



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**EŞ ZAMANLI HARİTALAMA VE**  
**KONUMLANDIRMA ALGORİTMALARI İLE**  
**ÜRETİLEN HARİTALARIN**  
**DOĞRULUĞUNUN ARAŞTIRILMASI**

**Kasım ERDAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

**EKİM-2024**  
**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**  
**TEZ KABUL VE ONAYI**

Kasım ERDAL tarafından hazırlanan “Eş Zamanlı Haritalama ve Konumlandırma Algoritmaları ile Üretilen Haritaların Doğruluğunun Araştırılması” adlı tez çalışması 16/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**İmza**

**Başkan**

Doç. Dr. Lütfiye KARASAKA  
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

**Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bilgehan MAKİNECİ  
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

**Üye**

Doç. Dr. Osman ORHAN  
(Mersin Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 241005020 no’lu proje ile desteklenmiştir.

## 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.

İmza

Kasım ERDAL

Tarih:

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## EŞ ZAMANLI HARİTALAMA VE KONUMLANDIRMA ALGORİTMALARI İLE ÜRETİLEN HARİTALARIN DOĞRULUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

Kasım ERDAL

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bilgehan MAKİNECİ

2024, 96 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bilgehan MAKİNECİ  
Doç. Dr. Lütfiye KARASAKA  
Doç. Dr. Osman ORHAN

Robotik araştırmalarında kullanılan konumlandırma ve haritalama tekniklerinin en bilineni Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalandırma (SLAM) algoritmasıdır. SLAM yöntemi geleneksel yöntemlerin aksine uzun zaman alan süreçlerde ve toplanan verinin yoğunluğundan kaynaklı problemlerde, gözlemlenen sorunları optimize edebilmektedir. Ayrıca haritacılık, robotik ve otonom araçlar gibi alanlarda geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. SLAM yöntemine ait algoritmaların matematiksel ve algoritmik bileşenleri, sensör ve bilgisayar temelli görüntü işleme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Fakat literatürdeki araştırmalar genellikle SLAM algoritmalarının performansını çevresel etmenler ve sensör yetenekleri üzerinden değerlendirmektedir. Bununla birlikte, algoritmaların içsel bileşenleri ve kullanıcı perspektifinden kaynaklanan etkiler ile alakalı yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma SLAM yönteminin fotogrametri yöntemi temelli çalışmalarda kullanımında karşılaşılan olumsuzlukları tespit etmek, olumlu yanlarını en iyilemek ve elde edilen sonuç ürünlerin doğruluğuna etki eden faktörleri araştırmak amacıyla kapsamlı bir analiz olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, GNSS destekli sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri ile LiDAR sensörü destekli akıllı mobil cihaz kullanılarak, iç ve dış mekanlarda gerçekleştirilen fotogrametrik ölçümler ve taramalar incelenmiştir. Sonuçlar, GNSS destekli LiDAR sistemlerinin dış mekanlarda önemli avantajlar sağladığını, genel döngü kapanmasının sonuç doğruluğunda önemli bir rol oynadığını ve akıllı mobil cihazların küçük yapılar için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Üç farklı el tipi LiDAR sistemi karşılaştırıldığında, nokta yoğunluklarından bağımsız olarak geometrik doğruluklarının birbirine yakın olduğu ancak sonuç ürünlerin görsel olarak farklı olabildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma SLAM teknolojisinin fotogrametri alanında kullanımının etkinliğini artırmak için önemli bulgular sunmuştur. Tez kapsamında yapılan çalışmalar, SLAM algoritmalarının ve entegre sistemlerin performansını değerlendirerek, gelecekteki araştırmalara ışık tutacak değerli veriler sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Fotogrametri, SLAM, Konumlandırma, Bilgisayarlı Görü, Videogrametri, İç Mekân Haritalandırma

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

### **Investigation of the Accuracy of Maps Produced with Simultaneous Mapping and Algorithm**

**Kasım ERDAL**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Geomatics Engineering**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Hasan Bilgehan MAKİNECİ**

**2024, 96 Pages**

#### **Jury**

**Asst. Prof. Dr. Hasan Bilgehan MAKİNECİ  
Assoc. Prof. Dr. Lütfiye KARASAKA  
Assoc. Prof. Dr. Osman ORHAN**

In robotic research, the most well-known technique for localization and mapping is the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) algorithm. The SLAM method optimizes the problems encountered in traditional methods, which are time-consuming processes and issues arising from the density of collected data. Additionally, it offers a wide range of applications, particularly in fields such as cartography, robotics, and autonomous vehicles. SLAM algorithms' mathematical and algorithmic components have made significant progress along with sensor and computer-based image processing technology advancements. However, research in the literature generally evaluates the performance of SLAM algorithms based on environmental factors and sensor capabilities. There is a lack of sufficient studies related to the internal components of the algorithms and the impacts arising from the user perspective. This study was conducted as a comprehensive analysis aiming to identify the drawbacks, optimize the positive aspects, and investigate the factors affecting the accuracy of the resulting products using the SLAM method suitable for photogrammetry. In this case, measurements and scans of 3D shapes were done indoors and outdoors using GNSS-enabled backpacks, handheld LiDAR systems, and smartphones with LiDAR sensors. The results revealed that GNSS-supported LiDAR systems provide significant advantages in outdoor environments, that overall loop closure plays a crucial role in the accuracy of the results, and that smart mobile devices are suitable for small structures. When comparing three handheld LiDAR systems, it was found that their geometric accuracies were similar regardless of point densities, but the visual appearance of the resulting products could vary. In conclusion, this study presents significant findings to enhance the effectiveness of using SLAM technology in the field of photogrammetry. The studies conducted within the scope of this thesis provide valuable data by evaluating the performance of SLAM algorithms and integrated systems, offering insights for future research.

**Keywords:** Photogrammetry, SLAM, Localization, Computer Vision, Videogrammetry, Indoor Mapping

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) yönteminin fotogrametrik temele dayalı kullanımlarında sistemlerin performanslarının optimize edilmesi ve doğruluğunun artırılması hedeflenmiştir. Farklı test alanlarında gerçekleştirilen ölçümler ve taramalardan elde edilen veriler kullanılarak, SLAM algoritmalarının ve LiDAR sistemlerinin performansları incelenmiştir. Bu doğrultuda, GNSS destekli sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri ile LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonlarının fotogrametrik ölçümler ve taramalardaki etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışma, SLAM algoritmalarının ve entegre sistemlerin performansını artırmak için kapsamlı bir analiz sunmakta ve elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen faktörleri araştırmaktadır.

Yüksek lisans tez çalışmamda konu seçiminde, uygulamalarda tüm bilgi ve birikimlerini bana destek olmak için kullanan danışman hocam Dr. Hasan Bilgehan MAKİNECİ hocama, bilgisinden her zaman destek aldığım Dr. Lütfiye KARASAKA hocama, tez çalışmam için gerekli verileri sağlayan ve desteklerini her zaman bana sunan Prof. Dr. Alberto Guarnieri hocama ve isimlerini tek tek yazamadığım tüm hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi en büyük pay sahibi olan ve beni her konuda cesaretlendiren, sonsuz desteklerini esirgemeyen annem Hacer ERDAL, babam Hüseyin ERDAL başta olmak üzere ailemin tüm fertlerine gönülden teşekkür ederim.

Kasım ERDAL  
KONYA-2024

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                                                     | <b>iv</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                                  | <b>iv</b> |
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                                                                    | <b>iv</b> |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>                                                                               | <b>iv</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>                                                                   | <b>vi</b> |
| <b>1 GİRİŞ.....</b>                                                                                   | <b>1</b>  |
| <b>2 KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>                                                                      | <b>5</b>  |
| <b>3 MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                                                                      | <b>15</b> |
| 3.1 SLAM Yöntemi .....                                                                                | 15        |
| 3.1.1 SLAM Yöntemi Varyantları .....                                                                  | 18        |
| 3.1.2 Modern Slam Yöntemi Çalışma Prensibi .....                                                      | 29        |
| 3.2 Kullanılan Ekipmanlar .....                                                                       | 32        |
| 3.2.1 Sırt Çantası ve El Tipi LiDAR Sistemleri .....                                                  | 32        |
| 3.2.2 Akıllı Mobil Cihaz .....                                                                        | 36        |
| 3.3 Çalışma Alanları ve Veri Setleri .....                                                            | 37        |
| 3.3.1 Çalışma Alanları .....                                                                          | 37        |
| 3.3.2 Veri Setleri .....                                                                              | 38        |
| 3.4 Buluttan Buluta Karşılaştırma (C2C) .....                                                         | 41        |
| <b>4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                                                         | <b>43</b> |
| 4.1 Arazi Çalışmaları Bulguları .....                                                                 | 43        |
| 4.2 Taramalardan elde edilen sonuç ürünler .....                                                      | 50        |
| 4.3 Mobil LiDAR Sistemlerinden Elde Edilen Nokta Bulutlarının<br>Değerlendirilmesi.....               | 56        |
| 4.3.1 GNSS Destekli Mobil LiDAR Sisteminden Elde Edilen Nokta<br>Bulutlarının Değerlendirilmesi ..... | 56        |
| 4.3.2 Üç Farklı LiDAR Sisteminden Elde Edilen Nokta Bulutlarının<br>Değerlendirilmesi.....            | 65        |
| 4.4 Akıllı Cep Telefonundan Elde Edilen Nokta Bulutlarının Değerlendirilmesi                          | 74        |
| 4.5 Mobil LiDAR Sistemleri ve Akıllı Cep Telefonundan Elde Edilen Verilerin<br>Değerlendirilmesi..... | 79        |
| 4.6 Görüntü Tabanlı Slam Algoritmasının Test Edilmesi Ve Değerlendirilmesi.                           | 81        |
| 4.7 Tartışma .....                                                                                    | 84        |
| <b>5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                                                    | <b>88</b> |
| 5.1 Sonuçlar .....                                                                                    | 88        |
| 5.2 Öneriler .....                                                                                    | 89        |

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| <b>KAYNAKLAR .....</b> | <b>91</b> |
|------------------------|-----------|



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Kısaltmalar

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| 2B   | İki Boyutlu                           |
| 3B   | Üç Boyutlu                            |
| FPS  | Frame Per Second                      |
| GNSS | Global Navigation Satellite Systems   |
| GPS  | Global Positioning Systems            |
| Hz   | Hertz                                 |
| IMU  | Inertial Measurement Unit             |
| İHA  | İnsansız Hava Aracı                   |
| KOH  | Karasel Ortalama Hata                 |
| PPK  | Post Process Kinematic                |
| ROS  | Robot Operating System                |
| RTK  | Real Time Kinematic                   |
| SfM  | Structure From Motion                 |
| SLAM | Simultaneous Localization and Mapping |
| USGS | United States Geological Survey       |
| YKN  | Yer Kontrol Noktası                   |

## 1 GİRİŞ

Geçmiş yıllarda robotlar, sistemler, hareket kabiliyetine sahip sensörler, vb. içinde bulundukları çevrelerin haritasını oluşturmak ve oluşturdukları harita içerisinde kendi konumlarını belirlemek amacıyla konumlandırma ve haritalandırma süreçlerini farklı işlem adımları olarak ele almışlardır (Cadena et al., 2016; Sualeh & Kim, 2019). Haritalama ve konumlandırma sürecinin farklı işlemler olarak değerlendirilmesi sürecin sonuca ulaşmasındaki zamanın artmasına ve veri yoğunluğuna sebep olmaktadır (Nissler, Buxttner, Marton, Beckmann, & Thomasy, 2016). Eş zamanlı konumlandırma ve haritalama (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) yönteminin geliştirilmesinden itibaren konumlandırma ve haritalandırma süreçleri eş zamanlı olarak yürütülmektedir. Geleneksel yöntemler kullanılırken karşılaşılan zaman ve veri büyüklüğü gibi problemler SLAM yönteminin geliştirilmesiyle minimize edilmiştir (Younes, Asmar, Shammash, & Zelek, 2017). SLAM yöntemine entegre sensörler ortamın haritalandırma için gerekli verileri toplamakta, SLAM yöntemine ait algoritma ise verileri işlemekte ve ortamın haritasını oluşturmaktadır. SLAM yöntemi ilk olarak kesin olmayan konum bilgisini oluşturarak sürece başlamaktadır. Sistem ortamın haritasını oluşturmaya devam ettikçe konum bilgisi yenilenmekte ve döngü kapanmasının gerçekleştirilmesiyle kesinleşmektedir (Sualeh & Kim, 2019).

Temel SLAM yönteminin yeni uygulama alanlarında kullanımı, sensör ve bilgisayar temelli görüntü işleme teknolojilerindeki gelişmeler SLAM yönteminin gelişmesini sağlamıştır (Castro, Nitsche, Pire, Fischer, & De Cristóforis, 2019). Sistemlerin farklı sensörler ve farklı algoritmik bileşenlerle desteklenmesi, temelinde SLAM yöntemi matematiği bulunan ancak birbirinden farklı algoritmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur (Ahmed, Masood, Fremont, & Fantoni, 2023; Eyvazpour, Shoaran, & Karimian, 2023; Sualeh & Kim, 2019). SLAM yöntemine ait algoritmaların anlaşılabilirliğinin sağlanması ve kullanılabilirliğinin artması amacıyla bu algoritmaları varyantlara ayırmak mümkündür. Varyantlar sensör yapısı, veri işlemede kullanılan yöntem, kullanılacağı ortamın büyüklüğü ve dinamik ortamda kullanılabilirliği gibi kriterler göz önünde bulundurularak sınıflandırılmıştır (Valencia & Andrade-Cetto, 2018). Varyantların temelini oluşturan algoritmaların dezavantajları, eksikleri ve kullanım problemleri yeni algoritmaların gelişimine neden olmuştur ve farklı varyantlara ait çok sayıda algoritma geliştirilmiştir (Albrecht, 2009; Davison, Reid, Molton, & Stasse, 2007; Frese, Wagner, & Röfer, 2010; Nüchter, Lingemann, Hertzberg, & Surmann,

2007). Geliştirilen algoritmalar, akademik olarak literatüre sunulmasının ardından çoğunlukla açık kaynak kodlu olarak kullanıcılara sunulmuştur. Bu durum SLAM yönteminin farklı varyantlarına ait algoritmaların kullanılmasına ve test edilmesine, algoritmaların farklı çalışma alanlarında ve farklı amaçlarda kullanılmasına olanak sağlamıştır (Frese et al., 2010; Gaspar, Nunes, Pinto, & Matos, 2018; Lluvia, Lazkano, & Ansuategi, 2021; Sharafutdinov et al., 2023). SLAM yönteminin en yaygın ve en temel kullanım amacı olan harita oluşturmak için çevrimdışı kullanımı, sistemin çevrede dolaşarak sensör verilerini kaydetmesi ve ardından bu verileri işleyerek çevrenin haritasını oluşturmasıdır. Oluşturulan harita, sonraki işlemler için çıktı ürün olarak alınabilmektedir. Bir diğer kullanım amacıysa konumlandırma hedefiyle çevrimiçi SLAM yönteminin kullanılmasıdır. Çevrimiçi olarak konumlandırma ve haritalandırma süreci yürütülebilmektedir. Çalışmanın asıl amacı konumlandırma bilgisini elde etmek olduğu için harita verileri algoritma içerisinde değerlendirilmektedir. Bu kullanımda harita bilgisi SLAM algoritmasına önceden eğitilebilmekte ve eğitim konumlandırma doğruluğunu olumlu yönde etkileyebilmektedir. Dinamik ortamların haritalanması amacıyla kullanılan online algoritmalar da bulunmaktadır (Frese et al., 2010). Belirtilen kullanım amaçları farklı mesleki disiplinler içinde çeşitli alanlarda kullanılmaktadır; bunlar arasında madencilik, robotik bilimi, afet yönetimi, otonom araçlar, arttırılmış gerçeklik, endüstriyel uygulamalar, tarım, su altı keşifleri, yapay zekâ ve uzay çalışmaları bulunmaktadır (Ahmed et al., 2023; Eyvazpour et al., 2023; Placed et al., 2023).

Harita mühendisliği çalışmalarında SLAM yöntemi pasif olarak kullanılmaktadır. Bu durumda sistem manuel olarak kontrol edilmektedir ve sensörlerden gelen verilerle ortamın haritası oluşturulmaktadır. Mobil LiDAR sistemlerinin temel yapı taşı olan SLAM yöntemine ait algoritmalar GNSS sistemlerinin çalışmadığı ortamlarda ve GNSS bulunmayan sistemlerde konum bilgisini üretmekte ve haritaların doğru oluşturulmasında önemli rol oynamaktadır. Mobil LiDAR sistemlerinin bir türü olan sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri harita mühendisliği çalışmalarında sağladığı avantajlarla dikkat çekmektedir (Oelsch, 2023). Mimari röleve, kadastro, akıllı şehir, coğrafi bilgi sistemleri çalışmaları ve hali hazır harita üretiminde kullanılan sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri iş süresinin kısalması ve maliyetinin azaltması gibi avantajları sağlamaktadır (Özdemir, Erdal, Veziroğlu, & Ateş, 2022). Mobil LiDAR sistemleri dışında SLAM yöntemine ait algoritmalar son yıllarda akıllı cep telefonlarına ve tabletlere entegre edilmiştir. Akıllı mobil cihazlara LiDAR sensörlerinin entegrasyonu ve SLAM algoritması tabanlı mobil uygulamaların geliştirilmesi, akıllı cihazların harita

mühendisliği çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. LiDAR sensörü destekli akıllı mobil cihazlar gerçek arazi koşullarında 3B nokta verisi ve görüntüler toplamaya olanak sağlamıştır (Erol, Kuçak, & Alkan, 2023; H. B. Makineci & Erdal, 2023). Bu gelişmelerle birlikte SLAM yöntemine ait algoritmaların harita mühendisliğinde kullanılan sistemlerde aktif rol oynaması farklı soru işaretlerini de beraberinde getirmiştir.

Çalışma öncesi yapılan araştırmalarda, SLAM yöntemine ait algoritmaların matematiksel, algoritmik karışıklığı ve içsel çeşitliliği, yöntemin yapısal bileşenlerinin ve entegre edildiği sistemin çalışma prensiplerinin tam olarak anlaşılmamasına neden olduğu tespit edilen ana problemdir. İlave olarak bu durum SLAM algoritmalarının ve entegre sistemin bileşenlerinin yanlış seçilmesine neden olduğu görülmektedir. Bu sebeplerle de SLAM yönteminin sağladığı avantajlar azalmaktadır ve entegre sistemlerin performansı olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, iç ve dış mekânlarda kullanılan SLAM ile entegre sistemlerin 3B nokta bulutlarının ve elde edilen sonuç haritalarının doğruluğunun araştırılması gerekmektedir. Araştırmalar, SLAM teknolojisinin etkin kullanımını desteklemek ve daha doğru sonuçlar elde etmek için önemlidir (H. B. Makineci & Erdal, 2023). Literatürdeki çalışmaların çoğu sırt çantası veya el tipi LiDAR sistemleri ile LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonları ve tabletlerden elde edilen verileri çevresel etmenler ve sensör yetenekleri üzerinden değerlendirmektedir. Ancak, SLAM yöntemine ait algoritma bileşenlerinin ve matematiksel modellerin etkileri yeterince araştırılmamıştır. Bu durum, SLAM yönteminin potansiyelinin tam olarak anlaşılmasını engellemektedir (Aslan, KALAYCI, & Tektaş, 2022; Erol et al., 2023; Monsalve, Yager, & Tonina, 2023; Rutkowski & Lipecki, 2023). Belirlenen problemlerin çözümü için yapılan çalışmalarda amaç, iç ve dış ortamlarda, gerçek arazi koşullarında SLAM algoritması bulunan sistemlerle gerçekleştirilen fotogrametrik temelli ölçüm ve taramalarda karşılaşılabilecek olumsuzları tespit etmektir ve elde edilen sonuç ürünlerin doğruluğunu etkileyen faktörleri araştırmaktır. İlave olarak SLAM yöntemine ait algoritmaların kullanıcı perspektifinden incelenmesi çalışmanın diğer bir temel amacıdır. Bu çalışma, SLAM algoritmalarının pratik uygulamalardaki performansını iyileştirmeye yönelik önemli bulgular sağlamayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın amacını gerçekleştirmek için belirlenen hedeflerden birisi, SLAM yöntemine ait varyantların irdelenmesidir ayrıca farklı varyantlara ait algoritmaların çalışma şemaları üzerinde durulmasıdır. Ardından SLAM yönteminin farklı varyantlarına ait algoritmalarla entegre çalışan mobil LiDAR sistemleri ve akıllı cep telefonları

kullanılarak gerçek arazi koşullarında iç ve dış mekâna ait taramalar gerçekleştirilmesidir. Çalışma kapsamında dört farklı mobil LiDAR sistemi kullanılması ve verilerin toplanması hedeflenmektedir. Mobil LiDAR sisteminden elde edilen nokta bulutunun değerlendirilmesi amacıyla arazide Yer Kontrol Noktası (YKN) tesis edilmiştir. 52 farklı taramada 308 adet YKN tesis edilmiştir. Literatürde koordinat ölçüm doğruluğunun uygun olduğu belirlenmiş olan Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonları TUSAGA-Aktif -İngilizce kısaltması olan CORS (Continously Operating Reference Stations) yöntemi kullanılarak YKN'ler ölçülmüştür (Inal, Bulbul, & Bilgen, 2018). Üç farklı mobil LiDAR sistemi ve LiDAR sensörü destekli akıllı mobil cihaz kullanılarak İtalya'nın Arezzo şehrinde bulunan Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait nokta verileri toplanmıştır. Toplanan nokta verileri Doğrudan Buluttan Buluta Karşılaştırma (C2C) algoritması kullanılarak karşılaştırılmıştır. Son olarak SLAM yönteminin güncel algoritmalarından olan ORB SLAM3 algoritması iç ve dış mekân veri kümeleri kullanılarak test edilmiştir.

Bu çalışmada yapılan literatür araştırması, SLAM yönteminin varyantlarının, mobil LiDAR sistemlerinin ve akıllı cep telefonuna ait farklı çalışmaların özetlendiği ve ilişkilendirildiği bir bölümdür. Ardından gelen materyal ve yöntem bölümünde de kullanılan algoritmalar, mobil LiDAR sistemleri ve akıllı cep telefonu, çalışma alanları, veri kümeleri ve karşılaştırma yöntemi konularından bahsedilmiştir. Araştırma bulgularının ve tartışmaların yapıldığı bölüm, en son olarak sonuçların ve önerilerin anlatıldığı bölümler ile çalışma tamamlanmıştır.

## 2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

SLAM yönteminin farklı sensörlerle beraber gelişmiş sistemlere entegre edilmesi ve bu doğrultuda farklı çalışmalarda kullanımının amaçlanması matematiksel ve algoritmik açıdan yeni gelişmelere kapı aralamıştır. Bu durum SLAM yönteminin varyantlara ayrılmasına ve yeni algoritmaların ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır (Ahmed et al., 2023). Yapılan bir çalışmada SLAM yöntemine ait algoritmalar listelenmiştir. Algoritmaların çalışma prensibi, matematiksel modeli, desteklediği sensörler, veri işleme yapısı incelenmiştir. Farklı çalışmalarda kullanılması planlanan SLAM yöntemine ait algoritmaların seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar sıralanmıştır. Özellikle semantik SLAM varyantının eksiklerinden ve geliştirilmesi gereken yanlarından bahsedilmiştir (Sualeh & Kim, 2019). Buna benzer bir çalışmada da SLAM yöntemi varyantlara ayrılmış, varyantların özellikleri, matematiksel modeli hakkında bilgiler verilmiştir. SLAM yöntemine ve varyantlarına kullanıcı perspektifinden bir bakış açısı sunulmuştur. SLAM yöntemine ait algoritmaların çalışmalarda kullanılması planlanırken algoritmaların hangi sensörü desteklediğine, veri işleme şekline ve benzeri detaylarına dikkat edilerek yapılan tercihlerin yürütülecek çalışmanın başarısını etkileyebileceğine dikkat çekilmiştir (Frese et al., 2010). Bu çalışmaların ortak yönü literatürde paylaşılan birçok kez test edilmiş ve kullanılmış olan SLAM yönteminin farklı varyantlarına ait algoritmalar üzerinde odaklanmasıdır. Benzer bir çalışmada da SLAM yöntemini varyantlara ayırmadan algoritmanın desteklediği sensörler ve algoritmik yapısı göz önünde bulundurularak SLAM yöntemi “Modern SLAM Yöntemi” ve “Klasik SLAM Yöntemi” olarak ikiye ayrılmıştır. Çalışmada modern SLAM yöntemi incelenmiş ve aktif olarak gerçek arazi koşullarında otonom deneyimler sunabilen algoritmalar tartışılmıştır. Algoritmaların günümüzde ve gelecekteki çalışmalar için eksiklerine dikkat çekilmiş ilaveten bu algoritmaların gerçek arazi koşullarında kullanımında ortaya çıkan hatalara odaklanılmıştır (Ahmed et al., 2023).

SLAM yöntemine ait geliştirilen algoritmaların birçoğu kullanıcılara açık platformlarda, bazılarıysa ticari yazılımlarda sunulmaktadır. Açık kaynak kodlu sunulan algoritmalar, yöntemin gelişmesine ve yeni algoritmaların kazanılmasına katkı sağlamaktadır (Macario Barros, Michel, Moline, Corre, & Carrel, 2022). Bu avantajların yanında farklı mesleki disiplinlere sahip araştırmacılar için algoritma tercihi, karmaşık bir problemi ortaya çıkarmıştır. Literatürde çok sayıda bulunan, sanal ortamda ve gerçek arazi koşullarında sıklıkla kullanılan, görsel SLAM varyantına ait algoritmaların

seçiminde sens3r desteğine, kullanım amacına ve benzeri kriterlere dikkat edilmesi gerekmektedir. G3rsel SLAM varyantına ait algoritmaların g3l ve zayıf y3nlerinin bilinmesi algoritmaların doğru kullanılması için 3nemlidir. Aksi takdirde yanlış algoritma tercihi ile SLAM y3nteminin sağladığı avantajlardan yararlanmak mümkün değildir. G3rsel SLAM varyantı algoritmalarının gerçek arazi koşullarında kullanmadan 3nce sanal ortamda test etmek mümkündür. Yapılan bir çalışmada mühendisler ve benzer mesleki disipline sahip araştırmacılar için g3rsel SLAM varyantı algoritmalarının kullanılabilirliğinin artması, daha uzun süreli ve daha avantajlı kullanımı amacıyla farklı ortamlarda konumlandırma hassasiyeti açısından açık kaynak kodlu g3rsel SLAM varyantı algoritmaları test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Algoritmalar konumlandırma doğruluğu, hesaplama performansı ve konumlama hatası kriterlerine g3re değerlendirilmiştir. Çalışmada literatürde popüler olan ORB SLAM2, ORB SLAM3, MapLab, LDSO, VinsMono, Vins Fusion, OpenVSLAM, Basalt, Kimera, OpenVINS ve DRE algoritmaları test edilmiştir. Algoritmaların test edilmesinde EuRoC ve TUM VI veri setleri kullanılmıştır. Algoritmalar aynı bilgisayarda test edilmiştir. Bunun nedeni bilgisayar donanımından kaynaklanabilecek farkların 3nne geçmektir. Karşılaştırma sonucunda EuRoC veri setini tüm algoritmaların çalıştırdığı, mesafe ve açısal hata değeri en düşük sonuçların ORB SLAM3 algoritmasından elde edildiği belirtilmiştir. LDSO algoritması dışındaki algoritmaların EuRoC veri setini hesaplama performansının benzer olduğuna değinilmiştir. EuRoC veri setinden alınan sonuçların aksine TUM VI veri setini MapLab, VinsMono, OpenVSLAM, Basalt, OpenVINS ve ORB SLAM3 algoritmalarının alıştırabildiğine değinilmiştir. ORB SLAM3 algoritmasının bu veri setinde en optimum sonuçları verdiği belirtilmiştir. Çalışmada test edilen semantik SLAM algoritması olan DRE algoritmasının hiçbir veri setini çalıştırmadığı belirtilmiştir. Bütün sonuçlar g3z 3nnde bulundurulduğunda ORB SLAM3 algoritmasının en güvenilir algoritma olduğu ancak gerçekleştirilmesi planlanan çalışma ve kullanılacak ekipmana g3re bu sonuçların farklılık g3sterebileceğine vurgu yapılmıştır.(Sharafutdinov et al., 2023). Benzer bir diğer çalışmada da ORB SLAM2, RTABMAP ve SPTAM algoritmaları test edilmiştir. Bu alışmada ROS (Robot Operating System) kullanılarak gerçek arazi koşullarında i ve dış mekânda veriler toplanmıştır. Algoritmaların konumlandırma doğruluğu ve haritalama işlemi sonucunda elde edilen sonuç ürünleri de karşılaştırılmıştır. İ mekân testinde ORB SLAM2 algoritmasının konumlandırma ve haritalandırma sürecini diğer algoritmalarla g3re daha başarılı tamamladığı vurgulanmıştır. RTABMAP algoritmasının ise dış mekân çalışmalarında diğer

algoritmalarla göre daha iyi sonuçlar aldığı vurgulanmıştır. SPTAM algoritmasının iç mekân çalışmalarında konum doğruluğu yeterli düzeydeyken, dış mekân çalışmalarında konumlandırma verisinin hatası değerinin yüksek olduğu belirtilmiştir. Özellikle tüm taramalarda döngü kapatması sahada uygulanmıştır, SPTAM algoritmasının başlangıç ve bitiş verilerini ilişkilendiremediği tespit edilmiştir (Jesus, Kobs, Cukla, Cuadros, & Gamarra, 2021). Benzer bir başka çalışmada ORB SLAM2, DynaSLAM ve ORB SLAM3 algoritmaları konumlandırma süreci baz alınarak karşılaştırılmıştır. Algoritmalar EuRoC ve KITTI veri setleri kullanılarak çalıştırılmıştır. Algoritmaların çalıştırılmasının ardından elde edilen ayak izleri karşılaştırıldığında sonuçların birbirine çok yakın olduğu vurgulanmıştır. ORB SLAM3 algoritmasından elde edilen metrik ve açısal hata değerlerinin diğer iki algorithmadan elde edilen hata değerlerine göre daha düşük olduğu vurgulanmıştır (Joans & Education, 2021). Belirtilen çalışmalarda alınan sonuçlar incelendiğinde literatürde geliştiricileri tarafından güncellenen ve birçok sensörle entegre çalışabilen ORB SLAM3 algoritması günümüzde görsel SLAM varyantları arasında en popüler ve en optimum sonuçları sunan algorithmadır.

SLAM yöntemi kullanılarak deniz, hava ve yersel araçların tamamen otonom olarak kullanımı mümkündür. Özellikle GNSS alıcıların çalışmadığı ortamlarda SLAM yöntemi algoritmaları konum verisi sağlamak ve haritalama gerçekleştirmektedir. Bu bağlamda yöntem, kullanılacak sisteme ve ekipmana göre revize edilmektedir. Yapılan bir çalışmada denizde kullanılacak bir deniz aracının tamamen otonom sürüşü için yeni bir SLAM algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni algoritma sonar ve barometre sensörleriyle entegre bir şekilde çalışmaktadır. Geliştirilen deniz aracının su altı çalışmalarında arama, kurtarma ve keşif çalışmalarında kullanılacağı vurgulanmıştır (Ribas, Ridao, & Neira, 2010). Yapılan bir diğer çalışmada da aktif olarak kullanılmayan kapalı maden ocaklarının son durumunun incelenmesi ve haritalarının oluşturulması amacıyla SLAM yöntemiyle çalışan yarı otonom robot dizayn edilmiştir. Robot LiDAR sensörü ve 360° kamerayla donatılmıştır. Robot, gerçek arazi koşullarında kapalı bir maden ocağında test edilmiştir. Robotun başarılı bir şekilde çalıştığı, konum ve harita verisi ürettiği belirtilmiştir (Thrun et al., 2004).

SLAM yöntemi harita mühendisliği ve benzer disiplinlerde GNSS sistemlerinin çalışmadığı ortamlarda ve GNSS alıcısı bulunmayan yada düşük GNSS doğruluğuna sahip sistemlerde kullanılmaktadır (Ahmed et al., 2023). Mobil LiDAR sistemlerinin bir parçası olan sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemlerinin algoritmik olarak temel yapı taşı SLAM yöntemiyle çalışan algoritmalarlardır. Yapılan bir çalışmada iç mekân

çalışmalarında kullanılmak üzere sırt çantası LiDAR sistemi tasarlanmıştır. Sırt çantası LiDAR sistemi LiDAR sensörü, 360° kamera ve grafik tabanlı SLAM varyantına ait geliştirilen bir algoritma ile donatılmıştır. Sistemin konumlandırma ve haritalama sürecini basit bir iç mekânda başarıyla tamamladığı vurgulanmış ve köşelere gidildikçe nokta verilerinde bozulmalar olduğu tespit edilmiştir. SLAM algoritmasının daha karmaşık bir iç mekânda konumlandırma verisini sağlıklı üretmesi amacıyla geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. İlâveten nokta bulutundaki bozulmaları minimum seviyeye düşürmek amacıyla sisteme IMU entegre edilerek revize edilmesi gerektiği öngörülmüştür (Karam, Vosselman, Peter, Hosseinyalamdary, & Lehtola, 2019). Yapılan bir başka çalışmada da grafik tabanlı SLAM varyantına ait bir algoritma olan LOAM kullanılarak sırt çantası LiDAR sistemi geliştirilmiştir. Sistem iki adet LiDAR sensörüne ve 360° kamera ile donatılmıştır. Geliştirilen sistem ağaçlık alanda, iç ve dış mekânda test edilmiş ve nokta verileri üretilmiştir. Ağaçlık alanda 20 farklı ağacın zeminden 1,3 m yükseklikteki çevre uzunlukları metre ile ölçülerek yarı çapları hesaplanmış, ağaçların nokta bulutunda ölçülen yarı çapları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda 20 ağacın yarı çapları için hesaplanan fark değerlerinin standart sapması 2,1 cm olarak hesaplanmıştır. İlave olarak kapalı alanda 20 farklı detayın ölçümü gerçekleştirilmiş ve detayların gerçek ölçüm değeri ile nokta bulutundaki değeri karşılaştırıldığında 2,4 cm standart sapma elde edildiği belirtilmiştir. Doğruluk karşılaştırılması dışında yersel lazer tarayıcı ve sırt çantası LiDAR sistemi kullanım süresi olarak karşılaştırılmış ve sırt çantası LiDAR sisteminin yersel lazer tarayıcıya göre zamansal olarak daha avantajlı olduğu belirtilmiştir (Akpınar, Çakmak, & Selbesoğlu, 2022).

Yapılan bir çalışmada yeraltı miras çalışmalarında SLAM yönteminin avantajlarının ve doğruluğunun incelenmesi amacıyla Stonex X120 el tipi LiDAR sistemi kullanılmıştır. El tipi LiDAR sisteminden elde edilen verilerle yersel lazer tarayıcıdan elde edilen veriler geometrik ve görsel olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işleminde C2C karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. İlave olarak elde edilen nokta bulutlarından 2B kesitler alınarak yoğunluk ve detay analizi gerçekleştirilmiştir. C2C karşılaştırılmasında iki nokta bulutu arasındaki mesafenin %66'sının 2 cm'in altında olduğuna değinilmiştir. Bu sonuç geometrik olarak el tipi LiDAR sisteminin yersel lazer tarayıcıyla benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Nokta bulutları görsel ve yoğunluk kriterlerine göre karşılaştırıldığında yersel lazer tarayıcıdan elde edilen verilerin daha yoğun olduğu ve görsel olarak gerçeğe daha yakın olduğu belirtilmiştir. SLAM yöntemiyle çalışan el tipi LiDAR sistemlerinin geometrik doğruluk ve mimari detay çıkarımı açısından 1/100 ile

1/200 ölçekler arasındaki mimari çalışmalarda kullanılması önerilmiştir (Tanduo, Teppati Losè, & Chiabrando, 2023). Benzer bir çalışmada Leica BLK2GO el tipi LiDAR sisteminden elde edilen veriler ile Focus 3D S120 yersel lazer tarayıcıdan elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. İki farklı sistem bol ağaçlık bir alanda kullanılarak nokta verileri toplanmıştır. Ölçümler C2C, C2M ve M3C2 karşılaştırma yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. C2C karşılaştırması sonucunda iki nokta bulutu arasındaki ortalama fark 1.9 cm'dir. Ayrıca ormanlık alandaki 10 adet ağacın iki nokta bulutundaki kesitleri alınarak incelemelerde bulunulmuştur. El tipi LiDAR sisteminden gelen ağaç gövdelerinin yersel lazer tarayıcıya göre daha seyrek olduğu vurgulanmıştır. Sistemler çalışma kapsamında 18 farklı kriter (tarama süresi, tarama yoğunluğu vb.) göz önünde bulundurularak 1 ile 5 arasında puanlanmıştır. Yersel lazer tarayıcı 65 puan alırken el tipi LiDAR sistemi 45 puan almıştır. İkili arasındaki farkın görsel detaylar ve gürültülü noktalara ait kriterlerden kaynaklandığı görülmektedir. Çalışmada SLAM yöntemiyle çalışan el tipi LiDAR sisteminin 25 m tarama mesafesiyle sınırlı kalmasına rağmen yersel lazer tarayıcıya göre hızlı ve pratik bir tarama gerçekleştirildiği vurgulanmıştır (Del Duca & Machado, 2023). El tipi LiDAR sistemlerinin karşılaştırıldığı başka bir çalışmada GeoSLAM marka el tipi LiDAR sistemlerinin farklı modelleri mimari röleve çalışmalarında test edilmiştir. Taramada tarihi binaların ve bahçelerinin taraması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların mimari röleve çalışmalarında kullanılabilecek düzeyde olduğu vurgulanmıştır. Elde edilen nokta bulutlarının ölçeği 1/100 ve 1/200 karşılık geldiği belirtilmiştir. Bu ölçekte ve daha büyük ölçekli çalışmalarda el tipi LiDAR sisteminin kullanımının avantajlı olduğu, çalışmada sistemin döngü kapanma hatasının ve nokta verilerinin konum doğruluğunun iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yazarlar el tipi LiDAR sistemlerinin 3B şehir modelleme ve akıllı şehir çalışmalarındaki potansiyelinin keşfedilmesi üzerine yeni çalışmalar yapmayı hedeflemektedirler (Sammartano & Spanò, 2018).

SLAM yöntemi harita mühendisliği ve benzer disiplinlerde insansız hava araçları (İHA), akıllı cep telefonları ve tabletlere entegre bir şekilde kullanılmaktadır. Mobil cihazlar için geliştirilen hassas sensörler ve güçlü işlem kapasitesi SLAM algoritması tabanlı uygulamaların etkin bir şekilde kullanımına olanak sağlamıştır. Özellikle akıllı cep telefonları ve tabletler gibi kolay taşınabilir cihazlar, SLAM tabanlı uygulamaların 3B modelleme ve benzer diğer çalışmalarda kolayca kullanılmasını sağlamaktadır. Bu avantajlar saha çalışmalarının verimliliğini artırırken, çalışma sonucunda elde edilen verilerin doğruluğu araştırma konusu olmuştur (Eyvazpour et al., 2023). Yapılan bir

çalışmada akıllı cep telefonuna yüklenen SLAM yöntemi tabanlı uygulama kullanılarak Konya ilinde bulunan tarihi bir köprünün modellenmesi amacıyla saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan akıllı cep telefonundan LiDAR sensörü bulunmaması nedeniyle sahada 3B nokta verisi toplanamamıştır. Saha çalışmalarında akıllı cep telefonla köprüye ait görüntüler alınırken SLAM yöntemi tabanlı mobil uygulama konumlandırma sürecinde sistemin ayak izini oluşturmuş ve haritalama sürecinde görüntüler arasındaki korelasyonu sağlayarak görüntülerden seyrek nokta bulutu elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler fotogrametrik yazılımda dengelenmesinin ardından köprüye ait 3B nokta bulutu verisi oluşturulmuştur. Akıllı cep telefonuna ilave olarak yersel lazer tarayıcıyla yedi oturum gerçekleştirilmiş ve tarihi köprüye ait bütünleşik nokta verisi elde edilmiştir. Elde edilen nokta bulutları karşılaştırılmıştır. İki nokta bulutunun geometrik olarak karşılaştırıldığında hata değerlerinin birbirine yakın olduğu vurgulanmıştır. Görsel olarak karşılaştırıldığında yersel lazer tarayıcıdan elde edilen verilerin köprünün gerçek renk değerlerine daha yakın olduğu vurgulanmıştır. SLAM yöntemi bu çalışmada konumlandırma sürecinde aktif olarak kullanılmış olsa da haritalama sürecinde sadece görüntülerin elde edilmesinde kullanılmıştır. Çalışmada modelleme gibi dış mekân çalışmalarında SLAM yönteminin kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur. SLAM yöntemi tabanlı uygulama akıllı cep telefonuyla görüntü alımı sırasında başlangıç ve bitiş noktalarını doğru işaretlemiştir ve döngü kapanmasını algılamıştır. Bu sonuç SLAM yönteminin başarılı bir şekilde çalıştığını belirtmektedir. Son olarak çalışmada İHA uçuşları gerçekleştirilmiş ve köprünün üst kısmına ait görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler fotogrametrik yazılımda dengelenerek nokta bulutu oluşturulmuştur. Ardından SLAM yöntemi ve yersel lazer tarayıcıdan elde edilen nokta bulutu İHA'dan elde edilen nokta verisi birleştirilmiştir. Çalışma sonunda farklı sistemlerin kombinasyonu ile köprüye ait 3B modeller oluşturulduğu belirtilmiştir. Çeşitli teknolojilerin entegrasyonu ile elde edilen detaylı ve yüksek doğrulukta modellerin köprülerin analizi, tasarımı ve bakımı gibi çalışmalarda önemli katkılar sağlayabileceği vurgulanmıştır (H. B. Makineci & Erdal, 2023). Benzer bir çalışmada LiDAR sensörü destekli akıllı tabletin iç mekân çalışmalarındaki performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada içerisinde farklı boyutlarda objeler bulunan bir ofis Leica ScanStation C10 marka/model yersel lazer tarayıcı ve akıllı tablet kullanılarak taramalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırılması amacıyla ofisteki nesnelere ait uzunluklar milimetrik çelik şerit metre kullanılarak ölçülmüştür. LiDAR sensörü destekli akıllı tabletle tarama işlemlerinde SLAM yöntemiyle çalışan iki farklı

yazılım kullanılmıştır. Yersel lazer tarayıcıdan çıkarılan detay ölçüleri karşılaştırıldığında santimetre altı farklar olduğu belirtilmiştir. Birinci yazılım kullanılarak LiDAR sensörü destekli tableten elde edilen nokta bulutundan çıkarılan detay ölçüsünde ise birkaç detay haricinde farkların 0,8 cm ile 1 cm arasında olduğu vurgulanmıştır. İkinci uygulamadan elde edilen nokta bulutundan alınan detay ölçüleri karşılaştırıldığında hataların 3 cm civarında olduğu belirtilmiştir. Genel olarak ifade edilecek olursa, LiDAR sensörü destekli akıllı tablet kullanılarak cm doğruluğunda nokta bulutlarının üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda, genel olarak iç mekanlarda 5 metreye kadar taramanın mümkün olabildiği, ancak 3 metre ve daha yakın mesafelerde akıllı tabletin daha iyi sonuçlar üretebileceği şekilde tarama yapabildiği gözlemlenmiş ve çalışma da LiDAR sensörü destekli akıllı tabletin kullanımı sırasında mesafenin arttıkça daha fazla gürültülü noktalar üretildiği vurgulanmıştır (Erol et al., 2023). Belirtilen iki çalışmada akıllı cihazlar SLAM yöntemi altyapılı algoritmalarla dış ve iç mekânda gerçek arazi koşullarında kullanılmıştır. Özellikle LiDAR sensörü destekli akıllı cihazların tarama sonucunda doğrudan haritalama verisi sunduğu ve SLAM yönteminin başarılı bir şekilde çalıştığı görülmektedir (Erol et al., 2023; H. B. Makineci & Erdal, 2023). Bir diğer çalışmada da LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu kullanılmıştır. Akıllı cep telefonu Diyarbakır ili merkez Sur ilçesinde bulunan Ulu camii avlusundaki, Güneş saati ve tarihi musalla taşının modellenmesi için kullanılmıştır. Çalışmada SLAM yöntemi ile çalışan uygulama kullanılarak tarihi eserlerin modellenmesi amaçlanmıştır. Konumlandırma ve haritalandırma süreci başarıyla tamamlanmıştır. Haritalama sürecinden elde edilen görüntüler fotogrametrik yazılımda dengelenerek nokta bulutu oluşturulmuştur. Oluşturulan nokta bulutu haritalama sürecinde elde edilen nokta bulutuyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada haritalama sürecinde elde edilen nokta bulutunun seyrek olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte düşük hassasiyet ve düşük nokta bulutu yoğunluğu gerektiren işlerde LiDAR sensörlü akıllı cep telefonunun kullanılması tavsiye edilmiştir (Aslan et al., 2022).

Mobil LiDAR sistemlerinin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasına rağmen maliyetinin yüksek olması, ekipmanların kullanım zorlukları ve sistemin kullanımı için teknik eğitim ve tecrübe gerekliliği gibi durumlar LiDAR sistemlerinin kullanımının kısıtlı olduğunu göstermektedir. Akıllı cep telefonlarına ve tabletlere LiDAR sensörünün entegre edilmesi ve SLAM yöntemiyle çalışan uygulamalarla desteklenmesi, mobil LiDAR sistemlerinin kullanıldığı alanlarda ve çalışmalarda akıllı cep telefonları ve tabletlerin kullanılabilirliğinin araştırılması konusunu gündeme

getirmiştir (Hou, Hübner, Schmidt, & Iwaszczuk, 2024). Bu konunun araştırılması ve değerlendirilmesi amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Erol et al., 2023; Hou et al., 2024; King, Kelly, & Fletcher, 2023; H. B. Makineci & Erdal, 2023; Monsalve et al., 2023; Rutkowski & Lipecski, 2023). Yapılan bir çalışmada LiDAR sensörü destekli akıllı tabletin yapı bilgi modelleme (BIM) sürecinde kullanılabilirliği ele alınmıştır. Çalışma farklı tarama yöntemleri ve çevresel koşullar altında veri toplayarak, LiDAR sensörü destekli akıllı tabletin performansını test etmeyi amaçlamıştır. Tablet statik ve dinamik veri toplama durumlarında ürettiği nokta bulutlarının doğruluğu incelenmiştir. Dinamik veri toplama deneylerinde tabletin hareket halindeki pozisyon değişikliklerinden dolayı nokta bulutu yoğunluğunun statik veri toplama deneylerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sonuçta, akıllı tabletin lidar sensörünün statik veri toplama deneylerinde daha hassas olduğu görülmüştür. Ayrıca, küçük alanların taranması ve pozisyon değişikliklerinin sınırlı tutulması durumunda, tabletin lidar sensörünün daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Statik ve dinamik oturumlarla elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırılmasının ardından dinamik oturumlarla toplanan nokta bulutları GeoSLAM el tipi LiDAR sistemiyle toplanan nokta bulutuyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda akıllı tablet kullanılarak toplanan nokta bulutunda yapının merkezinden duvarlara gidildikçe bozulmalar olduğu ve gürültülü noktaların arttığı vurgulanmıştır. İki nokta bulutunun geometrik yapısının karşılaştırılması amacıyla C2C karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. İki nokta bulutu arasındaki ortalama mesafenin 3,9 cm, standart sapmanın ise 5,5 cm olduğu belirtilmiştir. Elde edilen bulgular, LiDAR sensörü destekli akıllı tabletin belirli koşullar altında profesyonel lazer tarayıcılara kıyasla daha düşük hassasiyette sahip olduğu, ancak küçük ve sabit alanlarda yeterli doğruluk sağlayabildiğini, tabletin belirli koşullar altında doğru nokta bulutları üretebildiğini ve 3B BIM oluşturma süreçlerinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Son olarak yüksek doğruluk gerektiren projelerdeki hassasiyeti ve USGS tarafından belirlenen BIM kılavuzundaki standartları karşılayamadığı için profesyonel lazer tarayıcıların tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Teo & Yang, 2023). Başka bir çalışmada da su yapılarının taban yapısının ve pürüzlülüğünün modellenmesi için LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında suyun akışı sırasında nehir yataklarının veya kanalların tabanındaki şekil, kabartılar, oyulmuş bölgeler ve pürüzlü yataklar içeren yatak kanallarının özelliklerinin yakalanmasında ve analizi LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonundan elde edilen verilerle incelenmiştir. Elde edilen veriler yersel lazer tarayıcıdan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır ve her iki yöntemin

de büyük ölçekli topografik özellikleri ve makro pürüzlülüğü doğru bir şekilde temsil edebildiği sonucuna varılmıştır. LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu kullanılarak elde edilen yüzeylerin büyük ölçekli yatak yüksekliği değişkenliğini ve oyulmuş bölgeleri doğru bir şekilde temsil edebildiğini, bu yöntemin hızlı ve kullanıcı dostu veri toplama süreçleri sayesinde saha çalışmalarında pratik bir alternatif sunduğu vurgulanmıştır (Monsalve et al., 2023). Diğer bir çalışmada ise LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonunun madencilik çalışmalarındaki doğruluğu, operasyonel verimliliği araştırılmıştır. Çalışmada bir madenin havalandırma shaftında LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonunun ölçüm ve denetim süreçlerinde nasıl kullanılabileceği ve uygulanabilirliği incelenmiştir. LiDAR destekli akıllı cep telefonu kullanılarak beton hacmi hesaplamaları, shaft geometrisinin kontrolü ve çelik kalıp geometrisinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu veriler, profesyonel bir yersel lazer tarayıcı olan FARO FOCUS 130 ile karşılaştırılmış ve sonuçların yüksek doğruluk gerektirmeyen denetimler için yeterli olduğu sunulmuştur. Elde edilen bulgular, LiDAR destekli akıllı cep telefonunun tarama teknolojisinin, geleneksel mekanik ölçüm yöntemlerine göre daha ekonomik ve pratik bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Bu durum madencilik uygulamalarında hem ekonomik hem de kolay bir yöntem olarak akıllı cep telefonu teknolojisinin kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle yeraltı madenciliğinde bu tür teknolojilerin kullanımı, shaft kazma süreçlerinin hem güvenliğini hem de verimliliğini arttıracakı vurgulanmıştır (Rutkowski & Lipecki, 2023). Başka bir çalışmada da akıllı cep telefonu GNSS alıcısı, IMU, LiDAR tarayıcısı ve manometre gibi dahili sensör donanımlarıyla jeolojik veri toplama ve paylaşma işlemlerindeki kapasitelerini değerlendirerek, geleneksel saha araçlarının yerine kullanılabileceği test edilmiştir. Çalışma kapsamında cihazın GNSS alıcısının birkaç metre doğruluğundaki coğrafi konum doğruluğu kapasitesi, jeologların sahada kısa zamanda ve güvenilir veri toplamasını sağlamıştır. IMU ve manyetometresinin yön belirleme konusunda geleneksel pusula ve klinometrelere kıyasla benzer doğrulukta veriler sunmuştur. Bu özellik jeologların saha çalışmalarında daha hassas yön belirlemelerine olanak tanımıştır. Ayrıca çalışmada cihazın yüksek kaliteli fotoğraf ve video çekim kapasiteleri test edilmiş ve görsel dokümantasyon açısından önemli avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Akıllı cep telefonunda bulunan LiDAR sensörünün performansı test edilmiş ve tarayıcının jeolojik formasyonların detaylı ve doğru bir şekilde modellenmesini sağladığı tespit edilmiştir. Bu sayede saha çalışmalarının verimliliğinin ve doğruluğunun arttığı vurgulanmıştır. Elde edilen 3B modeller, jeo-miras dokümantasyonu ve eğitim materyali üretimi için de

büyük faydalar sunmaktadır. Akıllı cep telefonlarının ve benzer LiDAR sensörü destekli akıllı cihazların jeolojik çalışmalarda kullanımı, sadece verimlilik ve doğruluk açısından değil, aynı zamanda eğitim ve toplumsal katılımı artırma potansiyeli açısından da büyük önem taşıdığı sonucuna varılmıştır (Tavani et al., 2022).

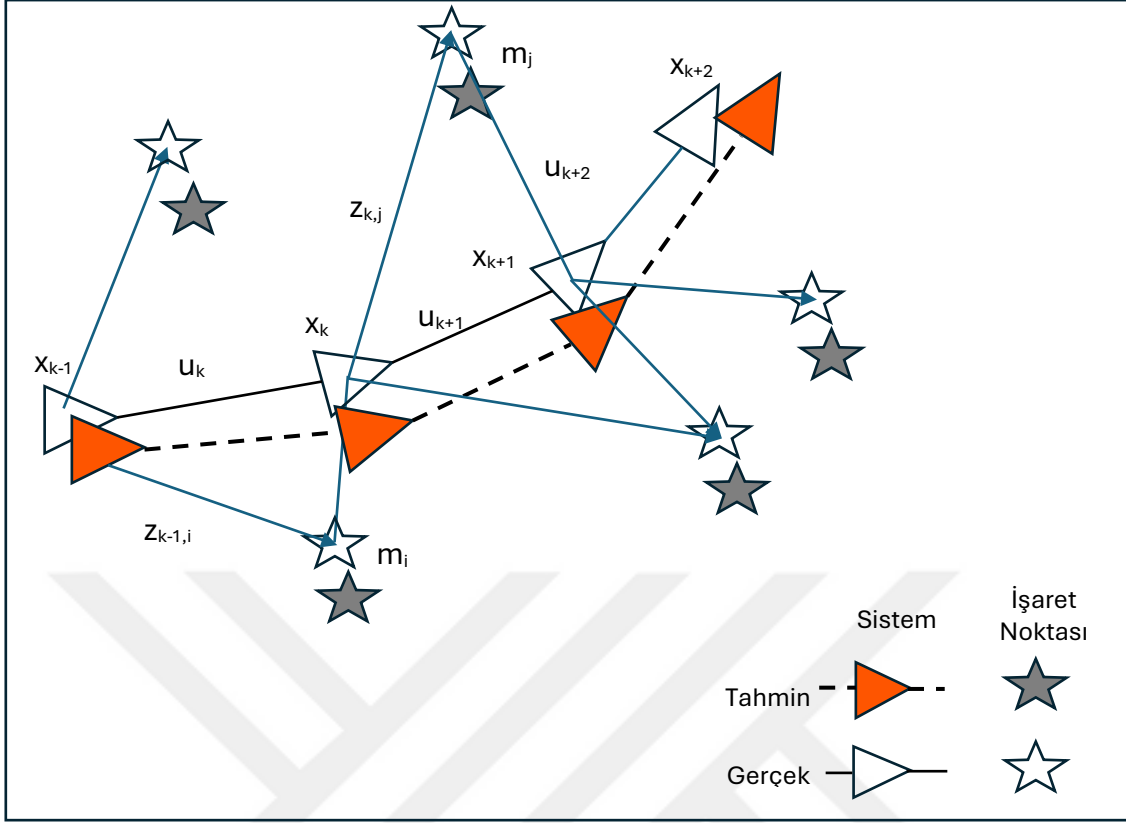
LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonları ve tabletlerin tek olarak kullanılmasının dışında, farklı araçlara entegre edilerek de kullanılması ve veriler toplanması mümkündür. Yapılan bir çalışmada LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu İHA'lara entegre edilerek kar derinliğinin ölçümünde kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, geleneksel ve yüksek maliyetli LiDAR sistemlerine ekonomik bir alternatif sunarak, kar derinliği tahminlerinde yüksek doğruluk sağlamaktır. Çalışma sonucunda İHA'ya entegre edilen akıllı cep telefonun kar derinliğini tahmin etmede etkili bir araç olabileceğini ve gelecekte çalışmalarda akıllı telefonların güçlü bir bilimsel araç olarak kullanılmasıyla ilgili büyük bir potansiyel olduğunu göstermiştir. Ancak, bu tür sistemlerin kullanımıyla ilgili kullanıcı ve hava koşullarından kaynaklanabilecek hataların olabileceği de tespit edilmiştir (King et al., 2023).

### 3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde farklı SLAM yöntemi varyantlarının test edilmesi amacıyla kullanılan mobil LiDAR sistemleri ve akıllı cep telefonu tanıtılmıştır. Ayrıca taramaların yapıldığı çalışma alanları ve kullanılan GNSS yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışma kapsamında SLAM yönteminin matematiksel modeli, farklı varyantlarına ait algoritmalar ve SLAM algoritmasının geleceği olarak vurgulanan semantik SLAM algoritması üzerinde durulmuştur.

#### 3.1 SLAM Yöntemi

SLAM yöntemi bir robotun, sistemin ya da daha basit bir tabirle hareket ettirilen bir sensörün bilinmeyen bir konumda bilinmeyen bir ortamda bulunduğu bu ortamın haritası oluşturulurken eş zamanlı olarak haritada konumunu belirleyebilme problemini çözmeye çalışmaktadır. Özellikle robotların ve sistemlerin tamamen otonom sürüşleri için SLAM yöntemi çok önemli bir yere sahiptir. Sensörlere entegre SLAM yöntemi, ortamın haritasını oluşturarak ortam içerisinde sensörün konumunu hesaplamaktadır. Temel SLAM yöntemini incelediğimizde, bir sistemin ortam içerisinde hareket ederek ve üzerinde bulunan sensörleri kullanılarak bir dizi bilinmeyen işaret noktasının gözlemlerini topladığı görülmektedir.(Şekil 3.1) (Durrant-Whyte & Bailey, 2006).



Şekil 3.1. SLAM yöntemi çalışma prensibi

“k” belirli bir zamanı temsil etmektedir. “ $x_k$ ” sistemin konumu ve yönelimini gösteren durum vektörü, “ $u_k$ ” k zamanında sistemi  $x_k$  zamanındaki bir duruma sürmek için uygulanan kontrol vektörü ve “ $m_i$ ” i numaralı işaret noktasının konumunu tanımlayan bir vektördür. SLAM yöntemi işaret noktasının konumunun zamanla değişmez olduğunu varsaymaktadır. “ $z_{ik}$ ” ise k zamanında i numaralı işaret noktasının sistemden alınan gözlemini ifade etmektedir. SLAM yönteminin olasılıksal çözümü Eşitlik 3.1’deki gibidir.

$$P(x_k, m | z_{0:k}, u_{0:k}, x_0) \quad (3.1)$$

Bütün zamanlar için olasılık dağılımı hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.1 kaydedilmiş gözlemler ve “k” zamanındaki kontrol verileri dahil olmak üzere aracın başlangıç konumuyla birlikte, “k” zamanındaki işaret noktalarının konumları ve sistem durumunun sonraki hareketinin, hareket yoğunluğunu açıklamaktadır. SLAM yönteminde, bu Eşitlik sistemin her hareketinde tekrardan hesaplanır. Zaman k-1’de  $P(x_{k-1}, m | Z_{0:k-1}, U_{0:k-1})$  dağılımı için bir tahminle başlayarak kontrol  $u_k$  ve gözlem  $z_k$  sonrasında ortak Bayes

Teoremini kullanarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama adımları sırasıyla kontrol girişi ve gözlem etkisini açıklayan bir durum geçiş eşitliğine ve gözlem eşitliğine ihtiyaç duymaktadır.(Durrant-Whyte & Bailey, 2006).

Gözlem eşitliği, sistem konumu ve işaret noktası konumu bilindiğinde gözlem yapma olasılığını açıklar ve Eşitlik 3.2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$P(z_k | x_k, m) \quad (3.2)$$

Sistemin hareketi için hareket eşitliği, zaman içerisindeki geçişlerinde olasılık dağılımı şeklinde açıklanmaktadır. Eşitlik 3.3 bu olasılık eşitliğini açıklamaktadır.

$$P(x_k | x_{k-1}, u_k) \quad (3.3)$$

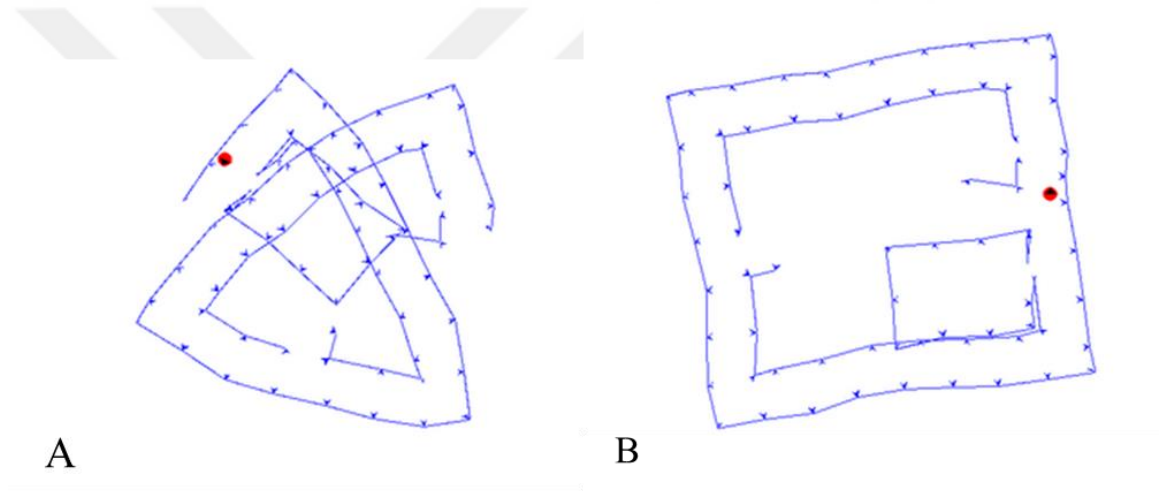
Sistemin hareketi, bir sonraki durum  $x_k$ 'nın bir önceki durumundaki  $x_{k-1}$  ve uygulanan kontrol olan  $u_k$ ' ya bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca hem gözlemlerden hem de haritadan bağımsız olduğu bir Markov süreci olarak kabul edilmektedir(Csorba, 1997). SLAM yöntemi zaman ve ölçüm güncellemelerini eş zamanlı olarak uygulamaktadır. Eşitlik 3.4 zaman güncelleme eşitliğini ve Eşitlik 3.5 ölçüm güncelleme eşitliğini göstermektedir.

$$P(x_k, m | Z_{0:k-1}, U_{0:k}, x_0) = \int P(x_k | x_{k-1}, u_k) \times P(x_{k-1}, m | Z_{0:k-1}, U_{0:k-1}, x_0) dx_{k-1} \quad (3.4)$$

$$P(x_k, m | Z_{0:k-1}, U_{0:k}, x_0) = \frac{P(z_k | x_k, m) P(x_k, m | Z_{0:k-1}, U_{0:k}, x_0)}{P(z_k | Z_{0:k-1}, U_{0:k})} \quad (3.5)$$

SLAM yönteminin matematiksel modeli incelendiğinde konumlandırma ve haritalandırma sürecinde elde edilen veriler göreceli ve ilişkilidir. SLAM yöntemiyle çalışan bir sistem, başlangıç konumunda başlayıp çok sayıda gözlem yaparak ortamın haritasını oluşturmakta ve konumlandırma problemini çözmektedir. Bu gözlemlerin ilişkilendirilmesinde bazı hatalar oluşmaktadır. Bu hatalar her gözlem çifti için oluşukça büyümektedir. Haritalama sürecinde elde edilen gözlem verilerinde bozulma olmasa da konum verileri bu verilerin bozulmasına sebep olmaktadır. Bu durum pozisyon belirsizliği olarak adlandırılmaktadır(Frese et al., 2010). Kısaca sistem başlangıç noktasına tekrar gelerek döngü kapanmasını gerçekleştirdiğinde biriken hata nedeniyle haritada döngü kapanması gerçekleşmemektedir. Sistemin başladığı noktayı yani

döngünün başlangıç noktasını tekrar haritalandırdığında SLAM yöntemi döngü kapanması işlemini gerçekleştirdiği görülmektedir. Sistem döngünün başlangıcındaki noktada haritayı işaretleyerek ya da deforme ederek döngünün her iki ucunu başarıyla bir araya getirmesi mümkündür. Tek bir gözlem çiftiyle harita ve konumlandırma verilerini önemli ölçüde değiştirmesi nedeniyle döngü kapanması SLAM yöntemi için önemlidir. Şekil 3.2’de döngü kapanması gerçekleştirilen ve gerçekleştirilmeyen iki tarama süreci gösterilmektedir. Döngü kapanması yapılmayan taramada koridorda bulunan odanın boyutu ve şekli doğru olsa da gözlem sürecindeki biriken hata nedeniyle veri ilişkilendirilmesi bozulmuş, haritalandırma ve konumlandırma süreci hatalı tamamlanmıştır (Frese, 2006).



**Şekil 3.2.** Döngü kapanması uygulanmamış tarama (A) ve Döngü kapanması uygulanmış tarama (B)  
(URL-1) [www.informatik.uni-bremen.de/agebv/en/SlamDiscussion](http://www.informatik.uni-bremen.de/agebv/en/SlamDiscussion)

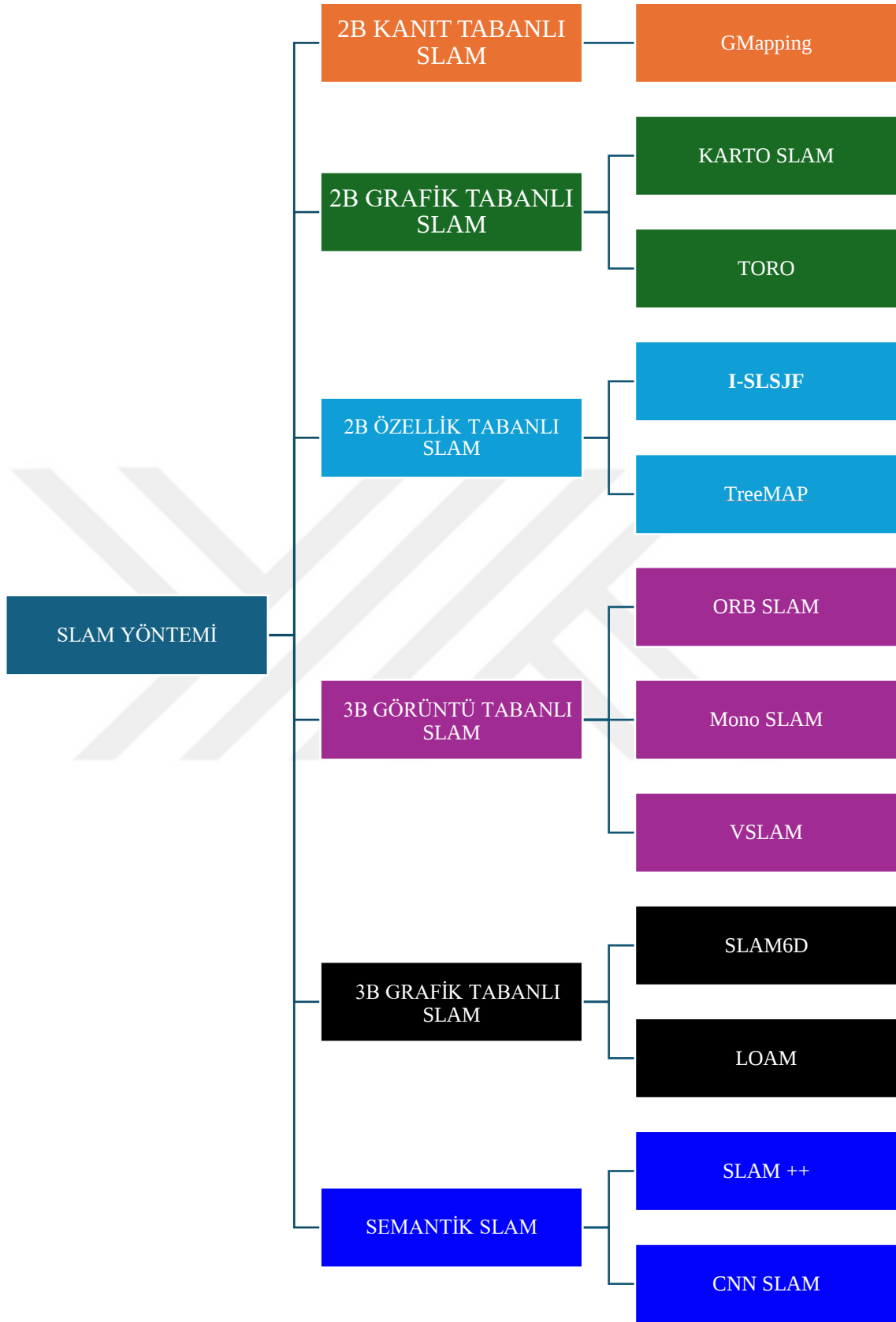
### 3.1.1 SLAM Yöntemi Varyantları

Döngü kapanmasından kaynaklanan hatalar, kullanılan sensörlere ait verilerin ilişkilendirilmesindeki problemler gibi durumlar SLAM yönteminin matematiksel ve algoritmik yapısının geliştirilmesini gerektirdiğini göstermiştir. Buna ilave olarak SLAM yönteminin uygulanacağı ortam ve kullanım amacı algoritmik gelişmelere doğrudan etki etmiştir. Geliştirilen algoritmalar SLAM yönteminin farklı varyantlarını oluşturmuştur. Bu varyantlara ait algoritmalar kullanım amacı, sensör yapısı ve matematiksel model olarak birbirinden farklıdır. Modern SLAM yöntemi kavramı bu varyantların gelişmesiyle ortaya çıkmıştır. Modern SLAM yöntemi akıllı ev robotları, silah envanteri, insansız hava araçları, elektrikli otomobiller başta olmak üzere tamamen otonom

kullanım ve kontrol edilmesi planlanan sistemlere entegre edilmiştir. SLAM yöntemi çoğunlukla pasif olarak kullanılmakta olup sistem manuel olarak kontrol edilmektedir, modern SLAM kavramıyla ortamın eğitimine gerek duyulmadan tamamen bilinmeyen bir ortamda otonom kontrol deneyimini test etmek mümkün hale gelmiştir (Ahmed et al., 2023).

Bu gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda SLAM yöntemini altı farklı varyanta ayırmak mümkündür. Bu varyantlara ait algoritmalar literatüre sunulmakta ve açık kaynak kodlu olarak paylaşılmaktadır. Gerekli gereksinimler ve yazılımların sağlanmasıyla bu algoritmaları kurmak ve test etmek mümkün olmakla birlikte farklı hatalarla ve sorunlarla da karşılaşılmaktadır. Özellikle dinamik ortamlarda aktif olarak kullanılması için geliştirilen algoritmaların yüklenmesi ve çalıştırılmasında farklı sorunlarla karşılaşılmaktadır. Otonom sistemler için geliştirilen bu algoritmaların kurulmasında ve çalıştırılmasında sorunlarla karşılaşılmasının en büyük nedenlerinden biri algoritmaların spesifik çalışmalar için geliştirilmesi ve kodlanması olduğu üzerinde durulmaktadır (Ahmed et al., 2023; Frese et al., 2010; Sharafutdinov et al., 2023).

Şekil 3.3 'de SLAM yöntemine ait varyantlar ve bu varyantlara popüler algoritmalar sunulmuştur. Varyantlar ve algoritmaları aynı renkte gösterilmektedir.



Şekil 3.3. SLAM yöntemi varyantları ve popüler algoritmaları

2B kanıt tabanlı SLAM varyantı lazer mesafe ölçer kullanılarak bit benzeri bir harita oluşturmaktadır. Haritada beyaz alan boş alanı, siyah alan engelleri ve gri alansa bilinmeyen alanı temsil etmektedir. Bu varyantın en popüler ve en pratik algoritması olan Gmapping son yıllarda ROS işletim sistemine entegre edilerek küçük ev aletleri başta olmak üzere iç mekân hizmet robotların da kullanılmaktadır (Norzam, Hawari, & Kamarudin, 2019) .

2B grafik tabanlı SLAM varyantı düzenli aralıklarla sistemin konumlarını içeren grafiklerden bir harita oluşturmaktadır. Konumlandırma verileri girdileri belirsiz mekânsal ilişkilere sahip bağlantılardır. Ardışık konumlandırma verileri arasındaki bağlantı genellikle odometri verisinden ve lazer taramadan gelen verilerin taramaların eşleştirilmesiyle oluşan göreceli konumundan sağlanmaktadır. 2B grafik tabanlı SLAM varyantının en büyük dezavantajı lazer tarayıcıdan gelen verilerin eşleştirme işleminin uzun ve yavaş gerçekleşmesidir. TORO (Tree-based NetwORk Optimizer) SLAM algoritması, grafik üzerinde sistemin konumunu ve yönelimi ilişkilerini optimize etmek için ağaç tabanlı bir optimizasyon kullanmaktadır. Algoritma bu yapıyla harita belirsizlikleri azaltmak, haritalama ve konumlandırma doğruluğun arttırmak ilaveten sistemin hareket ve algılama verilerinden elde edilen ilişkilerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Hu, Huang, & Dissanayake, 2010).

2B özellik tabanlı SLAM varyantı ana soru verilerin içerisindeki özelliklerin nasıl algılanıp tanımlanacağı ve hangi tür özelliklerin kullanacağıdır. Dış mekân çalışmalarında ağaçlar veya yapıların duvar köşeleri örnek olarak gösterilebilir. Her haritalandırma işleminde elde edilen özellikler veri birleştirme aşamasına tabi tutulmaktadır. Veri birleştirme işlemi için en basit çözüm yolu en yakın komşu ilişkilendirme çözümüdür. Bu çözümün etkili olabilmesi için harita belirsizliğinin en yakın komşu eşiği dikkate alınarak özellikler arasındaki mesafenin daha kısa olması gerekmektedir. Bu bağlamda en yakın komşu çözümü veri birleştirme işlemi için yeterince küçükse 2B özellik tabanlı SLAM varyantına ait algoritmalar kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında 3B görüntü tabanlı SLAM, 3B grafik tabanlı SLAM ve Semantik SLAM varyantları alt başlıklarla incelenecektir.

### 3.1.1.1 3B Görüntü Tabanlı SLAM Varyantı

3B görüntü tabanlı SLAM varyantı özellik tabanlı SLAM varyantına benzemektedir. 3B görüntü tabanlı SLAM varyantı veya kısaca Görsel SLAM varyantı bu varyantlar içerisindeki en çok kullanılan ve üzerine en çok çalışma yapılan varyanttır. Birbirinden farklı görsel noktalardan oluşan bir harita ile bu noktaların görüntü konumlarını gözlemleyen bir yapıya dayanan görsel SLAM varyantı, fotogrametri ve bilgisayar görüşü alanlarında uzun süredir incelenmiş ve geliştirilmiş bir teknolojidir. Fotogrametri alanında kullanılan ışın demetleriyle blok dengeleme ve SfM bu varyantın çevrimdışı bir versiyonu olarak benzetilmektedir (Albrecht, 2009; Sharafutdinov et al., 2023). Bu varyantın çalışma prensibi incelendiğinde ilk adım olarak taramalardaki özellik noktalarının tespiti gerçekleştirilmektedir. Çevrenin belirgin özelliklerinden bu noktalar seçilmektedir. Bu sayede algoritma çevredeki değişiklikleri algılamakta, konumunun ve sistem yöneliminin belirlenmesine ve cisimlerin konumunu birbiriyle bağlayarak harita oluşturulmasını sağlamaktadır. Özellik noktalarının tespitinde farklı nokta belirleyicileri kullanılmaktadır. SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) veya SURF (Speeded-Up Robust Features) gibi nokta çıkarımı yapan algoritmalar kullanılmaktadır. Ardından her bir nokta için bir tanımlayıcı vektör hesaplanmaktadır. Bu tanımlayıcı vektörler, her bir noktanın görüntüsel özelliklerini ve yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu adım ilk aşamada bulunan özellik noktalarının korunmasını sağlamaktadır ve farklı koşullar altındaki taramalarda bu noktaların tespiti için gereklidir. Bu vektörler farklı taramalardaki benzer noktaların eşleştirilmesi için kullanılmaktadır. Eşleştirme işlemi, farklı taramalar arasındaki benzerlikleri tespit etmektedir ve bu benzerliklere dayalı olarak noktalar arasında eşleştirmelerin yapılmasını sağlamaktadır. Vektör tanımlayıcıları olarak SIFT veya SURF gibi tanımlayıcılar kullanılmaktadır. Tanımlayıcı vektörler kullanılarak uzaklık veya benzerlik ölçütlerine dayalı olarak iki farklı taramadaki noktaların en yakın komşularının bulunmasıyla tarama eşleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu eşleşmeler, farklı kamera pozisyonları veya bakış açıları arasındaki benzer noktaların tanımlanmasını ve benzerliklere dayalı olarak birbirine bağlanmasını sağlamaktadır. Bu bağlantılar, sonraki adımlarda kullanılarak kamera hareketlerinin ve nesnelerin konumlarının tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. RANSAC (Random Sample Consensus) algoritması kullanılarak eşleştirilmiş özellikler arasındaki tutarlığın belirlenmesi için ve doğru eşleştirilmesi için kullanılmaktadır. RANSAC algoritması eşleştirmelerin bir alt kümesi rastgele seçmektedir ve eşleştirmeleri kullanarak bir model

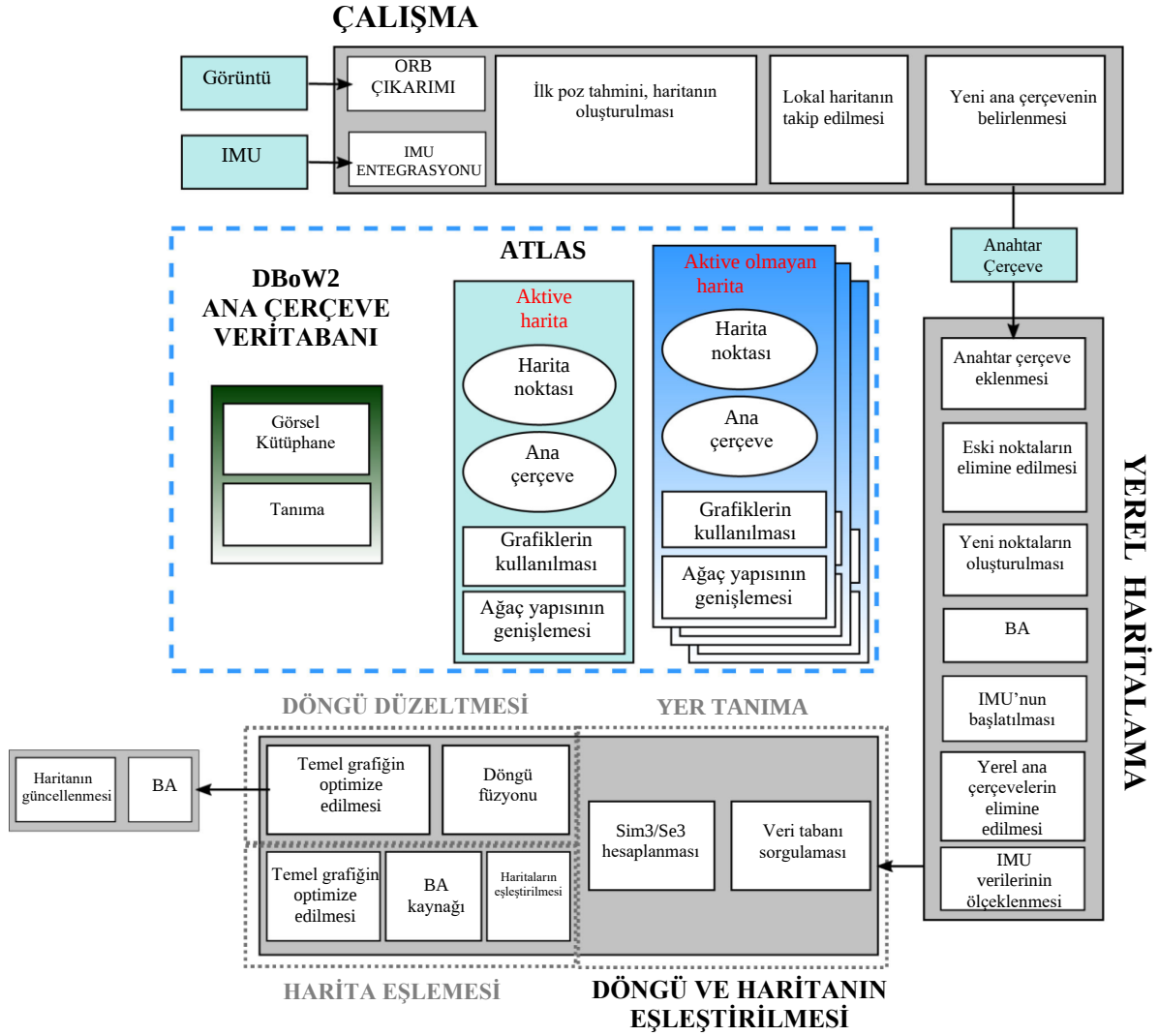
oluşturmaktadır. Oluşturulan model, kameranın hareketini temsil etmektedir ve modelin geri kalan veri kümesinin ne kadar uyumlu olduğu hesaplanmaktadır. RANSAC işleminin bir alt adımı 5/7 nokta algoritmasıdır. 5/7 nokta algoritması 5 veya 7 nokta kullanarak kamera hareketi tahmini gerçekleştirilmektedir ve bu tahminin ne kadar uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Bu süreç farklı alt kümelerin verdikleri sonuca bağlı olarak tekrar tekrar gerçekleştirilmektedir. En iyi model, en yüksek uyumlu çift sayısına sahip olan tekrar seçilen alt kümeyle belirlenmektedir. Bu şekilde doğru eşleştirmeler tespit edilmektedir ve güvenilir bir kamera hareketi tahmini oluşturulmaktadır. Son işlem adımı olarak RANSAC tarafından kabul edilen tüm taramalara least-squares tahmini yapılmaktadır. Least-squares tahmini, gözlemler arasındaki hata karelerinin toplamını en aza indirmektedir ve böylece en iyi uyumlu modeli oluşturmaktadır. Son işlem adımı görüntüler arasındaki kamera hareketlerinin veya nesne konumlarının daha kesin bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır ve sonunda SLAM sürecinin daha doğru bir harita oluşturmaya yardımcı olmaktadır (Frese et al., 2010; H. B. Makineci, Karabörk, & Durdu, 2020; Sharafutdinov et al., 2023).

3B görüntü tabanlı ilk SLAM algoritması Mono SLAM'dır (Davison et al., 2007). Algoritma bileşenleri incelendiğinde filtre temelli yöntemler kullanılarak SfM işlemi hızlandırılmış ve tarama verilerinden elde edilen görüntülerle kamera konumu bulunabilmektedir (Sharafutdinov et al., 2023). Mono SLAM algoritması, gerçek zamanlı olarak noktaların konumunu ve tarama ayak izini elde edebilmektedir. Mono SLAM algoritmasının sahip olduğu dezavantajlar 3B görüntü tabanlı SLAM varyantının gelişmesine sebep olmuştur. Kötü ölçeklenen filtreleme yaklaşımı, ayak izinin, özellik konumlarının aynı iş parçacığında çalışıyor olması ve güncelleme zorunluluğu Mono SLAM algoritmasının sahip olduğu birkaç dezavantajdır. Bu dezavantajları minimize etmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve literatüre sunulmuştur (Klein & Murray, 2007; Mur-Artal, Montiel, & Tardós, 2015; Strasdat, Montiel, & Davison, 2010). Geliştirilen algoritmalar arasında en popüler ve sürekli güncellemelerle desteklenen algoritmalarından biri olan ORB SLAM algoritması günümüzde dört farklı sürüme sahiptir.

ORB SLAM algoritması üç paralel işlemi içermektedir. İlk işlem adımı, gözlemlenen anahtar noktaları haritaya eşleştirerek kamera trajedisinin oluşturulmasıdır. İkinci işlem harita oluşturarak ışın demetleriyle blok dengeleme problemini çözmektedir. Ve son işlem adımı döngü kapanışlarını bulmaktadır. Ayrıca, tüm kamera trajedisinin tam optimizasyonunu tetikleyebilmektedir (Mur-Artal et al., 2015). ORB SLAM2 algoritmasını ilk sürümünden ayıran en büyük özellikse stereo ve derinlik kameralarını

destekleyebilmesidir. ORB SLAM2'nin çerçevesine sinir ağından alınan semantik bilgilerin eklendiği ORB SLAM2- CNN algoritması semantik SLAM algoritmasına örnek bir algoritmadır (Mur-Artal & Tardós, 2017a; Sharafutdinov et al., 2023; Tateno, Tombari, Laina, & Navab, 2017). Çalışma kapsamında görüntü tabanlı SLAM varyantı olarak ORB SLAM3 algoritması çalıştırılmıştır.

ORB SLAM3 algoritmasını diğer algoritmalarından ayıran birkaç farklı özelliği bulunmaktadır. IMU başlatma aşamasında bile tamamen harita tahminine dayanmaktadır. Görsel-inersiyel ile entegrasyonu eklenerek, stereo-inersiyel SLAM'a genişletme işlemi gerçekleştirilmiştir. Monoküler ve stereo görsel-inersiyel sistemlerin son derece başarılı olduğu ve hatta döngü kapanması olmayan taramalarda bile optimum sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Campos, Montiel, & Tardós, 2020; Mur-Artal & Tardós, 2017b). Son yıllarda geliştirilen görüntü tabanlı SLAM algoritmaları mekânsal çözümlemesini DBoW2 kütüphanesini kullanarak gerçekleştirmektedir (Mur-Artal & Tardós, 2017a; Qin, Li, & Shen, 2018; Zhao et al., 2024). DBoW2 kütüphanesi geometrik tutarlılığı kontrol etmeden önce üç ardışık taramayı eşleştirmektedir. Bu durum hassasiyeti arttırsa da kontrol aşamasına tekrar dönülmesi veri büyüklüğünün artmasına ve işlem süresinin uzamasına neden olmaktadır. ORB SLAM3 algoritmasında bu problem aday anahtar çerçeveler öncelikle geometrik tutarlılık açısından kontrol edilerek ve ardından çoğu durumda haritada bulunan üç anahtar çerçeve ile tutarlılık açısından kontrol işlemi gerçekleştirilerek çözülmüştür. Bu çözüm anahtar çerçeveleri geri çağırma ve veri birleştirme yoğunluğunu artırmaktadır ve harita doğruluğunu geliştirmektedir. ORB SLAM3 algoritmasının diğer sürümlerine göre en yenilikçi yanı görsel ve görsel-inertial sistemleri tek gözlü ve stereo konfigürasyonlarda işleyebilen ORB-SLAM Atlas ilişkisiz harita kümesini temsil edebilen, mekân tanıma, kamera özelleştirilmesi, döngü kapatma ve hassas, sorunsuz harita birleştirme işlemleri dahil tüm haritalandırma işlemlerini sorunsuz bir şekilde uygulamaktadır. Bu, farklı zamanlarda oluşturulan haritaları otomatik olarak kullanmayı ve birleştirmeyi sağlamaktadır (Campos, Elvira, Rodríguez, Montiel, & Tardós, 2021). Tüm bu gelişmelerle birlikte ORB SLAM3 algoritmasının çalışma şeması Şekil 3.4'te sunulmuştur.



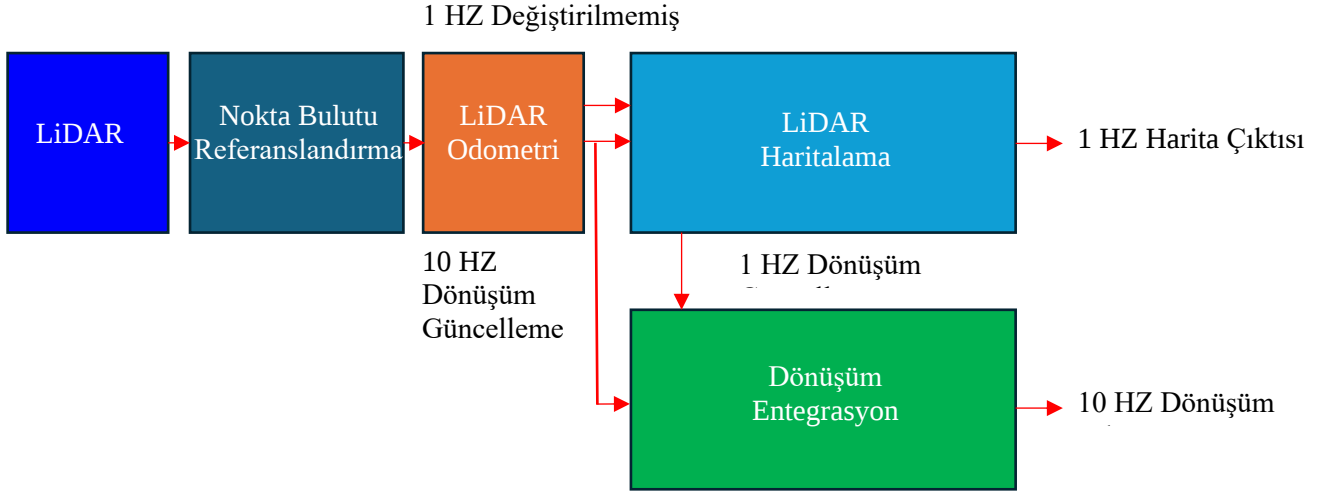
Şekil 3.4. ORB SLAM3 algoritmasının çalışma şeması (Campos et al., 2021)

### 3.1.1.2 3B Grafik Tabanlı SLAM Varyantı

Bu varyant 2B grafik tabanlı SLAM varyantının benzeri niteliğindedir. 3B grafik tabanlı SLAM varyantından elde edilen veriler daha yoğun ve işlenme süreci farklıdır. Sistem yardımıyla elde edilen nokta bulutları çiftler halinde tarama eşleştirme algoritması kullanılarak birleştirilmektedir. Birleştirme ve hizalanma işlemi ICP algoritması ve benzer algoritmalar kullanılmaktadır. Nokta bulutunun hizalanmasının ardından, en olası pozları hesaplamak için belirsiz poz ilişkilerinden oluşan bir grafik oluşturulmaktadır ve tüm taramalar global olarak eşleştirilerek hassasiyet artırılmaktadır (Frese et al., 2010). 3B grafik tabanlı SLAM varyantlarına ait algoritmalarda IMU kullanmak zorunludur. Bunun nedeni hareket elindeyken sistemin sarsılması ve tek düze hareket etmemesidir.

Bu duruma paralel olarak SLAM algoritmasını kullanan sistemin dur kalk yapması konumlandırma ve haritalandırma sürecinde ciddi problemlere yol açabilmektedir. SLAM 6D algoritması bu varyanta ait popüler bir algoritmadır (Frese et al., 2010). SLAM 6D algoritması LiDAR sensörünü desteklemektedir ve LiDAR sensöründen gelen verileri kullanarak haritalama işlemini yürütmektedir. Algoritma x, y ve z koordinatlarının yanı sıra yön ve eğim gibi ekstra boyutları içeren 6 serbestlik dereceli bir konumlandırma problemine odaklanmaktadır. SLAM 6D algoritması nokta çiftlerinin eşleştirilmesinde ICP algoritmasını kullanmaktadır ve döngü kapanmasının anlaşılabilirliğinin kolaylaştırılması amacıyla yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Nüchter et al., 2007). Günümüzde akademik çalışmalar için SLAM 6D algoritması kullanılarak geliştirilen sırt çantası ve el tip LiDAR sistemleri bulunmaktadır.

Bir diğer 3B grafik tabaklı SLAM algoritması LOAM algoritmasıdır. LOAM algoritması tam olarak SLAM algoritması olarak betimlenmese de SLAM 6D algoritmasının bir yan algoritması olarak betimlemek mümkündür. Algoritma 6-DOF ağacında LiDAR sensörü kullanılarak odometri bilgisine sahip haritalar üretmeye amaçlamaktadır. LOAM algoritması iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak LiDAR sensörünün hızını ve konumunu belirleyebilmek amacıyla yüksek frekanslı düşük doğruluklu odometri verisi üretilmektedir. Ardından odometri verisi kullanarak nokta bulutlarını hassas bir şekilde eşleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde taramalara ait noktaların eşleştirilmesi için ICP algoritmasına benzer algoritmalar kullanılmaktadır. SLAM 6D algoritması ile LOAM algoritmasının birbirinden ayıran en büyük fark odometri bilgisinin oluşturulmasıdır. Günümüzde akademik çalışmalar başta olmak üzere LOAM ve LOAM benzeri algoritmalar kullanılarak geliştirilen sırt çantası ve el tip LiDAR sistemleri bulunmaktadır (Akpınar et al., 2022; S. W. Chen et al., 2020; Karam et al., 2019; J. Zhang & Singh, 2014). Şekil 3.5'te LOAM algoritmasının çalışma şeması sunulmuştur.



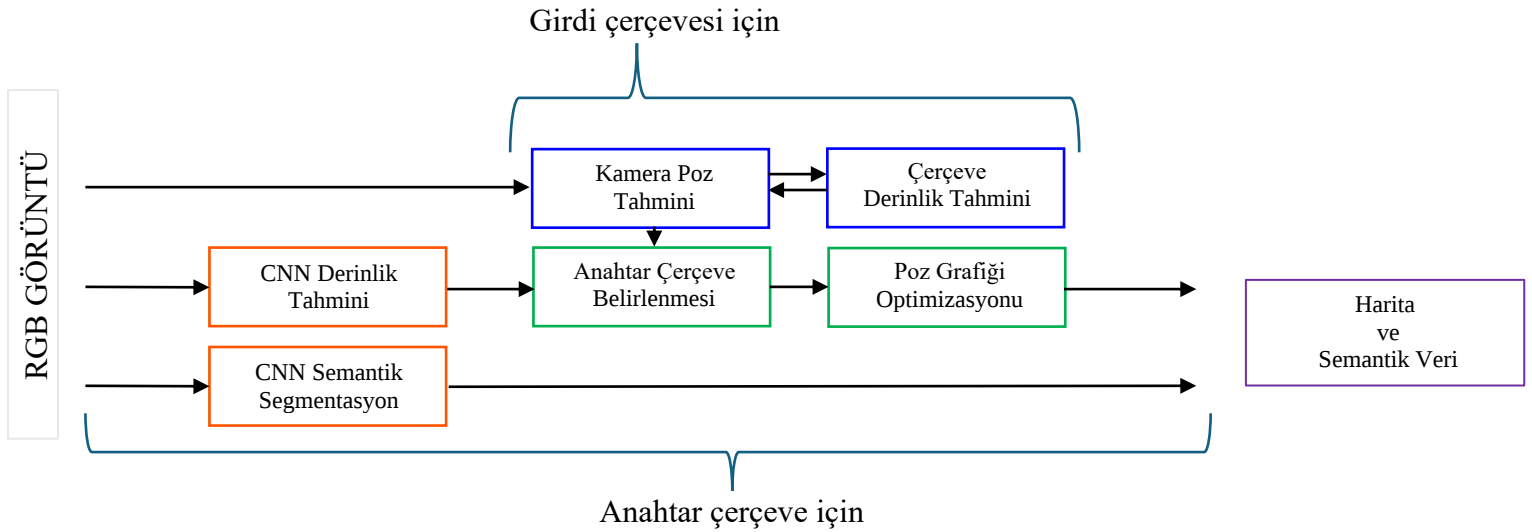
Şekil 3.5. LOAM algoritması çalışma şeması

LiDAR verilerinden gelen nokta verilerinin birleştirilmesi ve referanslandırılmasının ardından odometri verisi nokta verilerine düzeltme verisi olarak eklenmektedir. 10 Hz hızında ve 1 Hz hızında çalışan iki sistem bileşenine dönüşüm gerçekleştirilerek sonuç nokta verisi elde edilmektedir. Sonuç nokta verisinin konumsal doğruluğu noktaların referanslandırma doğruluğuna ve odometri doğruluğuna bağlı olduğu görülmektedir (J. Zhang & Singh, 2014).

### 3.1.1.3 Semantik SLAM Varyantı

Sistemin çevrenin haritalandırmasını yaparken çevrede bulunan nesnelerin semantik bilgisini de haritalandırma sürecine dahil eden algoritmalar, semantik SLAM varyantı içerisinde yer almaktadır. Semantik SLAM algoritmaları diğer SLAM algoritmalarıyla benzer şekilde çalışmaktadır ve çevredeki nesnelerin sadece geometrik yapılarını değil aynı zamanda semantik bilgilerini de dikkate alarak süreci devam ettirmektedir. Semantik SLAM varyantı, konumlandırma ve haritalandırma sürecine yüksek düzeyde algılama, sağlam performans, kaynak farkındalığı ve görev odaklı algılama sağlayarak performansı artırarak SLAM sürecini geliştirmektedir. Bu duruma paralel olarak semantik SLAM algoritmalarından gelen sonuç haritaları, haritalama çalışmaları başta olmak üzere birçok farklı çalışmada kullanılmaktadır (Iwaszczuk, Koppanyi, Pfrang, Toth, & Sciences, 2019). Bu durum algoritmaların popülaritesi artmıştır (Joans & Education, 2021; Sualeh & Kim, 2019). SLAM ++ algoritması semantik açıdan tam olarak tamamlanmış ilk SLAM algoritmalarından gösterilmektedir.

Algoritma gerçek arazi şartlarında çalışmaya başlamadan önce çevredeki cisimlerin CAD modelleri veri tabanının yüklenmiş ve algoritmaya eğitimi gerçekleştirilmiştir. Ardından gerçek arazi koşullarında RGB-D kamera kullanılarak haritalandırma gerçekleştirilmiş ve sınıflara ayrılmış bir harita elde edilmiştir (Salas-Moreno, Newcombe, Strasdat, Kelly, & Davison, 2013). Bir diğer önemli semantik SLAM algoritması olan CNN SLAM, tek RGB kameradan alınan görüntülerle hem derinlik hem de nesne tanımlama ve sınıflandırma yaparak 3B haritalar oluşturmaktadır. Derinlik tahmini için derin sinir ağı (CNN) kullanılmaktadır. CNN, görüntüdeki her piksel için derinlik tahmininde bulunmaktadır. Bu tahminden elde edilen derinlik haritası, yoğun rekonstrüksiyon için bir başlangıç noktası olarak kullanılmaktadır. Temel olarak CNN tarafından tahmin edilen yoğun derinlik haritaları doğrudan tek kameralı RGB-D kamera kullanılarak SLAM'dan elde edilen derinlik ölçümleriyle birleştirilerek 3B rekonstrüksiyon sağlanmaktadır. Görsel olarak ayırt edilebilir bir alt küme olan anahtar çerçeveler toplanmaktadır ve pozlar poz grafik optimizasyonuna dayalı olarak global olarak iyileştirilmektedir. İlave olarak kamera poz tahmini, her giriş çerçevesinde, çerçevenin ve en yakın anahtar çerçeve arasındaki dönüşümün tahmin edilmesiyle gerçekleştirilmektedir (Tateno et al., 2017)(Şekil 3.6.).



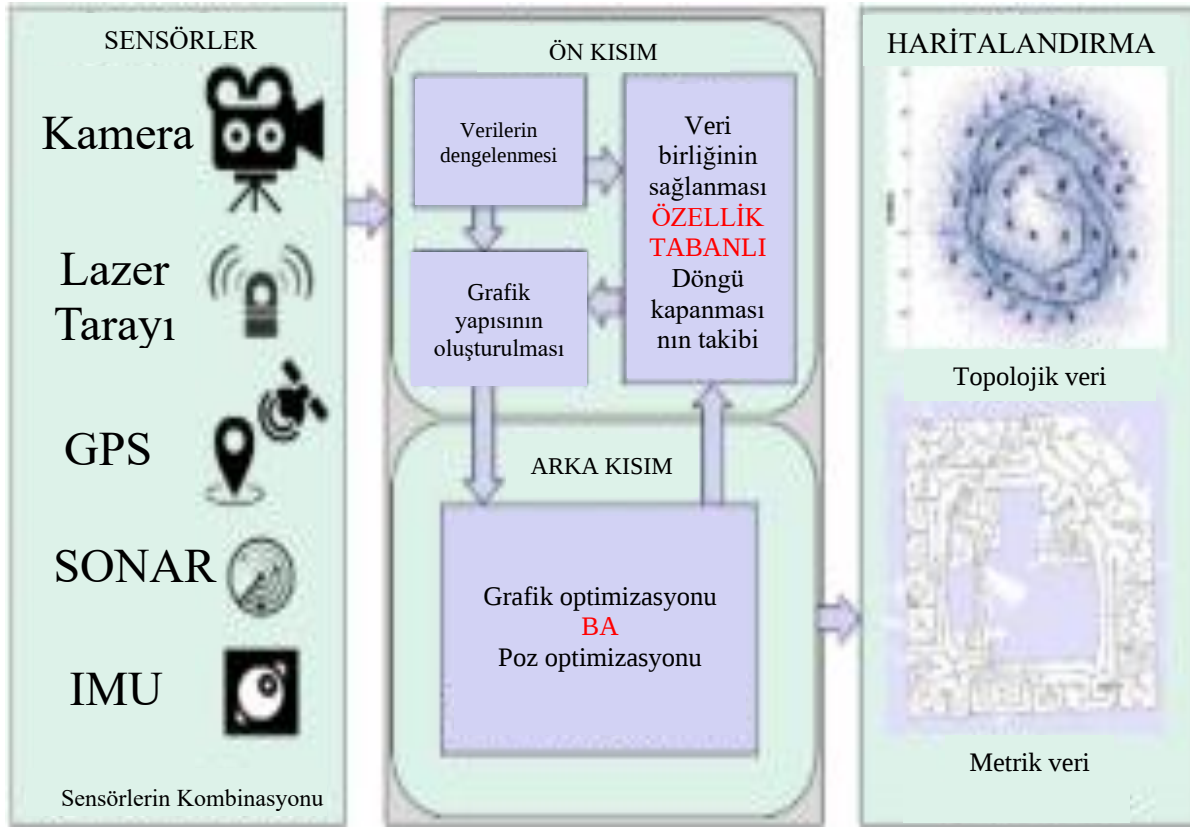
Şekil 3.6. CNN SLAM algoritması çalışma şeması (Tateno et al., 2017)

Yüksek kare hızını korumak amacıyla, derinlik haritasının yalnızca anahtar çerçeveler üzerinde CNN aracılığıyla derinlik tahmini gerçekleştirilmektedir. Her derinlik tahmininin piksel bazında güvenini ölçerek bir belirsizlik haritası

oluşturulmaktadır. SLAM algoritması için kullanılan kamera genellikle CNN'in eğitildiği veri setini edinmek için kullanılan kameradan farklı olduğundan, farklı inersiyel kamera parametrelerine karşı sağlamlık kazanmak için derinlik haritasının belirli bir normalizasyon prosedürü CNN SLAM algoritmasında geliştirilmiştir. Ek olarak, anlamsal etiket birleştirilmesi yapılırken, giriş çerçevesinin anlamsal bölümlenmesini tahmin etmek amacıyla ikinci evrimleştirilmiş ağ kullanılmaktadır. Son olarak, anahtar çerçevelerde bir poz grafik oluşturulmakta ve bunların göreceli pozları global olarak optimize edilmektedir (Tateno et al., 2017).

### 3.1.2 Modern Slam Yöntemi Çalışma Prensibi

Modern SLAM yöntemi kavramı içinde değerlendirilen çoğu uygulama grafik formülasyonu ele alarak konumlandırma ve haritalandırma problemini çözmektedir (Lu & Milios, 1997; Sualeh & Kim, 2019). Grafik, kısıtlamaları tanımlayan bir kuadratik eşitliğe karşılık gelen bir matris olarak oluşturulmaktadır. Ardışık ölçümlerle birlikte, ilave kenarlar karşılık gelen kısıtlamalar olarak matrise eklenmektedir. Grafiğin oluşturulmasının ardından kısıtlamaları sağlayan robot pozisyonlarının optimal yapılandırılması gerekmektedir. Dolayısıyla, grafik tabanlı SLAM çalışma mimarisi genellikle SLAM algoritmasının ön ve arka kısmı olarak kabul edilen iki parçadan oluşmaktadır (Şekil 3.7.). SLAM algoritmasının ön kısmı sensörlerden elde edilen ham ölçümler aracılığıyla grafik oluştururken SLAM algoritmasının arka kısmı ise kısıtlamalara dayalı olarak en olası konum yapılandırmasını hesaplamak için grafik optimizasyonunu gerçekleştirmektedir (Ahmed et al., 2023; Sualeh & Kim, 2019).



Şekil 3.7. SLAM algoritması çalışma şeması

### 3.1.2.1 SLAM Algoritması Ön Kısım

SLAM algoritmasının ön kısmı sensörlerden gelen ham verilerle doğrudan etkileşimdedir, veriler işlenmesi ve sisteminin önceden ziyaret edilen yerleri tanımlamasını sağlayan veri ilişkilendirme işlemi de bu kısımda gerçekleştirilmektedir. Bu kısımda algoritmanın temel taşı olarak görülen grafikler düğümlerin ve faktörlerin eklenmesiyle bu kısımda oluşturulmaktadır (Sualeh & Kim, 2019).

SLAM yönteminde robotlara yerleştirilen sensörler tarafından gerçekleştirilen ölçümler, doğrudan robot durumunun bir fonksiyonu olarak yazılmamaktadır. Ancak, SLAM yönteminin haritalama formülasyonu ölçümleri çevreye bağlayan analitik bir fonksiyon gerekliliği olarak ortaya koymaktadır (Sualeh & Kim, 2019). Bu gereklilikler sensörlerden gelen verilerin işlenerek anlamlı bilgilerin özellikler olarak çıkarılmasıyla sağlanmaktadır. Veri işleme süreci kullanılan sensörlere göre farklılık göstermektedir. Örnek olarak görüntü tabanlı SLAM varyantında doğrudan ve özellik tabanlı veri işleme yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır (Nimawat, 2023).

Verilerini ilişkilendirilmesi sensörler kullanılarak gerçekleştirilen ölçümün çevrenin herhangi bir kısmıyla ilişkilendirilmesini ifade etmektedir. Sistemin izlenmesi ve döngü kapanmanın takip edilmesi işlemleri bu kısımda gerçekleştirilmektedir. Veri ilişkilendirilmesi sırasında gerçekleşecek hatalar haritalandırma doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

Veri ilişkilendirme sürecinde işlenen verilerde karşılaşılan algısal yanılsama ve veri değişkenliği karşılaşılan problemlerdendir. Bu bağlamda döngü kapanması gerçekleştirildiğinde görüntüler arasındaki benzerlik ölçüsü tespit edilerek tanımlayıcılar ölçeklendirme işlemini gerçekleştirmektedir (Sualeh & Kim, 2019). Bu işlem sürecinde Bag-of-Words (BoW), Fisher Vector (FV) ve Vector of Locally Aggregated Descriptors (VLAD) gibi tanımlayıcılar kullanılmaktadır (Csurka, Dance, Fan, Willamowski, & Bray, 2004). Veri ilişkilendirme sürecinde görüntüler arasındaki farkın optimum seviyede algılanması, döngü kapanmasının iyileştirilmesi, derinliğin algılanması gibi desteklemeler için makine öğrenimi tabanlı tekniklerin bu kısımda kullanıldığı görülmektedir. Bu tür çalışmalara örnek olarak, ham veriden özellik öğrenen derin sinir ağlarına dayalı yaklaşımların kullanımı gösterilebilmektedir (Tateno et al., 2017). Özellikle Semantik SLAM varyantında verilerin sınıflara ayrılması sağlam döngü kapanma tespitine yardımcı olsa da sürecinin uzamasına neden olmaktadır (Li et al., 2021; Sualeh & Kim, 2019).

### 3.1.2.2 SLAM Algoritması Arka Kısım

Ön kısımda sensörler yardımıyla toplanan ve işlenen veriler, harita tahmini işlemi için arka kısma gönderilmektedir. Bu kısımda işlem adımlarının en aza indirgenmesi amacıyla Gauss Newton, Levenberg-Marguardt gibi yöntemler kullanılarak ardışık doğrusallaştırma işlemi gerçekleştirilir. Harita tahmini işleminde birçok formülasyon kullanılmaktadır (Sualeh & Kim, 2019). Bunlardan bir tanesi Poz Grafiği (PG) optimizasyonudur (Campos et al., 2021; R. Kümmeler, Grisetti, Strasdat, Konolige, & Burgard, 2011). Poz grafiği optimizasyonunda sistemin izlediği yol boyunca pozlar tahmin edilerek değişkenler ele alınmaktadır ve her faktör poz çiftine bir kısıtlama uygulamaktadır. SLAM yönteminin arka kısmında, hareketten yapı (SfM), demet dengeleme, ışın demetleriyle blog dengeleme (LBA) gibi algoritmalarda kullanılmaktadır (Davison et al., 2007; Sualeh & Kim, 2019; Sumikura, Shibuya, & Sakurada, 2019).

## 3.2 Kullanılan Ekipmanlar

Çalışma kapsamında SLAM yöntemine ait farklı varyantların test edilmesi amacıyla dört farklı sırt çantası/el tipi LiDAR sistemi ve akıllı cep telefonu kullanılmıştır.

### 3.2.1 Sırt Çantası ve El Tipi LiDAR Sistemleri

Mobil LiDAR sistemlerinin bir parçası olan sırt çantası LiDAR sistemleri ya da el tipi LiDAR sistemleri bir insanın kaldırabileceği bir ağırlıktadır ve sistem bileşeni olarak bünyesinde kamera, LiDAR sensörü, IMU gibi sensörleri bulundurmaktadır. Bazı marka/modellerde sırt çantası LiDAR sistemlerinde GNSS alıcısı da bulunmaktadır. Sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri hızlı ve pratik kullanımı, elde edilen sonuç ürünlerinin yüksek doğrulukta olması gibi avantajları göz önünde bulundurulduğunda kadastro, mimari röleve, dijital ikiz, akıllı şehir, madencilik çalışmaları başta olmak üzere birçok farklı çalışmada kullanılmaktadır (Aslan et al., 2022; Balcı, 2022; Kara Aydın, 2022; Özdemir et al., 2022; Shahat, Hyun, & Yeom, 2021). GNSS alıcısına sahip Greenvalley Libackpack DGC50, Leica BLK20, GeoSLAM ve STONEX X120 marka/model LiDAR sistemlerinden elde edilen sonuç ürünler çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. LiDAR sistemlerinin ticari haklarının saklı olması sebebiyle sistem bünyesinde hangi tür algoritma kullanıldığına açık bir veri bulunmamaktadır. Bu bağlamda SLAM yönteminin hangi algoritmasının kullanıldığı ya da geliştirildiği belirtilmemekle birlikte SLAM yönteminin hangi varyantının kullanıldığı paylaşılmaktadır.

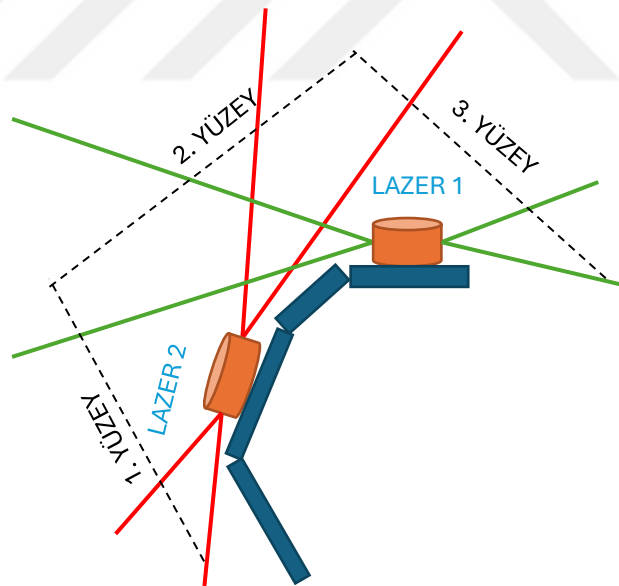
#### 3.2.1.1 GNSS Alıcılı Sırt Çantası LiDAR Sistemi

Greenvalley Libackpack DGC50 (GVL DGC50) sırt çantası LiDAR sistemini diğer sistemlerden ayıran özelliği farklı sensör yapısına sahip olmasıdır. Sistem bünyesinde 2 adet LiDAR sensörü, PPK yöntemiyle çalışan GNSS alıcısı, 360° kamera ve IMU bulunmaktadır. Sistemin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur

**Çizelge 3.1.** GVL DGC50 LiDAR sisteminin teknik özellikleri

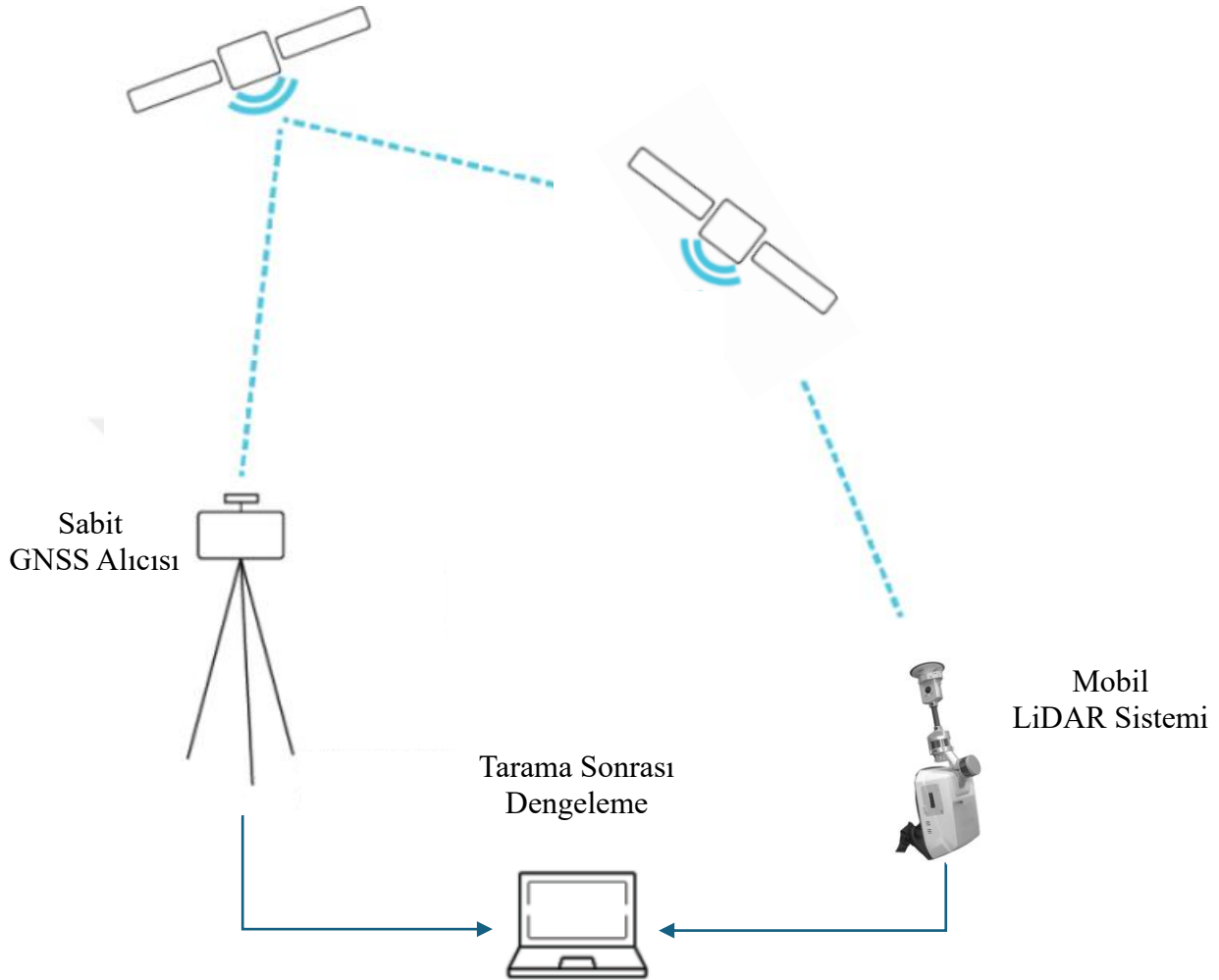
|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| Tarama Mesafesi              | 0.5-100 m                |
| Tarama Hızı                  | 300000                   |
| Görüş Alanı                  | 360 yatay $\pm$ 15 düşey |
| Lazer Doğruluğu              | 3 cm                     |
| Çalışma Sıcaklığı            | -10 ve 60                |
| Lazer Dalga Boyu             | 903 nm                   |
| Kamera Çözünürlüğü           | 4320×2160                |
| Kamera Frame Oranı           | 25 fps                   |
| GNSS Alıcısı Konum Doğruluğu | 1cm + 1 ppm              |

GVL DGC50 LiDAR sisteminde 2 adet LiDAR sensörü bulunmaktadır ve yatay sensör üst kısımda bulunurken düşey sensör 60° açı ile sistemin orta kısmında bulunmaktadır (Şekil 3.8.). Sensörlerin bu şekilde konumlandırılması tarama alanlarının yüzeysel olarak maksimum düzeyde tutmak olduğu görülmektedir. Bu sayede nokta verilerinin daha net belirgin olduğu ve minimum seviyede ışın sapması olduğu görülmektedir (P. Chen et al., 2021).

**Şekil 3.8.** GVL DGC50'ye ait sensörler ve konumları (Özdemir et al., 2022)

GVL DGC50 LiDAR sistemindeki bir diğer önemli sensör, PPK yöntemiyle çalışan GNSS alıcısıdır. Bu alıcı sistemin en üst noktasında yer alır ve sistemin ayak izinin koordinatlarını hassas bir şekilde kaydeder. Aynı zamanda, LiDAR sistemiyle eş zamanlı bir şekilde çalışan ve poligon noktasına sabitlenmiş olan statik GNSS alıcısından alınan

düzeltilme verileri, dengeleme sürecinde kullanılarak elde edilen nokta bulutunu ülke koordinat sistemine referanslandırılmasını sağlamaktadır (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. PPK yöntemi ve çalışma şeması

GVL DGC50 LiDAR sistemi çalıştırıldığında anlık olarak toplanan verileri ön işleme sürecinde kontrol ekranına yansıtmaktadır. Sistemin ayak izi ve seyrek nokta bulutunu kontrol etmek mümkündür. Sistemin kullandığı SLAM algoritması, 3B grafik tabanlı SLAM varyantına ait bir algoritmadır.

### 3.2.1.2 Diğer LiDAR Sistemleri

GNSS destekli mobil LiDAR sisteminden farklı olarak çalışma kapsamında Leica BLK2GO, GeoSLAM ve Stonex X120 marka/model LiDAR sistemleri kullanılarak veriler toplanmıştır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Leica BLK2GO (A), GeoSLAM (B) ve Stonex X120 (C)

Leica BLK2GO 830 nm lazer dalga boyuyla, yatay ekseninde 360°, dikey ekseninde 270° görüş alanıyla çalışmaktadır. Minimum 0,5 m ve maksimum yalnızca 25 m menzile ve 420.000 pts/sn nokta ölçüm oranına sahiptir. Gürültü aralığı  $\pm 3$  mm'dir. Sistem, taramalar ve nokta bulutu renklendirmenin yanı sıra, görüntü yakalama için yüksek çözünürlüklü bir adet 12 Megapiksel (Mp) ve üç adet 4,8 Mp kameraya sahiptir. Yalnızca 775 g ağırlığındadır ve pil başına 45 dakikaya kadar tarama yapabilmektedir. Leica BLK2GO el tipi LiDAR sisteminde konumlandırma ve haritalandırma işleminin çözülmesi için özel bir SLAM algoritmasına sahip olduğu görülmektedir. Bu algoritma "GrandSLAM" adını taşımaktadır ve hem görüntü tabanlı hem de grafik tabanlı varyantların özelliklerini içermektedir. Ayrıca algoritma IMU ile desteklenmektedir (Del Duca & Machado, 2023).

GeoSLAM LiDAR sistemi yakın kızılötesinde 905 nm dalga boyunda darbeleri ışık ışınlarla tarama gerçekleştirmektedir. Darbenin sensörden nesneye ve geriye doğru uçuş süresi 40 Hz'dir. Sistemin maksimum mesafe aralığı 100 m'dir. Sistem, 300.000 nokta/sn hızında çalışabilmektedir. GeoSLAM sisteminin kullandığı algoritma ismi

paylaşılmamıştır ancak grafik tabanlı SLAM yöntemiyle çalıştığı belirtilmektedir (Sammartano & Spanò, 2018).

Stonex X120 830 nm lazer dalga boyuyla çalışmaktadır ve yatay ekseninde 360°, dikey ekseninde ise 270° görüş alanına sahiptir. Minimum menzil 0,5 m, maksimum menzil ise 120 m'dir. Sistem, 320.000 nokta/sn hızında çalışabilmektedir ve  $\pm 3$  mm'lik bir gürültü aralığına sahiptir. Sistem bünyesinde yüksek çözünürlüklü üç adet 5 Mp kamera bulunmaktadır. Stonex X120 LiDAR sisteminin kullandığı algoritma ismi paylaşılmamıştır ancak 3B grafik tabanlı SLAM yöntemiyle çalıştığı belirtilmektedir.

### 3.2.2 Akıllı Mobil Cihaz

Son yıllarda akıllı mobil cihazların artırılmış gerçeklik (AR) uygulamalarında kullanılması ve kamera performansının iyileştirilmesi amacıyla LiDAR sensörü eklenmiştir. Geliştirilen mobil uygulamalar LiDAR sensörünün farklı amaçlar için kullanılmasına da olanak sağlamıştır. Özellikle görüntü tabanlı SLAM varyantına sahip mobil uygulamalar (Scaniverse, 3D ScannerApp, Pix4d Catch, SiteScape) 3B modelleme çalışmaları başta olmak üzere birçok çalışmada aktif olarak kullanılmaktadır (Erol et al., 2023; Hou et al., 2024; H. B. Makineci & Erdal, 2023; Monsalve et al., 2023). Mobil uygulamalar LiDAR sensörünü desteklemektedir. LiDAR sensörü bulunmayan akıllı cep telefonunda da kullanmak mümkündür. Apple markasının ürettiği iPhone akıllı cep telefonlarının pro modellerinde LiDAR sensörü bulunmaktadır. Çalışma kapsamında 15 Iphone Pro kullanılmıştır (Şekil 3.11.). Iphone 15 Pro akıllı cep telefonun da 48 megapiksellik f/1.7,8 diyafram açıklığına sahip ana kamera, 12 megapiksellik f/2.8 diyafram açıklığına sahip telephoto kamera ve yine 12 Mp f/2.2 diyafram açıklığına sahip ultra geniş açılı kamera bulunmaktadır. Iphone 15 Pro akıllı cep telefonun sahip olduğu LiDAR sensörünün teknik özellikleri hakkında bilgiler çok kısıtlıdır ancak maksimum tarama aralığının 5 m olduğu bilinmektedir (Tavani et al., 2022).



**Şekil 3.11.**İphone 15 Pro akıllı cep telefonu

### **3.3 Çalışma Alanları ve Veri Setleri**

Çalışma kapsamında GNSS destekli LiDAR sistemi kullanılarak Türkiye'nin farklı illerinde farklı çalışmalar kapsamında veriler toplanmıştır. El tipi LiDAR sistemleri ve akıllı cep telefonu kullanılarak İtalya'nın Arezzo şehrinde bulunan bir saraya ait veriler toplanmıştır. Gerçek arazi şartlarında gerçekleştirilen veri toplama çalışmalarının dışında 3B görsel SLAM varyantının test edilmesi amacıyla iki farklı veri seti kullanılmıştır.

#### **3.3.1 Çalışma Alanları**

Son yıllarda ülkemizde kadastro yenileme çalışmaları hız kazanmıştır. Kadastro yenileme çalışmaları kapsamında mesken ve gayri mesken alanlarının ölçülerek tapu kütüklerindeki alanları ve koordinatlarıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Bu bağlamda Aksaray, Muğla, Gümüşhane, Yozgat ve Bartın illerindeki kadastro yenileme çalışmasının arazi ölçümlerinde GNSS destekli sırt çantası LiDAR sistemiyle veriler toplanmıştır. Toplanan veriler CAD ortamına aktarılarak değerlendirilmiştir.

GNSS destekli sırt çantası LiDAR sistemi Iğdır ilinde bulunan tuz madeni modellenmesi ve Gümüşhane ilinde bulunan tarihi caminin mimari rölevesinin oluşturulması çalışmalarında kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında farklı varyantların karşılaştırılması amacıyla İtalya'nın Arezzo şehrinde bulunan Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait veriler toplanmıştır. Saray iki girişten oluşmaktadır. İlk giriş ana giriş olarak adlandırılmakta, ikinci giriş ise saat kulesinin olduğu giriş olarak adlandırılmaktadır(Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Palazzo della Fraternita dei Laici sarayı

### 3.3.2 Veri Setleri

Modern SLAM algoritmaları gerçek arazi koşullarında kullanılmadan önce bilgisayar ortamında test edilmektedir. Test sürecinde SLAM algoritmasının etkin bir şekilde çalışıp çalışmadığı ve sonuç ürünlerinin doğruluğu değerlendirilmektedir. Test işlemi amacıyla birçok veri seti oluşturulmaktadır. Bu veri setleri içerisinde bazıları literatürde kabul görmüştür ve birçok farklı çalışmada kullanılmıştır(Ahmed et al., 2023; Frese et al., 2010; Jesus et al., 2021; Joans & Education, 2021; Mingachev, Lavrenov, Magid, & Svinin, 2020; Sharafutdinov et al., 2023). Çalışma kapsamında görsel SLAM varyantı olan ORB SLAM3 algoritmasının test edilmesi amacıyla EuRoC MAV ve TUM VI veri seti tercih edilmiştir.

### 3.3.2.1 EuRoC MAV Veri Seti

Bu veri seti 2016 yılında oluşturulmuştur. Veri seti tamamıyla iç mekâna ait görüntülerden oluşmaktadır(Şekil 3.13.). Görüntüler stereo kameralar kullanılarak elde edilmiştir ve gri renk tonundadır(Burri et al., 2016). SLAM algoritmalarının değerlendirilmesi için sıklıkla kullanılan bir veri seti olduğu bilinmektedir(Jesus et al., 2021; Sharafutdinov et al., 2023). Ancak görüntü çözünürlüğü ve bit derinliğinin düşük olduğu görülmektedir. Veri setinin basit bir iç mekânda karmaşık olmayan görüntü alım güzergahına sahip olması nedeniyle ilk olarak EuRoC MAV veri setinden test edilen SLAM algoritmaları ardından diğer veri setlerinde test edilmektedir. Birçok SLAM algoritması EuRoC MAV veri setini çalıştırmaktadır(Burghoffer, Seyssaud, & Magnier, 2023; Campos et al., 2021; Pascoe, Maddern, Tanner, Piniés, & Newman, 2017; Sharafutdinov et al., 2023).



Şekil 3.13. EuRoC MAV data setinin toplandığı iç mekâna genel bakış

### 3.3.2.2 TUM VI Veri Seti

TUM VI veri seti 2018 yılında oluşturulmuştur. Veri seti 1024x1024 görüntü çözünürlüğüne sahip, 20 Hz'de 16-bit renk derinliği olan ilk olarak iç mekândan başlayıp ardından dış mekân çıkan ve döngü kapanması gerçekleştirerek başlangıç noktasında biten görüntülerden oluşmaktadır(Şekil 3.14.). Veri seti kameraya entegre edilmiş IMU verilerini de içermektedir(Schubert et al., 2018). TUM VI veri seti EuRoC MAV veri setine göre daha uzun sekansları içermektedir. Genellikle görsel SLAM varyantlarının testi amacıyla kullanılmaktadır. Veri setinin iç mekan kısmının testi için konum verisi bulunurken dış mekan kısmı için konum verisi bulunmamaktadır(Sharafutdinov et al., 2023).



Şekil 3.14. TUM VI veri setine genel bakış

### 3.4 Buluttan Buluta Karşılaştırma (C2C)

Farklı dönemlerde toplanan ya da farklı cihazlardan toplanan nokta bulutları arasındaki mesafeyi ifade eden noktalar arası mesafenin doğru hesaplanması, değişiklik tespiti, zamansal analiz gibi farklı analizler için önemlidir. Noktalar arası mesafenin hesaplamak amacıyla yöntemin seçimi, nokta bulutlarının boyutu, nokta gürültüsü ve aykırı değerlerin olup olmadığı ve mesafenin hesaplanmasında kullanılan yöntem(Öklid veya Hausdorff) gibi çeşitli etkenlere bağlı olduğu bilinmektedir. Noktalar arası mesafenin hesaplanması amacıyla çeşitli yöntemlere sahip farklı yazılımlar kullanılmaktadır(Diaz et al., 2023; Jafari, Khaloo, & Lattanzi, 2017; Javaheri, Brites, Pereira, & Ascenso, 2020).

Çalışma kapsamında CloudCompare yazılımında Doğrudan Buluttan Buluta Karşılaştırma yöntemi kullanılarak nokta bulutları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Yöntem nokta bulutunun kendi içerisindeki noktadan en yakın komşusuna Öklid mesafesinin medyanını belirleyerek nokta yoğunluğunun belirlenmesini sağlamaktadır. Karşılaştırılan iki nokta bulutu için bu işlemin tamamlanmasının ardından iki nokta bulutu arasındaki uzaysal ayrımın ölçülmesi amacıyla Hausdorff mesafesi ölçülmektedir ve ölçüm her bir nokta çifti için tek tek gerçekleştirilmektedir. Bu durum iki nokta bulutu arasındaki mekânsal ve geometrik farklılıkların ve benzerliklerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Karşılaştırma işleminde Hausdorff mesafesinin kullanılmasının en büyük avantajı nokta bulutunun yoğunluğunun homojenliği üzerinden herhangi bir varsayımda bulunmayarak hesaplamının gerçekleştirilmesidir.(Diaz et al., 2023).

Hausdorff mesafesi yönteminde referans nokta bulutuyla ve karşılaştırılan nokta bulutu arasındaki en yakın noktaların en büyük mesafeye sahip olanı belirlenmektedir.  $A = (a_1, \dots, a_p)$  ve  $B = (b_1, \dots, b_q)$  verilen iki sonlu nokta kümesi için Hausdorff mesafesi şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$H(A,B) = \max(h(A,B), h(B,A)) \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te "h" Hausdorff mesafesini göstermektedir ve :

$$h(A,B) = \max \min \|a-b\| \quad (a \in A), (b \in B) \quad (3.6)$$

$h(A,B)$  fonksiyonu tek taraflı Hausdorff mesafesi olarak adlandırılmaktadır ve simetrik özellik ( $h(A,B) \neq h(B,A)$ ) taşımamaktadır. Buna paralele olarak Eşitlik 3.5'te sunulan çift taraflı Hausdorff mesafesi tek taraflı Hausdorff mesafesine ve iki nokta bulutu arasındaki maksimum mesafeye bakarak simetrik hale gelmektedir.



## 4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

SLAM yönteminin farklı varyantlarına ait algoritmalarının test edilmesi, incelenmesi ve algoritmalar kullanılarak elde edilen sonuç ürünlerin değerlendirilmesi için iki farklı alternatif kullanılmıştır. Birinci alternatif SLAM yöntemine ait farklı varyantlar kullanılarak arazide nokta verisi, görüntüler ve GNSS bilgilerini içeren veri setlerinin toplanmasıdır. Bu süreçte SLAM algoritması aktif olarak kullanılmaktadır. İkinci alternatif olarak arazi çalışmalarında SLAM yöntemi kullanılmadan farklı sensörler kullanılarak elde edilen görüntüler açık kaynak kodlu SLAM algoritmalarına yüklenerek sonuç haritası ve kamera ayak izinin elde edilmesidir. Sırt çantası LiDAR sistemine ve mobil akıllı cihazlara entegre SLAM algoritması kullanılarak gerçek koşullarda veriler toplanmıştır. SLAM algoritması ve benzer algoritmaların test edilmesi amacıyla oluşturulmuş hazır veri setleri ORB SLAM 3 algoritmasına yüklenerek görüntü tabanlı SLAM algoritmasının testi gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışması başta olmak üzere tüm çalışma süresince gerçekleştirilen araştırma ve tarama işlemi sonuçlarının değerlendirilebilmesi için analiz aşamaları tasarlanmıştır. Doğru bir analiz gerçekleştirilmesi için elde edilen verilerin sağlam ve uyumlu olmasına dikkat edilmiştir.

### 4.1 Arazi Çalışmaları Bulguları

Dış mekân tarama çalışmaları kapsamında GNSS destekli LiDAR sistemi olan GVL DGC50 kullanılarak 137 tarama yapılmıştır. Dört farklı ilde ve farklı arazi koşullarında gerçekleştirilen 136 tarama kadastro yenileme çalışmalarında kullanılmıştır. Taramalar yapıların ve yapıların bulundukları kadastro ya da imar parseli sınırlarını içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir(Henrique & Uberti, 2024). Diğer tarama ise Gümüşhane İlinde bulunan tarihi caminin dijital ikizinin üretilmesi ve mimari röleve çalışmalarına altlık oluşturulması amacıyla uygun olarak tamamlamıştır(Balcı, 2022; H. B. Makineci & Erdal, 2021; Shahat et al., 2021). Taramalar sonucunda elde edilen sonuç ürünlerinin bağlı hatasının incelenmesi amacıyla Bartın ilinin merkez mahallerine ait 52 tarama alanına 307 adet YKN tesis edilmiştir.

Farklı SLAM algoritmalarına sahip mobil LiDAR sistemlerinin test edilmesi ve sonuç ürünlerinin karşılaştırılması amacıyla BLK2GO, GEOSLAM ve STONEX X120 marka/model mobil LiDAR sistemleri kullanılarak Arezzo şehrinde bulunan Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait nokta verileri toplanmıştır. SLAM algoritması

tabanlı mobil uygulamanın test edilmesi ve bağıl hatasının incelenmesi amacıyla Padova şehrinde bulunan bir binanın taraması LiDAR sensörü destekli akıllı telefonla gerçekleştirilmiştir. Tarama işleminin ardından yapı üzerinden 10 adet detay ölçüsü alınmıştır. SLAM algoritması kullanılarak 3 farklı mobil LiDAR sisteminden elde edilen sonuç ürünlerinin LiDAR sensörü bulunan akıllı cep telefonundan elde edilen sonuç ürünleriyle karşılaştırılması amacıyla Arezzo şehrinde bulunan Palazzo della Fraternita dei Laici sarayı LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonuyla taranmıştır.

İç mekân taraması çalışmalarında sırt çantası LiDAR sistemi olarak GVL DGC50, LiDAR sensörü bulunan ve bulunmayan akıllı telefon kullanılmıştır. Sırt çantası LiDAR sistemi kullanılarak Iğdır ilinde bulunan tuz madeninin taraması yapılarak madenin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. GVL DGC50 kullanılarak dış mekân taraması gerçekleştirilen tarihi caminin, iç mekân taraması gerçekleştirilmiştir. LiDAR sensörü bulunan ve bulunmayan akıllı cihazların, SLAM algoritmasının iç mekân tarama performansının test edilmesi için her iki cihazda kullanılmıştır. Bu amaçla tek odalı bir ofisin iç mekânı taranmıştır.

Çizelge 4.1 Aksaray ilinde, Çizelge 4.2 Muğla ilinde, Çizelge 4.3 Yozgat ilinde ve Çizelge 4.4 Bartın ilinde GVL DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları göstermektedir. Çizelge 4.5 GVL DGC50 ile gerçekleştirilen diğer taramaların sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 4.6 akıllı cihazlara ait taramaların sonuçlarını göstermektedir. Üç farklı sırt çantası ve LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu kullanılarak Palazzo della Fraternita dei Laici taramalarının sonuçları Çizelge 4.7'sunulmuştur.

**Çizelge 4.1.** Aksaray ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelge

| TARAMA ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ (DAKİKA) | TOPLAM MESAFE (m) |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 173870                         | 32.2                  | 1956.09           |
| 62176                          | 20.21                 | 794.72            |
| 7660                           | 4.03                  | 365.82            |
| 13610                          | 6.01                  | 433.78            |
| 13000                          | 6.59                  | 617.3             |
| 8990                           | 5.22                  | 510.85            |
| 57540                          | 20.03                 | 1977.72           |
| 22120                          | 17.57                 | 908.23            |

**Çizelge 4.2.** Muğla ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelge

| TARAMA ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | TOPLAM MESAFE<br>(m) |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 17090                             | 8.03                     | 714.48               |
| 29690                             | 12.42                    | 1096.67              |
| 15560                             | 7.13                     | 732.58               |
| 22430                             | 16.58                    | 450.66               |

**Çizelge 4.3.** Yozgat ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelge

| TARAMA ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | TOPLAM MESAFE (m) |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 12100                          | 5.27                     | 681.43            |
| 4950                           | 5.00                     | 419.96            |
| 35380                          | 26.03                    | 1286.98           |
| 11660                          | 12.58                    | 729.7             |
| 15330                          | 15.26                    | 824.74            |
| 33910                          | 28.49                    | 1520.76           |
| 9300                           | 6.49                     | 470.24            |
| 3710                           | 2.42                     | 167.77            |
| 13570                          | 4.42                     | 518.32            |

**Çizelge 4.4.** Bartın ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelge

| TARAMA ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | TOPLAM MESAFE<br>(m) |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 64170                             | 28.57                    | 989.34               |
| 38640                             | 23.52                    | 796.88               |
| 51160                             | 34.25                    | 1267.95              |
| 42070                             | 30.47                    | 1238.05              |
| 27610                             | 14.41                    | 573.64               |
| 22630                             | 20.52                    | 737.74               |
| 32970                             | 16.18                    | 736.55               |
| 50560                             | 39.25                    | 530.65               |
| 9180                              | 8.37                     | 286.2                |

**Çizelge 4.4.** Bartın ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelgenin devamı

| TARAMA ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | TOPLAM MESAFE<br>(m) |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 52440                             | 28.01                    | 607.79               |
| 39640                             | 33.42                    | 675.73               |
| 93940                             | 45.31                    | 826.86               |
| 43310                             | 29.28                    | 1072.67              |
| 34320                             | 25.06                    | 768.76               |
| 54470                             | 25.56                    | 707.23               |
| 110440                            | 33.29                    | 2457.46              |
| 297800                            | 35.09                    | 862.12               |
| 55940                             | 31.40                    | 1121.33              |
| 19650                             | 8.58                     | 571.2                |
| 65920                             | 4.12                     | 139.54               |
| 19720                             | 9.50                     | 627.42               |
| 19340                             | 9.01                     | 720.24               |
| 18960                             | 7.55                     | 617.38               |
| 23460                             | 4.49                     | 676.3                |
| 24010                             | 3.55                     | 408.1                |
| 17040                             | 9.01                     | 661.68               |
| 20720                             | 10.33                    | 953.84               |
| 53050                             | 35.40                    | 1440.92              |
| 30870                             | 27.57                    | 1279.87              |
| 64540                             | 4.02                     | 188.32               |
| 54010                             | 40.03                    | 1765.41              |
| 21300                             | 21.56                    | 809.5                |
| 45280                             | 3.05                     | 170                  |
| 19260                             | 9.58                     | 551.34               |
| 13480                             | 7.02                     | 285.61               |
| 25440                             | 15.27                    | 756.04               |
| 12500                             | 10.44                    | 720.3                |
| 79790                             | 8.27                     | 401.1                |
| 92400                             | 7.49                     | 381.99               |
| 35690                             | 4.01                     | 262.36               |
| 1780                              | 2.48                     | 153.94               |
| 15450                             | 11.38                    | 516.46               |
| 43520                             | 10.03                    | 917.29               |
| 13230                             | 7.37                     | 593.4                |
| 16730                             | 6.59                     | 675.11               |
| 26890                             | 13.55                    | 1078.39              |
| 31310                             | 9.55                     | 1083.18              |

**Çizelge 4.4.** Bartın ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelgenin devamı

| TARAMA ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | TOPLAM MESAFE<br>(m) |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 23020                             | 12.40                    | 1137.39              |
| 26230                             | 11.56                    | 955.25               |
| 1480                              | 2.19                     | 137.41               |
| 50540                             | 5.33                     | 219.33               |
| 15850                             | 8.01                     | 842.75               |
| 19720                             | 13.59                    | 823.2                |
| 19050                             | 11.03                    | 851.5                |
| 13900                             | 6.22                     | 325.92               |
| 49880                             | 38.06                    | 808.14               |
| 28790                             | 37.05                    | 1262.76              |
| 40740                             | 31.59                    | 1063.64              |
| 14430                             | 6.01                     | 568.32               |
| 28150                             | 22.50                    | 999.53               |
| 30580                             | 35.49                    | 1273.84              |
| 2100                              | 6.50                     | 566.88               |
| 8860                              | 3.27                     | 379.56               |
| 3910                              | 3.49                     | 147.55               |
| 29910                             | 27.51                    | 952.59               |
| 13410                             | 13.06                    | 663.81               |
| 9670                              | 14.22                    | 418.47               |
| 12900                             | 9.59                     | 528.85               |
| 21980                             | 7.36                     | 1000.68              |
| 34800                             | 29.01                    | 1017.11              |
| 21050                             | 9.17                     | 658.38               |
| 5630                              | 3.01                     | 222.44               |
| 9250                              | 5.29                     | 534.77               |
| 13290                             | 10.55                    | 507.79               |
| 41200                             | 24.59                    | 1099.18              |
| 25090                             | 11.03                    | 979.61               |
| 11020                             | 9.00                     | 579.32               |
| 31200                             | 17.35                    | 849.56               |
| 5320                              | 1.49                     | 209.61               |
| 9560                              | 8.31                     | 661.76               |
| 11560                             | 6.59                     | 578.06               |
| 6920                              | 5.00                     | 365.63               |
| 6880                              | 5.28                     | 330.96               |
| 15030                             | 8.49                     | 656.29               |
| 12190                             | 9.14                     | 1010.61              |

**Çizelge 4.4.** Bartın ilinde DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelgenin devamı

| TARAMA ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | TOPLAM MESAFE<br>(m) |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 17080                             | 5.47                     | 305.22               |
| 9500                              | 3.51                     | 318.8                |
| 4590                              | 3.03                     | 276.37               |
| 9070                              | 4.56                     | 388.93               |
| 4850                              | 5.49                     | 388.91               |
| 7990                              | 6.41                     | 565.77               |
| 5590                              | 5.09                     | 605.96               |
| 7450                              | 5.01                     | 281.02               |
| 25440                             | 18.59                    | 773.41               |
| 16800                             | 7.19                     | 515                  |
| 30110                             | 4.54                     | 804.35               |
| 28380                             | 10.06                    | 1072.94              |
| 25200                             | 10.55                    | 903.01               |
| 32140                             | 19.23                    | 1015.43              |
| 6340                              | 2.49                     | 223.27               |
| 18790                             | 7.15                     | 905                  |
| 4450                              | 3.06                     | 308.93               |
| 17810                             | 6.54                     | 370.68               |
| 30970                             | 21.09                    | 1335.86              |
| 25640                             | 17.58                    | 1181.29              |
| 45190                             | 29.01                    | 1487.68              |
| 20720                             | 16.43                    | 797.02               |
| 40570                             | 17.58                    | 960.4                |
| 13810                             | 9.27                     | 596.91               |
| 10210                             | 8.15                     | 374.3                |
| 30380                             | 32.06                    | 1540.56              |
| 26730                             | 10.22                    | 593.3                |
| 20510                             | 11.08                    | 558.22               |
| 10120                             | 9.54                     | 540.15               |
| 20260                             | 16.22                    | 703.04               |

**Çizelge 4.5.** DGC50 sırt çantası LiDAR sistemi diğer taramalarından elde edilen sonuçları gösteren çizelge

| TARAMA YAPILAN YER | TARAMA DETAYI | TARAMA ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ (DAKİKA) | TOPLAM MESAFE (m) |
|--------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Tuz Ocağı          | İç mekân      | 14140                          | 31.28                 | 1084.91           |
| Camii              | Dış mekân     | 400                            | 1.16                  | 56.92             |
|                    | İç mekân      | 40                             | 0.49                  | 21.58             |

**Çizelge 4.6.** Akıllı cihazlardan elde edilen taramalardan elde edilen sonuçların gösteren çizelge

| TARAMA YAPILAN YER                 | LiDAR SENSÖRÜ | TARAMA DETAYI | TARAMA ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ (DAKİKA) | TOPLAM MESAFE (m) |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Palazzo della Fraternita dei Laici | Mevcut        | Dış Mekân     | 304.10                         | 5.30                  | 195.49            |
|                                    |               |               |                                | 6.29                  | 195.07            |
|                                    |               |               |                                | 5.27                  | 196.22            |
| Yapı                               | Mevcut        | Dış Mekân     | 175                            | 3.45                  | 32.44             |
| Ofis                               | Mevcut        | İç Mekân      | 100                            | 2.35                  | 4.10              |
|                                    | Mevcut Değil  |               |                                |                       |                   |

**Çizelge 4.7.** Palazzo della Fraternita dei Laici sarayı tarama verilerinin gösteren çizelge

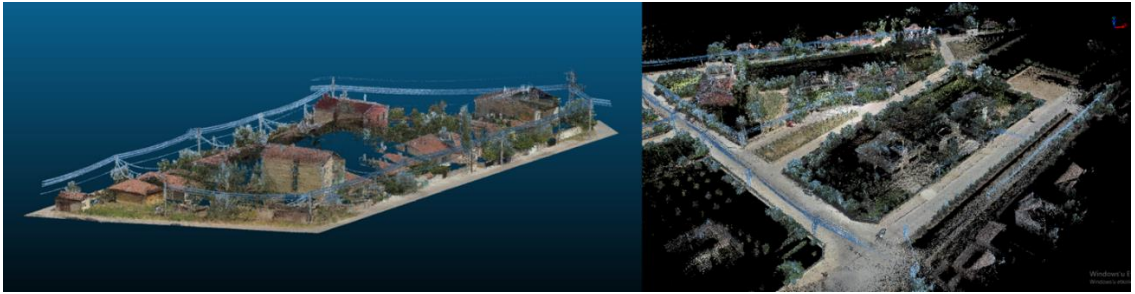
| TARAMA NUMARASI | ALET ADI            | TARAMA ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ (DAKİKA) | TOPLAM MESAFE (m) |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------|
| A1              | BLK2GO              | 1700                           | 4.39                  | 61.86             |
| A2              | GEOSLAM             | 1700                           | 4.50                  | 61.09             |
| A3              | STONEX X120         | 1700                           | 4.41                  | 61.32             |
| A4              | Akıllı Cep Telefonu | 304.1                          | 5.30                  | 195.49            |
| A5              | Akıllı Cep Telefonu | 304.1                          | 6.29                  | 195.07            |
| A6              | Akıllı Cep Telefonu | 304.1                          | 5.27                  | 196.22            |

Çalışmada LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu ve tablet ilk aşamada daha basit ve sade yapılarda test edilmiştir. Taramalar sonucunda elde edilen verilerde eksik bir verinin olmaması ve SLAM algoritması destekli mobil uygulamanın tarama esnasında herhangi bir hata mesajı vermemesinin ardından akıllı cep telefonu dış mekân çalışmalarında mimari olarak büyük ve karmaşık yapıların taranması işleminde kullanılmıştır. Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait taramalar değerlendirme aşamasında ayırt edilmesi amacıyla numaralandırılmıştır.

## 4.2 Taramalardan elde edilen sonuç ürünler

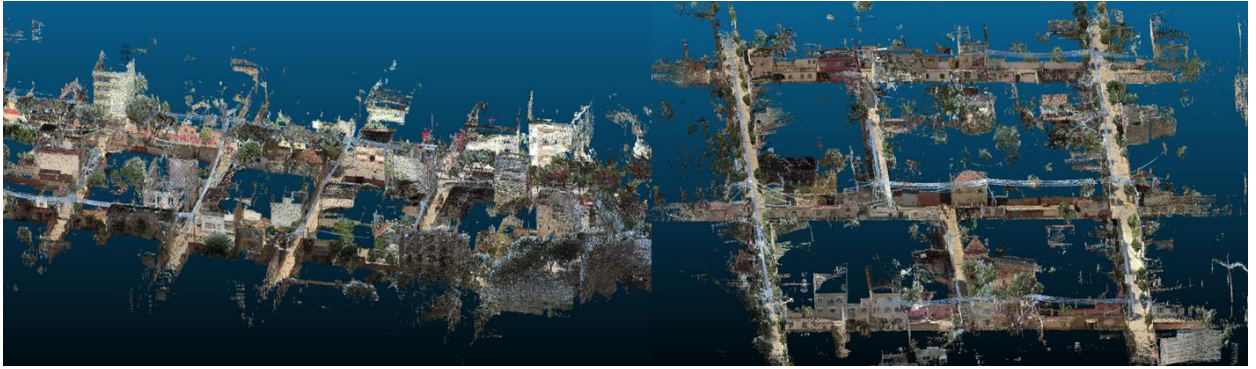
Farklı sistemler kullanılarak elde edilen tüm veriler işlenerek sayısal sonuç ürünleri elde edilmiştir. Mobil LiDAR sistemlerine ait verilerin dengelenmesi için arazi çalışmalarında elde edilen renkli görüntüler, IMU ve GNSS alıcısı verileri, LiDAR sensöründen elde edilen nokta bulutu verisi sistemin kendi yazılımına yüklenerek dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğerlerinden farklı olarak GNSS destekli bir mobil LiDAR sistemi olan GVL DGC50 ile toplanan verilerin dengelenmesi işleminde taramayla eş zamanlı olarak veri toplamaya başlayan sabit GNSS alıcısına ait kayıt verileri dengelemede kullanılmıştır. Dengeleme yazılımında tarama yapılan alana ait projeksiyon ve datum parametreleri seçilerek dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin sonucunda, referans koordinat sistemi tanımlanmış nokta bulutu elde etmek mümkündür. Mobil LiDAR sistemlerinden elde edilen arazi verilerinin dengeleme işlemleri sonucunda nokta bulutu verileri hatasız elde edilmiştir. Elde edilen nokta bulutlarının nokta bulutu işleme yazılımı olan CloudCompare'a aktarılması amacıyla aynı nokta bulutu formatında çıktısı alınmıştır.

Aksaray ilinde gerçekleştirilen taramaların tamamlanmasının ardından, 8 taramanın dengeleme işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır ve ülke referans koordinat sistemine (TUREF 33) referanslanmış nokta bulutları elde edilmiştir (Şekil 4.1.)



Şekil 4.1. Aksaray ilindeki taramalardan elde edilen nokta bulutları

Muğla ilinde gerçekleştirilen dört taramanın dengeleme işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır ve ülke referans koordinat sistemine (TUREF 27) referanslanmış nokta bulutları elde edilmiştir (Şekil 4.2.)



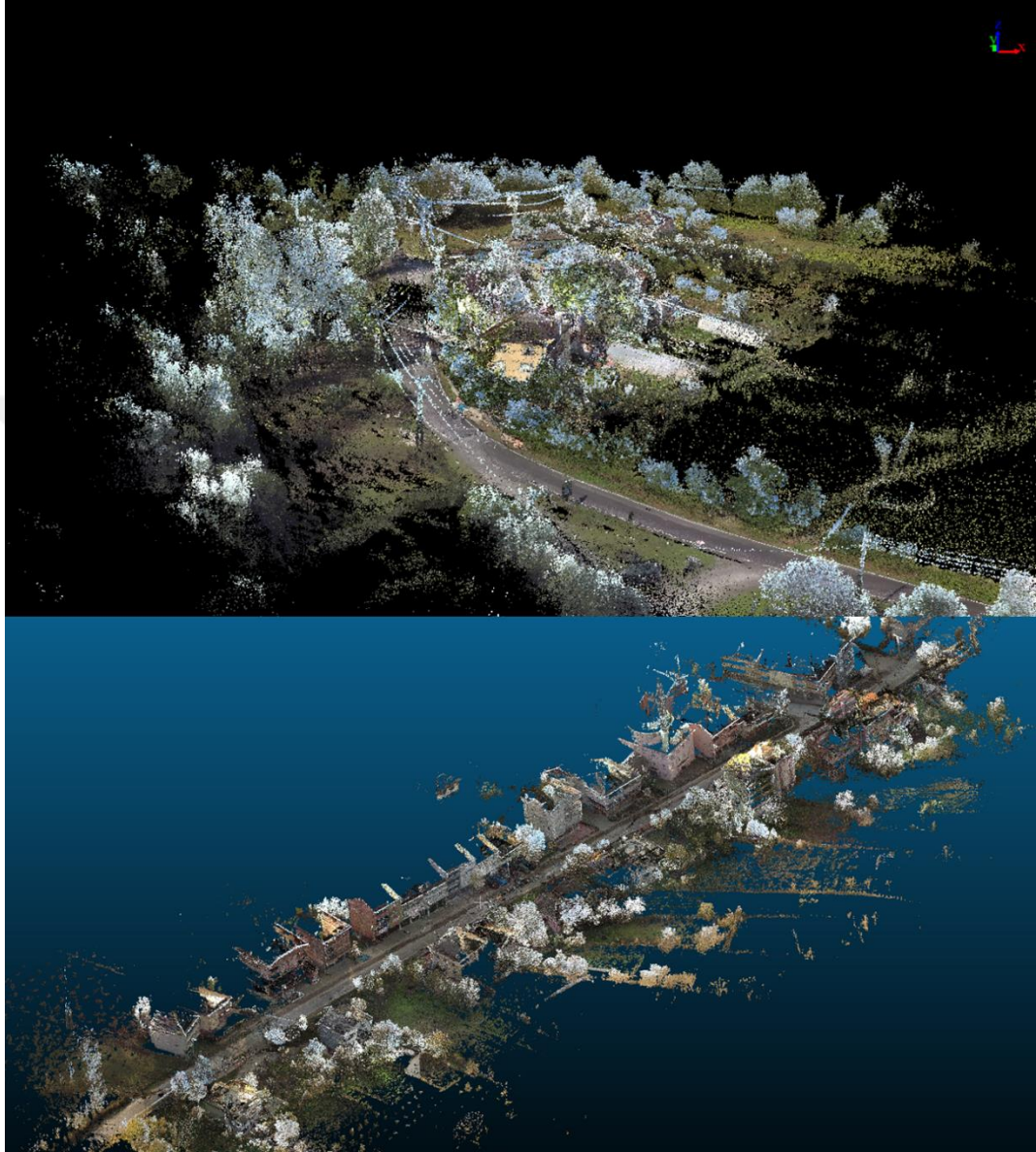
**Şekil 4.2.** Muğla ilindeki taramalardan elde edilen nokta bulutları

Yozgat ilinde gerçekleştirilen dokuz taramanın dengeleme işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır ve ülke referans koordinat sistemine(TUREF 36) referanslanmış nokta bulutları elde edilmiştir (Şekil 4.3.)



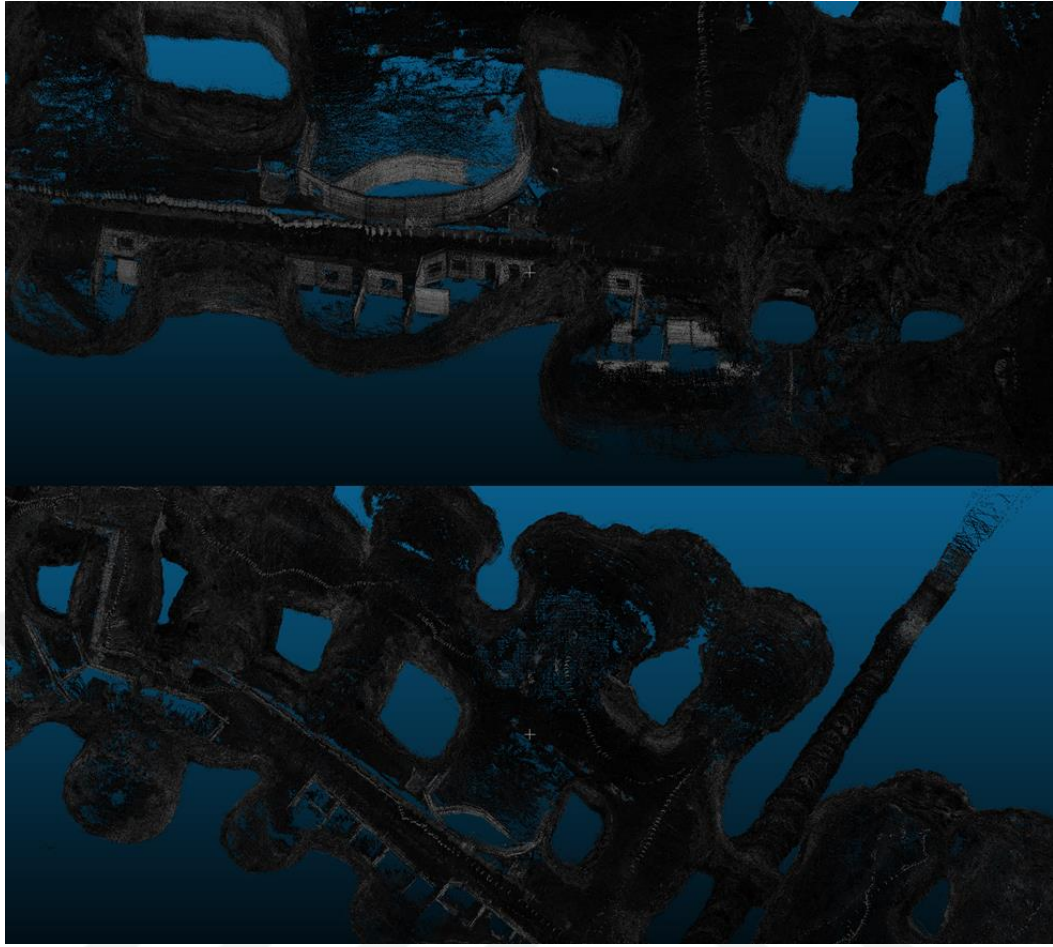
**Şekil 4.3.** Aksaray ilindeki taramalardan elde edilen nokta bulutları

Bartın ilinde gerçekleştirilen yüz on beş taramanın dengeleme işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır ve ülke referans koordinat sistemine(TUREF 33) referanslanmış nokta bulutları elde edilmiştir (şekil 4.4.)



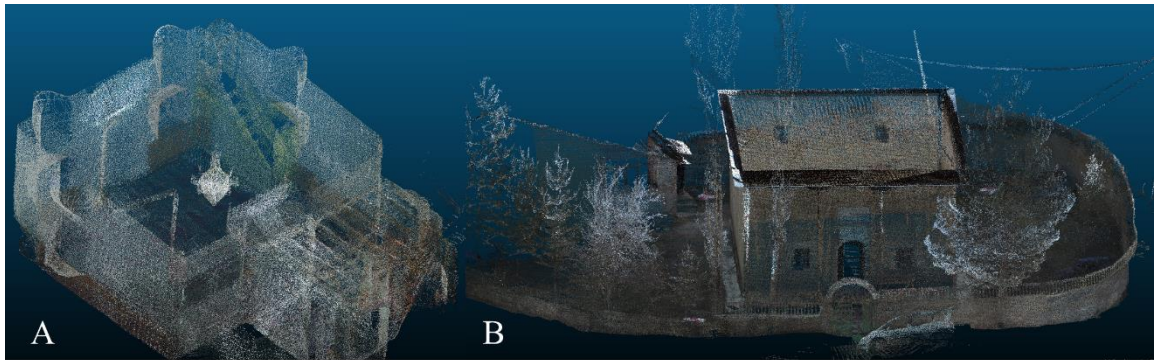
**şekil 4.4.** Bartın ilindeki taramalardan elde edilen nokta bulutları

Iğdır ilinde bulunan tuz madeninin tarama verileri dengelenerek nokta bulutu elde edilmiştir. Madende yeterli aydınlatmanın olmaması nedeniyle nokta bulutunun dengelenmesi sırasında görüntü kullanılmamış ve siyah beyaz nokta bulutu olarak değerlendirilmiştir. İ mekân taramalarında GNSS alıcısının çalışmamasından dolayı nokta bulutu lokal koordinat sistemine referanslandırılmıştır (şekil 4.5.).



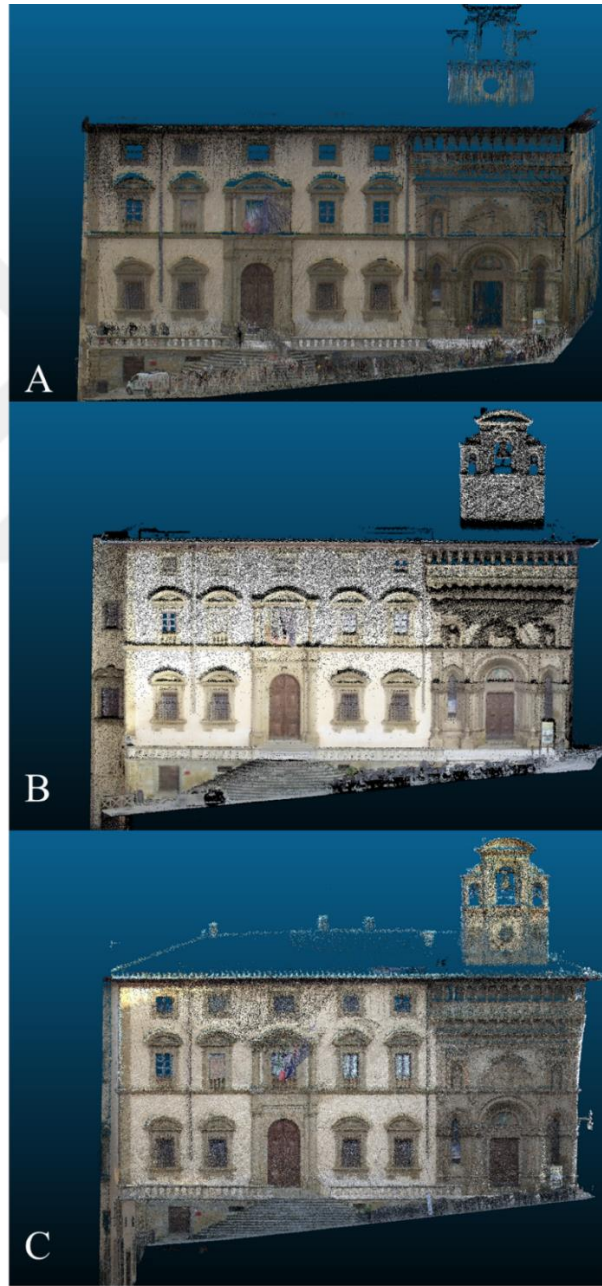
Şekil 4.5. Tuz madenine ait taramalardan elde edilen nokta bulutu

Gümüşhane ilinde bulunan tarihi caminin iç ve dış taramalarından elde edilen nokta verilerinden iç mekân taraması lokal koordinat sisteminde referanslandırılarak dengeleme işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen nokta bulutu amaca uygun birleştirilmek ve işlenmek üzere nokta bulutu formatında çıktı olarak alınmıştır (Şekil 4.6).



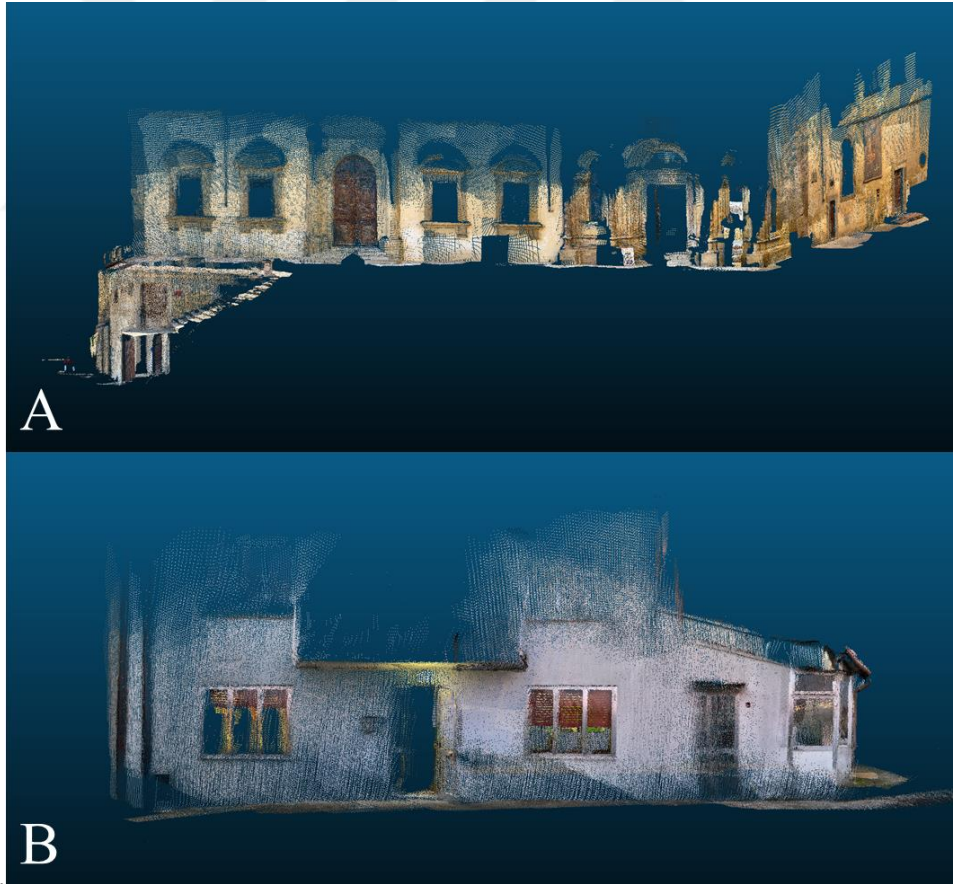
Şekil 4.6. A. Caminin içine ait nokta bulutu B. Caminin dışına ait nokta bulutu

Palazzo della Fraternita dei Laici sarayı taraması kapsamında BL2GO, GEOSLAM ve STONEX X120 model mobil Lidar sistemlerine ait taramalar dengelenmiş ve nokta bulutu elde edilmiştir. Belirtilen sistemlerde GNSS alıcısı bulunmadığından dengeleme işleminde sadece IMU verileri eklenmiş ve yatay ve düşey yönde dönüklük düzeltilmesi gerçekleştirilmiştir. Sistemde bulunan kamerayla elde edilen görüntüler kullanılarak renkli nokta bulutu oluşturulmuştur. Oluşturulan nokta bulutu lokal koordinat sisteminde referanslandırılmıştır.



Şekil 4.7. A. BLK2GO nokta verisi B. GEOSLAM nokta verisi C. STONEX X120 nokta verisi

Akıllı tablet ve cep telefonunda bulunan LiDAR sensörünün tarama aralığı ve sensör boyutu göz önünde bulundurulduğunda taramadan elde edilen veriler dengelemeye ihtiyaç duyulmadan anlık olarak arayüzde sunulmaktadır(Erol et al., 2023). SLAM algoritması kullanılarak geliştirilen yazılım sayesinde anlık olarak LiDAR verisi arayüzde sunulup haritalama işlemi devam ederken eş zamanlı olarak konumlandırma verisi oluşmaktadır. LiDAR sensörü bulunmayan akıllı telefonda ise SLAM algoritmasının görüntülerden anlık olarak oluşturduğu seyrek nokta bulutu kullanıcı arayüzünde sunulmaktadır. Bu nokta bulutu görsel SLAM algoritmasının yapısında bulunan nokta dedektörleri sayesinde oluşturulmaktadır(Frese et al., 2010; Sharafutdinov et al., 2023). Dış mekân çalışmaları kapsamında LiDAR sensörü destekli akıllı telefon kullanılarak dört tarama gerçekleştirilmiş ve nokta verisi toplanmıştır. Toplanan nokta verilerinden üç adeti Palazzo della Fraternita dei Laici sarayının, diğer taramaysa sistemin bağıl hatasının incelenmesi amacıyla bir yapıda gerçekleştirilen taramadır (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. A. Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait nokta bulutu B. Yapıya ait nokta bulutu

### 4.3 Mobil LiDAR Sistemlerinden Elde Edilen Nokta Bulutlarının Değerlendirilmesi

SLAM yönteminin farklı varyantlarına ait algoritmaların test edilmesi, değerlendirilmesi ve doğruluk analizinin gerçekleştirilmesi için haritalama işleminden elde edilen nokta bulutu ve konumlandırma işleminden elde edilen sistemin yada cihazın ayak izi kullanılmaktadır(Biström, 2019; Ribas et al., 2010). Bu çalışma kapsamında SLAM yöntemiyle çalışan dört farklı LiDAR sisteminden elde edilen nokta verileri değerlendirilmiş, karşılaştırılmış ve doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. GVL DGC50 sırt çantası LiDAR sisteminden elde edilen nokta bulutları değerlendirilmiştir ve doğruluk analizi yapılarak bağıl hata elde edilmiştir. Üç farklı mobil LiDAR sisteminden elde edilen veriler değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işleminde nokta bulutu geometrisinin kalite ölçütünün değerlendirilmesi ve nokta bulutları arasındaki geometrik farkın incelenmesi amacıyla en yakın nokta tekniğine dayalı Doğrudan Buluttan Buluta Karşılaştırma (C2C) algoritması kullanılmıştır(Jafari et al., 2017; Javaheri et al., 2020; Z. Zhang et al., 2016).

#### 4.3.1 GNSS Destekli Mobil LiDAR Sisteminden Elde Edilen Nokta Bulutlarının Değerlendirilmesi

Aksaray, Muğla, Bartın ve Yozgat illerinde yapılan taramalardan elde edilen nokta bulutları, kadastro yenileme çalışmaları başta olmak üzere farklı haritalama çalışmalarında kullanılabilecek coğrafi ve görsel veri kaynaklarını sunmaktadır. (Kara Aydın, 2022). Aksaray ve Yozgat illerinde tarama ortamının seyrek, Muğla ve Bartın illerinde bitki örtüsünün yoğun olmasına bağlı olarak tarama ortamının yoğun olduğu ve ölçüm süresine paralel olarak nokta bulutundaki nokta sayısının arttığı ancak  $m^2$  düşen nokta sayısının azaldığı gözlemlenmiştir (Çizelge 4.8.). Iğdır ilinde bulunan tuz madeninin taranma işleminden sonra elde edilen nokta verisi, madenin detaylı modellenmesi, röleve çalışmaları için gereken önemli verilerin çıkarılması, kübaj hesapları ve hacim ölçümleri gibi çeşitli çalışmalarda kullanılabilecek bir veri kaynağı niteliğindedir(Liu, Liu, Lv, Wang, & Lian, 2022; Özdemir et al., 2022). Gümüşhane ilinde bulunan tarihi caminin iç ve dış mekân taramalarından elde edilen nokta bulutu, tarihi dokümantasyon, mimari analiz ve röleve gibi çeşitli çalışmalarda kaynak olarak kullanılabilmektedir(H. B. Makineci & Erdal, 2021; Tanduo et al., 2023)(Çizelge 4.9.

Çizelge 4.8. Dört farklı ilde yapılan taramalardan elde edilen nokta bulutlarını gösteren çizelge

| TARAMA<br>YAPILAN İL | TARAMA ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | NOKTA BULUTU<br>BOYUTU | M <sup>2</sup> DÜŞEN<br>NOKTA SAYISI |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| AKSARAY              | 7660                              | 4.03                     | 27771146               | 3625.475979                          |
|                      | 8990                              | 5.22                     | 40388632               | 4492.617575                          |
|                      | 13610                             | 6.01                     | 63130636               | 4638.547832                          |
|                      | 13000                             | 6.59                     | 65758327               | 5058.332846                          |
|                      | 22120                             | 17.57                    | 74865640               | 3384.522604                          |
|                      | 57540                             | 20.03                    | 101386161              | 1762.011835                          |
|                      | 62176                             | 20.21                    | 114865640              | 1847.427303                          |
|                      | 173870                            | 32.2                     | 141386161              | 813.1716857                          |
| MUĞLA                | 15560                             | 7.13                     | 54518161               | 3503.737853                          |
|                      | 17090                             | 8.03                     | 60608442               | 3546.427267                          |
|                      | 29690                             | 12.42                    | 82408315               | 2775.625295                          |
|                      | 29430                             | 16.58                    | 108440515              | 3684.693                             |
| YOZGAT               | 3710                              | 2.42                     | 8984808                | 2421.781132                          |
|                      | 9300                              | 6.49                     | 17405778               | 1871.589032                          |
|                      | 4950                              | 5                        | 20895548               | 4221.322828                          |
|                      | 13570                             | 4.42                     | 23428668               | 1726.504643                          |
|                      | 12100                             | 5.27                     | 35239509               | 2912.356116                          |
|                      | 11660                             | 12.58                    | 56278014               | 4826.587822                          |
|                      | 15330                             | 15.26                    | 57347261               | 3740.85199                           |
|                      | 33910                             | 28.49                    | 90895017               | 2680.478237                          |
| BARTIN               | 35380                             | 26.03                    | 96692779               | 2732.978491                          |
|                      | 1480                              | 2.19                     | 8412123                | 5683.866892                          |
|                      | 1780                              | 2.48                     | 9724597                | 5463.256742                          |
|                      | 3569                              | 4.01                     | 14609076               | 4093.324741                          |
|                      | 3910                              | 3.49                     | 29168517               | 7459.978772                          |
|                      | 4450                              | 3.06                     | 40550045               | 9112.369663                          |
|                      | 4528                              | 3.05                     | 11881496               | 2624.0053                            |
|                      | 4590                              | 3.03                     | 44065668               | 9600.363399                          |
|                      | 5054                              | 5.33                     | 16193890               | 3204.172932                          |
|                      | 5320                              | 1.49                     | 26406443               | 4963.617105                          |
|                      | 5630                              | 3.01                     | 38236557               | 6791.573179                          |
|                      | 6340                              | 2.49                     | 37616493               | 5933.200789                          |
|                      | 6454                              | 4.02                     | 13874173               | 2149.701425                          |
|                      | 6592                              | 4.12                     | 9258823                | 1404.55446                           |
|                      | 6920                              | 5                        | 50410504               | 7284.754913                          |
|                      | 7979                              | 8.27                     | 32108935               | 4024.180348                          |
|                      | 8860                              | 3.27                     | 51249246               | 5784.339278                          |
|                      | 9070                              | 4.56                     | 59258452               | 6533.45667                           |

Çizelge 4.8. Dört farklı ilde yapılan taramalardan elde edilen nokta bulutlarını gösteren çizelgenin devamı

| TARAMA<br>YAPILAN İL | TARAMA<br>ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | NOKTA SAYISI<br>(MİLYON) | M2 DÜŞEN<br>NOKTA SAYISI |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| BARTIN               | 9180                              | 8.37                     | 35                       | 3787                     |
|                      | 9240                              | 7.49                     | 52                       | 5598                     |
|                      | 9250                              | 5.29                     | 39                       | 4215                     |
|                      | 9500                              | 3.51                     | 49                       | 5135                     |
|                      | 9560                              | 8.31                     | 81                       | 8466                     |
|                      | 9670                              | 14.22                    | 104                      | 10752                    |
|                      | 10120                             | 9.54                     | 80                       | 7897                     |
|                      | 10210                             | 8.15                     | 86                       | 8422                     |
|                      | 11020                             | 9                        | 93                       | 8443                     |
|                      | 11044                             | 33.29                    | 152                      | 13752                    |
|                      | 11560                             | 6.59                     | 105                      | 9091                     |
|                      | 12500                             | 10.44                    | 50                       | 3996                     |
|                      | 12900                             | 9.59                     | 112                      | 8665                     |
|                      | 13230                             | 7.37                     | 50                       | 3767                     |
|                      | 13290                             | 10.55                    | 110                      | 8285                     |
|                      | 13410                             | 13.06                    | 115                      | 8577                     |
|                      | 13480                             | 7.02                     | 20                       | 1518                     |
|                      | 13810                             | 9.27                     | 97                       | 7039                     |
|                      | 13900                             | 6.22                     | 22                       | 1615                     |
|                      | 14430                             | 6.01                     | 52                       | 3616                     |
|                      | 15450                             | 11.38                    | 53                       | 3408                     |
|                      | 15850                             | 8.01                     | 78                       | 4917                     |
|                      | 16730                             | 6.59                     | 49                       | 2959                     |
|                      | 16800                             | 7.19                     | 123                      | 7322                     |
|                      | 17040                             | 9.01                     | 41                       | 2426                     |
|                      | 17080                             | 5.47                     | 58                       | 3394                     |
|                      | 17810                             | 6.54                     | 106                      | 5971                     |
|                      | 18790                             | 7.15                     | 99                       | 5298                     |
|                      | 18960                             | 7.55                     | 54                       | 2840                     |
|                      | 19050                             | 11.03                    | 73                       | 3816                     |
|                      | 19260                             | 9.58                     | 39                       | 2045                     |
|                      | 19340                             | 9.01                     | 54                       | 2774                     |
|                      | 19650                             | 8.58                     | 37                       | 1883                     |
|                      | 19720                             | 9.5                      | 68                       | 3469                     |
|                      | 19720                             | 13.59                    | 85                       | 4300                     |
|                      | 20260                             | 16.22                    | 212                      | 10459                    |
|                      | 20510                             | 11.08                    | 112                      | 5489                     |
|                      | 20720                             | 10.33                    | 61                       | 2938                     |

Çizelge 4.8. Dört farklı ilde yapılan taramalardan elde edilen nokta bulutlarını gösteren çizelgenin devamı

| TARAMA<br>YAPILAN İL | TARAMA<br>ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | NOKTA SAYISI<br>(MİLYON) | M2 DÜŞEN<br>NOKTA SAYISI |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| BARTIN               | 20720                             | 16.43                    | 212                      | 10242                    |
|                      | 21000                             | 6.5                      | 74                       | 3542                     |
|                      | 21050                             | 9.17                     | 122                      | 5787                     |
|                      | 21300                             | 21.56                    | 67                       | 3162                     |
|                      | 21980                             | 7.36                     | 108                      | 4934                     |
|                      | 22630                             | 20.52                    | 115                      | 5093                     |
|                      | 23020                             | 12.4                     | 88                       | 3819                     |
|                      | 23460                             | 4.49                     | 40                       | 1705                     |
|                      | 24010                             | 3.55                     | 28                       | 1176                     |
|                      | 25090                             | 11.03                    | 129                      | 5139                     |
|                      | 25200                             | 10.55                    | 188                      | 7478                     |
|                      | 25440                             | 15.27                    | 82                       | 3221                     |
|                      | 25440                             | 18.59                    | 230                      | 9033                     |
|                      | 25640                             | 17.58                    | 225                      | 8787                     |
|                      | 26230                             | 11.56                    | 87                       | 3300                     |
|                      | 26730                             | 10.22                    | 109                      | 4067                     |
|                      | 26890                             | 13.55                    | 90                       | 3343                     |
|                      | 27610                             | 14.41                    | 87                       | 3161                     |
|                      | 28150                             | 22.5                     | 179                      | 6343                     |
|                      | 28380                             | 10.06                    | 188                      | 6618                     |
|                      | 28790                             | 37.05                    | 226                      | 7855                     |
|                      | 29780                             | 35.09                    | 81                       | 2729                     |
|                      | 29910                             | 27.51                    | 213                      | 7108                     |
|                      | 30110                             | 4.54                     | 88                       | 2944                     |
|                      | 30380                             | 32.06                    | 267                      | 8801                     |
|                      | 30580                             | 35.49                    | 279                      | 9125                     |
|                      | 30870                             | 27.57                    | 99                       | 3223                     |
|                      | 30970                             | 21.09                    | 187                      | 6036                     |
|                      | 31200                             | 17.35                    | 191                      | 6108                     |
|                      | 31310                             | 9.55                     | 75                       | 2401                     |
|                      | 32140                             | 19.23                    | 209                      | 6510                     |
|                      | 32970                             | 16.18                    | 95                       | 2886                     |
|                      | 34320                             | 25.06                    | 126                      | 3672                     |
|                      | 34800                             | 29.01                    | 305                      | 8766                     |
|                      | 38640                             | 23.52                    | 120                      | 3104                     |
|                      | 39640                             | 33.42                    | 196                      | 4952                     |
|                      | 40570                             | 17.58                    | 139                      | 3423                     |
|                      | 40740                             | 31.59                    | 279                      | 6850                     |

Çizelge 4.8. Dört farklı ilde yapılan taramalardan elde edilen nokta bulutlarını gösteren çizelgenin devamı

| TARAMA<br>YAPILAN İL | TARAMA<br>ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ<br>(DAKİKA) | NOKTA SAYISI<br>(MİLYON) | M2 DÜŞEN<br>NOKTA SAYISI |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| BARTIN               | 41200                             | 24.59                    | 270                      | 6553                     |
|                      | 42070                             | 30.47                    | 193                      | 4595                     |
|                      | 43310                             | 29.28                    | 181                      | 4175                     |
|                      | 43520                             | 10.03                    | 79                       | 1820                     |
|                      | 45190                             | 29.01                    | 266                      | 5886                     |
|                      | 48500                             | 5.49                     | 93                       | 1920                     |
|                      | 49880                             | 38.06                    | 247                      | 4960                     |
|                      | 50560                             | 39.25                    | 204                      | 4030                     |
|                      | 51160                             | 34.25                    | 194                      | 3787                     |
|                      | 52440                             | 28.01                    | 180                      | 3426                     |
|                      | 53050                             | 35.4                     | 173                      | 3264                     |
|                      | 54010                             | 40.03                    | 124                      | 2299                     |
|                      | 54470                             | 25.56                    | 131                      | 2399                     |
|                      | 55900                             | 5.09                     | 66                       | 1182                     |
|                      | 55940                             | 31.4                     | 128                      | 2285                     |
|                      | 64170                             | 28.57                    | 146                      | 2284                     |
|                      | 68800                             | 5.28                     | 75                       | 1084                     |
|                      | 74500                             | 5.01                     | 89                       | 1190                     |
|                      | 79900                             | 6.41                     | 94                       | 1171                     |
|                      | 93940                             | 45.31                    | 303                      | 3228                     |
|                      | 121900                            | 9.14                     | 176                      | 1447                     |
|                      | 150300                            | 8.49                     | 152                      | 1013                     |

Çizelge 4.9. Tuz ocağı ve cami taramalardan elde edilen nokta bulutlarını gösteren çizelge

| TARAMA<br>YAPILAN<br>YER | TARAMA<br>DETAYI | TARAMA<br>ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM<br>SÜRESİ<br>(DAKİKA) | NOKTA<br>SAYISI<br>(MİLYON) | M <sup>2</sup> DÜŞEN<br>NOKTA<br>SAYISI |
|--------------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Tuz Ocağı                | İç mekân         | 14140                             | 31.28                       | 208                         | 14683                                   |
| Camii                    | Dış Mekân        | 400                               | 1.16                        | 3                           | 7139                                    |
|                          | İç mekân         | 40                                | 0.49                        | 1                           | 26231                                   |

Bu çalışma kapsamında Bartın ilinde yapılan 52 taramaya 308 adet YKN tesis edilmiştir. Tesis edilen YKN'ler denetleme noktası olarak kullanılabilecek şekilde tesis edilmiş ve yersel ölçüm teknikleriyle (CORS RTK ile) ölçülmüştür. YKN'lerin ölçümü için kullanılan Tusaga Aktif (CORS RTK) yönteminin jeodezik ölçmelerdeki doğruluğu yatayda +/- 3 cm ve düşeyde +/-5 cm olarak tespit edilmiştir(H. B. Makineci, 2020).

GNSS destekli sırt çantası LiDAR sisteminin ve sisteme entegre SLAM algoritmasının bağıl hatasının incelenmesi amacıyla YKN bulunan taramalar numaralandırılmış ve numaralandırılan taramaların, tarama bitiminde döngü kapanmasına ve tarama esnasında lokal döngü kapanmasına sahip olup olmadığı sunulmuştur (Çizelge 4.9.). YKN'ler kullanılarak elde edilen nokta bulutunun doğruluğu irdelenmiştir. SLAM algoritmasının ayak izi ve sonuç ürün doğruluğuna etki eden en önemli faktörlerinden biri olan döngü kapanmasının ve veri toplama süresinin nokta bulutu doğruluğuna etkisi araştırılmıştır(Guivant & Nebot, 2001).

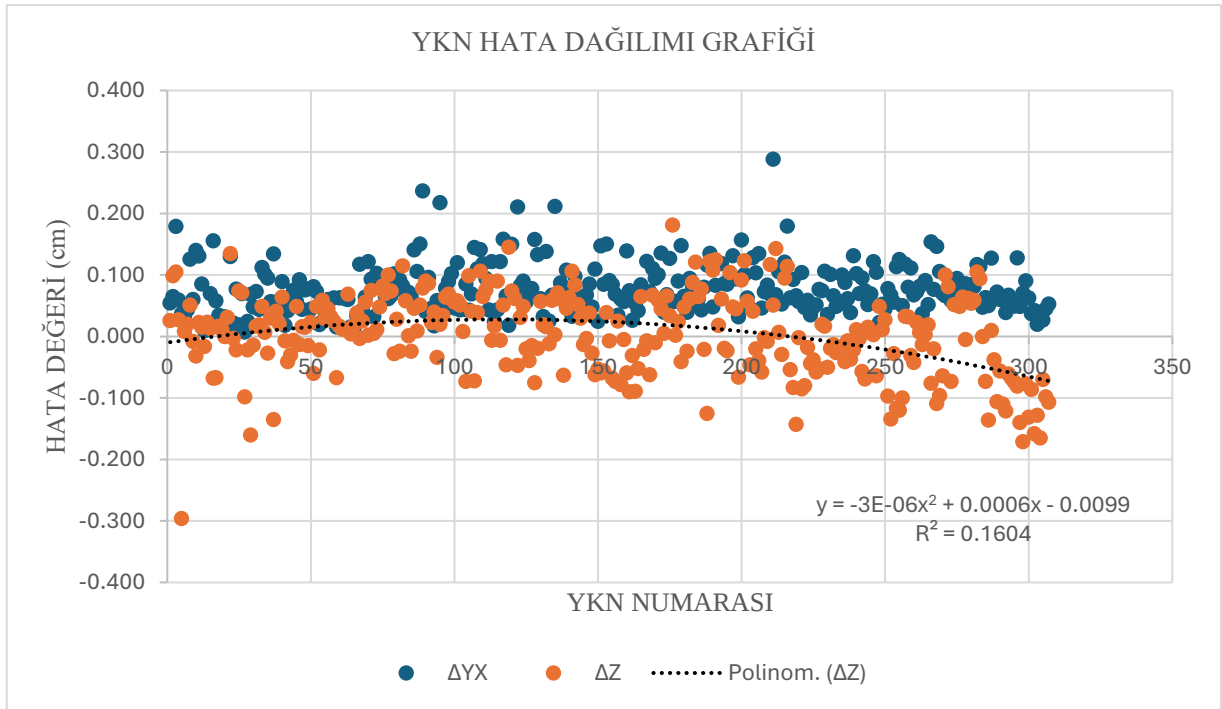
**Çizelge 4.10.** YKN bulunan taramalara ait çizelge

| TARAMA<br>NUMARASI | TARAMA<br>ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | NOKTA<br>SAYISI<br>(MİLYON) | m <sup>2</sup><br>DÜŞEN<br>NOKTA<br>SAYISI | ÖLÇÜM<br>SÜRESİ<br>(DAKİKA) | LOKAL<br>DÖNGÜ<br>KAPANMASI<br>(ADET) | DÖNGÜ<br>KAPANMASI | YKN<br>SAYISI<br>(ADET) |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| G1                 | 64170                                | 146                         | 2284                                       | 28.57                       | 15                                    | YOK                | 6                       |
| G2                 | 49880                                | 247                         | 4960                                       | 38.06                       | 10                                    | YOK                | 7                       |
| G3                 | 28790                                | 226                         | 7855                                       | 37.05                       | 7                                     | VAR                | 7                       |
| G4                 | 40740                                | 279                         | 6850                                       | 31.59                       | 4                                     | YOK                | 6                       |
| G5                 | 28150                                | 178                         | 6343                                       | 22.5                        | 3                                     | YOK                | 12                      |
| G6                 | 30580                                | 279                         | 9125                                       | 35.49                       | 9                                     | YOK                | 6                       |
| G7                 | 2100                                 | 74                          | 35418                                      | 6.5                         | 2                                     | YOK                | 5                       |
| G8                 | 29910                                | 213                         | 7108                                       | 27.51                       | 6                                     | YOK                | 10                      |
| G9                 | 13410                                | 115                         | 8577                                       | 13.06                       | 3                                     | VAR                | 4                       |
| G10                | 9670                                 | 104                         | 10752                                      | 14.22                       | 2                                     | VAR                | 4                       |
| G11                | 21980                                | 108                         | 4934                                       | 7.36                        | 1                                     | VAR                | 6                       |
| G12                | 34800                                | 305                         | 8766                                       | 29.01                       | 5                                     | YOK                | 7                       |
| G13                | 21050                                | 122                         | 5787                                       | 9.17                        | 2                                     | VAR                | 4                       |
| G14                | 5630                                 | 38                          | 6792                                       | 3.01                        | 1                                     | YOK                | 4                       |
| G15                | 9250                                 | 39                          | 4215                                       | 5.29                        | 1                                     | VAR                | 4                       |
| G16                | 13290                                | 110                         | 8285                                       | 10.55                       | 3                                     | YOK                | 5                       |
| G17                | 41200                                | 270                         | 6553                                       | 24.59                       | 5                                     | YOK                | 7                       |
| G18                | 25090                                | 129                         | 5139                                       | 11.03                       | 4                                     | VAR                | 7                       |
| G19                | 11020                                | 93                          | 8443                                       | 9                           | 1                                     | VAR                | 4                       |
| G20                | 31200                                | 191                         | 6108                                       | 17.35                       | 3                                     | VAR                | 6                       |
| G21                | 9560                                 | 81                          | 8466                                       | 8.31                        | 2                                     | VAR                | 5                       |
| G22                | 6920                                 | 110                         | 15955                                      | 5                           | 3                                     | YOK                | 4                       |
| G23                | 15030                                | 152                         | 10129                                      | 8.49                        | 4                                     | VAR                | 6                       |

Çizelge 4.10. YKN bulunan taramalara ait çizelgenin devamı

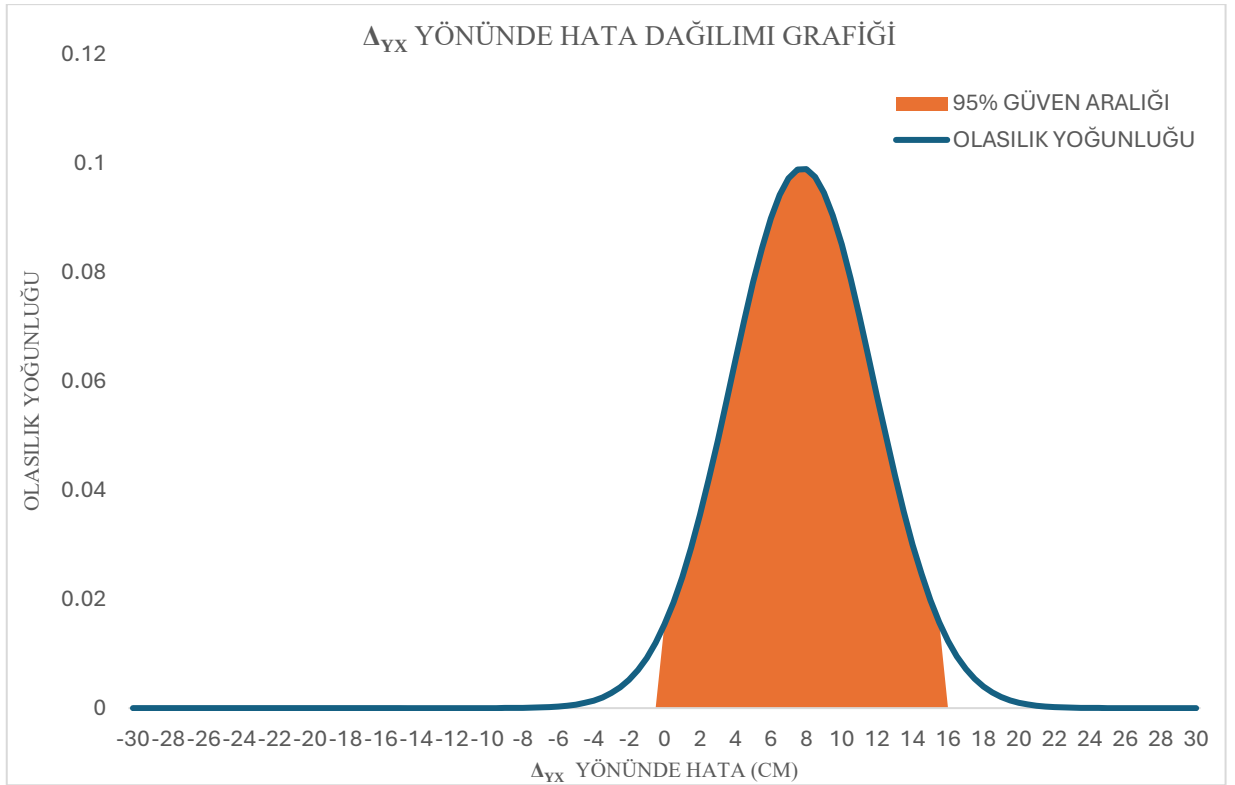
| TARAMA<br>NUMARASI | TARAMA<br>ALANI<br>(m <sup>2</sup> ) | NOKTA<br>SAYISI<br>(MİLYON) | m <sup>2</sup><br>DÜŞEN<br>NOKTA<br>SAYISI | ÖLÇÜM<br>SÜRESİ<br>(DAKİKA) | LOKAL<br>DÖNGÜ<br>KAPANMASI<br>(ADET) | DÖNGÜ<br>KAPANMASI | YKN<br>SAYISI<br>(ADET) |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| G24                | 12190                                | 176                         | 14470                                      | 9.14                        | 5                                     | VAR                | 4                       |
| G25                | 17080                                | 58                          | 3394                                       | 5.47                        | 2                                     | YOK                | 4                       |
| G26                | 9500                                 | 49                          | 5135                                       | 3.51                        | 2                                     | VAR                | 4                       |
| G27                | 4590                                 | 54                          | 11779                                      | 3.03                        | 2                                     | VAR                | 4                       |
| G28                | 7990                                 | 134                         | 16720                                      | 6.41                        | 3                                     | VAR                | 5                       |
| G29                | 5590                                 | 66                          | 11820                                      | 5.09                        | 2                                     | VAR                | 5                       |
| G30                | 7450                                 | 89                          | 11897                                      | 5.01                        | 1                                     | YOK                | 7                       |
| G31                | 25440                                | 230                         | 9033                                       | 18.59                       | 1                                     | YOK                | 9                       |
| G32                | 16800                                | 123                         | 7322                                       | 7.19                        | 2                                     | YOK                | 4                       |
| G33                | 30110                                | 109                         | 3608                                       | 4.54                        | 3                                     | VAR                | 5                       |
| G34                | 28380                                | 188                         | 6618                                       | 10.06                       | 8                                     | VAR                | 4                       |
| G35                | 25200                                | 188                         | 7478                                       | 10.55                       | 6                                     | YOK                | 6                       |
| G36                | 32140                                | 209                         | 6510                                       | 19.23                       | 3                                     | YOK                | 5                       |
| G37                | 6340                                 | 38                          | 5933                                       | 2.49                        | 3                                     | VAR                | 4                       |
| G38                | 18790                                | 100                         | 5298                                       | 7.15                        | 4                                     | VAR                | 7                       |
| G39                | 4450                                 | 40                          | 9112                                       | 3.06                        | 4                                     | VAR                | 4                       |
| G40                | 17810                                | 136                         | 7656                                       | 6.54                        | 2                                     | YOK                | 6                       |
| G41                | 30970                                | 187                         | 6036                                       | 21.09                       | 5                                     | YOK                | 6                       |
| G42                | 25640                                | 225                         | 8787                                       | 17.58                       | 6                                     | VAR                | 9                       |
| G43                | 45190                                | 266                         | 5886                                       | 29.01                       | 7                                     | YOK                | 9                       |
| G44                | 20720                                | 212                         | 10242                                      | 16.43                       | 3                                     | YOK                | 8                       |
| G45                | 40570                                | 139                         | 3423                                       | 17.58                       | 6                                     | YOK                | 7                       |
| G46                | 13810                                | 97                          | 7039                                       | 9.27                        | 4                                     | YOK                | 5                       |
| G47                | 10210                                | 86                          | 8422                                       | 8.15                        | 3                                     | YOK                | 4                       |
| G48                | 30380                                | 267                         | 8801                                       | 32.06                       | 7                                     | YOK                | 14                      |
| G49                | 26730                                | 109                         | 4067                                       | 10.22                       | 2                                     | YOK                | 6                       |
| G50                | 20510                                | 112                         | 5489                                       | 11.08                       | 3                                     | YOK                | 5                       |
| G51                | 10120                                | 80                          | 7897                                       | 9.54                        | 4                                     | YOK                | 6                       |
| G52                | 20260                                | 212                         | 10459                                      | 16.22                       | 9                                     | YOK                | 6                       |

GNSS destekli sırt çantası LiDAR sistemi kullanılarak toplanan arazi verilerinin dengelenmesinin ardından elde edilen nokta bulutlarının doğrudan ülke koordinat sistemine dönüştürülmesiyle sahada tesis edilen YKN'ler denetleme noktası olarak kullanılmıştır. Her YKN için nokta bulutundaki koordinatı ve yersel ölçümlerden elde edilen koordinatı karşılaştırılmış ve KOH (yatay) ve KOH (düşey) elde edilmiştir (Şekil 4.9.).

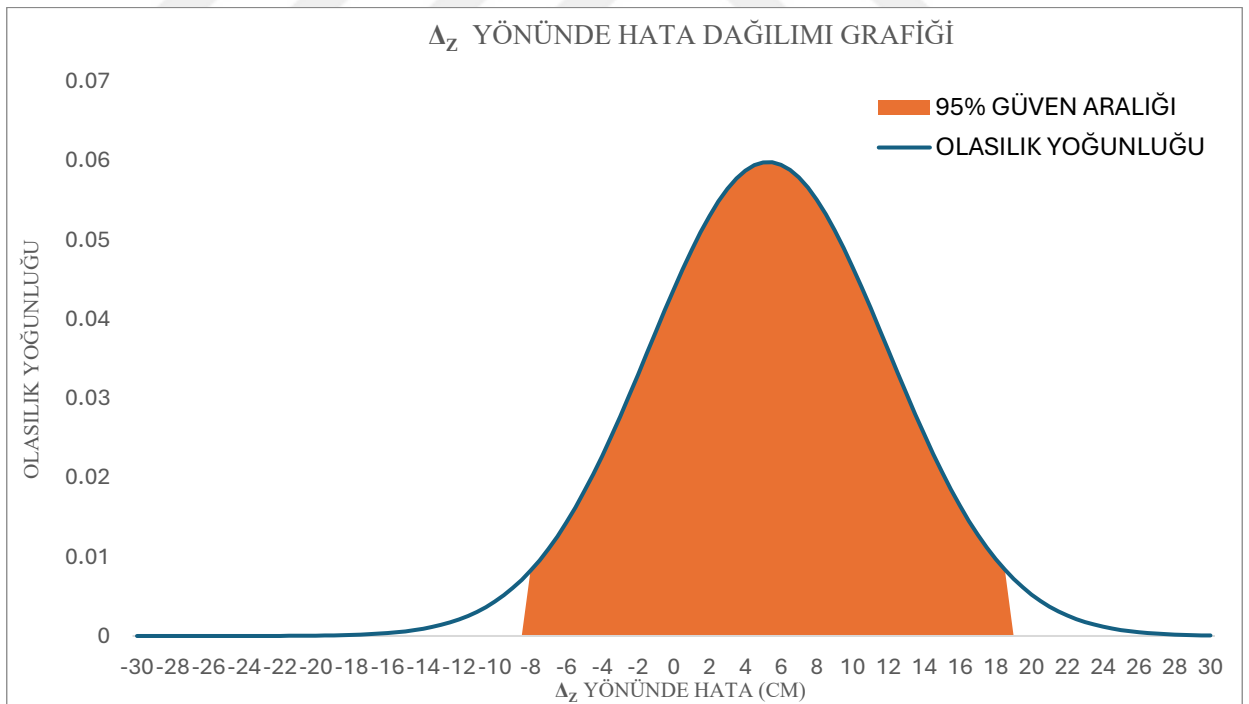


Şekil 4.9. YKN'lerin hata dağılımını gösteren grafik

YKN'lerin yatay doğrultuda ortalama hata değeri 7,78 cm, karesel ortalama hata 8,77 cm ve hesaplanan standart sapma değeri 4.03 cm'dir. Düşey doğrultuda ortalama hata değeri 5,28 cm, karesel ortalama hata 6,67 cm ve hesaplanan standart sapma değeri 6,70 cm'dir. Hesaplanan hataların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının incelenmesi ve verilerdeki birçok değişken göz önünde bulundurulduğunda, nokta bulutundaki YKN değerinin yersel ölçümlerden elde edilen YKN değerinden ne kadar uzak olabileceğini belirlemek için % 95 güven aralığı hesaplanmıştır(Kılıç, 2015).

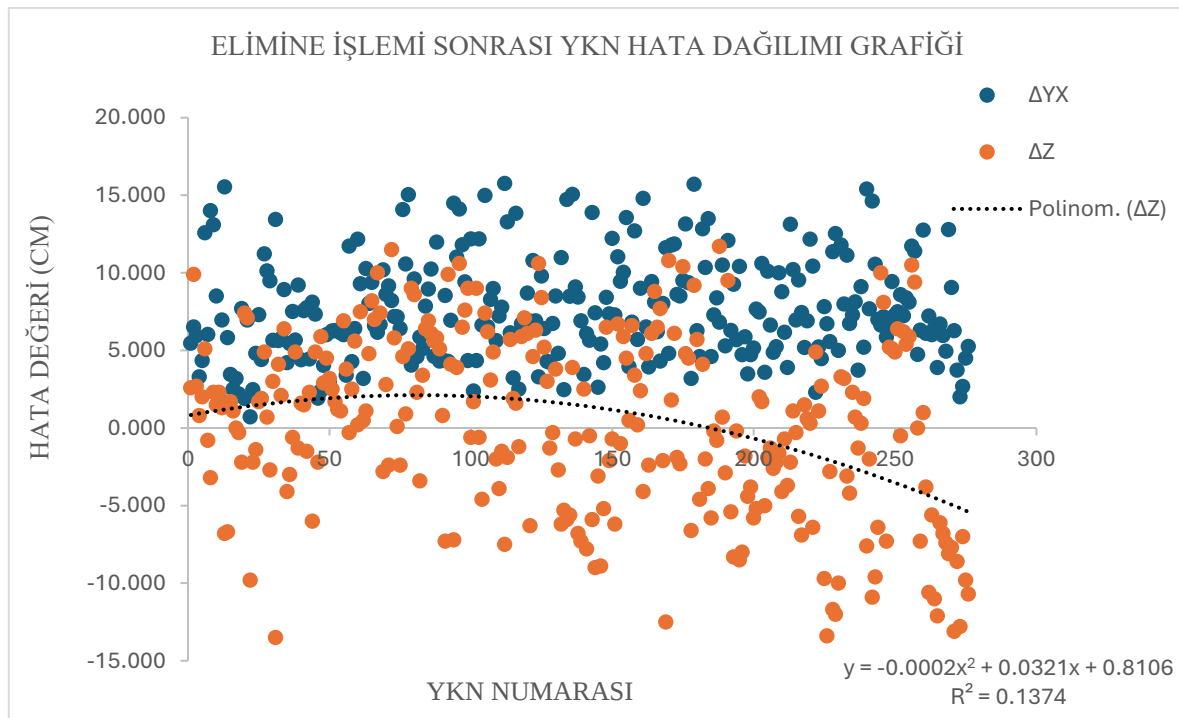


Şekil 4.10. Yatay yönde %95 güven aralığını gösteren grafik



Şekil 4.11. Düşey yönde %95 güven aralığını gösteren grafik

Güven aralığının sınırlarının belirlenmesinin ardından negatif ve pozitif yönde hata değeri yüksek olan otuz bir YKN elimine edilmiştir. Elimine işleminden sonra yatay yönde ortalama hata değeri 7.62 cm, karasel ortalama hata 8.32 cm ve standart sapma değeri 3,29 cm olarak hesaplanmıştır. Düşey doğrultuda ortalama hata değeri 4.74 cm, karasel ortalama hata 5.76 cm ve hesaplanan standart sapma değeri 5.74 cm'dir (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. Elimine işleminin ardından YKN'lerin hata dağılımını gösteren grafik

#### 4.3.2 Üç Farklı LiDAR Sisteminden Elde Edilen Nokta Bulutlarının Değerlendirilmesi

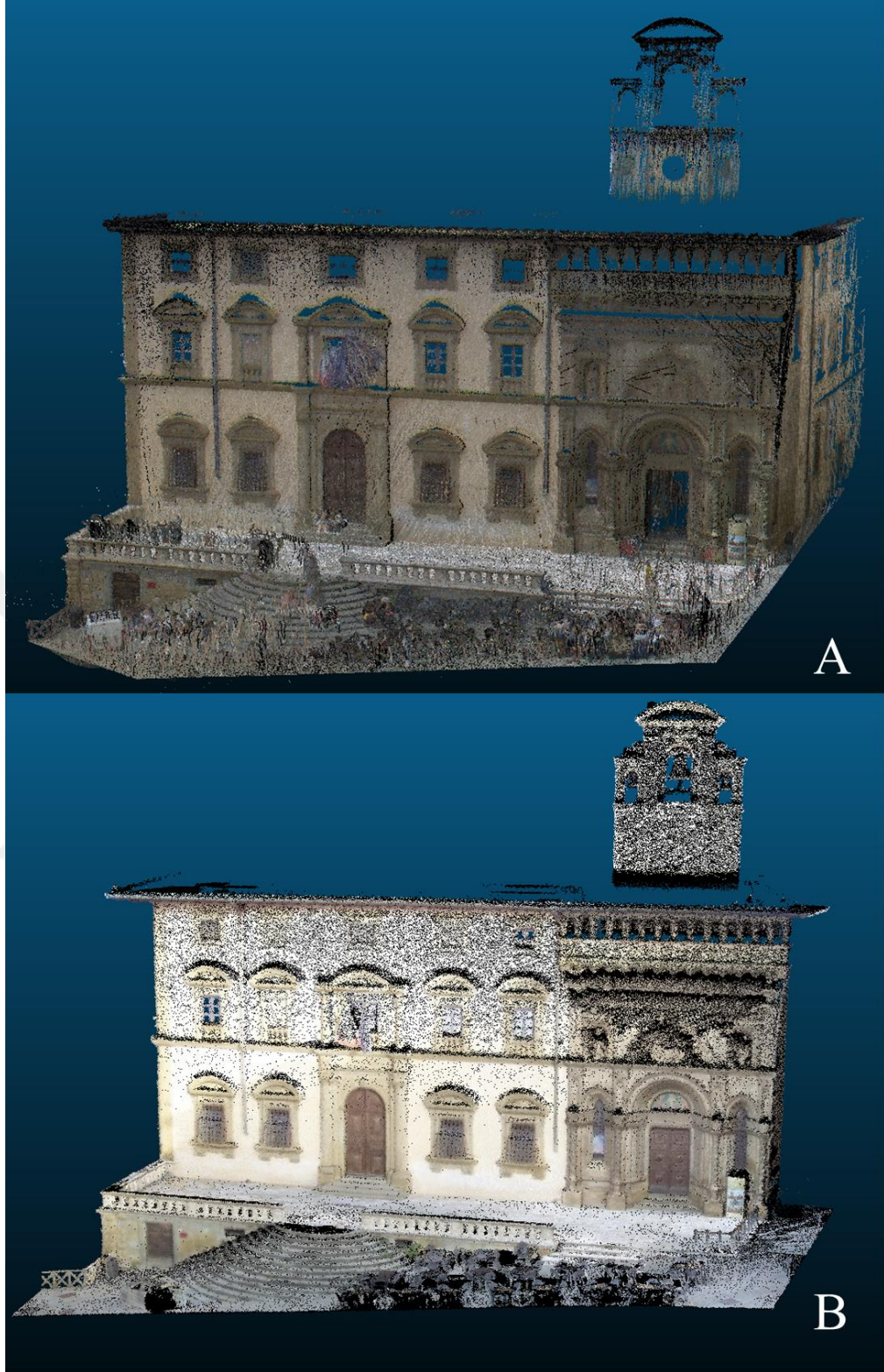
BLK2GO, GeoSLAM ve Stonex X120 model mobil LiDAR sistemi kullanılarak Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait nokta bulutları elde edilmiştir (Çizelge 4.11.). Elde edilen nokta verileri incelendiğinde sarayın zemine temas eden ön cephesinin tamamının ve yan cephelerinin bir kısmının tarandığı görülmektedir. Ön cephede kısmında bulunan saat kulesine ait bazı nokta verileri toplanmış olsa da diğer yersel teknikler kullanılarak elde edilen 3B nokta ve model verilerine benzer olarak sarayın çatı kısmına ait nokta verisi tam olarak toplanamamıştır (H. B. J. G. Makineci, 2016; Şenol, Yiğit, Yunus, & Ali, 2021).

**Çizelge 4.11.** Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait nokta bulutlarını gösteren çizelge

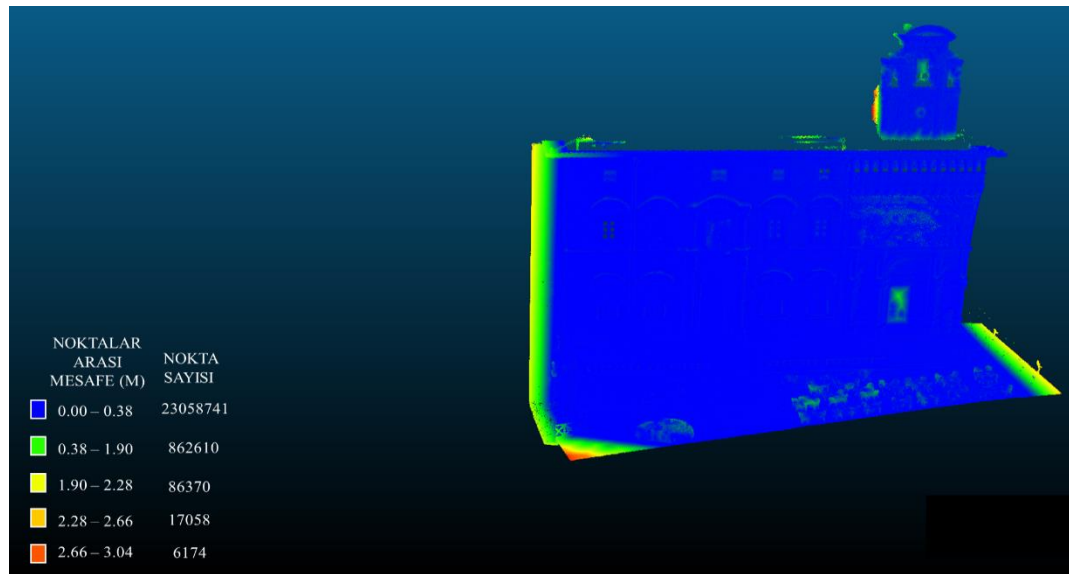
| TARAMA<br>NUMARASI | ALET ADI    | TARAMA<br>ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM<br>SÜRESİ<br>(DAKİKA) | NOKTA<br>SAYISI<br>(MİLYON) | M <sup>2</sup> DÜŞEN<br>NOKTA<br>SAYISI |
|--------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| A1                 | BLK2GO      | 1700                              | 4.39                        | 51                          | 29815                                   |
| A2                 | GEOSLAM     | 1700                              | 4.50                        | 24                          | 14136                                   |
| A3                 | STONEX X120 | 1700                              | 4.41                        | 18                          | 10790                                   |

Toplanan nokta verileri Doğrudan Buluttan Buluta Karşılaştırma (C2C) algoritması kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi gerçekleşmeden önce karşılaştırma yapılacak nokta bulutlarının aynı koordinat sisteminde ve aynı koordinatlarda olması gerekmektedir(Diaz et al., 2023). Toplanan nokta verileri aynı lokal koordinat sisteminde ve aynı detaya ait nokta bulutları olduğu için bu işleme gerek kalmadan karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. İki nokta bulutu arasında biri referans nokta bulutu ve diğeri karşılaştırılan nokta bulutu seçilerek karşılaştırma işlemi gerçekleştir. Karşılaştırma işleminin sonunda iki nokta bulutu arasında minimum mesafe, maksimum mesafe, ortalama mesafe hesaplanmış ve iki nokta bulutu arasındaki geometrik ve görsel farkı gösteren uzaklık ölçeği elde edilmiştir(Diaz et al., 2023; Javaheri et al., 2020).

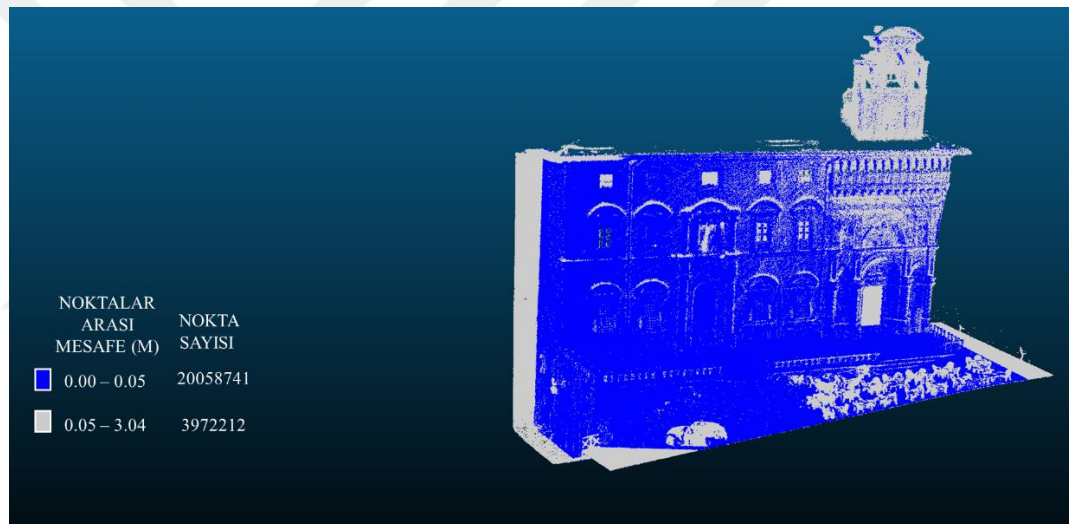
İlk olarak A1 ve A2 numaralı nokta bulutları karşılaştırılmıştır. Taramalar görsel olarak karşılaştırıldığında iki nokta bulutu arasında renk değerleri olarak fark olduğu görülmektedir (Şekil 4.13.). A1 numaralı taramanın renk dokusu olarak yapının gerçek rengine daha yakındır. İlaveten A1 numaralı taramanın daha sık bir dokuya sahip olduğu ve yapı genelinde bu dokuyu koruduğu, A2 numaralı taramanın ise yapının üst kısımlarına gidildikçe yüzey dokusunda bozulmalar olduğu ve nokta sapmasının arttığı tespit edilmiştir. İki nokta bulutuna ait noktalar geometrik olarak karşılaştırıldığında noktalar arası minimum mesafe 0.00 m, maksimum mesafe 3.12 m, ortalama mesafe 0.05 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.14.). Noktalar arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.38 m aralığının en yoğun nokta sayısının olduğu mesafe aralığı ve bu aralığın %87'sini oluşturan noktaların arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.05 m aralığında olduğu görülmektedir (Şekil 4.15.). Ana girişten saat kulesinin olduğu girişe doğru gidildikçe noktalar arasındaki mesafenin 0.10 m kadar çıktığı görülmektedir. Bu durum o kısımdaki noktalar arasındaki sapmanın arttığını göstermektedir (Şekil 4.16.).



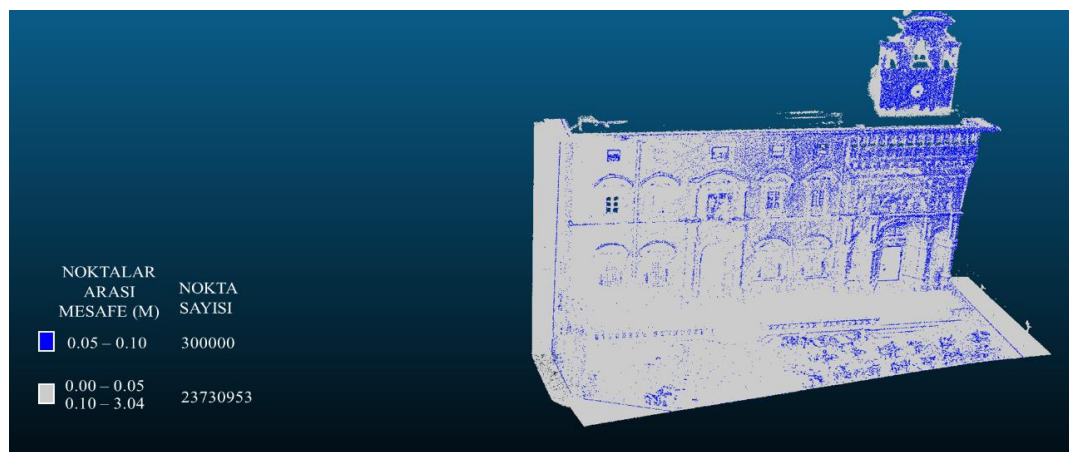
Şekil 4.13. A. A1 numaralı nokta bulutu B. A2 numaralı nokta bulutu



Şekil 4.14. A1 ve A2 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması

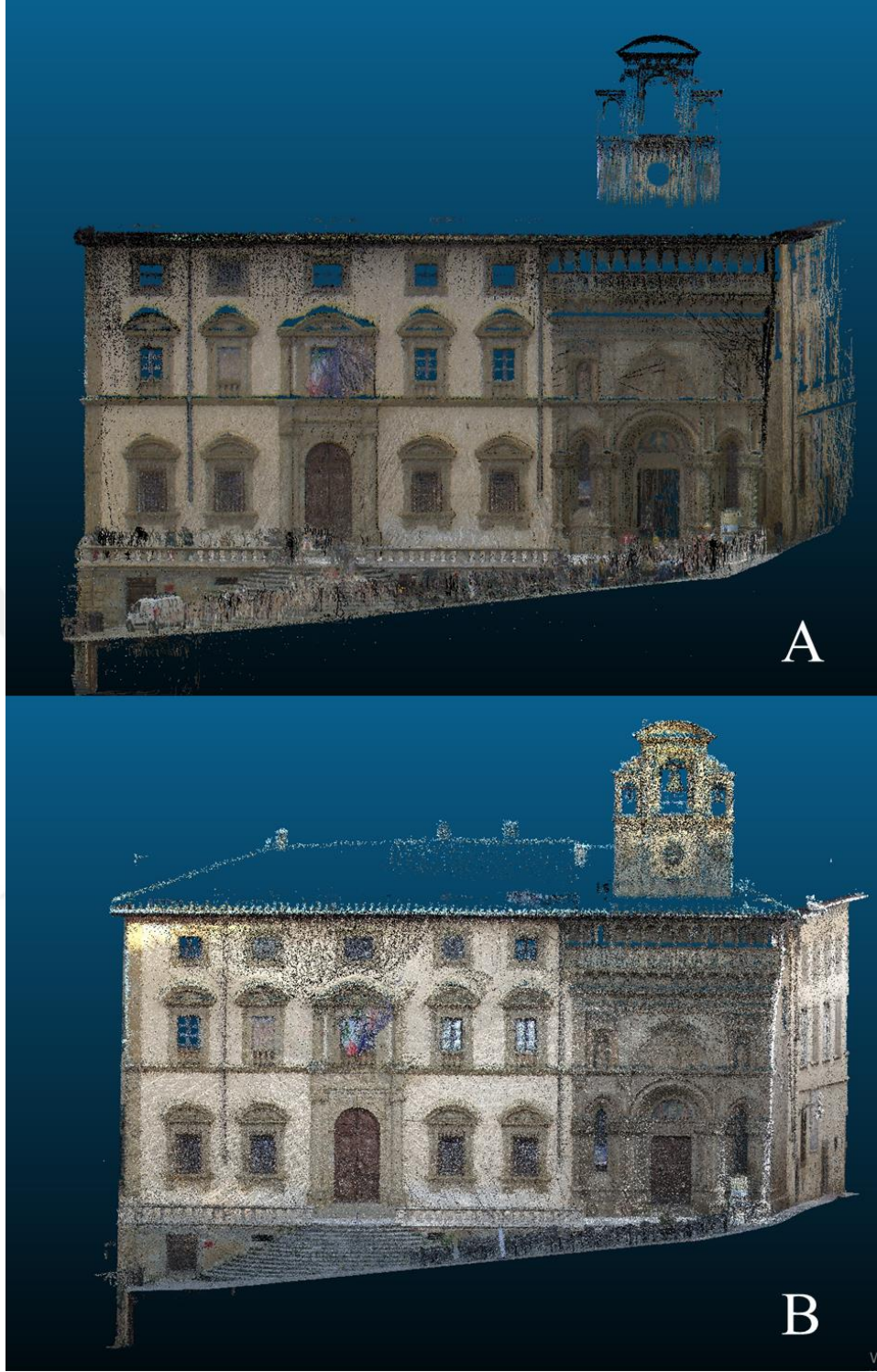


Şekil 4.15. A1 ve A2 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.05 m mesafedeki noktalar

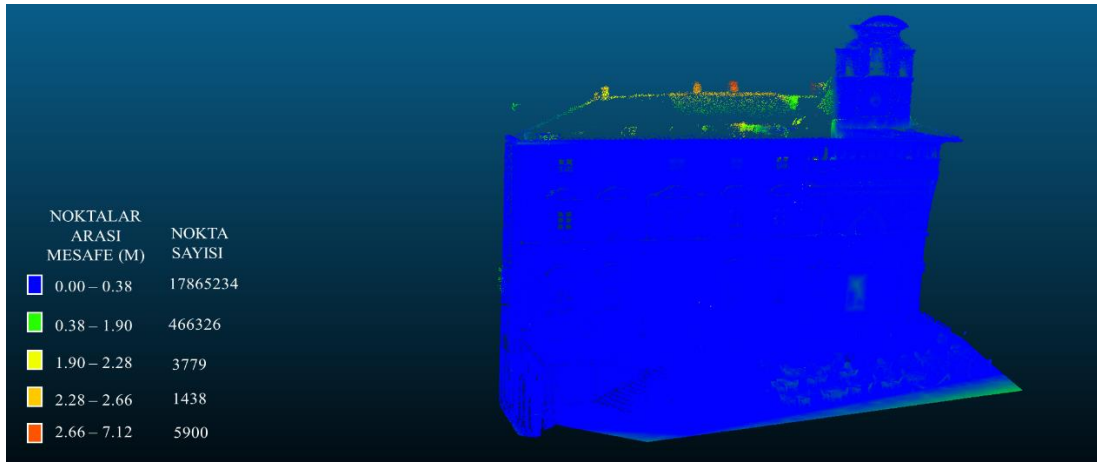


Şekil 4.16. A1 ve A2 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.05 ile 0.10 m mesafedeki noktalar

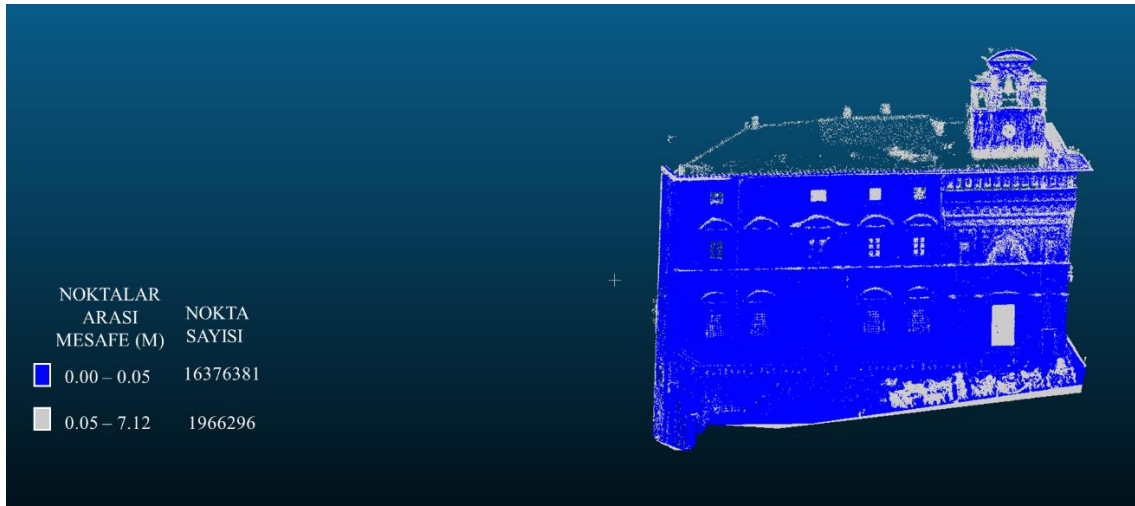
A1 ve A3 numaralı nokta bulutları görsel olarak karşılaştırıldığında iki nokta bulutu arasında renk değerler arasında fark olduğu görülmektedir. (Şekil 4.17.). İlaveten A1 numaralı taramanın A3 numaralı taramaya kıyasla daha sık bir dokuya sahip olduğu ve yapı genelinde bu dokuyu koruduğu tespit edilmiştir. İki nokta bulutuna ait noktalar geometrik olarak karşılaştırıldığında noktalar arası minimum mesafe 0.00 m, maksimum mesafe 7.16 m, ortalama mesafe 0.03 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.18.). Maksimum mesafenin A3 numaralı taramanın çatının bir kısmında bulunan noktalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Noktalar arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.38 m aralığının en yoğun nokta sayısının olduğu mesafe aralığı ve bu aralığın %92'ini oluşturan noktaların arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.05 m aralığında olduğu görülmektedir (Şekil 4.19.). Ana girişten saat kulesinin olduğu girişe doğru gidildikçe noktalar arasındaki mesafenin 0.10 m kadar çıktığı görülmektedir. Bu durum o kısımdaki noktalar arasındaki sapmanın arttığını göstermektedir (Şekil 4.20.).



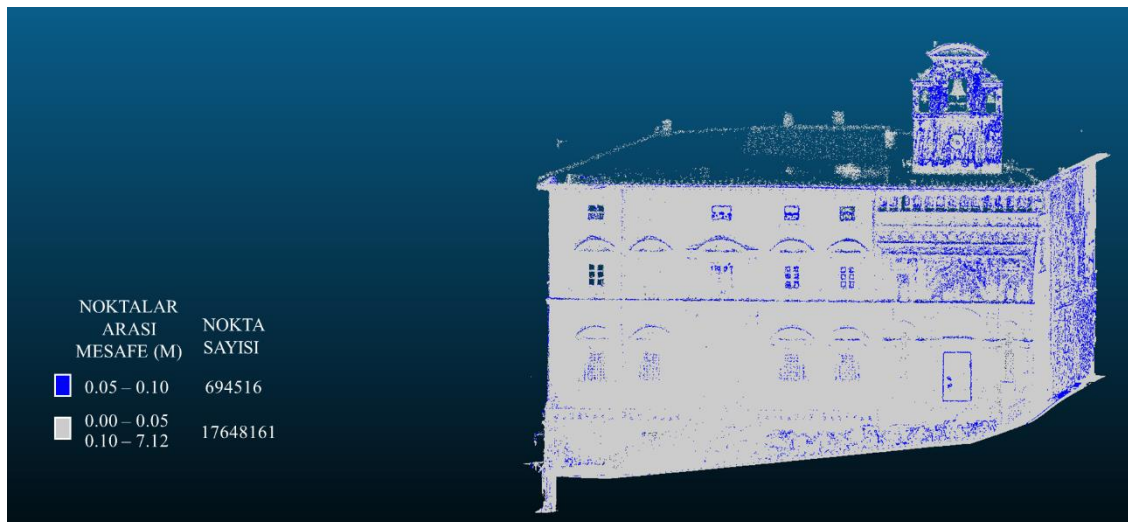
Şekil 4.17. A. A1 numaralı nokta bulutu B. A3 numaralı nokta bulutu



Şekil 4.18. A1 ve A3 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması

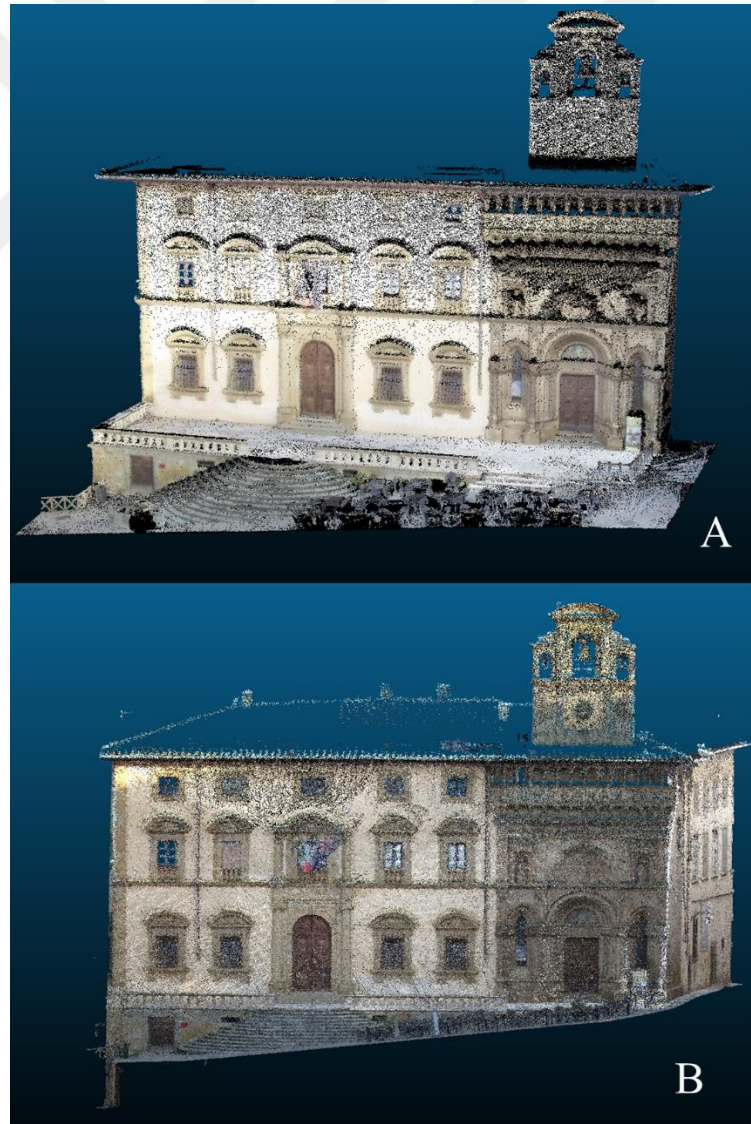


Şekil 4.19. A1 ve A3 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.05 m mesafedeki noktalar

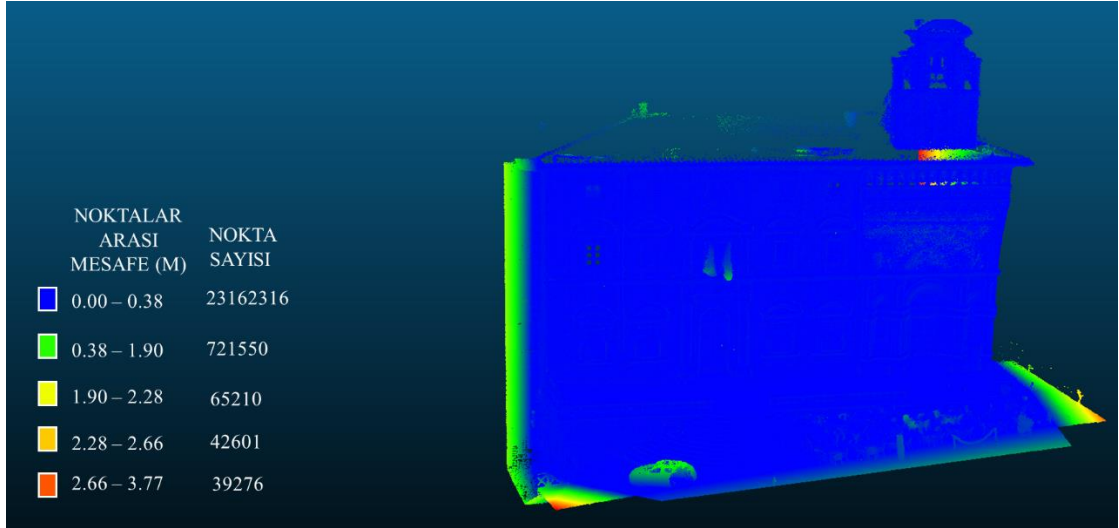


Şekil 4.20. A1 ve A3 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.05 ile 0.10 m mesafedeki noktalar

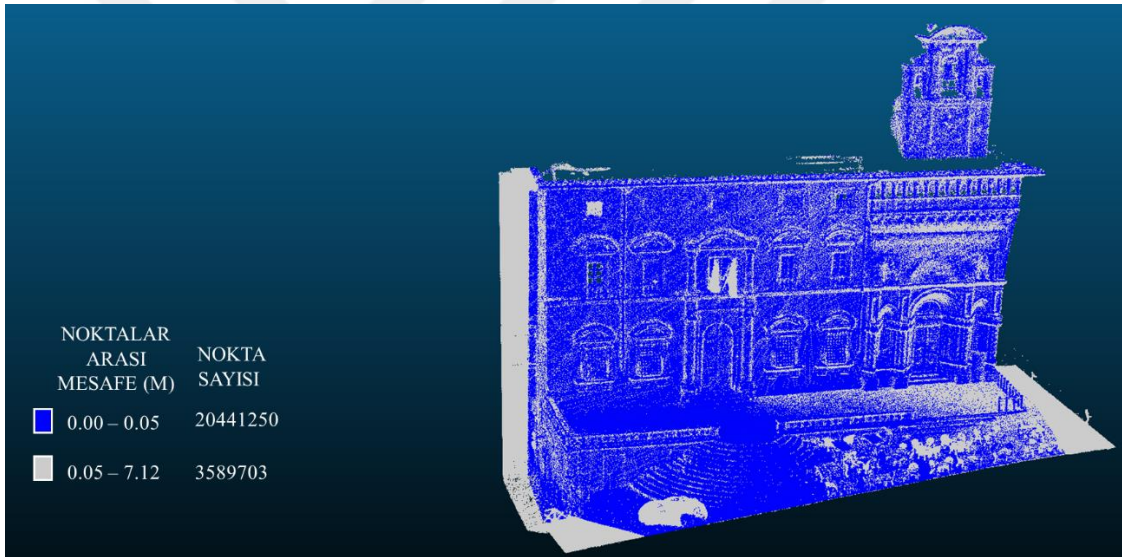
Son olarak A2 ve A3 numaralı nokta bulutları görsel olarak karşılaştırıldığında iki nokta bulutu arasında renk değerler arasında fark olduğu görülmektedir. (Şekil 4.21.). A3 numaralı taramanın A2 numaralı taramaya göre yapının gerçek rengini daha yakın olduğu görülmektedir. İki nokta bulutuna ait noktalar geometrik olarak karşılaştırıldığında noktalar arası minimum mesafe 0.00 m, maksimum mesafe 3.76 m, ortalama mesafe 0.05 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.22.). Noktalar arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.38 m aralığının en yoğun nokta sayısının olduğu mesafe aralığı ve bu aralığın %88'ini oluşturan noktaların arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.05 m aralığında olduğu görülmektedir (Şekil 4.23.). Nokta bulutunun genelinde noktalar arasındaki mesafenin 0.10 m düzeyine çıktığını göstermektedir. Bu durum iki nokta bulutu arasındaki yapının tamamında farklılıklar olduğunu göstermektedir (Şekil 4.24.).



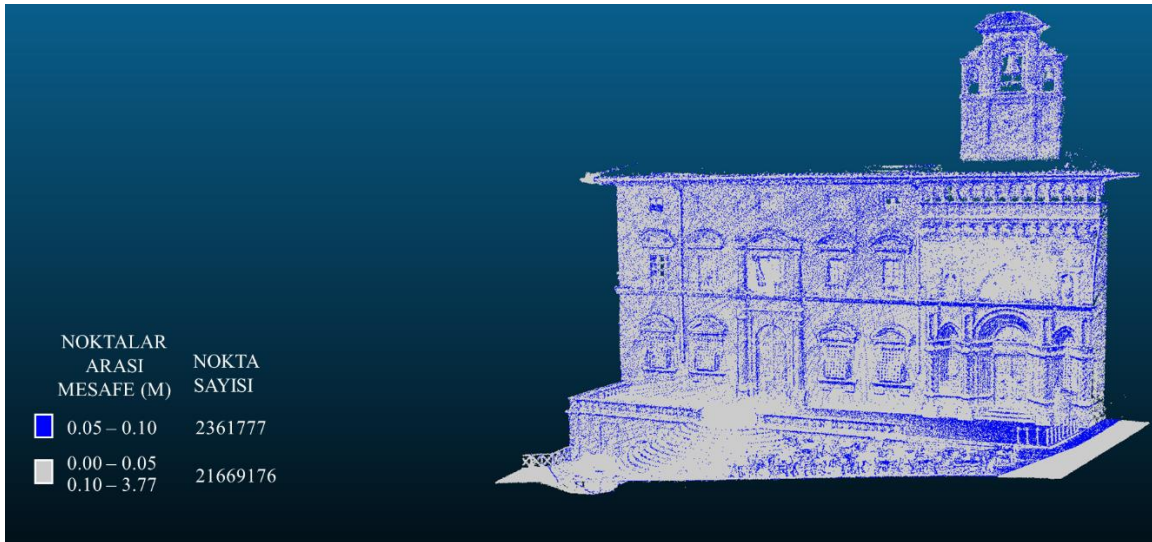
Şekil 4.21. A. A2 numaralı nokta bulutu B. A3 numaralı nokta bulutu



Şekil 4.22. A2 ve A3 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması



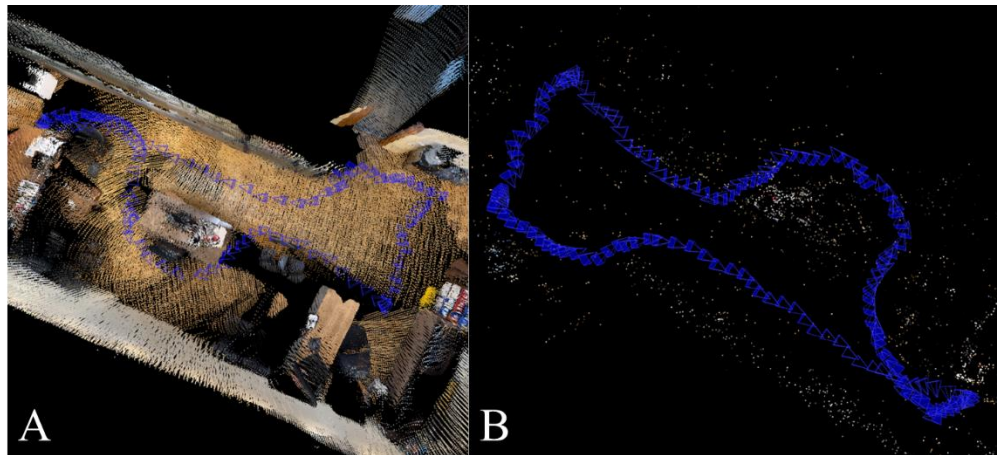
Şekil 4.23. A2 ve A3 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.05 m mesafedeki noktalar



Şekil 4.24. A2 ve A3 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.05 ile 0.10 m mesafedeki noktalar

#### 4.4 Akıllı Cep Telefonundan Elde Edilen Nokta Bulutlarının Değerlendirilmesi

Akıllı cep telefonunda bulunan LiDAR sensörünün ve SLAM algoritması tabanlı uygulamanın testi amacıyla tek odalı bir ofiste tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. LiDAR sensörü bulunan ve bulunmayan iki farklı akıllı telefon kullanılarak tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. İki tarama işleminde de konumlandırma işlemi başarıyla gerçekleştirilmiş ve tarama ayak izi elde edilmiştir. LiDAR destekli akıllı cep telefonunda ofisin nokta bulutu elde edilmiştir. LiDAR desteği bulunmayan akıllı cep telefonunda ise görsel SLAM algoritmasının görüntülerden oluşturduğu seyrek nokta verileri elde edilmiştir.



Şekil 4.25. A. LiDAR bulunan taramadan elde edilen ayak izi ve sonuç ürün  
B. LiDAR bulunmayan taramadan elde edilen ayak izi ve sonuç ürün

LiDAR sensörü destekli akıllı telefonun LiDAR sensörünün ve SLAM algoritmasıyla çalışan uygulamanın bağıl hatanın incelenmesi amacıyla Padova ilinde bulunan bir yapının dış cephesi taranmış ve binada detay ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bina cephesinden on farklı detay ölçülmüştür. Nokta bulutundan detay ölçülmesiyle gerçek detay ölçümleri karşılaştırıldığında hesaplanan ortalama hata 1,44 cm, minimum hata 0,42 cm, maksimum hata 2,8 cm, standart sapma 0,83 cm ve KOH 1,73 cm'dir (Çizelge 4.12.).

**Çizelge 4.12.** Detayların nokta bulutu ile gerçek boyutları arasındaki karşılaştırma

| DETAY NO | GERÇEK ÖLÇÜ (m) | NOKTA BULUTUNDAKİ ÖLÇÜ (m) | FARK (m) |
|----------|-----------------|----------------------------|----------|
| Detay 1  | 1.850           | 1.822                      | 0.028    |
| Detay 2  | 1.430           | 1.420                      | 0.010    |
| Detay 3  | 1.850           | 1.823                      | 0.027    |
| Detay 4  | 1.400           | 1.414                      | 0.014    |
| Detay 5  | 1.850           | 1.838                      | 0.012    |
| Detay 6  | 1.430           | 1.424                      | 0.006    |
| Detay 7  | 1.850           | 1.841                      | 0.009    |
| Detay 8  | 1.430           | 1.426                      | 0.004    |
| Detay 9  | 0.700           | 0.679                      | 0.021    |
| Detay 10 | 1.500           | 1.514                      | 0.014    |

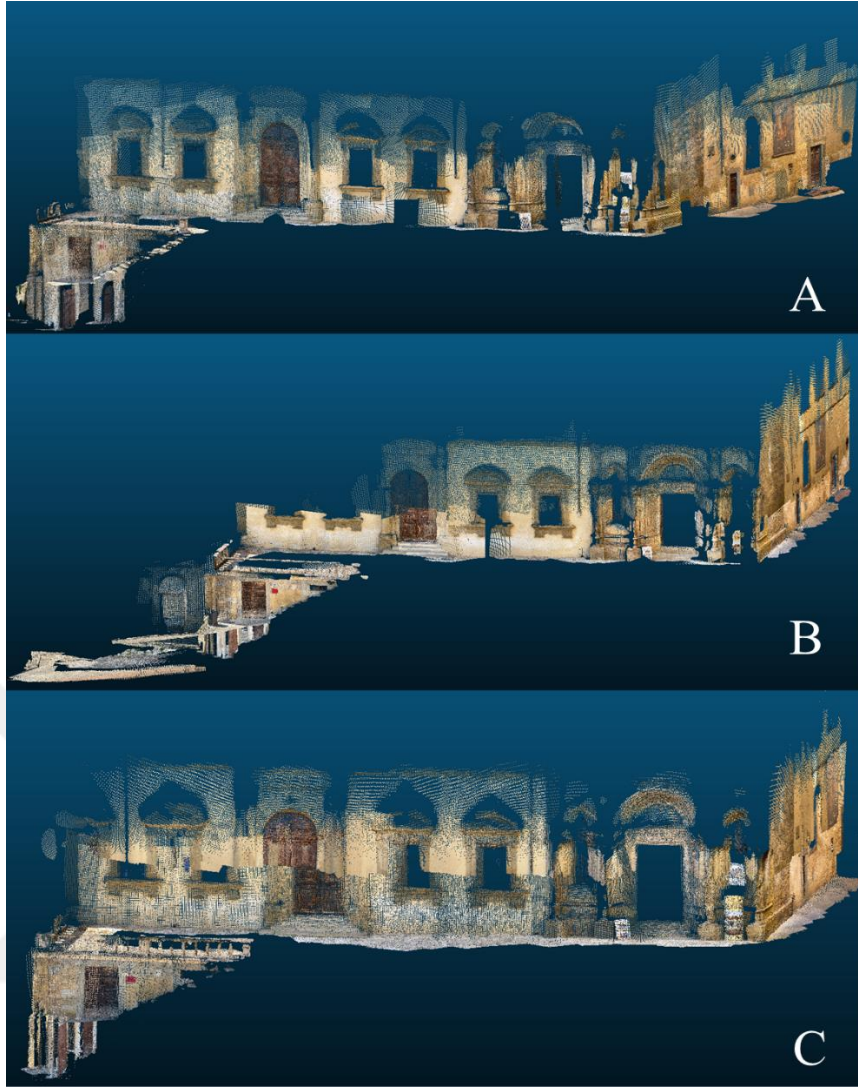
LiDAR sensörü ve SLAM algoritmasının test edilmesi sonucunda uygulama ile üretilen ve lokal koordinat sisteminde çıktı alınan nokta bulutunun görsel olarak anlamlı ve geometrik olarak bağıl hatasının düşük olduğu görülmektedir.

Test işleminin ardından mobil LiDAR sistemleriyle karşılaştırma yapılması amacıyla LiDAR sensör destekli akıllı cep telefonu kullanılarak Palazzo della Fraternita dei Laici sarayının taraması gerçekleştirilmiştir. Üç farklı tarama yapılmıştır ve tarama sonucunda elde edilen nokta bulutları karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.13.).

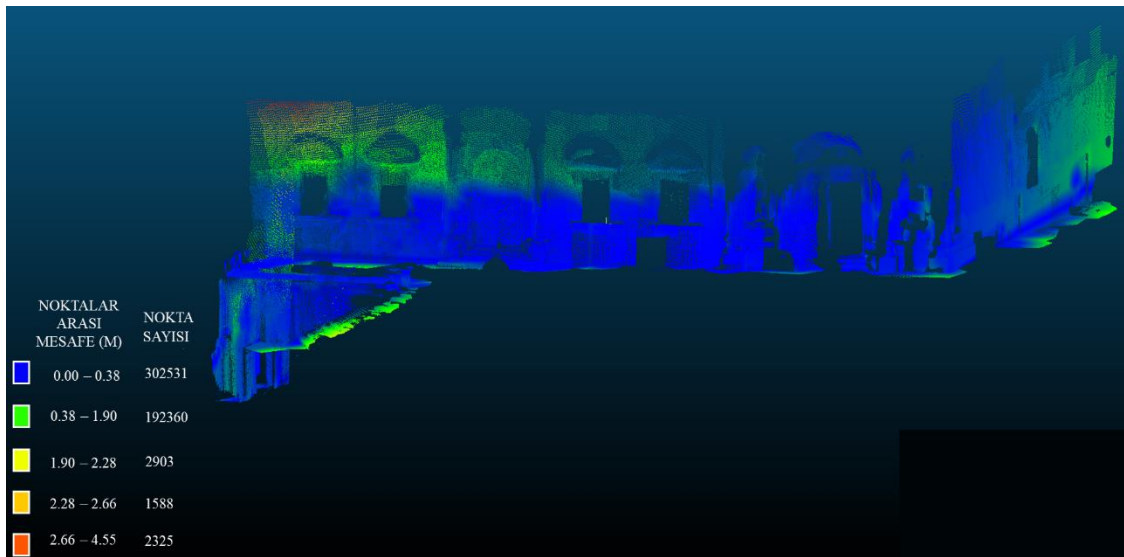
**Çizelge 4.13.** Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait nokta bulutlarını gösteren çizelge

| TARAMA NUMARASI | TARAMA ALANI (m <sup>2</sup> ) | ÖLÇÜM SÜRESİ (DAKİKA) | NOKTA SAYISI (MİLYON) | M <sup>2</sup> DÜŞEN NOKTA SAYISI |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| A4              | 304.10                         | 4.39                  | 0.5                   | 1652                              |
| A5              | 304.10                         | 4.50                  | 0.79                  | 2602                              |
| A6              | 304.10                         | 4.41                  | 0.55                  | 1811                              |

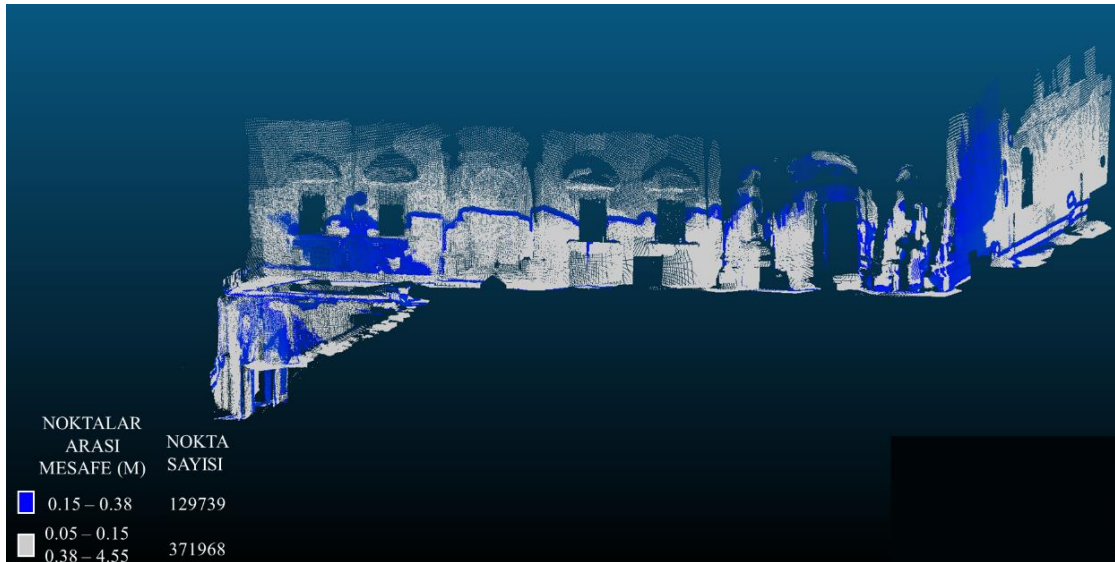
Üç farklı LiDAR sisteminden elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırması yapılırken kullanılan Doğrudan Buluttan Buluta Karşılaştırma (C2C) algoritması kullanılmıştır. İlk olarak A4, A5 ve A6 numaralı nokta bulutları görsel olarak karşılaştırılmıştır (Şekil 4.26.). Taramalar karşılaştırıldığında nokta bulutlarının zeminden itibaren yaklaşık 7 metre yüksekliğe kadar nokta verisi olduğu ancak A5 numaralı taramanın sarayın ana girişinin olduğu kısımda ciddi nokta verisi eksikliği olduğu, A6 numaralı nokta bulutunda ise sarayın giriş kapısından itibaren noktalarda kayıklık olduğu görülmektedir. A4 numaralı taramada saray üzerindeki detaylar tam olarak taranmamış olsa da elde edilen nokta bulutu diğer taramalardan elde edilen nokta bulutlarından görsel olarak daha iyi durumda olduğunu göstermektedir. A5 ve A6 taramalarındaki hataların ve kayıklıkların nedeni tarama esnasında hızlı ve ani hareket edilmesi, akıllı cep telefonun yanlış tutulması vb. nedenler olabilir (Luetzenburg, Kroon, & Björk, 2021; Teo & Yang, 2023). A4 ve A5 numaralı nokta bulutları geometrik olarak karşılaştırıldığında noktalar arası minimum mesafe 0.00 m, maksimum mesafe 4.55 m, ortalama mesafe 0.38 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.27.). Noktalar arasındaki mesafenin 0.00 m ile 0.38 m aralığında en yoğun nokta sayısının olduğu mesafe aralığı olduğu görülmektedir. Bu aralıkta noktaların büyük bir çoğunluğunun 0.15 m ile 0.38 m arasında olduğu görülmektedir (Şekil 4.28.). 0.00 m ile 0.05 m ile 0.05 ile 0.10 aralığındaki noktaların seyrek olduğu ve saat kulesi girişine yakın bir kısımda bulundukları tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. A. A4 numaralı nokta bulutu B. A5 numaralı nokta bulutu C. A6 numaralı nokta bulutu

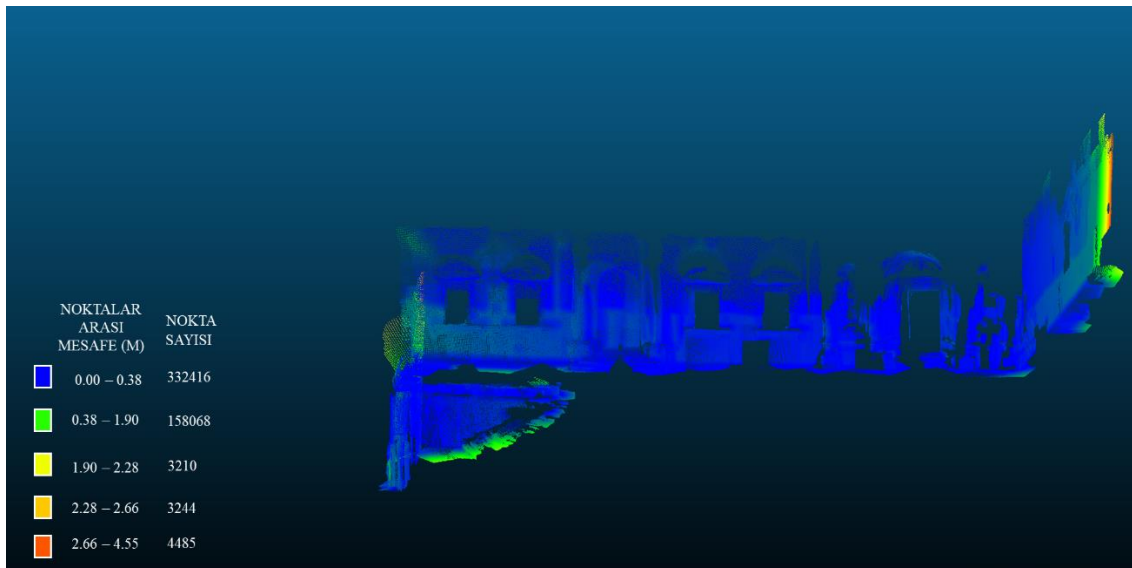


Şekil 4.27. A4 ve A5 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması

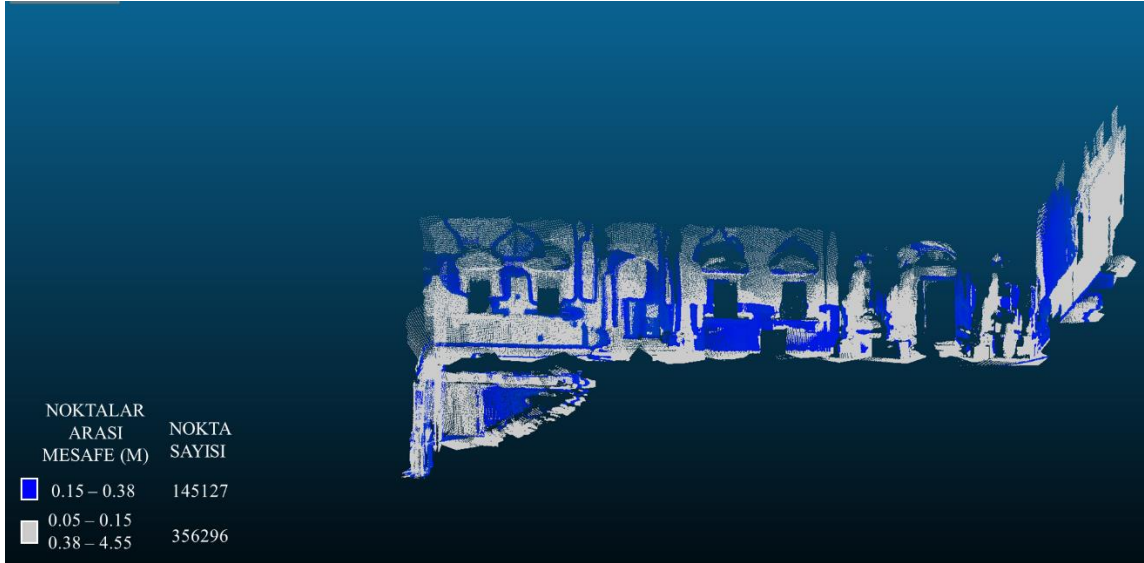


**Şekil 4.28.** A4 ve A5 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.15 ile 0.38 m mesafedeki noktalar

A4 ve A6 numaralı nokta bulutları geometrik olarak karşılaştırıldığında noktalar arası minimum mesafe 0.00 m, maksimum mesafe 4.26 m , ortalama mesafe 0.33 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.29.). Noktalar arasındaki mesafenin en yoğun olduğu aralık, 0.00 m ile 0.38 m aralığındadır, bu değerler arasında belirgin bir yoğunluk görülmektedir. Bu aralıkta noktaların büyük bir çoğunluğunun 0.15 m ile 0.38 m mesafe aralığında olduğu saptanmıştır. (Şekil 4.30.).



**Şekil 4.29.** A4 ve A6 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması



**Şekil 4.30.** A4 ve A6 taramalarına ait nokta bulutlarının karşılaştırılması sonucu 0.15 m ile 0.38 m mesafe aralığındaki noktaların dağılımı

#### 4.5 Mobil LiDAR Sistemleri ve Akıllı Cep Telefonundan Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi

Mobil LiDAR sistemleri SLAM yönteminin aynı varyantına ait algoritmalara sahiptir. Bu sistemler ticari amaçlar doğrultusunda kullanıldığı için sistem yapısında bulunan algoritmik bileşenler paylaşılmamaktadır. Sistem bileşenleri göz önünde bulundurularak algoritmik yapının incelenmesi ve sistem bir bütün olarak ele alınıp sonuç ürünleri üzerinden karşılaştırma yapmak mümkündür. SLAM algoritması gerçek saha koşullarında aktif olarak kullanıldığında sonuç ürünü olarak çevrenin bir modelini, haritasını ve sistem ayak izini sunmaktadır. Mobil LiDAR sistemlerinden elde edilen sonuçlar, tarama yapılan çevrenin, yapının ve nesnelerin geometrik ve görsel özelliklerini yansıtıyorsa haritalama sürecinin başarılı bir şekilde tamamlandığını göstermektedir. Konumlandırma verisi sistem ayak izini takip ederken, aynı zamanda haritalama sürecinde elde edilen verilere konum bilgisi sağlamaktadır. Özellikle GNSS alıcısı bulunmayan mobil LiDAR sistemlerinde konumlandırma işlemi büyük bir öneme sahiptir. LiDAR ve kamera veri toplama işlemini başarılı tamamlansa da konumlandırma sürecindeki bozulmalar ve konumlandırma hataları toplanan veride bozulmalara neden olmaktadır (S. W. Chen et al., 2020; Guivant & Neboit, 2001; Karam et al., 2019; Zhao et al., 2024). Mobil LiDAR sisteminde kullanılan SLAM algoritmaların karşılaştırması amacıyla çalışma kapsamında Leica BLK2GO, GeoSLAM ve Stonex X120 marka model mobil LiDAR sistemleri kullanılarak toplanan nokta bulutları karşılaştırılmıştır. Nokta

bulutları detaylı bir analize tabi tutulduğunda, görsel açıdan farklılıklar ortaya çıksa da geometrik olarak nokta bulutları arasındaki farkların 5 cm'nin altında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Mobil LiDAR sistemlerinin sensörlerinin ve SLAM algoritmalarının tarama sürecinde hatasız çalıştığı görülmektedir.

SLAM algoritmasının hızlı, pratik ve aktif olarak kullanılmasına olanak sağlayan LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonlarından elde edilen verilerin geometrik ve görsel olarak doğruluğunun araştırılması gerekmektedir(Corradetti et al., 2022). Çalışma kapsamında Palazzo della Fraternita dei Laici sarayı LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu kullanılarak üç defa taranmıştır. A5 ve A6 numaralı taramalardan elde edilen nokta bulutlarında bölgesel olarak kayıklıklar olduğu görülmektedir. Bu taramalarda gerçekleştirilen hataların, SLAM algoritmasının konumlandırma işlemi sürecinde yapılan hatalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Tarama esnasında taraması yapılan bölgenin tekrar taranması ve tarama esnasında aynı yerden birden fazla geçilmesi SLAM algoritmasının doğruluğuna etki etmiş ve konumlandırma işlemin de aksamalara sebep olmuştur(Hou et al., 2024; Teo & Yang, 2023). A4 numaralı nokta bulutunda yer yer boşluklar bulunsa da diğer taramalara göre geometrik ve görsel daha optimum bir sonuç elde edilmiştir. Farklı sistemlerden elde edilen nokta verilerinin karşılaştırılması amacıyla A4 numaralı nokta bulutu Mobil LiDAR sistemlerinden elde edilen nokta bulutlarıyla karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.14.).

**Çizelge 4.14.** A4 numaralı nokta bulutunun mobil LiDAR sistemlerinden elde edilen nokta bulutlarıyla karşılaştırılması

| Nokta Bulutu Numarası | Noktalar Arası Mesafe |              |               |
|-----------------------|-----------------------|--------------|---------------|
|                       | 0 cm - 5 cm           | 5 cm - 10 cm | 10 cm - 38 cm |
| A1                    | 13%                   | 13%          | 38%           |
| A2                    | 6%                    | 15%          | 18%           |
| A3                    | 8%                    | 25%          | 16%           |

Karşılaştırma işlemi sonucunda A1 numaralı nokta bulutunun en optimum sonuçlar verdiği görülmektedir. A1 numaralı nokta bulutunun nokta sayısının diğer nokta bulutlarına göre daha fazla olması buna etkindir. A3 numaralı nokta bulutunun A2 numaralı nokta bulutuna göre daha az sayıda noktaya sahip olmasına rağmen karşılaştırmada A4 numaralı nokta bulutuyla noktalar arası mesafenin daha yakın olduğu görülmektedir. A2 numaralı nokta bulutunun A4 numaralı nokta bulutuna en uzak nokta bulutu olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.6 Görüntü Tabanlı Slam Algoritmasının Test Edilmesi Ve Değerlendirilmesi

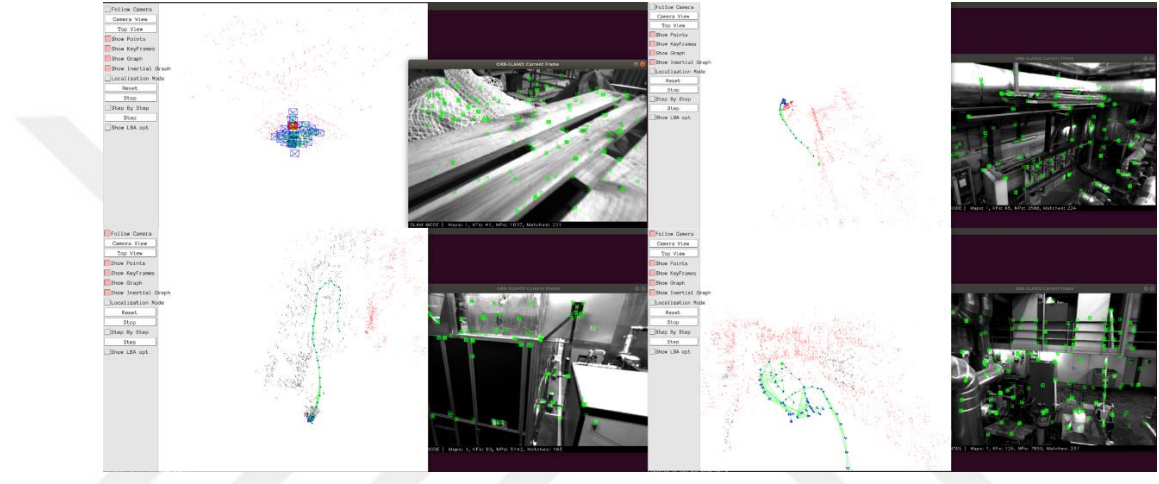
SLAM yönteminin birçok farklı varyantı bulunmaktadır. MonoSLAM algoritmasının tanıtılmasıyla beraber SLAM yönteminin özellik tabanlı varyantı güncel ismiyle görüntü tabanlı SLAM algoritması keşfedilmiştir(Davison et al., 2007). Görüntü tabanlı SLAM varyantının temeli oluşturan MonoSLAM algoritması sadece kameradan elde edilen görüntülerden kamera konumunu belirlemekte ve olasılık temelli filtrelemeler kullanarak haritalama sürecinin çözümünü hızlandırmışlardır. Haritalama aşamasında hızlandırılmış SfM algoritması kullanılmaktadır(Albrecht, 2009; Davison et al., 2007). MonoSLAM algoritmasının birçok dezavantajı bulunmakta ve algoritma çalıştırılırken birçok sorunla karşılaşıldığı tespit edilmiştir. Bu sorunları çözmek için MonoSLAM algoritmasında düzenlemeler yapılmış ve görüntü tabanlı SLAM algoritmasına ait yeni algoritmalar geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar arasında ORB SLAM, ORB SLAM2, ORB SLAM3, CNN SLAM, NİD SLAM, Pop-up SLAM algoritmaları popüler SLAM algoritmaları olduğu görülmektedir.(Campos et al., 2021; Mur-Artal et al., 2015; Mur-Artal & Tardós, 2017a; Pascoe et al., 2017; Sharafutdinov et al., 2023; Strasdat et al., 2010; Sualeh & Kim, 2019; Tateno et al., 2017; Yang, Song, Kaess, & Scherer, 2016). Geliştirilen bu algoritmalar halka açık paylaşılmaktadır. Ticari olmamak şartıyla algoritmaları çalıştırmak ve kullanmak mümkündür.

Görsel SLAM algoritmalarının çalıştırılması ve test edilmesi için ekipman gerekmektedir. Özellikle ROS (Robot Operating System) gibi ağır çerçeve ve araçlar koleksiyonunu çalıştırabilecek bilgisayar gereklidir. İlaveten açık kaynak kodlu paylaşılan SLAM algoritmaların çalıştırılması aşamasında birçok problem ve hatayla karşılaşmak mümkündür. ORB SLAM algoritmasının güncellemelerle desteklenmesi ve 2021 yılında ORB SLAM3 algoritmasının tanıtılmasıyla birlikte görüntü tabanlı SLAM algoritmaları arasında ORB SLAM3 algoritması en popüler SLAM algoritması olarak gösterilmektedir(Sharafutdinov et al., 2023). Çalışma kapsamında görüntü tabanlı SLAM algoritmasının test edilmesi ve elde edilen sonuç ürünlerin değerlendirilmesi amacıyla ORB SLAM3 algoritması kullanılmıştır.

Birçok sensöre sahip ve gerçek arazi koşullarına ait değerlere sahip veri kümeleri SLAM algoritmalarının test edilmesi için kullanılmaktadır(Jeong, Cho, Shin, Roh, & Kim, 2019). Literatürde kabul görmüş veri kümeleri arasında ORB SLAM3 algoritmasının iç mekân çalışmalarındaki performansını değerlendirmek için EuRoC MAV

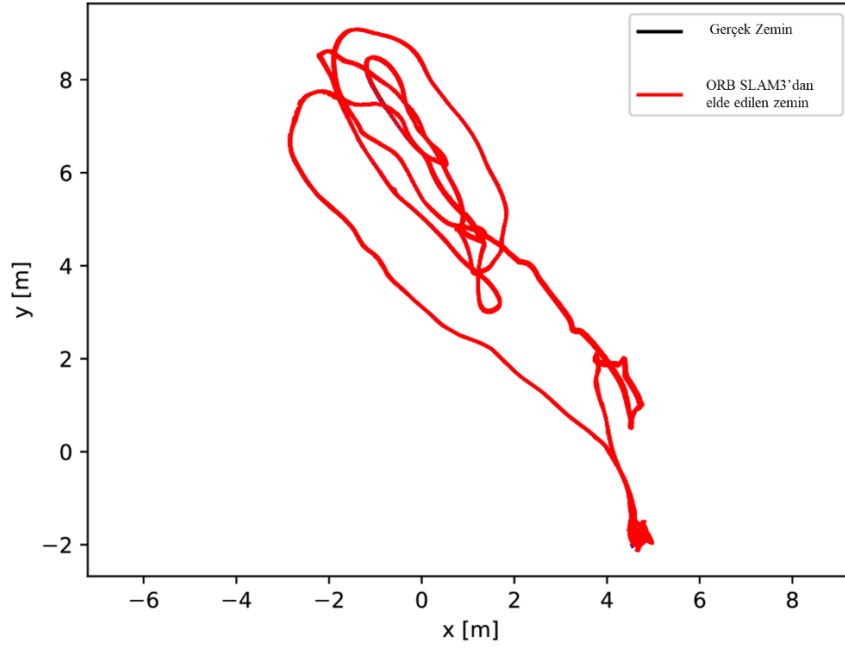
veri kümesi, dış mekân çalışmalarındaki performansını değerlendirmek için TUM VI veri seti kullanılmıştır.

ORB SLAM3 algoritmasına iç mekân veri seti olan EuRoC MAV veri seti yüklenip algoritma çalıştığında algoritma ilk olarak kamera poz bilgisi, kamera ayak izi bilgisini vermiştir(Şekil 4.31.). Kameranin hareket etmesiyle kamera ayak izi takibine eş zamanlı olarak seyrek nokta verisi başarıyla üretilmiştir. Döngü kapanmasının tamamlanmasıyla birlikte ORB SLAM3 algoritması, kamera ayak izinin rotasını gösteren nokta dosyasını ve seyrek nokta verisine ait koordinatları sonuç verileri olarak sunmuştur.



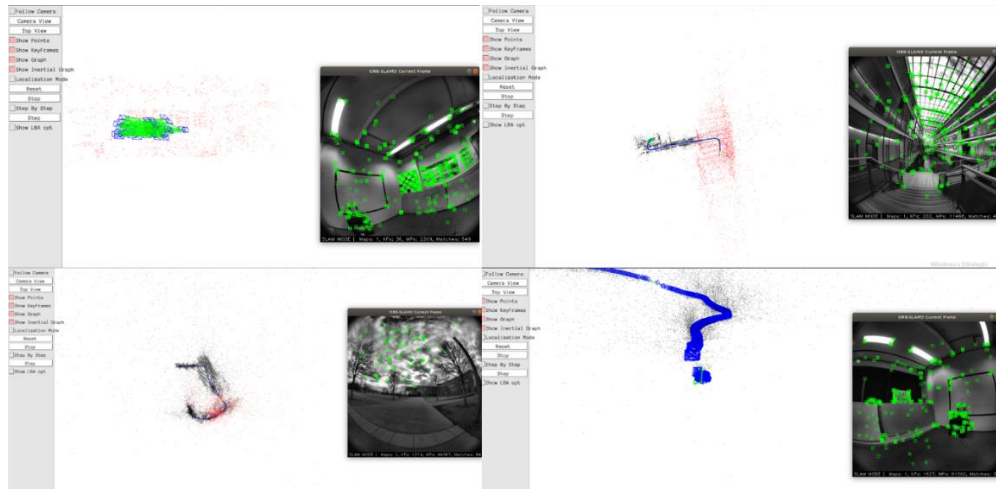
Şekil 4.31. ORB SLAM3 algoritmasının EuRoC MAV veri setiyle çalışma süreci

EuRoC MAV veri kümesi, kamera hareketlerinin yersel koşullarla ölçümünü gerçekleştirmiş bir nokta dosyasına sahiptir. Bu sayede kamera ayak izini test etmek mümkündür(Şekil 4.32).



Şekil 4.32. EuRoC MAV veri setinin kamera ayak izinin karşılaştırılması

ORB SLAM3 algoritmasında EuRoC MAV veri setinin başarılı bir şekilde çalıştırılmasının ardından algoritmaya TUMVI veri seti yüklenmiştir (Şekil 4.33.). Veri seti ilk olarak iç mekânda başlayıp ardından dış mekâna hareketlenmiştir. Kameranın çok hareketli olduğu ve veri setinde dinamik nesnelerin olduğu görülmektedir. Algoritma ilk süreçte konumlandırma sürecinde kamera ayak izini ve haritalama sürecinde çevrenin nokta verisini başarılı bir şekilde üretmiş olsa da döngü kapanmasının gerçekleştirmek için başlanılan noktaya gelindiğinde döngü kapanması başarılı bir şekilde gerçekleştirilememiş ve sonuç ürünler konumlandırma hatalı elde edilmiştir.



Şekil 4.33. ORB SLAM3 algoritmasının TUM VI veri setiyle çalışma süreci

#### 4.7 Tartışma

GNSS destekli sırt çantası LiDAR sisteminden elde edilen nokta bulutları, ülke koordinat sisteminde referanslandığı için diğer mobil LiDAR sistemlerine kıyasla önemli bir avantaj sağlar. Bu durum elde edilen verilerin daha doğru, tutarlı ve coğrafi olarak anlamlandırılabilir olmasını sağlamaktadır. Bu avantaj özellikle büyük ölçekli harita yapımı, coğrafi bilgi sistemleri, modelleme gibi çalışmalarda büyük fark yaratmaktadır(Lauterbach et al., 2015; M. Wang, 2022). Bunun nedeni GNSS alıcısı bulunmayan mobil LiDAR sistemi kullanılarak dış mekân taramalarından elde edilen nokta bulutlarının ülke koordinat sistemine dönüştürülmesi gerektiği durumlarda taramada tesis edilen YKN'ler dönüşüm noktası olarak kullanılmakta ve dengeleme sonrasında dönüşüm yapılmaktadır(Chung et al., 2017). GNSS destekli sırt çantası LiDAR sisteminden elde edilen veriler incelendiğinde sistemin başarılı bir şekilde çalıştığı görülmektedir. İç ve dış mekân çalışmalarında sistem bileşenleri ve SLAM algoritması başarılı bir şekilde çalışmış, konum ve harita bilgisi elde edilmiştir(Sobczak, Filus, Domański, & Domańska, 2021). BÖHHBÜY'de LiDAR sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen detay ölçümlerinde, yatay ve düşey yönde maksimum hata değerinin  $\pm 7$  cm olduğu belirtilmiştir. Sırt çantası LiDAR sistemi ile yapılan detay ölçümlerinde ise yatay yöndeki hata değerinin BÖHHBÜY tarafından belirlenen sınırdan kaldığı, düşey yöndeki hata değerinin ise bu sınırın altında kaldığı görülmüştür. Nokta bulutlarından elde edilecek detay ölçümleri büyük ölçekli harita üretilmesinde kullanılabileceği görülmektedir.

Nokta bulutlarının yersel ölçümlerle karşılaştırılmasıyla elde edilen hata değerlerinde SLAM algoritmasının etkisini doğrudan belirlemek mümkün değildir. SLAM algoritmasının hatadaki rolünü incelemek amacıyla taramalardaki genel döngü kapanması incelenmiştir. Genel döngü kapanması yapılan 22 taramada bulunan 100 YKN incelendiğinde, yatay yönde bütün YKN'lerin karesel ortalama hatanın altında kaldığı, düşey yönde ise 64 YKN'nin karesel ortalama hatanın altında kaldığı görülmektedir. Döngü kapanması, SLAM algoritmasının sistem konumunu ve çevrenin haritasını iteratif olarak güncellemesi sırasında zamanla biriken hata, gürültü ve diğer faktörler nedeniyle oluşabilecek tutarsızlıkların tespit edilip düzeltilmesini sağlamaktadır. Döngü kapanması SLAM algoritmasının doğruluğunu, haritalama ve konumlandırma ilişkisinin güvenilirliğini arttırmaktadır. GNSS alıcısı bulunan mobil LiDAR sistemleri dahil olmak üzere SLAM algoritmasıyla entegre çalışan sistemlerde sonuç ürün doğruluğunun

arttırılması için döngü kapanmasına dikkat edilmelidir(Rainer Kümmerle et al., 2009; Tian et al., 2023). GNSS destekli sırt çantası LiDAR sistemi iç mekânda kullanıldığında GNSS sistemi çalışmamakta ve konumlandırma süreci SLAM algoritması tarafından yürütülmektedir. İç mekân taramalarından elde edilen nokta bulutları incelendiğinde, sistem başarılı taramalar gerçekleştirmiş ve sonuç ürünlerde belirgin bir hata olmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle düşey yönde tarama için sisteme entegre edilen LiDAR sensöründen verimli sonuçlar alınmıştır(Şekil 4.34.). Tek sensörlü mobil LiDAR sistemlerinden elde edilen nokta bulutundaki zemin detaylarına göre daha çok zemin detayının tarandığı görülmektedir(P. Chen et al., 2021; Özdemir et al., 2022).



**Şekil 4.34.** Tuz madeni nokta bulutundaki zemin detayları

Farklı SLAM algoritmaları kullanılarak üretilen haritaların incelenmesi ve karşılaştırılması amacıyla LiDAR sensörü bulunan ve bulunmayan akıllı cep telefonlarıyla taramalar gerçekleştirilmiştir. LiDAR sensörü bulunmaya akıllı cep telefonundan elde edilen kamera ayak izi ve seyrek nokta bulutu incelendiğinde görüntü tabanlı SLAM varyantının başarılı bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Aynı tarama LiDAR sensörü destekli akıllı telefonla gerçekleştirildiğinde, kamera ayak izinin aynı olduğu elde edilen nokta bulutunun yoğunlaştığı görülmektedir. Elde edilen nokta bulutunda özellikle ofisin köşe kısımlarında boşluklar ve bozulmalar mevcuttur. Bu sensör boyutu, sistem hareket hızı ile doğrudan ilişkilidir. LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu kullanılarak gerçekleştirilen benzer iç mekân çalışmalarında benzer sonuçların elde edildiği, nokta bulutunun taramanın ortasından köşesine gidildikçe

hatanın arttığı görülmektedir. Hataların minimize edilmesi için telefon daha yavaş hareket ettirilmeli, ani poz değişimlerinden kaçınılmalı ve telefon bir tripot ya da bir telefon tutacağı yardımıyla kullanılmalıdır(Corradetti et al., 2022; Erol et al., 2023; Teo & Yang, 2023). Palazzo della Fraternita dei Laici sarayına ait taramalarda LiDAR sensörü destekli cep telefonunun mobil LiDAR sistemlerine göre zayıf kaldığı görülmektedir. LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonundan elde edilen nokta bulutu ile Mobil LiDAR sistemlerinden elde edilen nokta bulutları karşılaştırıldığında SLAM algoritmasının konumlandırma ve haritalama sürecini olumlu yürütmesine rağmen sensör boyutunun ve tarama genişliğinin yetersiz kalması nokta bulutunda ciddi boşluklar oluşturduğunu göstermektedir. LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonu, iç ve dış mekânlarda sade, basit ve az detaylı yapıların taramasında kullanıldığında daha etkili sonuçlar elde etmek mümkündür. (Aslan et al., 2022; Monsalve et al., 2023). SLAM yönteminin farklı varyantlarına ait algoritmaların test edilmesi, diğer alternatiflerinden biri olan bilgisayar ortamında SLAM algoritmasının test edilmesi süreci, zorlu ve karmaşık bir süreçtir. Bu sürecin en büyük zorluklarından biri, test edilmesi planlanan algoritmanın ana unsurlarının bilgisayara kurulması ve bu unsurların algoritmayla birleştirilmesi talimatlarının uygulanmasında karşılaşılan hataların karmaşık olmasıdır. ORB SLAM3 algoritması diğer algoritmalara göre daha basit kurulumu sahip olmasına rağmen birçok farklı problemle karşılaşmıştır(Jesus et al., 2021; Sharafutdinov et al., 2023). ORB SLAM3 algoritmasının kurulumunun başarıyla tamamlanmasının ardından algoritma çalıştırılmıştır. Uygulamada ilk olarak iç mekân veri seti çalıştırılmıştır. Kullanılan EuRoC MAV veri setini birçok görüntü tabanlı SLAM algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştırdığı farklı çalışmalarda belirtilmiştir(Jesus et al., 2021; Joans & Education, 2021; Mingachev et al., 2020; Sharafutdinov et al., 2023). ORBSLAM3 EuRoC MAV veri setini başarılı bir şekilde çalıştırmıştır. Sistem ayak izini ve seyrek nokta bulutunu sonuç ürün olarak sunmuştur. Sistem ayak izi , yersel koşullarla ölçülmüş değerleriyle karşılaştırıldığında neredeyse fark olmadığı görülmektedir. ORB SLAM3 algoritması TUM VI veri setiyle çalıştırıldığında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Algoritma iç mekânda konumlandırma ve haritalama işlemini başarıyla gerçekleştirmiştir ancak dış mekâna geçişten itibaren algoritma konumlandırma verisinde sapmalar yaşamıştır. ORB SLAM3 uygulamasının test edildiği diğer çalışmalarda da bu durum belirtilmiştir. Bunun veri setiyle de alakalı olduğu belirtilmektedir. Çünkü birçok SLAM algoritmasının ORB SLAM3 algoritmasının aksine bu veri setinin çalıştıramadığı belirtilmiştir(Sharafutdinov et al., 2023). ORB SLAM3 algoritması iki farklı veri setini de başarıyla işleyerek

sonuçlarını sunmuştur. Mobil LiDAR sistemlerinin kullanılmadığı ortamlarda ve arazi koşullarında, özellikle maden ocakları gibi zorlu arazi koşullarında ve acil durumlarda sadece görüntü verisi toplanarak ardından konumlandırma ve haritalama yapmak mümkündür. Bir diğer alternatifse ORB SLAM3 algoritmasının akıllı robotlara entegre ederek farklı arazi koşullarında otonom ya da yarı otonom olarak harita üretimi sağlanmaktadır. (Cadena et al., 2016; Thrun et al., 2004; X. Wang, Ma, & Li, 2023).



## 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

SLAM yöntemiyle çalışan sistemlerin fotogrametrik amaçlı kullanımı, geçmişe kıyasla önemli ölçüde artmıştır. Ancak, literatürdeki çalışmaların çoğu, sırt çantası veya el tipi LiDAR sistemleri ile LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonları ve tabletlerden elde edilen verileri çevresel etmenler ve sensör yetenekleri üzerinden değerlendirmektedir. SLAM algoritmalarının matematiksel ve algoritmik bileşenlerinin etkileri yeterince araştırılmamış, kullanıcı perspektifinden değerlendirilmemiş ve farklı sistemlerde kullanılarak elde edilen sonuçlara etki eden faktörler derinlemesine incelenmemiştir. Bu çalışmada, belirlenen problemlerin çözümüne yönelik olarak, iç ve dış ortamlarda gerçek arazi koşullarında SLAM algoritması bulunan sistemlerle gerçekleştirilen fotogrametrik ölçüm ve taramalarda karşılaşılabilecek olumsuzlukları tespit etmek ve elde edilen sonuç ürünlerinin doğruluğunu etkileyen faktörleri araştırmak amacıyla kapsamlı araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada sonuç ürünlerin incelenmesi için yapılan iş tasarımı, 3B grafik tabanlı SLAM varyantına ait algoritmalarla çalışan sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri değerlendirilmiştir. GNSS destekli sırt çantası LiDAR sistemlerinin dış mekân çalışmalarında diğer sistemlere göre büyük avantajlar sağladığı görülmektedir. Bu sistemlerden elde edilen sonuç ürünlerinin ülke koordinat sistemine referanslandırılmasını sağlayarak iş gücünün azalmasına ve zamansal tasarrufa olanak tanımıştır. GNSS destekli LiDAR sistemlerinden elde edilen sonuç ürünlerin doğruluğu GNSS sistemiyle ilişkili olsa da SLAM yönteminin doğruluğuna etki eden genel döngü kapanmasının da sonuç ürün doğruluğunda önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Üç farklı el tipi LiDAR sistemi karşılaştırıldığında, nokta yoğunluklarından bağımsız olarak geometrik doğruluklarının birbirine yakın olduğu, ancak görsel olarak farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun, SLAM yönteminden bağımsız olarak, kullanılan kamera sensörlerinin özellikleri ve nokta bulutu renklendirme algoritmalarının farklılıklarından kaynaklandığı görülmüştür. Bu bulgu özellikle görsel kalite ve renk doğruluğunun dikkate alınması gereken çalışmalarda, LiDAR sistemlerinin performansını değerlendirirken bu faktörlerin önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

3B grafik tabanlı SLAM varyantı ve mobil LiDAR sistemlerinin test edilmesinin ardından görüntü tabanlı SLAM varyantının kullanılabilirliği ve sonuç ürün

doğruluğunun araştırılması amacıyla LiDAR sensörü destekli akıllı cep telefonuna görsel SLAM varyantı algoritması altyapılı uygulama yüklenmiştir. Akıllı cep telefonuyla ilk olarak küçük bir yapı taranmış ve elde edilen sonuç ürünün bağıl hatası incelenmiştir. On detaylı ölçümünden elde edilen ortalama bağıl hatanın 1.45 cm olduğu görülmektedir. Bu sonuç akıllı cep telefonlarının küçük yapıların ve küçük tarama çalışmalarında kullanılmasının mümkün olduğu göstermiştir. Literatür taramasında benzer çalışmalarda aynı sonuca varıldığı vurgulanmıştır. Görüntü tabanlı SLAM varyantı ile 3B grafik tabanlı SLAM varyantının karşılaştırılması amacıyla Palazzo della Fraternita dei Laici sarayı iki farklı sistemle taranmıştır. Sonuç ürünlerinin nokta yoğunluğundan bağımsız olarak yapılan doğruluk karşılaştırmasında ciddi farklar tespit edilmiştir. Akıllı cep telefonlarının küçük yapıları taramada önemli avantajlar sağladığı gözlemlenirken, büyük yapılar için ise nokta yoğunluğu ve geometrik doğruluk açısından zayıf kaldığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu araştırma SLAM yöntemiyle çalışan sistemlerin fotogrametrik amaçlı kullanımında karşılaşılan eksiklikleri ve potansiyel iyileştirme alanlarını ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. Yapılan araştırmalar, sırt çantası ve el tipi LiDAR sistemleri ile akıllı cep telefonları gibi çeşitli donanım ve SLAM algoritmalarının performansını derinlemesine değerlendirerek, elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen faktörleri açığa çıkarmıştır. Bu bulgular, SLAM teknolojisinin fotogrametri alanında kullanımının etkinliğini artırmak için gelecekteki araştırmalara ışık tutacak önemli bir katkı sağlamaktadır.

## 5.2 Öneriler

SLAM yönteminin harita mühendisliği ve fotogrametri alanındaki uygulamalarının etkinliğini artırmak amacıyla çeşitli öneriler sunulmaktadır. Mevcut SLAM yöntemi algoritmalarının çeşitliliği yeterli gözükse de özellikle dinamik ortamlarda daha yüksek doğruluk ve hassasiyet sağlayabilecek yeni algoritmaların geliştirilmesi ve test edilmesi önem arz etmektedir. Gelecekteki çalışmalar, bu algoritmaların farklı çalışma koşullarında ve sensör tiplerinde performanslarını değerlendirerek optimizasyonunu sağlamalıdır.

Akıllı cep telefonlarına entegre SLAM algoritmalarının harita mühendisliğinde etkinliğini artırmak amacıyla akıllı cep telefonlarının daha geniş ve karmaşık projelerde test edilmesi gerekmektedir. Akıllı telefonların taşınabilirliği ve kullanım kolaylığı, iç

mekanlarda küçük ölçekli ve detaylı tarama gerektirmeyen projelerde büyük avantajlar sağlamaktadır. İç mekân çalışmalarında elde edilen avantajların dış mekânda da devamının sağlanması amacıyla akıllı cep telefonlarının daha hassas sensörlerle donatılması ve veri işleme kapasitelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, akıllı cep telefonlarının farklı ışık ve çevre koşullarında yüksek doğrulukla çalışabilmesi için algoritmaların optimize edilmesi ve cihazların kalibrasyon süreçlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- Ahmed, M. F., Masood, K., Fremont, V., & Fantoni, I. (2023). Active SLAM: A Review on Last Decade. *Sensors*, 23(19). doi:10.3390/s23198097
- Akpınar, B., Çakmak, Z. B., & Selbesoğlu, M. O. (2022). Taşınabilir Lazer Tarama Sistemleri ile Farklı Alanlarda Doğruluk Analizi. [Accuracy Assessment of Mobile Lidar System in Different Environments]. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(5), 1075-1086. doi:10.35414/akufemubid.1139569
- Albrecht, S. J. C. U. O. (2009). An analysis of visual mono-slam. 1-4.
- Aslan, İ., KALAYCI, E., & Tektaş, Y. J. T. F. D. (2022). Farklı veri kaynaklarından üretilen 3B modellerin kıyaslanması; Diyarbakır Ulu camii Musalla taşı ve Güneş saati örneği. 4(2), 52-57.
- Balcı, D. (2022). Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Lazer Tarayıcıların Kullanılması. [The Use of Laser Scanners in Documenting Cultural History]. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(1), 27-36. doi:10.51946/melid.1129846
- Biström, B. (2019). Comparative analysis of properties of LiDAR-based point clouds versus camera-based point clouds for 3D reconstruction using SLAM algorithms.
- Burghoffer, A., Seyssaud, J., & Magnier, B. (2023, 17-19 Oct. 2023). *OV2SLAM on EuRoC MAV Datasets: a Study of Corner Detector Performance*. Paper presented at the 2023 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST).
- Burri, M., Nikolic, J., Gohl, P., Schneider, T., Rehder, J., Omari, S., . . . Siegwart, R. (2016). The EuRoC micro aerial vehicle datasets. *The International Journal of Robotics Research*, 35(10), 1157-1163. doi:10.1177/0278364915620033
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., . . . Leonard, J. J. I. T. o. r. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. 32(6), 1309-1332.
- Campos, C., Elvira, R., Rodríguez, J. J. G., Montiel, J. M. M., & Tardós, J. D. (2021). ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 1874-1890. doi:10.1109/TRO.2021.3075644
- Campos, C., Montiel, J. M. M., & Tardós, J. D. (2020, 31 May-31 Aug. 2020). *Inertial-Only Optimization for Visual-Inertial Initialization*. Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- Castro, G., Nitsche, M. A., Pire, T., Fischer, T., & De Cristóforis, P. (2019). Efficient on-board Stereo SLAM through constrained-covisibility strategies. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 192-205. doi:<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.015>
- Chen, P., Shi, W., Bao, S., Wang, M., Fan, W., & Xiang, H. (2021). Low-Drift Odometry, Mapping and Ground Segmentation Using a Backpack LiDAR System. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 7285-7292. doi:10.1109/LRA.2021.3097060
- Chen, S. W., Nardari, G. V., Lee, E. S., Qu, C., Liu, X., Romero, R. A. F., & Kumar, V. (2020). SLOAM: Semantic Lidar Odometry and Mapping for Forest Inventory. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 612-619. doi:10.1109/LRA.2019.2963823
- Chung, M., Kim, C., Choi, K., Chung, D., Kim, Y. J. J. o. t. K. S. o. S., Geodesy, Photogrammetry, & Cartography. (2017). Development of LiDAR simulator for backpack-mounted mobile indoor mapping system. 35(2), 91-102.

- Corradetti, A., Seers, T., Mercuri, M., Calligaris, C., Buseti, A., & Zini, L. (2022). Benchmarking Different SfM-MVS Photogrammetric and iOS LiDAR Acquisition Methods for the Digital Preservation of a Short-Lived Excavation: A Case Study from an Area of Sinkhole Related Subsidence. *Remote Sensing*, 14(20). doi:10.3390/rs14205187
- Csorba, M. (1997). *Simultaneous localisation and map building*. Citeseer,
- Csurka, G., Dance, C., Fan, L., Willamowski, J., & Bray, C. (2004). *Visual categorization with bags of keypoints*. Paper presented at the Workshop on statistical learning in computer vision, ECCV.
- Davison, A. J., Reid, I. D., Molton, N. D., & Stasse, O. (2007). MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(6), 1052-1067. doi:10.1109/TPAMI.2007.1049
- Del Duca, G., & Machado, C. (2023). Assessing the Quality of the Leica BLK2GO Mobile Laser Scanner versus the Focus 3D S120 Static Terrestrial Laser Scanner for a Preliminary Study of Garden Digital Surveying. *Heritage*, 6(2), 1007-1027. doi:10.3390/heritage6020057
- Diaz, V., van Oosterom, P., Meijers, M., Verbree, E., Ahmed, N., & van Lankveld, T. (2023). *Comparison of Cloud-to-Cloud Distance Calculation Methods-Is the Most Complex Always the Most Suitable?* Paper presented at the International 3D GeoInfo Conference.
- Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), 99-110. doi:10.1109/MRA.2006.1638022
- Erol, S., Kuçak, R. A., & Alkan, R. M. (2023). iPad Pro LiDAR sensörünün profesyonel bir yersel lazer tarayıcı ile karşılaştırmalı performans analizi. *Geomatik*, 8(1), 35-41. doi:10.29128/geomatik.1105048
- Eyvazpour, R., Shoaran, M., & Karimian, G. (2023). Hardware implementation of SLAM algorithms: a survey on implementation approaches and platforms. *Artificial Intelligence Review*, 56(7), 6187-6239. doi:10.1007/s10462-022-10310-5
- Frese, U. (2006). A Discussion of Simultaneous Localization and Mapping. *Autonomous Robots*, 20(1), 25-42. doi:10.1007/s10514-006-5735-x
- Frese, U., Wagner, R., & Röfer, T. (2010). A SLAM Overview from a User's Perspective. *KI - Künstliche Intelligenz*, 24(3), 191-198. doi:10.1007/s13218-010-0040-4
- Gaspar, A. R., Nunes, A., Pinto, A. M., & Matos, A. (2018). Urban@CRAS dataset: Benchmarking of visual odometry and SLAM techniques. *Robotics and Autonomous Systems*, 109, 59-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.08.004>
- Guivant, J. E., & Nebot, E. M. (2001). Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3), 242-257. doi:10.1109/70.938382
- Henrique, V. B., & Uberti, M. S. (2024). Characterization of parcels by remote sensing techniques. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 42(2), 278-293. doi:10.1108/IJBPA-10-2021-0133
- Hou, J., Hübner, P., Schmidt, J., & Iwaszczuk, D. (2024). Indoor Mapping with Entertainment Devices: Evaluating the Impact of Different Mapping Strategies for Microsoft HoloLens 2 and Apple iPhone 14 Pro. *Sensors*, 24(4). doi:10.3390/s24041062
- Hu, G., Huang, S., & Dissanayake, G. (2010, 18-22 Oct. 2010). *Evaluation of Pose Only SLAM*. Paper presented at the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

- Inal, C., Bulbul, S., & Bilgen, B. (2018). Statistical analysis of accuracy and precision of GNSS receivers used in network RTK. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(10), 227. doi:10.1007/s12517-018-3581-8
- Iwaszczuk, D., Koppányi, Z., Pfrang, J., Toth, C. J. T. I. A. o. t. P., Remote Sensing, & Sciences, S. I. (2019). Evaluation of a mobile multi-sensor system for seamless outdoor and indoor mapping. 42, 31-35.
- Jafari, B., Khaloo, A., & Lattanzi, D. J. J. o. N. E. (2017). Deformation tracking in 3D point clouds via statistical sampling of direct cloud-to-cloud distances. 36, 1-10.
- Javaheri, A., Brites, C., Pereira, F., & Ascenso, J. (2020, 26-28 May 2020). *A Generalized Hausdorff Distance Based Quality Metric for Point Cloud Geometry*. Paper presented at the 2020 Twelfth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX).
- Jeong, J., Cho, Y., Shin, Y.-S., Roh, H., & Kim, A. (2019). Complex urban dataset with multi-level sensors from highly diverse urban environments. *The International Journal of Robotics Research*, 38(6), 642-657. doi:10.1177/0278364919843996
- Jesus, K. J. d., Kobs, H. J., Cukla, A. R., Cuadros, M. A. d. S. L., & Gamarra, D. F. T. (2021, 11-15 Oct. 2021). *Comparison of Visual SLAM Algorithms ORB-SLAM2, RTAB-Map and SPTAM in Internal and External Environments with ROS*. Paper presented at the 2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE).
- Joans, S. M. J. T. J. o. C., & Education, M. (2021). Analysis of Various Visual SLAM Algorithms. 12(13), 2436-2445.
- Kara Aydın, S. (2022). *Fotogrametrik Yöntemlerin Kadastral Çalışmalarda Kullanımı ve 3 Boyutlu Kadastro*. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Karam, S., Vosselman, G., Peter, M., Hosseinyalamdary, S., & Lehtola, V. (2019). Design, Calibration, and Evaluation of a Backpack Indoor Mobile Mapping System. *Remote Sensing*, 11(8). doi:10.3390/rs11080905
- Kılıç, S. J. J. o. M. D. (2015). Güven Aralığı. 5(2).
- King, F., Kelly, R., & Fletcher, C. G. (2023). New opportunities for low-cost LiDAR-derived snow depth estimates from a consumer drone-mounted smartphone. *Cold Regions Science and Technology*, 207, 103757. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103757>
- Klein, G., & Murray, D. (2007, 13-16 Nov. 2007). *Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces*. Paper presented at the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality.
- Kümmerle, R., Grisetti, G., Strasdat, H., Konolige, K., & Burgard, W. (2011, 9-13 May 2011). *G2o: A general framework for graph optimization*. Paper presented at the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Kümmerle, R., Steder, B., Dornhege, C., Ruhnke, M., Grisetti, G., Stachniss, C., & Kleiner, A. (2009). On measuring the accuracy of SLAM algorithms. *Autonomous Robots*, 27(4), 387-407. doi:10.1007/s10514-009-9155-6
- Lauterbach, H. A., Borrmann, D., Heß, R., Eck, D., Schilling, K., & Nüchter, A. (2015). Evaluation of a Backpack-Mounted 3D Mobile Scanning System. *Remote Sensing*, 7(10), 13753-13781. doi:10.3390/rs71013753
- Li, L., Kong, X., Zhao, X., Li, W., Wen, F., Zhang, H., & Liu, Y. (2021, 30 May-5 June 2021). *SA-LOAM: Semantic-aided LiDAR SLAM with Loop Closure*. Paper presented at the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).

- Liu, J., Liu, X., Lv, X., Wang, B., & Lian, X. (2022). Novel Method for Monitoring Mining Subsidence Featuring Co-Registration of UAV LiDAR Data and Photogrammetry. *Applied Sciences*, 12(18). doi:10.3390/app12189374
- Lluvia, I., Lazkano, E., & Ansuategi, A. (2021). Active Mapping and Robot Exploration: A Survey. *Sensors*, 21(7). doi:10.3390/s21072445
- Lu, F., & Milios, E. (1997). Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping. *Autonomous Robots*, 4(4), 333-349. doi:10.1023/A:1008854305733
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. J. S. r. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an application in geosciences. 11(1), 1-9.
- Macario Barros, A., Michel, M., Moline, Y., Corre, G., & Carrel, F. (2022). A Comprehensive Survey of Visual SLAM Algorithms. *Robotics*, 11(1). doi:10.3390/robotics11010024
- Makineci, H. B. (2020). İnsansız hava aracı ile fotogrametrik temelli görüntü alımı ve uçuş optimizasyonu.
- Makineci, H. B., & Erdal, K. (2021). Documentation of Cultural Heritage with Backpack LiDAR Usage on Photogrammetric Purpose. [Sırt Lidarının Fotogrametrik Amaçlı Kullanımıyla Kültürel Mirasın Dokümantasyonu]. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(1), 1-6. doi:10.51946/melid.921032
- Makineci, H. B., & Erdal, K. (2023). Adaptation analysis of produced 3D models from UAV-SLAM and UAV-TLS data combinations. *Mersin Photogrammetry Journal*, 5(1), 18-23. doi:10.53093/mephoj.1269630
- Makineci, H. B., Karabörk, H., & Durdu, A. (2020). The Performance Evaluation of Image Matching Techniques within UAV Images. *Turkish Journal of Geosciences*, 1(1), 8-14.
- Makineci, H. B. J. G. (2016). İnsansız Hava Araçları Lidar Etkileşimi. 1(1), 19-23.
- Mingachev, E., Lavrenov, R., Magid, E., & Svinin, M. (2020). *Comparative analysis of monocular SLAM algorithms using TUM and EuRoC benchmarks*. Paper presented at the Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings" ER (ZR) 2020, Ufa, Russia, 15–18 April 2020.
- Monsalve, A., Yager, E. M., & Tonina, D. J. J. o. E. (2023). Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. 1-11.
- Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M., & Tardós, J. D. (2015). ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5), 1147-1163. doi:10.1109/TRO.2015.2463671
- Mur-Artal, R., & Tardós, J. D. (2017a). ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), 1255-1262. doi:10.1109/TRO.2017.2705103
- Mur-Artal, R., & Tardós, J. D. (2017b). Visual-Inertial Monocular SLAM With Map Reuse. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2), 796-803. doi:10.1109/LRA.2017.2653359
- Nimawat, J. (2023). *Automatic Point Cloud Registration Using Visual Slam and Iterative Closest Point Algorithms*: North Carolina State University.
- Nissler, C., B×üttner, S., Marton, Z. C., Beckmann, L., & Thomasy, U. (2016, 6-9 Sept. 2016). *Evaluation and improvement of global pose estimation with multiple AprilTags for industrial manipulators*. Paper presented at the 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).

- Norzam, W. A. S., Hawari, H. F., & Kamarudin, K. (2019). Analysis of Mobile Robot Indoor Mapping using GMapping Based SLAM with Different Parameter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 705(1), 012037. doi:10.1088/1757-899X/705/1/012037
- Nüchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., & Surmann, H. J. J. o. F. R. (2007). 6D SLAM—3D mapping outdoor environments. 24(8-9), 699-722.
- Oelsch, M. (2023). *3D LiDAR Odometry and Mapping Leveraging Prior Knowledge*. Technische Universität München,
- Özdemir, E., Erdal, K., Veziroğlu, F., & Ateş, S. S. (2022). Tuz Mağaralarında Sırt Çantası LiDAR Sisteminin 3B Model Üretiminde Kullanılması; Tuzluca, Iğdır Örneği. [The Use of the Backpack LiDAR System in the Genarate of 3D Models in Salt Caves; The Example of Tuzluca, Iğdir]. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 4(1), 36-42. doi:10.51489/tuzal.1112140
- Pascoe, G., Maddern, W., Tanner, M., Piniés, P., & Newman, P. (2017). *Nid-slam: Robust monocular slam using normalised information distance*. Paper presented at the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
- Placed, J. A., Strader, J., Carrillo, H., Atanasov, N., Indelman, V., Carlone, L., & Castellanos, J. A. (2023). A Survey on Active Simultaneous Localization and Mapping: State of the Art and New Frontiers. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3), 1686-1705. doi:10.1109/TRO.2023.3248510
- Qin, T., Li, P., & Shen, S. (2018). VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(4), 1004-1020. doi:10.1109/TRO.2018.2853729
- Ribas, D., Ridao, P., & Neira, J. (2010). *Underwater SLAM for structured environments using an imaging sonar* (Vol. 65): Springer.
- Rutkowski, W., & Lipecki, T. (2023). Use of the iPhone 13 Pro LiDAR Scanner for Inspection and Measurement in the Mineshaft Sinking Process. *Remote Sensing*, 15(21). doi:10.3390/rs15215089
- Salas-Moreno, R. F., Newcombe, R. A., Strasdat, H., Kelly, P. H. J., & Davison, A. J. (2013, 23-28 June 2013). *SLAM++: Simultaneous Localisation and Mapping at the Level of Objects*. Paper presented at the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Sammartano, G., & Spanò, A. J. A. G. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. 10(4), 317-339.
- Schubert, D., Goll, T., Demmel, N., Usenko, V., Stückler, J., & Cremers, D. (2018, 1-5 Oct. 2018). *The TUM VI Benchmark for Evaluating Visual-Inertial Odometry*. Paper presented at the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability*, 13(6). doi:10.3390/su13063386
- Sharafutdinov, D., Griguletskii, M., Kopanov, P., Kurenkov, M., Ferrer, G., Burkov, A., . . . Tsetserukou, D. (2023). Comparison of modern open-source Visual SLAM approaches. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(3), 43. doi:10.1007/s10846-023-01812-7
- Sobczak, Ł., Filus, K., Domański, A., & Domańska, J. (2021). LiDAR Point Cloud Generation for SLAM Algorithm Evaluation. *Sensors*, 21(10). doi:10.3390/s21103313

- Strasdat, H., Montiel, J. M. M., & Davison, A. J. (2010, 3-7 May 2010). *Real-time monocular SLAM: Why filter?* Paper presented at the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Sualeh, M., & Kim, G.-W. (2019). Simultaneous Localization and Mapping in the Epoch of Semantics: A Survey. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 17(3), 729-742. doi:10.1007/s12555-018-0130-x
- Sumikura, S., Shibuya, M., & Sakurada, K. (2019). *OpenVSLAM: A versatile visual SLAM framework*. Paper presented at the Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia.
- Şenol, H. İ., Yiğit, A. Y., Yunus, K., & Ali, U. J. T. F. D. (2021). İHA ve yersel fotogrametrik veri füzyonu ile kültürel mirasın 3 boyutlu (3B) modelleme uygulaması: Kanlıdivane Örneği. 3(1), 29-36.
- Tanduo, B., Teppati Losè, L., & Chiabrando, F. (2023). DOCUMENTATION OF COMPLEX ENVIRONMENTS IN CULTURAL HERITAGE SITES. A SLAM-BASED SURVEY IN THE CASTELLO DEL VALENTINO BASEMENT. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1/W1-2023, 489-496. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-489-2023
- Tateno, K., Tombari, F., Laina, I., & Navab, N. (2017). *Cnn-slam: Real-time dense monocular slam with learned depth prediction*. Paper presented at the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
- Tavani, S., Billi, A., Corradetti, A., Mercuri, M., Bosman, A., Cuffaro, M., . . . Carminati, E. (2022). Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones. *Earth-Science Reviews*, 227, 103969. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103969>
- Teo, T.-A., & Yang, C.-C. (2023). Evaluating the accuracy and quality of an iPad Pro's built-in lidar for 3D indoor mapping. *Developments in the Built Environment*, 14, 100169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100169>
- Thrun, S., Thayer, S., Whittaker, W., Baker, C., Burgard, W., Ferguson, D., . . . Whittaker, W. (2004). Autonomous exploration and mapping of abandoned mines. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(4), 79-91. doi:10.1109/MRA.2004.1371614
- Tian, Y., Liu, F., Liu, H., Liu, Y., Suwoyo, H., Jin, T., . . . Wang, J. (2023). A Real-Time and Fast LiDAR-IMU-GNSS SLAM System with Point Cloud Semantic Graph Descriptor Loop-Closure Detection. *Advanced Intelligent Systems*, 5(10), 2300138. doi:<https://doi.org/10.1002/aisy.202300138>
- Valencia, R., & Andrade-Cetto, J. (2018). *Mapping, planning and exploration with Pose SLAM* (Vol. 74): Springer.
- Wang, M. (2022). Hybrid panoramic visual SLAM and point cloud color mapping.
- Wang, X., Ma, X., & Li, Z. (2023). Research on SLAM and Path Planning Method of Inspection Robot in Complex Scenarios. *Electronics*, 12(10). doi:10.3390/electronics12102178
- Yang, S., Song, Y., Kaess, M., & Scherer, S. (2016, 9-14 Oct. 2016). *Pop-up SLAM: Semantic monocular plane SLAM for low-texture environments*. Paper presented at the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Younes, G., Asmar, D., Shammass, E., & Zelek, J. (2017). Keyframe-based monocular SLAM: design, survey, and future directions. *Robotics and Autonomous Systems*, 98, 67-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.09.010>
- Zhang, J., & Singh, S. (2014). *LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time*. Paper presented at the Robotics: Science and systems.

- Zhang, Z., Li, J., Li, X., Lin, Y., Zhang, S., Wang, C. J. T. I. A. o. t. P., Remote Sensing, & Sciences, S. I. (2016). A fast method for measuring the similarity between 3d model and 3d point cloud. *41*, 725-728.
- Zhao, X., Wen, C., Prakhya, S. M., Yin, H., Zhou, R., Sun, Y., . . . Measurement. (2024). Multi-Modal Features and Accurate Place Recognition with Robust Optimization for Lidar-Visual-Inertial SLAM.

