



## Kültürel Mirasların Korunmasına Yönelik LiDAR ve İHA Fotogrametrisi Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı

Davut Balcı<sup>1\*</sup>, Ali Ulvi<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> İller Bankası Gaziantep Bölge Müdürlüğü, 27090, Gaziantep, Türkiye; (davutbalci1412@gmail.com)

<sup>2</sup> 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 eğim 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 tarayıcıdaki 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

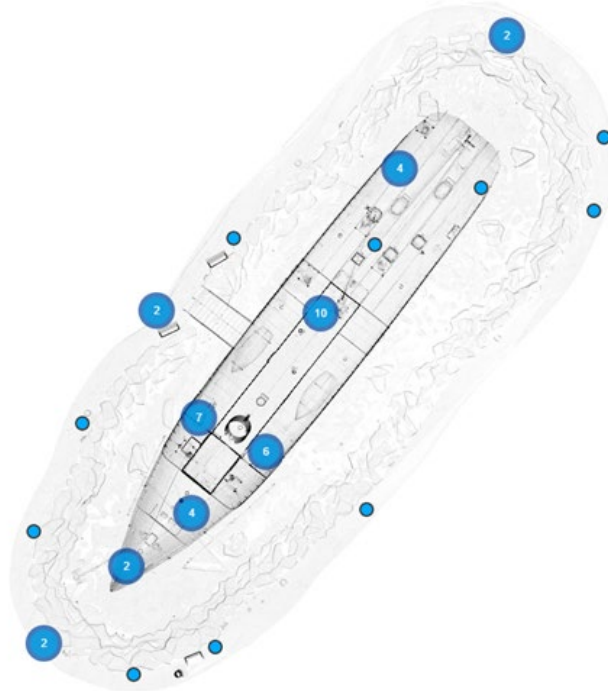
gerekir. Kalite ne kadar yüksek olursa tarama o kadar fazla zaman almaktadır. Örneğin, ¼ çözünürlükte ve 1x kalitede tarama süresi 1 dakika 30 saniye olurken, aynı çözünürlükte 4x kalite ayarında tarama süresi 7 dakika 46 saniye olur. Bu çalışmada ¼ çözünürlük ayarı ve 3x kalite ayarı kullanılmıştır. 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 orijinini tarayıcı alet kabul eden kutupsal koordinatlar ölçülmektedir. Bunlar; ölçüm doğrusunun x eksenine ile yatay

düzlemde yaptığı açı  $\alpha$ , ölçüm doğrusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı  $\theta$  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.

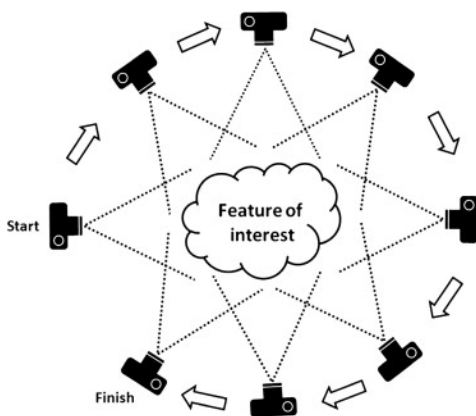
Yersel lazer tarama tekniğinde doğruluk ise, ölçüm cihazlarının tamamında olduğu gibi yersel lazer tarayıcılarla yapılan ölçümlerin sonuçları da ölçülen nesnenin biçimi, ışın geçirgenliği, yüzey pürüzlülüğü, yansıtıcılığı ve çevresel etkenler gibi farklı sebeplerden ötürü hatalı olabilmektedir (Çömert 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. Diğer 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 kullanarak 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 formulu 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  $\tau$  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  $\tau$  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.

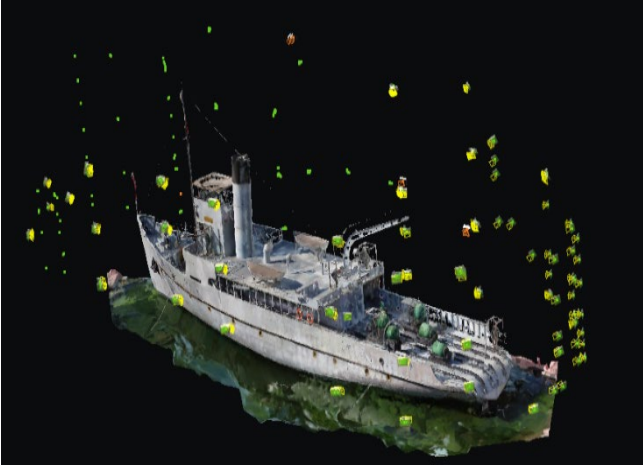
Yer kontrol noktaları: görüntü bloğundan 3B modelin coğrafi referansını almak için kullanılır. Bu noktaların görüntülere dahil edilebilmesi için zeminde İHA'dan açıkça görülebilecek konumlarda bulunması gerekmektedir.

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.

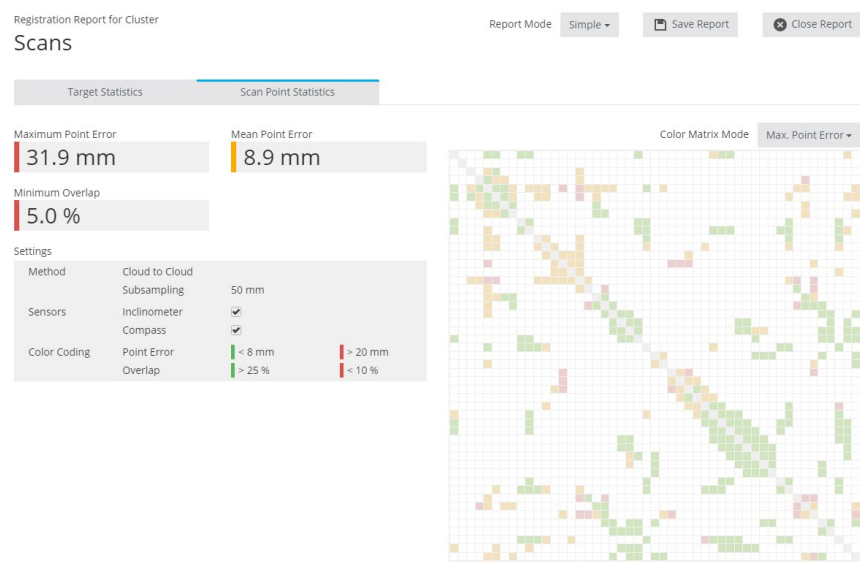
### 3.2. YLT ve İHA Fotogrametrisi Dijital Ürünlerin Değerlendirilmesi

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

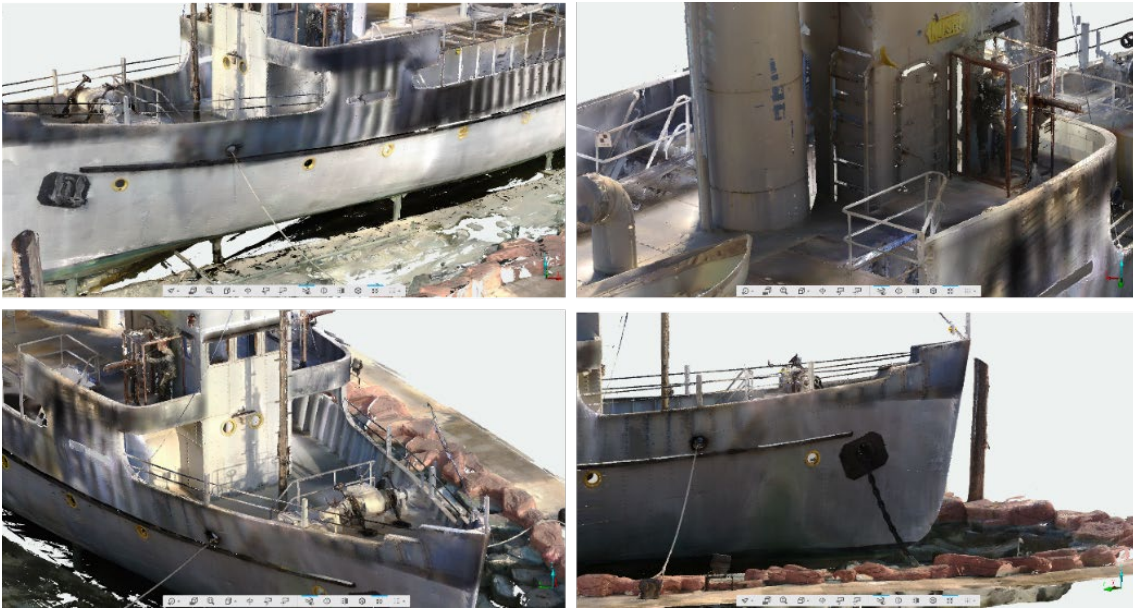


adlandırılan noktaların ortaya çıktığını belirtmek önemlidir. Bu yerlerin daha sonraki fotogrametri sürecinde eklenmesi gerekir. YLT ile elde edilen yaklaşık 3.4 milyar nokta kümeleri dışarı E57 formatında aktarıldı. YLT'den elde edilen nokta bulutları Şekil 9'da gösterilmiştir. Fotogrametrik veri analizi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

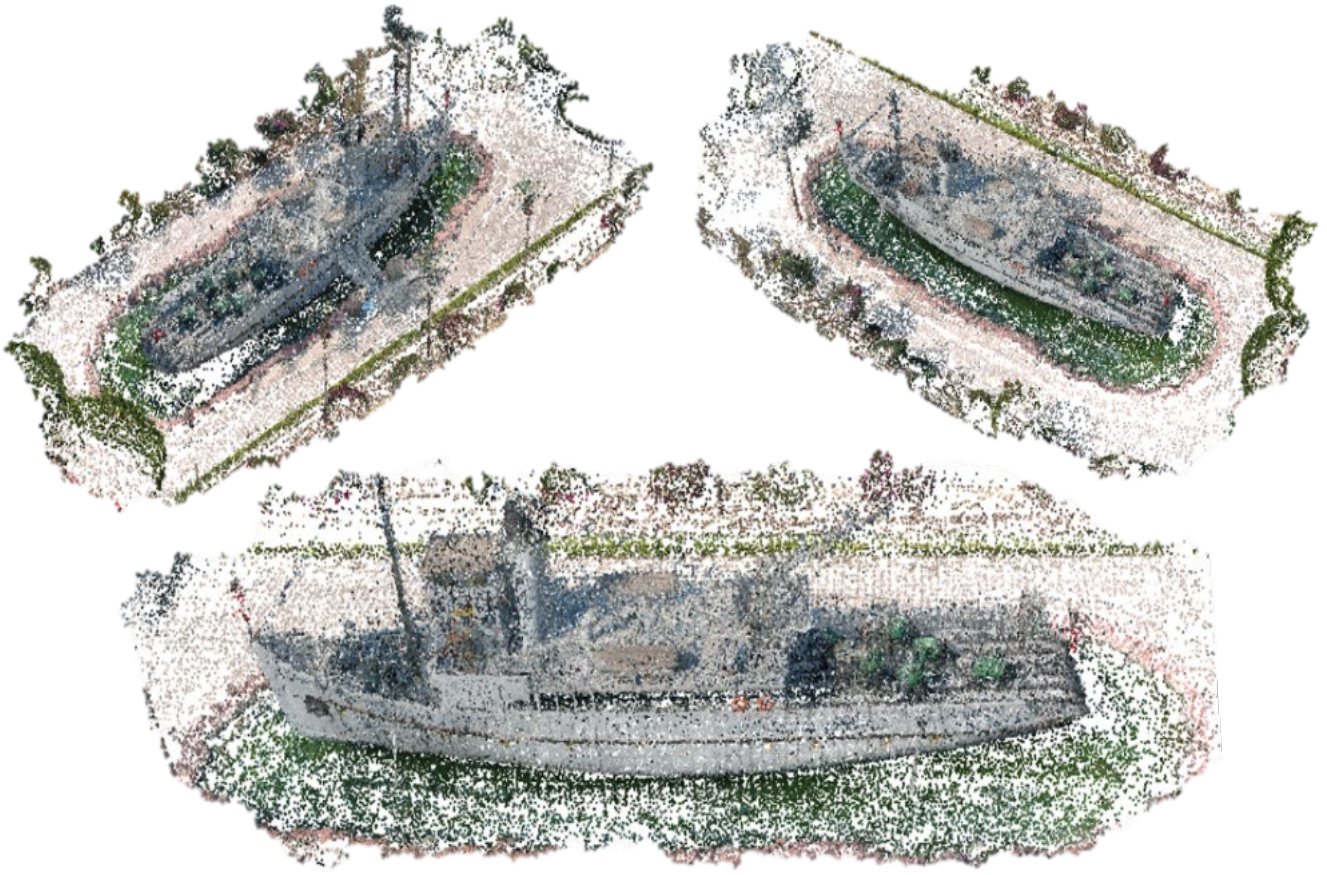


Şekil 9. YLT nihai nokta bulutları detay gösterimleri.

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.

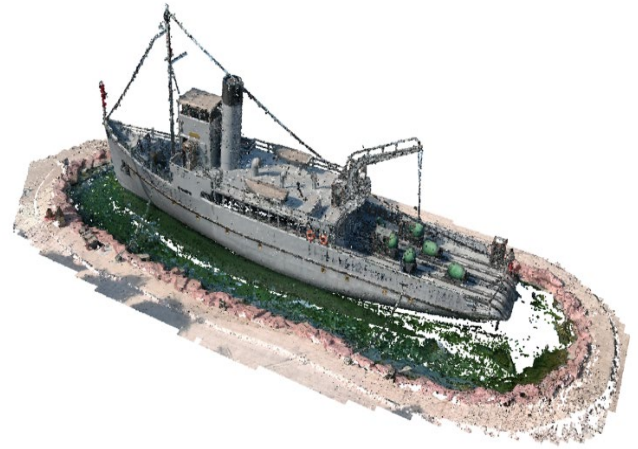
Görüntü hizalama, algoritma görüntüler üzerinde ortak noktalar arar ve her bir resim için kameranın konumunu bulur ve kamera kalibrasyon parametrelerini tahmin ederek bunları eşleştirir. Yazılım daha sonra kamera konumlarını hesaplar ve ilk seyrek nokta bulutunu oluşturur (Şekil 10).



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 <sub>x,y,z</sub>	0.682	0.873	0.828	1.528	1.536	1.825

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

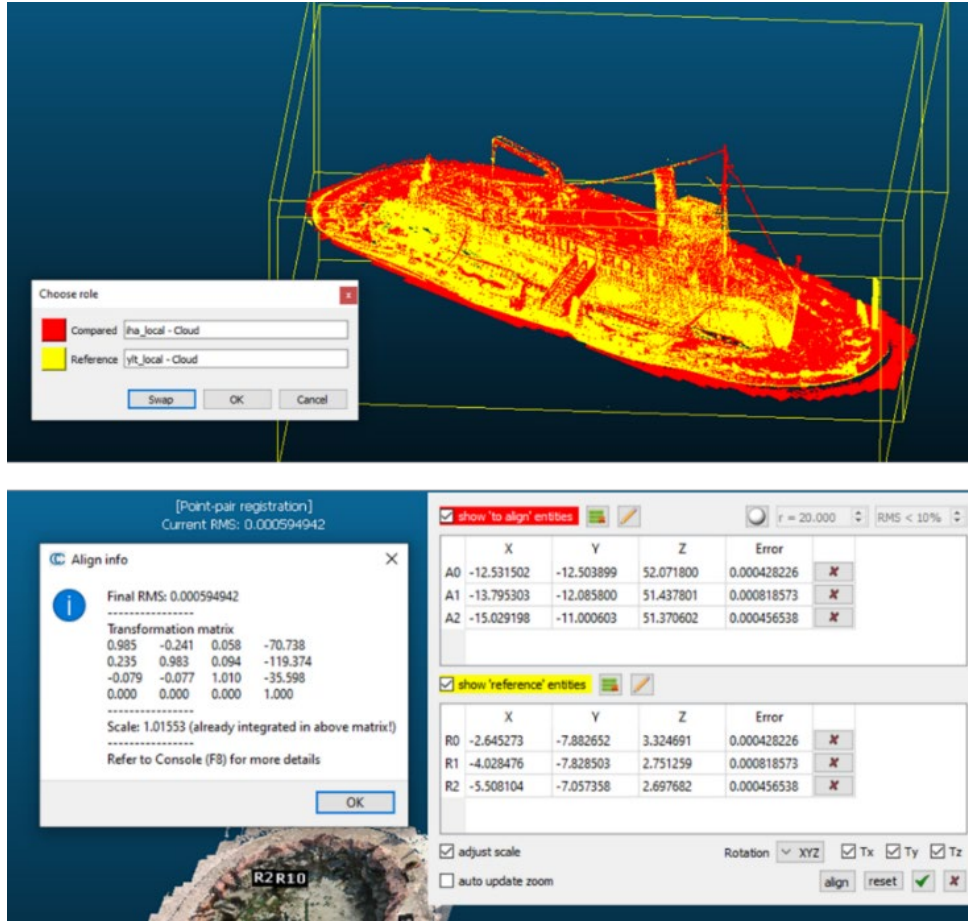
Sürecin sonunda iki yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur: birincisi lazer tarayıcı ile ikincisi ise görüntüler kullanılarak elde edilmiştir. İki veri kümesi benzersiz bir nokta bulutu, oluşturularak entegre edilmiştir. Veri birleştirme işlemi, iki bulutun aynı referans sisteminde olması ve doğruluk açısından 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.

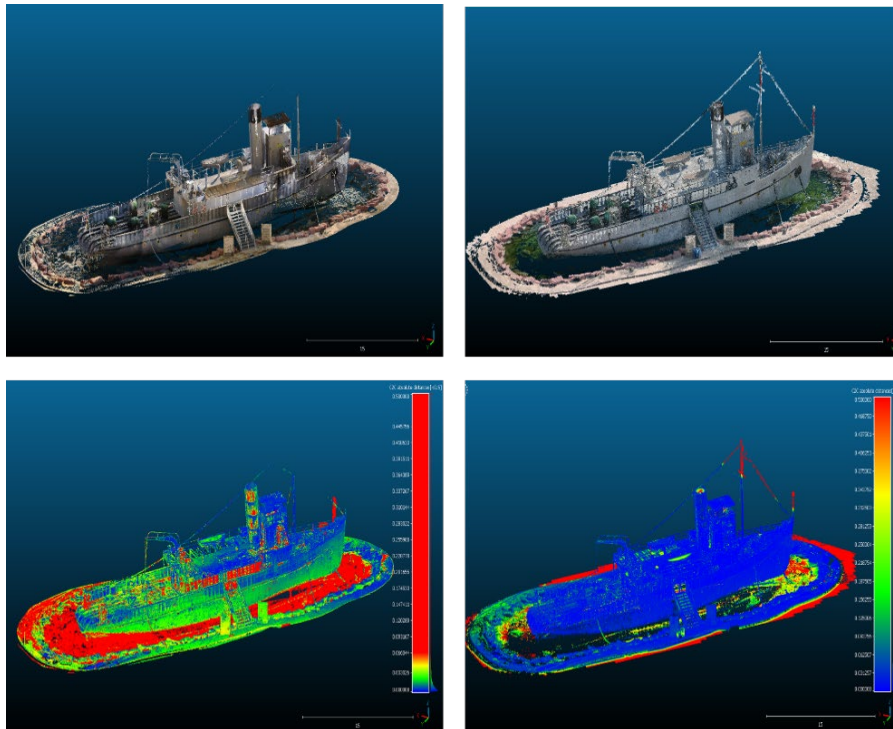
Şekil 12 incelendiğinde elbette bu değer, nokta bulutlarının birbirine ne kadar iyi uyduğunun gösterir fakat doğruluğuna karşılık gelmez, ancak aykırı değerler de dahil olmak üzere tüm noktaların sonuç hatasını göstermektedir. Bazı alanlarda YLT verilerinde hiç nokta bulunmadığından ve bazı cephe alanlarında 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 yinelemesi, 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 edilebileceği 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., Chiabrando, 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 Kadastrada 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/>