taşınarak elde edilmiştir. Bu işlem için EUÖ (Elektronik Uzunluk ve Açık Ölçer) kullanılmıştır. Aynı zamanda Beacon'ların kapalı alanın tavanına yerleştirilmesinde (aplikasyonunda) de EUÖ kullanılmıştır. Dışarıdan çıkış alınan sabit noktalar, GNSS alıcıyla TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı-Aktif) sisteminden yararlanılarak koordinatlandırılmıştır. Böylelikle elde edilen haritaların koordinatları ITRF96 (International Terrestrial Reference Frame 1996) datumunda ve UTM (Universal Transverse Mercator) projeksiyonunda olmuştur. Kapalı alanın haritası için açık kaynaklı leaflet JavaScript kütüphanesinden yararlanılmıştır. Bu çalışmanın test aşamalarını ve basit navigasyon uygulamasını görüntülemek için React Native platformunda Android ve iOS tabanlı bir mobil uygulama geliştirilmiştir.

3.1.1. Ön test aşaması

Ön test aşaması kapalı alanda, bir koridorda gerçekleştirilmiştir. Koridorun uzunluğu yaklaşık 12.00 m, genişliği yaklaşık 2.00 m ve yüksekliği 2.60 m'dir. Şekil 3.2'de test alanı gösterilmiştir.

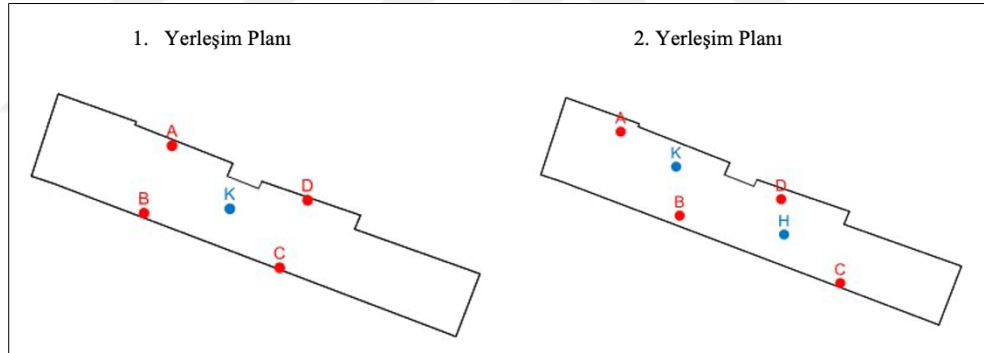


Şekil 3.2. Ön testler için uygulama alanı.

İlk olarak üçgenleme yöntemi için Beacon'ların iki farklı yerleşim planını baz alınarak testler gerçekleştirilmiştir. Bu yerleşim planları, koridorun fiziki durumu ve Beacon'lar arası mesafelere göre hazırlanmıştır. İlk yerleşim planında Beacon'ların uygulaması dikdörtgen (kısa kenarlar 2.00 m, uzun kenarlar 4.00 m) olacak şekilde koridorun tavanına yapılmıştır. İkinci yerleşim planında ise Beacon'ların uygulaması üçgen (kenar uzunlukları 3.00 m ve taban uzunluğu 5.09 m) olacak şekilde koridorun tavanına yapılmıştır. Testlerin başarısında, hedef nokta ile elde edilen konum arasındaki mesafe farkları baz alınmıştır. x_1, y_1 hedef noktanın koordinatları; x_2, y_2 elde edilen noktanın koordinatları ve hedef nokta ile elde edilen konum arasındaki uzaklık S olmak üzere Denklem (3.1)'de bu mesafenin matematiksel ifadesi gösterilmiştir.

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.1)$$

Test planlarında A, B, C, D noktaları Beacon'ların yerlerini, K ve H noktaları ise test noktalarını göstermektedir (Şekil 3.3). Şekilden görüldüğü üzere test noktaları dikdörtgen ve üçgen şeklin ortasında seçilmiştir.



Şekil 3.3. Ön test aşamasında gerçekleştirilen üçgenleme yöntemi için test planları.

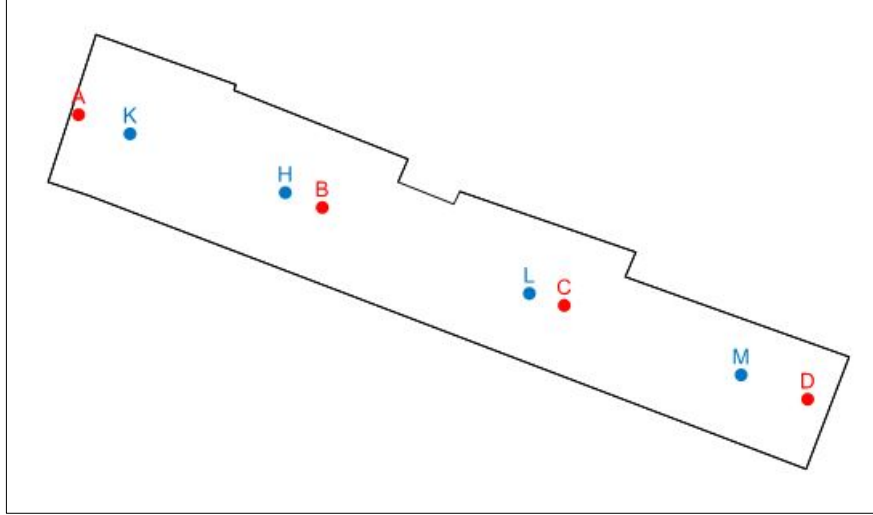
Üçgenleme yöntemi için yapılan ön test çalışmalarında hedef noktalara akıllı telefonla farklı yönlerden gidilerek birkaç saniye beklenilmiştir. İlk yerleşim planına göre on, ikinci yerleşim planına göre yirmi konum bilgisi elde edilmiştir. Üçgenleme yöntemi için yapılan ön test çalışmalarında elde edilen konum bilgileri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. İkinci yerleşim planında göre test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).

Hedeflenen Konum	Elde Edilen Konum	Uzaklık (<i>m</i>)
K	1	0.91
K	2	3.92
K	3	2.99
K	4	3.59
K	5	1.81
K	6	3.98
K	7	1.82
K	8	6.41
K	9	2.32
K	10	1.84
Ortalama		2.96
H	11	1.26
H	12	1.41
H	13	3.56
H	14	1.74
H	15	3.22
H	16	5.06
H	17	2.41
H	18	1.21
H	19	2.98
H	20	2.70
Ortalama		2.56

Çizelge 3.2 incelendiğinde K noktası için hedeflenen konum ile elde edilen konum farklarının ortalaması 2.96 *m*, H noktası için ise 2.56 *m*'dir.

Üçgenleme yöntemi için yapılan testlerden sonra yakınlık yöntemi için ön testler gerçekleştirilmiştir. Yakınlık yönteminin çalışma alt yapısı göz önünde bulundurularak Beacon'ların aplikasyonu, koridorun tavanına düz bir hat boyunca gerçekleştirilmiştir. Beacon'lar arası mesafe 2.00 *m*'den başlayarak 5.00 *m*'ye kadar farklı aralıklarda testler gerçekleştirilmiştir. Hedef noktaya ulaşıldığında en az konum değişimi gösteren Beacon dizilimi, 4.00 *m* ile yakınlık yöntemi için en uygun dizilim seçilmiştir. Test planlarında A, B, C, D Beacon'ların yerlerini K, H, L ve M ise test noktalarını temsil etmektedir. Yakınlık yöntemi için Beacon saha dizilimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yakınlık yöntemi için test planı.

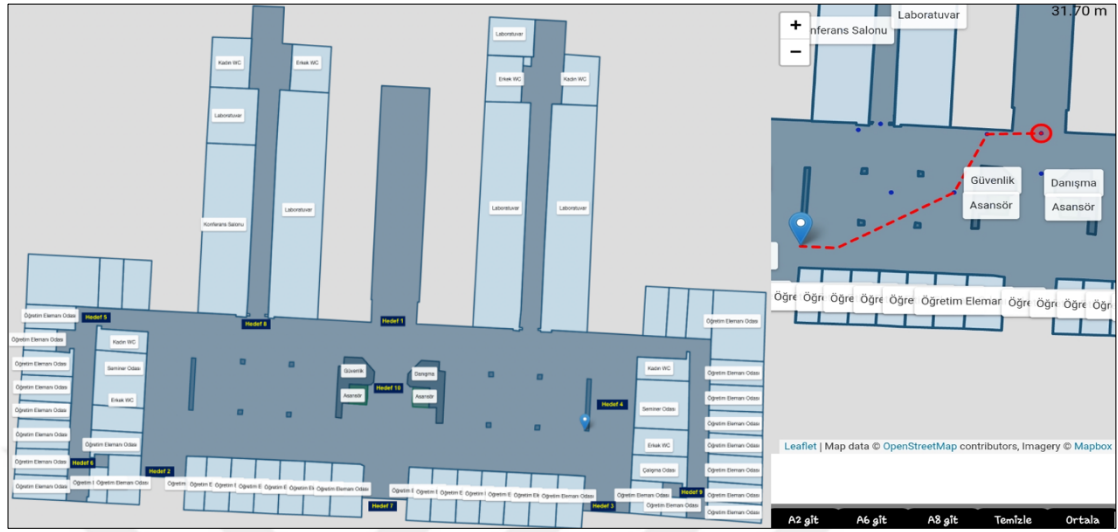
Yakınlık yöntemi için yapılan testlerde farklı yönlerden birçok kez hedef noktalara ulaşılmış ve hedef noktalarda birkaç saniye beklenilmiştir. Testlerde hedef noktaya ulaşıldığında yakınlık yönteminin çalışma prensibi olarak kullanıcının konumu, hedef noktaya en yakın Beacon konumu olarak elde edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarının tamamında bu durum gözlemlenmiştir. Yakınlık yönteminin test sonuçlarının konum doğruluğu ise Beacon'lar arası mesafenin yarısı olan 2.00 m kabul edilebilir. Sonuç olarak yakınlık yönteminin testlerinde kullanıcı, konumunu en fazla 2.00 m hata ile hesaplayabilecektir.

Üçgenleme ve yakınlık yönteminin ön test sonuçları incelendiğinde üçgenleme yöntemine göre 2.00 m konum hatasıyla yakınlık yöntemi navigasyon uygulamasında kullanılmıştır.

3.1.2. Navigasyon uygulaması

Navigasyon uygulamasının testleri, Mühendislik Fakültesinin giriş katında gerçekleştirilmiştir. Test alanına Beacon'ların uygulaması, EUÖ kullanılarak ön test aşamasında belirlenen yakınlık yöntemine göre kapalı alanın tavanına 4.00 m aralıkla yapılmıştır. Mobil navigasyon uygulamasının testleri, kapalı alanda belirlenen on hedef noktaya en kısa yoldan Dijkstra algoritmasıyla ulaşarak gerçekleştirilmiştir. Navigasyon uygulamasının başarı kriteri; belirlenen hedef noktalara çizilen rotalar boyunca ilerlerken konum değişiklikleri olmadan ulaşıldıysa başarılı, konumda yer yer değişiklikler olup ulaşıldıysa kısmen başarılı, tamamen ulaşamadıysa başarısız kabul

edilmiştir. Test alanının, hedef noktaların ve örnek bir testin akıllı telefondaki görüntülenmiş haritası Şekil 3.6’da sunulmuştur.



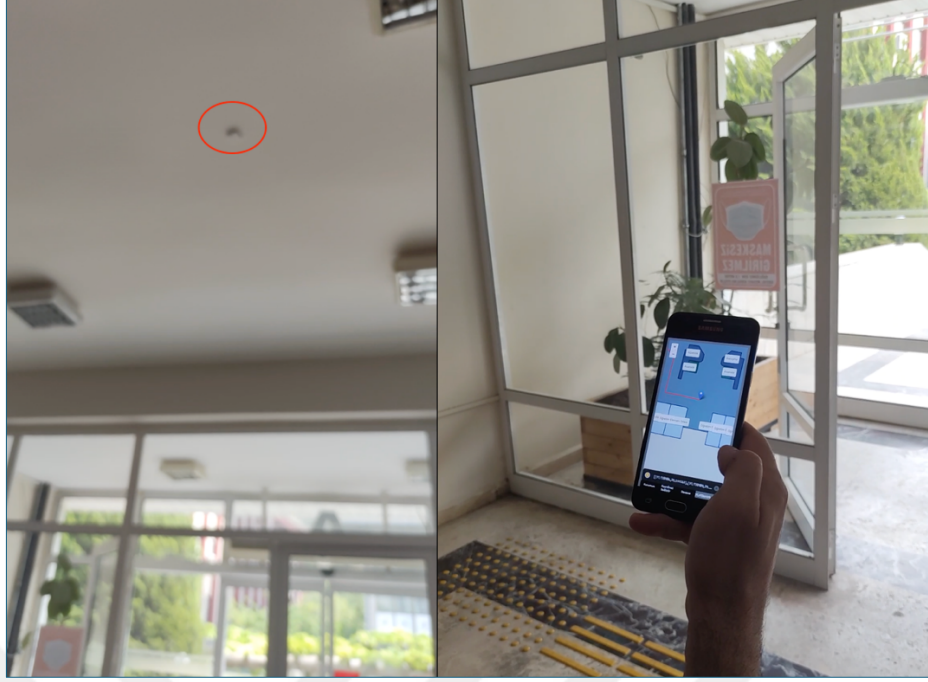
Şekil 3.6. Test alanının, hedef noktaların ve örnek testin mobil uygulama görüntüsü.

Mobil navigasyon uygulaması için yapılan testlerde belirlenen on hedef noktadan dokuz tanesine başarılı bir şekilde ulaşılırken bir noktada başarısız olunmuştur. Mobil navigasyon uygulamasının test sonuçları Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Mobil navigasyon uygulaması test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).

Hedeflenen Konum	Başarı Durumu
Hedef 1	Başarılı
Hedef 2	Başarılı
Hedef 3	Başarılı
Hedef 4	Başarılı
Hedef 5	Başarılı
Hedef 6	Başarılı
Hedef 7	Başarısız
Hedef 8	Başarılı
Hedef 9	Başarılı
Hedef 10	Başarılı

Çizelge 3.3 incelendiğinde Hedef 7 noktasında mobil navigasyon uygulaması başarısız olmuştur. Bu test noktası için yapılan incelemede, test noktası kapalı alanın giriş ve çıkışının olduğu bölümde yer almaktadır. Başarısızlıkla sonuçlanan test noktasının konumu Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Başarısızlıkla sonuçlanan test noktası ve Beacon'ın konumu.

Bu bölümün camekanlı yapıya sahip olmasının, sinyal yansımalarına neden olabileceği dolayısıyla konum doğruluğunu etkileyebileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu bölüm, standart kapalı alanın tavan yüksekliğinden 1.5 m daha fazla yüksekliğe sahip olması başarısızlığın diğer bir etkeni olarak düşünülmektedir.

3.2. Çok Katlı Kapalı Alanlarda Beacon Tabanlı Navigasyon Uygulaması

Bu uygulama Şekil 3.8'de yer alan Pamukkale Üniversitesi Hastanelerinin altı kattan oluşan polikliniklerinde ve on üç kattan oluşan yataklı servislerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı yaklaşık 40000 m^2 kapalı alanda, kat geçişlerinde de kesintiye uğramayacak şekilde Beacon tabanlı navigasyon uygulamasının gerçekleştirilmesi ve bu uygulamada karşılaşılan sorunların analiz edilerek çözüme kavuşturulmasıdır.



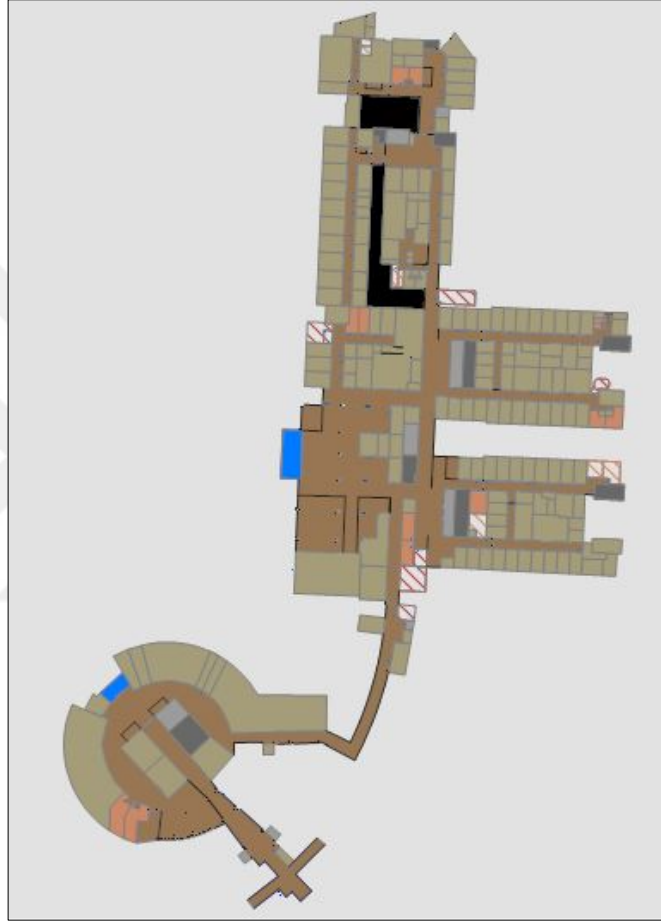
Şekil 3.8. Pamukkale Üniversitesi Hastaneleri.

Çalışmada konumlandırma algoritması olarak tek katlı kapalı alanda Beacon tabanlı navigasyon uygulamasında da elde edilen tecrübeler doğrultusunda yakınlık yöntemi kullanılmıştır. Kat haritalarının elde edilmesi hastane içerisindeki kapalı alanların çok büyük olmasından dolayı hastane kat planlarının koordinatlandırılması yoluyla olmuştur. Bu işlem için hastane bahçesinde iki sabit nokta TUSAGA-Aktif sisteminden yararlanılarak GNSS alıcısıyla ölçülmüştür. Daha sonra bu noktalardan faydalanılarak hastane içerisine EUÖ yardımıyla sabit noktalar atılmıştır. Şekil 3.9’da bu durum gösterilmiştir.



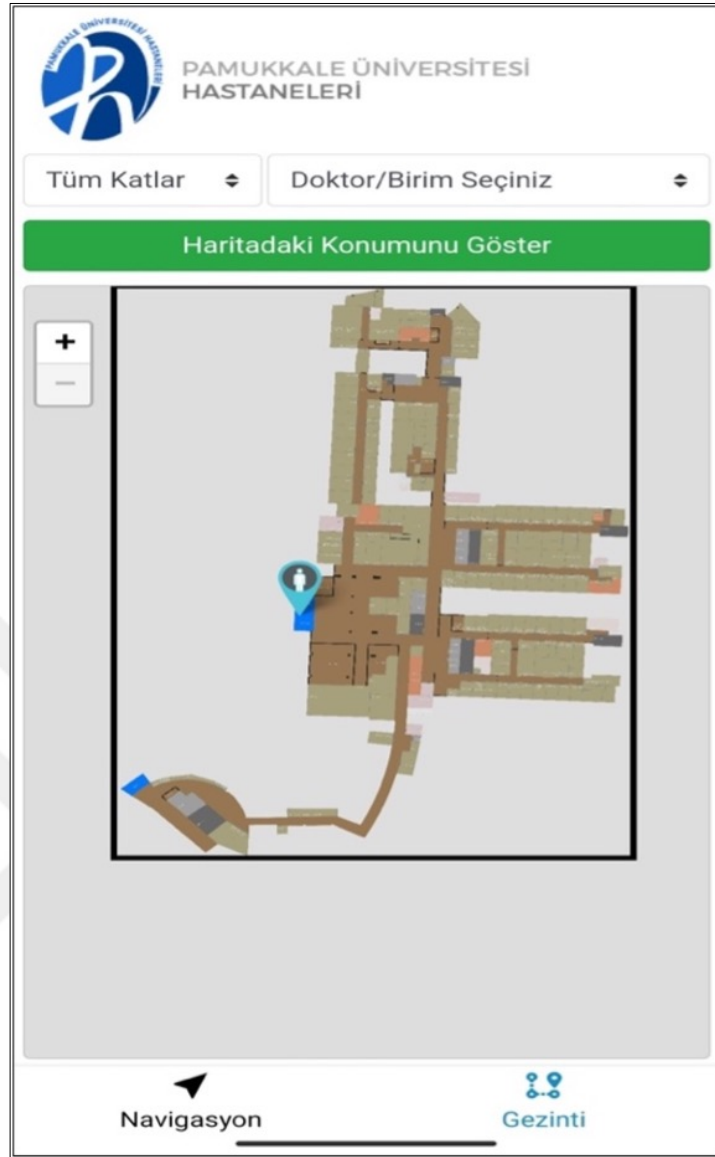
Şekil 3.9. Hastane haritalarının koordinatlandırılması.

Hastane içerisine atılan sabit noktalardan, kat projesinde de belirli olan kolonlar ölçülerek kat planları iki boyutlu benzerlik dönüşümüyle koordinatlandırılmıştır. Daha sonra haritaların izimleri NetCad programında gerçekleştirilerek GeoTIFF formatında navigasyon uygulamasına aktarılmıştış. Hastane katının çizim rneęi şekil 3.10'da gösterilmiştir.



şekil 3.10. Hastane kat haritası çizim rneęi.

Böylelikle mobil navigasyon uygulamasında kullanılan haritalar ITRF96 datumunda ve UTM projeksiyonunda elde edilmiştir. Haritaların mobil navigasyon uygulamasında görüntülenmesi için açık kaynaklı leaflet JavaScript kütüphanesinden yararlanılmıştış. Navigasyon uygulaması için oluşturulan haritaların mobil navigasyon uygulamasındaki görüntüsü şekil 3.11'de gösterilmiştir.

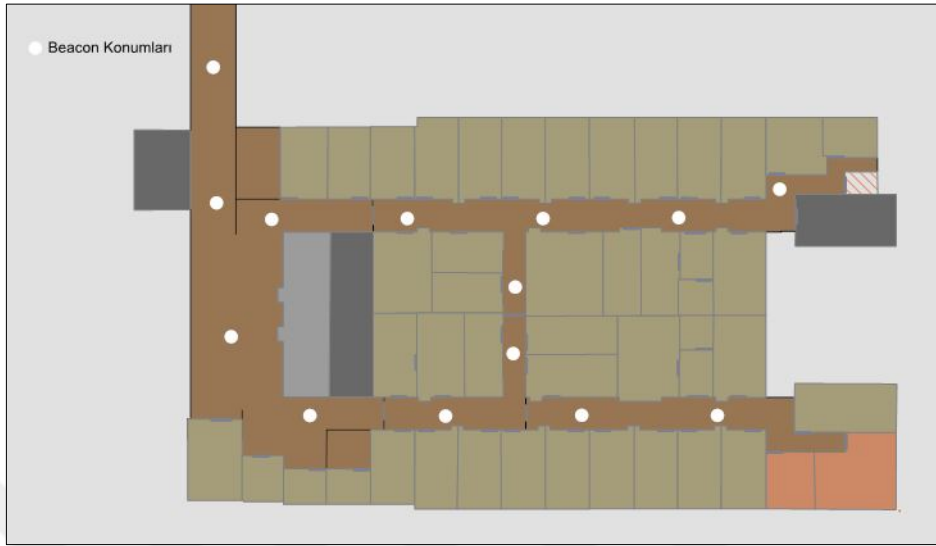


Şekil 3.11. Mobil navigasyon uygulamasında harita görüntüsü.

Bu uygulamanın testleri sırasında belirlenen hedef noktalara Dijkstra algoritması kullanılarak ulaşılmıştır. Kullanıcının hangi katta olduğunu bilmesi ve bulunduğu katla ilgili haritanın mobil uygulamada görüntülenmesini kendisine en yakın olan Beacon'dan aldığı sinyallerle gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan Beacon cihazlarının UUID değerleri, bulunduğu kat bilgisiyle veri tabanına kaydedilmiştir. Kullanıcı hangi Beacon'dan sinyal alıyorsa Beacon'ın bulunduğu kat haritasını mobil uygulamada görüntülenmektedir. Bu durumun alternatifi, Beacon'ların majör ve/veya minör değerlerine kat bilgileri atanarak da gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmanın test aşamalarını ve navigasyon uygulamasını görüntülemek için React Native platformunda, Android ve iOS tabanlı mobil uygulama geliştirilmiştir. Beacon'lar hastane katlarının tavanlarına 7 m'den 12 m'ye kadar değişen aralıklarla

birlikte çoğunlukla 10 m aralıklı olarak yerleştirilmiştir. Hastane içerisinde yer alan örnek Beacon yerleşim planı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Hastane katları için Beacon yerleşim planı örneği.

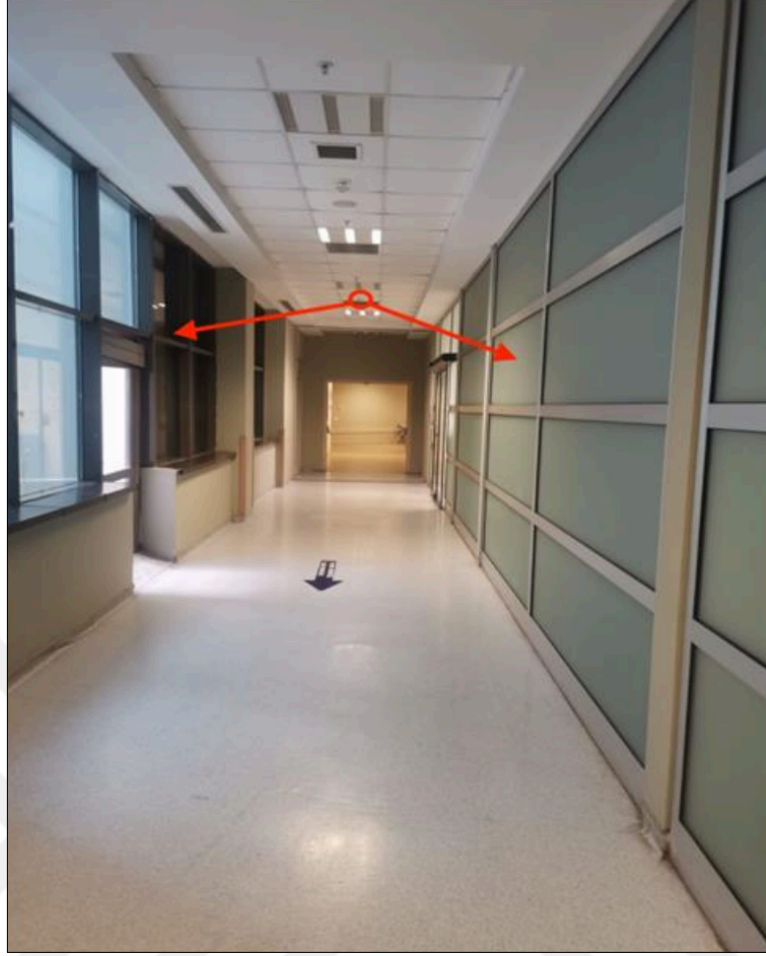
Bu çalışmanın mobil navigasyon uygulamasının testleri kullanıcının, belirlenen yirmi hedef noktaya ulaşma durumuna göre gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar aynı katta ve farklı katta olmak üzere sınıflandırılmıştır. Kullanıcı başladığı bir noktadan hedef noktaya ulaşmaya kadar ki geçtiği konum (yakınlık yöntemine göre sinyal aldığı Beacon sayısı) kaydedilmiştir. Kullanıcı çizilen rotada hedefe, konum dalgalanmaları (sinyal kesiklikleri, sinyal yansımaları gibi nedenlerden kaynaklı olarak oluşan ani konum değişiklikleri) olmadan ulaştıysa başarılı, konum dalgalanmaları yaşayarak oluştuysa kısmen başarılı, hedefe ulaşamadıysa başarısız kabul edilmiştir. Gerçekleştirilen mobil navigasyon uygulamasının test sonuçları Çizelge 3.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Mobil navigasyon uygulaması test sonuçları (Çakır ve diğ., 2024).

Test No	Aynı Kat	Farklı Kat	Test Edilen Konum Sayısı	Başarı Durumu
1	•		12	Başarılı
2	•		14	Kısmen Başarılı
3	•		11	Başarılı
4	•		11	Başarılı
5	•		9	Başarılı
6		•	12	Başarılı
7		•	4	Başarılı
8		•	6	Başarılı
9		•	13	Başarılı
10		•	18	Başarılı
11		•	5	Başarılı
12		•	22	Başarılı
13		•	6	Kısmen Başarılı
14		•	4	Başarılı
15		•	24	Başarılı
16		•	24	Başarılı
17		•	22	Başarılı
18		•	5	Başarılı
19		•	9	Başarısız
20		•	21	Başarılı

Çizelge 3.4’te incelendiğinde gerçekleştirilen yirmi testten on yedisinin başarılı, ikisinin kısmen başarılı ve birinin ise başarısız olduğu görülmektedir.

Kısmen başarılı olan testler incelendiğinde kullanıcının ilerlediği güzergahta yansıtıcı yüzeylerin olduğu fark edilmiştir. Bu durum yürüme hızı da dikkate alındığında ani konum değişikliklerine neden olmuştur. Kullanıcının ilerlediği güzergahta karşılaşılan yansıtıcı yüzeylere örnek Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kapalı alan içerisindeki yansıtıcı yüzeyler (Çakır ve diğ., 2024).

Başarısız olan test incelendiğinde ise kullanıcı belirlenen güzergâh üzerinde bir noktaya kadar sorunsuz ilerlemektedir. Sorun yaşadığı noktada ise Beacon sinyali alamamıştır. Yapılan incelemelerde Beacon cihazının sağlıklı çalışmadığı görülmüştür. Bu durum testin başarısızlıkla sonuçlanmasına neden olmuştur.

3.3. Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Üçgenleme Yöntemiyle Konumlandırma

Bu uygulama tavan yüksekliği 2.60 m olan 345.00 m^2 bir alana sahip kapalı bir alanda gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın gerçekleştiği kapalı alanın tavanında kirişler mevcut olup kolonlarla alan bölünmüş durumdadır. Şekil 3.14'te çalışma alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Üçgenleme yöntemi için kullanılan çalışma alanı (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Bu uygulamanın amacı kapalı alanlarda Beacon tabanlı üçgenleme yönteminin konumlandırma performansını test etmek, ortam koşullarına göre A ve n değerlerini belirleyerek üçgenleme yönteminin konumlandırma performansına etkisini gözlemlemek, kapalı alanın fiziki durumunun (kolon, giriş, duvar) üçgenleme yöntemine etkisini gözlemlemektir. Uygulamada iki farklı şekilde elde edilen mesafe bilgisi kullanılmıştır. Bunlar:

- 1- Otomatik olarak direkt kullanıcıya sunulan mesafe bilgisi kullanılarak,
- 2- Ortam koşullarına göre A ve n değerleri hesaplanıp bu değerlerle belirlenen mesafe bilgisi kullanılmasına dayalıdır.

Uygulamada ayrıca iki farklı şekilde üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmıştır. Bunlar:

- 1- En güçlü üç Beacon sinyal değeri kullanılarak,
- 2- Dört Beacon sinyal değerinin tamamı EKK ile değerlendirilerek üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmasına dayalıdır.

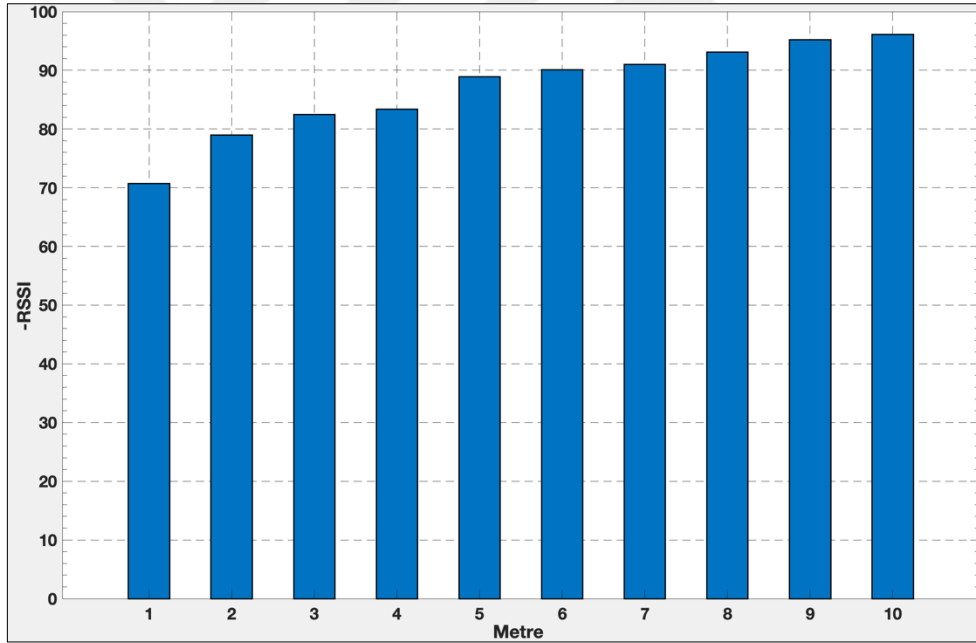
3.3.1. A ve n değerlerinin belirlenmesi

A ve n değerlerinin belirlenmesi için çalışma alanının farklı yerlerinde 1 m'den 10 m'ye kadar toplamda on adet referans uzaklığı kullanılarak akıllı telefonla RSSI okuması yapılmıştır. Bu referans uzaklıklarının her birinde de on adet RSSI okuması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen RSSI okumaları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Mobil navigasyon uygulaması test sonuçları (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Referans Uzaklık	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
RSSI Okuma Değerleri (dBm)	-70	-82	-82	-84	-86	-92	-94	-94	-93	-95
	-71	-79	-84	-81	-89	-91	-90	-91	-95	-99
	-72	-80	-82	-85	-92	-87	-91	-93	-95	-96
	-69	-78	-80	-83	-87	-87	-89	-91	-96	-95
	-68	-77	-83	-87	-91	-88	-91	-95	-98	-94
	-74	-77	-81	-81	-92	-88	-90	-92	-95	-95
	-70	-81	-84	-82	-89	-91	-93	-95	-96	-98
	-67	-80	-83	-81	-86	-90	-90	-93	-94	-97
	-71	-76	-81	-86	-85	-93	-91	-93	-96	-97
	-75	-80	-85	-84	-92	-94	-91	-94	-94	-95
Ortalama	-70.7	-79.0	-82.5	-83.4	-88.9	-90.1	-91.0	-93.1	-95.2	-96.1

Çizelge 3.5'te gösterilen RSSI değerlerinin m bazlı ortalamalarının grafiği Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. RSSI değerlerinin metre bazlı değişimleri.

İlk olarak çalışma sahasından toplanan RSSI okumaları kullanılarak 1 m için beklenen RSSI değerini temsil eden A değeri belirlenmiştir. Bu değer 1 m referans uzaklığı için okunan RSSI değerlerinin ortalaması alınıp -70.7 dBm olarak hesaplanmıştır. n değeri belirlenmesi için ise her bir referans uzaklığı için belirlenen RSSI değerlerinin ortalaması, Denklem (2.13)'le değerlendirilerek MSE için hazır hale getirilmiştir. MSE , Denklem (3.2)'de gösterilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (RSSI_i - RSSI_j)^2 \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de $RSSI_i$, ölçülen güç değerini (her bir referans uzaklığı için alınan on RSSI ölçüsünün ortalamaları); $RSSI_j$ ise Denklem (2.13) kullanılarak hesaplanan güç değerleridir. $RSSI_1(A)$, -70.7 dBm olmak üzere Denklem (2.13) kullanılarak $RSSI_j$ değerleri hesaplanmıştır. Bu aşama Denklem (3.3)-(3.5)'te gösterilmiştir.

$$RSSI_1 = RSSI_1(A) - 10n \log \left[\frac{d}{1m} \right] = -70.7 - 10n \log \left[\frac{1m}{1m} \right] = (-70.7) \text{ dBm} \quad (3.3)$$

$$RSSI_2 = RSSI_1(A) - 10n \log \left[\frac{d_2}{1m} \right] = -70.7 - 10n \log \left[\frac{2}{1m} \right] = (-70.7 - 3n) \text{ dBm} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ & \cdot \quad \cdot \quad \cdot \end{aligned}$$

$$RSSI_{10} = RSSI_1(A) - 10n \log \left[\frac{d_{10}}{1m} \right] = -70.7 - 10n \log \left[\frac{10m}{1m} \right] = (-70.7 - 10n) \text{ dBm} \quad (3.5)$$

$RSSI_i$ ve $RSSI_j$ değerleri MSE için Denklem (3.2)'de yerine yazılarak Denklem (3.6) elde edilir.

$$MSE = (-70.7 - (-70.7))^2 + (-79.0 - (-70.7 - 3n))^2 \dots (-96.1 - (-70.7 - 10n))^2 \quad (3.6)$$

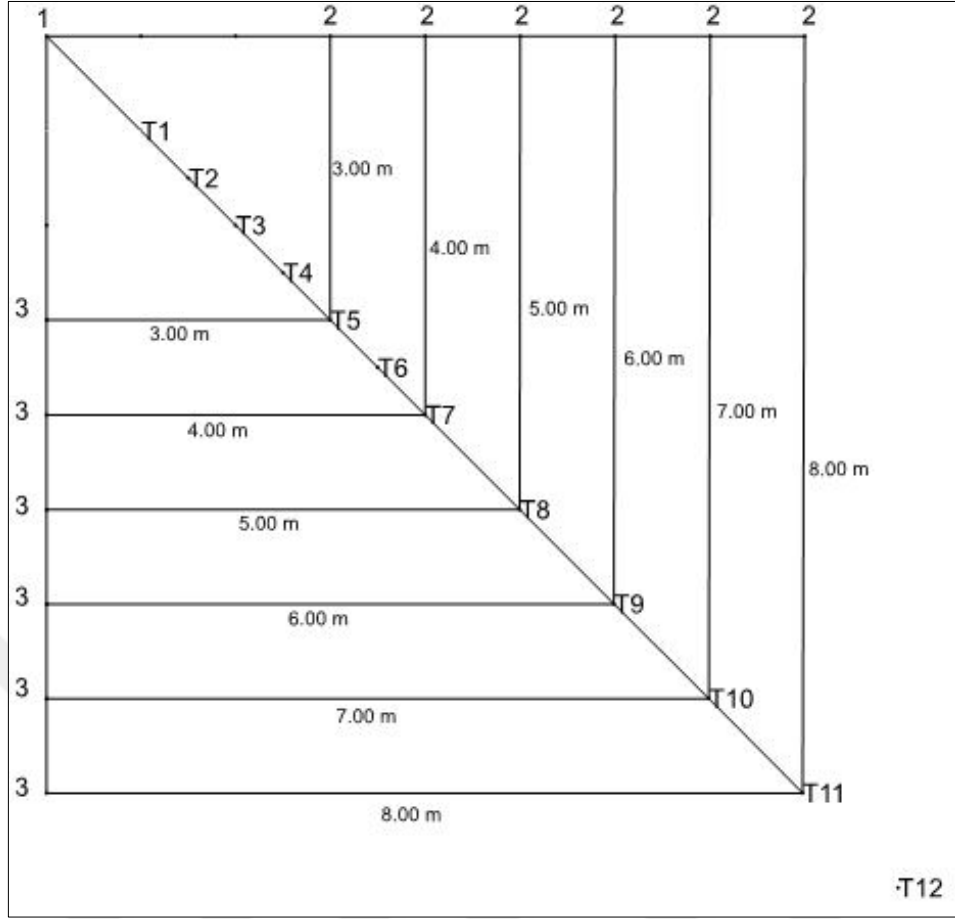
n değerinin belirlenmesi için MSE 'yi en küçük yapan değer, $MMSE$ ile hesaplanması gerekmektedir. Bu işlem için MSE yani Denklem (3.6), yol kaybı katsayısına göre türevi alınıp sıfıra eşitlenmiştir (Sümer, 2020). Denklem (3.7)'de $MMSE$ işlemi gösterilmiştir.

$$MMSE = \frac{dMSE}{dn} = \frac{d(521.16n^2 - 2595.12n + 3236.28)}{dn} = 0 \quad (3.7)$$

Bu işlemin ardından n değeri 2.49 olarak hesaplanır.

3.3.2. Üçgenleme yönteminin belirlenen farklı mesafe tiplerine göre test edilmesi

Bu çalışmada üçgenleme yöntemi için altı farklı konumlandırma taslağı hazırlanmıştır. Konumlandırma taslağı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Üçgenleme yöntemi için konumlandırma taslağı (Çakır ve Doğanalp ,2024).

Şekil 3.16'daki konumlandırma taslağına göre Beacon'lar, 3x3 m'den 8x8 m'ye kadar toplamda altı kare dizilim şekline göre kapalı alanın tavanına yerleştirilmiştir. Bu taslaklarda test noktaları karenin bir köşesine yakın, karenin tam ortasında ve karenin dışında bir noktaya yakın olacak şekilde seçilmiştir. Örneğin 3x3 m taslakta 1,2,3 ve T5 Beacon'ların bulunduğu köşe noktaları iken T1, T2 ve T6 test noktalarıdır. 4x4 m taslakta ise 1,2,3 ve T7 Beacon'ların bulunduğu köşe noktaları iken T1, T3 ve T8 test noktalarıdır. Uygulamalarda, test noktalarına yön kavramı olmaksızın ulaşılmış ve birkaç saniye beklenerek veriler elde edilmiştir. Her bir test noktasındaki oturum için beş RSSI değeri ölçülerek bu değerlerin ortalamaları çalışmada kullanılmıştır. Uygulamada toplanan veriler üç boyutlu konum bilgisine göre değerlendirilmiştir.

$$S^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'e göre S iki nokta arası mesafe olmak üzere x_1, y_1, z_1 birinci noktanın koordinatları; x_2, y_2, z_2 ise ikinci noktanın koordinatlarıdır. Hesaplamalarda $z_2 - z_1$ değeri, tavan yüksekliğiyle (2.60 m) ölçme işlemini gerçekleştiren kullanıcının tuttuğu

akıllı telefonun zeminden yüksekliği (1.15 m) arasındaki sabit yükseklik farkından dolayı 1.45 m olarak alınmıştır.

Uygulama kapsamında toplanan verilere ait sonuçlar Çizelgeler 3.6-3.17 arasında verilmiştir. Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafeyi gösteren çizelgelerde; Beacon konumu, ortalama RSSI değeri, test noktası, test noktasının Beacon'a uzaklığı, herhangi bir işleme tabi tutulmadan direkt olarak Beacon'dan elde edilen (üretici firma tarafından sağlanan standart değerlerle hesaplanıp kullanıcıya otomatik olarak sunulan) mesafe bilgisi ve bu mesafenin test noktasıyla arasındaki uzaklık (BMF), ortam koşullarına göre hesaplanan mesafe bilgisi ve bu mesafenin test noktasıyla arasındaki uzaklık (HMF) yer almaktadır.

Üçgenleme yöntemi kullanılarak yapılan konum hesaplamalarında, en güçlü üç Beacon sinyali kullanıldığında klasik üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmıştır. Klasik üçgenlemede alınan Beacon sinyal sayısı üçün altına düştüğünde konum hesaplanamamıştır. Alınan Beacon sinyal sayısı dört olduğunda üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak konum hesaplanmıştır. Üçgenleme yöntemiyle hesaplanan konum çizelgelerinde; kullanılan Beaconlar, test noktası, otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisiyle hesaplanan konumun test noktasına olan uzaklığı (OMU) ve ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisiyle hesaplanan konumun test noktasına olan uzaklığı (HKU) gösterilmiştir.

İlk test 3x3 m Beacon yerleşim taslağına göre yapılmıştır. Bu testte, Beacon'ların tamamından sinyal alınmış ve sonuçları Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. 3x3 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Beacon Konumu	Ortalama RSSI (dBm)	Test Noktası	Test Noktasının Beacon'a Uzaklığı(m)	Beacon'dan Gelen Mesafe Bilgisi (m)	Hesaplanan Mesafe Bilgisi (m)	BMF (m)	HMF (m)
1	-67.60	T1	2.03	0.28	0.76	1.75	1.26
2	-84.00	T1	2.66	1.92	3.52	0.74	0.86
3	-79.00	T1	2.66	1.21	2.18	1.46	0.49
T5	-95.60	T1	3.17	4.94	10.17	1.77	7.00
1	-70.60	T2	2.56	0.50	1.08	2.06	1.49
2	-77.80	T2	2.56	1.08	1.97	1.49	0.60
3	-80.00	T2	2.56	1.45	2.70	1.12	0.13
T5	-85.40	T2	2.56	2.18	4.06	0.39	1.49
1	-80.80	T7	5.84	1.50	2.74	4.34	3.10
2	-82.60	T7	4.37	1.88	3.54	2.49	0.83
3	-88.00	T7	4.37	2.72	5.19	1.65	0.81
T5	-64.00	T7	2.03	0.16	0.54	1.87	1.49

Çizelge 3.6 incelendiğine genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin, otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu RSSI değerleri, -84 dBm 85.40 dBm ve -95.60 dBm değerleri olduğu görülmektedir. Bu testin üçgenleme yöntemiyle elde edilen sonuçları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. 3x3 m konumlandırma sonuçları.

Yöntem	Kullanılan Beacon Sinyali	Test Noktası	OMU (m)	HKU (m)
Üçgenleme	1,2,3	T1	0.29	1.49
	1,2,3	T2	0.34	1.11
	1,2,T5	T7	3.30	2.79
EKK ile Üçgenleme	1,2,3,T5	T1	1.43	8.07
	1,2,3,T5	T2	0.47	1.60
	1,2,3,T5	T7	3.64	4.28

Çizelge 3.7 için test sonuçları incelendiğinde klasik üçgenleme yöntemi için karenin içinde kalan test noktalarında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumların daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışındaki noktada ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermiştir. Üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak elde edilen sonuçların

tamamında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermiştir.

İkinci test 4x4 m Beacon yerleşim taslağına göre yapılmıştır. Bu testte, Beacon'ların tamamından sinyal alınmış ve sonuçları Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. 4x4 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Beacon Konumu	Ortalama RSSI (dBm)	Test Noktası	Test Noktasının Beacon'a Uzaklığı(m)	Beacon'dan Gelen Mesafe Bilgisi (m)	Hesaplanan Mesafe Bilgisi (m)	BMF (m)	HMF (m)
1	-63.60	T1	2.03	0.17	0.55	1.86	1.48
2	-87.60	T1	3.48	2.69	5.15	0.79	1.67
3	-80.20	T1	3.48	1.35	2.41	2.13	1.07
T7	-95.80	T1	4.48	5.01	10.47	0.53	5.99
1	-68.20	T3	3.18	0.31	0.81	2.87	2.36
2	-88.40	T3	3.18	2.88	5.53	0.31	2.35
3	-70.60	T3	3.18	0.43	1.01	2.74	2.17
T7	-89.00	T3	3.18	2.95	5.67	0.23	2.48
1	-83.20	T8	7.22	1.75	3.20	5.46	4.02
2	-89.00	T8	5.30	2.89	5.50	2.41	0.20
3	-75.80	T8	5.30	0.90	1.74	4.40	3.57
T7	-71.80	T8	2.03	0.53	1.14	1.49	0.88

Çizelge 3.8 incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin, otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu RSSI değerlerinin tamamının, -87 dBm değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Bu testin üçgenleme yöntemiyle elde edilen sonuçları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. 4x4 m konumlandırma sonuçları (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Yöntem	Kullanılan Beacon Sinyali	Test Noktası	OMU (m)	HKU (m)
Üçgenleme	1,2,3	T1	0.78	2.30
	1,2,3	T3	1.01	3.74
	1,3,T7	T8	4.00	3.49
EKK ile Üçgenleme	1,2,3,T7	T1	0.58	6.24
	1,2,3,T7	T3	1.03	3.78
	1,2,3,T7	T8	4.22	4.75

Çizelge 3.9 için test sonuçları incelendiğinde klasik üçgenleme yöntemi için karenin içinde kalan test noktalarında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumun daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışındaki noktada ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermiştir. Üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak elde edilen sonuçların tamamında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermiştir.

Üçüncü test 5x5 m Beacon yerleşim taslağına göre yapılmıştır. Bu testte, Beacon'ların tamamından sinyal alınamamıştır. Test sonuçları Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. 5x5 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Beacon Konumu	Ortalama RSSI (dBm)	Test Noktası	Test Noktasının Beacon'a Uzaklığı(m)	Beacon'dan Gelen Mesafe Bilgisi (m)	Hesaplanan Mesafe Bilgisi (m)	BMF (m)	HMF (m)
1	-75.60	T1	2.03	0.92	1.79	1.10	0.23
2	-87.80	T1	4.38	2.73	5.20	1.65	0.82
3	-93.80	T1	4.38	4.30	8.67	0.07	4.30
T8	-93.20	T1	5.85	4.07	8.12	1.77	2.28
1	-77.20	T4	3.83	1.02	1.83	2.79	1.99
2	-79.80	T4	3.83	1.34	2.45	2.49	1.38
3	---	T4	3.83	---	---	---	---
T8	-95.20	T4	3.83	4.74	9.66	0.91	5.83
1	-80.20	T9	8.60	1.46	2.43	7.28	6.17
2	-92.80	T9	6.08	3.95	7.84	2.13	1.76
3	-89.80	T9	6.24	3.17	6.15	3.07	0.09
T8	-62.20	T9	2.02	0.12	0.46	1.90	1.56

Çizelge 3.10 için test sonuçları incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin, otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu RSSI değerlerinin tamamının, -93 dBm değerinin üstünde olan değerler olduğu görülmektedir. Bu testin üçgenleme yöntemiyle elde edilen sonuçları Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. 5x5 m konumlandırma sonuçları (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Yöntem	Kullanılan Beacon Sinyali	Test Noktası	OMU (m)	HKU (m)
Üçgenleme	1,2,T8	T1	1.03	2.55
	1,2,T8	T4	16.67	8.73
	1,3,T8	T9	4.98	6.70
EKK ile Üçgenleme	1,2,3,T8	T1	1.13	4.60
	1,2,3,T8	T4	---	---
	1,2,3,T8	T9	5.39	6.94

Çizelge 3.11 incelendiğinde klasik üçgenleme yöntemi için karenin ortasındaki test noktasında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumun daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin içinde kalan diğer test noktasıyla dışında kalan test noktasında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermiştir. Karenin içinde ve dışında kalan test noktalarında, üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak elde edilen sonuçlarda; otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermiştir. Karenin ortasındaki test noktasında ise Beacon sinyalleri yetersiz kaldığından EKK ile konum hesaplanamamıştır.

Dördüncü test 6x6 m Beacon yerleşim taslağına göre yapılmıştır. Bu testte, Beacon'ların tamamından sinyal alınmış ve sonuçları Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. 6x6 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Beacon Konumu	Ortalama RSSI (dBm)	Test Noktası	Test Noktasının Beacon'a Uzaklığı(m)	Beacon'dan Gelen Mesafe Bilgisi (m)	Hesaplanan Mesafe Bilgisi (m)	BMF (m)	HMF (m)
1	-66.32	T4	3.81	0.17	0.56	3.52	3.25
2	-90.00	T4	4.55	3.15	6.08	1.40	1.53
3	-91.40	T4	5.10	3.51	6.85	1.59	1.75
T9	-93.00	T4	5.16	3.95	8.03	1.21	2.87
1	-74.00	T6	5.16	0.68	1.36	4.57	3.79
2	-85.80	T6	4.54	2.23	4.14	2.32	0.41
3	-96.40	T6	4.54	5.33	11.20	0.79	6.66
T9	-92.60	T6	3.81	3.86	7.64	0.05	3.82
1	-86.20	T11	11.39	2.48	4.74	7.09	6.65
2	-94.00	T11	8.36	4.37	8.84	3.99	0.48
3	-83.20	T11	8.36	1.76	3.21	6.60	5.15
T9	-66.80	T11	3.17	0.25	0.71	2.92	2.46

Çizelge 3.12 incelendiğinde genel anlamda ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin, otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi olduğu RSSI değerlerin tamamının, -90 dBm değerinin üstünde olan değerler olduğu görülmektedir. Bu testin üçgenleme yöntemiyle elde edilen sonuçları Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.13. 6x6 m konumlandırma sonuçları.

Yöntem	Kullanılan Beacon Sinyali	Test Noktası	OMU (m)	HKU (m)
Üçgenleme	1,2,3	T4	0.40	4.23
	1,2,T9	T6	1.60	4.33
	1,3,T9	T11	8.57	5.77
EKK ile Üçgenleme	1,2,3,T9	T4	0.37	3.50
	1,2,3,T9	T6	2.36	8.53
	1,2,3,T9	T11	7.08	8.11

Çizelge 3.13 için test sonuçları incelendiğinde klasik üçgenleme yöntemi için karenin içinde kalan test noktalarında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumun daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışındaki noktada ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermiştir. Üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak elde edilen sonuçların tamamında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermiştir.

Beşinci test 7x7 m Beacon yerleşim taslağına göre yapılmıştır. Bu testte, Beacon'ların tamamından sinyal alınamamıştır. Bu teste ait sonuçlar Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. 7x7 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Beacon Konumu	Ortalama RSSI (dBm)	Test Noktası	Test Noktasının Beacon'a Uzaklığı(m)	Beacon'dan Gelen Mesafe Bilgisi (m)	Hesaplanan Mesafe Bilgisi (m)	BMF (m)	HMF (m)
1	-69.20	T4	3.81	0.35	0.88	3.46	2.93
2	---	T4	5.36	---	---	---	---
3	-91.40	T4	5.34	3.50	6.81	1.85	1.47
T10	---	T4	6.53	---	---	---	---
1	-76.20	T6	5.16	0.95	1.85	4.20	3.31
2	---	T6	5.16	---	---	---	---
3	-86.60	T6	5.16	2.41	4.53	2.75	0.62
T10	---	T6	5.16	---	---	---	---
1	-82.40	T11	11.39	1.63	2.96	9.76	8.43
2	-93.00	T11	8.18	4.11	8.29	4.07	0.11
3	-86.60	T11	8.18	2.47	4.68	5.71	3.50
T10	-70.60	T11	2.02	0.43	1.00	1.59	1.02

Çizelge 3.14 incelendiğinde ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe değerlerinin, otomatik olarak elde edilen mesafe değerlerinin tamamından daha iyi olduğu görülmektedir. Bu testin üçgenleme yöntemiyle elde edilen sonuçları Çizelge 3.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.15. 7x7 m konumlandırma sonuçları.

Yöntem	Kullanılan Beacon Sinyali	Test Noktası	OMU (m)	HKU (m)
Üçgenleme	---	T4	---	---
	---	T6	---	---
	1,3,T10	T11	6.25	6.21
EKK ile Üçgenleme	1,2,3,T10	T4	---	---
	1,2,3,T10	T6	---	---
	1,2,3,T10	T11	6.59	7.69

Çizelge 3.15 için test sonuçları incelendiğinde klasik üçgenleme yöntemi için karenin içindeki test noktaları için konum hesaplanamamıştır. Karenin dışındaki noktada ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermiştir. Üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak yapılan konum hesaplamalarında karenin içindeki test noktaları için konum hesaplanamamıştır. Karenin

dışındaki noktada ise otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermiştir.

Altıncı ve son test 8x8 m Beacon yerleşim taslağına göre yapılmıştır. Bu testte de önceki testlere benzer şekilde, Beacon'ların tamamından sinyal alınamamıştır. Test sonuçları Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. 8x8 m mesafe bilgileri (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Beacon Konumu	Ortalama RSSI (dBm)	Test Noktası	Test Noktasının Beacon'a Uzaklığı(m)	Beacon'dan Gelen Mesafe Bilgisi (m)	Hesaplanan Mesafe Bilgisi (m)	BMF (m)	HMF (m)
1	-69.40	T4	3.81	0.36	0.89	3.45	2.93
2	---	T4	6.23	---	---	---	---
3	-89.20	T4	6.21	2.91	5.55	3.30	0.66
T11	-95.80	T4	7.91	5.00	10.32	2.90	2.42
1	-79.00	T7	5.84	1.23	2.23	4.61	3.60
2	---	T7	5.84	---	---	---	---
3	-86.60	T7	5.84	2.58	4.74	3.26	1.10
T11	-95.80	T7	5.84	5.04	10.44	0.79	4.61
1	-91.80	T12	12.81	3.62	7.10	9.19	5.71
2	-83.20	T12	9.17	1.78	3.25	7.39	5.92
3	---	T12	9.17	---	---	---	---
T11	-69.20	T12	2.04	0.35	0.88	1.68	1.16

Çizelge 3.16 incelendiğinde bir nokta hariç ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin, otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinden daha iyi olduğu değerin ise -95.80 dBm olduğu görülmektedir. Bu testin üçgenleme yöntemiyle elde edilen sonuçları Çizelge 3.17'de verilmiştir.

Çizelge 3.17. 8x8 m konumlandırma sonuçları.

Yöntem	Kullanılan Beacon Sinyali	Test Noktası	OMU (m)	HKU (m)
Üçgenleme	1,3,T11	T4	1.08	3.27
	1,3,T11	T7	1.23	5.53
	1,3,T11	T12	6.51	5.06
EKK ile Üçgenleme	1,2,3,T11	T4	---	---
	1,2,3,T11	T7	1.50	6.15
	1,2,3,T11	T12	7.08	7.68

Çizelge 3.17 için test sonuçları incelendiğinde klasik üçgenleme yöntemi için karenin içinde kalan test noktalarında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumların daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Karenin dışındaki noktada ise ortam şartlarına göre hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı durum daha iyi sonuç vermiştir. Üçgenleme yöntemiyle birlikte EKK yöntemi de kullanılarak elde edilen sonuçların tamamında otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı durumlar daha iyi sonuç vermiştir.

3.4. Kapalı Alanda Beacon Tabanlı Konumlandırma Uygulaması

Bu uygulama tavan yüksekliği 2.65 m olan yaklaşık 108.00 m^2 bir taban alanına sahip kapalı bir alanda gerçekleştirilmiştir. Üçgenleme yönteminin gerçekleştirildiği çalışma alanına göre kolonlar mevcut olmayıp sadece tavanda bir giriş mevcuttur. Şekil 3.17’de çalışma alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Uygulama alanı.

Bu çalışma alanında iki ana uygulama simüle edilmiştir. Bu işlemler için Matlab yazılımı kullanılmıştır. Birinci uygulama parmak izi yöntemi üzerine kurgulanmıştır. İkincisi ise yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yöntemlerini aynı test noktalarındaki performanslarını değerlendirmek için kurgulanmıştır. Bu bölümde yapılan uygulamalar çok yönlü tasarlanmış olup buradaki çalışmanın amacı:

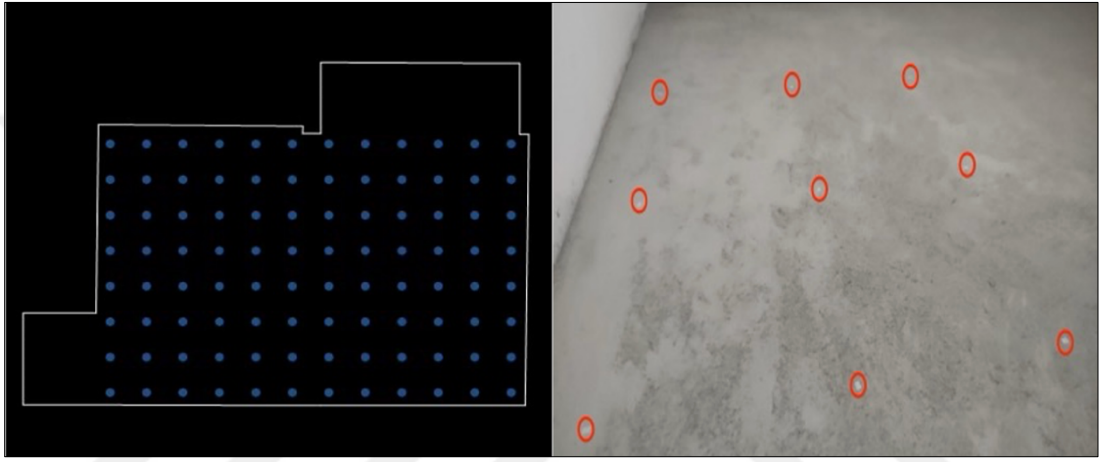
- 1- Parmak izi yönteminin konumlandırma performansının Beacon tabanlı olarak test edilmesi,
- 2- Parmak izi yönteminin Beacon sayısına göre test edilmesi ve alan büyüklüğüne uygun optimum Beacon sayısının belirlenmesi,
- 3- Parmak izi yönteminde veri toplama yönünün bu yöntemdeki konumlandırma performansına etkilerinin analiz edilmesi,
- 4- Parmak izi yönteminde veri toplama noktalarının sayısının bu yöntemdeki konumlandırma performansına etkilerinin analiz edilmesi,
- 5- Parmak izi yönteminde veri toplama yüksekliklerinin konumlandırma performansına etkilerinin analiz edilmesi,
- 6- Parmak izi yönteminde; elde edilen Beacon sinyallerindeki gürültüyü elemine ederek konumlandırmaya etkisinin analiz edilmesi,
- 7- Ortam koşullarına göre elde edilen mesafe bilgisinin farklı tahmin yöntemleriyle doğruluğunun artırılması,
- 8- Daha önce üçgenleme yöntemi için yapılan uygulamalarda; konumlandırma performansına etki eden kısıtlamaların azaltılması,
- 9- Tez çalışması kapsamında kullanılan konumlandırma yöntemlerinin aynı test noktalarında performanslarının değerlendirilmesi olarak planlanmıştır.

3.4.1. Parmak izi yöntemiyle Beacon tabanlı konumlandırma

Parmak izi yöntemi Bölüm 2.3.3'te açıklandığı gibi çevrim dışı ve çevrim içi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Çevrim dışı aşamada, çalışma sahasından belirli aralıklarla veriler toplanır ve bu veriler kullanılacak sınıflandırma yöntemine göre eğitilir. Çevrim içi aşamada ise sınıflandırma yöntemleriyle konumlandırma gerçekleştirilir. Çevrim dışı aşamada üstünde mutabık kalınan bir veri toplama yöntemi ve veri toplama aralığı bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra Özdemir (2020)'nin çalışmasında açıkladığı veri toplama yöntemleri noktadan noktaya manuel kalibrasyon, yürürken ölçme, yarı denetimli öğrenme ve sensör tabanlı yöntemin yanı sıra Doğancı (2008)'in çalışmasında açıkladığı statik ve dinamik süreçler de bu yöntemin çevrim dışı aşamasında veri toplama yöntemiyle ilgili bilgiler sunmaktadır. Veri toplama aralığı ise bu yöntemin konumlandırma doğruluğunu direkt olarak belirleyen önemli etkenlerden biridir. Çalışma alanı çok sık aralıklara bölünüp veri toplanması zaman alıcı ve maliyetli bir durumun ortaya çıkmasına neden olabilir. Daha az aralıklarla veriler toplanması ise

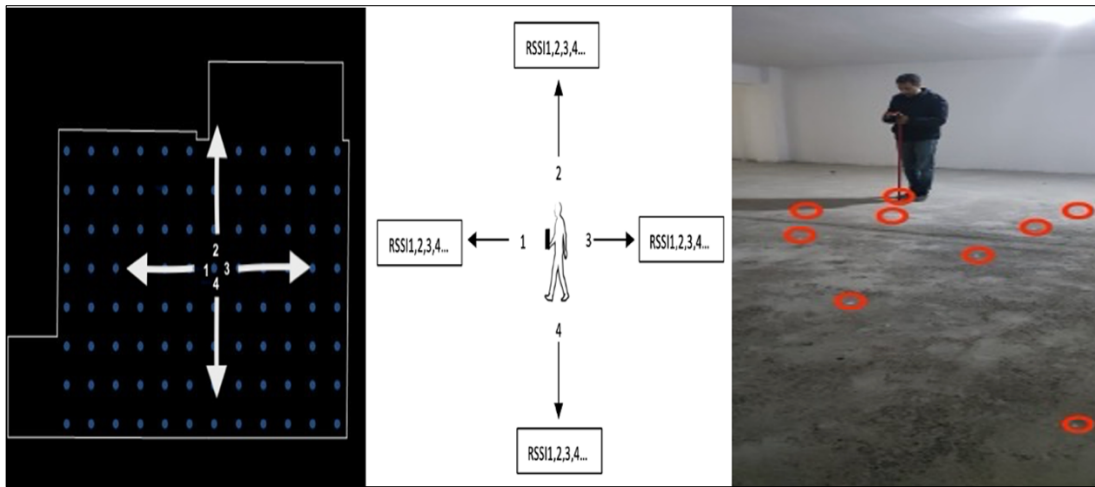
konumlandırma doğruluğunun bozulmasına neden olabilir (Molina ve diğ., 2018; Zhang ve Cai, 2018, Dinh ve diğ., 2020). Çevrim dışı aşamada kapalı alanın yapısal değişikliklerine, içerisindeki nesne ve insan sirkülasyonuna uyum sağlayabilecek ve bu değişikliklere hızlı cevap verebilecek bir veri tabanı oluşturulması önemlidir (Özdemir, 2020).

Parmak izi yönteminde bu durumlar göz önünde bulundurularak çevrim dışı eğitim aşaması için çalışma alanı, 1 m aralıklara bölünmüş ve 96 adet homojen dağılımlı veri toplama noktası oluşturulmuştur. Veri toplama noktaları Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Parmak izi yöntemi için veri toplama noktaları.

Çalışma alanında belirlenen 96 adet veri toplama noktasında veriler, yürüme hızı (5 km/s) dikkate alınarak her bir noktada dört yönlü olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.19’da veri toplama yönleri gösterilmiştir.



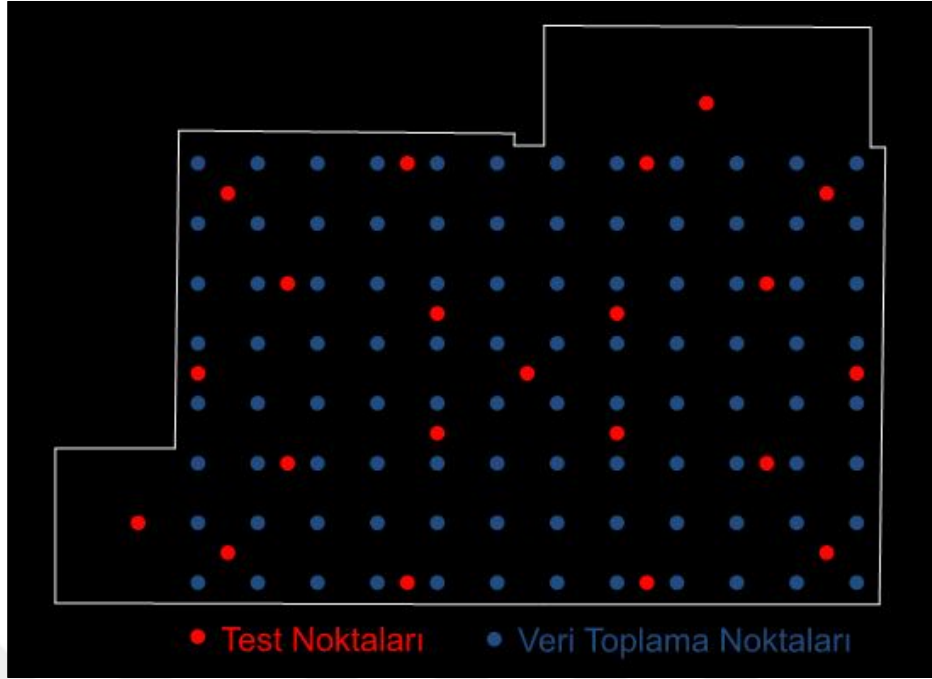
Şekil 3.19. Parmak izi yöntemi için veri toplama yönleri.

Veri toplama noktalarında veriler, akıllı bir mobil telefonla kaydedilmiştir. Bu işlem için Android tabanlı veri toplama yazılımı kullanılmıştır. Veri toplama yazılımı Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Parmak izi yöntemi için veri toplama yazılımı.

Çevrim içi aşamada sınıflandırma yönteminin konumlandırma performansını belirlemek için 21 test noktası belirlenmiştir. Test noktalarının uygulama alanına dağılımı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Parmak izi yöntemi için test noktaları.

Çevrim dışı aşamada toplanan veriler, kullanılacak sınıflandırma yöntemine göre çevrim içi aşamada konum tahmini için değerlendirilecektir. Bu çalışmada sınıflandırma yöntemi olarak NN, KNN, WKNN ve YSA yöntemleri kullanılmıştır. Eğitim aşamasında toplanan veriler, sınıflandırma yöntemlerine girdi verisi olarak hazırlanmıştır. Her bir veri toplama noktasında dört yönlü toplanan veriler Beacon sinyal sayısına göre hazır hale getirilmiştir. Girdi verisi olarak veri toplama noktalarındaki dört yönlü toplanan sinyaller, bu sinyallerin ortalamaları, standart sapmaları alınmıştır. Girdi verisine karşılık çıktı verisi, veri toplama noktalarının X ve Y koordinatları olarak ayrı ayrı alınmıştır. Çizelge 3.18’de sınıflandırma yöntemleri için dört Beacon’lı girdi ve çıktı veri örneği gösterilmiştir.

Çizelge 3.18. Sınıflandırma yöntemleri için girdi ve çıktı verisi.

RSSI1	RSSI2	RSSI3	RSSI4	Ortalama RSSI	Standart Sapma RSSI	X Koordinatı	Y Koordinatı
-92	-89	-80	-88	-87	5	22.91	84.19
-96	-89	-84	-84	-88	6	22.91	84.19
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.

Çevrim dışı aşamada eğitilen veriler, çevrim içi aşamada sınıflandırma yöntemlerine göre test noktalarında elde edilen RSSI sinyalleriyle karşılaştırılmış ve konum bilgisi elde

edilmiştir. Test noktasının konum bilgisiyle sınıflandırma yöntemine göre elde edilen konum bilgisi arasındaki uzaklıkların ortalaması, standart sapmaları ve RMSE (Root Mean Square Error, Kök Ortalama Kare Hatası) değerleri çizelgelere yansıtılmıştır. T_K , test noktasının konumunu; T_H , test noktasının hesaplanan konumunu; k ve N veri sayısı olmak üzere Denklem (3.9)-(11)'de değerlendirme ölçütlerinin matematiksel ifadesi gösterilmiştir.

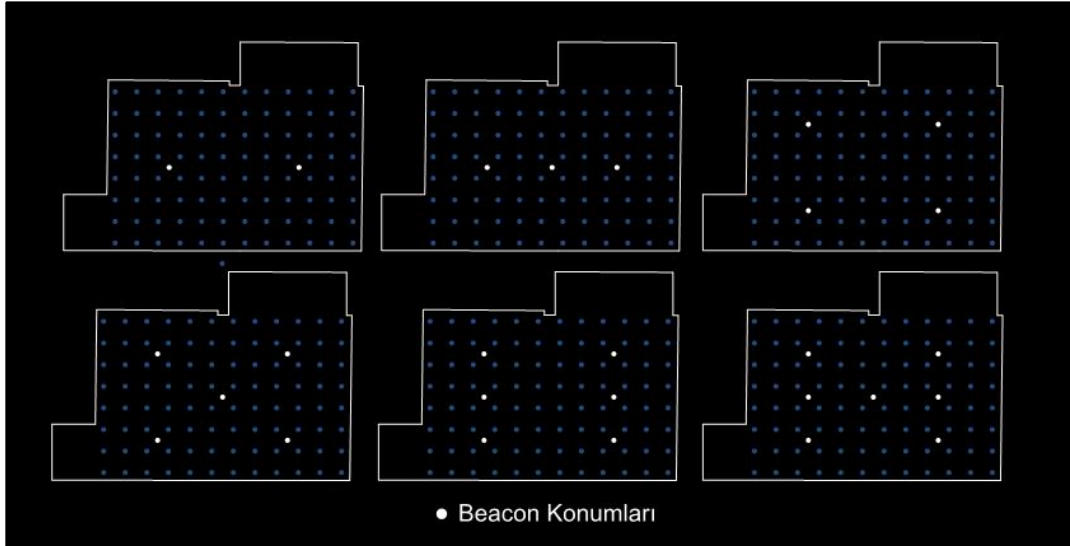
$$\text{Ortalama } (O) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (T_K - T_H) \quad (3.9)$$

$$\text{Standart Sapma} = \sqrt{\frac{\sum ((T_K - T_H) - O)^2}{N-1}} \quad (3.10)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (T_K - T_H)^2} \quad (3.11)$$

3.4.1.1. Beacon sayısının konumlandırma doğruluğuna etkisi

Parmak izi yöntemi için yapılan çalışmada, çalışma sahasında kullanılacak optimum Beacon sayısını belirlemek adına altı farklı yerleşim taslağına göre eğitim ve konumlandırma aşaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan yerleşim taslakları Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Parmak izi yöntemi için Beacon yerleşim taslağı.

Beacon sayısına göre oluşturulan yerleşim taslakları baz alınarak yapılan konumlandırmada; NN, KNN ve WKNN için test sonuçları Çizelge 3.19’da gösterilmiştir,

Çizelge 3.19. Beacon sayısına göre NN,KNN ve WKNN için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Yöntem	Ortalama (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
2	NN	5.68	2.57	6.23
	KNN3	5.80	2.89	6.47
	KNN5	5.75	2.96	6.46
	WKNN3	5.98	2.79	6.60
	WKNN5	5.52	2.83	6.19
3	NN	<u>4.83</u>	<u>3.32</u>	<u>5.85</u>
	KNN3	5.99	3.43	6.90
	KNN5	5.43	3.37	6.38
	WKNN3	5.18	3.45	6.22
	WKNN5	5.14	3.29	6.09
4	NN	5.04	2.82	5.77
	KNN3	5.14	2.87	5.87
	KNN5	5.19	3.08	6.02
	WKNN3	4.90	2.71	5.59
	WKNN5	4.94	2.67	5.60
5	NN	5.56	2.82	6.22
	KNN3	5.49	2.81	5.16
	KNN5	5.24	2.83	5.95
	WKNN3	5.24	2.61	5.85
	WKNN5	5.12	2.46	5.67
6	NN	5.62	2.98	6.35
	KNN3	5.76	3.35	6.66
	KNN5	5.75	3.19	6.56
	WKNN3	5.68	3.10	6.46
	WKNN5	5.74	3.02	6.48
7	NN	5.19	2.70	5.84
	KNN3	5.83	2.97	6.53
	KNN5	5.70	3.09	6.48
	WKNN3	5.53	2.75	6.16
	WKNN5	5.40	3.01	6.18

Çizelge 3.19 incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalamasını NN sınıflandırma yöntemiyle üç Beacon diziliimli sonuç vermiştir. YSA için test sonuçları Çizelge 3.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.20. Beacon sayısına göre YSA için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Ortalama (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
2	10	Tansig	4.42	2.02	4.86
3	10	Tansig	<u>4.02</u>	<u>1.77</u>	<u>4.39</u>
4	10	Tansig	4.12	1.88	4.52
5	10	Tansig	4.24	1.59	4.53
6	10	Tansig	4.51	1.95	4.91
7	10	Tansig	4.92	2.15	5.36

Çizelge 3.20 incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalamasını yine üç Beacon dizilimli sonuç vermiştir.

3.4.1.2. Veri toplama yönünün konum doğruluğuna etkisi

Parmak izi yöntemi için dört yönlü elde edilen veriler test noktalarında Bölüm 3.4.1.1’de değerlendirilmiş ve konum farklarının ortalamasına göre en iyi konumlandırma doğruluğunu, üç Beacon dizilimli sonuç vermiştir. Üç Beacon diziliminde elde edilen veriler, veri toplama yönlerinin konumlandırma doğruluğuna etkisini incelemek için aynı sınıflandırma yöntemleriyle tek yönlü olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. NN, KNN ve WKNN için test sonuçları Çizelge 3.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.21. Veri toplama yönlerine göre NN,KNN ve WKNN için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Veri Toplama Yönü	Yöntem	Ortalama (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
3	1	NN	4.11	2.74	4.90
		KNN3	4.95	2.57	5.55
		KNN5	5.09	3.07	5.91
		WKNN3	4.13	2.72	4.91
		WKNN5	4.16	2.78	4.91
3	2	NN	4.14	2.98	5.06
		KNN3	4.79	3.07	5.65
		KNN5	4.10	3.11	5.10
		WKNN3	4.17	3.00	5.09
		WKNN5	3.75	3.06	4.79
3	3	NN	3.76	3.12	4.84
		KNN3	5.16	3.11	5.99
		KNN5	4.71	3.00	5.40
		WKNN3	3.86	2.93	4.81
		WKNN5	3.90	2.95	4.85
3	4	NN	3.37	1.75	3.77
		KNN3	3.90	2.85	4.79
		KNN5	3.83	2.90	4.76
		WKNN3	3.79	2.01	4.26
		WKNN5	3.82	1.84	4.22

Çizelge 3.21 incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalamasını dört yönünde toplanan ve test edilen NN sınıflandırma yöntemi vermiştir. Farklı yönlerden ve aynı sınıflandırma yöntemiyle elde edilen konum farklarının ortalamaları arasında 1.26 m'ye kadar varan (bir ve dört yönü arasında, KNN5) değişiklikler gözlemlenmektedir. YSA yöntemi için farklı yönlerden elde edilen konumlandırma sonuçları Çizelge 3.22'de gösterilmiştir.

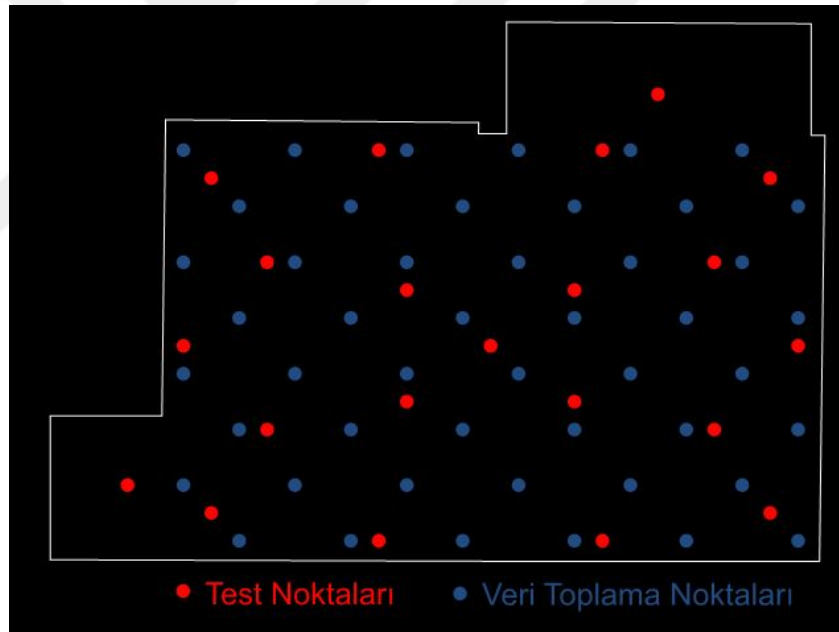
Çizelge 3.22. Veri toplama yönlerine göre YSA için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Veri Toplama Yönü	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Ortalama (m)	Standart Sapma(m)	RMSE (m)
3	1	10	Tansig	4.30	1.69	4.60
	2	10	Tansig	3.63	2.03	4.13
	3	10	Tansig	3.79	2.26	4.38
	4	10	Tansig	3.45	1.34	3.69

Çizelge 3.22 incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalamasını dört yönünde toplanan YSA yöntemi vermiştir. Farklı yönlerden ve aynı sınıflandırma yöntemiyle elde edilen konum farklarının ortalamaları arasında 85 *cm*'ye kadar varan (bir ve dört yönü arasında) değişiklikler gözlemlenmektedir.

3.4.1.3. Veri toplama aralıklarının konum doğruluğuna etkisi

Parmak izi yöntemi için dört yönlü elde edilen veriler test noktalarında Bölüm 3.4.1.1'de değerlendirilmiş ve konum farklarının ortalamasına göre en iyi sonucu üç Beacon dizilimli sonuç vermiştir. Üç Beacon diziliminde eğitim aşamasında 1 *m* aralıkla 96 adet veri toplama noktasıyla dört yönlü elde edilen veriler, bu testte 2 *m* aralıkla 48 adet veri toplama noktasıyla yine dört yönlü olarak değerlendirilmiştir. Şekil 3.23'te eğitim ve test noktalarının çalışma alanına dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Eğitim ve test noktaları

Konumlandırma aşaması için NN, KNN ve WKNN test sonuçları Çizelge 3.23'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.23. Veri toplama aralıklarına göre NN,KNN ve WKNN için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Veri Nokta Sayısı	Yöntem	Ortalama (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
3	48	NN	5.07	3.30	6.04
		KNN3	5.26	3.11	6.11
		KNN5	5.55	3.29	6.44
		WKNN3	5.16	3.28	6.10
		WKNN5	5.16	3.26	6.09
3	96	NN	4.83	3.32	5.85
		KNN3	5.99	3.43	6.90
		KNN5	5.43	3.37	6.38
		WKNN3	5.18	3.45	6.22
		WKNN5	5.14	3.29	6.09

Çizelge 3.23 incelendiğinde eğitim aşamasında 48 adet veri toplama noktasıyla toplanan verilerin konumlandırma aşamasındaki test sonuçları incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalamasını NN sınıflandırma yöntemi vermiştir. Daha önce 96 adet veri toplama noktasıyla toplanan verilerin test sonuçlarıyla kıyaslandığında NN yöntemi daha çok veri toplama noktasıyla iyi sonuç verirken (24 *cm* daha iyi), KNN3 yöntemi daha az veriyle daha iyi sonuç (73 *cm* daha iyi) vermiştir. Diğer yöntemlerde ise en fazla 12 *cm* (KNN5) değişiklik meydana gelmiştir. YSA yöntemi için konumlandırma sonuçları Çizelge 3.24’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.24. Veri toplama aralıklarına göre YSA için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Veri Nokta Sayısı	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Ortalama (m)	Standart Sapma(m)	RMSE (m)
3	48	10	Tansig	4.24	1.84	4.61
3	96	10	Tansig	4.02	1.77	4.39

Çizelge 3.24 incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalaması, 48 adet veri toplama noktasına kıyasla 22 *cm* daha iyi sonuç veren 96 adet veri toplama noktasıyla elde edilmiştir.

3.4.1.4. Veri toplama yüksekliklerinin konum doğruluğuna etkisi

Bu çalışmada veri toplama yüksekliklerinin konumlandırma doğruluğuna etkilerini incelemek için 4x4 *m* Beacon diziliminde kullanıcı, test noktasında akıllı

telefonla zeminden 1.00 m, 1.15 m ve 1.30 m olmak üzere üç farklı yükseklikte verileri kaydetmiştir. Üç farklı veri toplama yüksekliğine göre elde edilen konumlandırma sonuçları NN, KNN ve WKNN yöntemleri için Çizelge 3.25'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.25. Veri toplama yüksekliklerine göre NN, KNN ve WKNN test sonuçları.

Beacon Sayısı	Veri Toplama Yükseklikleri (m)	Yöntem	Ortalama (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
4	1.00	NN	5.10	2.79	5.81
		KNN3	5.35	3.07	6.15
		KNN5	5.43	3.27	6.33
		WKNN3	5.06	2.81	5.78
		WKNN5	5.38	2.92	6.11
4	1.15	NN	5.04	2.82	5.77
		KNN3	5.14	2.87	5.87
		KNN5	5.19	3.08	6.02
		WKNN3	4.90	2.71	5.59
		WKNN5	4.94	2.67	5.60
4	1.30	NN	5.05	2.79	5.76
		KNN3	4.85	2.76	5.57
		KNN5	5.02	3.01	5.85
		WKNN3	4.92	2.85	5.68
		WKNN5	4.87	3.09	5.76

Çizelge 3.25 incelendiğinde en iyi konum farklarının ortalaması, 1.30 m yüksekliğinde KNN3 sınıflandırma yönteminde elde edilmiştir. Farklı veri toplama yüksekliklerinde elde edilen konum doğrulukları için aynı sınıflandırma yöntemi baz alındığında konum farklarının ortalamasında 51 cm'ye varan (1.00-1.30 m, WKNN5) değişiklikler gözlemlenmektedir. YSA yöntemi için üç farklı veri toplama yüksekliğine göre elde edilen konumlandırma sonuçları Çizelge 3.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.26. Veri toplama yüksekliklerine göre YSA için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Veri Toplama Yükseklikleri (m)	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Ortalama (m)	Standart Sapma(m)	RMSE (m)
4	1.00	10	Tansig	4.18	1.92	4.59
	1.15	10	Tansig	4.12	1.88	4.52
	1.30	10	Tansig	4.13	1.75	4.48

Çizelge 3.26 incelendiğinde YSA yöntemi için en iyi sonuç 1.15 m veri toplama yüksekliğinde elde edilmiştir. YSA yönteminde veri toplama yüksekliklerinin konum farklarının ortalamasına etkisi en fazla 6 cm olmuştur.

3.4.1.5. Konumlandırma doğruluğunun iyileştirilmesi

Bu testte Beacon'lardan gelen RSSI sinyallerindeki gürültüyü elemine etmek için KF kullanılmıştır. Eğitim ve test noktalarında dört yönlü olarak elde edilen RSSI sinyalleri, nokta bazlı filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra elde edilen RSSI sinyalleri eğitim ve konumlandırma aşaması için sınıflandırma yöntemleriyle değerlendirilmiştir.

Parmak izi yöntemi için dört yönlü elde edilen veriler konumlandırma taslaklarına göre test noktalarında Bölüm 3.4.1.1'de değerlendirilmiş ve konum farklarının ortalamasına göre en iyi konumlandırma doğruluğunu, üç Beacon dizilimli sonuç vermiştir. Üç Beacon diziliminde elde edilen sonuçların konumlandırma doğruluğunu arttırmak adına veriler, KF ile tekrardan değerlendirilmiş NN, KNN ve WKNN için konumlandırma sonuçları Çizelge 3.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.27. KF kullanımında NN, KNN ve WKNN için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Yöntem	Ortalama (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
3	NN	4.83	3.32	5.85
	KNN3	5.99	3.43	6.90
	KNN5	5.43	3.37	6.38
	WKNN3	5.18	3.45	6.21
	WKNN5	5.14	3.29	6.09
3 (KF)	NN	<u>4.43</u>	<u>3.16</u>	<u>5.43</u>

Çizelge 3.27 incelendiğinde KF öncesi konum farklarının ortalamalarında en iyi sonuç 4.83 m iken KF sonrası aynı sınıflandırma yönteminde 40 cm'lik iyileştirme gözlemlenmiştir. YSA yöntemi için KF ile yapılan değerlendirmelerin sonuçları Çizelge 3.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.28. KF kullanımında YSA için test sonuçları.

Beacon Sayısı	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Ortalama (m)	Standart Sapma(m)	RMSE (m)
3	10	Tansig	4.02	1.77	4.39
3 (KF)	10	Tansig	3.99	1.83	4.38

Çizelge 3.28 incelendiğinde KF ile elde edilen konum farklarının ortalamalarında aynı YSA yapısında 3 cm'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir.

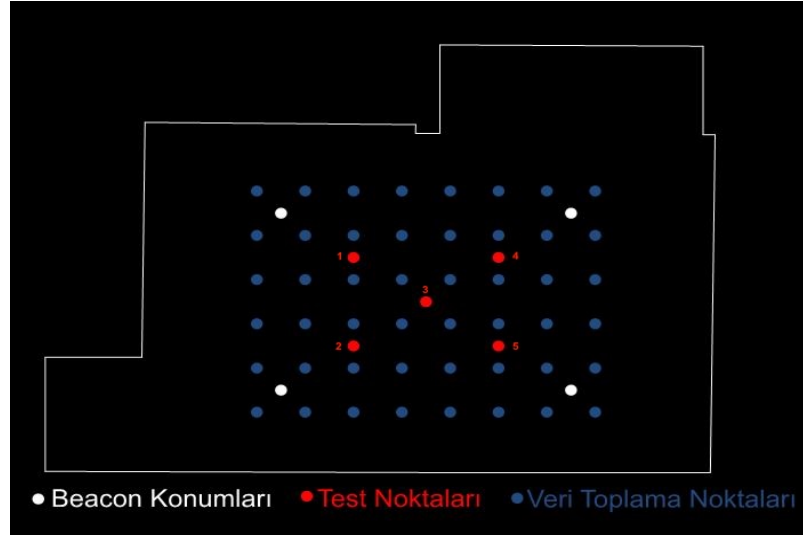
Parmak izi yöntemi için yapılan testlerin sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde homojen bir konum doğruluğu elde edilemediğini, nokta bazlı elde edilen verilerin düzensiz ve değişimlerinin fazla olduğunu çizelgelerde yer alan standart sapma ve RMSE değerlerinin değişimleri göstermektedir.

3.4.2. Beacon tabanlı konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Bu bölümde yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yöntemlerinin konumlandırma performansları kıyaslanmıştır. Üç yöntem için de sinyaldeki gürültüyü azaltmak için KF kullanılmıştır. Yakınlık yöntemi için ortam şartlarına göre belirlenen A ve n değerleri üçgenleme yönteminde de kullanılmıştır.

Üçgenleme yöntemi; otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisi, ortam şartlarına göre elde edilen mesafe bilgisi, KF kullanılarak elde edilen RSSI sinyalleri, filtresiz RSSI sinyalleri, EKK yöntemi ve en güçlü üç Beacon sinyalinin değerlendirildiği klasik üçgenleme yöntemi baz alınarak test edilmiştir.

Parmak izi yönteminde ise uygulama alanı ve diğer konumlandırma yöntemleriyle kıyaslama durumu göz önünde bulundurularak dört Beacon diziliminde elde edilen veriler kullanılmıştır. Eğitim aşamasında çalışma alanının tamamı yerine, test alanının gerçekleştirildiği bölümün RSSI sinyalleri kullanılmıştır. Parmak izi yöntemi için veri toplama aralığı 1 m alınmıştır. Test alanının boyutları 7x5 m , taban alanı 35.00 m^2 'dir. Beacon dizilimleri ise 6x4 m olmak üzere kapalı alanın tavanına yerleştirilmiştir. Konumlandırma taslağı Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Konumlandırma taslağı.

3.4.2.1. Yakınlık yöntemi

Yakınlık yöntemi için yapılan uygulamalarda veri toplama noktalarından elde edilen dört yönlü RSSI sinyalleri, polinom enterpolasyonu ve YSA algoritması kullanılarak ortam şartlarına göre A ve n değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisiyle Beaconlar'dan otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin, Beacon'lara olan mesafesi üç boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Beş test noktasında dört Beacon kullanılarak dört yönlü 80 mesafe bilgisi elde edilmiştir. A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan 80 mesafe bilgisiyle Beaconlar'dan otomatik olarak elde edilen 80 mesafe bilgisinin, kullanıcı ile Beacon arasında olması gereken gerçek mesafeyle farklarının mutlak değerlerinin ortalamaları, standart sapmaları ve RMSE değerleri çizelgelere yansıtılmıştır. Bu durum Denklem (3.8) ve (3.9)'da açıklanmıştır.

$$D_h = |x_g - x_h| \quad (3.8)$$

$$D_o = |x_g - x_o| \quad (3.9)$$

Denklem (3.8) ve (3.9)'da x_g ; kullanıcı ile Beacon arasında olması gereken gerçek mesafeyi, x_h ; ortam koşullarına göre hesaplanan mesafeyi, D_h ; olması gereken gerçek mesafeyle hesaplanan mesafe arasındaki farkın mutlak değerini, x_o ; Beaconlar'dan otomatik olarak elde edilen mesafeyi, D_o ; olması gereken gerçek mesafeyle Beaconlardan otomatik olarak elde edilen mesafeyle arasındaki farkın mutlak değerini temsil etmektedir.

Polinom enterpolasyonunda girdi verisi olarak veri toplama noktalarındaki kullanıcının Beacon'lara olan uzaklıkları ve bu uzaklıkların RSSI değerleri alınmıştır. Toplamda 48 veri toplama noktasının dört Beacon'a dört yönlü olan uzaklıkları ve bu uzaklıkların RSSI değerleri göz önüne alındığında 768 uzaklık ve RSSI değeri, polinom enterpolasyonunda girdi verisi olarak değerlendirilmiştir. Polinomun derecesine göre elde edilen 1 m 'den 10 m 'ye kadar olan RSSI değerleri Bölüm 3.3.1'de gösterildiği gibi kullanılarak önce n değeri daha sonra ise test noktalarının Beacon'lara olan mesafe değerleri elde edilmiştir.

YSA yöntemi için ise polinom enterpolasyonundan farklı olarak Beacon numaraları da ayırt edici bir özellik olarak girdi verisine eklenmiştir. Polinom enterpolasyonunda olduğu gibi 48 veri toplama noktasının dört Beacon'a dört yönlü olan uzaklıkları, RSSI sinyali gönderen Beacon'ın numarası ve Beacon'a olan uzaklıklarının RSSI değerleriyle birlikte 768 uzaklık, Beacon numarası ve RSSI değeri YSA yöntemi için değerlendirilmiştir. Tahmin kısmında ise gizli katmandaki nöron sayısındaki değişkenliğe göre 1 m 'den 10 m 'ye kadar RSSI değerleri, dört Beacon sinyali için ayrı ayrı tahmin ettirilmiştir. Bölüm 3.3.1'de gösterildiği gibi dört Beacon için 1 m 'den 10 m 'ye kadar elde edilen RSSI değerlerinin ortalamaları kullanılarak test noktalarının Beacon'lara olan mesafe değerleri elde edilmiştir.

Polinom enterpolasyonu ve YSA yöntemi için gösterilen çizelgelerde test noktalarının Beacon'lara olan gerçek mesafesiyle, A ve n değeri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin farklarının mutlak değerlerinin ortalamaları (HMO); yine test noktalarının Beacon'lara olan gerçek mesafesiyle, Beacon'lardan otomatik olarak elde edilen mesafe değerleri arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamaları (BMO) gösterilmiştir. Polinom enterpolasyonu için 9. dereceden sonra n değeri ve HMO değerlerinde aşırı değişkenlikler meydana geldiğinden çizelgelerde 9. dereceye kadar gösterilmiştir. Polinom enterpolasyonu için test sonuçları Çizelge 3.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.29. Polinom enterpolasyonu ile belirlenen A ve n değerinin test sonuçları.

Polinom Derecesi	A (dBm)	n değeri	HMO (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)	BMO (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
1	-74.69	2.05	1.92	1.68	2.54	1.73	1.06	2.03
2	-69.23	2.19	3.24	3.41	4.69	1.73	1.06	2.03
3	-65.74	3.03	1.68	1.42	2.20	1.73	1.06	2.03
4	-62.89	3.08	2.30	2.01	3.05	1.73	1.06	2.03
5	-58.11	4.39	1.12	0.75	1.34	1.73	1.06	2.03
6	<u>-60.17</u>	<u>4.63</u>	<u>0.95</u>	<u>0.69</u>	<u>1.17</u>	1.73	1.06	2.03
7	-46.06	12.13	1.87	1.04	2.14	1.73	1.06	2.03
8	-43.68	10.92	1.61	0.95	1.87	1.73	1.06	2.03
9	-39.61	15.02	1.96	1.07	2.23	1.73	1.06	2.03

Çizelge 3.29 incelendiğinde mesafe tahminlerinin ortalamaları için en doğru sonucu 6. dereceden polinom enterpolasyonunun verdiği görülmektedir.

YSA yöntemi için nöron sayısı değiştirilerek birçok tahmin yapılmıştır. Yapılan tahminler sonucu elde edilen en doğru 10 sonuç çizelgelere yansıtılmıştır. YSA yöntemi için test sonuçları Çizelge 3.30’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.30. YSA kullanılarak belirlenen A ve n değerleri için test sonuçları.

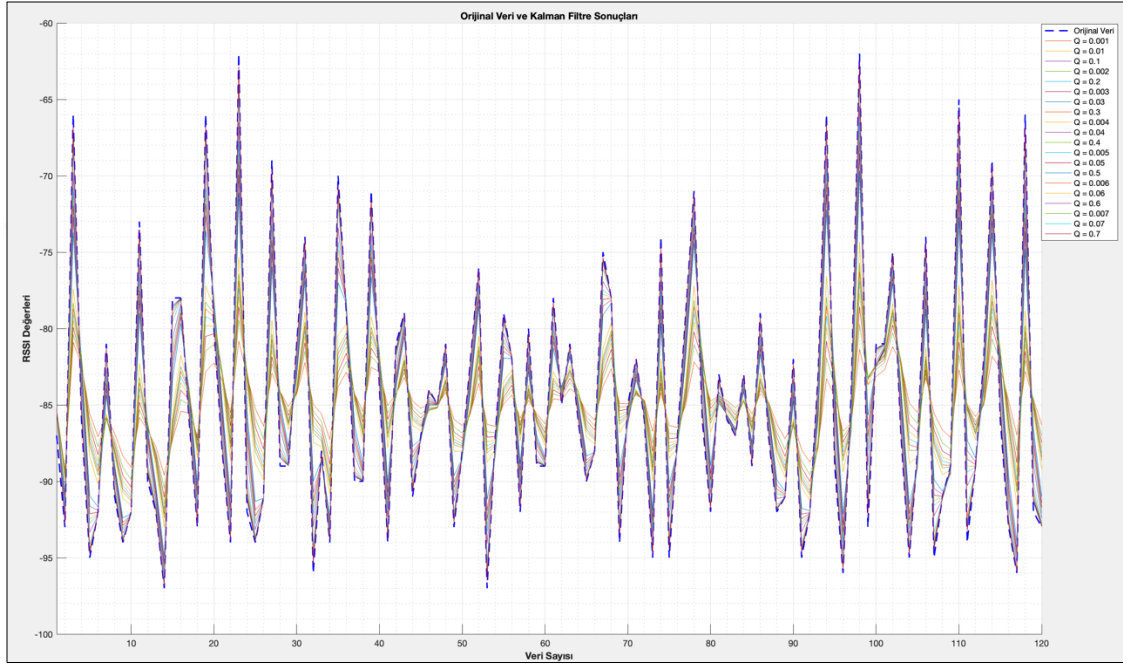
Nöron Sayısı	A (dBm)	n değeri	HMO (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)	BMO (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
2	-66.11	2.72	2.33	2.19	3.20	1.73	1.06	2.03
3	-65.92	2.75	2.30	2.15	3.14	1.73	1.06	2.03
4	-65.41	2.82	2.26	2.08	3.06	1.73	1.06	2.03
5	-63.68	3.12	1.96	1.75	2.59	1.73	1.06	2.03
6	-59.06	3.71	1.81	1.46	2.33	1.73	1.06	2.03
7	<u>-63.24</u>	<u>3.27</u>	<u>1.73</u>	<u>1.47</u>	<u>2.27</u>	1.73	1.06	2.03
8	-63.29	3.14	2.01	1.76	2.66	1.73	1.06	2.03
9	-62.94	3.18	2.01	1.74	2.65	1.73	1.06	2.03
15	-69.76	2.34	2.36	2.36	3.33	1.73	1.06	2.03
30	-65.49	2.88	2.07	1.87	2.78	1.73	1.06	2.03

Çizelge 3.30 incelendiğinde en doğru mesafe tahminlerinin ortalamalarını 7 nöronlu YSA yapısının verdiği görülmektedir.

Polinom enterpolasyonu ve YSA yöntemi kullanılarak yapılan mesafe tahminleri kıyaslandığında mesafe tahminlerinin ortalamalarına göre polinom enterpolasyonu daha

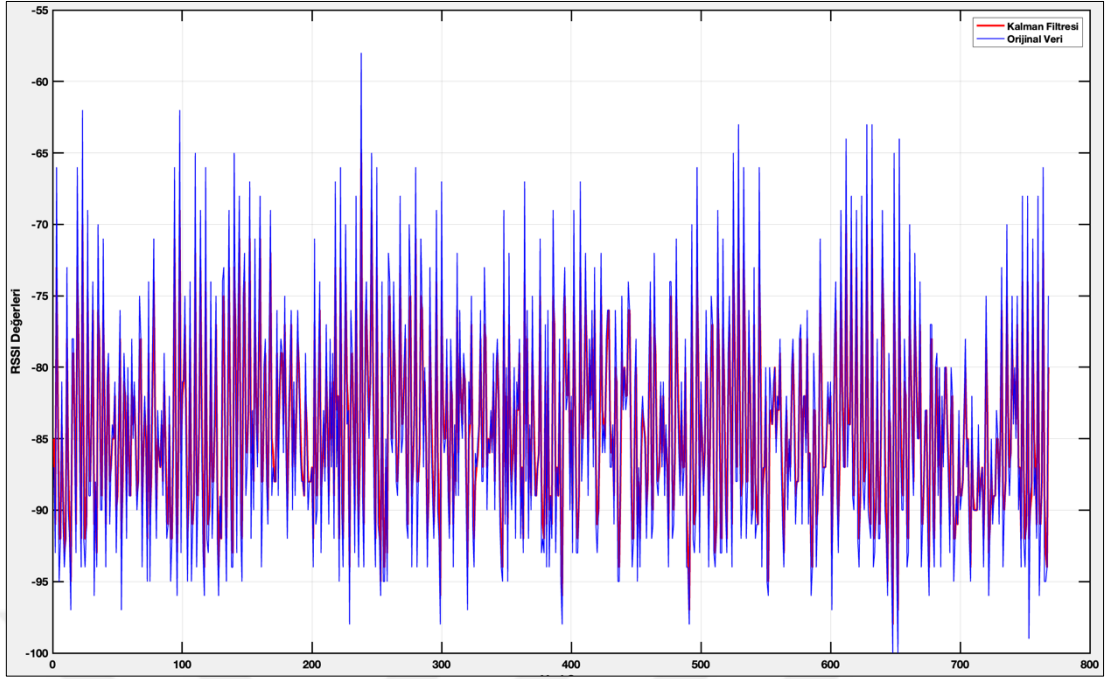
iyi sonuç vermiştir. Bu aşamada RSSI sinyallerindeki gürültüyü elemine etmek için KF kullanılmıştır. Polinom enterpolasyonunda en iyi sonucu veren A (-60.17) ve n (4.63) değerleri KF kullanıldıktan sonra tekrar değerlendirilmiş A ve n değerleri yenilenmiştir.

KF'nin matematiksel yapısında yer alan R ve Q değerlerini belirlemek için birçok deneme yapılmıştır. Orijinal veri üzerinde, sabit bir R değerine bağlı Q değişimlerinin bir kesiti Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



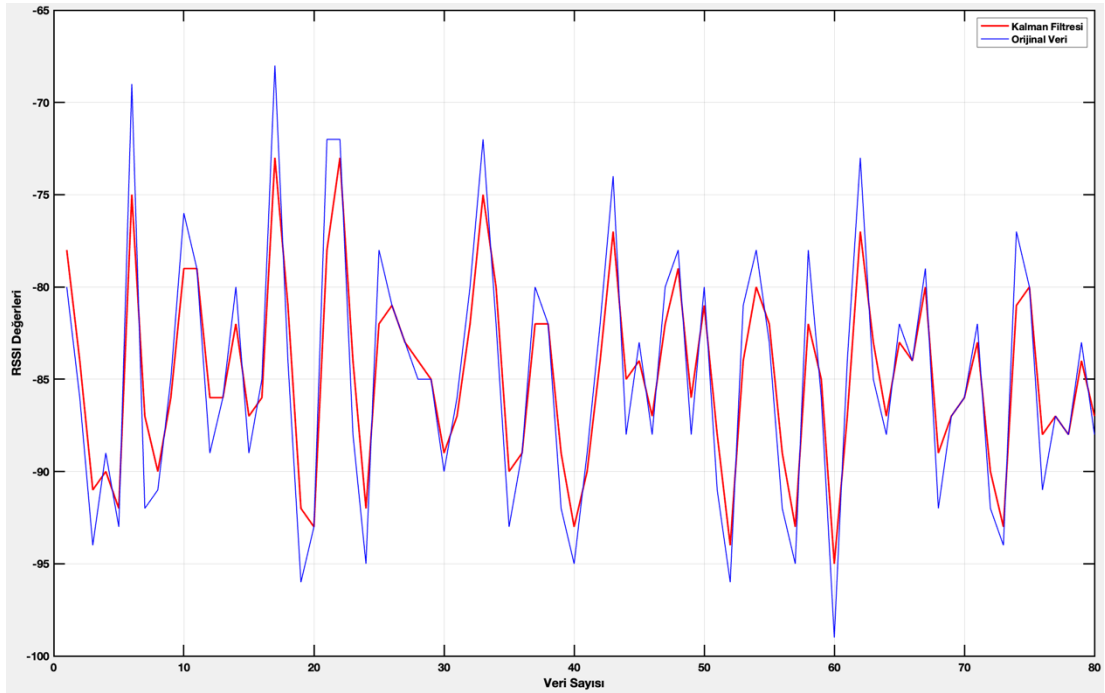
Şekil 3.25. RSSI sinyallerinin farklı Q değerlerinde değişimleri.

Yapılan denemeler sonucunda R değeri 0.02 ve Q değeri 0.04 belirlenmiştir. Bu değerler baz alınarak ön aşamada KF kullanılarak elde edilen RSSI sinyallerinin değişimi Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. RSSI sinyallerinin KF sonrası değişimleri.

Şekil 3.26 incelendiğinde RSSI sinyallerindeki dalgalanmaların azaldığı görülmektedir. Test aşamasında KF kullanılarak elde edilen RSSI sinyallerinin değişimi Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Test noktalarında elde edilen RSSI sinyallerinin KF sonrası değişimleri.

Şekil 3.27 incelendiğinde RSSI sinyallerindeki dalgalanmaların azaldığı görülmektedir. Polinom enterpolasyonu sonucu elde edilen en doğru sonuç, KF kullanımı sonrasında A ve n değerlerinin değişimi için test edilmiştir. Test sonuçları Çizelge 3.31’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.31. Polinom enterpolasyonu ve KF kullanımı için test sonuçları.

A (dBm)	n değeri	HMO (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)	HMO (Kalman Filtreleme) (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
-43.00	6.79	0.90	0.57	1.06	0.83	0.58	1.01
-47.00	6.29	0.90	0.56	1.05	0.82	0.56	0.99
<u>-48.00</u>	<u>6.16</u>	<u>0.89</u>	<u>0.56</u>	<u>1.05</u>	<u>0.82</u>	<u>0.55</u>	<u>0.99</u>
-49.00	6.04	0.89	0.56	1.05	0.83	0.55	0.99
-52.00	5.66	0.90	0.58	1.06	0.84	0.54	1.00
-54.00	5.41	0.90	0.60	1.08	0.85	0.55	1.01
-57.00	5.03	0.92	0.64	1.11	0.87	0.58	1.05
-58.00	4.90	0.93	0.65	1.13	0.88	0.59	1.06
-60.00	4.65	0.95	0.69	1.17	0.91	0.62	1.10
-60.17	4.63	0.95	0.69	1.17	0.91	0.63	1.11

Çizelge 3.31 incelendiğine en doğru mesafe tahminlerinin ortalamaları KF kullanılarak elde edilmiştir. Bu sonuca A ve n değerleri için sırasıyla -48.00 dBm ve 6.16 kullanılarak ulaşılmıştır.

Yakınlık yöntemi için gerçekleştirilen testler genel olarak değerlendirildiğinde KF kullanılması çizelgelerde gösterilen standart sapma ve RMSE değerlerini pozitif yönde etkilemiştir. Bu durum Beacon sinyallerindeki gürültüyü ve RSSI dalgalanmalarını dolayısıyla ani mesafe değişimlerini azaltmıştır. Ayrıca mesafe tahminlerinde polinom enterpolasyonu için doğruluğu arttırmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar üçgenleme yöntemi için yapılacak uygulamalarda altlık olarak kullanılmıştır. Üçgenleme yönteminde yer alan mesafe tahminlerinde, yakınlık yönteminde yapılan testler sonucu elde edilen A (-48.00 dBm) ve n (6.16) değerleri kullanılmıştır.

3.4.2.2. Üçgenleme yöntemi

Bu uygulamada üçgenleme yöntemi için birçok durum (kombinasyon) göz önünde bulundurularak konum hesaplanmıştır. Üçgenleme yöntemi için parmak izi yönteminde kullanıldığı gibi yön bilgisi bu testte dikkate alınmıştır. Beş test noktasının her birinde gerçek konum ile hesaplanan dört konum bilgisinin (her bir yön için) farklarının; ortalamaları, standart sapmaları ve RMSE değerleri çizelgelere yansıtılmıştır. Tüm kombinasyonlarda elde edilen sonuçları kıyaslamak adına beş test noktası için elde edilen sonuçların ortalamaları için de ayrı bir çizelge hazırlanmıştır. Üçgenleme yöntemiyle yapılan konum hesaplama kombinasyonları aşağıda açıklanmıştır.

- 1- Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisiyle birlikte en güçlü üç Beacon sinyalinin kullanıldığı üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmıştır.
- 2- Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisiyle birlikte dört Beacon sinyalinin tamamı kullanılarak EKK yöntemiyle konum hesaplanmıştır.
- 3- A ve n değerleri belirlenerek en güçlü üç Beacon sinyalinin kullanıldığı üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmıştır.
- 4- A ve n değerleri belirlenerek dört Beacon sinyalinin tamamı kullanılarak EKK yöntemiyle birlikte konum hesaplanmıştır.
- 5- KF kullanılarak en güçlü üç Beacon sinyalinin kullanıldığı üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmıştır.
- 6- KF ile dört Beacon sinyalinin tamamı kullanılarak EKK yöntemiyle konum hesaplanmıştır.
- 7- Beacon sinyalleri KF'den geçirilerek A ve n değerleri ile üçgenleme yöntemiyle konum hesaplanmıştır.
- 8- Beacon sinyalleri KF'den geçirilerek A ve n değerleri ile dört Beacon sinyalinin tamamı kullanılarak EKK yöntemiyle konum hesaplanmıştır.

Bu kombinasyonlarda kullanılan A ve n değeri bir önceki bölümde yakınlık yöntemi için hesaplanmış ve bu uygulamalarda kullanılmıştır. Yakınlık yöntemi için en doğru sonucu veren A ve n değerleri sırasıyla -48.00 dBm ve 6.16 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler üçgenleme ve EKK yönteminde ortam koşullarına göre elde edilen mesafe bilgisi için kullanılmıştır.

En güçlü üç Beacon sinyalinin değerlendirildiği üçgenleme yöntemi için test sonuçları Çizelge 3.32'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.32. Üçgenleme yöntemi için test sonuçları.

Beacon Sayısı	A (dBm)	n	Test Noktası	Test Noktasına Ortalama Uzaklık (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
3	--	--	1	2.20	0.17	2.20
			2	2.06	0.32	2.08
			3	1.66	0.11	1.66
			4	2.13	0.45	2.17
			5	2.23	0.17	2.23
Ortalama				2.06		
3	-48.00	6.16	1	2.15	0.20	2.15
			2	2.01	0.36	2.03
			3	1.97	0.31	1.99
			4	1.80	0.19	1.80
			5	2.15	0.13	2.15
Ortalama				2.02		

Çizelge 3.32 incelendiğinde Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisiyle A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı üçgenleme yöntemlerinin konum doğrulukları beş test noktası için değişkenlik göstermektedir. Beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları, her iki durum için incelendiğinde A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı üçgenleme yöntemi 4 cm daha iyi sonuç vermiştir.

Test noktalarında dört Beacon sinyalinin tamamı kullanılarak EKK yöntemiyle hesaplanan konumların test sonuçları Çizelge 3.33'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.33. EKK ile üçgenleme yöntemi için test sonuçları.

Beacon Sayısı	A (dBm)	n	Test Noktası	Test Noktasına Ortalama Uzaklık (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
4 (EKK)	--	--	1	2.16	0.17	2.17
			2	2.08	0.37	2.10
			3	1.77	0.22	1.79
			4	1.96	0.13	1.96
			5	2.31	0.52	2.35
Ortalama				2.06		
4 (EKK)	-48.00	6.16	1	2.14	0.25	2.15
			2	2.07	0.37	2.10
			3	2.02	0.25	2.03
			4	1.80	0.11	1.80
			5	2.23	0.47	2.27
Ortalama				2.05		

Çizelge 3.33 incelendiğinde Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisiyle A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı EKK yöntemlerinin konum doğrulukları beş test noktası için değişkenlik göstermektedir. Beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları, her iki durum için incelendiğinde Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisinin kullanıldığı EKK yöntemi 1 cm daha iyi sonuç vermiştir.

Yapılan uygulamalarda elde edilen RSSI sinyalleri KF'den geçirilmiştir. Bu sinyaller A ve n değerlerini hesaplamak için yakınlık yönteminde kullanılmıştır. Yakınlık yöntemi için en doğru sonucu veren A ve n değerleri sırasıyla -48.00 dBm ve 6.16 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler üçgenleme ve EKK yönteminde ortam koşullarına göre elde edilen mesafe bilgisi için kullanılmıştır. KF ile en güçlü üç Beacon sinyalinin değerlendirildiği üçgenleme yöntemi için test sonuçları Çizelge 3.34'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.34. KF ile üçgenleme yöntemi için test sonuçları.

Beacon Sayısı	A (dBm)	n	Test Noktası	Test Noktasına Ortalama Uzaklık (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
3-KF	--	--	1	2.15	0.18	2.15
			2	2.16	0.25	2.17
			3	1.57	0.05	1.57
			4	2.01	0.20	2.02
			5	2.20	0.09	2.20
Ortalama				2.02		
3-KF	-48.00	6.16	1	2.11	0.31	2.13
			2	2.09	0.36	2.12
			3	1.75	0.16	1.76
			4	1.85	0.18	1.86
			5	2.11	0.15	2.11
Ortalama				1.98		

Çizelge 3.34 incelendiğinde Beacon sinyallerinden otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisiyle A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı üçgenleme yöntemlerinin konum doğrulukları beş test noktası için değişkenlik göstermektedir. Beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları, her iki durum için incelendiğinde A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı üçgenleme yöntemi, 4 cm daha iyi sonuç vermiştir.

Test noktalarında KF ile dört Beacon sinyalinin tamamı kullanılarak EKK yöntemiyle hesaplanan konumların test sonuçları Çizelge 3.35'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.35. EKK ve KF ile üçgenleme yöntemi için test sonuçları.

Beacon Sayısı	A (dBm)	n	Test Noktası	Test Noktasına Ortalama Uzaklık (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
4 (EKK-KF)	--	--	1	2.18	0.04	2.18
			2	2.16	0.24	2.17
			3	1.66	0.10	1.66
			4	1.89	0.23	1.90
			5	2.17	0.36	2.19
Ortalama				2.01		
4 (EKK-KF)	-48.00	6.16	1	2.16	0.04	2.16
			2	2.15	0.34	2.17
			3	1.83	0.15	1.83
			4	1.79	0.14	1.79
			5	2.12	0.42	2.15
Ortalama				2.01		

Çizelge 3.35 incelendiğinde her iki kombinasyonda da konum doğrulukları beş test noktası için değişkenlik göstermektedir. Beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları, her iki durum için incelendiğinde sonuçlarda bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Test noktalarında üçgenleme yöntemi kullanılarak hesaplanan konumların tüm kombinasyonlar için konum doğruluklarının ortalamaları, Çizelge 3.36’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.36. Üçgenleme yöntemleri için genel test sonuçları.

Yöntem	A (dBm)	n	Konum Hatalarının Ortalaması (m)
Üçgenleme	--	--	2.06
Üçgenleme	-48.00	6.16	2.02
EKK	--	--	2.06
EKK	-48.00	6.16	2.05
KF- Üçgenleme	--	--	2.02
KF- Üçgenleme	-48.00	6.16	1.98
KF- EKK-Üçgenleme	--	--	2.01
KF- EKK-Üçgenleme	-48.00	6.16	2.01

Çizelge 3.36 incelendiğinde beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları için en iyi sonucu KF ile A (-48.00) ve n (6.16) değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe bilgisinin kullanıldığı üçgenleme yöntemi vermiştir. Konum doğruluklarının ortalamaları baz alındığında en iyi sonuç ile diğer kombinasyonlar arasında en fazla 8 cm'lik bir fark oluşmuştur. Bu durum konum homojenliğinin sağlanması bakımından önemlidir. Ancak beş test noktası ayrı ayrı ele alındığında çizelgelerde yer alan standart sapma ve RMSE değerlerindeki düzensiz değişimler, her bir test noktasının kendi içerisindeki konum homojenliğini sağlamakta zorlandığını göstermektedir.

3.4.2.3. Parmak izi yöntemi

Parmak izi yöntemi için yapılan bu çalışma Bölüm 3.4.1'de gösterilen uygulamaların dört Beacon'la aynı mekânda daha küçük bir alanda gerçekleştirilmiş halidir. Bu uygulamada verilerin ham hali ve KF'den geçirilmiş hali olmak üzere iki durum sınıflandırma yöntemleri için değerlendirilmiştir. Beş test noktası için verilerin

ham hali kullanılarak elde edilen konumlandırma sonuçları NN, KNN ve WKNN yöntemleri için Çizelge 3.37’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.37. Verilerin ham hali kullanılarak NN,KNN ve WKNN test sonuçları.

Test Noktası	Yöntem	Konum Hatalarının Ortalaması (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
1,2,3,4,5	NN	2.82	1.25	3.07
	KNN3	2.80	1.30	3.08
	KNN5	2.92	1.37	3.21
	WKNN3	2.78	1.33	3.07
	WKNN5	<u>2.73</u>	<u>1.26</u>	<u>3.00</u>

Çizelge 3.37 incelendiğinde beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları için en iyi sonucu WKNN5 sınıflandırma yöntemi vermiştir. WKNN5 sınıflandırma yöntemi için eğitim ve test aşamasında KF kullanılarak elde edilen konum doğruluklarının ortalaması ise Çizelge 3.38’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.38. KF ile NN,KNN ve WKNN için test sonuçları.

Test Noktası	Yöntem	Konum Hatalarının Ortalaması (m)	Standart Sapma (m)	RMSE (m)
1,2,3,4,5	WKNN5	2.57	1.58	3.00

Çizelge 3.38 incelendiğinde ham veri kullanılmasında beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları için en iyi sonucu veren WKNN5 sınıflandırma yöntemi için KF kullanılması 16 cm ’lik bir iyileştirme sağlamıştır. Ancak standart sapma ve RMSE değerlerinde beklenen değişimler gözlemlenmemiştir. Bu durum ise genel anlamda daha doğru sonuçlar elde edildiğini gösterse de konum bazlı değişimlerin KF öncesine göre biraz daha fazla olduğuna işaret etmektedir.

YSA sınıflandırma yöntemi için konum doğruluklarının ortalamaları Çizelge 3.39’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.39. YSA için test sonuçları.

Test Noktaları	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Konum Hatalarının Ortalaması (<i>m</i>)	Standart Sapma(<i>m</i>)	RMSE (<i>m</i>)
1,2,3,4,5	2	Tansig	1.86	0.82	2.03
	3	Tansig	1.84	0.82	2.00
	5	Tansig	2.00	1.25	2.44
	6	Tansig	2.02	0.98	2.23
	8	Tansig	1.83	0.79	1.99
	9	Tansig	1.86	0.84	2.03
	10	Tansig	1.93	0.74	2.06
	13	Tansig	2.02	0.96	2.22
	14	Tansig	2.02	0.89	2.20
	25	Tansig	<u>1.81</u>	<u>1.05</u>	<u>2.08</u>

Çizelge 3.39 incelendiğinde beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları için en iyi sonucu 25 nöronlu YSA yapısı vermiştir. YSA yöntemi için eğitim ve test aşamasında KF kullanılarak elde edilen konum doğruluklarının ortalaması Çizelge 3.40'ta gösterilmiştir.

Çizelge 3.40. KF ile YSA için test sonuçları.

Test Noktaları	Nöron Sayısı	Fonksiyon	Konum Hatalarının Ortalaması (<i>m</i>)	Standart Sapma(<i>m</i>)	RMSE (<i>m</i>)
1,2,3,4,5	25	Tansig	1.77	0.73	1.90

Çizelge 3.40 incelendiğinde ham veri kullanılmasında beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları için en iyi sonucu veren 25 nöronlu YSA yapısı için KF kullanılması 4 *cm*'lik bir iyileştirme sağlamıştır. Bunun yanı sıra standart sapma ve RMSE değerlerinde de iyileşmeler meydana gelmiştir. Bu durum konum doğruluğu ve homojenliğinin sağlanması bakımından önemlidir.

3.4.2.4. Konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada kullanılan Beacon tabanlı konumlandırma yöntemlerini konumlandırma doğruluklarını kıyaslamak için yapılan uygulamalarda sırasıyla yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yöntemi kullanılmıştır. Yakınlık yöntemi için koordinat bilgisi değil mesafe bilgisi elde edilmiştir. Bu mesafe bilgisi, test noktalarındaki kullanıcının mobil alıcısıyla Beacon arasındaki elde edilen (hesaplanan) mesafe değeridir. Yakınlık

yönteminde test noktaları için bu mesafe değerlerinin ortalaması için en iyi sonuç $0.82\ m$ olarak elde edilmiştir.

Üçgenleme ve parmak izi yöntemi için ise test noktalarının koordinatları hesaplanmış ve elde edilen konum bilgisiyle test noktası arasındaki mesafe, değerlendirme ölçütü olarak alınmıştır. Çizelge 3.41’de beş test noktasında en iyi mesafe sonuçlarının ortalamasını veren üçgenleme ve parmak izi yöntemleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.41. Konumlandırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Test Noktası	Yöntem	Konum Hatalarının Ortalaması (m)
1,2,3,4,5	KF-Üçgenleme (A ve n değerleriyle)	1.98
	KF-Parmak izi (YSA)	1.77

Çizelge 3.41 incelendiğinde beş test noktasının konum doğruluklarının ortalamaları için en iyi sonucu parmak izi yöntemi vermiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında Beacon tabanlı tek katlı kapalı alanda navigasyon uygulaması, Beacon tabanlı çok katlı kapalı alanlarda navigasyon uygulaması, kapalı alanda Beacon tabanlı konumlandırma yöntemleriyle (yakınlık, üçgenleme ve parmak izi) ilgili uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Beacon tabanlı konumlandırmada literatürde yer alan ve bir kısmına Bölüm 2.4'te yer verilen sorunlarla bu çalışmanın uygulamaları sırasında karşılaşılmış, kısıtlamalar da paylaşılmıştır.

Bu uygulamalarda Beacon'lardan alınan RSSI sinyallerinin ortam koşullarından etkilenmesi sonuçları değiştirmiştir. Yapılan uygulamalarda bu durum homojen konum doğruluklarının elde edilmesini güçleştirmiştir.

RSSI sinyallerindeki gürültünün elemine edilmesi için KF kullanılması, A ve n değerlerinin belirlenerek elde edilen mesafe değerlerinin doğruluğunun artırılması, matematiksel modellerle konumlandırma yöntemlerinin doğruluğunun artırılması gibi düşünceler gerçekleştirilmiş ve kısmen de olsa başarı sağlanmıştır. Ancak bu durum kullanılan konumlandırma yöntemleriyle birleştirildiğinde yine homojen konum doğruluklarının elde edilmesini güçleştirmiştir.

Konumlandırma işlemi yapılacak ortamın fiziki koşulları, kullanılacak konumlandırma yönteminin performansına direkt olarak etki etmektedir. Farklı mekânlarda aynı alan büyüklüklerinde ve aynı konumlandırma yöntemi kullanılarak yapılan konumlandırma uygulamalarında, farklı konum doğrulukları elde edilmesi bir başka sorun olarak karşımıza çıkmıştır.

Konumlandırma işleminde kullanılacak verilerin elde edilme şekli de (akıllı telefonun özellikleri, Beacon cihazlarının özellikleri, veri toplama yükseklikleri, veri alma yönü vb.) konumlandırma performansını etkileyen bir başka unsur olarak bu çalışmada gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen konumlandırma uygulamaları için Beacon cihazlarının saha yerleşimleri sırasında küçük testler yapılmıştır. Bu işlemle, uygulama sırasında Beacon cihazlarının sağlıklı çalışması sağlanmış ve bu cihazlardan sorunsuz sinyal alınması gerçekleştirilmiştir. Başarıyla yerleştirilen ve bu testleri geçen Beacon cihazlarından sağlıklı sinyal alınsa bile uygulamalar sırasında bütüncül bir yaklaşımla bir güzergahın veya ağı parçası olan birçok Beacon sinyali alınmasıyla birlikte daha önce test edilip arzu edilen sinyal alımlarının gerçekleşmediği durumlarla da karşılaşılmıştır. Bundan dolayı konum doğruluklarının olumsuz etkilediği durumlar gerçekleşmiştir.

Konumlandırma yöntemleri teoride oldukça başarılı görünse de uygulamada ortam şartları ve sinyal kalitesi başta olmak üzere birçok sebebe bağlı olarak beklenen sonuçların elde edilmediği durumlarla da karşılaşmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Kapalı alanlarda konumlandırma sorununu çözmek için birçok teknoloji ve yöntem geliştirilmektedir. Bu çalışmada da bu sorunun çözümüne katkı sunmak için Beacon tabanlı konumlandırma yöntemlerinden yakınlık, üçgenleme ve parmak izi yöntemleri yapılan uygulamalarla incelenmiştir. Bu uygulamalar sırasında konumlandırma doğruluğuna daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi birçok faktör etki etmektedir. Bu faktörleri azaltmak veya yok etmek için birçok matematiksel model, donanım ve hibrit yöntem geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında da yakınlık yönteminin ana unsuru olan Beacon ile kullanıcı (akıllı mobil telefon) arasındaki mesafe, farklı matematiksel modeller kullanılarak ortam koşulları için belirlenmiştir. Bu konumlandırma yöntemi kullanılarak 4.00 m aralıklı Beacon dizilimi ve 2.00 m konum doğruluğuyla tek katlı kapalı alanlarda navigasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamanın daha gelişmiş hali olan çok katlı, daha büyük çok katlı bir kapalı alanda ise 7.00 m ile 12.00 m arasında değişen Beacon dizilimli navigasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kapalı alan büyüdükçe ve Beacon sayısı arttıkça Beacon dizilimi için mesafeler artmakta ve dolayısıyla konum doğruluğu düşmektedir. Belirlenen hedefe ulaşma bakımından tek katlı kapalı alanlarda navigasyon uygulamasının testlerinde %90, çok katlı kapalı alanlarda navigasyon uygulamasının testlerinde ise %95 başarı sağlanmıştır.

Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafe, logaritmik yol kaybı modeline göre belirlenebilmektedir. Bu modelin matematiksel ifadesinde yer alan A ve n değerleri ortam koşullarına göre bu çalışmada belirlenmiştir. Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafenin ortam koşullarına göre belirlenebilmesi için A ve n değerleri polinom enterpolasyonu ve YSA yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan testler sonucunda Beacon ile kullanıcı arasındaki mesafe 6. dereceden polinom enterpolasyonu kullanılarak ortalama 0.95 m doğrulukla, 7 nöronlu YSA yapısı kullanılarak ortalama 1.73 m doğrulukla hesaplanmıştır. Aynı mesafe değeri, Beacon'lardan otomatik olarak ortalama 1.73 m doğrulukla hesaplanmıştır. Aynı ortam koşulları ve test noktaları için daha doğru sonucu veren 6. dereceden polinom enterpolasyonu kullanılarak ortalama 0.95 m doğrulukla elde edilen mesafe değerleri; KF kullanımı sonrasında 0.91 m doğrulukla, hibrit bir yaklaşımla A değerinin revize edilmesi sonucunda ise 0.82 m doğrulukla elde edilmiştir.

Üçgenleme yöntemi için yapılan ilk konumlandırma uygulamasında; Beacon'lerden otomatik olarak elde edilen mesafe değeri ve ortam koşullarına göre A ve n değerleri kullanılarak elde edilen mesafe değeri kullanılarak klasik üçgenleme ve EKK yöntemiyle farklı konumlandırma taslaklarına göre konum hesaplanmıştır. Genel anlamda ortam şartlarına göre A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe değerleri, Beacon'lerden otomatik olarak elde edilen mesafe değerine göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Bu uygulamanın konumlandırma testlerinde ise genel anlamda üç Beacon'ın kullanıldığı klasik üçgenleme yöntemi, EKK yöntemine göre daha iyi sonuç vermiştir. Konumlandırma taslaklarından $3 \times 3 \text{ m}$ ve $4 \times 4 \text{ m}$ olan kare taslaklarda, karenin içerisinde kalan test noktaları için en fazla 1.01 m hata ile konum hesaplanmıştır. Bu konum, Beacon'lerden otomatik olarak elde edilen mesafe değerleri ve en güçlü üç Beacon sinyali kullanılarak elde edilmiştir.

Aynı uygulamada konum hesaplarında; genel anlamda ortam şartlarına göre A ve n değerleri kullanılarak hesaplanan mesafe değerleri daha iyi sonuç vermesine rağmen Beacon'lerden otomatik olarak elde edilen mesafe değeri kullanılarak elde edilen konumlar daha doğru sonuçlar vermiştir. Bu durumun oluşmasında ortam koşullarına göre belirlenen A ve n değerlerinin iyi modellenememesi, ortamın fiziki durumu, test noktaları için veri alma yönünün dikkate alınmaması gibi etkenler sıralanabilir. Ayrıca RSSI değişimlerinin düzensiz olması ve bundan dolayı üçgenleme yönteminin matematiksel alt yapısına homojen değerler sağlanamaması, Beacon'lerden alınan sinyallerin RSSI değerlerinin mesafe bazlı Beacon konumları ile örtüşmemesi gibi sebeplerinde bu durumun oluşmasında birer etken olduğu düşünülmektedir (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Aynı testlerde otomatik değerlerle hesaplanan mesafe bilgisinin daha iyi sonuç verdiği durumlara bakıldığında n değerinin hesaplanması için kullanılan RSSI sinyalleriyle ilişkili olduğu görülmektedir. Çizelge 3.5'te n değerinin hesaplanması için toplanan verilerde 4 m için -83.4 dBm , 5 m için ise -88.9 dBm değeri görülmektedir. Bu değerler arasındaki artış miktarı 1 m ile 2 m arasındaki farktan sonra en büyük artış miktarıdır. Şekil 3.15 dikkatli incelendiğinde bu durum fark edilmektedir. Testlerde 3 m ile 5.5 m arası hariç mesafe tahminlerinde ortam koşullarına göre hesaplanan mesafe bilgisi için daha doğru sonuçlar elde edilirken 3 m ile 5.5 m arası tahminlerde yanıltıcı sonuçlar elde edilmiştir. Beaconlardan otomatik olarak değerlerle elde edilen mesafe bilgisinin daha iyi sonuç verdiği durumların %75'i bu aralıktadır (Çakır ve Doğanalp, 2024).

Tez çalışması kapsamında incelenen konumlandırma yöntemlerinin aynı test noktalarında performanslarını değerlendirmek için yapılan testlerde üçgenleme yöntemiyle elde edilen en iyi sonuç, 1.98 m ortalama konum hatasıyla hesaplanmıştır. Bu doğruluk, KF kullanımıyla birlikte Beacon'la kullanıcı arasındaki mesafe için A ve n değerleri belirlenerek elde edilmiştir. Aynı uygulamada üçgenleme yöntemi için EKK, KF ve otomatik olarak elde edilen mesafe bilgisi kullanarak da testler gerçekleştirilmiştir. Tüm bu testler sonucunda ortalama konum hatasında en fazla 8 cm'lik değişkenlik meydana gelmiştir. Bu değişkenlik daha önce üçgenleme yöntemi için gerçekleştirilen testlere nazaran oldukça azdır. Bunun sebebinin; ortamın fiziksel koşullarının homojen olması (kiriş ve kolonların olmaması), Beacon yerleşimlerinin bir önceki çalışmaya göre duvarlardan daha uzak olması, KF kullanılması ve kullanıcı yönünün testlerde dikkate alınması olduğu düşünülmektedir.

Üçgenleme yönteminde giriş kısmında verilen literatür çalışması da dahil olmak üzere kaynakların birçoğunda veriler iki boyutlu değerlendirilmekte veya bu konuda yeterli bilgi sunulmamaktadır. Bu çalışmada ise üç boyutlu değerlendirilmiştir. Üçüncü boyut ise veri toplama yüksekliği ile tavan yüksekliği arasındaki fark olarak alınmıştır. Üçgenleme yöntemi bu çalışmada, kaynakların birçoğunda olduğu gibi iki boyutlu değerlendirilseydi 1.98 m ortalama konum hatası yerine 1.25 m ortalama konum hatası elde edilecekti. Gerçekte ise bu durum yapılan uygulamayla örtüşmeyecektir.

Parmak izi yöntemi için yapılan konumlandırma uygulamalarında birçok durum test edilmiştir. Bu yöntemde 108.00 m² bir alan için kullanılacak Beacon cihazı sayısını belirlemek için yapılan testlerde en doğru sonuçlar; YSA yöntemi için sonuçlar 4.02 m, NN sınıflandırma yöntemi için 4.83 m'lik konum hatasıyla üç Beacon dizilimli taslakla elde edilmiştir. Veri toplama yönleri de bu yöntemde konum doğruluğuna etki etmektedir. Aynı sınıflandırma yöntemiyle ancak farklı yönlerden elde edilen konum farklarının ortalamaları arasında 1.26 m'ye kadar varan değişkenlikler gözlemlenmiştir. Örneğin üç Beacon dizilimli aynı YSA yapısı kullanılarak sadece dört yönünden elde edilen veriler değerlendirildiğinde konum doğruluklarının ortalaması 3.45 m olmuştur. Ancak gerçekte bu durumun karşılığı yoktur. Veri toplama aralıkları da konum doğruluğuna etki etmektedir. 1 m aralıklarla toplanan verilerle hesaplanan konumların ortalamaları, 2 m aralıklı toplanan verilerle kıyaslandığında 73 cm'ye varan değişkenlikler meydana gelirken bu değişkenlikler kullanılan sınıflandırma yöntemine göre farklılık göstermektedir. Örneğin NN ve YSA yönteminde, 2 m aralıklı toplanan verilerde konum doğruluğu düşerken KNN3 sınıflandırma yönteminde konum doğruluğu artmıştır.

Konum doğruluğuna etki eden bir başka parametre de veri toplama yükseklikleridir. 1.00 m, 1.15 m ve 1.30 m yükseklikte toplanan veriler aynı sınıflandırma yöntemleri kullanılarak kıyaslandığında konum doğruluğunda farklılıklar meydana gelmektedir. Bu farklılıkların miktarı kullanılan sınıflandırma yöntemiyle ilgilidir. Örneğin aynı YSA yapısında konum farklarının ortalamasında, en fazla 5 cm'lik bir fark meydana gelirken WKN5 sınıflandırma yönteminde 51 cm'ye varan (1.00-1.30 m) fark değerleri gözlemlenmiştir. Bu uygulamada yapılan bir başka çalışma ise sinyaldeki gürültüyü elemine etmek için KF kullanılmasıdır. KF kullanılarak aynı Beacon diziliminde ve aynı sınıflandırma yönteminde (NN), konum doğruluklarının ortalamalarında 40 cm iyileştirme elde edilmiştir. YSA sınıflandırma yönteminde ise aynı yapıda 3 cm iyileştirme elde edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında incelenen konumlandırma yöntemlerinin aynı test noktalarında performanslarını değerlendirmek için yapılan uygulamalarda parmak izi yöntemi için test noktalarında elde edilen konum doğruluklarının ortalamalarının tamamında önceki uygulamalara göre (daha büyük ve çok noktayla gerçekleştirilen testler) daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu testlerde en iyi konum doğruluğu, 1.77 m konum hatası ile 25 nöronlu YSA yapısıyla elde edilmiştir. Daha önceki dört dizilimli Beacon sonuçlarıyla kıyaslandığında aynı ortamda ve aynı sınıflandırma yönteminde konum doğruluklarının ortalamasında 2.00 m'den fazla iyileştirmeler meydana gelmiştir. Bu durum daha küçük bir alanda 1 m aralıklı 96 adet veri toplama noktası yerine, yine 1 m aralıklı 48 adet veri toplama noktasının kullanılması ve test noktalarının tamamının dört Beacon diziliminin içerisinde yer almasıyla doğrudan ilgilidir. Veri toplama noktasını daha önceki uygulamalarda 2 m'ye düşürüp 48 adet veri toplama noktasıyla konum tahmini yaptığımızda aynı durum gözlemlenmemiştir.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında yapılan uygulamalar sonucunda birçok veri elde edilerek analizleri yapılmıştır. Dolayısıyla her bir uygulama için ayrı sonuçlar elde edilmiştir.

Beacon tabanlı tek katlı kapalı alanda navigasyon uygulaması için yapılan uygulamaların analizlerinde, bu büyüklükteki kapalı alanlar için kullanılacak konumlandırma yöntemi veya yöntemleri için ön test aşaması yapılması önemlidir. Beacon cihazlarının uygulaması için EUÖ ve GNSS alıcı kullanılması konumlandırma

doğruluğunu arttırması bakımından önerilmektedir. Belirli bir datum ve projeksiyonda kapalı alanın ve mobil uygulamanın haritasının elde edilmesi elde edilecek verinin analizini, yorumlanmasını ve konum bazlı hatalara müdahaleyi kolaylaştırmaktadır (Çakır ve diğ., 2024).

Beacon tabanlı çok katlı kapalı alanlar için yapılan navigasyon uygulamasının analizleri sonucunda aşağıda belirtilen öneriler sunulabilir:

- 1- Bu büyüklükteki kapalı alanlarda, navigasyon uygulaması için ölçme işlemi gerçekleştirilerek harita oluşturulması çok fazla zaman ve maliyet gerektirmektedir. Bu nedenle kat planlarından harita elde edilmesi zaman ve maliyet açısından uygun olmakla birlikte kat planlarının gerçekte kapalı alan ile örtüşmediği durumlar oluşabilmektedir. Bundan dolayı kontrol ölçüsü alınmalı, saha kontrolleri yapılmalı ve harita güncel tutulmalıdır.
- 2- Kapalı alanın fiziki durumu baz alındığında kapalı alanın çok sayıda koridordan oluşması, Beacon saha yerleşimine daha uygun olması, diğer konumlandırma yöntemlerine göre daha basit bir şekilde uygulanıyor olması, konumlandırma hassasiyeti bakımından navigasyon uygulamaları için yeterli olması gibi nedenlerden dolayı yakınlık yönteminin kullanılması önerilmektedir.
- 3- Beacon sinyalleri ortam koşullarından etkilenmektedir. Çok sayıda Beacon sinyalini de kullanıcı düzensiz alabilir. Bu nedenle bu büyüklükteki kapalı alanlarda Beacon'ların saha yerleşimi dikkatli seçilmelidir.
- 4- Sinyal yansımasının etkili olduğu yerlerde konum doğruluğunun olumsuz etkilenmesinden dolayı Beacon'ların saha içindeki yerleşimleri değiştirilmeli (aralarındaki mesafe arttırılmalı) sonuç alınamıyorsa o bölgedeki Beacon sayısı azaltılmalıdır.
- 5- Beacon'ların sahadaki konumlarından dolayı kullanıcı Beacon'a yakın olmasına rağmen bazen bu sinyali alamayabilir. Bu nedenle Beacon sinyalini güvenli bir şekilde alması için Beacon'lar kapalı alanın tavanına yerleştirilmesi daha uygundur. Ancak tavan yüksekliğinin, standart tavan yüksekliğini (2.5 m-3.5 m) çok fazla aştığı durumlarda Beacon'lar duvara da yerleştirilebilir.
- 6- Kullanıcıların yürüme hızı, Beacon'ların saha yerleşiminde göz önünde bulundurulmalıdır.
- 7- Beacon yerleşimlerinin planlama hatası, sinyal karışıklıkları ve yansımaları, ortamın fiziki koşulları gibi durumlardan kaynaklı olarak kapalı alanda Beacon'ın bulunduğu konum ile kullanıcının bulunduğu hedef konum uyuşmayabilir. Bu tip durumlarda

ilgili Beacon'dan sinyal alındığında kullanıcının konumu (hedef konum) yazılım müdahalesiyle olması gereken yerlerde gösterilmelidir.

- 8- Bu çalışmada üretici firma tarafından sağlanan standart A değeri olan -77 ve 350 ms sinyal alma aralığı kullanılmıştır. Kapalı alanın büyük olması nedeniyle farklı A ve n değeri hesaplanmamıştır. Bu değerlerin değiştirilmesi veya hesaplanıp kullanılması durumunda kullanıcı ile Beacon arasındaki mesafenin doğruluğu ve hassasiyeti değişecektir. Ayrıca Beacon'ların kendi içerisinde homojen konum doğruluğunu da olumsuz etkileyecektir. Bu durumla birlikte Beacon'ların sinyal alma aralıklarının değiştirilmesi Beacon'ların pil ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı bu büyüklükteki kapalı alanlar için üretici firmanın sağladığı değerler dışında farklı A ve n değerlerinin belirlenmesi önerilmemektedir. Belirlenecek sinyal alma aralıklarının ise tüm Beacon ağında aynı olması önemlidir.
- 9- Mobil uygulamayı kullanan kullanıcıların Beacon alıcıları (akıllı mobil telefonlar) ve işletim sistemleri farklı olabilmektedir. Bu durum, navigasyon uygulamasında konum bilgisinin elde etme hızını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla standart bir Beacon alıcısı belirlemek oldukça zordur. Bu ve buna benzer durumlarda test aşamasını gerçekleştiren kullanıcıların standartlarına yakın bir tasarım yapılması veya çok farklı mobil telefon ve işletim sistemleriyle navigasyon testleri yapılması önerilmektedir.
- 10- Bu tip navigasyon projelerinde belirli bir datum ve projeksiyonda harita elde edilmesi haritanın güncellemesi, Beacon'ların sahada hassas bir şekilde yerleştirmesi ve veri analizi gibi durumlar için kolaylık sağlamaktadır (Çakır ve diğ., 2024).

Yakınlık yöntemi için yapılan uygulamaların analizlerinde; ortam koşullarına göre A ve n değerinin belirlenmesi, Beacon'ların saha dizilimleri arasındaki mesafeler, kapalı alanın fiziki durumu, RSSI sinyallerinde gürültünün elemine edilmesi gibi durumlar konum doğruluğunu ve hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Yakınlık yöntemiyle yapılacak projelerde bu durumlar göz önünde bulundurulmalı ve mümkünse test edilmelidir.

Üçgenleme yöntemi için yapılan uygulamaların analizlerinde, elde edilen mesafe bilgisinin hassas ve doğru elde edilmesi üçgenleme yöntemi için her zaman hassas ve doğru konum elde edileceği anlamına gelmemelidir. Teoride üç Beacon sinyali bir noktada kesişiyorsa da uygulamada bu durum gerçekleşmeyebilir. Üçgenleme yöntemi için hassas ve doğru konum elde edilmesi ortamın fiziki şartları, Beacon'lardan gelen RSSI sinyallerinin değişkenliğinin az olması, kapalı alanın büyüklüğü gibi etkenlerle doğrudan ilgilidir. Dört veya daha fazla Beacon sinyalinin EKK yöntemi ile

değerlendirilerek konum hesaplanması en güçlü üç Beacon sinyalinin kullanıldığı duruma göre daha kötü konum doğruluğu elde edilmesine neden olabilir. Burada önemli olan dört ve üzeri Beacon'lardan alınan sinyallerin ne kadar hassas ve doğru olacaktır. Doğru ve hassas elde edilen Beacon sinyalleri EKK yönteminin doğruluğuna olumlu katkı sağlayacaktır. RSSI sinyallerindeki gürültünün filtreleme yöntemleriyle azaltılması konum doğruluğu ve homojenliğini artırması bakımından önemlidir.

Parmak izi yöntemi için yapılan uygulamaların analizlerinde; ortamın fiziki durumu, veri toplama şekli, veri toplama yükseklikleri, veri toplama aralıkları, kullanılan sınıflandırma yöntemi ve RSSI sinyallerindeki gürültünün filtrelemesi gibi durumlar konum doğruluğu ve hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Parmak izi yöntemiyle yapılacak projelerde bu durumlar göz önünde bulundurulmalı ve mümkünse test edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ağaya, S. A., 2019, Endüstri 4.0 uyumlu BLE teknolojisi ile endüstriyel işletmelerde IoT tabanlı personel haritalandırma, takip ve yetkilendirme sistemi geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 96.
- Alexandr, A. Anton, D. Mikhail, M. and Ilya, K., 2020, Comparative analysis of indoor positioning methods based on the wireless sensor network of bluetooth low energy beacons, In *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*, Dolgoprudny, Russia, 1-5.
- Ali, Z. Hussain, I. Faisal, M. Nazir, H. M. Hussain, T. Shad, M. Y. Mohamd Shoukry, A. and Hussain Gani, S. 2017, Forecasting drought using multilayer perceptron artificial neural network model, *Advances in meteorology*, 2017(1), 5681308.
- Al Nuaimi, K. and Kamel, H., 2011, A survey of indoor positioning systems and algorithms. In *2011 international conference on innovations in information technology*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 185-190.
- Allurwar, N., Nawale, B. and Patel, S., 2016, Beacon for proximity target marketing, *Int. J. Eng. Comput. Sci*, 15(5), 16359-16364.
- Altın, M. S., 2019, Bluetooth düşük enerji tabanlı hastane takip ve konumlandırma sistemi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 70.
- Anagnostopoulos, G. G. and Deriaz, M., 2014, Accuracy enhancements in indoor localization with the weighted average technique, *SensorComm*, 112-116.
- Arıkan, D. Yıldız, F. ve Makineci, H. B., 2021, Hava lidarı verilerine uygulanan farklı enterpolasyon yöntemlerinin sam doğruluğuna etkisi, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 377-394.
- Arsan, T., 2018, Büyük patlama – büyük çöküş optimizasyon yöntemi kullanılarak bluetooth tabanlı iç mekân konum belirleme sisteminin doğruluğunun iyileştirilmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 367-374.
- Arslan, K., 2019, Yapay zekâ teknikleri ile Wi-Fi ve bluetooth tabanlı kapalı alan konumlandırma sistemi geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Burdur, 101.
- Assayag, Y. Oliveira, H. Souto, E. Barreto, R. and Pazzi, R., 2023, Adaptive path loss model for BLE indoor positioning system, *IEEE Internet of Things Journal*, 10(14), 12898-12907.
- Assissi, A. Paul, A. A. Mathew, J. Paul, J. Jose, T. and Soumya, K. R., (2016), Beaconholic: An efficient framework for location sensing reminder application

- using IoT, 2016 International Conference on Electrical, *Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, 3397-3401.
- Ataseven, B., 2013, Yapay sinir ağıları ile öngörü modellemesi, *Öneri Dergisi*, 10(39), 101-115.
- Aydalka, S. C., 2018, Bluetooth beacon teknolojisi kullanarak lokasyon ve müze eser tanıtım uygulaması gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 54.
- Aydemir, F., 2020, IoT based indoor disinfection coordinating system against the new coronavirus, *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 4(2), 81-85.
- Bai, L. Ciravegna, F. Bond, R. and Mulvenna, M, 2020, A low cost indoor positioning system using bluetooth low energy, *Ieee Access*, 8, 136858-136871.
- Başak, A.A., 2017, Izgara tabanlı parmak izi algoritmalarıyla kapalı alan konumlandırma optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 86.
- Başçıftçı, F. ve İnal, C., 2008, Jeodezide kullanılan bazı koordinat dönüşümlerinin programlanması, *SÜ Müh. Mim. Sahte. Derg*, 23, 1.
- Bayar, A., 2019, Kapalı mekânlarda BLE beacon kullanarak sunucu tabanlı konum takibi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 74.
- Bilbao-Jayo, A. Almeida, A. Sergi, I. Montanaro, T. Fasano, L. Emaldi, M. and Patrono, L., 2021, Behavior modeling for a beacon-based indoor location system, *Sensors*, 21(14), 4839.
- Bisdikian, C., 2001, An overview of the Bluetooth wireless technology, in *IEEE Communications Magazine*, 39(12), 86-94.
- Bouse, L. King, S. A. and Chu, T., 2024, Simplified indoor localization using bluetooth beacons and received signal strength fingerprinting with smartwatch. *Sensors*, 24(7), 2088.
- Candra, A. Budiman, M. A. and Hartanto, K., 2020, Dijkstra's and a-star in finding the shortest path: A tutorial, In *2020 International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics (DATABIA)*, Medan, Indonesia, 28-32.
- Casareo, K. and Chaczko, Z., 2018, Beacon-based localization middleware for tracking in medical and healthcare environments, In *2018 12th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, Sydney, NSW, Australia, 1-6.
- Çakır, R. Çiçekdemir, Ç. ve Doğanalp, S., 2024, Çok katlı mekânların navigasyonu için bluetooth tabanlı Beacon teknolojisi: Pamukkale Üniversitesi Hastanesi Örneği, *Geomatik*, 9(2), 156-163.

- Çakır, R. Tanrıverdi, M. Sarıkaya, B. Şentürk, F. ve Doğanalp, S. 2024, Kapalı alanda beacon tabanlı navigasyon uygulaması, *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 12(1), 118-131.
- Çakır, R. ve Doğanalp, S., 2024, Beacon tabanlı mesafe bilgisinin ortam şartlarına göre belirlenerek üçgenleme algoritmasıyla test edilmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 650-659.
- Çankaya, İ. A., 2015, Artırılmış gerçeklik kullanılarak kapalı alan navigasyon sisteminin ios platformunda uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 72.
- Daniş, F. S., 2021, Sequential Monte Carlo localization using bluetooth low-energy beacons, Doktora Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 134.
- De Blas, A. and López-de-Ipiña, D., 2017, Improving trilateration for indoors localization using BLE beacons, *In 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, Split, Croatia, 1-6.
- De Blasio, G. Quesada-Arencibia, A. García, C. R. Molina-Gil, J. M. and Caballero-Gil, C., 2017, Study on an indoor positioning system for harsh environments based on Wi-Fi and bluetooth low energy. *Sensors*, 17(6), 1299.
- De Oliveira, L. C. Andrade, A. O. De Oliveira, E. C. Soares, A. Cardoso, A. and Lamounier, E., 2017, Indoor navigation with mobile augmented reality and beacon technology for wheelchair users. *In 2017 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)*, Orlando, FL, USA, 37-40.
- Deng, Y. Ai, H. Deng, Z. Gao, W. and Shang, J., 2022, An overview of indoor positioning and mapping technology standards. *Standards*, 2(2), 157-183.
- Dewi, C. and Arbawa, Y. K., 2019, Performance evaluation of distance function in KNN and WKNN for classification of soil organic matter, *In 2019 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*, Lombok, Indonesia, 196-199).
- Dhanalakshmi, S. B. Joseph, C. Rajeswari, A. Poongothai, M. and Rozario, J., 2023, Enhancing indoor navigation: bluetooth beacon-based localization systems, *In 2023 7th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, 133-138.
- Dijkstra, E.W., 1959, A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269–271.
- Dinh, T. M. Duong, N. S. and Sandrasegaran, K., 2020, Smartphone-based indoor positioning using BLE iBeacon and reliable lightweight fingerprint map, *IEEE Sensors Journal*, 20(17), 10283-10294.

- Doğancı, Y. U., 2008, 802.11 standartlarını kullanarak pozisyon tespiti, Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 77.
- Duong, N. S., and Dinh, T. M., 2021, Smartphone indoor positioning based on enhanced BLE beacon multi-lateration, *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(1), 51-62.
- Duong, N. S. and Dinh, T. M., 2021, On the accuracy of iBeacon-based indoor positioning system in the iOS platform, In *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Monastir, Tunisia, 58-62.
- El Haji, E. Azmani, A. and El Harzli, M., 2014, A pairing individual-trades system, using KNN method: The educational and vocational guidance as a case study, In *2014 Third IEEE International Colloquium in Information Science and Technology (CIST)*, Tetouan, Morocco, 74-79.
- Elsheikh, A. H. Sharshir, S. W. Abd Elaziz, M. Kabeel, A. E. Guilan, W. and Haiou, Z., 2019, Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. *Solar Energy*, 180, 622-639.
- Emer, B., 2023, İşitme engelli bireyler için beacon teknolojileri ile bina içi yönlendirme sistemi tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İzmir, 64.
- Eroğlu, O. ve Doğan, M., 2019, Konum tabanlı hizmetler, bluetooth tabanlı iç mekân konumlandırma hizmeti, Antalya İli örneği, *TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara.
- Gao, F. and Li, X. J., 2022, Effect of construction materials on indoor positioning system using bluetooth low energy. In *2022 32nd international telecommunication networks and applications conference (ITNAC)*, Wellington, New Zealand, 82-87.
- Gao, J. Qin, Z. Fan, T. and Sun, W., 2022, BSSH: Bluetooth indoor positioning strategy for ship cabin based on hierarchical area. *Mobile Information Systems*, 2022(1), 5425306.
- Girolami, M. La Rosa, D. and Barsocchi, P., 2024, A CrowdSensing-based approach for proximity detection in indoor museums with Bluetooth tags, *Ad Hoc Networks*, 154, 103367.
- Görmez, Y. Arslan, H. Işık, Y. E., and Tomaç, S., 2023, A novel hybrid model for bluetooth low energy-based indoor localization using machine learning in the internet of things, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 36-43.
- Guillod, T. Papamanolis, P. and Kolar, J. W., 2020, Artificial neural network (ANN) based fast and accurate inductor modeling and design, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 1, 284-2.

- Gunawan, R. D. Napianto, R. Borman, R. I. and Hanifah, I., 2019, Implementation of dijkstra's algorithm in determining the shortest path (case study: specialist doctor search in bandar lampung), *Int. J. Inf. Syst. Comput. Sci*, 3(3), 98-106.
- Gülağız, F. K. Göz, F. Şahin, E. Albayrak, M. S. ve Kavak A., 2016, Beacon temelli sanal etiket uygulaması, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1-7.
- Gülbağ, S. A., 2024, Radyo dalgalarından alınan sinyal güç göstergesi (rssi) değeri ile konum belirleme doğruluğunun incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 133.
- Güleryüz, M., 2015, Bölge tanımlı kapalı alanlar için düşük güçlü bluetooth konumlama sistemi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 85.
- Handojo, A. Lim, R. Octavia, T. and Anggita, J. K., 2019, Museum visitor activity tracker using indoor positioning system, *In 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*, Bangkok, Thailand, 1-5.
- Hatipoğlu, A., 2018, Indoor location finding of the transmitter based on bluetooth received signal strength, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 73.
- Haykin, S., 2009, Neural Networks and Learning Machines, *Pearson Education*.
- Haznedar, Y., 2021, Wi-Fi ve BLE hibrit teknolojilere dayalı makine öğrenme destekli iç mekân konumlandırma, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 84.
- Heydon R., 2012, Bluetooth low energy the developer's handbook, Bernard Goodwin, John Fuller, Elizabeth Ryan, Bob Russell, *Prentice Hall, United States*, 3-4.
- Heidari, E. Sobati, M. A. and Movahedirad, S., 2016, Accurate prediction of nanofluid viscosity using a multilayer perceptron artificial neural network (MLP-ANN), *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 155, 73-85.
- Hoshi, H. Ishizuka, H. Kobayashi, A. and Minamikawa, A., 2017, An indoor location estimation using BLE beacons considering movable obstructions, *In 2017 Tenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)*, Toyama, Japan, 1-2.
- Hu, S. Shen, C. Zhang, K. and Huang, X., 2019, Improved wknn indoor positioning algorithm based on c-means and chi-square distance. *In 2019 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*, Haikou, China, 432-435.
- Huzir, S. M. H. M. Al-Hadi, A. H. I. H. Yusoff, Z. M. Ismail, N. and Taib, M. N., 2024, Accurate agarwood oil quality determination: A breakthrough with artificial neural

- networks and the levenberg-marquardt algorithm, in *IEEE Access*, 12, 50389-50403.
- Hüsrevoğlu, M. ve Tuşat, E., 2018. İki boyutlu bazı datum dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi, *Geomatik*, 3(1), 22-34.
- İnal, C., ve Yiğit, C. Ö., 2004, Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliğe dönüşümünde enterpolasyon yöntemlerinin kullanılabilirliği, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 19(1), 73-84.
- Janczak, D. Walendziuk, W. Sadowski, M. Zankiewicz, A. Konopko, K. Slowik, M. and Gulewicz, M., 2024, Indoor positioning based on bluetooth RSSI mean estimator for the evacuation supervision system application, *IEEE Access*, 12, 55843-55858.
- Jeon, K. E. She, J. Soonsawad, P. and Ng, P. C., 2018. BLE beacons for internet of things applications: Survey, challenges, and opportunities, *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 811-828.
- Ji, T. Li, W. Zhu, X. and Liu, M., 2022, Survey on indoor fingerprint localization for BLE, In *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 6, 129-134.
- Jianyong, Z, Haiyong, L. Zili, C. and Zhaohui, L., 2014, RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning, *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Busan, 526-533.
- Junoh, S. A. and Pyun, J. Y., 2024, Augmentation of fingerprints for indoor BLE localization using conditional gans. *IEEE Access*, 12, 30176-30190.
- Kaczmarek, M. Ruminski, J. and Bujnowski, A., 2016, Accuracy analysis of the RSSI BLE SensorTag signal for indoor localization purposes, *2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, Gdansk, Poland, 1413-1416.
- Kahveci, M. Tuşat E. ve Doğanalp. S., 2022, Jeodezik koordinat sistemleri: teorik-uygulama, *Nobel Akademik Yayıncılık*, 232.
- Kajioka, S. Mori T. Uchiya, T. Takumi, I. and Matsuo, H., 2014, Experiment of indoor position presumption based on RSSI of bluetooth LE beacon, *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Tokyo, Japan, 337-339.
- Kalman, R. E., 1960, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of basic engineering*, 82(D), 35–45.
- Karabtcev, S. N. Khorosheva, T. A. and Kapkov, N. R. 2019, BLE beacon interaction module and mobile application in the indoor-navigation system, In *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*, Vladivostok, Russia, 1-6.

- Khudhair, A. A. Jabbar, S. Q. Sulttan, M. Q. and Wang, D, 2016, Wireless indoor localization systems and techniques: survey and comparative study, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 3(2), 392-409.
- Kluge, T. Groba, C. and Springer, T, 2020, Trilateration, fingerprinting, and centroid: taking indoor positioning with bluetooth LE to the wild, *In 2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*, Cork, Ireland, 264-272.
- Kohne. M, and Sieck, J., Location-Based services with iBeacon technology, 2014, *2014 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*, Madrid, Spain, 315-321.
- Kumar, D. R. Samui, P. and Burman, A., 2022, Prediction of probability of liquefaction using hybrid ANN with optimization techniques, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1587.
- Kurani, A. Doshi, P. Vakharia, A. and Shah, M., 2023, A comprehensive comparative study of artificial neural network (ANN) and support vector machines (SVM) on stock forecasting. *Annals of Data Science*, 10(1), 183-208.
- Leng, L. B. Smitha, K. G. and Sinha, S., 2019, Smart nation: Indoor navigation for the visually impaired. *In 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, Singapore, 147-151.
- Lin, Y. W. and Lin, C. Y., 2018, Beyond beacons—An interactive positioning and tracking system solely based on BLE mesh network, *In Advances in Network-Based Information Systems: The 20th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2017)*, Toronto, 351-362.
- Liu, C. Zhang, Y. and Zhou, H., 2021, A comprehensive study of bluetooth low energy, *In Journal of Physics: Conference Series*, 2093(1), 012021.
- Liu, D. and Hsieh, C., 2018, Study of indoor exhibitions using beacon's mobile navigation, *2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*, Yunlin, Taiwan 335-337.
- Liu, H., Darabi, H. Banerjee, P. and Liu, J., 2007, Survey of wireless indoor positioning techniques and systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1067-1080.
- Liu, Q. Intema, W. Drif, A. Pawełczak, P. and Zuniga, M., 2019, BEH: Indoor batteryless BLE beacons using RF energy harvesting for internet of things, *arXiv preprint arXiv:1911.03381*.
- Lv, C. Xing, Y. Zhang, J. Na, X. Li, Y. Liu, T. ... and Wang, F. Y., 2017, Levenberg–Marquardt backpropagation training of multilayer neural networks for state estimation of a safety-critical cyber-physical system, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(8), 3436-3446.

- Lyatuu, C. A., 2022, An analysis of bluetooth 5 in comparison to bluetooth 4.2. *Europub Journal of Education Research*, 3(1), 112-120.
- Maaloul, K. Lejdel, B. Clementini, E. and Abdelhamid, N. M., 2023, Bluetooth beacons based indoor positioning in a shopping malls using machine learning, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(2), 911-921.
- Mackey, A. Spachos, P. Song, L. and Plataniotis, K. N., 2020, Improving BLE beacon proximity estimation accuracy through bayesian filtering, in *IEEE Internet of Things Journal*, 7(4), 3160-3169.
- Madleňák, M. and Skýpalová, E., 2024, Experimental testing of received signal strength in indoor positioning system, In *2024 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, İstanbul, Türkiye, 1-4.
- Makariye, N., 2017, Towards shortest path computation using Dijkstra algorithm, In *2017 International Conference on IoT and Application (ICIOT)*, Nagapattinam, India, 1-3.
- Masmanacı, M. N., 2018, Bluetooth beacon temelli kapalı alan mobil konum tespit ve analiz sistemi geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 69.
- McCulloch, W. S. and Pitts, W., 1943, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The bulletin of mathematical biophysics, 5, 115-133.
- Memon, S. Memon, M. M. Shaikh, F. K. and Laghari, S., 2017, Smart indoor positioning using BLE technology, In *2017 4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Salmabad, Bahrain, 1-5.
- Molina, B. Olivares, E. Palau, C. E. and Esteve, M., 2018, A multimodal fingerprint-based indoor positioning system for airports, *Ieee Access*, 6, 10092-10106.
- Murase, M. Tanaka, K. and Naito, K., 2018, Prototype implementation of human management system with BLE beacon devices in natural disasters, *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 1-2.
- Nagah Amr, M. ELAttar, H. M. Abd El Azeem, M. H. and El Badawy, H., 2021, An enhanced indoor positioning technique based on a novel received signal strength indicator distance prediction and correction model, *Sensors*, 21(3), 719.
- Nakano, M. Komuro, N. and Kawamoto, K., 2019, Indoor positioning method based on BLE location fingerprint with statistics approach, In *2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 1160-1163.
- Ndebugre, M. Y., 2022, Optimization of bluetooth low energy-based indoor localization using smart systems, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 52.

- Nguyen, H. X. Cao, H. Q. Nguyen, T. T. Tran, T. N. C. Tran, H. N. and Jeon, J. W., 2021, Improving robot precision positioning using a neural network based on Levenberg Marquardt–APSO algorithm. *IEEE Access*, 9, 75415-75425.
- Özdemir, B. N., 2020, Kapalı mekânlarda rss tabanlı konum belirleme yaklaşımı: parmak izi metodunun uygulanması ve performans analizi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 105.
- Özer, Y., 2003, Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliğe dönüşümünde kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 148.
- Öztemel, E., 2012, Yapay sinir ağları, *Papatya*.
- Paek, J. Ko, J. and Shin, H., 2016, A measurement study of BLE ibeacon and geometric adjustment scheme for indoor location-based mobile applications, *Mobile Information Systems*, 2016(1), 8367638.
- Pakanon, N. Chamchoy, M. and Supanakoon, P., 2020, Study on accuracy of trilateration method for indoor positioning with BLE beacons, In *2020 6th international conference on engineering, applied sciences and technology (ICEAST)*, Chiang Mai, Thailand, 1-4.
- Palumbo, F. Barsocchi, P. Chessa, S. and Augusto, J. C., 2015, A stigmergic approach to indoor localization using bluetooth low energy beacons, *2015 12th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, Karlsruhe, Germany, 1-6.
- Pawlovsky, A. P., 2018, An ensemble based on distances for a kNN method for heart disease diagnosis, In *2018 international conference on electronics, information, and communication (ICEIC)*, Honolulu, HI, USA, 1-4.
- Phutcharoen, K. Chamchoy, M. and Supanakoon, P., 2020, Accuracy study of indoor positioning with bluetooth low energy beacons, In *2020 joint international conference on digital arts, media and technology with ECTI northern section conference on electrical, electronics, computer and telecommunications engineering (ECTI DAMT & NCON)*, Pattaya, Thailand, 24-27.
- Pyt, P. Skrobacz, K. Jankowski-Mihulowicz, P. Węglarski, M. Kamuda, K., 2023, Empowering accessibility: beacon-based IoT localization, *Electronics*, 12(19), 4012.
- Revach, G. Shlezinger, N. Ni, X. Escoriza, A. L. Van Sloun, R. J. and Eldar, Y. C., 2022, KalmanNet: Neural network aided Kalman filtering for partially known dynamics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 70, 1532-1547.
- Rida, M. E. Liu, F. Jidi, Y., Algawhari, A. A. A. and Askourih, A., 2015, Indoor location position based on bluetooth signal strength, *2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering*, Shanghai, China, 769-773.

- Roy, P. Mondal, S. Biswas, A. and Banerjee, R., 2024, A comprehensive study on BLE enabled IoT based tracking system (BITS) for indoor environment, *In 2024 2nd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, Bengaluru, India, 578-585.
- Ruan, L. Zhang, L. Cheng, F. and Long, Y., 2018, The global optimal placement of BLE beacon for localization based on indoor map, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 529-534.
- Sadowski, S. and Spachos, P., 2019, Optimization of BLE beacon density for RSSI -based indoor localization, *In 2019 IEEE international conference on communications workshops (ICC Workshops)*, Shanghai, China, 1-6.
- Safwat, R. Shaaban, E. Al-Tabbakh, S. M. and Emara, K., 2023, Fingerprint-based indoor positioning system using BLE: Real deployment study, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(1), 240-249.
- Saini, I. and Maheshkar, V., 2022, Effects of distance metrics on color recognition using color histogram and KNN algorithm, *In 2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)*, New Delhi, India, New Delhi, India, 1-5.
- Shen, Y. Hwang, B. and Jeong, J. P., 2020, Particle filtering-based indoor positioning system for beacon tag tracking. *Ieee Access*, 8, 226445-226460.
- Shi, T. and Gong, W., 2024, A survey of bluetooth indoor localization, *arXiv preprint arXiv:2404.12529*
- Shi, R., 2022, The world of the bluetooth, *In Third International Conference on Electronics and Communication; Network and Computer Technology (ECNCT 2021)*, Harbin, China, 12167, 161-167.
- Shin, B. Kim, T. Kyung, H. Yu, C. Shin, D. and Lee, T., 2024, Vehicle tracking system in underground parking lots using smartphone, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-15.
- Shiraki, S. and Shioda, S., 2022, Contact information-based indoor pedestrian localization using bluetooth low energy beacons. *IEEE Access*, 10, 119863-119874.
- Shu, W. Wang, S., and Zhai, B., 2023, Trilateration system based on bluetooth distance measurement principle, *In 2023 9th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Shenzhen, China, 229-234.
- Shu-Xi, W., 2012, The improved dijkstra's shortest path algorithm and its application, *Procedia Engineering*, 29, 1186-1190.
- Singh, A., and Smitha, K. G., 2024, Cultivating navigational autonomy in the visually impaired: a novel approach with virtualeye. *In 2024 IEEE Conference on Artificial Intelligence (CAI)*, Singapore, 408-413.

- Silvestrini, S. and Lavagna, M., 2022, Deep learning and artificial neural networks for spacecraft dynamics, navigation and control, *Drones*, 6, 270.
- Sophia, S. Shankar, B. M. Akshya, K. Arunachalam, A. C. Avanthika, V. T. Y., and Deepak, S., 2021, Bluetooth low energy based indoor positioning system using ESP32. In *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, Coimbatore, India, 1698-1702.
- Spachos, P. and Mackey, A., 2018, Energy efficiency and accuracy of solar powered BLE beacons. *Computer Communications*, 119, 94-100.
- Subedi, S. Kwon, G. R. Shin, S. Hwang, S. S. and Pyun, J. Y., 2016, Beacon based indoor positioning system using weighted centroid localization approach, In *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Vienna, Austria, 1016-1019.
- Sung, Y., 2016, RSSI-Based distance estimation framework using a Kalman filter for sustainable indoor computing environments, *Sustainability*, 8(11), 1136.
- Sümer, N. N., 2020, Kapalı alan konum tespitinde RSSI tabanlı düşük enerjili bluetooth kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 90.
- Tanrıöven, M. H. and Taşdelen, K., 2020, Establishing a mesh network with bluetooth and investigating the range analysis. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 12-19.
- Tao, Y. and Yau, S. S. T, 2023, Outlier-robust iterative extended Kalman filtering, *IEEE Signal Processing Letters*, 30, 743-747.
- Tarmanini, C. Sarma, N. Gezegin, C. and Ozgonenel, O., 2023, Short term load forecasting based on ARIMA and ANN approaches, *Energy Reports*, 9, 550-557.
- Taşkan, A. K, 2019, Precise indoor positioning using bluetooth low energy (BLE) technology, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 141.
- Thi, T. M. D. and Duong, N. S., 2023, iBeacon-based indoor positioning system: from theory to practical deployment. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(5), 5156-5164.
- Toprak F., 2016, Evaluation of bluetooth low energy technology for indoor localization in built environments, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 133.
- Torii, H. Ibi, S. and Sampei, S., 2018, Indoor positioning and tracking by multi-point observations of BLE beacon signal. In *2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, Bremen, Germany, 1-5.

- Ture, M. and Hatipoglu, A, 2019, Indoor location finding of the transmitter based on Bluetooth received signal strength, *In 2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Istanbul, Turkey, 1-5.
- Turgut, Z., 2018, Nesnelerin interneti için hareketlilik yönetimi, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 151.
- Uttraphan, C. Abdul Aziz, F. D. Abd Wahab, M. H. and Idrus, S. Z. S., 2020, Bluetooth based indoor navigation system, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Penang, Malaysia, 917(1), 012055.
- Vadivukkarasi, K. and Kumar, R., 2020, Investigations on real time RSSI based outdoor target tracking using Kalman filter in wireless sensor Networks, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(2), 1943.
- Yadav, R. K. Bhattarai, B. Gang H. S. and Pyun, J. Y., 2019, Trusted k nearest bayesian estimation for indoor positioning system. *IEEE Access*, 7, 51484-51498.
- Yavuz, B., 2014, Yeni iletişim ortamı olarak mobil iletişim teknolojilerinin pazarlama iletişimi etkinliğini arttırmada bağlam temelli kullanımı, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul, 360.
- Yılmaz, N., 2019, Jeoid yüksekliklerinin belirlenmesinde ağırlıklı ortalama ve polinomlarla enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 743-754.
- Zeadally, S. Siddiqui, F. and Baig, Z., 2019, 25 years of bluetooth technology, *Future Internet*, 11(9), 194.
- Zhang, M. and Cai, W., 2018, Multivariate polynomial interpolation based indoor fingerprinting localization using bluetooth. *IEEE sensors letters*, 2(4), 1-4.
- Zhuang, Y. Yang, J. Li, Y. Qi, L. and El-Sheimy, N., 2016, Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. *Sensors*, 16(5), 596.
- Zhuang, Y. Zhang, C. Huai, J. Li, Y. Chen, L. And Chen, R., 2022, Bluetooth localization technology: Principles, applications, and future trends, *IEEE Internet of Things Journal*, 9(23), 23506-23524.
- Wang, Y. Yang, X. Zhao, Y. Liu, Y. And Cuthbert, L., 2013, Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods, *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, 2013, 837-842.
- Wibowo, F. M. and Permadi, D. F. H., 2023, Comparison of three border positioning (TBP) and least square estimation (LSE) algorithm towards indoor positioning system (IPS). In *2023 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, Malang, Indonesia, 629-634.
- Wiener, N., 1949, Extrapolation Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series: With Engineering Applications, *Cambridge*, 8, 21.

- Wu, C. Wong, I. C. Wang, Y. Ke, W. and Yang, X., 2024, Experimental study of bluetooth indoor positioning using rss and deep learning algorithms, *Mathematics*, 12(9), 1386.
- Wu, H. Junginger, S. Roddelkopf, T. Liu, H. and Thurow, K., 2023, BLE beacons for sample position estimation in a life science automation laboratory, *Transportation Safety and Environment*, 6(3).
- Xiao, C. Yang D. Chen, Z. and Tan, G., 2017, 3-D BLE indoor localization based on denoising autoencoder. *IEEE Access*, 5, 12751-12760.
- URL-1 <https://www.fortunebusinessinsights.com/press-release/internet-of-things-iot-market-9155> [Erişim Tarihi: 22.09.2024].
- URL-2 <https://www.bluetooth.com/2024-market-update> [Erişim Tarihi: 22.09.2024].
- URL-3 <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-core-specification-version-5-4-technical-overview/> [Erişim Tarihi: 22.09.2024].
- URL-4 <https://store.kontakt.io/product/asset-tag/> [Erişim Tarihi: 22.09.2024].