

e-ISSN
2717-6797

TÜRKİYE

LiDAR DERGİSİ

Turkish Journal of LiDAR



Cilt/Vol: 6
Sayı/ Issue: 1
Haziran/June, 2024



Türkiye LiDAR Dergisi



Dergi Hakkında

Türkiye LiDAR Dergisi; LiDAR teknolojisini geliştirme, kullanım ve yer bilimleri ile ilgili çalışmaları yayınlayan ve Uluslararası Dizinler ve Veritabanlarında taranan hakemli bir dergidir. Dergi, LiDAR Sistemleri ve LiDAR Otonom Sistemleri vb. konular ve ayrıca LiDAR'ın tasarım ve uygulamalarına odaklanır.

Amaç & Kapsam

Türkiye LiDAR Dergisi,

- ✦ Yersel, hava ve mobil LiDAR kullanım alanında ulusal ve uluslararası gelişmeleri; Harita, Jeoloji, Çevre, Maden, Şehir Plancılığı, Ziraat vb. mühendislik alanı, Arkeoloji ve mimarlık ile ilgilenen bilim insanlarının bilgisine sunmak,
- ✦ Aşağıdaki konularla doğrudan veya dolaylı faaliyetlerde bulunan bilim adamları, araştırmacılar, mühendisler ve diğer uygulayıcılar arasında bilgi ve deneyim paylaşımını güçlendirecek ve hızlandıracak kolay erişilebilir ve geniş kapsamlı bir tartışma ortamı sağlamak.
- ✦ Dünyada ve Türkiye'de teknolojik ve ekonomik kalkınmada rol oynayabilecek mesleki gelişmelerle ilgili sorunların çözümünde büyük önem taşıyan LiDAR teknolojisi ile kurumlar arası işbirliğinin başlatılmasına ve geliştirilmesine katkıda bulunmak.

Türkiye LiDAR Dergisinin kapsamı;

- ✓ Temel LiDAR Uygulamaları,
- ✓ LiDAR Platformları
- ✓ Yersel LiDAR Uygulamaları
- ✓ El Tipi LiDAR Uygulamaları
- ✓ Mobil LiDAR Uygulamaları
- ✓ Giyilebilir LiDAR Uygulamaları
- ✓ Hava LiDAR Uygulamaları
- ✓ İHA LiDAR Uygulamaları
- ✓ LiDAR Otonom Sistemleri
- ✓ LiDAR ile Arttırılmış Gerçeklik ve sanal gerçeklik (VR) uygulamaları,
- ✓ LiDAR verileri ile Coğrafi Bilgi Sistemleri entegrasyonu,
- ✓ LiDAR ile Belgeleme Çalışmaları
- ✓ LiDAR ile Endüstriyel ölçmeler,
- ✓ LiDAR ile Deformasyon ve Heyelan Ölçmeleri,
- ✓ LiDAR ile Madencilik Ölçmeleri,
- ✓ LiDAR ile Şehircilik ve Ulaşım Planları Çalışmaları,
- ✓ LiDAR ile Tarım Uygulamaları,
- ✓ LiDAR ile Hidrografik Uygulamaları,
- ✓ LiDAR ile 3D modelleme
- ✓ LiDAR ile açılan tüm multidisipliner çalışmalar,

Yayınlanma Sıklığı

Yılda 2 sayı (Haziran-Aralık)

ISSN

2717-6797

WEB

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/melid>

İletişim

lidar@mersin.edu.tr / ayasinyigit@mersin.edu.tr /



Turkish Journal of LiDAR

About Journal

The Journal of LiDAR is a peer-reviewed journal that publishes studies on LiDAR technology development, use, and earth sciences and is scanned in International Indexes and Databases. The journal, LiDAR Systems, and LiDAR Autonom Systems, etc. focuses on the design and applications of LiDAR, including.

Aim & Scope

Turkish Journal of LIDAR,

- ✚ To present international developments in the use of terrestrial, wearable, UAV, air, and mobile LIDAR to the information of scientists interested in the fields of Map, Geology, Environment, Mining, Urban Planning, Agriculture, archeology, and architecture.
- ✚ To provide an easily accessible and wide-ranging discussion environment that will strengthen and accelerate the sharing of knowledge and experience between scientists, researchers, engineers, and other practitioners who are involved in direct or indirect activities with the following topics.
- ✚ To contribute to the initiation and development of inter-institutional cooperation with LiDAR technology, which is of great importance in solving problems related to professional developments that can play a role in technological and economic development in the world and in Turkey.

The scope of Turkish Journal of LIDAR;

- ✓ Basic LIDAR Applications,
- ✓ LiDAR Platforms
- ✓ Terrestrial LiDAR Applications
- ✓ Hand-Held LiDAR Applications
- ✓ Mobile LiDAR Applications
- ✓ Wearable LiDAR Applications
- ✓ Air LiDAR Applications
- ✓ UAV LiDAR Applications
- ✓ LiDAR Autonomous Systems
- ✓ Augmented Reality and virtual reality (VR) applications with LiDAR,
- ✓ Geographical Information Systems integration with LiDAR data,
- ✓ Documentation Studies with LiDAR
- ✓ Industrial measurements with LiDAR,
- ✓ Deformation and Landslide Measurements with LiDAR,
- ✓ Mining Measurements with LiDAR,
- ✓ Urbanism and Transportation Planning Studies with LiDAR,
- ✓ Agricultural Applications with LiDAR,
- ✓ Hydrographic Applications with LiDAR,
- ✓ 3D modeling with LiDAR
- ✓ All multidisciplinary studies conducted with LiDAR,

Publication frequency

Biannual (June-December)

ISSN

2717-6797

WEB

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/melid>

Contact

lidar@mersin.edu.tr / ayasinyigit@mersin.edu.tr /



Türkiye LiDAR Dergisi
Turkish Journal of LiDAR

EDİTÖR / EDITOR

Abdurahman Yasin Yiğit

Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, Mersin, Türkiye

EDİTÖR KURULU / EDITORIAL BOARD

- **Prof. Dr. Hacı Murat YILMAZ**, Aksaray University
hmuraty@gmail.com,
- **Prof. Dr. Khalil Valizadeh KAMRAN**, University of Tabriz, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Department of Remote Sensing and GIS, Tabriz, Iran
valizadeh@tabrizu.ac.i
- **Assoc. Prof. Dr. Murat UYSAL**, Afyon Kocatepe University
muysal@aku.edu.tr,
- **Assist. Prof. Dr. Bilgehan KEKEÇ**, Konya Technical University
kekec@ktu.edu.tr,
- **Dr. Hayri ULVİ**, Gazi University
hayriulvi@gmail.com,
- **Dr. Alper AKAR**, Erzincan Binali Yıldırım University,
alperakar@erzincan.edu.tr,
- **Dr. Özlem AKAR**, Erzincan Binali Yıldırım University
oakar@erzincan.edu.tr,
- **Dr. Mehmet Ali DERELİ**, Giresun University
madereli@gmail.com
Giresun University
- **Dr. Mustafa Zeybek**, Selçuk University
mzeybek@selcuk.edu.tr
- **Dr. Atta-ur RAHMAN**, Department of Geography and Geomatics,
University of Peshawar-Pakistan
atta-urrehman@uop.edu.pk

DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

- **Prof. Dr. Murat YAKAR**, Mersin University
myakar@mersin.edu.tr,
- **Prof. Dr. İbrahim YILMAZ**,
iyilmaz@aku.edu.tr,
Afyon Kocatepe University
- **Dr. Resul ÇÖMERT**,
rcomert@gumushane.edu.tr,
Gümüşhane University

LiDAR Dergisi Dil Editörleri / LiDAR Journal Language Editors

Res. Asst. Halil İbrahim ŞENOL, Harran University
hse nol@harran.edu.tr

İçindekiler

Contents

Araştırma Makaleleri;

Research Articles**;

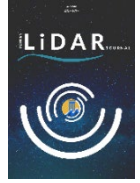
Sayfa/Page No	Makale Adı ve Yazar Adı Article Name and Author Name
01-09**	<i>Akıllı Telefon iPhone LiDAR Tarayıcısının Altyapı Çalışmalarında Uygulanabilirliği</i> <i>Applicability of Smartphone Iphone Lidar Scanner in Infrastructure Studies</i> Mustafa Zeybek
10-29**	<i>Kültürel Mirasların Korunmasına Yönelik LiDAR ve İHA Fotogrametrisi Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı</i> <i>Using LiDAR and UAV Photogrammetry Methods for Cultural Heritage Preservation</i> Davut Balcı & Ali Ulvi
30-35**	<i>Yersel Lazer Tarama ile Tarihi Yapının Modellenmesi: Hamidiye Saatli Çeşme Örneği</i> <i>Modeling of Historical Building with Local Laser Scanning: Hamidiye Clock Fountain Example</i> Nisanur Aydoğan & Efsa Yiğit
36-43**	<i>Kentsel Alanlarda Kadastro Haritaları için Mobil LiDAR Yönteminin Kullanılması</i> <i>Using Mobile LiDAR Method for Cadastral Maps in Urban Areas</i> Burak Can Kaya & Muhammed Emin Bıyık



Türkiye LiDAR Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/melid>

e-ISSN 2717-6797



Akıllı Telefon iPhone LiDAR Tarayıcısının Altyapı Çalışmalarında Uygulanabilirliği

Mustafa Zeybek ^{1*}

^{1*} Selçuk Üniversitesi, Güneysınır Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 42490, Konya, Türkiye;
(mzeybek@selcuk.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
mzeybek@selcuk.edu.tr

Araştırma Makalesi

Alıntı: Zeybek, M. (2024). Akıllı Telefon iPhone LiDAR Tarayıcısının Altyapı Çalışmalarında Uygulanabilirliği. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 6(1), 01-09.

Geliş : 10.12.2023
Revize 1 : 13.03.2024
Revize 2 : 19.04.2024
Kabul : 06.05.2024
Yayınlama : 30.06.2024

Özet

Son zamanlarda ışık algılama ve mesafe ölçme (LiDAR) sensörlerinin akıllı telefonlara entegre edilmesi, fotoğraf odak uzaklığının iyi ayarlanması yanı sıra üç boyutlu (3B) iç ve dış mekân haritalama için yepyeni bir alternatif ölçme aracı olarak yerini almıştır. Bu yeni sistem sayesinde tarama teknolojisi farklı disiplinlerde sivil kullanıma kapılarını aralasa da veri kalitesinin jeodezik LiDAR ölçme seviyesi için henüz oldukça erken. Küçük detayların ölçülmesini gerektiren işlemlerde sistem tamamen güvenilir olmayabileceği daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir. Ancak, bu durum, akıllı telefon LiDAR'larının harita yapımında kullanımına tamamen engel değildir. Bu makale, Apple 14 Pro akıllı cihazının dış ortamlarda, özellikle altyapı çalışma kanallarının 3B modellemesinde belirli seviyelerde haritalandırılmasına imkân verip veremeyeceğini tartışmaktadır. Özellikle, kanalizasyon, içme suyu gibi altyapı tesislerine ait 3B haritaları kanal yapı ortamlarının yeniden yapılandırılması, daha sonra yapılması planlanan bakım ve onarım çalışmaları için önemli bir konudur. Bu konuyla ilgili örnek çalışma alanı, Selçuk Üniversitesi Güneysınır Meslek Yüksekokulu doğal gaz bağlantı hattı olarak belirlenmiştir. Hatta ait geometrik yapı ve rölatif konum belirleme çalışması yapılmıştır. Altyapı çalışmaları sırasında farklı yapılar ve sistemler tespit edilmiştir. Bu katmanların belirlenmesi, sonraki kazı aşamalarında sağlayacağı bilgiler açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: iPhone, LiDAR, 3B, Nokta bulutu, Altyapı.

Applicability of Smartphone Iphone Lidar Scanner in Infrastructure Studies

*Corresponding Author:
mzeybek@selcuk.edu.tr

Research Article

Citation: Zeybek, M. (2024). Applicability of Smartphone Iphone Lidar Scanner in Infrastructure Studies. *Turkish Journal of LiDAR*, 6(1), 01-09 (in Turkish).

Received : 24.11.2023
Revised 1 : 13.03.2024
Revised 2 : 19.04.2024
Accepted : 06.05.2024
Published : 30.06.2024

Abstract

The recent integration of light detection and ranging (LiDAR) sensors into smartphones has provided a brand new alternative surveying tool for three-dimensional (3D) indoor and outdoor mapping, as well as fine-tuning photo focal length. Thanks to this new system, scanning technology opens the doors to civilian use in different disciplines, but it is still too early for the data quality to reach the level of geodetic LiDAR surveying. Prior research has demonstrated that the system might not be totally dependable for procedures requiring the measurement of minute details. This does not, however, preclude the creation of maps using smartphone LiDAR. This paper discusses whether the Apple 14 Pro smart device can enable certain levels of mapping in outdoor environments, especially 3D modeling of infrastructure working channels. In particular, 3D maps of infrastructure facilities such as sewerage and drinking water are important for reconstructing canal building scenes and for subsequent maintenance and repair works. The case study area is the natural gas connection line of Selcuk University Guneysinir Vocational School. The geometric structure and relative positioning of the line were determined. Different structures and systems were identified during the infrastructure works. The identification of these layers is considered to be important in terms of the information they will provide in the following excavation phases.

Keywords: iPhone, LiDAR, 3D, Point cloud, Infrastructure.

1. Giriş

Son yirmi yıl içinde lazer tarama teknolojisi sürekli gelişerek haritalama faaliyetlerine büyük katkılar sağlamıştır. Farklı firmaların sektöre girmesiyle artan rekabet, tarama sistemlerinin ilerlemesine ve cihaz fiyatlarının önemli ölçüde düşmesine katkıda bulunmuştur. Son birkaç yıl içinde, jeodezik tarama sistemlerindeki yeniliklere ek olarak, sırtta taşınabilen, elde taşınabilen ve akıllı telefonlara entegre edilebilen lazer tarama sensörleri geliştirilmiştir. Apple, bu alanda 2020 yılında Pro modelleriyle piyasaya ilk adımını atmıştır (Apple, 2020; Díaz-Vilariño vd., 2022).

Işık Algılama ve Mesafe Ölçme (LiDAR) sistemi, lazer ışını kullanarak objelerin mesafelerini ve konumlarını ölçen optik bir düzendir. Bu sistem sayesinde, objenin yüzeyi ve karakteristiği hakkında bilgiler, ışık ölçümleriyle üç boyutlu (3B) ve yüksek konumsal hassasiyetle elde edilmektedir. Lazer tarama ölçme tekniği, günümüzde yersel, mobil ve havasal olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılmaktadır (Sevgen & Karslı, 2020; Zeybek, 2021; Suleymanoglu vd., 2024). Literatürde, lazer tarama sistemleri genellikle "LiDAR" terimi ile adlandırıldığı için bu çalışmada da "LiDAR" terimi kullanılmıştır (Killinger, 2014).

Sistem, jeodezik ölçümleri de içerecek şekilde son derece doğru, hızlı ve yoğun 3B bilgi sağlayan nokta bulutu verileri oluşturmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı, LiDAR sistemleri pek çok disiplinde kullanılmaktadır (Cetin & Yastikli, 2023). LiDAR ölçme tekniğinin kullanılacağı araştırmalarda, gerekli detayları ve bilgileri elde etmek amacıyla en uygun LiDAR sistemini seçmek, proje finansmanını planlamak ve ham LiDAR verilerini son kullanıcı için anlamlı bilgilere dönüştürecek donanım, yazılım ve personel eğitimlerine karar vermek büyük önem taşımaktadır.

Özellikle erişimi zor olan ve hızlı veri toplama gerektiren alanlarda, LiDAR sistemleri etkili bir ölçme aracı olarak değer görmektedir. (Shen vd. 2024). Bu alanlar, orman araştırmaları (Akay vd., 2009; Cetin & Yastikli, 2023; Gollob vd., 2021), jeolojik ölçmeler (Zeybek vd., 2015), kentsel planlama alanları (Sevgen, 2019), geniş alanlarda topoğrafik harita üretimi, doğal afetlerin izlenmesi (Huang vd., 2021), yol geometrisi (Soilan vd., 2019; Suleymanoglu vd., 2023), iç mekan modellemesi ve taraması (Yiğit vd., 2023) ve diğer (Seyfeli & Ok, 2022) pek çok disiplin örnek olarak verilebilir.

Önemli altyapıların 3B haritalanması, envanterinin oluşturulması ve sürekli izlenmesi, mevcut ve potansiyel tehlikelere karşı dirençlerinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Gelişmiş ülkelerde kritik altyapılar, enerji ve kamu hizmetleri,

finans, gıda, ulaşım, bilgi ve iletişim teknolojileri, sağlık, su, güvenlik ve imalat gibi çeşitli sektörler temelinde sınıflandırılmakta ve bu kritik altyapı bileşenleri, LiDAR gibi yöntemlerle etkin bir şekilde izlenmektedir (Sharifisoraki vd., 2023). Bu teknoloji, özellikle yersel ve havasal sistemler vasıtasıyla gaz, petrol ve içme suyu boru hatları ile enerji üretimi ve iletimi gibi kritik altyapı bileşenlerinin izlenmesinde ve güvenliğinin sağlanmasında önemli bir rol üstlenmektedir (GIM International, 2022).

Teknolojik ilerlemeler sayesinde, LiDAR sistemleri yapı sağlığı izlemesi gibi kritik alanlarda 3B nokta bulutu oluşturma ve yapı analizleri için giderek daha fazla önem kazanmıştır. Bu alanda, veri toplama ve işleme hızını artırarak zaman tasarrufu sağlayan, daha hızlı, verimli ve hesaplama açısından etkin, maliyeti düşük yapı sağlığı izleme sistemleri geliştiren çeşitli gruplar ve çalışmalar bulunmaktadır. Bu metodolojiler, yapıların durumunu hızla değerlendirmeyi ve potansiyel sorunları erken aşamada tespit etmeyi mümkün kılar; böylece önleyici bakım ve onarımlar zamanında ve ekonomik bir şekilde gerçekleştirilebilir (Kaartinen vd., 2022).

Son yıllarda, sivil kullanım için önemli bir teknolojik ilerleme olarak, akıllı telefonlara LiDAR sistemleri entegre edilmiştir (Losé vd., 2022). Bu tür sistemler, temelde genel amaçlı sensörler olarak tasarlanmıştır ve son kullanıcıları hedef almakta, ancak profesyonel özelliklerle donatılmamışlardır. Henüz jeodezik ölçüm seviyelerine ulaşabilen akıllı telefon sensörleri piyasaya sürülmemiş olsa da, elde edilen hassasiyet düzeyleri bazı haritalama işlemleri için yeterli bulunmuştur. Bu gelişme, kullanıcıların günlük cihazlarıyla belirli haritalama faaliyetlerini gerçekleştirmelerine imkan tanıyarak, teknolojinin erişilebilirliğini ve uygulama alanlarını genişletmiştir (Kuçak vd., 2023).

iPhone 13 Pro ve Recon-3D cihazlarının bir arada kullanıldığı bir çalışmada (Kottner vd., 2023), üç farklı senaryo üzerinden testler gerçekleştirilmiştir. Ölçme süresi ortalama 2 dakikadan daha kısa bir sürede gerçekleştirilmiştir. Yapılan kontrol ölçmelerinde, 0,10 cm, 0,69 cm ve 0,17 cm ölçü farklarına ulaşılmış; ve bunlarla birlikte 0,22 cm genel ortalama mutlak hata ile 0,18 cm standart sapma değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, kullanılan metodolojinin yeterli doğrulukta ve makul seviyelerde tekrar edilebilir 3B nokta bulutu verileri üretmeye imkan tanıdığını ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, iPhone 14 Pro akıllı telefon ve 3dScanner app (3DScanner App, 2023) uygulaması kullanılarak Selçuk Üniversitesi Güneysinır Meslek Yüksekokulu'nun doğal gaz bağlantı hattının (PE80) envanteri oluşturulmuş ve bir metodolojinin geliştirilebilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma, akıllı telefon teknolojileri ve uygulamalarının altyapı

tesislerinin envanter çıkarma ve analiz süreçlerinde uygulanabilir ve etkili çözümler sunup sunamayacağını incelemeyi hedeflemektedir.

2. Materyal ve Metot

Apple'ın en son ürünlerine entegre edilen lazer sensörleri hakkında resmi teknik detaylar sınırlı olmasına rağmen, literatür taramaları bu sensörlerin, geleneksel LiDAR sistemlerine göre özellikle otonom araç ve robotik uygulamalarda daha yüksek ölçeklenebilirlik ve güvenilirlik sunmayı hedefleyen katı hal LiDAR (SSL) teknolojisine dayandığını ortaya koymaktadır (Luetzenburg vd.,2021). Bu tür bir LiDAR, mekanik motorlu parçaların kullanımını azaltarak daha dayanıklı ve güvenilir bir sistem oluşturmayı amaçlamaktadır. Apple'ın LiDAR sensörü, ölçülen noktaları cihazın Bionic çipinde çalışan bilgisayarlı görüş algoritmaları ile desteklenen diğer kameralar ve hareket sensörlerinin verileriyle birleştirilerek, daha kapsamlı ve doğru bir görüntü elde etmeyi sağlar. Bu sensörlerin belirlenen menzili 5 metredir ve yapılan araştırmalar, iPad ve iPhone cihazlarında kullanılan LiDAR sensörlerinin teknik özelliklerinin benzer olduğunu göstermiştir (Benvenuto vd., 2022).

Literatürde LiDAR sensörü içeren akıllı telefonların kullanımıyla ilgili farklı uygulamalar yer almaktadır (Günen vd., 2023; Monsalve vd., 2023; Vacca, 2023). Bu çalışmada ücretsiz "3D Scanner app" uygulaması kullanılmıştır (3DScanner App, 2023). Çalışma alanında üç farklı tarama gerçekleştirilmiştir. Tarama sırasında cihazın yavaş ve yumuşak hareket ettirilmesine özen gösterilmiş, hızlı ve keskin dönüşlerden kaçınılarak tarama kalitesinin korunması sağlanmıştır. Yüzey taraması için en iyi sonuçları alabilmek adına farklı ölçme metodolojileri geliştirilebilir. Ancak, görüş açısının kısıtlı olduğu kanal gibi çalışma alanlarında, iyi bir nokta bulutu elde etmek için en az iki karşılıklı ve örtüşen taramanın yeterli olduğu görülmüştür.

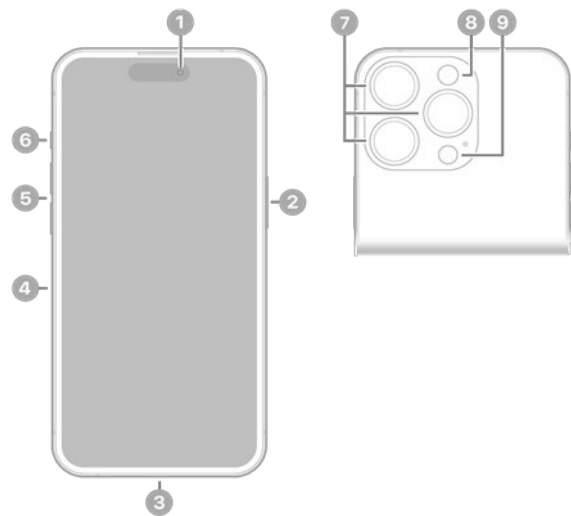
3D Scanner App'te tarama yapmak için uygulamadaki kırmızı düğmeye basmak yeterlidir. Uygulamada belirli bir tarama süresi olmamakla birlikte, tarama verisi telefonun işlemci ve hafızasını zorlayacak boyutlara ulaştığında otomatik olarak sonlanır. Tarama tamamlandığında, uygulama ham veriyi işleyerek renk bilgisiyle zenginleştirilmiş nokta bulutu oluşturur. Tarama sırasında, kameradan alınan görüntülerle nokta bulutları renklendirilir ve noktalar sıkıştırılarak LAS dosya formatında kaydedilir.

2.1. Apple iPhone 14 Pro LiDAR

Bu makale, Apple iPhone 14 Pro akıllı telefonunda bulunan ve tüketicilere yönelik düşük maliyetli bir LiDAR sensörünü incelemektedir. Bu sensör, yakın kızılötesi spektrumunda lazer ışığı yayan ve düşey aralıklı yüzey yayımlı lazer (VCSEL) temelli doğrudan Zaman Uçuşu (dTOF) teknolojisini kullanmaktadır (Teo & Yang, 2023). Sensör, VCSEL ve tek fotonlu fotodiyot teknolojisini entegre ederek, her görüntü karesinde 576 noktayı tespit edebilme kapasitesine sahiptir (Teo & Yang, 2023). LiDAR Sensörü akıllı telefonun arka bölümünde sağ alt kısmında yer almaktadır (Şekil 1).

2.2. Nokta Bulutlarında Profil ve Kesit Ölçmeleri

Kanal hattının yönü boyunca veya buna dik olarak elde edilen nokta bulutu verisinin iki boyutlu (2B) görselleştirilmesi, düşey yapıları daha net görselleştirmek, sınıflandırma sonuçlarını detaylı incelemek veya farklı enterpolasyon yöntemlerinin sonuçlarını karşılaştırmak için kritik bir yöntemdir. Özellikle, kanal hattı gibi karmaşık 3B nokta bulutlarından bilgi çıkarımı zorlayıcı olabilir. 2B görüntüleme, bu zorluğu aşmada ve süreci basitleştirmede önemli bir araçtır. Bu uygulama için iki temel noktanın belirlenmesi ve kesit kalınlığının kanal genişliğine uygun ayarlanması gerekmektedir. Nokta bulutu, bu kriterlere göre kırılarak işlenir. X, Y ve Z koordinatlarının kullanımı, özellikle X-Z ve Y-Z profillerinin çizimi için yaygındır ve bu, belirli yapıların ve özelliklerin daha detaylı incelenmesini sağlar.



Şekil 1. LiDAR Sensörü konumu (1-8: Telefonun diğer fonksiyon tuş ve sensörleri),(9: LiDAR sensörü) (Apple, 2023).

2.3. Nokta Bulutların Doğrusal Hat Çizimleri

Nokta bulutları, 3D modelleme ve çizimler için son derece değerli veri kaynaklarıdır. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımları, bu verilerin işlenmesi için ideal platformlar sunar. CAD yazılımlarının farklı modülleri sayesinde kullanıcılar, 3B nokta bulutları üzerinden detaylı modellemeler ve çizimler yapabilirler. 3B nokta bulutlarından doğrusal hat çizimleri yapılması için CAD yazılımlarında takip edilmesi gereken adımlar şunlardır:

1. Nokta Bulutlarını Projeye Aktarma: İlk adım, 3B nokta bulutunun CAD yazılımına aktarılmasıdır. Bu işlem LAS, OBJ, DXF, STL, PLY gibi çeşitli formatlarda gerçekleştirilebilir. Her CAD yazılımının desteklediği belirli nokta bulutu formatları vardır, bu yüzden uygun formatın seçilmesi önemlidir.
2. Noktaların Georeferanslanması: İçe aktarılan nokta bulutunun, lokal koordinat sistemlerinden ulusal veya uluslararası referans sistemlerine entegrasyonu gereklidir. Bu işlem, kontrol noktaları kullanılarak yapılır ve noktaların 3B uzayda rastgele değil, gerçek konumlarını yansıtacak şekilde düzenlenmesini sağlar. Bu adım, modelin doğruluğunu ve kullanımını artırır.
3. Doğrusal Hat Çizimi: Nokta bulutunun koordinatlandırılmasını takiben, CAD yazılımındaki çizim araçları kullanılarak nokta bulutu üzerinde 2D veya 3D hatlar çizilir. Bu işlem, tasarımın veya analizin gereksinimlerine uygun olarak doğrusal yapıları belirlemek amacıyla manuel veya otomatik yöntemlerle gerçekleştirilir.

Bu süreç, CAD yazılımlarının esnekliği ve çeşitli araçları aracılığıyla karmaşık 3D nokta bulutlarını anlamlı ve kullanışlı tasarımlara çevirme olanağı sunmaktadır.

2.4. Nokta Bulutlarında Silindir Tespiti

Bu bölümde, nokta bulutlarından yarım veya üç çeyrek görünüme sahip potansiyel boru hatlarının tespiti için yarı otomatik veya manuel silindir uygulama süreci detaylandırılmıştır. Bu süreç, doğruluk ve verimlilik açısından önemli adımları içerir:

1. Nokta Bulutunun İşlenmesi: İlk adım olarak, gerçek yer koordinatlarına uygun şekilde düzenlenmiş nokta bulutlarından başlanır. Gürültü ve istenmeyen noktaların ayıklanması bu aşamada gerçekleştirilir. Gürültüyü azaltmak ve istenmeyen noktaları temizlemek için çeşitli filtreleme ve düzenleme teknikleri kullanılır. Eğer

bu işlemler yapılmazsa, kullanılacak olan hazır geometrik modeller, bu istenmeyen noktalardan olumsuz etkilenebilir.

2. Silindirik Yapıların Tespiti: Nokta bulutu içindeki potansiyel silindirik yapıların tespiti için literatürde bir dizi yöntem bulunmaktadır. Hough Dönüşümü(Rabbani & Van Den Heuvel, 2005), RANSAC (Random Sample Consensus) (Bolles & Fischler, 1981), ve LSE (Least Square Error) (Lukács vd., optimizasyon teknikleri gibi yöntemler, kenar tespiti, nokta bulutlarının segmentasyonu ve yüzey noktalarının modellenmesi gibi süreçlerde kullanılır. Bu teknikler yardımıyla, tespit edilen silindirik yapılar için en uygun geometri hesaplanır ve böylece, elde edilen silindir yarıçapı, uzunluğu ve eksen normalleri gibi özellikler en düşük hata oranıyla belirlenir.

2.5. Röper İşlemi

Altyapı kanallarında bulunan doğal gaz boru hatları, kablolar ve diğer tesislerin yerlerinin tespit edilmesi sürecinde, çevredeki sabit istasyonlardan alınan gözlemlerle yapılan röperleme işlemi büyük önem taşır. Bu işlem, çevredeki sabit istasyonların konumlarının belirlenmiş ve LiDAR teknolojisi ile taranmış olmasını gerektirir. Bu sabit noktalar hem kontrol hem de röper noktası olarak kullanılır. Yeniden kazı yapıldığında, bu sabit noktalardan alınan ölçümlerle, yükseklik ve mesafe belirlenerek olası kazaların önüne geçilir. Bu yöntem, kazı sırasında meydana gelebilecek hasar ve kazaları önleyerek altyapı tesislerinin korunmasına ve güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunur.

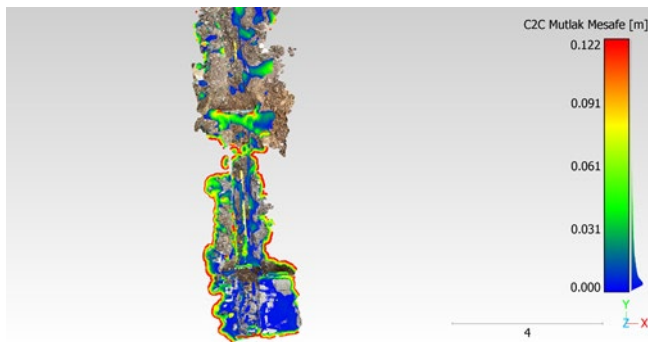
3. Bulgular

Selçuk Üniversitesi Güneysınır Meslek Yüksekokulu'nda doğalgaz bağlantı boru hattına yönelik yapılan çalışma ve uygulama (Şekil 2), alandan toplanan görsel verilerle desteklenmiştir ve dört ana aşamadan oluşan bir değerlendirme sürecini içermiştir. İlk aşamada, yaya olarak yapılan arazi ölçümlerinde herhangi bir kontrol noktası kullanılmamıştır. Daha sonra, iPhone 14 Pro'nun LiDAR sisteminden alınan nokta bulutu verileri ile analize başlanmış, bu verilere dayanarak borunun geometrisi belirlenmek için silindir uydurma teknikleri uygulanmıştır. Çalışmanın son aşamasında, elde edilen verilere dayalı olarak belirli sabit noktalar referans alınarak yatay ve düşey mesafe farkları hesaplanmıştır.



Şekil 2. Uygulama alanından bir görüntü.

Üç farklı tarama gerçekleştirilmiş ve bu taramalardan elde edilen veriler, en az üç noktadan toplanarak Iterative Closest Point (ICP) algoritması (Besl ve McKay 1992) kullanılarak CloudCompare yazılımı (CloudCompare 2023) ile entegre edilmiştir. Nokta bulutlarında toplam 4,444,787 nokta kaydedilmiştir. Elde edilen tarama sonuçlarındaki farklılıklar detaylı bir şekilde incelenmiş ve bulgular Şekil 3'te görselleştirilmiştir.



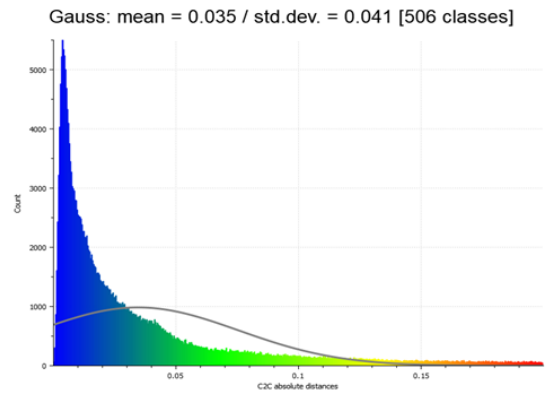
Şekil 3. Birinci ve ikinci tarama birleştirme sonrası en yakın nokta karşılaştırmasına göre farklar.

Şekil 3'teki verilere dayanarak dört noktada dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dönüklük parametreleri ile tüm noktalar belirlenen benzerlik dönüşümüne uygun şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen dönüklük matrisi ve karesel ortalama hata (RMSE) Şekil 4'te verilmiştir.

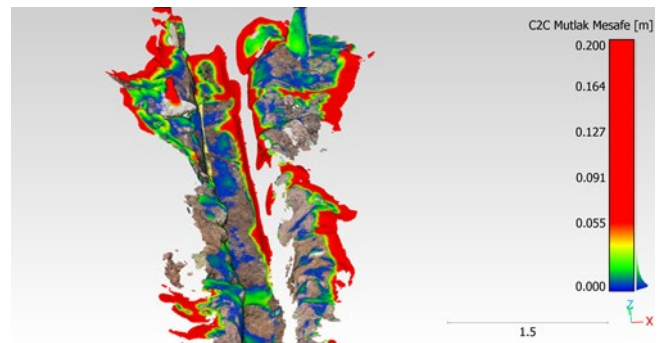
Align info			
Final RMS: 0.0243323			
Transformation matrix			
0.998	-0.004	0.057	0.086
0.004	1.000	0.006	-18.170
-0.057	-0.006	0.998	0.516
0.000	0.000	0.000	1.000
Scale: fixed (1.0)			

Şekil 4. Birinci ve ikinci tarama dönüklük hesabı.

Ardından, yüzey noktaları da dahil edilerek Iterative Closest Point (ICP) algoritması kullanılarak nihai dönüşüm tamamlanmıştır. Bu dönüşümle, referans ve model noktaları karşılaştırılarak aradaki farklar belirlenmiştir. Bu farklar, tarama açısının, objenin yüzeyinin ve dokusunun neden olduğu varyasyonları yansıtmaktadır ve mutlak sonuç doğrulukları hakkında bilgi vermektedir. Düz yüzeylerde elde edilen farklar 5 cm ve altında olup, bu iyi bir doğruluk düzeyini göstermektedir. Ancak, karmaşık yüzeylerde bu farklar 20 cm'ye kadar çıkabilmekte; bu önemli farklılıklar, ilk ve ikinci tarama işlemleri sırasında tarama açılarındaki boşluklar ve karmaşık yüzeylerden kaynaklanan hatalar nedeniyledir. Nokta bulutları arasındaki farkların dağılımı Gauss dağılımı ile analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 5'te görselleştirilmiştir.



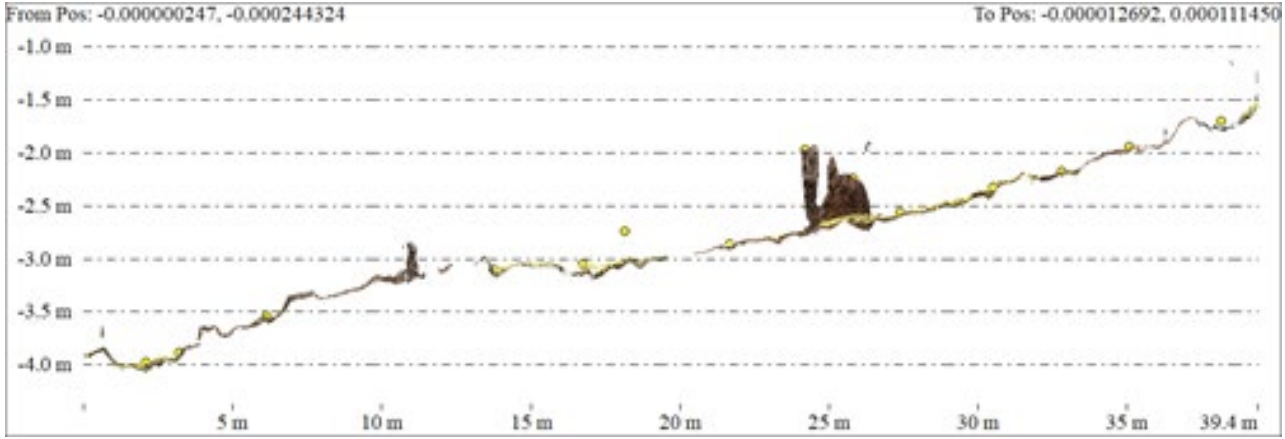
Şekil 5. Nokta bulutlarındaki (1-2. tarama ICP sonrası) farkların Gauss dağılımında gösterimi, ortalama ve standart sapma değerleri sırasıyla 3.5 cm ve 4.1 cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. İkinci ve üçüncü tarama birleştirme sonrası en yakın nokta karşılaştırmasına göre farklar.

İkinci ve üçüncü tarama sonuçları, ilk tarama grupları arasındaki farklarla benzerlik göstermektedir. Ancak üçüncü taramada yan cephelerin daha az tarama altına alınması sonucunda, bazı farklar 20 cm'den fazla olarak görülse de, ortalama fark 3.0 cm ve

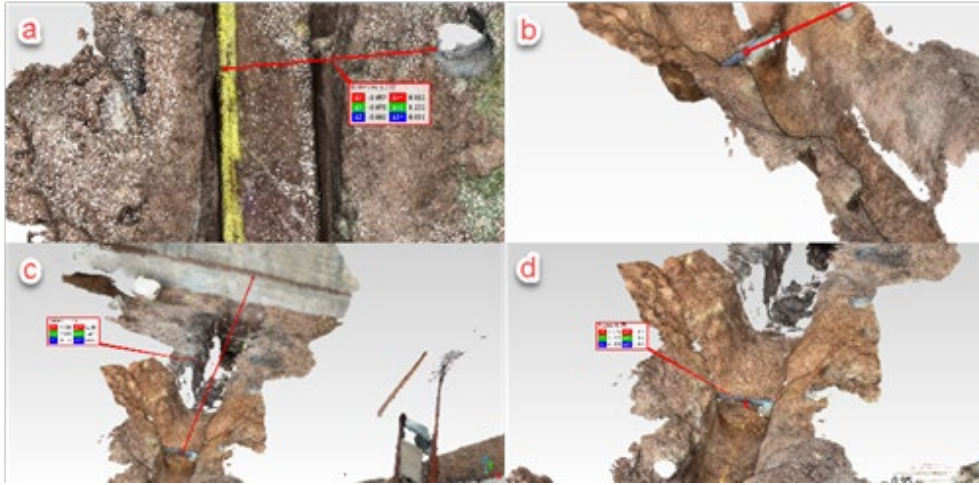
standart sapma 4.6 cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Ana güzergâh hattı, lokal koordinat sistemi içerisinde 5 cm kalınlığında profiller alınarak diğer yapılar ve boy kesitleri ile birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Ana doğrultu hat profili görselleştirilmesi.

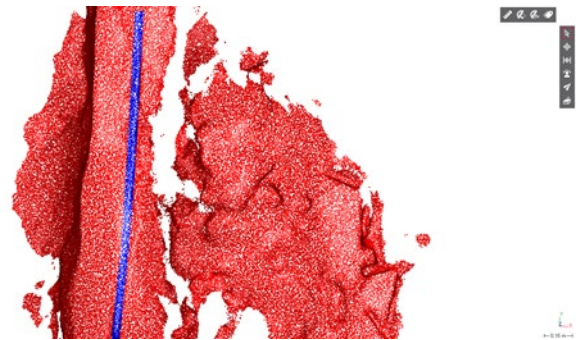
Elde edilen nokta bulutları üzerinden yapılan röperleme işlemi, uygulamada basit ancak etkili bir

yöntemdir (Şekil 8). Bu ölçümler, gelecekte yapılacak kazı işlemleri için kılavuzluk edecek niteliktedir.



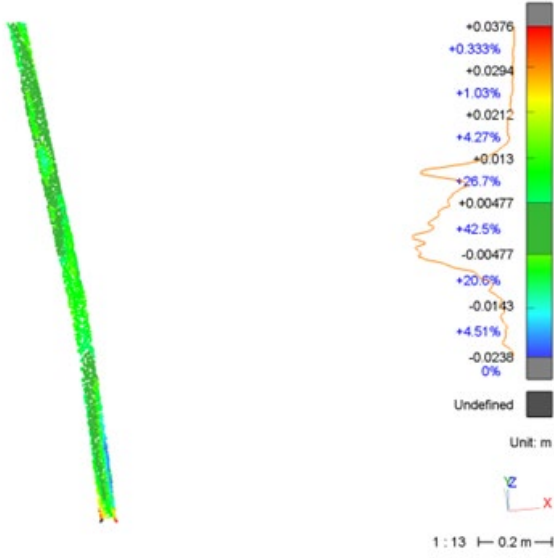
Şekil 8. Nokta bulutlarından röperleme işlemi, a) en yakın ağacın boru hattına olan geometrik farkları, b) hat üzerindeki diğer hatların yakın detaylarla ilişkisi, c) hattın diğer hatlarla olan durumunun duvardan olan mesafesi, d) hat üzerindeki diğer hatların detay ölçmeleri.

Sınıflandırma sürecinde, nokta bulutlarının renk (RGB) farklılıklarını kullanarak, 3DReshaper (3DReshaper, 2024) yazılımı ile manuel bir yöntem uygulanmıştır. Kısa bir hat üzerinde çalışıldığı için bu manuel yöntem hem etkili hem de yeterli olmuştur (Şekil 9). Ancak, daha uzun hatların sınıflandırılması gerektiğinde, işlemin hızlandırılması ve zamandan tasarruf sağlamak için yarı otomatik veya otomatik yöntemler tercih edilmelidir. Bu otomasyon yöntemleri, büyük veri miktarlarının işlenmesini kolaylaştırır ve sınıflandırma sürecinin genel verimliliğini artırabilir.



Şekil 9. Doğalgaz borusunu temsil eden noktaların sınıflandırılması (Mavi: boru hattı, Kırmızı: diğer detaylar).

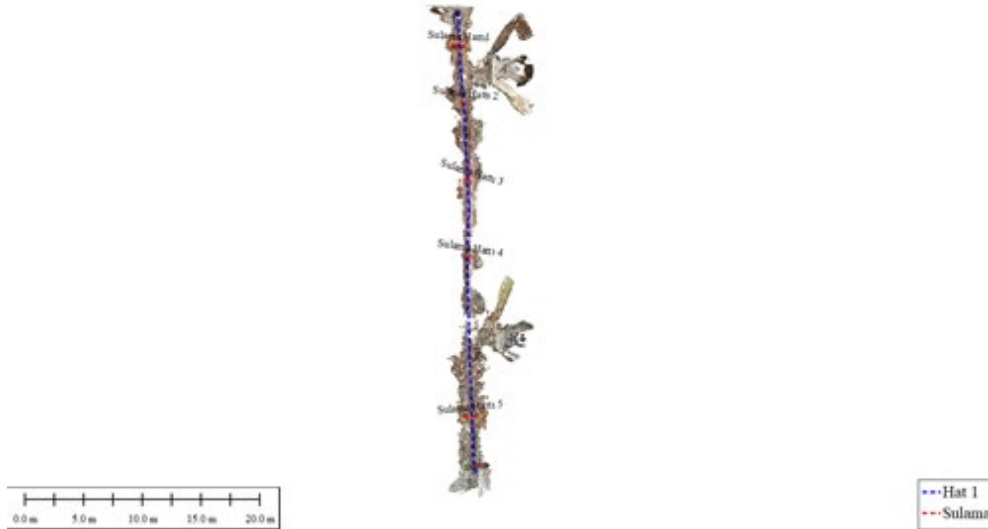
Bu aşamadan sonra, 3DReshaper yazılımının “en iyi silindir uydurma” (Best fit cylinder) aracı kullanılarak silindir uygulama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Doğalgaz borusunu geometrik olarak tanımlanmasında silindir uydurma işlemi ve uydurmanın fark değerleri (Fark miktarları, En Yüksek: 3 cm, En Düşük: -2.3 cm).

Silindir uygulamalarında, gözle görülebilen yerlerde yüksek doğruluk elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 10). Ancak, doğalgaz hatlarına bağlı ve esnek yapıda olan bireysel gaz kontrol kutularına gelen borularda bu uygulamanın hatalara yol açtığı tespit edilmiştir. Esnek boru bölümlerinde kısa kesitler alınması, bu tür hataların önlenmesi için önemlidir. Alternatif olarak, esnek silindirik boru hatlarını daha doğru tanımlayabilmek için özel yöntemler veya yazılımların kullanılması gerekebilir. Silindir uygulaması sonuçlarına göre, hattın yarıçapı 2.5 cm ve standart sapması 0.8 cm hata ile hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, silindir uygulamasının belirli durumlar ve malzemeler için etkili olabileceğini gösterirken, esnek malzemelerle çalışılırken özen gösterilmesi gerektiğini de vurgular.

Çalışma alanındaki sulama ve içme su hatları, daha önceki konumları bilinmediği için, JCB operatörü tarafından kazı sırasında yanlışlıkla hasar görmüştür. Bu tür hatların doğru bir şekilde belirlenmesi ve kazı veya onarım aşamalarında yeniden tanımlanabilmesi, kazı ekiplerine büyük kolaylık sağlar. Ana hatla ilişkilendirilmiş bu hatların görselleştirilmesi, çalışma sahasındaki riskleri azaltarak operasyonel verimliliği ve güvenliği artıracaktır (Şekil 11).



Şekil 11. Doğalgaz boru hattının diğer altyapı elemanlarıyla birlikte ilişkilendirilmesi-Kesit alınması ve doğrultuların belirlenmesi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Apple iPhone 14 Pro'nun lazer tarama sensörü ve 3D Scanner App'in yoğun görüntü eşleştirme teknolojisi kullanılarak altyapı tesislerinin konumları hakkında 3B konumsal bilgilerin toplanmasının güvenilir, hızlı ve pratik bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Bulgular, iPhone 14 Pro ile 3D Scanner App kullanarak 5 metreye kadar mesafede veri toplanabileceğini; ancak 1-2 metre mesafede ve normal yürüme hızında daha yüksek doğrulukla veri

toplamanın daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Altyapı kanalı üzerindeki 3B nokta bulutlarının başarılı bir şekilde toplanması için karşılıklı yapılan taramaların, hat çıkarımı tahminlerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, esnek boru hatlarının geometrik tanımlanması için, 1 metre veya daha kısa kesitlerde yapılan tek seferlik silindir uygulamalarının daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalar, altyapı kanal ve boru hatlarının konumlarını belirlemek amacıyla iPhone 14 Pro LiDAR tarayıcısıyla farklı tekniklerde ölçüm yapan

diğer cihazların kullanımını ve ölçüm kalitelerinin değerlendirilmesini içermelidir. Bu yaklaşım, çeşitli cihazların performanslarını karşılaştırmak ve en uygun yöntemleri belirlemek için temel oluşturacaktır. Ayrıca, farklı mobil uygulamaların kullanımının ve karşılaştırılmasının, elde edilen sonuçların kıyaslanmasına yardımcı olacağı ve en etkili yazılımların seçimi ve geliştirilmesine yönelik çalışmalara rehberlik edeceği öngörülmektedir. Uygulamalarda LAS, ASCII, PLY ve OBJ gibi yaygın dosya formatlarının desteklenmesi, verilerin post-process işlemleri için daha geniş seçenekler sunarak, veri işleme süreçlerinin esnekliğini artıracaktır.

Yazarların Katkısı

Tasarım, düzenleme ve tüm analizler yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar için herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- 3DReshaper (2024). "Leica Cyclone 3DR - All-in-One Deliverable Solution". Geliş tarihi 12 Mart 2024 (<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr>).
- 3DScanner App. (2023). "3D Scanner App." Geliş tarihi 07 Aralık 2023 (<https://3dscannerapp.com/>).
- Akay, A. E., Oğuz, H., Karas, I. R., & Aruga, K. (2009). Using LiDAR technology in forestry activities. *Environmental monitoring and assessment*, 151, 117-125.
- Apple (2020). "iPhone 12 Pro - Teknik Özellikler (TR)". Geliş tarihi 06 Aralık 2023 (https://support.apple.com/kb/SP831?locale=tr_TR).
- Apple (2023). "iPhone 14 Pro - Teknik Özellikler (TR)". Geliş tarihi 07 Aralık 2023 (https://support.apple.com/kb/SP875?viewlocale=tr_TR&locale=tr_TR).
- Benvenuto, L., Cosso, T., & Delzanno, G. (2022). An adaptive algorithm for multipath mitigation in GNSS positioning with Android smartphones. *Sensors*, 22(15), 5790.
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992, April). Method for registration of 3-D shapes. In *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures*, 1611, 586-606.
- Bolles, R. C., & Fischler, M. A. (1981, August). A RANSAC-based approach to model fitting and its

application to finding cylinders in range data. In *IJCAI*, 1981, 637-643.

- CloudCompare (2023). "CloudCompare - Open Source project". Geliş tarihi 09 Aralık 2023 (<https://www.danielgm.net/cc/>).
- Díaz Vilariño, L., Tran, H., Frías Nores, E., Balado Frías, J., & Khoshelham, K. (2022). 3D mapping of indoor and outdoor environments using Apple smart devices. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B4-2022, 303-308.
- GIM, International (2022). "Using Lidar Software for Energy Infrastructure Mapping-Web of Science Core Collection". Geliş tarihi 06 Aralık 2023 (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000787750100012>).
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, 13(16), 3129.
- Günen, M. A., Erkan, İ., Aliyazıcıoğlu, Ş., & Kumaş, C. (2023). Investigation of geometric object and indoor mapping capacity of Apple iPhone 12 Pro LiDAR. *Mersin Photogrammetry Journal*, 5(2), 82-89.
- Huang, X., Gong, J., Chen, P., Tian, Y., & Hu, X. (2021). Towards the adaptability of coastal resilience: Vulnerability analysis of underground gas pipeline system after hurricanes using LiDAR data. *Ocean & Coastal Management*, 209, 105694.
- Kaartinen, E., Dunphy, K., & Sadhu, A. (2022). LiDAR-based structural health monitoring: Applications in civil infrastructure systems. *Sensors*, 22(12), 4610.
- Killinger, D. K. (2014). Lidar (light detection and ranging). In *Laser spectroscopy for sensing*, 2014, 292-312. Woodhead Publishing.
- Kottner, S., Thali, M. J., & Gascho, D. (2023). Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. *Forensic Imaging*, 32, 200535.
- Kuçak, R. A., Erol, S., & Alkan, R. M. (2023). iPad Pro LiDAR sensörünün profesyonel bir yersel lazer tarayıcı ile karşılaştırmalı performans analizi. *Geomatik*, 8(1), 35-41.
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an application in geosciences. *Scientific reports*, 11(1), 1-9.
- Lukács, G., Marshall, A. D., & Martin, R. R. (1997). Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori. *RECCAD, Deliverable document*, 1197, 2.
- Monsalve, A., Yager, E. M., & Tonina, D. (2023). Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. *Journal of Ecohydraulics*, 8(1) 1-11.

- Rabbani, T., & Van Den Heuvel, F. (2005). Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds. *Isprs Wg Iii/3, Iii/4, 3*, 60-65.
- Sevgen, S. C. (2019). Airborne lidar data classification in complex urban area using random forest: a case study of Bergama, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(1), 45-51.
- Sevgen, S. C., & Karsli, F. (2020). Automatic ground extraction for urban areas from airborne lidar data. *Turkish Journal of Engineering*, 4(3), 113-122.
- Seyfeli, S., & Ok, A. O. (2021, November). Classification of Mobile Laser Scanning Point Cloud in an Urban Environment Using kNN and Random Forest. In *The Proceedings of the International Conference on Smart City Applications 5*, 963-973.
- Sharifisoraki, Z., Dey, A., Selzler, R., Amini, M., Green, J. R., Rajan, S., & Kwamena, F. A. (2022). Monitoring critical infrastructure using 3d lidar point clouds. *IEEE Access*, 11, 314-336.
- Shen, Z., Wang, J., Pang, C., Lan, Z., & Fang, Z. (2024). A LiDAR-IMU-GNSS fused mapping method for large-scale and high-speed scenarios. *Measurement*, 225, 113961.
- Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., del Río-Barral, P., Perez-Collazo, C., Arias, P., & Riveiro, B. (2019). Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure monitoring. *Infrastructures*, 4(4), 58.
- Suleymanoglu, B., Gurturk, M., Yilmaz, Y., Soycan, A., & Soycan, M. (2023). Comparison of unmanned aerial vehicle-LiDAR and image-based mobile mapping system for assessing road geometry parameters via digital terrain models. *Transportation Research Record*, 2677(8), 617-632.
- Suleymanoglu, B., Soycan, M., & Toth, C. (2024). 3D Road Boundary Extraction Based on Machine Learning Strategy Using LiDAR and Image-Derived MMS Point Clouds. *Sensors*, 24(2), 503.
- 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.
- Vacca, G. (2023). 3D Survey with Apple LiDAR Sensor—test and assessment for architectural and cultural heritage. *Heritage*, 6(2), 1476-1501.
- Yiğit, A. Y., Gamze Hamal, S. N., Ulvi, A., & Yakar, M. (2023). Comparative analysis of mobile laser scanning and terrestrial laser scanning for the indoor mapping. *Building Research & Information*, 52(4), 1-16.
- Zeybek, M. (2021). Extraction of road lane markings from mobile LiDAR data. *Transportation research record*, 2675(5), 30-47.
- Zeybek, M., Şanlıoğlu, İ., & Genç, A. (2015). Yüksek çözünürlüklü yersel lazer tarama verilerinin filtrelenmesi ve filtrelemelerin heyelan izlemeye etkisi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 11-20.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Türkiye LiDAR Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/melid>

e-ISSN 2717-6797



Kültürel Mirasların Korunmasına Yönelik LiDAR ve İHA Fotogrametrisi Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı

Davut Balcı^{1*}, Ali Ulvi²

^{1*} İller Bankası Gaziantep Bölge Müdürlüğü, 27090, Gaziantep, Türkiye; (davutbalci1412@gmail.com)

² Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri, 33310, Mersin, Türkiye; (aliulvi@mersin.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
davutbalci1412@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Balcı, D. & Ulvi, A. (2024). Kültürel Mirasların Korunmasına Yönelik LiDAR ve İHA Fotogrametrisi Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 6(1), 10-29.

Geliş : 14.03.2024
Reviz : 02.06.2024
Kabul : 10.06.2024
Yayın : 30.06.2024

Özet

Bu çalışmada, Türkiye'deki Mersin İli Tarsus İlçesindeki Tarihi Nusret Mayın Gemisi örnek alınarak yersel lazer tarama ve İHA fotogrametri nokta bulutu verilerinin karşılaştırılması ve entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, yersel lazer tarayıcıdan elde edilen bir nokta bulutu ile İHA fotogrametriden elde edilen bir nokta bulutu arasındaki farkların değerlendirilmesidir. Ayrıca, biri geleneksel yaklaşımla diğeri yeni bir çakıştırma yaklaşımıyla üretilen iki bütünleşik nokta bulutunun doğrulukları araştırılmıştır. Kültürel miras dokümantasyonu alanında amaç, ilgilenilen nesnenin eksiksiz ve doğru bir 3B modelini oluşturmaktır. Bu çalışmadaki gibi kompleks yapıdaki büyük nesnelerin sayısallaştırılması isteniyorsa, tüm alanlarda veri kapsamının garanti edilmesi gerekir. Hem yersel lazer tarama hem de İHA fotogrametrisi farklı görüş açılarına sahiptir ve bu da incelenen alanın farklı şekilde kapsanmasına neden olur. Her iki yöntemin nokta bulutu çıktıları karşılaştırıldıktan sonra, yalnızca her iki nokta bulutunun kombinasyonu ile istenen eserin tam kapsamının sağlanabileceği sonucuna varılabilir. Veri kapsamının yanı sıra, elde edilen verilerin de doğru olması gerekir. Nokta bulutlarının doğrulukları karşılaştırıldığında, yalnızca bir yersel lazer tarayıcının tüm alanlarda sabit göreceli ve mutlak doğruluğu garanti edebileceği söylenebilir. İHA fotogrametri nokta bulutu, nokta bulutunun önemli bölümlerinde yeterli doğruluk sağlar, ancak hata oranı ve hata olasılığı lazer tarayıcıdan çok daha yüksektir. Fotogrametri nokta bulutu doğruluğunun zor doğrulanması nedeniyle, hataların tespit edilmemesi kolaylıkla gerçekleşebilir. Sadece kalibre edilmiş lazer tarayıcılar ile tüm noktaların yüksek doğrulukla ölçüldüğü varsayılabilir. Her iki entegrasyon yaklaşımı da lazer verileri ile fotogrametri verilerinin entegrasyonunun artık bir engel olmadığını ve yenilikçi çakıştırma yaklaşımlarının şimdiden umut verici sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kültürel miras, belgeleme, 3B, fotogrametri, lazer tarayıcı, hibrit belgeleme.

Using LiDAR and UAV Photogrammetry Methods for Cultural Heritage Preservation

*Corresponding Author:
davutbalci1412@gmail.com

Research Article

Citation: Balcı, D. & Ulvi, A. (2024). Using LiDAR and Uav Photogrammetry Methods For Cultural Heritage Preservation. *Turkish Journal of LiDAR*, 6(1), 10-29 (in Turkish).

Received : 14.03.2024
Revised : 02.06.2024
Accepted : 10.06.2024
Published : 30.06.2024

Abstract

In this study, the comparison and integration of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry point cloud data was carried out by taking the Historical Nusret Mine Ship in Tarsus District of Mersin Province in Turkey as an example. The main purpose of this study is to evaluate the differences between a point cloud obtained from a terrestrial laser scanner and a point cloud obtained from UAV photogrammetry. Additionally, the accuracy of two integrated point clouds, one produced with a traditional approach and the other with a new registration approach, were investigated. In the field of cultural heritage documentation, the goal is to create a complete and accurate 3D model of the object of interest. If large objects with a complex structure are to be digitized, as in this study, data coverage in all areas must be guaranteed. Both terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry have different viewing angles, resulting in different coverage of the area being examined. After comparing the point cloud outputs of both methods, it can be concluded that only the combination of both point clouds can achieve the full coverage of the desired artifact. In addition to data coverage, the data obtained must also be accurate. Comparing the accuracies of point clouds, it can be said that only a terrestrial laser scanner can guarantee constant relative and absolute accuracy in all areas. UAV photogrammetry point cloud provides sufficient accuracy in important parts of the point cloud, but the error rate and probability of error are much higher than laser scanner. Because photogrammetry point cloud accuracy is difficult to verify, errors can easily go undetected. It can only be assumed that with calibrated laser scanners all points are measured with high accuracy. Both integration approaches have shown that integration of laser data and photogrammetry data is no longer a barrier and that innovative registration approaches are already showing promising results.

Keywords: Cultural heritage, documentation, 3D, photogrammetry, laser scanner, hybrid documentation.

1. Giriş

Kültürel varlıklar çeşitli nedenlerle zaman içinde zarar görebilir veya yok olabilir. Bunu önlemek için öncelikle kültürel eserlerin 3B dokümantasyonunun yapılması tavsiye edilmektedir (LaRocco & Paeng, 2020). Dokümantasyondan elde edilen veriler, örneğin kültürel mirasların deformasyonunu izlemek ve restorasyon çalışmalarını desteklemek gibi birçok alanda kullanılabilir. Geçmişte, belgeleme için çok sayıda teknik kullanılmıştır. Eserleri ya da eser gruplarını belgelemek için eski fotoğraflardan, haritalardan, çizimlerden, projelerden, arşivlerden, resimlerden, gravürlerden, arkeolojik verilerden ve seyahat notlarından bilgi edinilebilir.

Belgeleme kapsamlı ve uzun bir süreçtir (Günen vd., 2019; Halaç & Öğülmüş, 2021). Araştırma, inceleme, gözlem, detaylandırma, tanımlama, terminolojik bilgi ve diğer verilerin elde edilmesi gibi çok çeşitli faaliyetleri içerir. Sadece bir eserin veya eser grubunun geometrisini değil, aynı zamanda diğer ilgili parametreleri de kaydetmek önemlidir (Moyano vd., 2020; Muenster, 2022). Bir eseri benzersiz ve özel kılan tüm özellikler önemlidir ve dikkate alınmalıdır. Buna sosyal, tarihi, akustik ve mimari hususlar da dâhildir. Günümüzde, ölçme teknikleri olarak; nivelman aletleri ile belgeleme teknikleri, teodolitler, total istasyonlar, GNSS, LiDAR ve yer tarayıcıları ile belgeleme ve hava ve yer fotogrametrisi gibi çeşitli belgeleme teknikleri kullanılmaktadır. Geleneksel ölçmeye ek olarak, daha gelişmiş lazer tarama ve fotogrametri teknikleri de vardır.

Kültürel mirasın belgelenmesinde; uygulama aşamasında fazla insan gücüne bağlı olması, zaman alıcı olması ve doğruluk açısından yeterli olmaması gibi faktörlerden dolayı eski belgeleme teknikleri yerine yüksek çözünürlükle birlikte yüksek doğruluğa sahip, fazla insan gücüne bağlı olmayan ve hızlı belgeleme teknikleri tercih edilmektedir (Negiz, 2017; varol vd., 2021). Yıllar boyunca doğru ve güvenilir 3B dijital sahne rekonstrüksiyonu oluşturmak için çeşitli metodolojiler önerilmiştir. Bunlar arasında, görüntü tabanlı modelleme (örn. fotogrametri), menzil tabanlı yaklaşım (örn. yersel lazer tarayıcı/YLT) veya yukarıda bahsedilen teknolojilerin entegrasyonu şu anda en üretken olarak kabul edilmektedir (Remondino, 2011). Bununla birlikte, benimsenecek uygun teknoloji ve prosedürün seçimi her zaman zorlu bir konudur (McCarthy vd., 2020). Aslında böyle bir seçim, araştırılan nesnenin boyutu ve karmaşıklığının yanı sıra gerekli doğruluk düzeyi ve konum kısıtlamalarından da etkilenmektedir. Genellikle menzil tabanlı yaklaşımlar, yüksek çözünürlüklü bir geometrik model oluşturmaya olanak tanıyan yüksek yoğunluklu bir 3B nokta bulutu üretirken, görüntü

tabanlı teknikler yalnızca ana nesne yapısını tasvir eden yüksek çözünürlüklü dokulu 3B modeller oluşturmaya daha uygundur (El-Hakim, 2004). Her iki araştırma tekniğinin çıktılarının birleştirilmesi, potansiyellerinin tamamen kullanılmasına ve sınırlarının azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Menzil tabanlı sensörler arasında YLT, herhangi bir çalışma nesnesinin doğru 3B yoğun nokta bulutlarını hızlı bir şekilde çıkarma yeteneği sayesinde kültürel miras alanında büyük ölçüde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntem, esas olarak homojen olmayan bir nokta bulutu oluşturabilen donanımın görüş açısı mesafesi ve eğitim sorunları nedeniyle sınırlamadan bağımsız değildir (Jo, 2019). Bu yüzden çoğu eser, donanımın görüş açısının incelenecek öğeye dik ve nispeten yakın konumlandırılmasıyla yalnızca kısmen çözülebilir (Oğul 2020). Ayrıca, gerekli aletlerin ulaşılması zor alanlarda taşınması ve düzenlenmesinin karmaşıklığından dolayı ek kısıtlamalar ortaya çıkabilmektedir. Son olarak YLT, veri toplamak ve işlemek için hem donanımsal hem de zaman maliyetleri açısından dezavantajlıdır (Oğul 2020). Buna karşılık fotogrametri, 2B görüntü ölçümlerini 3B bir modele dönüştürmek için perspektif veya projektif geometri formülasyonlarının uygulanmasına dayanmaktadır. Bu, aynı öğeyi farklı konumlardan gösteren fotoğraflardaki karşılık gelen noktaların tespit edilmesiyle gerçekleşmektedir. Bu tür prosedürler başlangıçta manuel olarak gerçekleştirilmiş (analitik ve analogik fotogrametri) ve ancak 1990'larda otomatikleştirilmiştir (dijital fotogrametri).

Fotogrametrik veriler, mevcut farklı veri toplama platformları (uzay, hava, İHA ve yersel) kullanılarak toplanabilmektedir. Colomina vd., (2014) tarafından vurgulandığı üzere, bunlar arasında İHA, düşük maliyetli araçlar kullanarak yüksek çözünürlüklü metrik ve niteliksel verilerin elde edilmesine olanak tanıdığı için geçerli bir alternatiftir (Ulvi vd., 2019). Gerçekten de başlangıçta askeri alanda kullanılan ve daha sonra sivil sektöre tanıtılan elektronik ve optik cihazların (örneğin, entegre devreler, radyo kontrollü sistemler) sürekli gelişimi, sensör boyutu ve ağırlığının azaltılmasıyla birlikte, maliyetlerinde ciddi bir düşüşe neden olmuş ve piyasada yayılmalarını desteklemiştir. Dahası, İHA pilot için herhangi bir risk oluşturmadan düşük irtifalarda uçabilmektedir (Palladino, 2018). Bu, uçuş görevinin uygun şekilde planlanması yoluyla, incelenen nesnenin boyutuna uyarlanmış bir Yer Örneklem Aralığı (YÖA) elde etmenin yanı sıra erişilmesi zor alanlara ulaşmak gibi kullanıcıların ihtiyaçlarının karşılanmasına olanak tanımaktadır (Luhmann, 2020). Bununla birlikte, bu yaklaşımın bazı dezavantajları vardır; özellikle, yalnızca küçük

boyutlu alanlara uygulanabilir ve sonuçta ortaya çıkan nokta bulutu kalitesi yer kontrol noktaları (YKN) miktarı ve dağılımından, uçuş planlarından ve kamera kalibrasyon parametrelerinden (Saponaro vd., 2020; Capolupo vd., 2020) etkilenmektedir. Bu nedenle, Hareketten Yapı (SfM) tekniklerinin MultiView Stereo (MVS) algoritmalarıyla entegrasyonuna dayanan İHA dijital fotogrametrisi, YLT'den üretilenlerden daha homojen ancak daha az yoğun nokta bulutları üretilmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, iki belgeleme yöntemiyle üretilen doğru 3B verilerden çıkarılan özdeğerlerden türetilen geometrik özelliklerin tutarlılığını değerlendirmek ve karşılaştırmaktır. İHA fotogrametrisi ve YLT teknikleri, kültürel miras alanında doğru 3B sahne rekonstrüksiyonları üretmek için en popüler teknikler oldukları için seçilmiştir. 3B nokta bulutları oluşturulduktan ve doğrulukları değerlendirildikten sonra, her iki verinin referans verisi ile doğruluk analizi yapılmıştır. Ek olarak her iki veriden üretilen nokta bulutları CloudCompare yazılımında C2C analizi ile değerlendirilip analizler yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak Mersin İli'nin Tarsus İlçesindeki Nusret Mayını gemisi seçilmiştir. Almanya'da imal edilen bu mayın gemisi başarı anlamındaki Nusrat adını taşımaktaydı. Çanakkale Deniz Zaferinde önemli rolü olan Nusret Mayın gemisi 40 metre uzunluğunda ve 7.5 metre genişliğinde bir gemidir. Türk Deniz Kuvvetlerindeki görevi 1955 yılında sona ermiş ve 1962 yılında özel bir gemicilik şirketine satılmıştır. Gemi kuru yük gemisi olarak hizmet görürken, 1989 yılında Mersin limanında batmıştır. 1999 yılında Mersin'deki bir gönüllü grubu batık gemiyi çıkarmış ve gemi 2002 yılında Tarsus Belediyesince satın alınmıştır. Daha sonra gerekli temizleme ve düzenleme çalışmaları yapılmıştır. Çanakkale Savaşları ile ilgili heykellerin de yer aldığı bir çevre düzenlemesi ile anıt haline getirilmiştir. Gemi Mersin ili Tarsus ilçesinde ilçe merkezini Mersin'e bağlayan ana cadde üzerinde ve $36^{\circ}54'26''\text{K } 34^{\circ}53'04''\text{D}$ koordinatlarındadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı.

2.2. Kullanılan Donanımlar

2.2.1. Yersel Lazer Cihazı ve Veri Toplama

Lazer tarama saha çalışması için Faro Focus S350 YLT cihazı kullanılmıştır (Şekil 2). Yersel lazer tarayıcılar uzunluk ölçüm prensiplerine göre üç sınıfa ayrılır: uçuş süresi, üçgenleme ve faz farkı tarayıcıları. Uçuş süresi tarayıcılarının tarama aralığı çok geniştir. Faz farkı ölçümüne sahip tarayıcılar daha kısa mesafeleri ölçebilir ancak ölçüm doğruluğu, uçuş süresi ölçümüne sahip tarayıcılardan daha hassas ve doğrudur. Ayrıca üçgenleme yöntemiyle çalışan lazer tarayıcılar, faz farkı yöntemiyle ölçüm yapan lazer tarayıcılara göre daha hassas ve doğru sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte üçgenleme yöntemini kullanan lazer tarayıcılar küçük nesnelere için etkilidir (Abbas vd., 2017; Atik vd., 2020). Temel bilgileri Tablo 1'de verilen FARO Focus S350 lazer tarayıcı 0,6-350 m aralığında, saniyede 976.000 nokta toplama kapasitesiyle faz farkı yöntemine göre çalışmaktadır. FARO lazer tarayıcı, lazer, ayna ve entegre kameradan oluşan tek bir lazer ünitesine sahiptir. Faro Focus S350 genellikle kısa mesafeli tarama için veya detaylandırmanın gerekli olduğu iç mekân taraması için kullanılır, çünkü bu tarayıcı için maksimum menzil 350 metredir. Bir araştırma tasarımı öncelikle YLT istasyonlarının konumlarını tanımlamalı, böylece istenen mekânsal çözünürlükte tüm nesne kapsamı garanti edilebilmelidir. Lazer tarayıcı yakın mesafelerde yaklaşık 1-2 mm hassasiyetle ölçümler üretebilir. Bir yüzey üzerindeki noktaların yoğunluğu tarayıcının çözünürlüğüne bağlı olacaktır.



Şekil 2. FARO Focus S350 YLT cihazı.

Birçok lazer tarayıcı üreticisi, belirli bir mesafede nokta yoğunluğunu sağlayan bir ayar sunmaktadır. Örneğin, FARO lazer tarayıcısındaki 14'lük çözünürlük, 10 m mesafede yaklaşık 6 mm'lik bir nokta aralığına neden olur. Bu ayardaki nokta yoğunluğu, tarayıcıdan 5 m uzaklıktaki bir nesne için 3 mm ve tarayıcıdan 1 m uzaklıktaki bir nesne için 0,6 mm olacaktır. Aksine kalite, bir noktanın örneklenme sayısı ile ilgilidir. Noktadan ne kadar çok örnek alınırsa verinin bilinen veya gerçek değere mümkün olduğunca yakın olması

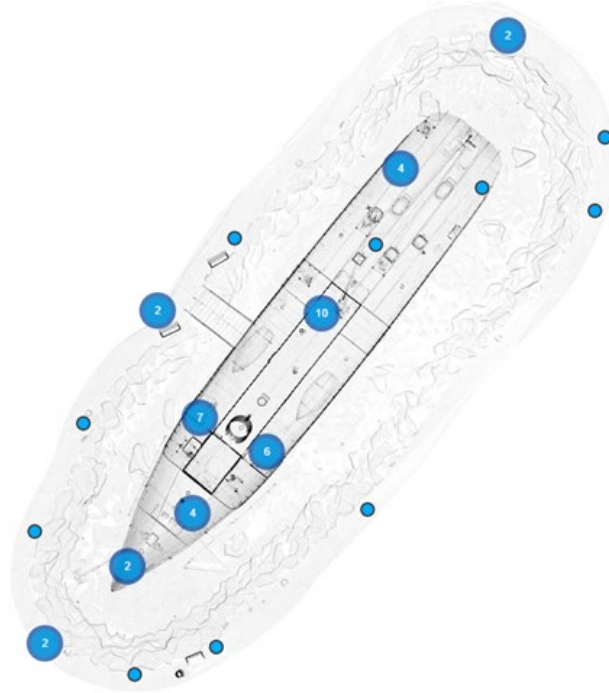
gerekir. Kalite ne kadar yüksek olursa tarama o kadar fazla zaman almaktadır. Örneğin, ¼ çözünürlükte ve 1x kalitede tarama süresi 1 dakika 30 saniye olurken, aynı çözünürlükte 4x kalite ayarında tarama süresi 7 dakika 46 saniye olur. Bu çalışmada ¼ çözünürlük ayarı ve 3x kalite ayarı kullanılmıştır. Tarayıcı eserden kabaca 1 m uzağa yerleştirildi, bu da 1 mm'den daha az bir nokta aralığına yol açmıştır.

Tablo 1. FARO Focus S350 YLT cihazı teknik özellikleri.

Özellik	Değeri
Ağırlığı	12.25 kg
Uzunluk Ölçüleri	238*358*395 mm
Çözünürlük	700 MP
Batarya Adedi	2
Batarya Süresi	13 Saat
SD Kart	256 GB
Uygun Çalışma Sıcaklığı	(-20) - 50 C°
Uzaklık Hassasiyeti	± 5 mm
Veri Alma Mesafesi	0.4 m - 1 km+
Görüş Alanı	360° yatay 290° düşey
Ölçüm Hızı	1 Mn nokta/saniye
Ölçme Prensibi	Time of Flight

Lokasyon belirlenirken, bir önceki tarama noktasında taranan alan ile bir sonraki taranacak alan arasında en az %60 örtüşme olmasına dikkat edilmiştir. Bazı test alanlarında yansıtıcı yüzeyler bulunmaktadır. Çalışma, lazer tarama teknolojilerinin farklı alanlardaki performansını test etmeyi amaçladığından bu yansıma alanlarına ekstra bir önlem alınmamıştır. YLT verileri toplandıktan sonra farklı lokasyonlardan taranan veriler buluttan buluta yöntemiyle birleştirip hedeflerle referanslanmıştır. Referanslama öncesinde her bir alanın nokta bulutu verileri Stray filtresi, Dark tarama filtresi ve Uzaklık filtresi yöntemleriyle filtrelenerek YLT nokta bulutu verileri temizlenmiştir. Daha sonra veriler yeniden örneklenir ve Görüntü işleme aşamasına geçilmektedir. Son aşama olan Görüntü işleme bölümünde isteğe bağlı 3B model üretimi için Üçgen Mesh ve Doku Haritalama ile yüksek kalitede 3B modeller üretilebilmektedir.

Veri toplama işleminin ilk kısmı bulutsuz ve sıcak bir günde sabah 10 ile öğleden sonra 2:30 arasında gerçekleştirilmiştir. Toplamda, Geminin çeşitli mesafelerden ve açılardan tam ve yoğun bir nokta bulutu elde etmek için toplam 49 tarama pozisyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. 49 oturumluk lazer taramanın kuşbakışı tarama planı.

2.2.2. İHA Cihazı ve Veri Toplama

Fotogrametri verilerinin toplanması için kullanılan İHA, özellikle fotogrametrik araştırmalar için uygun olan Autel EVO2 seçilmiştir (Şekil 4).

İHA tarafından yakalanan görüntülere SfM algoritmasının uygulanması için dijital görüntülerin konum özellikleri ve coğrafi etiketlemesi gereklidir.

Bunun nedeni, SfM algoritmasından türetilen kamera konumunun, YKN koordinatları tarafından sağlanan ölçek ve yöne sahip olmamasıdır. Böylece, gerçek yer bilgisi gibi YKN'lerin hassas ölçümü için, hassas ölçüm cihazı (Total-station) kullanılarak konum doğruluğunu doğrulamak amacıyla 28 YKN referans noktası ve 12 Denetleme Noktası (DN) ölçümü yapılmıştır. İHA fotogrametrisi YLT verilerinin

toplandığı gün ve saat aralığında yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan İHA, AUTEL'in 8K (8000 × 6000) çözünürlüklü Robotics XT701 kamerası, 1/2 CMOS görüntü sensörü ve FOV'si 79° ve odak uzaklığı olan lens ile monte edilen EVO2 Dual 640 T'dir. Kayıpsız 4× optik yakınlaştırmayla 4,3–17,2 mm'dir. İHA fotogrametrisi yöntemi ile 3B nokta bulutunu oluşturmak için kullanılan ekipmanın ayrıntılı özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 4. Autel Robotics EVO2 İHA genel görünümü.

Tablo 2. Autel Robotics EVO2 İHA genel ve teknik özellikleri.

Özellik	Değer
360 Derece Takla	Yok
Başsız Mod	Var
Beni Takip Et	Var
Engel Sensörü	12 Yönlü
FPV	Var
Hareketli Gimbal	3 Eksenli Gimbal
Kaza Koruma	Var
Otomatik Eve Dönüş (RTH)	Var
Otomatik Rota Takip	Var
Sabit İrtifa	Var
SD Kart Desteği	Max 128 GB
Tek Tuş İniş	Var
Tek Tuş Kalkış	Var
Sivil Havacılık İzni	Gerektirir
GHZ	5.8 GHz
Kanal	12 Kanallı
Uygulama Kontrol	Var
Ağırlık	650gr-750gr
Batarya	4300 mAh LiPo
Ebat	16cm-18cm
GPS Modu	GPS Var
Kamera	8K
Maksimum Hız	50kmp-70kmp
Uçuş Mesafesi	7000m-8000m
Uçuş Süresi	35-40 Dakika

İHA ile havadan fotoğraf verisi toplamanın iki yolu vardır. Bunlardan ilki uzman İHA pilotu tarafından manuel uçuştur. İkinci veri toplama şekli ise yazılımlar aracılığı ile tam otomatik bir uçuş planlaması ile oluşturmaktadır. Çalışmada tam otomatik bir uçuş planı yapılmıştır. Uçuş yazılımı olarak Pix4D Capture yazılımı kullanılmıştır. Otomatik uçuş için, İHA'nın önceden tanımlanmış yolu mümkün olduğunca doğru bir şekilde otomatik olarak uçabilmesi için kullanılan bir uçuş planı hazırlamak önemlidir. İlk adımda, İHA için bir sınır görevi gören ilgi alanı tanımlanmalıdır. Ek olarak, bir uçuş ızgarası oluşturmak için kamera ayarlarının planlama yazılımına entegre edilmesi gerekmektedir. Son olarak, görüntü örtüşmesinin yanı sıra uçuş yüksekliğinin de ayarlanması gerekir. Bu proje senaryosu için 20 m'lik bir uçuş yüksekliğinin yanı sıra %80'lik bir önden görüntü örtüşmesi (Boyuna bindirme) ve yandan görüntü örtüşmesi (enine bindirme) tanımlanmıştır. Nihai uçuş planı uçuş yolu için "çift ızgara" olarak adlandırılan bir yol tanımlanmıştır. Ek olarak hava görüntüleri kamera açısı olarak aşamalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak nadir görüntüler toplanmış ardından aynı uçuş planı ile 45° ve 60°'lik kamera açıları ile görüntüler toplanmıştır. Eğik görüntülerin kullanılmasının nedeni, cephenin bazı kısımlarının da kamera ile yakalanabilmesidir. Ulvi (2021) veri füzyonunu desteklemek için eğik görüntülerin alınmasını önermiştir. Bu ayrıntılar daha sonra TLS ve İHA-fotogrametri verilerinin veri füzyonu için daha iyi görülebilir (Ulvi, 2021). Her uçuş yaklaşık 16 dakika sürmüştür ve toplamda 3 uçuş yapılmıştır. Sonuç olarak, her üç uçuşta toplam 203 görüntü yakalanmıştır.

2.3. Lazer Tarama ve Fotogrametri Yöntemi

2.3.1. Lazer Tarayıcıların Ölçme Prensipleri

Lazer tarayıcıların çalışma sistemindeki en önemli faktörlerden biri olan lazer mesafe ölçümü için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında faz farkı ölçümü, uçuş zamanı ölçümü (Time of Flight) ve üçgenleme sayılabilir. Bu yöntemler ile elde edilen nokta bulutu verileri, objenin 3B modelini oluşturmak için kullanılan referans koordinat sistemi ile birleştirilmektedir.

Lazer tarayıcılar, ölçülüp 3B' a dönüştürülecek nesneyi dikey ve yatay yönde belli bir açı ile nokta dizileri halinde tarayarak nokta bulutu şeklinde görüntülenmesini sağlamaktadır (Ağca vd., 2016; Şenol vd., 2019; Aldao vd., 2021). Nokta bulutunda bulunan her bir lazer noktası için orijini tarayıcı alet kabul eden kutupsal koordinatlar ölçülmektedir. Bunlar; ölçüm doğrusunun x eksenini ile yatay

düzlemde yaptığı açı α , ölçüm doğrusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı θ ve ölçülen noktaya olan eğik uzaklık q' dur (Ossowski & Tysi c, 2018;  zdođan & Deliormanlı, 2018; Son vd., 2020; Kabadayı, 2023). Bununla birlikte ölçüm mesafesine ve ölçülen nesnenin yüzey yapısına göre geri dönen lazer ışınının yoğunluğu da ölçülerek kaydedilmektedir (Altuntaş & Yıldız, 2008; Alptekin vd., 2019). Total stationlar gibi belli bir noktaya kurulum yapılarak yönlendirilemeyen yersel lazer tarayıcılar, her defasında farklı bir doğrultuda tarayıcı merkezli x , y , z eksenleri gösterecektir. Bu sebeple bir alan için yapılan tüm taramalar, ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmelidir (Kaya vd., 2021; Balcı, 2022; Yiğit vd., 2023). Lazer tarayıcı ile bir bina taranacaksa eğer, tarayıcı bir noktaya kurulur ve tarayıcının gördüğü yüzey taranır daha sonra tarayıcı ilk tarama yüzeyinin hemen bitişik alanını tarayacak şekilde uygun bir yere konumlandırılarak tarama yapılmaktadır. Ancak bu noktada önemli olan husus ardışık taramalarda belirli oranda alan taramalarında örtüşme bulunmalıdır. Yani kısaca her taramada bir önceki alan taramasından belirli bir kısım tekrar taranmaktadır.

Üçgenleme Metodu: Bu metoda göre tarayıcıdan çıkan lazer ışını yansıtıcı alete gider ve yansıtıcı alet ışını nesneye gönderir, nesneden tekrar yansıyan ışını CCD (charge-coupled device) kamera toplamaktadır. Nesne yüzeyindeki noktaların koordinatları oluşan üçgenlerden elde edilmektedir. Bu metod ile çalışan lazer tarayıcılarda konum belirlemek için tek kameralı veya çift kameralı çözümler uygulanmaktadır. Tek kameralı çözümü kullanan üçgenleme yönteminde baz uzunluğu değişmeyeceği için bu tarz tarayıcılar küçük objeler ve kısa menziller için iyi sonuçlar sağlamakla beraber ışığın uçuş zamanı prensibiyle çalışan lazer tarama cihazlarından daha doğru sonuçlar sağlamaktadır (Boehler & Marbs, 2002; Boehler vd., 2002). Çift kameralı çözüme sahip olan üçgenleme yöntemi ile tek kameralı çözüme sahip üçgenleme yöntemi aynı doğrulukta sonuç vermekle birlikte geometrik çözüm yöntemleri aynı prensibe dayanmaktadır.

Faz Farkı Metodu: Cihaz tarafından yayılan lazer ışınının faz farkını ölçmeyi çalışma prensibi olarak tanımlayan bir yöntemdir faz farkı metodu. Cihaz tarafından yayılan ışın ile nesne tarafından yansıtılan ışın karşılaştırılır ve faz farkı (kayma) belirlenir. Yayılan ve alınan sinyal arasındaki faz farkı, tarayıcı ile nesne arasındaki mesafeyi ölçmek için kullanılmaktadır.

Lazer Işını Gidiş Geliş Zamanı ile Ölçüm Metodu: Lazer ışını gidiş geliş zamanı ile işlem yapan tarayıcılarda, tarayıcı ile taranan nokta arasındaki uzunluk, lazer ışınının yayılması ve alınması arasındaki zaman farkı ölçülerek hesaplanır. Bu tür

tarayıcılarda nesne yüzeyinden yansıyan lazer ışını yakalayan bir foto diyot ve lazer ışını yayıldığında başlayan ve yansıyan ışın yakalandığında sona eren çok hassas bir zamanlayıcı bulunmaktadır. Bu mekanizmalar zaman farkını belirlemektedir.

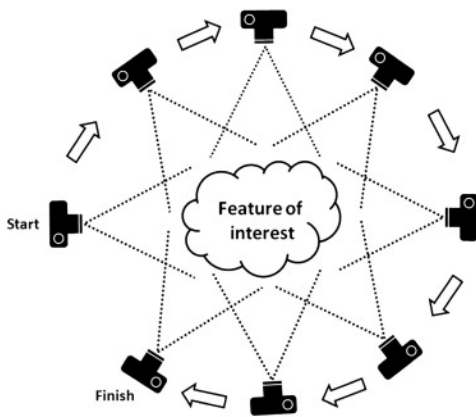
Yersel lazer tarama tekniğinde doğruluk ise, ölçüm cihazlarının tamamında olduğu gibi yersel lazer tarayıcılarla yapılan ölçümlerin sonuçları da ölçülen nesnenin biçimi, ışın geçirgenliği, yüzey pürüzlülüğü, yansıtıcılığı ve çevresel etkenler gibi farklı sebeplerden ötürü hatalı olabilmektedir (Çömert vd., 2012; Di Stefano vd., 2021). Bundan dolayı ölçüm sonrası gerekli düzeltmelerin yapılabilmesi adına diğer ölçme alet ve cihazlarında olduğu gibi yersel lazer tarayıcılarında hangi doğrulukta ölçüm yapıldığının bilinmesi önem arz etmektedir (Dittrich, 2017; Dustin vd., 2016). Yersel lazer tarayıcıların doğruluklarının araştırılmasıyla alakalı birçok yöntem geliştirilmiş olup yayınlanan sonuçlara göre lazer tarayıcıların ışın yapısına göre değişebilmekte olmasıyla birlikte genellikle 300 m'nin altındaki kısa mesafeler için 1 cm ve 1000 m'nin üzerindeki uzun mesafeler için ise 10 cm civarında ölçü hassasiyetine sahiptirler. Araştırılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre aynı yersel lazer tarayıcı kullanılarak yapılan uzunluk karşılaştırılmalarında, ölçüm doğruluğunun lazer tarama mesafesi ile ters orantılı, lazer tarama yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu saptanmıştır. Yani kısaca yersel lazer tarayıcılarda yakın mesafe ve yoğun tarama olduğunda daha iyi ve doğru sonuç verdikleri söylenebilmektedir. Ayriyeten veri kalitesini taranan nesnenin parlaklığı, yansıtıcı özelliği ve rengi etkilemektedir. 3B nokta bulutları incelendiğinde pürüzsüz ve düzgün olan nesnelerin nokta bulutu bozuk ve düzensiz olduğu saptanmıştır. Lazer ışınlarını daha az yansıtan siyah renkli nesnelerin nokta bulutunda bazı bölgelerin hiç nokta verisi olmadığı tespit edilmiştir. Tarama verilerinin değerlendirme aşamasında, nesnenin yüzey özelliklerine göre değişiklik gösterebilen 3B nokta bulutunun bazen yanlış ve düzensiz olabileceği ve tam anlamıyla taranan nesneyi yansıtmayabileceği göz ardı edilmemelidir.

2.3.2. İHA Fotogrametrisi ve SfM Algoritması

Fotogrametri, fotoğraflardan ölçümler yaparak nesnelerin 3B modellerini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Çok sayıda fotoğraf, belirli bir algoritma kullanılarak birleştirilir ve nesnenin yüksek çözünürlüklü 3B modeli elde edilir. Fotogrametri tekniği prensip olarak fotoğraflardan kaynaklanan hataları düzelterek doğru bilgiler üretmeye dayalı olup fotoğraf teknolojisi kadar da eski bir yöntemdir (Lumban-Gaol vd., 2018; Matys vd., 2021). Bu teknik,

bir arazinin veya objenin fotoğrafik görüntülerinin alınması, hacim ölçümü, koordinat ve yükseklik ölçümü, model dönüşümü, mesafe ve alan ölçümü ve yorumlanması süreçlerini kapsamaktadır. Havadan veya yerden çekilen 2B fotoğrafların belirli kurallara göre üst üste bindirilmesi ile gerçekleştirilir (Kabadayı, 2022; Yiğit & Uysal, 2021; Kaya vd., 2021). Bu teknik, mekânsal koordinatları bilinen kontrol noktalarına dayanır ve noktalar arasında üçgenleme yapılarak 3B modelin, 3B nokta bulutlarının, ortofoto görüntülerin ve Sayısal yükseklik modeli analizlerinin oluşturulmasını sağlamaktadır.

Hareketten Yapısal Algılama (Structure from Motion, Görüntüden Yapısal Model Oluşturma/Hareketten Yapı) olarak adlandırılan algoritma, stereoskopik fotogrametri ile aynı temel ilkelere dayanmaktadır (Kabadayı & Erdoğan, 2022). Bu, 3B yapıların bir dizi üst üste binen, ofset görüntüden çözülebileceği anlamına gelmektedir (Şekil 5). Bununla birlikte, algoritma geleneksel fotogrametriden temelde farklı olmaktadır. Burada, sahnenin geometrisi, kamera konumları ve yönlendirmesi, önceden bilinen 3B konumlara sahip bir hedef ağı tanımlamaya gerek kalmadan otomatik olarak çözülmektedir. Bunun yerine, demet ayarlaması için oldukça gereksiz, yinelemeli bir yöntem kullanılarak eş zamanlı olarak çözülmektedirler. Algoritma, bir dizi örtüşen görüntüden otomatik olarak çıkarılan özelliklerden oluşan bir veri tabanına dayanmaktadır (Snavely vd., 2008). Aşağıda açıklandığı gibi, bu yaklaşım yüksek derecede örtüşen görüntü setleri için en uygun algoritmadır. Yaklaşım, çeşitli konumlardan sahnenin 3B yapısının tamamını yakalamaktadır. Hareketli bir sensörden gelen görüntüler için uygundur.



Şekil 5. SfM tekniği genel mantığı.

İHA Fotogrametrisi; SfM'nin matematiksel ve istatistiksel modelleri ve geleneksel fotogrametri arasında farklılıklar vardır (Polat vd., 2020; Kaya vd., 2021; Yiğit vd., 2023). İHA fotogrametrisi, 3B nesne rekonstrüksiyonunu kullanır ve bu nedenle doğruluk yerine mevcut tüm verileri kullanarak yerel çözüm ve

yerel optimizasyon ile geleneksel fotogrametri ve ışın optimizasyonu modelleri kullanır (Polat vd., 2021; Yiğit & Uysal, 2021; Kabadayı & Erdoğan, 2023). Bununla birlikte geleneksel fotogrametri, küresel tutarlılık, model geçerliliği, ölçümlerin doğruluğu, uyumluluk ve temel olarak bütünsel/küresel bir matematiksel model içeren çözümler arar. Bu önemli fark, hava ölçümü, 3B dijital yüzey modeli oluşturma ve ortofoto oluşturma aracı olarak İHA fotogrametrisinin uygulanmasını ve disiplinlerini sınırlamaktadır. İHA fotogrametrisi, geleneksel fotogrametriyi iki gelişim alanıyla değiştirmektedir (Ulvi & Yiğit, 2020; Şenol & Çöltekin, 2022). Bunlardan ilki İHA fotogrametrisinde kullanılan matematiksel/istatistiksel modeldir. Aynı zamanda bu uygulama noktaları geleneksel fotogrametri ile uyumlu hale getirilmesidir. Diğeri ise, bütünsel-küresel bir matematiksel model tasarlama için fiziksel koşulların sağladığı olanakların, geleneksel fotogrametrisinin küresel çözümünün temeli olan sensör kamera lens kalitesi ve lens distorsiyonu hakkındaki bilgileri sayesinde İHA sensörleri için de geçerli olmasıdır (Cryderman vd., 2014). Öte yandan özel durumlarda, uygulama alanı ve koşullarında İHA fotogrametrisi ile gelişen model ve hesaplama yaklaşımları, geleneksel fotogrametrisinin hesaplama verimliliğini artırmaya katkıda bulunmaktadır (Torun, 2017).

Sonuç ürün odaklı bir yaklaşım olduğunda fotogrametri ile İHA fotogrametrisi (SfM) arasında fark yoktur, ancak hesaplama yaklaşımları ve süreçleri arasında kesin bir fark vardır. Bu fark fotogrametrisinin olgun geometrik, istatistiksel ve matematiksel temellerine dayanmaktadır. İHA fotogrametrisi, bilgisayarlı görmeye, nesne tanıma, görüntü haritalamaya ve geometrik dönüşüm algoritmalarına ve nokta modelleme modellerine dayanır. Bu fark nedeniyle, planlama, düzenleme ve hesaplama dikkate alınmadığında, belirli koşullar altında iki yaklaşım arasında önemli farklılıklar ortaya çıkması kaçınılmazdır (Cryderman vd., 2014).

Bir İHA fotogrametri uçağı tasarlarken, bazı karakteristik özellikler ön plana çıkmaktadır ve dikkate alınması önem arz etmektedir. Seçilecek hava aracında, taşıyabileceği yük miktarı ve uçuş süresi uçak seçiminin başarısında önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, haritalanacak alanın büyüklüğü ve doğruluk seçimi etkileyen faktörlerdir. Geniş alana sahip projelerde tamamen otomatik bir uçuş ve uzun uçuş süresi gerekeceği için uçuş süresi önemli bir etmendir. Özellikle geniş alanlarda hiçbir helikopter (geleneksel, Quadro, hexa veya octocopter) kullanılamaz, bunun yerine kesinlikle bir uçak kullanılmalıdır. Son yıllarda, düşük maliyetli üretilen İHA'lar farklı alanlarda, özellikle fotogrametride çok

yaygınlaşmıştır. Bu genişleme, model uçakların veya helikopterlerin geliştirilmesi, çok daha etkili elektronik ekipmanların geliştirilmesi, GPS ve INS sistemleriyle navigasyonun iyileştirilmesi ve fiyatların düşürülmesi ile açıklanabilir. Örneğin, % 90 etkili kullanımlı fırçasız motorlar, uzun ömürlü Li-Po (Lityum Polimer) aküler örnektir. Entegre devreler olarak bir kontrol cihazı ile birlikte GPS ve INS sistemlerinin pahalı olmayan üretimi multicopter gelişiminde çok etkili olmuştur. İHA'larla yapılan fotogrametrik çalışmaların büyük ve geniş alanlarda desimetre düzeyinde doğruluk sağladığı bilinmektedir (Eisenbeiss, 2004).

2.4. ICP Algoritması ve C2C Tekniği

Lazer tarama yöntemi ve fotogrametrik 3B nokta bilgisi ölçme ve cisim modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer tarayıcı verileri ile fotogrametriden elde edilen 3B verilerde en önemli işlem adımı aynı cisim için farklı yöntemlerden üretilen nokta bulutlarının ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmesidir. Nokta bulutlarının birleştirilmesi fotogrametri ve bilgisayar bilimcileri için hala önemli bir araştırma konusudur. Nokta bulutlarını birleştirme yöntemlerinin literatürde farklı sınıflandırmaları da bulunabilir. Nokta bilgileri kullanılarak uygulanan iteratif en yakın nokta (ICP) yöntemi (Besl & McKay, 1992; Li vd., 2020) uygulamada en yaygın kullanılan yöntemdir ve birleştirme doğruluğu oldukça yüksektir. Yöntemin olumsuz yanı hesaplama süresinin uzun olmasıdır. Diğer yandan, ölçülerinin (nokta bulutlarının) otomatik birleştirilmesinde, dönüşüm parametreleri önce yaklaşık olarak hesaplanmakta daha sonra hassas yöneltme uygulanmaktadır (coarse-to-fine). Yaklaşık yöneltme herhangi bir yöntemle yapıldıktan sonra, hassas yöneltme genellikle ICP yöntemi ile uygulanmaktadır.

Hassas çakıştırma için iyi bilinen bir yöntem ICP algoritmasıdır (iteratif en yakın noktalar). Bir nokta bulutundaki her nokta ile diğer nokta bulutundaki en yakın nokta arasında benzeşmeler oluşturulur. Daha sonra bir noktadan noktaya hata ölçütü (benzeşmelerin karesel uzaklıklarının ortalaması) en aza indirilir. İşlem, hata bir eşikten küçük olana veya maksimum iterasyona ulaşılan kadar tekrarlanır (Yan vd., 1979). ICP çakıştırma, serbest formlu yüzeylerin çakıştırılması için doğru ve güvenilir bir yöntemdir (Besl vd., 1992). ICP algoritması, hedef nokta kümesi S ile referans nokta kümesi M arasındaki T rijit dönüşümünü bulmak için kullanılır, böylece iki eşleşen veri bir tür metrik kıstas altında optimum eşleşmeyi sağlar. Hedef nokta kümesi S'nin koordinatlarının $\{S_i | S_i \in R^3, i = 1, 2, \dots, N_S\}$ referans nokta kümesi M'nin koordinatlarının $\{M_i | M_i \in R^3, i =$

$1, 2, \dots, N_M\}$ olduğu varsayılırsa, k' inci iterasyonda, S nokta kümesinin koordinatlarına karşılık gelen noktanın koordinatları $\{M_i^k | M_i^k \in R^3, i = 1, 2, \dots, N_M\}$ olur. S ve M^k arasındaki dönüşüm matrisi hesaplanır ve veriler arasındaki mesafe verilen τ eşliğinden az olana kadar orijinal dönüşüm güncellenir. ICP algoritması adımları aşağıdaki gibidir (He vd., 2017):

- (1) $\|M_i^k - S_i^k\| = \min$ olacak şekilde M referans kümesinde karşılık gelen $M_i^k \in M^k$ noktasını hesaplayın;
- (2) $\sum_{i=1}^N \|R^k S_i^k + T^k - M_i^k\|^2 = \min$ olacak şekilde R^k döndürme matrisini ve T^k öteleme vektörünü hesaplayın;
- (3) $S_i^{k+1} = \{S_i^{k+1} | S_i^{k+1} = R^k S_i^k + T^k, S_i^k \in S\}$ hesaplayın;
- (4) $d^{k+1} = \sum_{i=1}^N \|S_i^{k+1} - M_i^k\|^2$ hesaplayın;
- (5) d^{k+1} verilen τ değerinden küçük değilse, $d^{k+1} < \tau$ veya k yineleme sayısı önceden ayarlanmış maksimum yineleme sayısından büyük olana kadar (+1) döndürün.

ICP algoritmasının ortalama karmaşıklığı $O(n \log n)$ 'dir (burada n nokta bulutu noktalarının sayısıdır) ve etkin bir şekilde yerel bir minimuma yakınsanabilir. Uygun bir başlangıç dönüşümünün tahmin edilmesi gereklidir ve ICP algoritması, hedef nokta kümesinin tüm noktalarının referans noktaları kümesine karşılık geldiğini varsaymaktadır (He vd., 2017).

C2C analizi ise referans nokta bulutu ile karşılaştırılan nokta bulutu arasındaki her noktanın en yakın komşu mesafesini Hausdorff mesafe yapısı kullanarak hesaplanması metodolojisi ile çalışmaktadır (Denklem 1). En yakın komşu mesafesi ilkesi, karşılaştırılan nokta bulutundaki her nokta için referans bulutundaki en yakın noktanın arandığı ve Öklid mesafesinin hesaplandığı iki nokta arasındaki mesafeleri hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$h(A,B) = \max_{\alpha \in A} \min_{\beta \in B} (\min_{\beta \in B} \{d(\alpha, \beta)\}) \quad (1)$$

Denklemde;

$\alpha = A$ setinin nokta sayısı

$\beta = B$ setinin nokta sayısı

$d(\alpha, \beta) =$ Bu noktalar arasındaki herhangi metrik, anlamına gelmektedir.

2.5. Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi, çalışmanın doğruluğunu ve güvenilirliğini ölçmek için son adımdır (Yiğit vd., 2023). Doğruluk analizini gerçekleştirmek için karesel ortalama hata (KOH) yöntemi kullanılarak doğruluk analizi yapılacaktır. Bu yöntemde aynı birimdeki iki

verinin farkı bulunur (Denklem 2) ve farklarının karesini veri sayısının bir eksiğine bölüp karekökü (Denklem 3) alınarak karesel ortalama hata hesaplanmaktadır. Karesel ortalama hata değerinin küçük olması verilerin birbirine yakınlığı ve ölçünün duyarlı olduğu anlamına gelmektedir. Bu çalışmada referans verisi olarak Total-station verileri kabul edilmektedir.

$$V_{x,y,z,i} = X, Y, Z_{\text{totalstation}_i} - X, Y, Z_{\text{YLT,İHA}_i} \quad (2)$$

$$KOH_{x,y,z} = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (3)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. YLT ve İHA Fotogrametrisi ile Dijital Ürünlerin Üretilmesi

Saha çalışmasına ilk olarak Nusret Mayın Gemisi Kültür Parkı içerisinde ölçüm ve çekimler yapabilmek için gerekli izinlerin alınması ile başlanmıştır. Gerekli izinler alındıktan sonra lazer tarama işlemi için gün ve saat planlaması yapılmıştır. Saha çalışması süreci iç ve dış mekân lazer tarama adımları 1 gün sürmüştür. Çalışma sonunda doğruluk analizinde kullanmak üzere gemi üzerinden el ile ölçü alma işlemleri ise aynı gün tamamlanmıştır. Çalışma kapsamında hibrit bir metodoloji sunulduğu için hem YLT hem de İHA fotogrametrisi ile veriler elde edilmiş ve sonuç ürünleri üretilmiştir. Bu yüzden bu kısım her iki yöntemi beraber ele almaktadır.

YLT'den beklenen sonuçları elde etmek için yüksek verimlilik için referans noktalarının doğru yerleşimini planlamak, tarama konumlarının sayısını tahmin etmek ve doğru yerleşimlerini planlamak önemlidir. Tarayıcı konumları arasındaki ilişki hakkında hızlı bilgi alabildiğimizde kayıt ve işlem sonrası süreç için yararlı olmaktadır. Nesnenin boyutuna ve karmaşıklığına bağlı olarak tarayıcı konumları her senaryo için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi kültürel miras eseri, izin alınamayan alanların dışını kapsayacak şekilde tarama pozisyonlarının da buna göre ayarlanması gerekmektedir. Tarayıcının konumundan, dijitalleştirme sırasında yeniden yapılandırma çalışmasının gerçekleşeceği gerçeği de dikkate alınmıştır. Tarama kalitesini etkileyebilecek diğer etkenler tozlu ortam ve güvenlidir.

2B proje dokümantasyonu oluşturmak için iki önemli parametrenin, çözünürlük ve kalitenin ayarlanması gerekmektedir. Bu iki parametre, tüm süreç için en önemli parametrelerdir, çünkü yakalanan ayrıntı düzeyini ve bir tarayıcı konumundan veri elde etmek için gereken süreyi etkilerler; bu, tüm verileri

elde etmek ve doğru şekilde yardımcı olmak için gereken toplam süreye yeterince yansıtılır. Bireysel taramaların son işlemlerde kaydedilmesi sürecidir. İlk parametre olan çözünürlük, nokta mesafesini belirler ve bu da ayrıntı düzeyini belirlemektedir. Bu parametreyi artırarak daha fazla sayıda noktanın yakalanmasını sağlanacak ve aynı zamanda mesafeler azaltılacaktır. Aksi takdirde, bu parametrenin düşürülmesi, daha az sayıda noktanın yakalanmasına ve aralarındaki mesafenin artmasına neden olmaktadır. Amaçlarımız doğrultusunda, ilgilenilen nesneye olan mevcut mesafenin hesaplanmasında gereken ayrıntı düzeyi ve zaman tasarrufuna dayanarak 1/4 çözünürlük seçilmiştir. Bu, tarayıcıdan 10 m uzaklıktaki 6,136 mm'lik noktanın mesafesini temsil etmektedir.

Kalite ayarı öncelikle ölçüm hızını ve 'gürültü' azaltma seviyesini belirler; yani artan kalite değeri, tarayıcının her tarama noktasında harcadığı ölçüm süresini artırırken, bilgiyi doğrulamak için birden fazla ölçüm gerçekleştirir ve ardından sonucun ortalaması alınmaktadır. Yukarıdakilere ek olarak bu parametre aynı zamanda tarama noktalarındaki farklılıkların ayrıntının mı yoksa gürültünün doğru bir temsili mi olduğunu belirleyen bir gürültü azaltma algoritması kullanılmıştır. Algoritma, taranan noktaları birbirine belirli bir mesafede karşılaştırır ve aralarındaki farkın, kalite ayarının belirlediği tolerans dahilinde olup olmadığını belirlemektedir. Aksi takdirde tarama noktası kaldırılır ve bu da gürültünün azalmasına neden olmaktadır. Bu parametrenin ayarı aynı zamanda büyük ölçüde iç veya dış alanlar, hava koşulları vb. gibi tarama koşullarına da bağlıdır. Zamandan tasarruf etme koşulunu karşılamak için en uygun koşulları elde etmeye ve dolayısıyla kalite ayar parametresine (2x) ulaşmaya çalışılmıştır. Sahadaki ön ölçümlere dayanarak, tarayıcı konumları arasındaki mesafenin ve referans noktalarının tarayıcı konumundan uzaklığının belirlenmesi gerekmektedir. Dış alanı tararken her zaman belirli bir zamandaki hava koşullarını dikkate almak gerekmektedir. Bu ölçümler aynı zamanda ideal hava koşullarında 1/4 çözünürlükte 2x kalite ayarının ve referans noktalarının ve hedeflerin konumunun 10 m'ye kadar mesafede kullanılmasının yeterli olduğunu göstermektedir. Tarama, Faro Focus X 330 yersel lazer tarayıcı ile 330 m mesafeye tarama imkânı ve 2 mm doğrulukla gerçekleştirildi. Mümkün olan en yüksek doğruluğu elde etmek için referans kâğıt hedeflerden (dama tahtaları) oluşan bir kombinasyon kullanılmıştır. Bu tür yersel lazer tarayıcıyı kullanırken, referans hedefleri kullanmadan tarama yapmak mümkündür; bu da sonuçta zamandan ve paradan tasarruf sağlar, ancak nesnenin tarama doğruluğundan ödün vermektedir. Referans hedefleri

olmadan tarama yaparak daha yüksek doğruluk elde etmek için, tarama konumlarının çok kısa bir mesafeye yerleştirilmesi gerekli olacaktır; bu da çok daha fazla sayıda son tarayıcı konumu ve sahada çok daha fazla zaman harcanmasını gerektirecektir. Öte yandan, referans hedeflerin kullanılması, daha önce bahsedilen duruma kıyasla sahada geçirilen süreyi yalnızca biraz uzatacak ve aynı zamanda yazılım ortamındaki kayıt sürecini de basitleştirecektir. Hedef işaretlerinin konumları, yazılımın bunları otomatik olarak referans öğeleri olarak tanıdığı veri işlemede kullanılır. Bunları temel alarak, farklı açılardan taramaları otomatik olarak birleştirir ve böylece taranan nesnenin karmaşık bir nokta bulutunu oluşturmaktadır. İki tarama konumu arasında en az üç ortak referans noktası olması gerektiğine dikkat etmek de önemlidir. Bireysel taramaların son işleme kapsamında uyumlaştırılması ve koordinasyonu, entegre GPS alıcısı tarafından sağlanmaktadır. Geminin tamamında yersel lazer tarama açısından en zorlu manzara gemini üst katları ve dar alanlarıydı. Buraların dar olması ve yüksek olması bu kısımları arasındaki geçişler zorlaştırmıştır. Aynı zamanda tehlikeli bacaların olması, yüzeyde yoğunlaşma, duvarlarda dökülme vb. gibi birçok neden olumsuz etkilemiştir. Veri elde etmek için gereken süreyi kısaltmak gerekiyordu. Veri toplama için gereken sürenin minimum düzeyde olmasını sağlamak için tarayıcı ayarları düzenlendi. Taramalar sonunda YLT'ye entegreli yüksek çözünürlüklü kamera ile çekilen RGB resimler ile gerçekleştirilmiştir.

Lazer tarama gemi çevresinde ve güvertelerinde olmak üzere iç ve dış lazer taramaları gerçekleştirilmiştir. Gemi çevresinde 14 tarama, güvertelerin üzerinde ise 35 tarama yapılarak toplam 49 oturumda süreç tamamlanmıştır. Kamaralar, kaptan köşkü, makine dairesi gibi iç mekân taramaları izin alınmadığı için yapılamamıştır. Tarama işlemleri Faro Focus S 350 model YLT ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere arazide lazer tarama örneği verilmiştir.



Şekil 6. YLT ile veri toplama (İskele tarafı).

İHA kullanarak havadan alım gerçekleştirmek için iki konunun dikkate alınması gerekir: (i) sistemin seçimi; (ii) edinim ve veri işleme stratejisi. İlk noktaya gelince, iki ana kategori seçilebilir: sabit kanatlılar ve çok rotorlular. Bu sistemler faydalı yük, uçuş süresi ve veri toplama kararlılığı açısından farklı performanslara sahiptir. Fotogrametrik amaçlar için, sabit kanatlar geniş alanlarda (en az 1,5 km yarıçap) tercih edilirken, çoklu rotorlar daha küçük alanlar (örneğin, 400 × 400 m) veya dikey uçuş veya havada asılı kalmanın gerekli olduğu yerler için en iyisidir. Veri toplama ve işleme stratejisi aşağıdaki adımlara ayrılabilir:

Görev planlama: İHA'nın uçuşu gerçekleştirmek için bilmesi gereken parametrelerin tanımlanması. Bunlar, izlenecek yolu ve göreceli uçuş yüksekliğini tanımlamak için çalışma alanı ve edinimin geometrisiyle ilgilidir. Bu parametreler, 3B modelin beklenen nihai YÖA ve kullanılan özel kameraya bağlıdır. Kullanılan İHA durumunda, görev planlama yazılımı uçuş parametrelerini beklenen nihai sonuçların bir fonksiyonu olarak otomatik olarak tahmin edemez, bu nedenle tahminlerinin önceden yapılması gerekmektedir.

İHA uçuşu ve veri toplama: Uçuş, veri toplamanın operasyonel adımıdır. İHA otonom bir uçuş gerçekleştirebilir ve uçuş planında önceden tanımlanan yol noktalarını takip ederek dijital görüntüler kaydedebilir. Uçuş sırasında, sistemin konumu ve tutumu gibi bazı veriler de dahili navigasyon sensörleri aracılığıyla kaydedilmiştir. Bununla birlikte, bu veriler modelin doğru bir coğrafi referanslamasını gerçekleştirmek için yeterince doğru değildir, bu nedenle YKN'lere ihtiyaç vardır.

Referans ağı: küresel bir koordinat sistemi kullanmak için, bazı köşeler topografik veya GNSS araştırması yoluyla ölçülebilir. Bu noktalar sonraki YKN ölçümleri için yerel referanslardır.

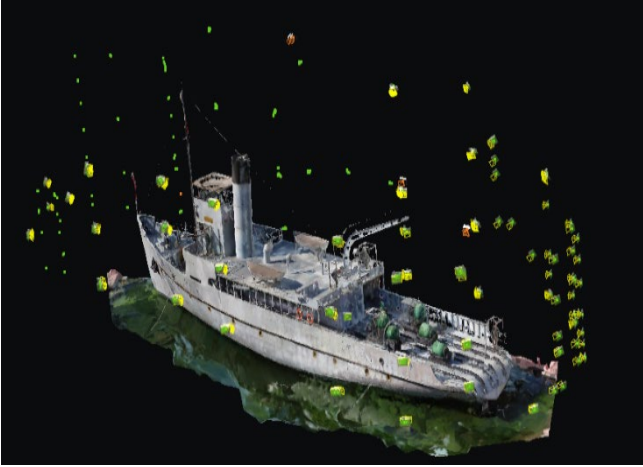
Yer kontrol noktaları: görüntü bloğundan 3B modelin coğrafi referansını almak için kullanılır. Bu noktaların görüntülere dahil edilebilmesi için zeminde İHA'dan açıkça görülebilecek konumlarda bulunması gerekmektedir.

Model oluşturma: 3B nokta bulutlarını oluşturmak için görüntü hizalamasından oluşur. Şu anda üçgenlemeyi fotogrametrik veya SFM yaklaşımıyla gerçekleştirmek mümkündür. 3B yoğun nokta bulutlarından dokulu ağı yeniden yapılandırmak mümkündür.

Nihai ürün çıkarımı: tipik olarak, Yoğun Dijital Yüzey Modelleri, ortofotolar, Nokta bulutları ve 3B modeller oluşturulabilir. Bunlar, radyometrik bilgilerle birlikte alanın 3B olarak tam bir geometrik doğru tanımı için çok yararlı olabilmektedir.

İHA fotogrametri yönteminde ise gemi çevresinde yaklaşık 1 saatlik bir uçuş yapılmış olup 203 fotoğraf

çekilmiştir. Hava fotoğrafları nadir ve oblik olarak çekilmiştir. Çalışmada nadir olarak çekilen görüntüler geminin maksimum yüksekliğine göre ayarlanmıştır. Geminin yerden en yüksek yeri yaklaşık 15 metredir. Bu yüzden nadir görüntüler tam otomatik uçuş planı olarak 20 metreden yapılmıştır. Bu yükseklikte 1.45 cm/piksel YÖA'da veriler toplanmıştır. Eğik açılardan (45° ve 60°) ise kademeli olarak yükseklikler belirlenmiş ve dairesel olarak geminin etrafından fotoğraflar alınmıştır. Oblik fotoğraflar objeye yatay yönde 5 metre mesafeden çekilmiştir (Şekil 7). Bu yükseklikte yaklaşık 0.78 cm/piksel YÖA değerlerde görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 7. İHA ile resim çekim konumları.

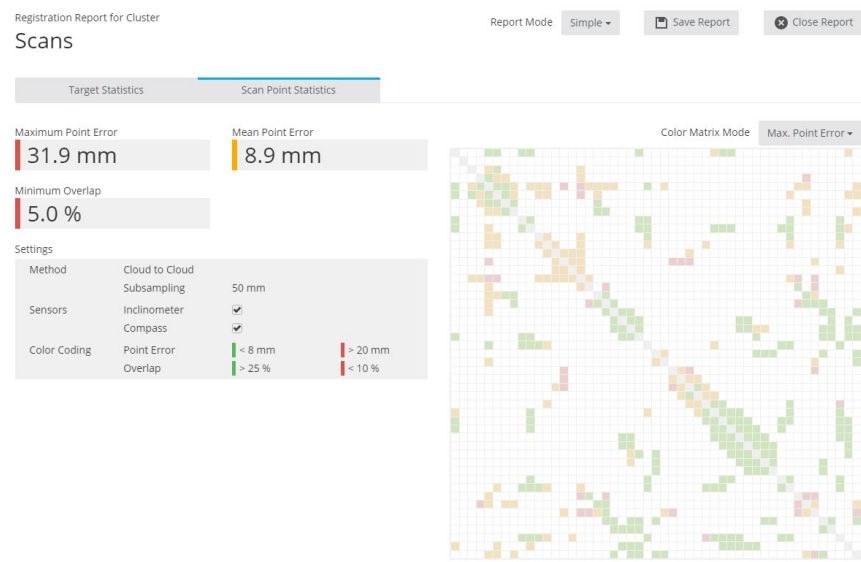
Rüzgâr koşulları çok uygun olduğundan (yaklaşık 5 m/s) uçuş modlarını ve uçuş şeklini değiştirmeye gerek kalmamıştır. Uçuş sırasında teraslar, kule, dış merdiven, ana giriş ve mimarinin bireysel detaylarındaki detayların yakalanma derecesine dikkat edildi. Önemli olan, dijitalleştirme yönteminin birleşimi için ortak hedeflerin yakalanmasıdır. Resimler .jpg formatındadır. İHA standardında lokal veya global koordinat sisteminde uygulanan sensörlerin konum ve yönlerinin izlenmesi ve kaydedilmesi mümkündür. Kullandığımız İHA Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) ve Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) içeren İHA ekipmanı, uçuş sırasında kameranın konumunu ölçmekten oluşan doğrudan coğrafi referanslamaya olanak tanımaktadır. Ancak bu tür konumlandırma her zaman yüksek kaliteli 3B yeniden yapılanmaya izin vermemektedir. Doğruluğu artırmak için 40 YKN kullanıldı. Bunlar bir total station ile ölçülmüştür. Tüm genişliği kapsayacak şekilde YKN'ler total station kullanılarak homojen bir şekilde toplanmıştır. Koordinat sistemi eksenler cepheye paralel ve dik olacak şekilde 12 m'de kurulmuştur. XYZ koordinatları 100, 200 ve 10 m olarak belirlendi. Her alandaki elemanların koordinatları daha sonra tek tip bir nokta seti elde etmek için kaydedilmiştir.

3.2. YLT ve İHA Fotogrametrisi Dijital Ürünlerin Değerlendirilmesi

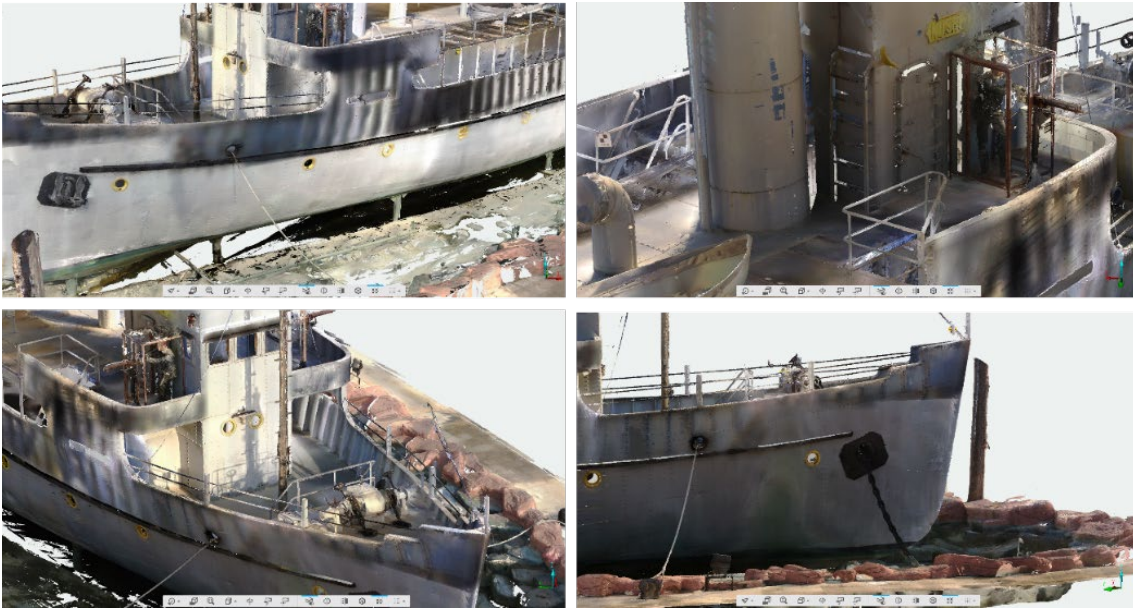
İlgilenilen alanın kayıtlı ve temiz bir nokta bulutunu elde etmek için işleme sonrası adımların yürütülmesi gerekmektedir. YLT tarama verileri için işletim ve işleme yazılımı Faro Scene yazılımıdır (sürüm 2019.1, FARO Technologies, Inc., Sarasota, FL, ABD). Bu yazılım ile lazer verileri alınabilir, görüntülenebilir, işlenebilir, analiz edilebilir ve son olarak yaygın lazer veri formatlarına dönüştürülebilmektedir. İlk olarak veri toplama gününe ait ham tarama verilerinin yazılıma aktarılması gerekmiştir. Daha sonra kötü kaliteli noktaları ve istenmeyen verileri silmek için ilk kaba veri filtrelemesi yapılmıştır. Tüm tarama projesi kentsel bir alanda gerçekleştiğinden ve ilgilenilen alanda bitki örtüsü olduğu için ve yapılardan kaynaklı gürültüler kaldırılmıştır. Son işleme, bireysel senaryoların bireysel kümelerde ayrı ayrı kaydedildiği FARO SCENE yazılım ortamında da gerçekleştirilmiştir. YLT verileri ilk olarak kayıt yapılmıştır. Süreçte farklı konumlardan gelen nokta bulutları ICP ve C2C algoritmaları ile otomatik birleştirilmiştir. Daha sonra kaydedilen bu nokta bulutları ortak bir referansa oturtulması için total station ile ölçülen hedef işaretleri kullanılarak tekrar kaydedildi ve süreç tamamlanmıştır. Son olarak yazılım ortamında filtreler uygulanarak bireysel senaryoların nokta bulutlarındaki istenmeyen noktalar ortadan kaldırılmıştır. Tarama sırasında nesne ve çevresinde de temizlik çalışmaları yapıldı ve bu da küçük zaman planı değişikliklerine ve çeşitli gürültülere yol açmaktadır. YLT, büyük nesnelere çalışmak için çok iyi bir çözümdür. Bu aşamada ortaya çıkan nokta bulutu şekil, yönelim ve konum açısından hassas olarak oluşturulmuştur. Şekil 8'de gösterildiği üzere YLT için yazılımın verdiği rapor gösterilmektedir. Rapora göre ortalama birleştirme hatası 8.9 mm'dir. Elde edilen sonuçların doğruluğu tatmin edicidir (1 cm'ye ulaşır) ve ölçümün kendisi nispeten basittir. Bu cihaz, 3B geometriyi taramak ve bina bilgi modelleme sistemiyle entegrasyon için veri oluşturmak için idealdir. Literatürde belirtildiği gibi, lazer taramanın kullanımı belirli sınırlamalarla ilişkilidir. Örneğin nokta bulutu birçok gereksiz öge ve gürültü içerebilir. Bizim durumumuzda, ana engelleyici unsurlar kuzeybatı ve batı taraflarındaki ağaçlardı. Lazer taramayla ilgili diğer bir sorun ise engellerden veya istenmeyen ölçüm koşullarından dolayı kör noktaların oluşmasıdır. Bu nedenle nesnenin tamamını taramak her zaman mümkün olmuyor. Yersel lazer tarama teknolojisinin kullanımı sırasında, lazer ışınının nesne üzerinde ölçülen noktaya çarpmadığı yerde ölüm noktaları olarak

adlandırılan noktaların ortaya çıktığını belirtmek önemlidir. Bu yerlerin daha sonraki fotogrametri sürecinde eklenmesi gerekir. YLT ile elde edilen yaklaşık 3.4 milyar nokta kümeleri dışarı E57 formatında aktarıldı. YLT'den elde edilen nokta bulutları Şekil 9'da gösterilmiştir. Fotogrametrik veri analizi ile ilgili olarak, yazılım programları hem ticari hem de açık kaynaklı çözümlerle farklı yaklaşımlar kullanmaktadır. Ticari çözümlerde, kullanıcılar

yalnızca sınırlı sayıda işleme parametresi ayarlayabilirken, açık kaynaklı yazılımlar kullanıcıların tüm süreci kontrol etmesine ve hem elde edilen sonuçları hem de kullanılan algoritmaları analiz etmesine olanak tanır. Bu çalışmada, fotogrametrik veriler SfM algoritma temelli çalışan Agisoft Metashape (Agisoft LLC, St. Petersburg, Rusya) sürüm 1.8.3 yazılımı kullanılarak işlenmiş ve alanın referanslı 3B nokta bulutu elde etmek için görüntü üçgenlemesi



Şekil 8. YLT nokta bulutları birleştirme hatası.

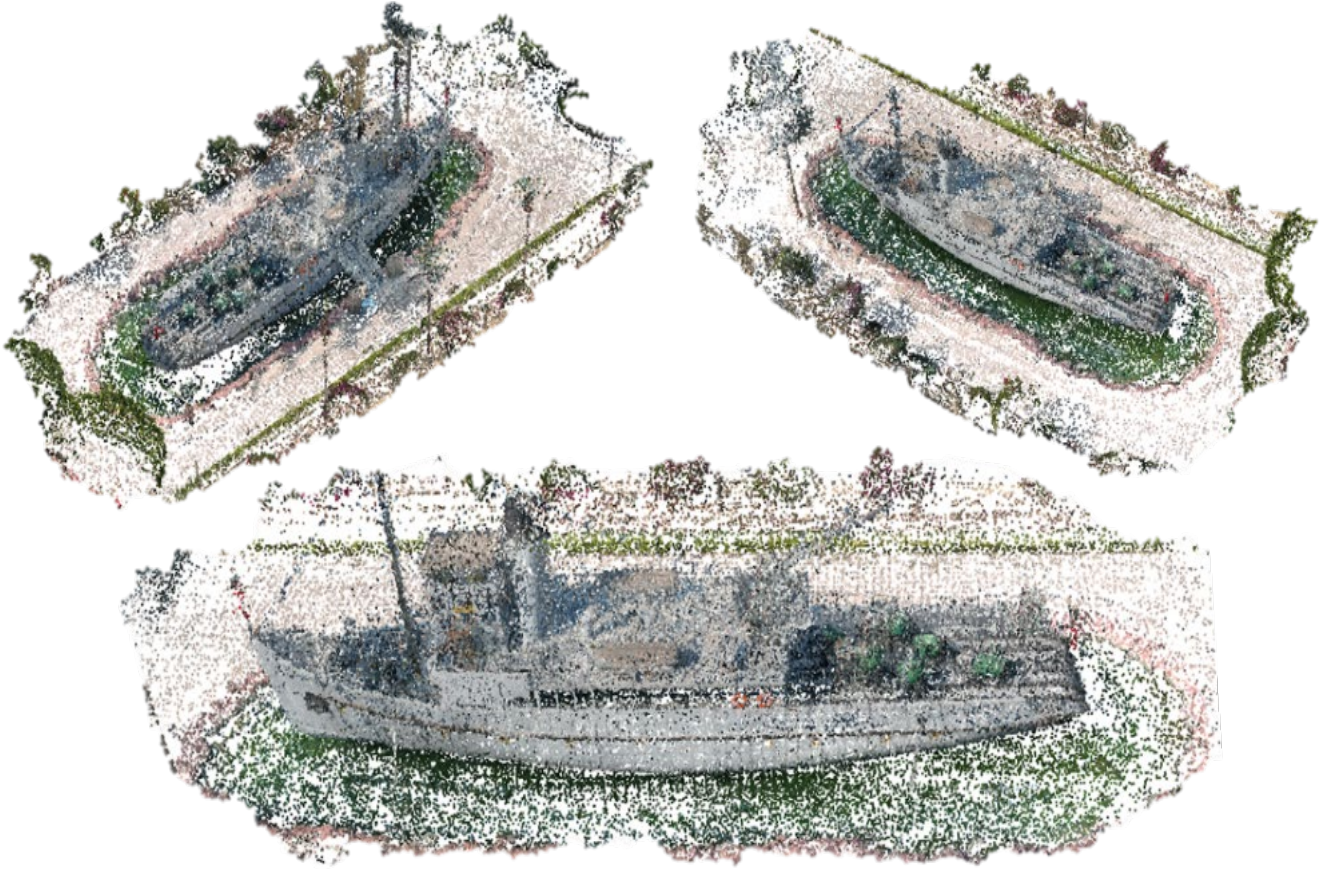


Şekil 9. YLT nihai nokta bulutları detay gösterimleri.

Ofis çalışmalarında YLT verileri üretildikten sonra İHA fotogrametrisi tekniklerinden elde edilen nokta bulutlarının üretimine geçilmiştir. İlk adımda, görüntüler yazılıma eklenir. Ardından gerçek görüntü hizalaması, yaygın SfM tekniği uygulanarak gerçekleştirilir. Bu teknikle yazılım, çakışan görüntülerdeki bağlantı noktalarını bulur ve son olarak kamera konumunu ve yönünü mümkün

olduğunca iyi ayarlayarak fotoğrafları hizalayabilmektedir.

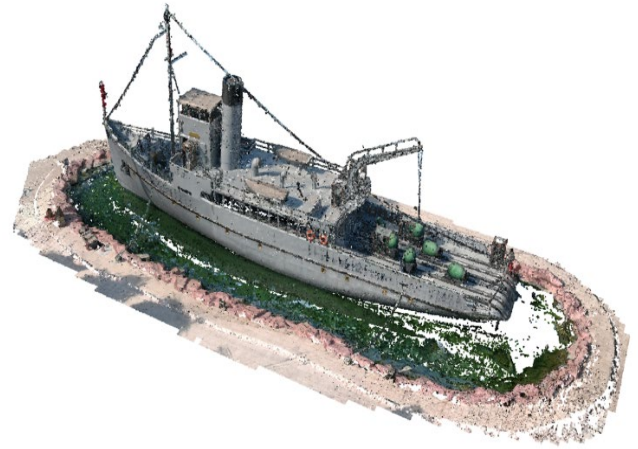
Görüntü hizalama, algoritma görüntüler üzerinde ortak noktalar arar ve her bir resim için kameranın konumunu bulur ve kamera kalibrasyon parametrelerini tahmin ederek bunları eşleştirir. Yazılım daha sonra kamera konumlarını hesaplar ve ilk seyrek nokta bulutunu oluşturur (Şekil 10).



Şekil 10. İHA ile elde edilen seyrek nokta bulutları.

Bir sonraki adımda YKN (28 adet) yazılıma aktarılmış ve daha sonra kullanılmak üzere yalnızca sabit YKN'ler seçilmiştir. Daha sonra YKN'ler bazı görüntülerde manuel olarak yeniden konumlandırılır, böylece görüntüye mümkün olduğunca iyi otururlar ve nihai görüntü hizalaması ve nokta bulutunun referanslaması için kullanılabilirler. Kamera hizalaması referans YKN'ler dikkate alınarak iyileştirilir ve son olarak daha ileri analizler için kullanılacak referanslı yoğun nokta bulutu oluşturulur. İHA-fotogrametri veri alımında da çevredeki alanın büyük bir kısmı yakalanmıştır ve yersel lazer taramada olduğu gibi, bu veriler verilerin hizalanmasını/registrasyonunu iyileştirmeye yardımcı olmaktadır.

Daha sonra Yoğun Nokta bulutu oluşturma aşamasına geçilmiştir. Bu, tahmini kamera konumlarına ve Metashape tarafından oluşturulan seyrek buluta dayanmaktadır. Çok sayıda ağaç olması durumunda, en iyi çözüm düşük doğrulukta bir hizalama yapmak ve ardından yüksek çözünürlüklü yoğun nokta bulutu oluşturularak kaliteyi artırmaktır. Fakat biz çalışmamızda en yüksek doğrulukta üretim yaptık. Sonuç olarak Nadir ve oblik görüntülerden 203 tanesi kullanılarak 1.30 cm/piksel değerinde YÖA yakalanmıştır. İHA fotogrametrisi ile yaklaşık 136 milyon nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 11). Tüm işlem yaklaşık 5-6 saat sürmüştür.



Şekil 11. İHA ile elde edilen nihai yoğun nokta bulutları (İskele arka kısım).

SfM fotogrametrik tekniklerinin doğruluğu çeşitli yöntemlerde geniş çapta araştırılmaktadır. Fotogrametride 3B modelin doğruluğu ve çözünürlüğü, kameradan cepheye olan mesafe, mercekle ve fotoğrafların keskinliğini değiştirebilecek atmosferik koşullar (örneğin sis ve gölge) dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. 95 metre ve 150 metrelik çalışmalarda yazılım ile teodolit verileri arasında teorik beklentilere göre tutarlı deneysel değerler olan %0,005 ve %0,02'lik farklar gösteren hassas tahminler gerçekleştirmiştir. Bevilacqua vd., (2019) doğruluk artışının taban-derinlik ilişkisine,

yakınsak görüntülerin kullanımına ve görüntü başına ölçülen nokta sayısındaki artışa bağlı olduğunu belirtmiştir. Aynı noktanın görüldüğü görüntü sayısı ne kadar fazla olursa doğruluk da o kadar iyi olur. Ancak doğrulukla ilgili çoğu çalışma YKN sayılarına odaklanmaktadır. Agüera vd., (2017) referanslama için kullanılan YKN sayısının İHA fotogrametrisi kullanılarak elde edilen ortogörüntü doğrulukları üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Çalışma, YKN sayısı arttıkça hem yatay hem de dikey doğruluğun arttığını göstermiştir. Öte yandan, RMS dayalı çoğu çalışma, (x,y) eksenini için YKN verileri ve ortogörüntü işaretleyicileri ile z eksenini için yükseklik modeli arasında ayırım yapmıştır. Aicardi vd., (2018) YKN verileri ile ortofotolar arasındaki doğruluğu belirlemek için çeşitli yazılımlarla çalışmıştır. Peña-Villasenín vd., (2017) benzer bir çalışması çeşitli cephelerdeki kamera düzenlemesinin doğruluğunu belirledi. Bu nedenle birçok fotogrametrik araştırmalardan ve YLT'den elde edilen verilerin hassasiyeti artırmak ve aynı referans çerçevesine getirmek için YKN veya hedef işaretleri kullanılmalıdır. Esere yerleştirilen toplam 40 YKN'den 28 tanesi yukarı detaylı açıklanan referanslandırma ve hassasiyeti artırmak için kullanılmıştır. Geriye kalan 12 tanesi ise denetleme noktası olarak kullanılmıştır.

3.3. Doğruluk Analizi

Veri işleme adımlarına bakıldığında İHA fotogrametrisi ve YLT tekniğinden elde edilen nihai nokta bulutları total station ölçümü yardımıyla aynı referans koordinat sistemine dönüştürüldüğü görülmektedir. Veri işlemedeki bu adımlar aynı zamanda sonuç ürünlerin analiz ve kıyasındaki en önemli adımlardan birisidir.

Bu çalışmada doğruluk analizi için esere yerleştirilen 12 adet hedef işaretinin ölçümleri YLT, İHA ve total station ile gerçekleştirilmiştir. Denklem 2 ve 3 kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, total station ölçümleri referans olarak kullanılmış ve 3B modellerin mekânsal X, Y ve Z doğruluğuna ilişkin analizler gerçekleştirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. incelendiğinde beklendiği üzere YLT verilerinin hassasiyeti İHA fotogrametrisine göre daha yüksek çıkmıştır. Fakat tablo incelendiğinde her iki verinin de oldukça yüksek hassasiyetle üretildiği görülmektedir. Bu değerlere göre önerilen her iki yöntemde hem görsel hem de metrik olarak oldukça başarılı belgeleme yöntemleri olarak gösterilebilir.

Tablo 3. Referans veriler kullanılarak yapılan doğruluk analizi, 3B Karesel Ortalama Hata (KOH) sonuçları.

NN	YLT			İHA			YLT			İHA			
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	VxVx	VyVy	VzVz	VxVx	VyVy	VzVz	
1	0.25	0.14	0.65	-1.41	1.61	1.31	0.063	0.020	0.423	1.988	2.592	1.716	
2	0.85	1.45	1.54	1.88	-1.62	-0.88	0.723	2.103	2.372	3.534	2.624	0.774	
3	0.29	0.25	0.65	-0.91	0.54	1.49	0.084	0.063	0.423	0.828	0.292	2.220	
4	0.85	1.45	0.54	0.14	1.96	-1.24	0.723	2.103	0.292	0.020	3.842	1.538	
5	-0.75	-0.48	0.86	0.32	1.64	1.23	0.563	0.230	0.740	0.102	2.690	1.513	
6	1.12	1.27	1.25	-1.80	1.32	2.64	1.254	1.613	1.563	3.240	1.742	6.970	
7	-0.23	-0.25	0.12	1.55	-1.71	-1.92	0.053	0.063	0.014	2.403	2.924	3.686	
8	0.17	-0.56	-0.12	1.01	1.33	1.40	0.029	0.314	0.014	1.020	1.769	1.960	
9	0.15	1.12	0.15	1.57	1.10	2.07	0.023	1.254	0.023	2.465	1.210	4.285	
10	0.13	0.75	1.11	1.81	1.02	-2.42	0.017	0.563	1.232	3.276	1.040	5.856	
11	-1.25	-0.23	-0.56	-2.55	-1.84	1.48	1.563	0.053	0.314	6.503	3.386	2.190	
12	0.15	-0.11	-0.37	0.54	-1.36	1.98	0.023	0.012	0.137	0.292	1.850	3.920	
							[VV]	5.115	8.388	7.544	25.670	25.960	36.629
							KOH _{x,y,z}	0.682	0.873	0.828	1.528	1.536	1.825

3.4. Yersel Lazer Tarama ve İHA Fotogrametri Nokta Bulutu Verilerinin Karşılaştırılması

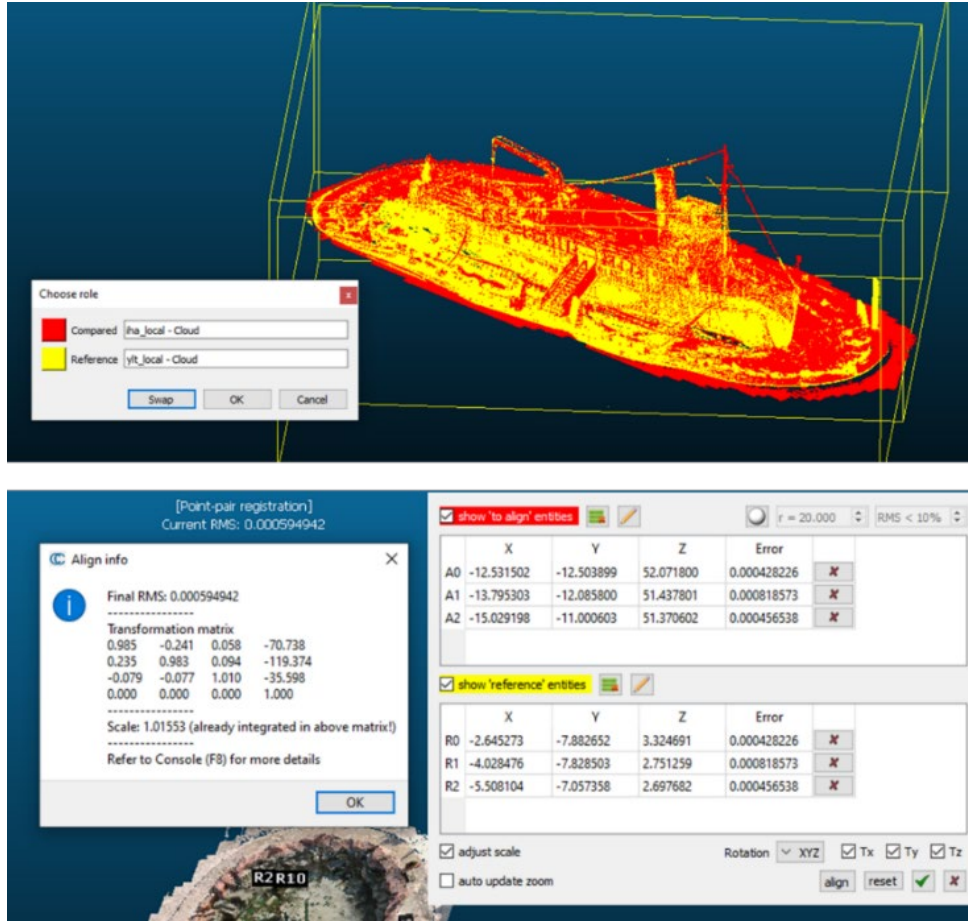
Sürecin sonunda iki yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur: birincisi lazer tarayıcı ile ikincisi ise görüntüler kullanılarak elde edilmiştir. İki veri kümesi benzersiz bir nokta bulutu, oluşturularak entegre edilmiştir. Veri birleştirme işlemi, iki bulutun aynı referans sisteminde olması ve doğruluk açısından tamamen tutarlı sonuçlar elde edilmesi sayesinde kolaylaştırılmıştır. Entegrasyon, 3B renkli nokta bulutlarının E57 formatında, verileri birleştiren ve sonuçları analiz eden CloudCompare yazılımına

aktarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Lazer nokta bulutu, fotogrametrik nokta bulutuna kıyasla daha büyük bir yoğunluğa sahip olmuştur; ancak bu durum iki veri setinin entegrasyonunu engellememiştir.

YLT verilerini İHA-fotogrametri verileriyle birleştirmek için yaklaşım ICP algoritması ile ince bir şekilde karşılaştırılmasıyla yapılmaktadır. Bu yaklaşım için, nokta bulutlarının kolay ve hızlı bir şekilde karşılaştırılmasına ve birleştirilmesine olanak tanıyan açık kaynaklı bir yazılım olan CloudCompare yazılımı kullanılmıştır. ICP algoritması, geometri bilgilerini kullanarak iki nokta bulutunu kaydetmek/hızlamak için kullanılan popüler bir yöntemdir. Algoritma iki

nokta bulutuna/karmasına ihtiyaç duyar ve ilk dönüşümü tahmin eder, daha sonra karşılık gelen noktaların hatasını mümkün olduğunca azaltarak iteratif olarak iyileştirilmektedir. Algoritmanın ana adımları, her iki veri kümesindeki nokta kümelerinin

seçimi, nokta eşleştirme, nokta çifti ağırlıklandırma, belirli nokta çiftlerini reddetme ve son olarak noktalar arasındaki hatayı tanımlama ve azaltmadır (Rusinkiewicz vd., 2001).



Şekil 12. YLT ve İHA ile elde edilen nihai yoğun nokta bulutlarının ICP ile birleştirilmesi.

Bu entegrasyonda karşılaşılan zorluk, her iki yöntemin de iyi kalitede veri sağladığı örtüşen alanların çok küçük olmasıdır. Neyse ki lazer tarayıcı, iç yapı için bu veri kaydı için kullanılabilir kısımları hakkında doğru veriler sağlamıştır. ICP algoritmasının gerçekleştirilmesi için YLT verileri ve İHA fotogrametri verileri, kaba bir kombinasyon için İlk Nokta Çifti Seçme yöntemini gerçekleştirmek üzere CloudCompare yazılımına aktarılmıştır. İlk Nokta Çifti Seçme yöntemi, her iki nokta bulutunda da aynı noktaların seçilmesine dayanır ve bu noktalar daha sonra mümkün olduğunca iyi bir şekilde birleştirilmeye çalışılmıştır. Noktaların yanlış konumlandırılması nedeniyle çok kolay hatalara yol açan yazılımda noktaları manuel olarak ayarlamak yerine, iki nokta bulutunu kabaca birbirine kaydetmek için YKN'ler kullanılmaktadır. YLT verileri daha doğru olduğundan, YLT verileri referans olarak belirlenir ve İHA fotogrametri nokta bulutu hizalanmaktadır. Kaba hizalama sırasında bir dönüşüm matrisi uygulanır ve nihai KOH 0.6 mm ile sonuçlanır (Şekil 12). Bu değer,

her iki ölçüm yönteminde de yüksek doğruluğuna karşılık gelmektedir.

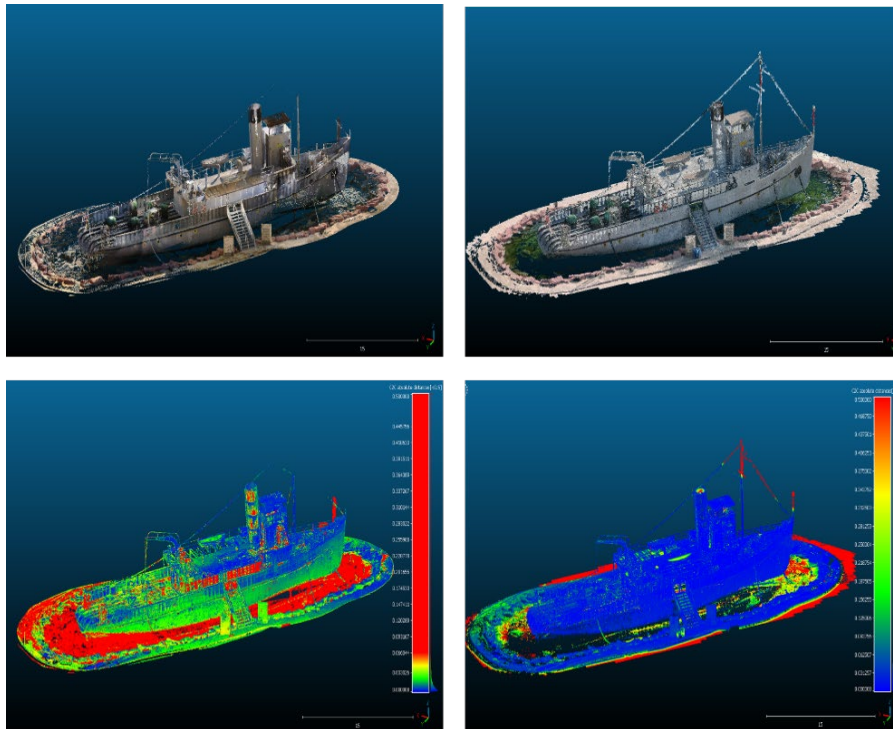
Şekil 12 incelendiğinde elbette bu değer, nokta bulutlarının birbirine ne kadar iyi uyduğunun gösterir fakat doğruluğuna karşılık gelmez, ancak aykırı değerler de dahil olmak üzere tüm noktaların sonuç hatasını göstermektedir. Bazı alanlarda YLT verilerinde hiç nokta bulunmadığından ve bazı cephe alanlarında İHA fotogrametri nokta bulutunda çok hatalı noktalar bulunduğundan, daha büyük bir KOH değeri beklenilmekteydi. Doğruluk hakkında son bir açıklama ancak yeni hizalanmış İHA fotogrametri noktaları yüksek doğruluklu YLT noktaları ile tekrar karşılaştırıldığında yapılabilir ve verilerin artık sadece birkaç santimetre farklı olduğu görülebilmektedir. Elde edilen ve entegre edilen nokta bulutu Şekil 53'te görülebilmektedir. Belirli kesitlere bakıldığında artık boşluklar tespit edilebilir ve iç fotogrametrik hizalamayı değiştirmeden verilerin bu sonuçtan daha iyi hizalanamayacağı çıkarılabilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. YLT ve İHA ile elde edilen nihai yoğun nokta bulutlarının birleşmiş hali.

Georgantas vd., (2012) farklı verileri C2C ile karşılaştırmanın gerekliliğini anlatmışlardır. C2C algoritması, 3B nokta bulutlarını karşılaştırarak farklılıklarını belirlemek için basit ve etkili bir yöntemdir. YLT ve İHA fotogrametri nokta bulutları, Cloud Compare yazılımındaki C2C algoritması kullanılarak analiz ve karşılaştırmaya tabi tutulmuştur. Bu yöntem, iki nokta kümesi arasındaki mesafeyi doğrudan tahmin etmek için hızlı bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemde, yüzey normallerinin hesaplanması, piksel tabanlı yöntemlerde tipik olarak gerekli olan ağ oluşturma veya ızgaralama gerektirmemektedir. Algoritmanın daha ayrıntılı bir yinelenmesi, Girardeau-Montaut vd.,

(2005) tanımlanan Hausdorff mesafe yöntemini, kayıtlı bir nokta bulutundaki belirli bir p noktası ile ikinci nokta bulutundaki en yakın p' noktası arasındaki mesafeyi hesaplamak için sekiz ağaç yapılarıyla birlikte kullanılmaktadır. Bu yöntem, optimum düzlem uyumunu belirlemek için en küçük kareler yöntemini veya iki veri kümesi arasındaki ortalama mesafeyi uygulayarak sekiz ağaçları kullanılmaktadır. Hausdorff mesafesi olarak bilinen metrik, farklı bulut veri setleriyle ilişkili iki nokta arasındaki benzerlik derecesini ölçer. Şekil 14'de C2C analiz görselleri verilmektedir. C2C analizi için tüm görsellerde sol tarafta referans YLT seçilmiş olup sağ taraftaki görsellerde referans İHA verisi seçilmiştir.



Şekil 14. YLT ve İHA ile elde edilen nihai yoğun nokta bulutlarının C2C analizi (Sancak kısmı).

C2C karşılaştırma algoritması kullanılarak nokta çiftlerinin yaklaşık %80'ninin 2,5 cm'den daha kısa bir mesafede eşleştiği ve ayrıca nokta çiftlerinin %99,99'unun 3,0 cm'den daha kısa bir mesafede eşleştiği görülmektedir. Bu değerlere göre her iki belgeleme yöntemlerinden üretilen 3B veriler eserlerin yeniden yapılandırılmasından ve incelenmesine ve diğer çevresel analizlere kadar tüm çalışmalarında geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir. YLT ve İHA verilerinin entegrasyonu sürecinde kritik bir husus, kullanılan metodolojiye bağlı olarak bulutlardaki noktaların farklı doğrulukta olması olabilir. Fotogrametrik analiz noktaların doğruluğunun tahmin edilmesini sağlarken (bizim durumumuzda 1.30 cm), YLT verilerinin doğruluğu daha fazladır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Türkiye'deki Mersin İli Tarsus İlçesindeki Tarihi Nusret Mayın Gemisi örnek alınarak yersel lazer tarama ve İHA fotogrametri nokta bulutu verilerinin karşılaştırılması ve entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, yersel lazer tarayıcıdan elde edilen bir nokta bulutu ile İHA fotogrametriden elde edilen bir nokta bulutu arasındaki farkların değerlendirilmesidir. Ayrıca, biri geleneksel yaklaşımla diğeri yeni bir karşılaştırma yaklaşımıyla üretilen iki bütünleşik nokta bulutunun doğrulukları araştırılmıştır. Kültürel miras dokümantasyonu alanında amaç, ilgilenilen nesnenin eksiksiz ve doğru bir 3B modelini oluşturmaktır. Bu çalışmadaki gibi kompleks yapıdaki büyük nesnelerin sayısallaştırılması isteniyorsa, tüm alanlarda veri kapsamının garanti edilmesi gerekir. Hem yersel lazer tarama hem de İHA fotogrametrisi farklı görüş açılarına sahiptir ve bu da incelenen alanın farklı şekilde kapsanmasına neden olmaktadır. Her iki yöntemin nokta bulutu çıktıları karşılaştırıldıktan sonra, yalnızca her iki nokta bulutunun kombinasyonu ile istenen eserin tam kapsamının sağlanabileceği sonucuna varılabilir. Veri kapsamının yanı sıra, elde edilen verilerin de doğru olması gerekmektedir. Nokta bulutlarının doğrulukları karşılaştırıldığında, yalnızca bir yersel lazer tarayıcının tüm alanlarda sabit göreceli ve mutlak doğruluğu garanti edebileceği söylenebilmektedir. İHA fotogrametri nokta bulutu, nokta bulutunun önemli bölümlerinde yeterli doğruluk sağlar, ancak hata oranı ve hata olasılığı lazer tarayıcıdan çok daha yüksektir. Fotogrametri nokta bulutu doğruluğunun zor doğrulanması nedeniyle, hataların tespit edilmemesi kolaylıkla gerçekleşebilir. Sadece kalibre edilmiş lazer tarayıcılar ile tüm noktaların yüksek doğrulukla ölçüldüğü varsayılabilir. Veri toplama gereksinimi bir kültür varlığının yüksek

doğrulukta nokta bulutu ise, İHA fotogrametri nokta bulutu üretimi için ana veri toplama yöntemi olarak kullanılmamalı, daha çok hassas lazer tarayıcı ile ulaşılamayan alanlar için etkili bir ek olarak görülmelidir. Haritacılar, iki yöntem arasında karar vermenin doğru yaklaşım olmadığını farkında olmalıdır. Daha ziyade, hangi alan için hangi yöntemin kullanılacağı ve nihai nokta bulutlarında ne kadar örtüşme olacağı sorusu, veri toplama öncesinde çözülmesi gereken önemli bir sorudur. Bu nedenle, veri toplama yöntemlerinden birini veya diğeri seçmek yerine, yersel lazer tarama ve İHA fotogrametri nokta bulutu verilerinin entegrasyonu doğru bir yaklaşımdır. Entegrasyon yaklaşımına ve karşılaştırma doğruluğuna karar vermek söz konusu olduğunda, şimdiye kadar iki nokta bulutunun istikrarlı bir şekilde karşılaştırılmasının yalnızca geleneksel Yinelemeli En Yakın Nokta (ICP) algoritması ile elde edilebildiği söylenebilir. Agisoft Metashape yazılımındaki SfM algoritması ile mükemmel eşleşen bir fotogrametrik nokta bulutu oluşturulabilir, ancak kullanıcı etkileşimindeki daha az olasılık nedeniyle hata riski geleneksel yaklaşıma göre daha yüksektir. Bu çalışmada, mutlak doğrulukla ilgili hataların meydana geldiği ve ortaya çıkan nokta bulutunun, daha fazla coğrafi referanslama olmadan, artık araştırma doğruluğuna karşılık gelmediği ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, kültürel miras dokümantasyonunda yüksek doğrulukta ve güvenilir nokta bulutu verileri üretilecekse, yersel lazer tarama gibi kanıtlanmış ölçme tekniklerinin kullanılması gerektiği söylenebilir, ancak İHA fotogrametri verilerinin eklenmesi, farklı yöntemlerin en iyilerini birleştirmek için daha fazla fırsat sunmaktadır. Son olarak, her iki entegrasyon yaklaşımı da lazer verileri ile fotogrametri verilerinin entegrasyonunun artık bir engel olmadığını ve yenilikçi karşılaştırma yaklaşımlarının şimdiden umut verici sonuçlar verdiğini göstermiştir. Teknoloji ve algoritmalar gelişmeye devam ettikçe, lazer tarama verilerinin fotogrametri verileriyle otomatik entegrasyonu, eksiksiz 3B modeller elde etmek için birkaç yıl içinde yaygın bir iş akışı haline gelebilir. Bu, gelecek nesiller için değerli kültürel varlıkların korunması amacıyla kültürel mirasın belgelenmesi için büyük değer taşımaktadır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma 2. yazarın danışmanlığında 1. yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2022-2-TP2-4775 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Yazarların katkıları eşittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., Majid, Z., Lau, C. L., ... & Ariff, M. F. M. (2017). Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner. *Measurement*, 100, 301-310.
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227.
- Ağca, M., Efdal, K., Murat, H. M., & Adıgüzel, F. (2016). Yersel Lazer Tarayıcı ve İha Sistemlerinden Elde Edilen Verilerin 3B Modellemedeki Hassasiyetlerinin Karşılaştırılması: Somuncu Baba Külliyesi Örneği, Aksaray. 6. *Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (UZAL-CBS 2016)*, 146-151.
- Aicardi, I., Chiabrande, F., Lingua, A. M., & Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 257-266.
- Aldao, E., González-Jorge, H., & Pérez, J. A. (2021). Metrological comparison of LiDAR and photogrammetric systems for deformation monitoring of aerospace parts. *Measurement*, 174, 109037.
- Alptekin, A., Fidan, Ş., Karabacak, A., Çelik, M. Ö., & Yakar, M. (2019). Üçayak Örenyeri'nin yersel lazer tarayıcı kullanılarak modellenmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 1(1), 16-20.
- Altuntaş, C., & Yıldız, F. (2008). Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri ve nokta bulutlarının birleştirilmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (98), 20-27.
- Atik, M. E., & Duran, Z. (2021). Lokal özellik temelli yöntemler kullanılarak 3B yüz tanıma ve doğruluk analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 359-372.
- Balcı, D. (2022). Kültürel mirasın belgelenmesinde lazer tarayıcıların kullanılması. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(1), 27-36.
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992, April). Method for registration of 3-D shapes. In *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures* 1611, 586-606.
- Bevilacqua, M. G., Caroti, G., Piemonte, A., & Ulivieri, D. (2019). Reconstruction of lost architectural volumes

by integration of photogrammetry from archive imagery with 3D models of the status quo. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 119-125.

- Boehler, W., & Marbs, A. (2002). 3D scanning instruments. *Proceedings of the CIPA WG*, 6(9), 1-4.
- Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., & Siebold, M. (2002, September). 3D scanning software: an introduction. In *CIPA Heritage Documentation, International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, 47-51.
- Capolupo, A., Saponaro, M., Borgogno Mondino, E., & Tarantino, E. (2020). Combining interior orientation variables to predict the accuracy of Rpas-Sfm 3D models. *Remote Sensing*, 12(17), 2674.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
- Cryderman, C., Mah, S. B., & Shufletoski, A. (2014). Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations. *Geomatica*, 68(4), 309-317.
- Çömert, R., Avdan, U., Tün, M., & Ersoy, M. (2012). Mimari belgelenmede yersel lazer tarama yönteminin uygulanması (Seyitgazi Askerlik Şubesi Örneği). *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(1), 1-18.
- Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387-2429.
- Dittrich, A., Weinmann, M., & Hinz, S. (2017). Analytical and numerical investigations on the accuracy and robustness of geometric features extracted from 3D point cloud data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 126, 195-208.
- Dustin, D., Liscio, E., & Eng, P. (2016). Accuracy and repeatability of the laser scanner and total station for crime and accident scene documentation. *J Assoc Crime Scene Reconstr*, 20(1), 57-67.
- Eisenbeiss, H. (2004). A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W1), 1-7.
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J. A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. *IEEE computer graphics and applications*, 24(3), 21-29.
- Georgantas, A., Brédif, M., & Pierrot-Desseilligny, M. (2012). An accuracy assessment of automated photogrammetric techniques for 3D modeling of complex interiors. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 23-28.

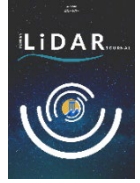
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., & Thibault, G. (2005). Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3), 19.
- Günen, M., Baydoğan, M., & Beşdok, E. (2019). Kültürel Eserlerin Arttırılmış Gerçeklik ile Sunumu: Germir Panagia Rum Kilisesi. 10. Tufuab Teknik Sempozyumu, Aksaray, Türkiye, 18-26.
- Halaç, H. H., & Öğülmüş, V. (2021). Kültürel miras verilerinin dijital olarak depolanması: openheritage3d örneği. *Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 11(2), 521-540.
- Handl, M. (2023). Comparing and integrating Terrestrial Laser Scanning and UAV-Photogrammetry point cloud data—the example of the Salzburg Cathedral. Yüksek lisans tezi, Faculty of Digital and Analytical Sciences, of the Paris-Lodron-University Salzburg, Salzburg, January 2023
- He, Y., Liang, B., Yang, J., Li, S., & He, J. (2017). An iterative closest points algorithm for registration of 3D laser scanner point clouds with geometric features. *Sensors*, 17(8), 1862.
- Jo, Y. H., & Hong, S. (2019). Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 53.
- Kabadayı, A. (2022). Açık maden ocağında hacim hesabı için GNSS ve İHA ölçümlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 52-57.
- Kabadayı, A. (2023). Yersel Lazer Tarayıcıların Tarihi Köprülerin Modellenmesinde Kullanımı. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(2), 68-75.
- Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2022). İHA Fotogrametrisi Kullanarak Kadastroda Binaların Konum Doğruluğunun İncelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(2), 66-72.
- Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2023). İHA Fotogrametrisi Kullanarak Yozgat Çilekçi Türbesi'nin 3 Boyutlu Nokta Bulutu ve Modelinin Üretilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5 (1), 29-35.
- Kaya, Y., Şenol, H. İ., & Polat, N. (2021). Three-dimensional modeling and drawings of stone column motifs in Harran Ruins. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 48-52.
- Kaya, Y., Yiğit, A. Y., Ulvi, A., & Yakar, M. (2021). Arkeolojik alanların dokümantasyonunda fotogrametrik tekniklerinin doğruluklarının karşılaştırmalı analizi: Konya Yunuslar Örneği. *Harita Dergisi*, 165, 57-72.
- LaRocco, J., & Paeng, D. G. (2020). A functional analysis of two 3D-scanned antique pistols from New Zealand. *Virtual Archaeology Review*, 11(22), 85-94.
- Li, P., Wang, R., Wang, Y., & Tao, W. (2020). Evaluation of the ICP algorithm in 3D point cloud registration. *IEEE access*, 8, 68030-68048.
- Luhmann, T., Chizhova, M., & Gorkovchuk, D. (2020). Fusion of UAV and terrestrial photogrammetry with laser scanning for 3D reconstruction of historic churches in georgia. *Drones*, 4(3), 53.
- Lumban-Gaol, Y. A., Murtiyoso, A., & Nugroho, B. H. (2018). Investigations on the bundle adjustment results from sfm-based software for mapping purposes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 623-628.
- Matys, M., Krajcovic, M., & Gabajova, G. (2021). Creating 3D models of transportation vehicles using photogrammetry. *Transportation Research Procedia*, 55, 584-591.
- McCarthy, J. K., Benjamin, J., Winton, T., & van Duivenvoorde, W. (2020). 3D Recording and Interpretation for Maritime Archaeology. *Underwater Technology*, 37(2), 65-66.
- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Bienvenido-Huertas, D., & Marín-García, D. (2020). Validation of close-range photogrammetry for architectural and archaeological heritage: Analysis of point density and 3D mesh geometry. *Remote sensing*, 12(21), 3571.
- Muenster, S. (2022). Digital 3D technologies for humanities research and education: an overview. *Applied Sciences*, 12(5), 2426.
- Munthe-Kaas, N. H. (2018). *Estimating the design parameters of a highly skewed ship propeller by automated 3d-scanning*, Yüksek lisans tezi, Norwegian University of Science and Technology, Department of Mechanical and Industrial Engineering, İngiltere.
- Negiz, N. (2017). Kentlerin tarihsel sürdürülebilirliğinde kültürel miras: önemi ve değeri üzerine düşünmek. *Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi*, 3(1), 159-172.
- Ossowski, R., & Tysiãc, P. (2018). A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. *Polish Maritime Research*, (2), 140-147.
- Özdoğan, M. V., & Deliormanlı, A. H. (2018). Yersel lazer tarayıcı ile yeralti galerisinde meydana gelen deformasyonların belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59), 663-675.
- Palladino, M., Nasta, P., Capolupo, A., & Romano, N. (2018). Monitoring and modelling the role of phytoremediation to mitigate non-point source cadmium pollution and groundwater contamination at field scale. *Ital. J. Agron*, 13(s1), 59-68.
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2017). 3-D modeling of historic façades using SFM photogrammetry metric documentation of different building types of a historic

- center. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(6), 871-890.
- Polat, N., Çokoğullu, S., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M., Şenol, H. İ., Oral, M., ... & Marangoz, Ö. (2021). İHA fotogrametrisinin arkeolojik yüzey araştırmalarına katkılarının incelenmesi. *TÜBA-AR Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*, (28), 175-186.
- Polat, N., Önal, M., Ernst, F. B., Şenol, H. İ., Memduhoglu, A., Mutlu, S., ... & Kara, H. (2020). Harran Ören Yeri Arkeolojik Kazı Alanınının Çıkarılan Bazı Küçük Arkeolojik Buluntuların Fotogrametrik Olarak 3B Modellenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 55-59.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote sensing*, 3(6), 1104-1138.
- Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001, May). Efficient variants of the ICP algorithm. In *Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling*, 145-152, IEEE.
- Saponaro, M., Capolupo, A., Caporusso, G., Borgogno Mondino, E., & Tarantino, E. (2020). Predicting the accuracy of photogrammetric 3D reconstruction from camera calibration parameters through a multivariate statistical approach. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 479-486.
- Snaveley, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision*, 80, 189-210.
- Son, S. W., Kim, D. W., Sung, W. G., & Yu, J. J. (2020). Integrating UAV and TLS approaches for environmental management: A case study of a waste stockpile area. *Remote Sensing*, 12(10), 1615.
- Şenol, H. İ., & Çöltekin, A. (2022). Building Footprint Extraction from High Resolution UAV Images Using Deep Learning Algorithms in the Context of Unplanned Urbanisation. *Abstracts of the ICA*, 5, 144.
- Şenol, H. İ., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M., Çetin, B., & Polat, N. (2019). Lazer Tarayıcı ve İnsansız Hava Aracı Kullanılarak Kızılkoyun Kral Kaya Mezarlarının 3 Boyutlu Belgelenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası*, 17, 25-27.
- Torun, A. (2017). İnsansız Hava Aracı (İHA) Sektörü Ve İHA Fotogrametrisinin Ölçme Bağlamında Konumlandırılması The Sector of Unmanned Aerial Systems and Positioning UAS Photogrammetry Regarding Surveying Discipline. *16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultay, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ankara*
- Ulvi, A. (2021). Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 42(6), 1994-2021.
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A., & Kaya, Y. (2019). The use of photogrammetric techniques in documenting cultural heritage: The Example of Aksaray Selime Sultan Tomb. *Universal Journal of Engineering Science*, 7(3), 64-73.
- Varol, F., Yiğit, A. Y., & Ulvi, A. (2021). Kültürel Mirasın Dijital Ortamda 3 Boyutlu Arşivlenmesi: Maghoki-Attar Camii Sanal Model Örneği. *Turizm Akademik Dergisi*, 8(1), 181-191
- Yan, L., Tan, J., Liu, H., Xie, H., & Chen, C. (2017). Automatic registration of TLS-TLS and TLS-MLS point clouds using a genetic algorithm. *Sensors*, 17(9), 1979.
- Yiğit, A. Y., & Ulvi, A. (2020). İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 46-54.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Yüksek çözünürlüklü insansız hava aracı (İHA) görüntülerinden karayolların tespiti. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 1040-1054.
- Yiğit, A. Y., Gamze Hamal, S. N., Ulvi, A., & Yakar, M. (2023). Comparative analysis of mobile laser scanning and terrestrial laser scanning for the indoor mapping. *Building Research & Information*, 1-16.
- Yiğit, A. Y., Hamal, S. N. G., Yakar, M., & Ulvi, A. (2023). Investigation and Implementation of New Technology Wearable Mobile Laser Scanning (WMLS) in Transition to an Intelligent Geospatial Cadastral Information System. *Sustainability*, 15(9), 7159.
- Yiğit, A. Y., Kaya, Y., & Şenol, H. İ. (2023). Açık Maden Ocaklarında İnsansız Hava Aracı (İHA) Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 225-235.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Yersel Lazer Tarama ile Tarihi Yapının Modellenmesi: Hamidiye Saatli Çeşme Örneği

Nisanur Aydoğan^{1*}, Efsa Yiğit¹

^{1*} Yozgat Bozok Üniversitesi, Şefaati Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 66800, Yozgat, Türkiye;
(nisanuraydogan69@gmail.com; efsa8080@gmail.com)



*Sorumlu Yazar:
nisanuraydogan69@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Aydoğan, N. & Yiğit, E. (2024). Yersel Lazer Tarama ile Tarihi Yapının Modellenmesi: Hamidiye Saatli Çeşme Örneği. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 6(1), 30-35.

Geliş : 13.05.2024
Revize : 12.06.2024
Kabul : 19.06.2024
Yayınlama : 30.06.2024

Özet

Lazer tarama, kültürel miras alanlarının mekânsal dokümantasyonu için çok önemlidir ve kısa bir saha çalışması süresinde hassas mekânsal veriler sağlar. Hem geleneksel yakın mesafe fotogrametrisi hem de kameraya bağlı fotogrametri temel tekniklerdir, ancak zor yüzeyler için yakın mesafe fotogrametrisi gereklidir. Lazer tarama süreci, yüzey taşıma, veri toplama ve tarayıcı temelleri gibi karmaşık süreçleri içerir. Nesnelerin daha hassas ve kapsamlı 3B model elde etme olasılığı, araştırma alanında yeni yer tabanlı lazer tarayıcı teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla artmıştır. Bu durum öncelikle, nesnelerin tipik olarak son derece karmaşık şekillere sahip olduğu kültürel mirasın, mimari ve arkeolojik yüzey araştırması alanında geçerlidir. Buna ek olarak, lazer tarayıcı cihazları kullanılarak yapılan alım işlemi oldukça hızlı ve ekonomiktir ve ortaya çıkan 3B modeller kullanıcılar için oldukça faydalıdır. Bununla birlikte, lazer tarayıcıdan gelen verileri analiz ederken, yorumlarken ve modellerken ekstra özen gösterilmesi gerekir. Bu nedenle, uygun kayıt teknikleri kullanılarak, nesnenin nihai 3B modelini oluşturmak için tek tek taramaların hizalanması önemlidir. Bu çalışmada Yersel Lazer Tarama (YLT) aygıtını kullanarak herhangi bir insan etkileşimi olmadan tarihi çeşmenin dijital olarak kaydetmeyi amaçlamaktadır. Çeşme, çalışma için YLT ekipmanı kullanılarak çeşitli konumlarda taranmıştır. YLT verileri 3D modeller oluşturmak için kullanılmış ve tarihi çeşmenin görsel olarak temsil edilerek belgelenmiştir. Belgelemede YLT verisi nokta bulutundan 3 boyutlu model üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yersel lazer tarama, lazer tarama, kültürel miras, modelleme.

Modeling of Historical Building with Local Laser Scanning: Hamidiye Clock Fountain Example

*Corresponding Author:
nisanuraydogan69@gmail.com

Research Article

Citation: Aydoğan, N. & Yiğit, E. (2024). The Use of Terrestrial Laser Scanners in Modeling Historical Bridges. *Turkish Journal of LiDAR*, 6(1), 30-35 (in Turkish).

Received : 13.05.2024
Revised : 12.06.2024
Accepted : 19.06.2024
Published : 30.06.2024

Abstract

Laser scanning is crucial for the spatial documentation of cultural heritage sites, providing precise spatial data in a short fieldwork period. Both traditional close-range photogrammetry and camera-borne photogrammetry are basic techniques, but close-range photogrammetry is required for difficult surfaces. The laser scanning process involves complex processes such as surface handling, data acquisition and scanner basics. The possibility of obtaining more accurate and comprehensive 3D models of objects has increased with the emergence of new ground-based laser scanner technologies in the research field. This is primarily the case in the field of cultural heritage, architectural and archaeological survey, where objects typically have extremely complex shapes. In addition, the acquisition process using laser scanner devices is very fast and economical, and the resulting 3D models are very useful for users. However, extra care needs to be taken when analyzing, interpreting and modeling the data from the laser scanner. Therefore, using appropriate registration techniques, it is important to align the individual scans to create the final 3D model of the object. This study aims to digitally record the historic fountain without any human interaction using a Terrestrial Laser Scanning (TLS) device. The fountain was scanned at various locations using TLS equipment for the study. The TLS data was used to create 3D models and visually represent and document the historic fountain. In the documentation, a 3D model was generated from the point cloud of the TLS data.

Keywords: Terrestrial laser scanning, laser scanning, cultural heritage, modeling.

1. Giriş

Fotogrametri, nesnelere 3 boyutlu veya 2 boyutlu metrik olarak yeniden yapılandırmak için görüntüleri ölçme ve yorumlama bilimi ve sanatı olarak tanımlanabilir. Yakın mesafe fotogrametrisi genellikle birkaç desimetre ile 200 m arasında değişen nesnelere alınan veriler için kullanılmaktadır. Bir görüntünün uzaydaki yönelimi biliniyorsa, her görüntü, doku modelleri veya uzaydaki nesnelere ölçmek için kullanılabilir bir ışın demeti oluşturur.

Görüntü tabanlı 3B modellerin hesaplanması genellikle birden fazla görüntü üzerinde doğru ölçümler sağlayan uzman operatörlerin müdahalesini gerektiren bir görevdir. Görüntü sayısına göre farklı yaklaşımlar vardır: çoklu yakınsak işleme, stereo çiftlerin işlenmesi veya daha nadiren tek görüntü işleme ve farklı otomasyon seviyeleri gibi yaklaşımlardır (Güler & Erdem, 2014).

Eski fotogrametrik yaklaşımlar, metrik kameralar ve fotogrametrik tarayıcılar gibi metrik veri sağlayan cihazlar gerektirir. Şu anda, kameralar ve tarayıcılar gibi hazır ekipmanlar, uygun şekilde kalibre edilip edilmediklerine bakılmaksızın kullanılabilir ve buna göre kalibre edilebilir (ancak doğru sonuçlar yalnızca cihazların tamamen kalibre edilmesi durumunda beklenebilir). Her durumda, dış yönelim parametrelerinin, kameranın nesne koordinat sistemindeki konumu ve tutumunun yanı sıra iç yönelim parametrelerinin (odak uzaklığı, ana nokta koordinatları ve bozulma parametreleri) bilinmesi gerekir. Günümüzde, farklı ticari paketler bu görevleri yerine getirebilmektedir. Bunlar, bağlantı noktası ölçümü ve demet ayarlama aşamasından sonra sensör kalibrasyonu ve oryantasyon verileri, 3B nesne noktası koordinatları ve tel kafes veya dokulu 3B modeller elde edilmesini sağlar (Yiğit & Uysal, 2023; Ulvi vd., 2019a; Kabadayı vd., 2020).

Üç boyutlu dijitalleştirme, kültürel miras dokümantasyonu için hızla standart bir uygulama haline gelmektedir (Kabadayı & Erdoğan, 2023). Arkeolojik alanlar ve eserler rutin olarak çeşitli şekillerde sayısallaştırılmakta ve düzenlenmektedir, ancak her yöntemin nihai amacı orijinal nesneyi veya yeri doğru bir şekilde temsil etmek ve güvenilir bilgi aktarmaktır (Yakar vd., 2023; Ulvi vd., 2020b). Arkeolojik eserlerin 3 boyutlu modellenmesi sürecinin her birinin doğasında bir yorumlama ve hata düzeyi vardır ve arkeologların amacı bu hatayı en aza indirmektir (Kabadayı, 2021). FARO lazer tarama kolu ve diğerleri gibi lazer tabanlı tarama yöntemleri büyük bir başarıyla kullanılmıştır ve son yedi yılda, bilgisayarla görme fotogrametrisi (çoklu görüntü fotogrametrisi, yakın mesafe fotogrametrisi veya hareketten yapı olarak da bilinir) dokümantasyonun

belirli yönleri için neredeyse her yerde kullanılır hale gelmiştir. Bu teknolojiler, arkeologların çalışma konularını 3B dijital veri formatlarında doğru bir şekilde belgelemelerini sağlar (Kabadayı, 2023). Mevcut tarama/belgeleme teknolojileri, çalışma konularının boyutlarını ve renklerini dijital formatlarda yakalamak ve yeniden yapılandırmak için farklı yöntemler kullanır (Erdoğan vd., 2021). Bu yöntemlerin her birinin işlem hızı, yazılım ve ekipman maliyeti ve yakalanan verilerin doğruluğu gibi avantaj ve dezavantajları vardır.

Lazer tarama, çok sayıda üç boyutlu ölçümün kısa sürede toplanmasını sağlar. Yerel bir koordinat sisteminde yoğunluk değerleriyle birlikte bir nokta bulutu oluşturur; RGB değerleri gibi ek bilgiler genellikle dahili veya harici dijital kameralar tarafından sağlanır. Lazer tarama ile oluşturulan nokta bulutu kendi başına yararlı olsa da, yalnızca bir amaç için bir araçtır. Lazer tarama genellikle 2B kesitler, profiller, planlar ve 3B modeller oluşturmak amacıyla yüzey bilgilerini kaydetmek için kullanılır. Lazer tarayıcılar yerden çalışabilir veya bir uçağa entegre edilebilir. Birincisi yersel lazer tarama (YLT) olarak adlandırılırken, ikincisi havadan lazer tarama veya LiDAR olarak adlandırılır, ancak bu son terim yerden kullanılan lazer tarayıcıları içeren belirli bir çalışma prensibi için geçerlidir (English Heritage, 2008).

YLT, ölçüm aralığına veya çalışma prensibine göre sınıflandırılabilir: üçgenleme, uçuş süresi veya faz tabanlı. İlk durumda, cihaz nesnenin üzerine bir lazer deseni tutmakta ve lazerin nesne üzerindeki izdüşümünün yerini aramak için bir kameradan yararlanmaktadır. İkinci durumda, tarayıcılar iki olay (geri dönen darbeler) arasındaki bir zaman dilimini ölçmek için lazer darbelerinden yararlanır. İkinci prensip de zamana dayalı bir ölçüm prensibidir, ancak lazer ışınının gücünü modüle eder, böylece gönderilen ve alınan dalga formları arasındaki faz farkını ölçer (Lerma García vd., 2008).

Bazı tarayıcılar ölçülen noktaların rengini yakalayabilmekte ve taranan nesneyi çok daha iyi temsil eden nokta bulutları elde edebilmektedir. Bu nokta bulutlarından kaba bir 3B renkli model, her üçgen için köşelerinin rengi alınarak elde edilebilir. Bu, üçgenlerin büyüklüğü kadar bir çözünürlükte dokulu modellerin oluşturulmasını içerir. Diğer tarayıcılar, tarayıcıdan renk elde etmek için kullanılan nokta bulutuna göre doğrudan referanslı bir dijital kamera içerir. Bununla birlikte, bu entegre kameraların ana dezavantajı, düşük radyometrik ve geometrik çözünürlüklerinin yanı sıra yakın mesafe ölçümleri için verdikleri paralaksız renk değerleridir.

Bu teknolojinin arkeolojik verileri belgelemeye yönelik birçok özelliğine rağmen, lazer tarama tüm kayıt görevlerine bir çözüm sunmayacağı için bazı

diğer hususlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, her boyuttaki nesne ve peyzaj üzerinde sınırsız geometrik doğruluk ve bütünlük sağlamaz (Fidan vd., 2023) lazer tarayıcı doğruluklarının bir incelemesini vermektedir. Taramanın gerekli kalite seviyesine ulaşması da uzun zaman alabilir ve bir sahneyi birkaç saniye içinde kaydeden bir kameradan daha az çok yönlüdür. Ayrıca, maliyet, ulaşım sorunları ve ilgili veri yönetiminin karmaşıklığı ile birlikte zaman alıcı olması, bazı arkeolojik alanlarda ciddi pratiklik sorunlarına yol açmaktadır (English Heritage, 2008; Remondino & Campana, 2008). Tarayıcılar ayrıca çalışabilecekleri minimum ve maksimum aralıklara sahiptir. Bu aralıklar üreticiye bağlıdır ve bu nedenle seçilen cihaz, çalışılan alanın ve/veya nesnenin düzgün bir şekilde kaydedilmesi için çok önemlidir. Tüm bu özellikler, ölçme sürecinin önceden dikkatlice planlanmasını gerekli kılar - YLT teorisi ve uygulamasına ilişkin eksiksiz bir kılavuz örneğin Ulvi vd., (2019a,b) verilmiştir.

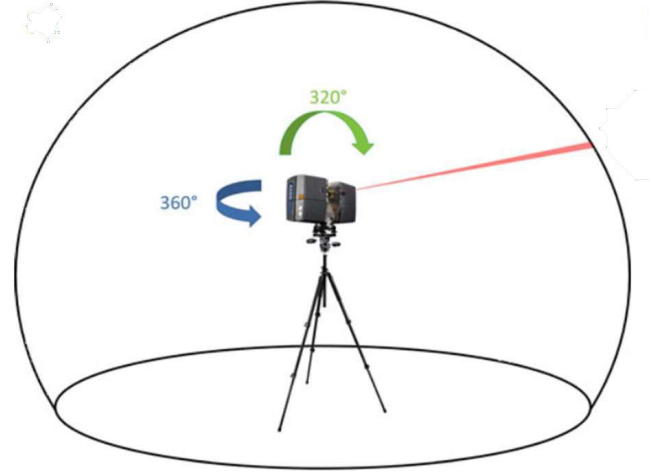
Bu çalışmada, tarihi yapılardan Hamidiye saatli çeşmesinin nokta bulutu verisini YLT yardımıyla üretilmesi ve yapının 3 boyutlu modeli oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Yerden veya havadan hızlı 3B ölçümler yapılmasına olanak sağlayan teknolojik gelişmelerden biri de yerel koordinat sisteminde yoğun nokta bulutları üretebilen lazer tarama yöntemidir. Ayrıca, dahili veya harici kameralar tarafından yapılan nokta bulutundaki noktalara Kırmızı-Yeşil-Mavi (RGB) değerleri verir. Lazer tarayıcılar uçağın içine monte edilebilir veya yerden kullanılabilir. Öge hakkında uzamsal bilgi sunmak için her bir atımın RGB değerleri ve X, Y ve Z koordinatları ortak bir koordinat sisteminde toplanır. Bir nesnenin yoğun nokta bulutlarını hızlı bir şekilde toplayan elektrikli bir cihaz, yer tabanlı bir lazer tarayıcıdır. Tarayıcının çalışma alanının ortasında dönen bir prizma lazerin dikey çizgisini yansıtır (Us vd., 2022). İncelenen nesneye çarptıktan sonra, lazer ışını lazer tarayıcı sensörlerine geri dönecek ve kaydedilecektir. Lazer tarayıcı, geri dönüş sinyalinden üç boyutlu noktaları hassas ve doğru bir şekilde hesaplar. Maksimum ölçebilme mesafesi prensiplerine göre iki tür yersel lazer tarayıcı vardır. İlki faz kayması/faz farkını karşılaştırarak mesafeyi ölçerken, ikincisi YLT ile hedef nesne arasındaki sinyalin uçuş süresini doğrudan ölçmektedir.

Modellemesi yapılan çalışmada Faro Focus 3D X330 cihazı kullanılmıştır (Şekil1). Cihazın çalışma prensibi sürekli yayılan ve alınan lazer ışınları üzerinde faz farklarını karşılaştırarak algılanan nesne

ile olan mesafeleri hesaplar. .bu şekilde cihaz sürekli nesnelere ışın dalgaları göndermektedir. Bu gönderimlerde zaman farkı oluşmakta ve Eşitlik 1'de verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu eşitlikteki faz farkı $\Delta\theta$ ile gösterilirken sinüs dalgasının frekansı f ile gösterilir. Cihaz ile hedef nesne arasındaki mesafe Eşitlik 2 kullanılarak belirlenir.

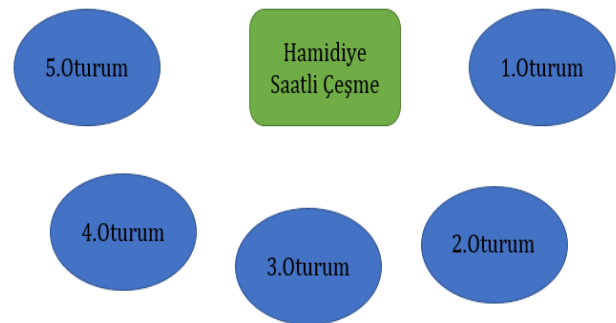


Şekil 1. Yersel Lidar tarama cihazı ve çalışma prensibi.

Bu lazer tarayıcı ± 2 mm hassasiyetle 60 cm ila 330 m mesafeyi tarayabilir. 976.000 noktaya kadar veri bir saniyede toplanabilir. Tablo 1'de cihazın teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Faro FocusS 350 özellikleri.

Tarama Mesafesi	0.6 m - 350 m
Çözünürlük	1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/16, 1/20, 1/32
Kalite	2x, 3x, 4x, 6x
Ölçüm Hızı	976.000 nokta/saniye
İç düzlük	± 1 mm
Ağırlık	4,2 kg
Boy	230x183x103mm



Şekil 2. Yersel Lazer tarayıcı konumları.

Saha araştırmasında mezar taşının etrafına beş istasyon noktası yerleştirilmiş ve tarama yapılmıştır (Şekil 2). Bu istasyon noktaları oluşturulurken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmuştur, çünkü amaç hedef nesnenin hassas ve kapsamlı verilerini elde etmektir.

Saha çalışmasının tamamlanmasının ardından veriler işlendi. Bu noktada, Scene adlı cihazın yazılımı toplanan verileri işledi. Verileri bütünleştirmek için nokta bulutundan nokta bulutuna (cloud to cloud) yöntemi kullanıldı. Füzyon işleminin hassasiyeti tamamlandığında $\pm 3,2$ milimetre içindeydi. Taranan eserin yanı sıra, nokta bulutu verilerinde çok sayıda gereksiz ve dağınık veri bulunmaktadır. Bu gereksiz veriler elimine edilmiştir.

3. Bulgular

Verileri elde etmek için 3B lazer tarama kullanan bir sistem kullanıldı. Türbeden veri toplamak için saniyede 976.000 nokta yakalayabilen FARO Lazer tarayıcı (Şekil 1) kullanılmıştır. Bu tarayıcının düşük ortam ışığında %90 yansıtıcı bir yüzeyde maksimum yakalama mesafesi 153 metredir. Faz farkı ölçüm konseptine dayanan bu teknoloji, 0,009 derece hassasiyetle yatay yönde 360 derece ve dikey yönde 320 derecelik daha geniş bir görüş alanı sunarak tam panoramik görüntülerin yakalanmasını sağlıyor. Beyazdan koyu griye yansımının neden olduğu sistematik mesafe yanlışlığı her 25 metrede ± 2 milimetredir.

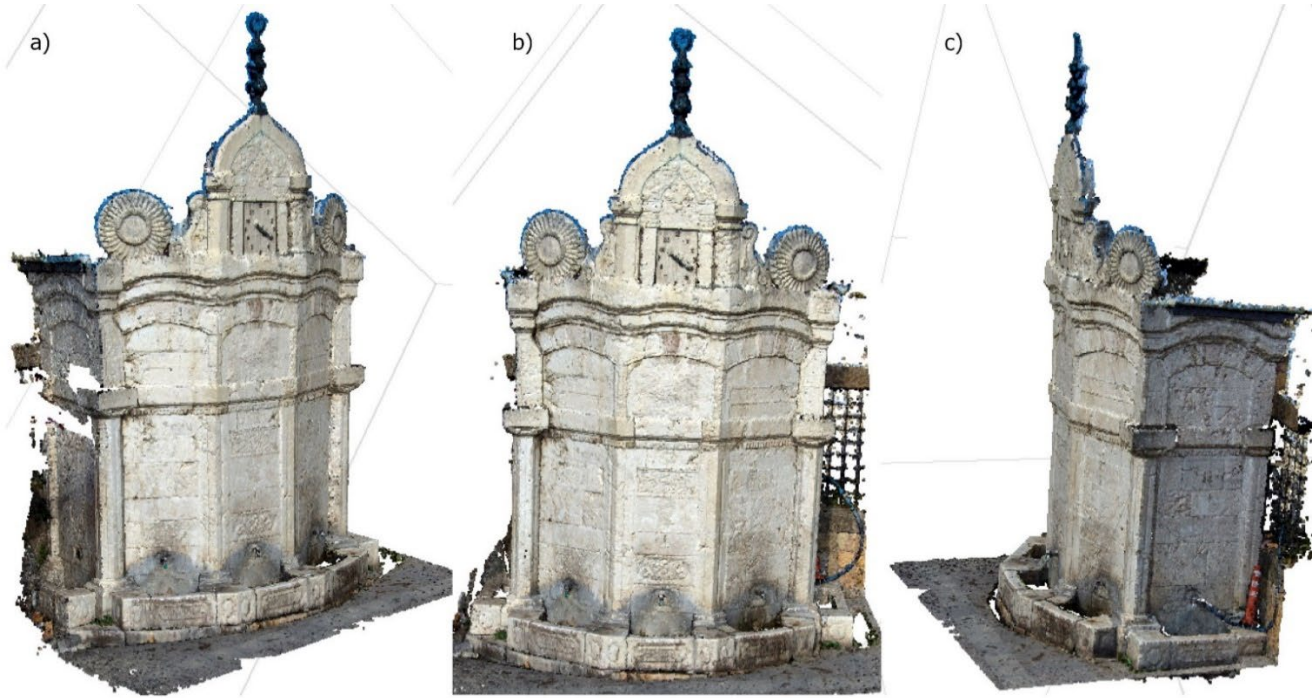
Yapının kapsamlı bir 3B dokümantasyonunu oluşturmak için, bu tür yapıları (çeşmeleri) tek bir istasyondan kapsamak mümkün olmadığından, beş adet tarama istasyonu kullanılmıştır.

Bu proje için 1/5'lik bir tarama çözünürlüğü seçilmiştir. Seçilen çözünürlük, gürültü azaltma ve tarama aralığı, beklenen tarama süresini ve dosya boyutunu doğrudan etkiler. Tarama süresi ve dosya boyutu artan çözünürlükle birlikte artar. Cihazın maksimum tolerans sapma aralığı $\pm 15'$ 'dir. Bu nedenle, yüksek kalitede veri toplanmasını garanti etmek için lazer tarayıcıyı düzlemek çok önemlidir. Çeşme yapısının sadece ön yüzü için beş tarama istasyonu tarafından yapılmıştır (Şekil 2).

Taramada cihazın konumlandırılmasında yapı camii duvarı ile çok yakın olmasından dolayı sağ, sol ve ön cephe taramaları gerçekleştirilmiş, arka cephe taraması yapılamamıştır.

Tarihi çeşmenin taramasında yapılan ardışık oturumların ortak bölgeler içermesine dikkat edilmiş, bu ortak alanlar modelleme çalışmasında yeterli gelmiştir.

Tarama verilerini (5 tarama, 10.5 milyon nokta) birleştirmek için FARO Scene yazılımı kullanılmıştır. İnceleme sonucunda, renkli nokta bulutlarına dayalı bir 3B görselleştirme modeli oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Renkli nokta bulutunun 3B görselleştirilmesi a)Sol cephe görünümü b)Ön cephe görünümü c) Sağ cephe görünümü.

FARO tarayıcı teknolojisi ile fotoğraf cihazının sorunsuz bir şekilde birbirine bağlanma derecesi, görselleştirilen 3B renk modelinin kalitesini belirler. Görselleştirme içeriğinde, doku haritalamanın en zor sorun olduğu kanıtlanmıştır. Fotoğraflardan alınan

RGB verileri yanlış nokta bulutlarında karıştırıldığında yanlış renk detayı yorumlaması meydana gelir. Bunu önlemek için tarama, güneşin geliş açısına bağlı olarak öğleden sonra yapılmıştır.

4. Sonuçlar

Günümüzde 3B modellere ve görsel bilgilere hızlı ve uygun maliyetli bir şekilde sahip olmak çok önemlidir. Çeşitli nedenlerle 3B bilgileri kullanmak için büyük hacimli verilerin hızlı bir şekilde toplanması gerekir; bu durumlarda dijital fotogrametrik ve geleneksel jeodezik yaklaşımlar yetersiz kalır. Bu nedenle, nesnelerin geometrisini üç boyutlu olarak hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirebilen yersel lazer tarama teknolojisini kullanmak mümkündür. Bu yöntem, özellikle kültürel mirasın belgelenmesi ve inşasında işgücü, para ve zaman tasarrufu gibi önemli faydalar sağlamaktadır.

Tarama sırasında elde edilen nokta bulutlarının öge yüzeyinin fiziksel özelliklerine (doku, renk ve yansıtma) bağlı olarak değişebileceğini ve nesneyi doğru bir şekilde tasvir etmeyebileceğini akılda tutmak önemlidir.

Yersel lazer tarama yaklaşımının uygulanması yüksek kapasiteli bilgisayar donanımı ve lazer tarayıcı gerektirdiğinden pahalıdır. Doğruluk, kullanım kolaylığı, daha az personel ve zaman tasarrufu, başlangıç maliyeti yüksek görünse de kuruluş masraflarının fazlasıyla telafi edilmesini sağlar.

Kültürel miras alanlarının mekânsal dokümantasyonunda lazer taramanın önemli bir rolü olduğu ortaya çıkmıştır. Bu etkili teknolojinin yardımıyla, az bir saha çalışması süresinde önemli ve kesin mekânsal veriler toplanabilir. Lazer taramadan elde edilen veriler, kültürel miras veri tabanları için bilgi toplanmasında büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, hem bağımsız kameralarla geleneksel yakın mesafe fotogrametrisini hem de doğrudan tarayıcıya bağlı kameraları kullanan fotogrametri, çok önemli bir belgeleme tekniği olmaya devam etmektedir. Her iki yöntem de doku oluşturma ve özellik çıkarmaya yardımcı olabilese de, tarayıcıların erişmesi zor olan yüzeyleri kaydetmek için yakın mesafeli fotogrametri gereklidir. Ayrıca, lazer tarama sürecinde yüzey geçişinden veri toplamaya ve temizleme, ağ oluşturma, boşluk doldurma ve kayıt gibi tarayıcı temellerine kadar geliştirilmesi gereken bir dizi karmaşık işlem vardır. Lazer tarama kullanılarak yüksek kaliteli, görsel olarak yoğun veriler toplanabilir.

Yazarların Katkısı

Nisanur Aydoğan, Efsa Yiğit: Metodoloji, Saha Çalışması, Modelleme, Kontrol, Analiz, Yazım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Campana, S., & Remondino, F. (2008). Fast and Detailed Digital Documentation of Archaeological Excavations and Heritage Artifacts, in: Posluschny, A., K. Lambers and I. Herzog (eds.), Layers of Perception. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, Nisan 2-6, 2007 (Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte). Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn, 10, 36-42.
- Erdoğan, A., Kabadayı, A., & Akın, E. S. (2021). Kültürel mirasın fotogrametrik yöntemle 3B modellenmesi: Karabıyık Köprüsü Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3(1), 23-27.
- Fidan, Ş., Ulvi, A., Yiğit, A. Y., Hamal, S. N. G., & Yakar, M. (2023). Combination of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry for Heritage Building Information Modeling: A Case Study of Tarsus St. Paul Church. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 89(12), 753-760.
- Güler, O., & Erdem, O. A. (2014). Applying interactive 3D education and using stereoscopic 3D technology in vocational education. *International Journal of Informatics Technologies*, 7(3), 11.
- Heritage, E. (2008). *Conservation principles policies and guidance: For the sustainable management of the historic environment*. English Heritage. Nisan 2008,
- Kabadayı, A. (2021). Unmanned aerial vehicle usage in rough areas and photogrammetric data generation. *Advanced UAV*, 1(1), 8-14.
- Kabadayı, A. (2023). Kültürel Mirasın Dijital Arşivlenmesi: Emirci Sultan Türbesi ve Camii Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(2), 82-88.
- Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2023). İHA Fotogrametrisi Kullanarak Yozgat Çilekçi Türbesi'nin 3 Boyutlu Nokta Bulutu ve Modelinin Üretilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 29-35.
- Kabadayı, A., Kaya, Y., & Yiğit, A. Y. (2020). Comparison of documentation cultural artifacts using the 3D model in different software. *Mersin Photogrammetry Journal*, 2(2), 51-58.
- Lerma García, J. L., Van Genechten, B., Heine, E., & Santana Quintero, M. (2008). Theory and practice on terrestrial laser scanning. *Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia., Valencia, SPAIN*, 261.
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A. Y., & Kaya, Y. (2020). İha Ve Yersel Fotogrametrik Teknikler Kullanarak Aksaray Kızıl Kilisenin 3b Modelinin Ve Nokta Bulutunun Elde Edilmesi. *Geomatik*, 5(1), 19-26.
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A., & Kaya, Y. (2019a). Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunun Yersel Lazer Tarama Ve İha Teknikleri İle Elde Edilmesi:

- Konya Yunuslar Örneği. *TUFUAB 10. Teknik Sempozyumu*, Aksaray.
- Ulvi, A., Yiğit, A. Y., & Yakar, M. (2019b). Modeling of Historical Fountains by Using Close-Range Photogrammetric Techniques. *Mersin Photogrammetry Journal*, 1(1), 1-6.
- Us, H., Köse, S., & Bıyık, M. E. (2022). Antik Mezar Taşlarının Yersel Lazer Tarama (YLT) Yöntemi ile Üç Boyutlu (3B) Belgelenmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(1), 11-16.
- Yakar, M., Ulvi, A., Yiğit, A. Y., & Alptekin, A. (2023). Discontinuity set extraction from 3D point clouds obtained by UAV Photogrammetry in a rockfall site. *Survey Review*, 55(392), 416-428.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital İkiz Oluşturmada Nokta Bulutlarına Dayalı Analiz. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 318-329.



© Author(s) 2024

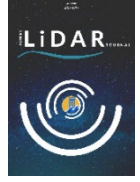
This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Türkiye LiDAR Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/melid>

e-ISSN 2717-6797



Kentsel Alanlarda Kadastro Haritaları için Mobil LiDAR Yönteminin Kullanılması

Burak Can Kaya ^{1*}, Muhammed Emin Bıyık ¹

^{1*} Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 33310, Mersin, Türkiye; (kburakcank@gmail.com; muhammedeminbiyik3301@gmail.com)



*Sorumlu Yazar:
kburakcank@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Kaya, B. C., & Bıyık, M. E. (2024). Kentsel Alanlarda Kadastro Haritaları İçin Mobil LiDAR Yönteminin Kullanılması. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 6(1), 36-43.

Geliş : 10.06.2024
Revize : 21.06.2024
Kabul : 22.06.2024
Yayınlama : 30.06.2024

Özet

Bu çalışma, kentsel alanlarda kadastro haritalarının oluşturulmasında Mobil LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisinin kullanımını araştırmaktadır. Geleneksel kadastro yöntemlerinin sınırlamaları, kentsel alanların dinamik yapısı ve teknolojik gelişmelerin ışığında, Mobil LiDAR teknolojisi, yüksek doğruluk ve detay sunarak önemli bir alternatif sunmaktadır. Araştırma, Mersin Üniversitesi Çiftlikköy kampüsünde gerçekleştirilmiş olup, kompleks yapıların yoğun olduğu bir alan seçilmiştir. Çalışmada giyilebilir bir lazer tarayıcı kullanılarak elde edilen veriler, çeşitli analiz ve optimizasyon süreçlerinden geçirilmiştir. Sonuçlar, Mobil LiDAR teknolojisinin 3B nokta bulutları oluşturma, yüksek hassasiyetle ölçüm yapma ve kadastro yenileme çalışmalarında etkin bir araç olduğunu göstermektedir. Bu teknoloji, özellikle insan etkileşimi ve ek son işlem gerektirse de modern kentsel yönetim ve planlama uygulamaları için büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mobil LiDAR, kadastro, 3B nokta bulutu, SLAM, lazer tarama.

Using Mobile LiDAR Method for Cadastral Maps in Urban Areas

*Corresponding Author:
kburakcank@gmail.com

Research Article

Citation: Kaya, B. C., & Bıyık, M. E. (2024). Using Mobile LiDAR Method for Cadastral Maps in Urban Areas. *Turkish Journal of LiDAR*, 6(1), 36-43 (in Turkish).

Received : 10.06.2024
Revised : 21.06.2024
Accepted : 22.06.2024
Published : 30.06.2024

Abstract

This study investigates the use of mobile LiDAR (Light Detection and Ranging) technology for cadastral mapping in urban areas. Given the limitations of traditional cadastral methods, the dynamic nature of urban areas, and technological advances, Mobile LiDAR technology provides an important alternative by providing high accuracy and detail. The research was conducted in the Çiftlikköy campus of Mersin University and an area with dense complex structures was selected. The data collected with a handheld laser scanner was subjected to various analysis and optimization processes. The results show that mobile LiDAR technology is an effective tool for 3D point cloud generation, high accuracy surveying and cadastral renovation. This technology has great potential for modern urban management and planning applications, especially where human interaction and additional post-processing are required.

Keywords: Mobile LiDAR, cadastre, 3D point cloud, SLAM, laser scanning,

1. Giriş

Kentsel gelişimin başlangıcından bu yana toprak ve arazi yönetimi büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak, sınırların belirlenmesi ve tanımlanması, mülkiyetin tesis edilmesi ve mülkiyetin korunması amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Bu süreç, arazi parsellerinin sistematik olarak incelenmesi ve ardından toplanan verilerin analiz edilmesiyle, mal sahibine mülkünü kullanma, ondan kar elde etme ve yönetme hakkı sağlama amacına doğru evrilmiştir (Yiğit vd., 2023). Günümüzde bu araştırmalar "kadaströ faaliyetleri" veya "kadaströ çalışmaları" olarak adlandırılmaktadır. Modern kadaströ sistemleri, arazi yönetim sistemlerinin ayrılmaz bir bileşeni olduğundan, arazinin sürdürülebilir yönetimi için vazgeçilmez bir aracı temsil etmektedir (Petronijević vd., 2021). Kadaströ ölçümü alanı, son yıllarda hem kavramsal çerçevesi hem de operasyonel sistemi açısından derin bir dönüşüm geçirmiştir. İlkel bir tapu sicilinden, etkili ve sürdürülebilir arazi yönetimini kolaylaştıran, teknolojik olarak sofistike ve uyarlanabilir bir sisteme dönüşmüştür (Hajji vd., 2021; Buuveibaatar vd., 2022). Dahası, insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki yükü arttıkça, kadastronun bir bileşen olarak yer aldığı arazi yönetim sistemlerinin gelişimi de artmaktadır (Yomralıoğlu, 2011). Değişim özellikle ekonomik ve siyasi dönüşüm, kentleşme, tarımsal yoğunlaşma ve ormansızlaşma gibi süreçler tarafından yönlendirilmektedir. Ayrıca, değişimin hızı doğanın korunması, insan refahı ve sürdürülebilir kalkınma gibi bir dizi faktöre bağlıdır (Cabo vd., 2018).

Sosyal ve çevresel süreçlerin boyutları, insan-arazi bağlantılarının dahil edilmesi ve arazi kullanımının çeşitlendirilmesi ile genişletilmiştir. Federation Internationale des Geometres/The International Federation of Surveyors (FIG) tarafından yayımlanan Kadaströ 2014 çalışması, kadaströ faaliyetleri için standartlar oluşturma, kamu ve ticari sektörler arasında iş birliğini teşvik etme ve geleneksel ölçümler yerine dijital yöntemlere geçişi kolaylaştırma amacını taşımaktadır (Yiğit & Ulvi, 2020). Kadaströ 2034 vizyonu, önümüzdeki 20 yıl boyunca arazi yönetiminin geleceğini öngörmenin bir yolu olarak önerilmektedir. Öncelikli odak noktası hassas, güncel, nesne tabanlı, üç boyutlu ve dört boyutlu (dört boyutlu, üç boyutlu + zaman) kadaströ kavramlarının uygulanması olmuştur (Cabo vd., 2018; Sevgen, 2019; Cay vd., 2017; Chang vd., 2020; Chen, 2019). Bu konuda dikkat çeken iki girişim, planlamanın ilk aşamalarında çevre koruma ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymayı amaçlayan Gündem 21 ve Gündem 2030'dur. Gündem 2030'un Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini (SKH'ler) etkin bir şekilde izleyebilmek için doğru, güncel ve detaylı verilere erişmek çok önemlidir (Ulvi & Yiğit, 2019). Bu

tür veriler, bilinçli karar alma ve 2030 Gündeminin uygulanmasının hesabının sorulmasını sağlama açısından büyük önem taşımaktadır. Şehirlerin benzeri görülmemiş bir şekilde büyümesi, SKH'ler ele alınan bir dizi çevresel soruna katkıda bulunmaktadır. Binlerce yıldır kesintisiz olarak devam eden kentleşme süreci, son yıllarda kayda değer bir hızlanma yaşamıştır. Bu olgu, son birkaç on yılda gözlemlenen kentleşme oranlarındaki önemli artışa atıfta bulunularak literatürde kapsamlı bir şekilde belgelenmiştir (Chen, 2018; Cui, 2019).

Birleşmiş Milletler Genel Sekreteri, 2000-2015 yılları arasında kentsel arazilerin genişlemesinin, dünyanın tüm bölgelerindeki kentsel nüfus artışını aştığını belirtmiştir (Dawidowicz, 2018). Bu olgu, kentsel alanların kontrolsüz bir şekilde genişlemesine ve buna bağlı olarak kentsel nüfus yoğunluğunun azalmasına neden olmuştur. Uzaktan algılama verileri, kentsel gelişimin izlenmesi ve kadaströ sistemlerinin güncellenmesi için paha biçilmez bir bilgi kaynağıdır (Di Filippo vd., 2018). Yalnızca binaların ve yapay altyapının konumunu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda önemli özellikleri de içerir. Son zamanlarda, sürdürülebilir arazi yaklaşımı kapsamında kadaströ yenileme alanında çalışmalar yürütmek için yenilikçi metodolojilerin ve teknolojinin kullanımında kayda değer bir artış olmuştur (Di Stefano vd., 2021). Bu çalışmalarda, özellikle Türkiye'deki konut stokunun ve kentsel gelişimin hızlı büyümesi önemli bir faktör olarak tanımlanmaktadır. Kentleşmenin etkisi, klasik ölçüm tekniklerine dayanan geleneksel kadaströ yöntemlerini, arazi koşullarının dinamik yapısı nedeniyle yetersiz hale getirmiştir. Sonuç olarak, teknoloji kullanımı ile kadaströ güncelleme çalışmaları için yeni ve verimli bir alternatif sağlayan lazer tarama teknolojisi kullanılarak kadaströ haritalarının uygulanabilirliği önemli bir ivme kazanmıştır.

Haritalar ve planlar, binaların mevcut durumlarının mimari bir plan için uygun olup olmadığını belirlenmesini veya yenileme aşamalarında mimari olarak yorumlanmasını kolaylaştırır (Otero vd., 2020). Bir şehri oluşturan ana unsur bina olduğu için, binalar 3B şehir modellemesinde en çok talep gören nesnelere (Wei, 2008). Kentsel alanlar, genellikle yol ve bina gibi topoğrafik unsurların inşası, yıkımı ya da genişletilmesindeki insan faaliyetleri nedeniyle hızla değişmektedir (Morgan & Tempfli, 2000). Ayrıca, kentsel alanlarda yapılaşmanın hızlı bir şekilde artmasından dolayı, bina nesnelere güncel olmayabilir. Bu amaçla, kapalı alanların geometrik özelliklerinin doğru ve hassas bir şekilde ölçülmesi günümüzde birçok çalışma için önem taşımaktadır (Velas vd., 2019). Önceleri klasik metrik ölçüm cihazlarıyla yapılan ölçüm işlemleri, total-station gibi hassas ölçü aletlerinin geliştirilmesiyle mimari yapıların benzer

amaçlarla ölçülmesi ve haritalanmasında önemli bir adım oluşturmuştur. Süreç içerisinde teknoloji ve fizik alanındaki gelişmeler lazer tarama sistemlerinin yaygınlaşmasına ve lazer sinyallerinin ölçüm amaçlı kullanılmasına katkı sağlamıştır (Kuçak vd., 2023; Zeybek, 2021).

Lazer tarama tekniği, nesnelere doğrudan, hassas ve otomatik üç boyutlu (3B) koordinatlarını sağlayan bir teknolojisidir (Akar, 2017; Reshetyuk, 2009). Bu teknoloji ile hedef nesne hakkında büyük detaylar içeren, yüksek çözünürlüklü eşleştirme sağlayan, değişiklik takibi ve sunum imkânı olan ve herhangi bir metrik ölçüm alınabilen yüksek hassasiyetli 3B nokta bulutları oluşturulabilmektedir. Giyilebilir lazer tarama sistemi, anlık konumlandırma ve haritalama algoritmalarından olan Eşzamanlı Konum Belirleme ve Haritalama (Simultaneous Localization and Mapping/SLAM) kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, sistemin harita üzerindeki konumunu belirlerken aynı anda menzil sensörlerini geçirerek bilmediğiniz çevrenin haritalanmasına izin verir (Di Filippo vd., 2018). Bu, farklı alanlara seyahat ederek ve farklı konumlardan ölçüm yaparak nokta bulutlarının yakalanmasını sağlar (Yakar vd., 2009). SLAM tabanlı cihaz, kendisini çevreleyen ortamda konumlandırmak için LiDAR ve Ataletsel ölçüm birimi (Inertial Measurement Uni/IMU) sensörlerinden veri alır. SLAM algoritması, yerel koordinat ortamının bir haritasını oluşturmak ve konumunu tahmin etmek için duvarlar, zeminler ve sütunlar gibi geometrik nesne varyasyonlarını tespit ederek bu verileri analiz eder. Giyilebilir Mobil Lidar (GML) cihazlarında SLAM algoritması, harita ve model oluşturmanın temelini oluşturur (Yiğit vd., 2023; Karabacak & Yakar, 2023a,b,c,d)

Türkiye'deki kadastro işlemlerinin %99'unun tamamlanmıştır (Dinlemez & Ok, 2021). Bununla birlikte, kullanılan mevcut yöntem ve ekipmanlar, kadastro ölçümlerinde istenen ± 8 cm hassasiyete ulaşmak için yetersizdir. Bazı ölçümler yanlış veya eksik yapılmıştır ve bu yöntem ve ekipmanlar, mevcut kadastro verilerinin sayısallaştırılması ve Türkiye tarafından kabul edilen uluslararası standartlara (ISO 19152, 2012) uyulması gibi diğer zorlukları ele almada da yetersizdir (ISO 19152, 2012). Ayrıca, Arazi Yönetimi Alan Modeli, INSPIRE, Kadastro 2014 ve gelecekteki gelişmeler gibi vizyoner çalışmalar kadastronun yenilenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur (Ercan & Toker, 2022; Gollob vd., 2020). Ölçüm aletleri alanında süregelen ilerleme, teknolojiye gelişmelerin bir sonucudur. Ölçüm cihazlarının evrimi sayaçların ortaya çıkmasıyla başlamış ve Elektronik Uzunluk Ölçer (Total Station) ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System/GNSS) dahil olmak üzere ileri teknolojilerin uygulanmasıyla ilerlemiştir. Bu

teknolojiler doğruluklarını ve hassasiyetlerini kanıtlamış olsalar da artan insan nüfusu nedeniyle çevresel etkilere karşı hassastırlar. Özellikle yerleşim alanlarında, GNSS'nin sınırlamalarını ve total-station ve ölçüm teknolojisinin zaman verimliliği açısından dezavantajlarını ele almak için yeni çözümler geliştirilmektedir. Bu hedefe ulaşmak için yeni teknolojilerin etkinliği değerlendirilmelidir. Birçok disiplin, çeşitli araştırma bağlamlarında jeodezik ölçüme potansiyel bir alternatif olarak GML üzerine araştırmalar yürütmüştür. Bu makale, uzaktan algılama cihazları olan Mobil LiDAR sensörlerinden elde edilen verilerin karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır (Karabacak & Yakar, 2022; Karataş vd., 2022; Nazari vd., 2023). Bununla birlikte, çalışmamızın odaklandığı gibi geniş bölgelerde modern teknoloji ile eski yaklaşımlar arasındaki karşılaştırma üzerine çok az araştırma yapılmıştır. Yeni tasarımı ve karmaşık işlevselliği nedeniyle mobil LiDAR sistemi, karmaşık kentsel ortamlarda önerilen tekniği incelemek için değerli bir fırsat sunmaktadır. Araştırma projesi, GML LiDAR sensörlerinin karmaşık bir metropol ortamında doğruluk değerlendirmeleri ve kadastro araştırmalarında bina ayak izlerinin kullanımını değerlendirmek üzere tasarlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak, Mersin Üniversitesi Çiftlikköy kampüsünde bulunan, karmaşık yapıların yoğunlukta olduğu bir bölge seçilmiştir. Bu alan, büyük girinti ve çıkıntılara sahip binalar, çeşitli dış sütunlar ve güneşten korunmak için üstü balkon olan geçiş tünelleri gibi mimari özellikler taşımaktadır. Bu özellikler, geleneksel ölçüm yöntemleri ile veri toplamanın zor olduğu koşullar yaratmaktadır. Ayrıca, alanın yüksek insan sirkülasyonu nedeniyle uzun süreli ölçüm yapmanın zorlukları da dikkate alınarak seçilmiştir. Çalışma alanında bulunan yapılar maksimum 3 katlı olup yüksekliği yaklaşık 8-10 metre civarındadır. Bu alanın seçilmesindeki en önemli sebep yapıların karmaşıklığı ve geleneksel ölçüm yöntemleri ile veri toplanmasının oldukça zor olması gösterilebilir. Ayrıca çevrede bulunan geçiş alanlarında çok fazla insan sirkülasyonu olduğu için uzun süreli ölçüm yapma durumu olumsuz etkilenmesi bu alanın seçilmesinde etken olmuştur.

2.2. Donanım

Bu çalışmada, Heron Lite Renkli lazer tarayıcı kullanılmıştır. Bu cihaz, uçuş zamanı prensibi ile çalışmakta olup, bir nesneye gönderilen lazer darbesinin nesneye ulaşması, yansması ve sensöre

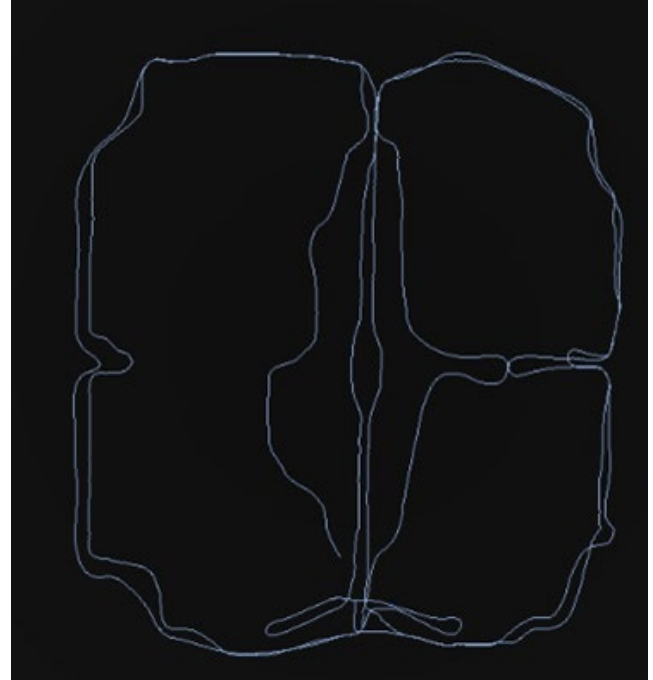
geri dönmesi için geçen süreyi hesaplamaktadır. Teknik özellikleri Tablo 1'de verilen GML cihazı, bir nesneye gönderilen lazer darbesinin nesneye ulaşması, nesne üzerinde yansması ve sensöre geri dönmesi için geçen sürenin hesaplanması prensibi ile çalışmaktadır. Mesafe bilgisi verebilmesi nedeniyle anlık nesne tespiti ve nesne yeniden yapılandırma gibi güncel araştırma alanlarında önemli etkileri vardır. Bazen bu cihazda kullanılan yöntem dahili kameralar ve ölçülen mesafe bilgisinin doğruluğunu etkileyen bir hata kaynağı içerir. Heron Lite Color, bu yöntemi kalibre edilmiş reflektörlerle uygulayarak hataları en aza indirir. Giyilebilir mobil tarama işlemi için ilk olarak çalışma alanında keşif yapılarak yörüngeler belirlenmiştir. Yörünge belirlenirken başlangıç noktası ile bitiş noktasının aynı yerde olmasına dikkat edilmiştir. Yani ölçüm yörüngesi belirlenen noktadan başlayıp hat tamamlandıktan sonra başlangıç noktasında bitecek şekilde oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan lazer tarayıcı SLAM algoritması ile çalışmakta olup cihazın harita üzerindeki konumunu belirlerken aynı anda menzil sensörlerini kullanarak çevrenin haritalanmasını sağlar. Bu yöntem, LiDAR ve IMU sensörlerinden gelen verileri kullanarak, cihazın konumunu tahmin eder ve çevrenin geometrik bir haritasını oluşturur. SLAM algoritması, özellikle karmaşık ve dinamik kentsel ortamlarda yüksek doğrulukta haritalama yapılmasına olanak tanır.

2.3. Veri toplama

Çalışma alanının tamamen açık havada olması çevresel faktörlerin (araba, bitki örtüsü vb.) fazlalığına ve canlıların (insan, hayvan vb.) yoğunluğuna neden olmaktadır. Bu nedenle, veri toplama sürecinde gürültü oluşturabilecek hareketli ve sabit nesnelere kaçınmak için bazı önlemler alınmalıdır. İlk olarak, taramalar yörünge boyunca (Şekil 1) hareketliliğin en

az olduğu zamanda gerçekleştirilmiştir. Tarama sırasında, tarama operatörünün yanında bir yardımcı operatör bulunmuştur. Yörünge üzerinde tarama yapılmadan önce, yardımcı operatör yaklaşık elli metre önceden hareket etmiş ve çevresel etkileri en aza indirmek için önlemler almaya çalışmıştır. Bu nedenle, tarama-veri işleme aşamasında gürültülü verileri ortadan kaldırmak için tarama cihazından 1,5-30 m dışındaki veriler sürece dahil edilmemiştir. Bu çalışmada kullanılan mobil lazer tarama cihazı giyilebilir olarak tasarlandığı için operatörün vücuduna taşıma aparatları yerleştirilmiştir. Lazer sensörünün monte edildiği direk elle tutulmakta ve operatör kaynaklı salınlara maruz kalmaktadır. Bu da yörüngeyi kaydeden IMU'da hatalara yol açmaktadır. Bu nedenle yörüngeler, tarama boyunca minimum titreşim olacak şekilde belirlenmiş ve özellikle engebeli alanlardan kaçınılmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan güzergâh.

Tablo 1. Mobil LiDAR Gexcel Heron Lite Color'ın Teknik Performans Özellikleri (Yiğit vd., 2023).

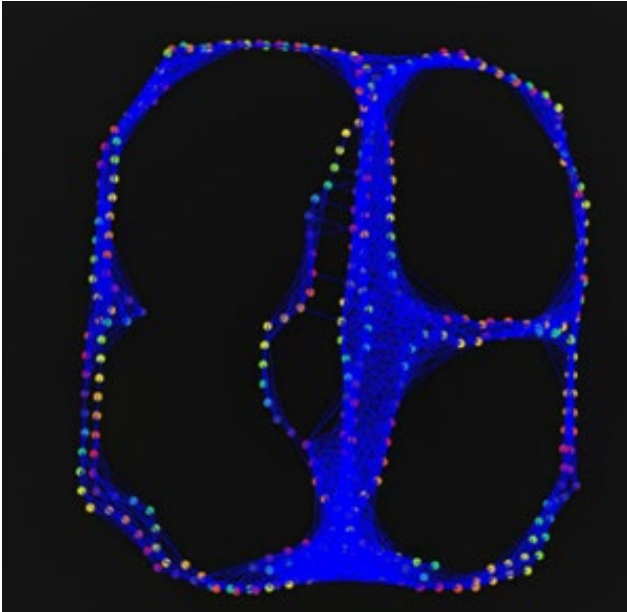
Gexcel Heron Lite Color'ın Teknik Özellikleri	Değer
Marka ve tip	Velodyne VLP 16
Ölçüm aralığı	0,4-100 m iç veya dış mekân
Ölçüm hızı	Saniyede 300.000 puana kadar
Menzil Doğruluğu (10-100 m ölçümler için)	± 3 cm
Mutlak doğruluk [cm cinsinden 1 sigma]	± 3 cm
Maksimum ölçüm çözünürlüğü	~ 2 cm
Görüş alanı (dikey/yatay)	360° V/360° H
Lazer sınıfı	Lazer sınıfı 1

3. Bulgular

GML ile veri toplamak önemli olduğu kadar sonrasında verilerin işlenmesi de önemli bir süreçtir.

GML taraması sonucunda elde edilen verilerin işlenmesi üç adımda gerçekleştirilmiştir: bir kilometre sayacı, Yinelemeli En Yakın Nokta (Iterative Closest Point/ICP) ve bir harita oluşturma. İlk olarak, hareketli

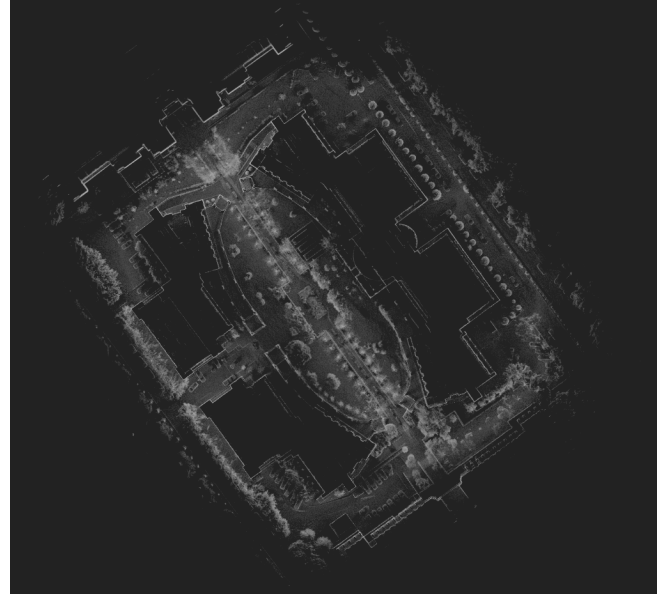
nesnelere kaynaklanan gürültüyü gidermek için mesafe sınırı ayarlanmıştır. Eşik değerleri $0,10m < eşik < 5,00m$ olarak belirlenmiştir. Çevredeki hareketli nesnelere kaynaklanan gürültüyü azaltmak için lazer darbesi mesafesi uzatılmıştır. Ayrıca yapıların üst kısımlarına mümkün olduğunca fazla lazer atımı gerçekleştirmek için cihaz ile hedef nesne arasındaki mesafenin artmasına bağlı olarak eşik değeri mümkün olduğunca artırılmıştır. İkinci bölüm olan ICP algoritması, ilgili varlıklar arasındaki çerçeve hatalarını en aza indirerek bir nokta bulutu ile bazı referans yüzeyler (veya başka bir nokta bulutu) arasındaki dönüşümü bulmayı amaçlamaktadır. Bu aşamada "yerel harita" ayarları yapılmış ve oluşturulacak 3B nokta bulutu haritasının geometrik kriterleri belirlenmiştir. Kilometre sayacından sonra "harita oluştur" bölümüne geçildi. Burada tüm yörünge bir dizi haritaya bölünerek oluşturulmuştur. Harita oluşturma işleminden sonra global optimizasyon kısmına geçilmiştir. Bu adımda segmente edilmiş haritalar hizalanır. Bu bölümdeki parametre ayarında ICP iterasyonunun varsayılan değeri seçilmiştir. Bu bölümün temel amacı doğruluğu arttırmaktır. Parametre ayarından sonra bölümlenmiş haritalar bir bağ ile birbirine bağlanır (Şekil 2).



Şekil 2. Harita üretmek için bağ atımı.

Daha sonra GML verileri kullanılarak 2 boyutlu kadastral harita üretildi (Şekil 3). Üretilen harita üzerinde çizimler yapıldı. Ancak Şekil 3'te görüldüğü gibi üretilen ortofoto haritasında GML verisinden dolayı boşluklar bulunmaktadır. Bu nedenle harita çizimi sürecinde hem ortofoto hem de 3 boyutlu nokta bulutları (Şekil 4) kullanılmalıdır. Üretilen ortofoto haritası 1 cm/piks çözünürlükte üretilmiştir. Bu değerler kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir ve

çalışmada 1 cm/pix seçilmesinin nedeni çizimlerde alanın aynı çözünürlüklü hava ortofotosunun kullanılmasıdır. Böyle bir uygulamada sadece nokta bulutundan çizim yapmak veri karışıklığına ve gürültüye neden olur. Bu nedenle yazarlar olarak, çalışmada uygulandığı gibi nokta bulutu verileri ile ortofoto verilerinin entegre bir şekilde kullanılması önerilmektedir.



Şekil 3. Çalışma alanına ait Blueprint.

Mobil LiDAR sistemi kullanılarak yapılan çalışma, Mersin Üniversitesi Çiftlikköy kampüsünde gerçekleştirilen taramalar sonucunda elde edilen verilerin analiz edilmesiyle önemli sonuçlar ortaya koyulmuştur. Heron Lite Renkli lazer tarayıcı kullanılarak elde edilen veriler, yüksek çözünürlüklü 3B nokta bulutlarına dönüştürülmüştür. Verilerin işlenmesi sırasında hareketli nesnelere kaynaklanan gürültülerin azaltılması için çeşitli önlemler alınmış ve bu sayede elde edilen nokta bulutlarının doğruluğu artırılmıştır. Elde edilen nokta bulutları, karmaşık kentsel yapılar ve detaylı çevre özelliklerini doğru bir şekilde yansıtarak, kadastral haritalarının güncellenmesi için yüksek doğrulukta veriler sağlamıştır. Çalışma, Mobil LiDAR teknolojisinin kentsel kadastral çalışmalarında kullanılabilirliğini ve doğruluğunu göstermiştir. Giyilebilir Mobil LiDAR sistemi ile yapılan ölçümler, 5 ila 10 cm arasında değişen doğruluklarla sonuçlanmış ve bu sistemin kentsel alanlardaki yapıların ve çevrelerin detaylı haritalanmasında etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, SLAM algoritması kullanılarak yapılan taramalar, nokta bulutlarının oluşturulmasında ve harita doğruluğunun artırılmasında önemli bir rol oynamıştır.



Şekil 4. Çalışma alanının 3B nokta bulutu.

4. Tartışma

Bu araştırma, Mobil LiDAR teknolojisinin kentsel kadastro çalışmalarındaki potansiyelini ve uygulanabilirliğini detaylı bir şekilde incelemiştir. Mobil LiDAR teknolojisinin kentsel kadastro haritalarının oluşturulmasındaki etkinliğini ve doğruluğunu incelemiştir. Mersin Üniversitesi Çiftlikköy kampüsünde gerçekleştirilen araştırma, kompleks yapıların yoğun olduğu bir alanda, Heron Lite Renkli lazer tarayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Mobil LiDAR sisteminin yüksek çözünürlüklü 3B nokta bulutları oluşturarak, kentsel alanlardaki yapıların detaylı ve doğru bir şekilde haritalanmasını sağladığını göstermektedir.

GML sistemi ile yapılan ölçümler, 5 ila 10 cm arasında değişen doğruluklarla sonuçlanmış ve bu sistemin kentsel alanlardaki yapıların ve çevrelerin detaylı haritalanmasında etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur. SLAM algoritması kullanılarak yapılan taramalar, nokta bulutlarının oluşturulmasında ve harita doğruluğunun artırılmasında önemli bir rol oynamıştır. Elde edilen nokta bulutları, karmaşık kentsel yapılar ve detaylı çevre özelliklerini doğru bir şekilde yansıtarak, kadastro haritalarının güncellenmesi için yüksek doğrulukta veriler sağlamıştır.

Elde edilen bulgular, Mobil LiDAR sistemlerinin geleneksel kadastro yöntemlerine göre birçok avantaj sunduğunu göstermektedir. Özellikle, kentsel alanlardaki dinamik yapı ve karmaşık çevre koşulları göz önüne alındığında, Mobil LiDAR teknolojisi hızlı, doğru ve detaylı veri toplama imkânı sunarak kadastro çalışmalarında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Mobil LiDAR sistemlerinin kentsel yönetim ve planlama uygulamalarında yaygın olarak kullanılması, kadastro çalışmalarının doğruluğunu ve verimliliğini artırabilir. Ancak, bu teknoloji insan etkileşimi ve ek son işlem gerektirdiğinden,

operatörlerin bu konuda eğitilmesi ve sistemlerin optimize edilmesi önemlidir. Ayrıca, Mobil LiDAR teknolojisinin maliyet etkinliği ve sürdürülebilirliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Gelecekteki araştırmalar, Mobil LiDAR sistemlerinin farklı kentsel ortamlardaki performansını değerlendirmeli ve bu teknolojinin kadastro çalışmalarındaki etkinliğini artırmak için yeni yöntemler geliştirmelidir. Ayrıca, diğer uzaktan algılama teknolojileri ile entegrasyon ve veri işleme süreçlerinin iyileştirilmesi, kentsel kadastro çalışmalarında daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

5. Sonuçlar

Uzaktan algılama teknolojisindeki son gelişmeler, kentsel yönetim ve planlama uygulamalarında giderek daha fazla kullanılan GML nokta bulutlarına olan ilginin artmasına neden olmuştur. GML haritalama sistemi potansiyel göstermiştir, ancak insan etkileşimi ve ek son işlem gerektirmektedir. Bu araştırma, GML'nin 3B ölçüm için teknolojik ve metodolojik sınırlamalarını vurgulamakta ve doğruluğu sağlamak için yardımcı verilere olan ihtiyacı vurgulamaktadır. GML, farklı verilerin birleştirilmesi için uygun bir ikame olduğunu kanıtlamış ve birçok bağlamda kullanılabilirliğini göstermiştir. Bununla birlikte, doğal arazi izlemede yaygın olarak kullanılmamıştır ve çok az çalışma bu özel bağlamdaki etkinliğini değerlendirmiştir. Önceki araştırmalar, GML'nin, özellikle İHA kullanımının yasak olduğu veya GNSS araştırmasının mümkün olmadığı açık hava haritalama durumlarında fotogrametri için uygun bir yedek olabileceğini göstermiştir. LiDAR sensörleri, özellikle geleneksel ölçüm tekniklerinin yetersiz kaldığı durumlarda uygulanabilir bir alternatif olarak hizmet vermektedir. Sıkışık kentsel alanlarda uydu sinyalleri zayıf olabilir, bu da doğruluğu ve verimliliği olumsuz etkileyebilir. GML yaklaşımları, SLAM algoritması ile birleştirildiğinde, bu ve benzeri

senaryolarda önemli çözümler sağlar. Bu çalışma, HERON Lite Color taşınabilir GML'nin kadastral bölgelerin doğru bir şekilde ölçülmesindeki etkinliğini incelemiş ve taşınabilir sistemlerin sivil yapıları veya metropol bölgeleri ölçmek için kullanıldığında 5 ila 10 cm'lik doğruluklara ulaşabileceğini bulmuştur. Gelecekteki araştırmalar, kadastro uygulamaları için taşınabilir sistemlerin değerlendirilmesine ve bu ortamlarda veri toplama ve işleme için en uygun yöntemlerin belirlenmesine öncelik vermelidir.

Araştırmanın sonuçları, Mobil LiDAR teknolojisinin kentsel kadastro çalışmalarında sunduğu avantajları ve potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu teknoloji, özellikle insan etkileşimi ve ek son işlem gerektirse de modern kentsel yönetim ve planlama uygulamaları için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Mobil LiDAR sistemleri, geleneksel kadastro yöntemlerine göre daha hızlı, doğru ve detaylı veri toplama imkânı sunarak, kadastro çalışmalarında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, Mobil LiDAR sistemlerinin farklı kentsel ortamlardaki performansını değerlendirmeli ve bu teknolojinin kadastro çalışmalarındaki etkinliğini artırmak için yeni yöntemler geliştirmelidir. Ayrıca, diğer uzaktan algılama teknolojileri ile entegrasyon ve veri işleme süreçlerinin iyileştirilmesi, kentsel kadastro çalışmalarında daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, Mobil LiDAR teknolojisinin kullanımının yaygınlaştırılması ve optimize edilmesi, sürdürülebilir kentsel yönetim ve planlama uygulamalarının başarısına önemli katkılar sağlayacaktır.

Yazarların Katkısı

Burak Can Kaya; Muhammed Emin Bıyık: Metodoloji, Saha Çalışması, Modelleme, Analiz, Kontrol, Denetleme, Tartışma, Yazım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

Akar, A. (2017). Evaluation of accuracy of dems obtained from uav-point clouds for different topographical areas. *International journal of engineering and geosciences*, 2(3), 110-117.

Buuveibaatar, M., Lee, K., & Lee, W. (2022). Implementation of the LADM-Based Cadastral

- Model for Mongolia towards Transition to a 3D Cadastre. *Land*, 11(11), 2014.
- Cabo, C.; Del Pozo, S.; Rodríguez-González, P.; Ordóñez, C.; González-Aguilera, D. Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sens.* 2018, 10, 540.
- Cay, T., Toklu, N., & Esen, Ö. (2017). Evaluation of land reform policies in Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(2), 61-67.
- Chang, L., Niu, X., & Liu, T. (2020). GNSS/IMU/ODO/LiDAR-SLAM integrated navigation system using IMU/ODO pre-integration. *20(17)*, 4702.
- Chen, C., Tang, L., Hancock, C. M., & Zhang, P. (2019). Development of low-cost mobile laser scanning for 3D construction indoor mapping by using inertial measurement unit, ultra-wide band and 2D laser scanner. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(7), 1367-1386.
- Chen, Y., Tang, J., Jiang, C., Zhu, L., Lehtomäki, M., Kaartinen, H., ... & Chen, R. (2018). The accuracy comparison of three simultaneous localization and mapping (SLAM)-based indoor mapping technologies. *18(10)*, 3228.
- Cui, Y., Li, Q., & Dong, Z. (2019). Structural 3D reconstruction of indoor space for 5G signal simulation with mobile laser scanning point clouds. *Remote Sensing*, 11(19), 2262.
- Dawidowicz, A., & Żróbek, R. (2018). A methodological evaluation of the Polish cadastral system based on the global cadastral model. *Land use policy*, 73, 59-72.
- Di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, L. J., Barba, S., Martín-Jiménez, J. A., Mora, R., & González Aguilera, D. (2018). Use of a wearable mobile laser system in seamless indoor 3D mapping of a complex historical site. *Remote Sensing*, 10(12), 1897.
- Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387-2429.
- Dinlemez, M., & Ok, A. Ö. (2021). Türkiye'de Geçmişten Günümüze Taşınmaz Yönetimindeki Gelişmeler Ve Dijitalleşme Yolunda Atılan Adımlar. *Third Sector Social Economic Review*, 56(4), 2932-2943.
- Ercan, O., & Toker, K. (2022). Assessment of the completion of the forest cadastre considering the legal grounds, collaboration, and the use of technology: The case of Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(1), 49-58.
- Gollob, C., Ritter, T., & Nothdurft, A. (2020). Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and simultaneous localization and mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, 12(9), 1509.
- Hajji, R., Yaagoubi, R., Meliana, I., Laafou, I., & Gholabzouri, A. E. (2021). Development of an integrated BIM-3D GIS approach for 3D cadastre in

- Morocco. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 351.
- ISO 19152. (2012). Geographic information – Land Administration Domain Model (LADM). <https://www.iso.org/standard/51206.html> (Erişim Tarihi: 9 Mayıs 2024).
- Karabacak, A., & Yakar, M. (2022). Giyilebilir Mobil LiDAR Kullanım Alanları ve Cambazlı Kilisesinin 3B Modellemesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(2), 37-52.
- Karabacak, A., & Yakar, M. (2023a). Incorrect use of wearable mobile LiDAR: Example of Mersin Soli Beach and Ankara National Library Underpass. *Intercontinental Geoinformation Days*, 7, 234-237.
- Karabacak, A., & Yakar, M. (2023b). Giyilebilir Mobil LiDAR'ın Kadastroda Kullanılabilirliği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(2), 52-60.
- Karabacak, A., & Yakar, M. (2023d). 3D Modeling of Mufti Abdullah Sıddık Mosque using Wearable Mobile LiDAR. *Advanced LiDAR*, 3(1), 01-09.
- Karataş, L., Alptekin, A., & Yakar, M. (2022). Analytical Documentation of Stone Material Deteriorations on Facades with Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetric Methods: Case Study of Şanlıurfa Kışla Mosque. *Advanced LiDAR*, 2(2), 36-47.
- Kuçak, R. A., Erol, S., & Alkan, R. M. (2023). iPad Pro LiDAR sensörünün profesyonel bir yersel lazer tarayıcı ile karşılaştırmalı performans analizi. *Geomatik*, 8(1), 35-41.
- Morgan, M., & Tempfli, K. (2000). Automatic building extraction from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 3(2), 616-623.
- Nazari, S. W., Akarsu, V., & Yakar, M. (2023). Analysis of 3D Laser Scanning Data of Farabi Mosque Using Various Softwares. *Advanced LiDAR*, 3(1), 22-34.
- Otero, R., Lagüela, S., Garrido, I., & Arias, P. (2020). Mobile indoor mapping technologies: A review. *Automation in Construction*, 120, 103399.
- Petronijević, M., Višnjevac, N., Prašević, N., & Bajat, B. (2021). The extension of IFC for supporting 3D cadastre LADM geometry. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 297.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*, Doktora tezi, Royal Institute of Technology (KTH) Department of Transport and Economics Division of Geodesy, Stockholm, İsveç.
- Sevgen, S. C. (2019). Airborne lidar data classification in complex urban area using random forest: a case study of Bergama, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(1), 45-51.
- Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2019). Kültürel mirasın dijital dokümantasyonu: Taşkent Sultan çeşmesinin fotogrametrik teknikler kullanarak 3B modelinin yapılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 1-6.
- Velas, M., Spanel, M., Sleziak, T., Habrovec, J., & Herout, A. (2019). Indoor and outdoor backpack mapping with calibrated pair of velodyne LiDARs. *Sensors*, 19(18), 3944.
- Wei, S. (2008). Building boundary extraction based on lidar point clouds data. *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 157-161.
- Yakar M, Yılmaz H M & Mutluoğlu H M (2009). Hacim Hesaplamalarında Laser Tarama ve Yersel Fotogrametrinin Kullanılması. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Yakar, M., & Karabacak, A., (2023c). Giyilebilir Mobil Lidar ve Uygulamaları, Isbn: 978-625-8101-40-9, *Atlas Akademi*, Baskı Sayısı: 1, 196 Sayfa, Konya, Türkiye.
- Yiğit, A. Y., & Ulvi, A. (2020). İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 46-54.
- Yiğit, A. Y., Hamal, S. N. G., Yakar, M., & Ulvi, A. (2023). Investigation and Implementation of New Technology Wearable Mobile Laser Scanning (WMLS) in Transition to an Intelligent Geospatial Cadastral Information System. *Sustainability*, 15(9), 7159.
- Yomralıoğlu, T. (2011). Dünya'da arazi yönetimi. *Türkiye'de sürdürülebilir arazi yönetimi çalışmaları*, 26-27.
- Zeybek, M. (2021). Indoor mapping and positioning applications of hand-held lidar simultaneous localization and mapping (slam) systems. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(1), 7-16.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>