

iPhone LiDAR Tabanlı 3B Modellemenin Küçük Boyutlu Nesneler İçin Doğruluğunun Değerlendirilmesi

Seda Nur Gamze Hamal ^{1*} & Ebruhat Civelekoğlu ²

- ¹ Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri A.B.D., 33110, Mersin; (sedanurgamzehamal@gmail.com)
² Çınarlı Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, İzmir 35170, Türkiye; e.aggunlu@gmail.com



*Sorumlu Yazar:
sedanurgamzehamal@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Hamal, S. N. G. & Civelekoğlu, E. (2025). iPhone LiDAR Tabanlı 3B Modellemenin Küçük Boyutlu Nesneler İçin Doğruluğunun Değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 7(2), 60-71.

Geliş : 15.12.2025
Revize 1 : 24.12.2025
Kabul : 25.12.2025
Yayınlama : 25.12.2025

Özet

Bu çalışma, küçük ölçekli ve detay seviyesi yüksek nesnelerin üç boyutlu (3B) olarak modellenmesinde iPhone 16 Pro Max Light Detection and Ranging (LiDAR) sensörünün performansını yersel fotogrametri yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Yüzey geometrisi ve doku karmaşıklığı bakımından farklı üç obje üzerinde yürütülen deneysel çalışma kapsamında, her iki yöntemden elde edilen modeller görsel kalite, ölçümsel doğruluk ve yüzey fark analizleri Cloud-to-Cloud (C2C) üzerinden incelenmiştir. Fotogrametrik modeller yüksek çözünürlüklü görüntülere dayalı olarak ayrıntılı yüzey geometrisini başarıyla temsil etmiş ve RMSE değerleri 0,152–0,168 cm aralığında gerçekleşmiştir. Buna karşılık iPhone LiDAR sensörü hızlı veri üretimi ve yüksek taşınabilirlik avantajları sunmakla birlikte, küçük nesne ölçeğinde derinlik çözünürlüğü ve nokta yoğunluğuna bağlı sınırlılıklar göstermiş; RMSE değerleri 0,240–0,274 cm aralığında seyretmiştir. C2C analizleri özellikle karmaşık yüzeylerde LiDAR sapmalarının arttığını ve ince detayların düzleştiğini ortaya koymuştur. Bulgular, mobil LiDAR sistemlerinin küçük nesnelerin hızlı ön-belgelenmesi ve orta düzey detay gerektiren uygulamalar için uygun olmakla birlikte, yüksek doğruluk gerektiren kültürel miras, arkeolojik buluntu veya laboratuvar ölçekli modellemelerde fotogrametrinin daha güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Çalışma ayrıca sensör çözünürlüğü, yazılım temelli işleme teknikleri ve hibrit modelleme yaklaşımlarının gelecekte küçük ölçekli modelleme performansını iyileştirmeye yönelik önemli araştırma alanları sunduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: iPhone LiDAR, Fotogrametri, Structure-from-Motion (SfM), (C2C) analizi.

Evaluation of iPhone LiDAR-Based 3D Modeling Accuracy for Small-Sized Objects

*Corresponding Author:
sedanurgamzehamal@gmail.com

Research Article

Citation: Hamal, S. N. G. & Civelekoğlu, E. (2025). Evaluation of iPhone LiDAR-Based 3D Modeling Accuracy for Small-Sized Objects. *Turkish Journal of LiDAR*, 7(2), 60-71 (in Turkish).

Received : 15.12.2025
Revised 1 : 24.12.2025
Accepted : 25.12.2025
Published : 25.12.2025

Abstract

This study comparatively evaluates the performance of the iPhone 16 Pro Max Light Detection and Ranging (LiDAR) sensor and terrestrial photogrammetry for three-dimensional (3D) modeling of small-sized objects with a high level of geometric detail. An experimental framework was conducted using three objects exhibiting different surface geometries and texture complexities, and the resulting models were assessed in terms of visual quality, metric accuracy, and surface deviation through Cloud-to-Cloud (C2C) analysis. Photogrammetric models, generated from high-resolution imagery, successfully represented fine surface geometry, yielding RMSE values in the range of 0.152–0.168 cm. In contrast, while the iPhone LiDAR sensor provides advantages in rapid data acquisition and high portability, it exhibited limitations related to depth resolution and point density at the small-object scale, with RMSE values ranging from 0.240 to 0.274 cm. C2C analyses revealed increased deviations in LiDAR-derived models, particularly over geometrically complex surfaces, where fine details tended to be smoothed or flattened. The findings indicate that although mobile LiDAR systems are suitable for rapid preliminary documentation of small objects and applications requiring a moderate level of detail, photogrammetry remains a more reliable approach for high-accuracy applications such as cultural heritage documentation, archaeological artifact recording, and laboratory-scale modeling. The study further highlights sensor resolution, software-based processing strategies, and hybrid modeling approaches as key research directions for improving small-scale 3D modeling performance in future studies.

Keywords: iPhone LiDAR, Photogrammetry, Structure-from-Motion (SfM), Cloud-to-Cloud (C2C) analysis.

1. Giriş

Üç boyutlu (3B) modelleme, nesne ya da yüzeylerin dijital ortamda geometrik ve görsel olarak temsil edilmesini sağlayan güçlü bir teknolojidir. Bu yöntem sayesinde nesneler fiziksel temas olmadan belgelenebilir, ölçülebilir ve uzun süreli olarak korunabilir. Bu nedenle 3B modelleme; kültürel miras dokümantasyonu, arkeolojik buluntuların kaydı, mimari analizler, endüstriyel denetim süreçleri, adli araştırmalar ve sanal gerçeklik uygulamaları gibi pek çok alanda önemli bir araç haline gelmiştir (Fidan & Fidan, 2021; Yiğit, Paukkonen, 2023; Zang & Lan, 2025; Soyluoğlu vd., 2025; Yiğit & Ulvi, 2025). Teknolojinin daha erişilebilir hâle gelmesiyle birlikte, 3B veri üretimi artık yalnızca uzman araştırmacıların değil, saha uygulayıcılarının ve teknik bilgisi sınırlı kullanıcıların da başvurabileceği bir yöntem haline gelmiştir (Uzun vd., 2022; Fidan, 2025a;b).

3B modelleme sürecinin temel aşaması, fiziksel gerçekliğe ilişkin verinin doğru toplanmasını gerektirir. Bu amaçla yaygın olarak fotogrametri ve LiDAR (Light Detection and Ranging) yöntemleri kullanılmaktadır (Fidan & Ulvi, 2022). Fotogrametri, çoklu görüntülerden 3B geometri üretmeye dayanan bir görüntü tabanlı yöntemdir ve uygun çekim koşullarında karmaşık yüzeyleri yüksek hassasiyetle modelleyebilir (Fidan, 2025b; Ulvi & Hamal, 2025). LiDAR ise yüzeye gönderilen lazer darbelerinin geri dönüş sürelerini ölçerek mesafe verisi elde eder ve doğrudan nokta bulutu üretir. Yersel lazer tarayıcılar (YLT) veya profesyonel haritalama dronları ile kullanılan LiDAR sistemleri, yüksek doğruluk sunsa da maliyet, ağırlık, taşınabilirlik ve düzenleyici kısıtlar gibi nedenlerle geniş kullanıcı grupları için erişilebilir değildir (Dostal & Yamafune, 2018; Balado vd., 2025; Zhang & Lan, 2025).

Bu sınırlılıkların giderek daha fazla tartışıldığı son yıllarda, araştırmacılar düşük maliyetli ve taşınabilir çözümlere yönelmiştir. Literatürde düşük bütçeli 3B haritalama sensörlerine yönelik ilgi artmış maliyeti yüksek ve taşınması zor YLT cihazlarının yerine ise maliyeti düşük ve daha hafif tarama platformlarının kullanıldığı çalışmalar çoğalmıştır. Bununla birlikte, bu tür sistemler genellikle büyük ölçekli mimari yapıların belgelenmesine odaklanmış ve iç mekânlar için yeterli çözünürlük sunsa da karmaşık küçük ölçekli nesneler için çoğu zaman yetersiz kalmıştır (Łabędz vd., 2022; Kuçak vd., 2023; Paukkonen, 2023; Soyluoğlu vd., 2025). Tarama teknolojilerindeki maliyet düşüşü ve sensörlerin giderek daha küçük cihazlara entegre edilmesiyle birlikte, Microsoft Kinect (Qiu vd., 2022) ve Google Tango (Schöps vd., 2015) gibi erken dönem düşük maliyetli tarayıcılar ortaya çıkmıştır. Ancak bu sensörler ürettikleri verinin düşük

kalitesi nedeniyle geniş ölçekte benimsenmemiştir. Bu gelişim çizgisinin devamında Apple, 2020 yılında iPhone ve iPad Pro modellerine LiDAR sensörünü entegre ederek, tarama teknolojisini günlük kullanıma uygun cihazlara taşımıştır. Böylece toplumun büyük kısmının hâlihazırda kullandığı mobil cihazlar, aynı zamanda 3B veri üretebilen araçlara dönüşmüştür. Teknik uzmanlığı olmayan kullanıcıların bile dijital belgeleme süreçlerine katılabilmesinin önü açılmıştır (Tatsumi vd., 2023; Zhang & Lan, 2025).

iPhone/iPad Pro LiDAR sistemlerinin ortaya çıkışı, düşük maliyet, yüksek taşınabilirlik ve kullanıcı dostu arayüz gibi avantajlarla mimari miras, iç mekân tarama ve hızlı saha belgelenmelerinde önemli bir alternatif oluşturmuştur. Ancak burada önemli bir sınırlılık göze çarpmaktadır: Literatürde iPhone/iPad Pro LiDAR teknolojisi çoğunlukla geniş yüzeyler, iç mekân hacimleri ve dış cephe taramaları gibi büyük ölçekli uygulamalarda değerlendirilmiş; buna karşın küçük boyutlu, detay seviyesi yüksek nesnelerdeki performansı neredeyse hiç sistematik olarak incelenmemiştir. Bazı çalışmalar bu sensörlerin geniş ve düz yüzeylerde kabul edilebilir doğruluk verdiğini, ancak karmaşık detaylarda nokta yoğunluğunun düşmesi, kenar yumuşaması ve yüzey bozulmalarının görüldüğünü belirtmektedir (Fidan vd., 2022; Łabędz vd., 2022; Paukkonen, 2023; Beavers vd., 2024; Grobler vd., 2025; Soyluoğlu vd., 2025; Krausková vd., 2025). Ancak bu bulgular çoğunlukla sınırlı vaka örneklerine dayandığı için yöntemin güvenilirliği, hassasiyet düzeyi ve morfolojik karmaşıklığa verdiği tepki tam olarak anlaşılamamıştır. Dolayısıyla, iPhone/iPad Pro LiDAR sistemlerinin küçük ölçekli nesnelerde ne ölçüde başarılı olduğu, hangi yüzey tiplerinde anlamlı sapmalar ürettiği, fotogrametri ile karşılaştırıldığında hangi koşullarda avantaj veya dezavantaj sunduğu gibi sorular hâlâ yanıt beklemektedir. Bu durum, literatürde açık bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu ele alarak Apple cihazına entegre iPhone 16 Pro Max LiDAR sensörünün küçük boyutlu ve detaylı yüzey morfolojisine sahip nesnelerdeki performansını fotogrametri yöntemi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Üretilen 3B modeller nokta bulutu yoğunluğu, yüzey detay seviyesi ve geometrik doğruluk gibi metrikler üzerinden karşılaştırılmıştır. Böylece iPhone LiDAR sistemlerinin küçük ölçekli obje modellemesindeki teknik kapasitesi, sınırları ve olası kullanım senaryoları ortaya konmuştur. Çalışmanın bulguları, arkeolojik buluntu belgelenmesi, küçük ölçekli kültürel miras nesneleri, müze envanterleme ve düşük maliyetli dijital arşivleme gibi alanlarda iPhone LiDAR'ın uygulanabilirliğinin yeniden değerlendirilmesine katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Nesneleri

Bu çalışmada, iPhone LiDAR ve fotogrametri yöntemlerinin küçük ölçekli nesneler üzerindeki 3B modelleme performanslarını karşılaştırmak amacıyla, yüzey geometrisi ve doku karmaşıklığı açısından farklılık gösteren üç fiziksel obje seçilmiştir. Birinci obje, yaklaşık $13,5 \times 12 \times 7,5$ cm boyutlarında, düz yüzeyli ve belirgin kenar çizgilerine sahip, prizmatik formda bir fotoğraf makinesi ambalaj kutusudur. İkinci obje ise yaklaşık $13 \times 16 \times 6$ cm ebatlarında, eğrisel formda ve renkli dış kaplamaya sahip kalp şeklinde bir hediye kutusudur. Üçüncü obje olarak ise yaklaşık $15 \times 11 \times 17$ cm boyutlarında, karmaşık oyma detaylara ve girintili-çıkıntılı yüzey yapısına sahip, Antik Mısır temalı bir büst tercih edilmiştir.

Tüm objeler, sabit bir referans düzlemi sağlayan ve her bir karesi 2,5 cm olan yüksek kontrastlı damalı zemin üzerine yerleştirilmiştir. Hem fotogrametri hem de iPhone LiDAR uygulamaları için aynı çevresel koşullar altında taranmıştır. Bu düzenleme, nesne morfolojisine bağlı olarak tarama yöntemlerinin performans farklılıklarını sistematik biçimde değerlendirmeye olanak tanımıştır.

2.2. Yersel Fotogrametri ve iPhone 16 Pro Max LiDAR ile Veri Toplama

Bu çalışmada üç boyutlu model üretimi için hem görüntü tabanlı yersel fotogrametri hem de mobil LiDAR teknolojisi kullanılmıştır. Yersel fotogrametri, nesnelerin farklı açılardan çekilmiş yüksek çözünürlüklü fotoğraflarından merkezi izdüşüm prensibi ve çoklu görüntü eşleştirme algoritmaları aracılığıyla üç boyutlu geometri elde etmeye dayanan bir yöntemdir (Yiğit & Kaya, 2025; Yiğit & Uysal, 2025). Bu yöntem, Structure-from-Motion (SfM) yaklaşımıyla birlikte çalışmakta olup, görüntülerdeki ayırt edilebilir özellik noktalarının otomatik olarak tespit edilmesi, bu noktaların görüntüler arasında eşleştirilmesi ve kamera konumlarının hesaplanması gibi aşamalarla ilerler (Sanz-Ablanedo vd., 2018; Iglhaut vd., 2019; Kovanič vd., 2024). SfM sürecinin sonunda sahnenin ilk iskeleti niteliğinde seyrek bir nokta bulutu oluşmaktadır. Ardından Multi-View Stereo (MVS) algoritmalarıyla bu yapı yoğunlaştırılarak nesnenin detay seviyesini yüksek biçimde temsil eden yoğun nokta bulutu elde edilmektedir. Bu iş akışı, yalnızca RGB görüntülerden yüksek doğruluklu 3B model üretilmesini sağlayarak fotogrametriyi küçük ölçekli nesnelerin belgelenmesinde oldukça güçlü bir yöntem hâline getirmektedir (Morita vd., 2024; Maté-González vd., 2025; Mach vd., 2025). Bu kapsamda nesneler, sabit ışık koşulları altında tripod kullanılarak

ve yüksek örtüşme oranı sağlanacak şekilde çok açılı fotoğraflarla belgelenmiştir. Çekim planı, yüzeyin tamamının kapsanmasına ve SfM tabanlı işleme için gerekli geometrik çeşitliliğin sağlanmasına yönelik olarak oluşturulmuştur. Ayrıca sahada fiziksel uzunlukları bilinen referans mesafeler işaretlenmiş ve tüm veri setlerinin ortak ölçekte karşılaştırılabilmesi güvence altına alınmıştır.

Her obje için toplam 50 adet, 24 megapiksel çözünürlüğe sahip görüntü üretilmiştir. Fotoğraflar, iPhone 16 Pro Max'in yüksek çözünürlüklü çoklu kamera sistemi kullanılarak çekilmiş olup, çekimler arasında yaklaşık %70 örtüşme sağlanmıştır. Dairesel ve eğimli açılardan yapılan bu çekimler, nesnelerin tüm yüzey detaylarının eksiksiz biçimde kaydedilmesini amaçlamıştır. Bu yaklaşım sayesinde, SfM ve MVS işlem adımlarının gerektirdiği geometrik çeşitliliği ve görüntü kalitesini sağlayan, fotogrametrik model üretimine uygun yüksek nitelikli bir veri seti elde edilmiştir (Tablo 1).

Fotogrametri görüntülerinin toplanmasının ardından ikinci veri kaynağı olarak iPhone 16 Pro Max üzerinde yer alan LiDAR sensörü kullanılmıştır. Bu sensör, Apple'ın son nesil mobil LiDAR mimarisine sahiptir ve doğrudan Uçuş Süresi (direct Time-of-Flight, dToF) prensibiyle çalışmaktadır. Sistem; bir VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) kızılötesi lazer yayıcı, SPAD tabanlı NIR CMOS alıcı (Single-Photon Avalanche Diode) ve cihazdaki jiroskop, ivmeölçer, manyetometre ve RGB kameralar ile entegre çalışan bir algılama altyapısından oluşmaktadır. Bu birleşik mimari, sensörün derinlik ölçümlerini cihazın diğer yerleşik sensörleriyle birleştirerek üç boyutlu bir yeniden yapılandırma yapmasını sağlar (Tablo 1).

Bu çok sensörlü yapı sayesinde iPhone LiDAR, tek bir tüketici sınıfı cihaz içinde hem derinlik verisini hem de yüksek çözünürlüklü renk bilgisini aynı optik ve işlem koşullarında sağlayabilmektedir. Bu özellik, LiDAR tabanlı nokta bulutu ile fotogrametrik veri setinin aynı platformdan, tutarlı kamera iç parametreleri ve benzer aydınlatma koşullarıyla elde edilmesine olanak tanıdığı için bu çalışmada tercih edilmiştir. Ek olarak, mobil LiDAR sistemi geleneksel yersel lazer tarayıcı sistemlerine kıyasla düşük maliyetli, taşınabilir ve saha kullanımı açısından oldukça pratiktir (Zeybek, 2024; Grobler & Celano, 2025; Cuperschmid vd., 2025).

Tarama işlemleri iOS tabanlı 3D Scanner uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Her obje sabit konumda bırakılmış ve operatör cihazı nesne etrafında kontrollü biçimde dolaştırarak 360° çevresel tarama yapmıştır. Ortalama 3-4 dakika süren her tarama sonucunda, objenin yüzey geometrisini temsil eden bir nokta bulutu ve eşlik eden derinlik haritası elde edilmiştir. iPhone 16 Pro Max LiDAR sensörü mutlak

ölçekte veri topladığından, elde edilen modeller doğrudan ölçekli biçimde kaydedilmiş ve analizlerde kullanılmak üzere .obj formatında dışa aktarılmıştır.

Son aşamada hem yersel fotogrametri hem de mobil LiDAR ile toplanan veriler, doğruluk değerlendirmeleri ve C2C (Cloud-to-Cloud) analizleri kapsamında karşılaştırmalı inceleme yapılabilmesi için ortak bir koordinat sistemine aktarılmıştır.

Tablo 1. iPhone 16 Pro Max kamera ve LiDAR sensör teknik özellikleri (Apple, 2024).

Bileşen	Özellik
Arka Kamera Sistemi	Üçlü kamera sistemi (Ana kamera + Ultra geniş açı + Telefoto)
Ana Kamera (Wide)	48 MP, 24/28/35 mm eşdeğer, $f/1.78$ diyafram, ikinci nesil sensör kaydırmalı OIS
Ultra Geniş Açı Kamera	48 MP, 13 mm eşdeğer, $f/2.2$ diyafram, 120° görüş alanı
Telefoto Kamera	12 MP, 5× optik zoom (120 mm eşdeğer), $f/2.8$ diyafram
Maksimum Fotoğraf Çözünürlüğü	8064 × 6048 piksel (48 MP)
Video Kayıt	4K 24/30/60 fps, ProRes ve Log video desteği
Ön Kamera (TrueDepth)	12 MP, $f/1.9$ diyafram
LiDAR Tarayıcı	Apple LiDAR Scanner (Doğrudan Uçuş Süresi- dToF)
Lazer Kaynağı	VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) kızılötesi yayıcı
Alıcı Birimi	SPAD tabanlı NIR-CMOS (Single Photon Avalanche Diode)
Tarama Prensipleri	Time-of-Flight (ToF) derinlik ölçümü
Menzil	~5 metreye kadar etkili ölçüm (iç ve dış mekân koşullarına bağlı)
Derinlik Çözünürlüğü	Milimetre ölçeğinde yakın mesafe doğruluğu
Entegrasyon	Jiroskop, ivmeölçer, manyetometre ve RGB kameralarla eşzamanlı veri füzyonu
Çıktı Formatı	.USDZ, .OBJ, .PLY (uygulamaya bağlı)
İşletim Sistemi	iOS 18 üzerinde çalışan gelişmiş sensör füzyonu
İşlemci	A18 Pro çip – fotogrametrik işlem ve LiDAR veri işleme için optimize edilmiş Neural Engine

2.3. Veri İşleme

Bu çalışmada yersel fotogrametri ve iPhone 16 Pro Max LiDAR ile toplanan veriler, karşılaştırılabilir üç boyutlu modeller üretmek amacıyla iki ayrı iş akışına tabi tutulmuş ve daha sonra ortak bir referans sisteminde analiz edilebilir hâle getirilmiştir.

Yersel fotogrametri verileri, Structure-from-Motion (SfM) ve çoklu görüntü eşleştirme (MVS)

tabanlı standart fotogrametrik iş akışı kullanılarak işlenmiştir. Bu süreçte ilk olarak görüntüler yazılım ortamına aktarılmış, otomatik özellik tespiti ve bağlayıcı nokta eşleştirmesi gerçekleştirilmiştir. Ardından kameraların iç ve dış yöneltme parametreleri çözümlenmiş ve seyrek nokta bulutu oluşturulmuştur. Yoğun nokta bulutu üretimi, üçgen mesh oluşturma ve doku kaplama adımları sırasıyla uygulanmış; elde edilen model saha ölçümlerinden belirlenen referans uzunlukları kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Fotogrametrik model daha sonra analiz sürecinde kullanılmak üzere dışa aktarılmıştır.

iPhone 16 Pro Max LiDAR verileri, Time-of-Flight sensöründen elde edilen derinlik ölçümlerinin 3D Scanner (iOS) uygulaması aracılığıyla işlenmesiyle oluşturulmuştur. Uygulama, tarama sırasında gerçek zamanlı bir nokta bulutu ve yüzey modeli üretmiş; işlem sonunda nesnenin üç boyutlu mesh modeli doğrudan ölçekli olarak dışa aktarılmıştır. LiDAR verisinde mutlak ölçek sensör tarafından otomatik olarak sağlandığından ek bir ölçeklendirme işlemine gerek duyulmamıştır. Üretilen modeller .obj formatında kaydedilmiştir.

İki yöntemle elde edilen üç boyutlu modeller, CloudCompare yazılımında Iterative Closest Point (ICP) algoritması kullanılarak aynı koordinat sistemine getirilmiş ve karşılaştırmalı analizler için konumsal uyumları standartlaştırılmıştır.

2.4. Karşılaştırmalı Analiz

Bu aşamada, yersel fotogrametri ve iPhone 16 Pro Max LiDAR yöntemleriyle üretilen üç boyutlu modellerin geometrik doğruluğu, saha ortamında yerleştirilen ve her bir karesi 2,5 cm olan dama tahtası referans hedefleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Dama tahtası üzerindeki karelerin fiziksel boyutları bilindiğinden, bu yapı hem ölçek kontrolü hem de ölçüsel doğruluk testleri için güvenilir bir referans sağlamaktadır.

Her bir modelden, dama tahtası üzerinden ve model üzerinde homojen olarak dağıtılmış 6 farklı örnek uzunluk seçilmiş ve bu uzunlukların değeri üç boyutlu modeller üzerinden yeniden ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler, ilgili referans uzunluklarla karşılaştırılarak mutlak hata, ortalama sapma ve kök ortalama kare hata (RMSE) Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır. Böylece her iki yöntemin nesne ölçeğindeki doğruluk performansı sayısal olarak belirlenmiştir.

$$V = L - X \quad (1)$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{[VV]}{n - 1}} \quad (2)$$

Bu yaklaşım, ölçek hatalarını, lokal deformasyonları ve sensör kaynaklı olası sapmaları nesne yüzeyi boyunca homojen şekilde değerlendirme imkânı sunmuş; doğruluk analizinin yöntemsel güvenilirliğini artırmıştır. Elde edilen sonuçlar, sonraki aşamada gerçekleştirilen C2C analizinin yorumlanması için temel bir metrik doğruluk bileşeni oluşturmuştur.

Doğruluk analizinin ardından, yersel fotogrametri ve iPhone 16 Pro Max LiDAR yöntemleriyle üretilen nokta bulutları arasındaki geometrik farkları nicel olarak belirlemek amacıyla Cloud-to-Cloud (C2C) analizi uygulanmıştır. C2C, iki farklı yöntemle oluşturulan 3B nokta bulutlarının yüzey geometrilerini nokta bazında karşılaştıran, yüzeyler arasındaki mesafe farklarını doğrudan ölçen bir analiz yöntemidir. Bu analiz, özellikle sensör kaynaklı hataların, yüzey deformasyonlarının ve veri yoğunluğundaki farklılıkların nesnenin tamamı boyunca mekânsal olarak nasıl dağıldığını belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır.

C2C analizinde fotogrametri nokta bulutundaki her bir noktanın, LiDAR nokta bulutundaki en yakın yüzeye olan dik mesafesi hesaplanmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni, yalnızca nokta-nokta uzaklıklarını değil, yüzey normallerine göre tanımlanan en kısa mesafeyi kullanmasıdır. Böylece, nokta yoğunluğundaki değişimlerden etkilenmeyen, daha dengeli ve yüzey temsiline duyarlı bir ölçüm elde edilmiştir. Hesaplanan sapma değerleri renk skalası ile görselleştirilmiş; bu sayede yüzey boyunca meydana gelen pozitif veya negatif farkların mekânsal dağılımı detaylı biçimde analiz edilmiştir.

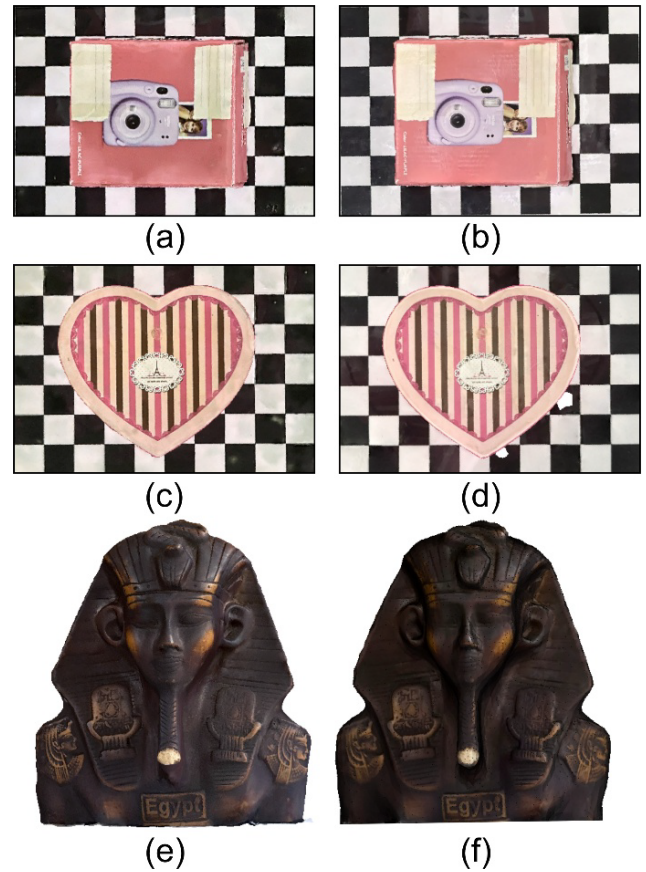
Bu analiz hem küresel doğruluk seviyesini hem de lokal sapma bölgelerini belirleyerek iki yöntemin ürettiği modeller arasındaki tutarlılığın kapsamlı biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır.

3. Bulgular

Bu bölümde, yersel fotogrametri ve iPhone 16 Pro Max LiDAR sensöründen elde edilen üç boyutlu modellerin karşılaştırmalı analizine ilişkin bulgular sunulmaktadır. Analiz süreci, öncelikle her iki yöntemin ürettiği modellerin görsel niteliğinin değerlendirilmesiyle başlamış; ardından dama tahtası referans uzunlukları kullanılarak ölçümsel doğruluk testleri gerçekleştirilmiştir. Son aşamada, iki nokta bulutu arasındaki geometrik farklılıkları nicel olarak ortaya koymak amacıyla Cloud-to-Cloud (C2C) analizi uygulanmıştır. Böylece yöntemlerin küçük ölçekli nesnelerdeki performansları yüzey detay seviyesi, geometrik bütünlük, lokal sapmalar ve hata dağılımları üzerinden bütüncül biçimde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, fotogrametrinin ayrıntı yakalama

kapasitesi ile LiDAR sensörünün hızlı veri üretme avantajını karşılaştırmalı olarak ortaya koymakta ve her iki teknolojinin nesne ölçeğindeki güçlü ve sınırlı yönlerini açıklığa kavuşturmaktadır.

Şekil 1’de üç obje için fotogrametri ile oluşturulan modeller (solda) ve iPhone LiDAR sensörüyle üretilen modeller (sağda) yan yana sunulmaktadır. Görsel inceleme, iki yöntemin özellikle küçük objelerde ürettiği geometrik keskinlik, doku tanımlayıcılığı ve yüzey sürekliliği açısından belirgin farklılıklar ortaya koyduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Fotogrametri (sol) ve iPhone 16 Pro Max LiDAR (sağ) yöntemleriyle üretilen üç objeye ait üç boyutlu modellerin görsel karşılaştırması.

Birinci objede (Şekil 1a-b), fotogrametri modelinin kenar çizgilerini daha keskin tanımladığı ve yüzey dokusunu daha yüksek ayrıntı ile aktardığı görülmektedir. LiDAR modelinde özellikle üst yüzey ve köşelerde lokal yumuşamalar, geometrik yuvarlanmalar ve nokta yoğunluğu düşüşü dikkat çekmektedir. Kareli referans zeminin kontrastlı yapısı fotogrametri çıktısında daha net gözlemlenirken, LiDAR modelinde bazı hücrelerde kırılmalar ve yüzey süreksizlikleri oluşmuştur.

İkinci objede (Şekil 1c-d), fotogrametri modeli doku düzeni ve renk dağılımını daha doğru temsil etmiş; LiDAR modelinde ise dama tahtası üzerinde boşluklar, eksik yüzeyler ve kenar bölgelerinde hatalı kapanmalar tespit edilmiştir. Yüzey geometrisi görece

basit olmasına rağmen, LiDAR sensörü nesne kenarlarının takibinde belirgin güçlük yaşamıştır.

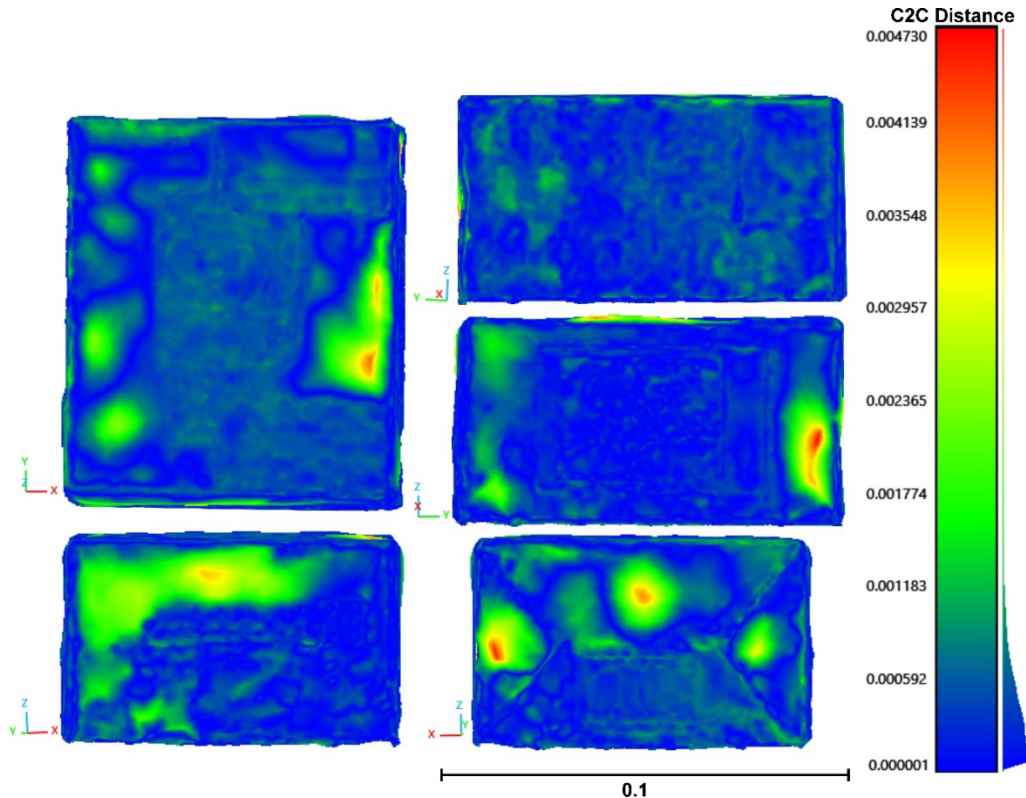
Üçüncü objede (Şekil 1e-f), fotogrametri yöntemi ayrıntı çözünürlüğü açısından belirgin biçimde üstün performans sergilemiştir. Yüz hatları, kabartma figürler ve ince oyma çizgileri fotogrametri ile açık şekilde modellenmiş; LiDAR çıktısında ise bu detayların önemli ölçüde basitleştiği ve yüzeyin genel olarak düzleştiği gözlenmiştir. Nokta yoğunluğunun düşük olması, karmaşık yüzey geometrilerinde lokal deformasyonlara yol açmıştır.

Genel olarak, görsel değerlendirme fotogrametrinin küçük ölçekli nesnelerde yüksek ayrıntı seviyesi, keskin kenar geometrisi, yüksek doku doğruluğu ve sürekli yüzey yapısı sunduğunu göstermektedir. LiDAR modelleri ise hızlı veri toplama avantajına rağmen, özellikle ince detaylarda yüzey yumuşaması, detay kaybı, boşluk oluşumu ve kenar deformasyonu gibi sınırlılıklar sergilemiştir. Bu gözlemler, sonraki doğruluk ve C2C analizlerinde elde edilen nicel sonuçlarla desteklenmiştir.

Fotogrametri modeli referans alınarak gerçekleştirilen C2C mesafe analizi sonuçlarında birinci obje için (Şekil 2), fotogrametri ve LiDAR modelleri arasındaki farkların genel olarak düşük seviyede olduğunu, ancak belirli bölgelerde lokal sapmaların belirginleştiğini göstermiştir. Yüzeyin merkezi bölgelerinde farklar çoğunlukla 0.0001-0.1 cm aralığında seyrederek mavi renk tonlarıyla temsil edilmiştir. Bu durum, LiDAR sensörünün geniş ve düz

yüzeylerde fotogrametriye yakın bir geometri üretebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, köşe bölgeleri, kenar çizgileri ve yerel çıkıntı-girinti içeren yüzeylerde sapmalar artmış; yeşil ve sarı tonlarında görüntülenen bu alanlarda farklar 0.2-0.35 cm düzeyine ulaşmıştır. En yüksek sapmalar ise (kırmızı bölgeler) kenar keskinliğinin yüksek olduğu noktalarda 0.4 cm üzeri değerlere kadar çıkmıştır. Bu dağılım, LiDAR sensörünün küçük ölçekli objelerde kenar takibinde ve detaylandırmada fotogrametriye kıyasla daha düşük performans gösterdiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, LiDAR'ın hızlı veri toplama avantajına rağmen, küçük objelerdeki ince geometrik özellikleri tutarlı biçimde temsil etme kapasitesinin sınırlı olduğunu doğrulamaktadır.

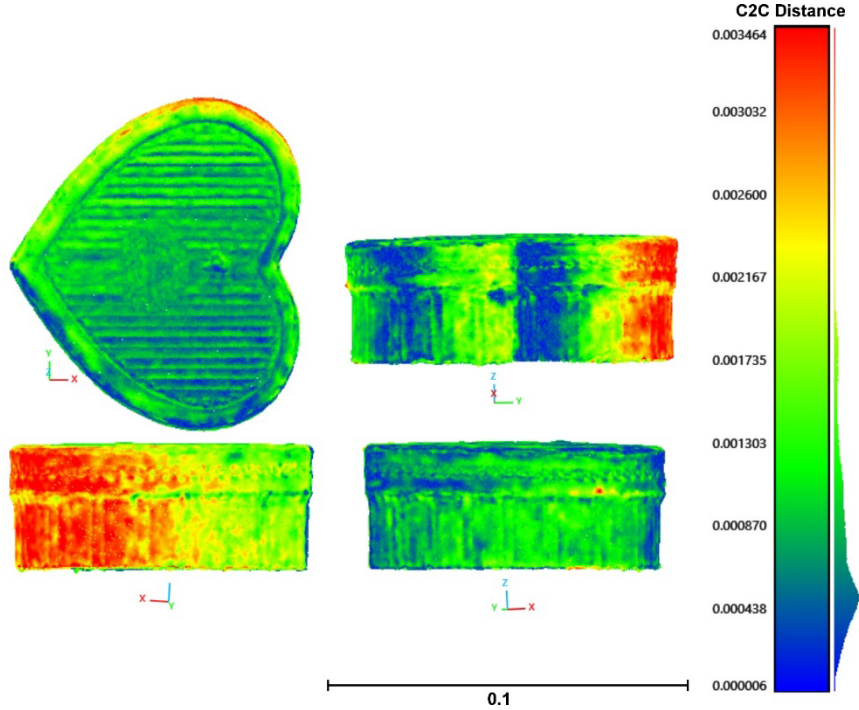
İkinci objeye ait C2C sonuçları (Şekil 3), LiDAR ve fotogrametri modelleri arasındaki yüzey farklarının nesnenin geometrik yapısına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Objenin üst yüzeyinde farkların büyük bölümünün mavi-yeşil aralığında (<0.15 cm) yoğunlaşması, LiDAR sensörünün geniş ve eğrisel yüzeylerde fotogrametriye nispeten daha tutarlı bir rekonstrüksiyon üretebildiğini göstermektedir. Ancak objenin kenar bölgelerinde ve özellikle kapak birleşim çizgisinde farkların belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu alanlarda yeşil-sarı bölgeler 0.2-0.26 cm seviyelerine ulaşırken, kutunun yan yüzeylerinin belirli bölümlerinde kırmızı tonlu yüksek sapmalar 0.3 cm'nin üzerine çıkmıştır.



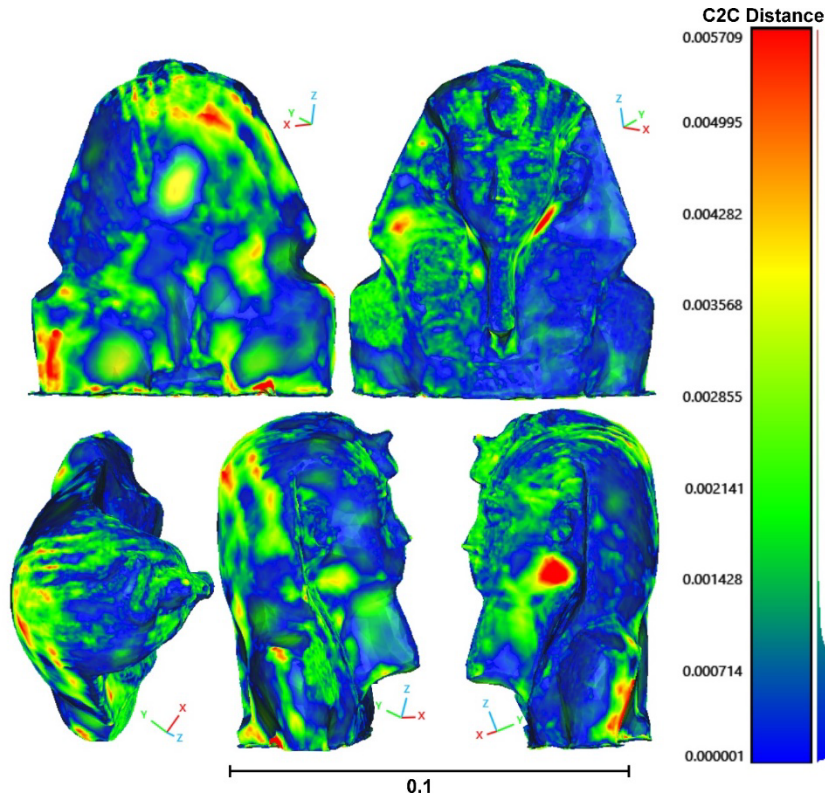
Şekil 2. Fotogrametri modeli referans alınarak iPhone 16 Pro Max LiDAR nokta bulutu üzerinde gerçekleştirilen Cloud-to-Cloud (C2C) mesafe analizi.

Bu durum, LiDAR sensörünün küçük ve ince kenar yüzeylerini takip etmede zorlandığını ve geometrik doğruluğun yüzey eğimi arttıkça düştüğünü göstermektedir. Yan yüzeylerde oluşan yapısal düzensizlikler, sensörün yatay tarama sırasında nokta yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak yüzeyde yumuşama ve lokal deformasyonlar

oluşturmuştur. Genel olarak bu bulgular, LiDAR'ın objenin ana hacim formunu kabul edilebilir ölçüde yakalayabildiğini, ancak kenar çizgileri ve ince geometrik detayların aktarımında fotogrametriye göre anlamlı sınırlılıklar taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Fotogrametri modeli referans alınarak kalp şeklindeki hediye kutusuna ait iPhone 16 Pro Max LiDAR nokta bulutu üzerinde gerçekleştirilen Cloud-to-Cloud (C2C) mesafe analizi.



Şekil 4. Fotogrametri modeli referans alınarak Antik Mısır temalı büste ait iPhone 16 Pro Max LiDAR nokta bulutu üzerinde gerçekleştirilen Cloud-to-Cloud (C2C) mesafe analizi.

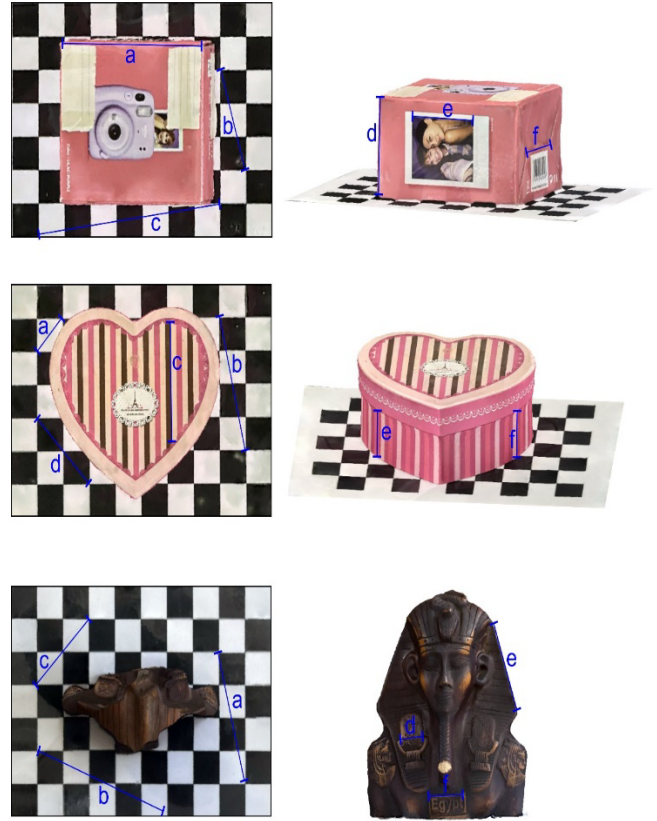
Üçüncü objeye ait C2C analizi (Şekil 4), karmaşık yüzey morfolojisine sahip objelerde LiDAR ve fotogrametri modelleri arasındaki ayrışmanın belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Büstün geniş yüzey alanlarında farkların büyük bölümü mavi-yeşil tonlarında (<0.2 cm) seyrederek iki yöntemin genel formu benzer ölçüde yakalayabildiğini ortaya koymuştur. Ancak yüz hatları, kabartmalı figürler, oyma detaylar ve girintili-çıkıntılı bölgeler gibi yüksek geometrik karmaşıklığa sahip yüzeylerde sapmalar belirgin biçimde artmıştır. Özellikle alın, burun çevresi, sakal bölgesi, lateral yüzey çizgileri ve arka saç dokusuna karşılık gelen alanlarda kırmızı tonlu yüksek sapmalar 0.4–0.57 cm aralığına ulaşmıştır. Bu durum, LiDAR sensörünün nokta yoğunluğunun karmaşık yüzeylerde düşmesi ve eğimli bölgelerde lazer geri dönüşünün zayıflaması nedeniyle yüzeyin yer yer düzleşmesine yol açtığını göstermektedir. Ayrıca büstün profil görünümünde (yan yansıtmalarda), yüz konturlarında oluşan yeşil-sarı dağılımlı 0.2–0.3 cm düzeyindeki farklar, LiDAR'ın ince yüzey kıvrımlarını fotogrametri kadar doğru izleyemediğini ortaya koymuştur. Genel olarak bu bulgular, LiDAR'ın sade ve geniş yüzeylerde kabul edilebilir doğruluk sağladığını, ancak karmaşık geometriye küçük objelerde fotogrametriye kıyasla belirgin detay kayıpları ve lokal geometrik bozulmalar ürettiğini göstermektedir.

Doğruluk değerlendirmesi kapsamında üç obje üzerinde seçilen referans uzunlukları kullanılarak fotogrametri ve iPhone 16 Pro Max LiDAR yöntemlerinin metrik hassasiyetleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5, bu analizde kullanılan a–f referans çizgilerinin objeler üzerindeki konumsal dağılımını göstermektedir. Referanslar; yatay, düşey ve eğimli hatlar dahil olmak üzere farklı geometrik yönelimleri temsil edecek şekilde belirlenmiş, böylece yöntemlerin hem genel yüzeyde hem de lokal bölgelerde göstereceği performansın bütüncül olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Her referans uzunluğu sahada fiziksel olarak ölçülmüş, ardından aynı uzunluklar fotogrametri ve LiDAR modelleri üzerinden tekrar hesaplanmıştır. Elde edilen bu üçlü karşılaştırma (gerçek ölçüm – fotogrametri – LiDAR), yöntemlerin sapma miktarlarının belirlenmesini ve her obje için RMSE değerlerinin hesaplanmasını mümkün kılmıştır. Sayısal farklar ve RMSE sonuçları Tablo 2'de sunulmaktadır.

Birinci obje, yüzey geometrisinin görece sade olması nedeniyle yöntemlerin temel ölçümsel performansını karşılaştırmak için uygun bir referans niteliği taşımaktadır. RMSE sonuçları, fotogrametrinin 0,152 cm ile daha yüksek tutarlılık sunduğunu; iPhone

LiDAR sisteminin ise 0,262 cm ile belirgin biçimde daha yüksek hataya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, düşük karmaşıklıkta yüzeylerde dahi LiDAR sensörünün konumsal doğruluğunun sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Doğruluk analizinde kullanılan referans uzunluklarının üç obje üzerinde konumlandırılması.

İkinci obje, eğimli ve kısmen kavisli yüzey yapısı sayesinde yöntemlerin yönsel duyarlılıklarını sınanan bir test ortamı sağlamıştır. RMSE'nin fotogrametri için 0,158 cm, LiDAR için ise 0,240 cm olarak hesaplanması, yüzey eğriliği arttıkça iki yöntem arasındaki doğruluk farkının korunduğunu ve fotogrametrinin metrik stabilitesini sürdürdüğünü göstermektedir. Bu sonuç, LiDAR sensörünün özellikle küçük ölçekli eğim değişimlerine karşı daha yüksek hata üretme eğiliminde olduğunu işaret etmektedir.

Üçüncü obje, detay yoğunluğu ve geometrik karmaşıklık açısından yöntemlerin performans farklılıklarını en belirgin şekilde ortaya koyan örneklerdir. RMSE değerleri fotogrametride 0,168 cm, LiDAR'da ise 0,274 cm olarak gerçekleşmiştir. Bu fark, LiDAR sensörünün karmaşık yüzey topolojisini temsil ederken nokta yoğunluğu ve derinlik çözünürlüğü açısından sınırlılıklar yaşadığını; buna karşılık fotogrametrinin yüksek çözünürlüklü görüntüler sayesinde küçük morfolojik değişimleri daha doğru yakalayabildiğini teyit etmektedir.

Tablo 2. Fotogrametri ve iPhone LiDAR yöntemleriyle elde edilen ölçüm uzunluklarının karşılaştırılması ve yöntemler arası farkların nicel değerlendirmesi.

Obje	N.N.	Ölçülen Uzunluk (cm)	Fotogrametri (cm)	LiDAR (cm)	$V_{\text{Fotogrametri}}$ (cm)	V_{LiDAR} (cm)	$m_{\text{Fotogrametri}}$ (cm)	m_{LiDAR} (cm)
1. Objeye	a	13,5	13,65	13,85	-0,15	-0,35	0,152	0,262
	b	7,9	7,74	7,57	0,16	0,33		
	c	17,6	17,71	17,74	-0,11	-0,14		
	d	7	7,09	7,15	-0,09	-0,15		
	e	6	5,89	6,12	0,11	-0,12		
	f	5,9	6,14	6,25	-0,24	-0,35		
2. Objeye	a	3,5	3,65	3,15	-0,15	0,35	0,158	0,24
	b	10,3	10,44	10,55	-0,14	-0,25		
	c	9,2	9,05	9,39	0,15	-0,19		
	d	7	7,26	7,21	-0,26	-0,21		
	e	3,7	3,61	3,9	0,09	-0,2		
	f	3,7	3,6	3,9	0,1	-0,2		
3. Objeye	a	10,31	10,54	10,05	-0,23	0,26	0,168	0,274
	b	13,46	13,66	13,74	-0,2	-0,28		
	c	9,01	8,79	9,4	0,22	-0,39		
	d	7	6,92	6,75	0,08	0,25		
	e	2,9	2,99	2,64	-0,09	0,26		
	f	3,6	3,48	3,45	0,12	0,15		

4. Tartışma

Bu çalışmada iPhone 16 Pro Max LiDAR sensörünün küçük ölçekli nesnelerdeki üç boyutlu modelleme performansı fotogrametri ile karşılaştırılmış ve iki yöntemin nesne ölçeğindeki davranışları farklı metrikler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, mobil LiDAR sistemlerinin hızlı veri üretimi ve taşınabilirlik açısından önemli avantajlara sahip olduğunu; ancak küçük ve detay gerektiren yüzeylerde fotogrametriye göre daha yüksek hata değerleri ürettiğini göstermektedir. Bu durum, RMSE hesaplamaları ve C2C analizlerinde gözlenen yüzey farklarıyla tutarlı bir biçimde ortaya çıkmıştır.

Fotogrametri modellerinin üç obje üzerinde de düşük hata değerleri üretmesi (0,152–0,168 cm), yöntemin küçük boyutlu nesnelerde detay seviyesi yüksek yüzeyleri doğru biçimde temsil edebildiğini göstermektedir. Yüksek çözünürlüklü görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutu, kenar keskinliği, yüzey sürekliliği ve mikro-doku tanımlayıcılığı açısından LiDAR'a göre daha başarılı bir temsil sunmuştur. Literatürde fotogrametrinin küçük ölçekli nesnelerde yüksek doğruluk sağlamasına ilişkin bulgular bu gözlemleri desteklemektedir (Sanz-Ablanedo vd., 2018; Iglhaut vd., 2019; Morita vd., 2024; Maté-González vd., 2025).

LiDAR modellerinde ise üç obje boyunca RMSE değerlerinin 0,240–0,274 cm aralığında seyretmesi, sensörün küçük nesne ölçeğinde belirli teknik sınırlılıklarla karşılaştığını göstermektedir. Derinlik çözünürlüğünün kısa menzilde sınırlı olması ve yüzey eğimi arttıkça nokta yoğunluğunun azalması, modellerde kenar yumuşaması, detay düzleşmesi ve yüzey süreksizliklerine yol açmıştır. Özellikle üçüncü objede tespit edilen yüksek C2C farkları (0,57 cm'ye ulaşan lokal sapmalar), karmaşık topolojilerde LiDAR verisinin yüzey ayrıntılarını sınırlı bir doğrulukla temsil edemediğine işaret etmektedir. Bu bulgular, mobil LiDAR sensörlerinin ince detaylara sahip yüzeylerde doğruluk kayıpları ürettiğini bildiren önceki çalışmalarla uyumludur (Łabędz vd., 2022; Paukkonen, 2023; Beavers vd., 2024; Krausková vd., 2025).

İkinci objede LiDAR'ın daha dengeli bir performans göstermesi, sensörün geniş ve eğrisel yüzeylerde daha stabil bir rekonstrüksiyon sağlayabildiğini göstermektedir. Ancak bu durum küçük ve keskin kenar bölgelerinde geçerli olmamış; bu alanlarda hata seviyeleri artmıştır. Bu gözlem, LiDAR'ın büyük ölçekli yapı yüzeylerinde kabul edilebilir doğruluk sunarken küçük nesnelere doğru inildikçe hassasiyet kayıplarının belirginleştiğini bildiren literatürle tutarlıdır (Grobler vd., 2025; Soyuluoğlu vd., 2025).

iPhone LiDAR sistemlerinin küçük boyutlu ve karmaşık yüzey morfolojisine sahip objelerdeki performansı literatürde sınırlı sayıda çalışma ile ele alınmış olup, bu alan hâlen araştırma ihtiyacı barındırmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, sensörün bu tür nesnelerde kabul edilebilir düzeyde doğruluk üretebildiğini, ancak fotogrametriye kıyasla daha yüksek sapmalar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle iPhone LiDAR'ın küçük nesnelerin hızlı, pratik ve taşınabilir ön-belgelemesi, sahada hızlı durum tespiti yapılması ve detay seviyesi orta düzeyde olan uygulamalar için uygun bir seçenek olduğu değerlendirilebilir. Buna karşılık, milimetre-altı doğruluk gerektiren müze envanterleme, arkeolojik mikro-buluntu analizleri veya hassas laboratuvar modellerinde fotogrametrinin sunduğu detay seviyesi LiDAR'ın üzerinde kalmaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, küçük ölçekli ve detay seviyesi yüksek nesnelerin üç boyutlu olarak modellenmesinde iPhone 16 Pro Max LiDAR sensörünün performansını yersel fotogrametri yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Üç farklı obje üzerinden yürütülen analizler, fotogrametrinin yüksek çözünürlüklü görüntü verisi sayesinde ayrıntılı yüzey geometrisini daha doğru biçimde temsil ettiğini, LiDAR sensörünün ise hızlı veri toplama ve taşınabilirlik avantajlarına rağmen ölçümsel doğruluk açısından sınırlılıklar taşıdığını göstermiştir. RMSE değerleri fotogrametri için 0,152–0,168 cm, LiDAR için ise 0,240–0,274 cm aralığında gerçekleşmiş; C2C analizleri özellikle karmaşık yüzeylerde LiDAR sapmalarının belirgin şekilde arttığını ortaya koymuştur.

Bu bulgular, küçük nesne modellemesi gibi ayrıntı düzeyi yüksek uygulamalarda fotogrametrinin daha uygun bir yöntem olduğunu doğrularken, iPhone LiDAR sisteminin kabul edilebilir doğrulukta hızlı rekonstrüksiyonlar üretebildiğini göstermektedir. Bu nedenle LiDAR sensörü; ön-belgeleme çalışmaları, pratik saha kayıtları, detay gereksinimi orta düzeyde olan eğitim ve tanı amaçlı 3B taramalar gibi senaryolarda işlevsel bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Bununla birlikte çalışmanın bazı kısıtları bulunmaktadır. Kullanılan iPhone LiDAR sensörünün kısa menzilli derinlik çözünürlüğü ve nokta yoğunluğu, karmaşık geometrilere detay kayıplarına yol açmıştır. Objelerin boyutlarının 5–20 cm aralığında olması, sensörün teknik sınırlarının daha belirgin hale gelmesine neden olmuştur. Ayrıca LiDAR verisi tek bir uygulama üzerinden elde edildiğinden, farklı yazılım platformlarının iyileştirme ve filtreleme yöntemlerinin performansa etkisi bu çalışma kapsamında

değerlendirilememiştir. Fotogrametri verileri ise kontrollü ışık koşullarında üretilmiş olup, saha ortamındaki değişken aydınlatma koşullarının yöntemler arası doğruluk farkına etkisi ayrıca incelenmemiştir. Ek olarak, karşılaştırma yalnızca üç obje üzerinden gerçekleştirilmiş; daha geniş morfolojik çeşitliliğe sahip nesne grupları bu çalışmanın alanı dışında kalmıştır.

Gelecek çalışmalarda, LiDAR sensörünün küçük nesne performansını artırmak için sensör füzyonu yaklaşımıyla fotogrametri verileriyle bütünleştirilmesi, yazılım tabanlı yüzey iyileştirme ve nokta yoğunluğu artırma algoritmalarının kullanılması ve derin öğrenme destekli nokta bulutu tamamlama tekniklerinin uygulanması potansiyel gelişim alanları sunmaktadır. Farklı mobil cihaz modelleri, derinlik sensörü mimarileri ve yazılım işleme tekniklerinin karşılaştırıldığı daha geniş kapsamlı çalışmalar, mobil LiDAR sistemlerinin nesne ölçeğindeki sınırlarını daha kapsamlı biçimde ortaya koyacaktır. Ayrıca değişken ışık koşulları, farklı yüzey malzemeleri, parlaklık ve yansıtıcılık gibi optik faktörlerin sistematik olarak test edilmesi, sensörlerin gerçek saha uygulamalarındaki davranışlarını anlamak açısından önemli bir katkı sağlayacaktır.

Genel olarak bu çalışma, iPhone LiDAR ve fotogrametri yöntemlerinin küçük ölçekli nesne modelleme bağlamındaki davranışlarını bütüncül biçimde ortaya koymuş; her iki teknolojinin pratik uygulama alanlarına ilişkin önemli bir değerlendirme çerçevesi sunmuştur. Elde edilen bulgular, mobil cihaz tabanlı 3B modelleme yaklaşımlarının geliştirilmesi için hem teknik hem metodolojik açıdan yol gösterici niteliktedir.

Yazarların Katkısı

Seda Nur Gamze Hayat: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Uygulama, Görselleştirme, Modelleme, Analiz ve yorumlama, Yazma – orijinal taslak, Kontrol.

Ebruhayat Civelekoğlu: Denetleme/danışmanlık, Proje yönetimi, Uygulama, Modelleme, Analiz, Yazım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışma da herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Apple Inc. (2024). iPhone 16 Pro Max – Technical Specifications. Apple Official Website.
- Balado, J., Garozzo, R., Winiwarter, L., & Tilon, S. (2025). A systematic literature review of low-cost 3D mapping solutions. *Information Fusion*, 114, 102656. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102656>
- Beavers, C., Day, C., Krietemeyer, A., Peterson, S. M., Ahn, Y., & Li, X. (2024). Mapping of Pavement Conditions Using Smartphone/Tablet LiDAR Case Study: Sensor Performance Comparison (No. 24-16). San Jose State University. College of Business. Mineta Transportation Institute. <https://doi.org/10.31979/mti.2024.2224>
- Cuperschmid, A. R. M., Neves de Oliveira, G., & Froner, Y. A. (2025). Exploring the use of lidar in smartphones: documenting the frontispiece of Saint Francis of Assisi Church in Ouro Preto, Brazil. *International Journal of Architectural Heritage*, 19(9), 1397-1414. <https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2344163>
- De Paolis, L. T., De Luca, V., Gatto, C., D'Errico, G., & Paladini, G. I. (2020, August). Photogrammetric 3D reconstruction of small objects for a real-time fruition. In *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (pp. 375-394). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58465-8_28
- Dostal, C., & Yamafune, K. (2018). Photogrammetric texture mapping: A method for increasing the Fidelity of 3D models of cultural heritage materials. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.01.024>
- Fidan, D., & Fidan, Ş. (2021). Yersel lazer tarama teknolojileriyle oluşturulan 3B modellerin akıllı kent uygulamalarında kullanımı: Mersin Süslü Çeşme örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 48-57.
- Fidan, D., Oruç, M. E., Hamal, S. N. G., & Fidan, Ş. (2022). Tersine mühendislik uygulamalarında yersel lazer tarayıcıların kullanım olanaklarının araştırılması; klasik otomobiller örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(1), 1-10.
- Fidan, Ş. (2025a). Antik kentlerin giriş kapılarının insansız hava araçları ile üç boyutlu modellenerek belgelenmesi: Anavarza Ören Yeri Zafer Kapısı örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 7(1), 27-38.
- Fidan, Ş. (2025b). ÖSYM Sınavında Harita Alanının Seçiminde Farkındalığın Arttırılması İçin Akıllı Cep Telefonları ile Objelerin Fotoğraflanması ve Üç Boyutlu Modellenmesi Üzerine Bir Değerlendirme. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 7(1), 21-27.
- Fidan, Ş., & Ulvi, A. (2022). Tarsus Aziz Pavlus Kilisesi'nin yersel lazer tarama teknikleri ile üç boyutlu modelinin oluşturularak sanal gerçekliğe hazırlanmasının değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 4(2), 60-70.
- Galantucci, L. M., Guerra, M. G., & Lavecchia, F. (2018, May). Photogrammetry applied to small and micro scaled objects: a review. In *International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing* (pp. 57-77). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89563-5_4
- Grobler, E., & Celano, G. (2025). Photogrammetric and LiDAR Scanning with iPhone 13 Pro: Accuracy, Precision and Field Application on Hazelnut Trees. *Sensors*, 25(18), 5629. <https://doi.org/10.3390/s25185629>
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155-168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Kovanič, L., Peřovský, P., Topitzer, B., & Blišfan, P. (2024). Spatial analysis of point clouds obtained by SfM photogrammetry and the TLS method—Study in quarry environment. *Land*, 13(5), 614. <https://doi.org/10.3390/land13050614>
- Krausková, D., Mikita, T., Hrůza, P., & Kudrnová, B. (2025). Accuracy Assessment of iPhone LiDAR for Mapping Streambeds and Small Water Structures in Forested Terrain. *Sensors*, 25(19), 6141. <https://doi.org/10.3390/s25196141>
- 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. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1105048>
- Łabędź, P., Skabek, K., Ozimek, P., Rola, D., Ozimek, A., & Ostrowska, K. (2022). Accuracy verification of surface models of architectural objects from the iPad LiDAR in the context of photogrammetry methods. *Sensors*, 22(21), 8504. <https://doi.org/10.3390/s22218504>
- 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.
- Mach, J., Svatý, Z., Šoupa, O., Nouzovský, L., & Halecký, M. (2025). Implementation of an SfM-MVS-based photogrammetry approach for detailed 3D reconstruction of plants. *Plant Methods*, 21(1), 127. <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01445-x>
- Maté-González, M. Á., Yali, R., Rodríguez-Hernández, J., González-González, E., & Aguirre de Mata, J. (2025). Comparison of NeRF-and SfM-Based Methods for Point Cloud Reconstruction for Small-Sized Archaeological Artifacts. *Remote Sensing*, 17(14), 2535. <https://doi.org/10.3390/rs17142535>
- Morita, M. M., Carvajal, D. A. L., Bagur, I. L. G., & Bilmes, G. M. (2024). A combined approach of SFM-MVS photogrammetry and reflectance transformation imaging to enhance 3D reconstructions. *Journal of*

- Cultural Heritage*, 68, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.05.008>
- Paukkonen, N. (2023). Towards a mobile 3D documentation Solution. Video-based photogrammetry and iPhone 12 Pro as fieldwork documentation tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6(1). <https://doi.org/10.5334/jcaa.135>
- Qiu, Z., Martínez-Sánchez, J., Brea, V. M., Lopez, P., & Arias, P. (2022). Low-cost mobile mapping system solution for traffic sign segmentation using Azure Kinect. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102895. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102895>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>
- Scaggion, C., Castelli, S., Usai, D., & Artioli, G. (2022). 3D digital dental models' accuracy for anthropological study: Comparing close-range photogrammetry to μ -CT scanning. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 27, e00245. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00245>
- Schöps, T., Sattler, T., Häne, C., & Pollefeys, M. (2015, October). 3D modeling on the go: Interactive 3D reconstruction of large-scale scenes on mobile devices. In *2015 International Conference on 3D Vision* (pp. 291-299). IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DV.2015.40>
- Soyluoğlu, M., Orabi, R., Hermon, S., & Bakirtzis, N. (2025). Digitizing Challenging Heritage Sites with the Use of iPhone LiDAR and Photogrammetry: The Case-Study of Sourp Magar Monastery in Cyprus. *Geomatics*, 5(3), 44. <https://doi.org/10.3390/geomatics5030044>
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., & Furuya, N. (2023). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(7), 1603-1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- Ulvi, A., & Hamal, S. N. G. (2025). Fusion of IPAD Pro LiDAR and SfM-Based Photogrammetry for 3D Documentation of Cultural Heritage. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01936-w>
- Uzun, S. D., Hamal, S. N. G., & Fidan, Ş. (2022). Elde taşınabilir lazer tarayıcılar ile insan yüzünün modellenerek güzellik ve bakım sektöründe kullanımının değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 4(1), 17-20.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Xing, Y., Yang, S., Fahy, C., Harwood, T., & Shell, J. (2025). Capturing the Past, Shaping the Future: A Scoping Review of Photogrammetry in Cultural Building Heritage. *Electronics*, 14(18), 3666. <https://doi.org/10.3390/electronics14183666>
- Yiğit, A. Y., & Kaya, Y. (2025). Augmented Reality and Photogrammetry Based Anatomical Models in Medical Education. *SN Computer Science*, 6(6), 667. <https://doi.org/10.1007/s42979-025-04218-4>
- Yiğit, A. Y., & Ulvi, A. (2025). Kentsel planlama ve çevresel izleme için fotogrametri tabanlı ağaç modelleme. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 11(1), 60-71. <https://doi.org/10.53516/ajfr.1611711>
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2025). Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry. *Measurement*, 242, 115931. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>
- Zeybek, M. (2024). Akıllı Telefon iPhone LiDAR Tarayıcısının Altyapı Çalışmalarında Uygulanabilirliği. *Turkey Lidar Journal/Türkiye Lidar Dergisi*, 6(1). <https://doi.org/10.51946/melid.1402883>
- Zhang, N., & Lan, X. (2024). Everyday-Carry Equipment Mapping: A Portable and Low-Cost Method for 3D Digital Documentation of Architectural Heritage by Integrated iPhone and Microdrone. *Buildings*, 15(1), 89. <https://doi.org/10.3390/buildings15010089>



© Author(s) 2025.

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