



Accuracy analysis of 3D point clouds obtained from camera and LiDAR sensors of smartphones and tablets

Taylan Öcalan*^{ID}, Duygu Arıcan^{ID}, Reza Molk Araei^{ID}, Caneren Gül^{ID}, Nursu Tunalıoğlu^{ID}

Department of Geomatic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Yıldız Technical University, 34220, Esenler, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- Sensor-based point cloud generation
- Feasibility of mobile smart devices usage for 3D modeling
- Deviation analysis with C2C and M3C2 methods

Keywords:

- Structure-from-motion
- Smartphones and tablets
- LiDAR
- 3B Point Cloud Generation
- Accuracy Assessment

Article Info:

Research Article
Received: 30.06.2022
Accepted: 06.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1138633

Correspondence:

Author: Taylan Öcalan
e-mail: tocalan@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 5302

Graphical/Tabular Abstract

Today, mobile smart devices embedded with state-of-the-art sensor technologies have become an essential 3D data generation tool apart from use in standard daily life routines. Recently, LiDAR sensor embedded smart device enables point cloud generation, which creates an alternative way of 3D modeling of objects that may be low-cost, comparatively accurate regarding the aim of application, and time-saving. Figure A represents a general workflow of 3D point cloud generation acquired from different sensors of smart devices to explore the feasibility of usage in different study areas. Two methodologies have been followed as LiDAR-based and image-based data generation. High-accurate terrestrial laser scanner data were taken as reference for objects selected in this study. For accuracy assessments, statistical values were computed from comparison results, which were estimated by the implementation of Cloud-to-Cloud (C2C) and Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) algorithms.

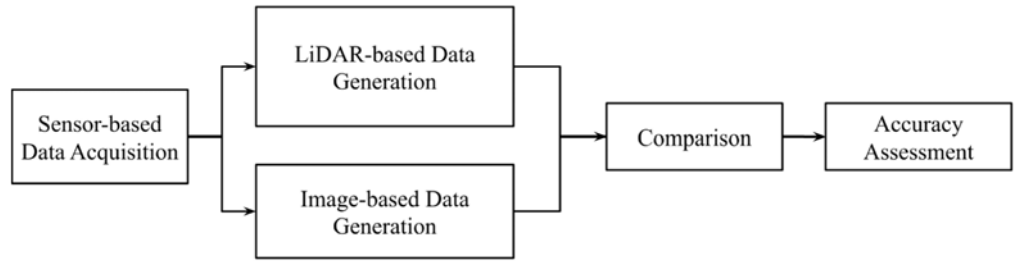


Figure A. Flowchart of sensor-based point cloud generation

Purpose: This study aims to evaluate the performance assessment of 3D point clouds generated by various sensor-based data.

Theory and Methods: Within the scope of this study, 3D point clouds of two different objects (so-called N1 and N2) were generated by using LiDAR sensors of (1) terrestrial laser scanner, (2) smartphone, (3) tablet; and camera sensors of the (4) tablet and (5) digital camera. The Structure-from-Motion (SfM) method was used for the generation of the image-based point clouds. Iterative closest point (ICP) was implemented to register point clouds obtained from different scan points in terrestrial laser scanning. All point clouds were georeferenced with GCPs. Point clouds were compared with terrestrial laser scanning data by following C2C distance and M3C2 approaches. The deviations were statistically evaluated, and a normal distribution test was implemented.

Results: According to the results of C2C method, all calculated mean distances and standard deviations of the point clouds were computed below the cm level. In all C2C comparison analyses for both objects, differences did not exceed 50 mm in terms of absolute deviation. To figure out whether the differences obtained from M3C2 comparison fit to normal distribution or not, Kolmogorov-Smirnov Test were applied, and it is seen that differences were not fit to normal distribution.

Conclusion: Even the standard deviations of the image-based point cloud generations resulted in lower values, which represent more accurate solutions than the LiDAR-based point cloud generation from the mobile smart devices, the performance of 3D point cloud generation of mobile smart devices is promising in terms of being low-cost, timesaving, and supplying comparatively accurate solutions.



Akıllı telefon ve tabletlerin kamera ve LiDAR sensörlerinden elde edilen 3 boyutlu nokta bulutlarının doğruluk analizi

Taylan Öcalan*^{ID}, Duygu Arıcan^{ID}, Reza Molk Araei^{ID}, Caneren Gül^{ID}, Nursu Tunaloğlu^{ID}
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Sensör tabanlı nokta bulutu oluşturma
- 3D modelleme için mobil akıllı cihaz kullanımının fizibilitesi
- C2C ve M3C2 yöntemleri ile sapma analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 30.06.2022
Kabul: 06.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1138633

Anahtar Kelimeler:

Hareketten nesne oluşturma,
akıllı telefon ve tabletler,
LiDAR,
3B nokta bulutu üretimi,
doğruluk analizi

ÖZ

Taşınabilir ve giyilebilir akıllı mobil cihazların (telefon, tablet, kol saati, gözlük vb.) önemi dijitalleşen mekânsal bilgi endüstrisinde her geçen gün artmaktadır. Akıllı telefonlar gerek kullanım oranı gerekse ekonomik pazar payıyla bu endüstride ön plana çıkmaktadır. Profesyonel donanımlara kıyasla görece düşük maliyetli olan ve birçok sensör özelliğine sahip bu cihazlarda, farklı çözünürlükte kameralar kullanılmaktadır. Son olarak piyasaya sunulan bazı akıllı telefon ve tablet modellerine eklenen lazer tarama (Light Detection and Ranging, LiDAR) sensör özelliğiyle mekânsal bilgi endüstrisine sağlanan veri kaynakları bir adım daha ileri taşınarak, kamera+LiDAR sensörlerinin mühendislik ölçme uygulamalarında efektif kullanımının altyapısı geliştirilmiştir. Bu özelliklere sahip cihazlar 3 boyutlu (3B) modelleme ve artırılmış gerçeklik (Augmented Reality, AR) uygulamaları için daha uygun maliyetli alternatifler sunmaktadır. Bu çalışmada, iç ve dış mekânlarda farklı boyut ve geometrik şekillerde tanımlanan nesnelerin akıllı cihazların (telefon+tablet) kamera+LiDAR sensörleriyle üretilen görüntüleri ve nokta bulutları kullanılarak oluşturulan 3B modelleri analiz edilerek bu cihazların yüksek doğrulukta mekânsal veri üretimine uygunlukları test edilmiştir. Bu kapsamda, C2C ve M3C2 sapma analizi yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen bulgular dikkate alındığında, yenilikçi teknolojik sensörlere sahip akıllı mobil cihazlarla gerçekleştirilen 3B model uygulamalarının doğruluğu, bu cihazların mekânsal bilgi endüstrisi kapsamındaki birçok farklı sektörde kullanılmak üzere baskın bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

Accuracy analysis of 3D point clouds obtained from camera and LiDAR sensors of smartphones and tablets

H I G H L I G H T S

- Sensor-based point cloud generation
- Feasibility of mobile smart devices usage for 3D modeling
- Deviation analysis with C2C and M3C2 methods

Article Info

Research Article
Received: 30.06.2022
Accepted: 06.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1138633

Keywords:

Structure-from-motion,
smartphones and tablets,
LiDAR,
3D point cloud generation,
accuracy assessment

ABSTRACT

The importance of portable and wearable smart mobile devices (phone, tablet, watch, glasses, etc.) is increasing day by day in the digitalizing spatial information industry. Smartphones come to the fore in this industry with their usage rate and economic market share. Cameras with different resolutions are used in these devices, which are relatively low cost compared to professional equipment and have many sensor features. With the laser scanning (LiDAR) sensor feature added to some smartphones and tablet models that have been recently introduced to the market, the data sources provided to the spatial information industry were taken one step further and the infrastructure for the effective use of camera + LiDAR sensors in engineering measurement applications has been developed. These features offer cheaper alternatives for 3D modeling and augmented reality (Augmented Reality, AR). In this study, images and point clouds obtained with camera+LiDAR sensors of objects defined in different sizes and geometric shapes in indoor and outdoor spaces by using smart devices (phone + tablet) for high accuracy spatial information production with 3D measurement and modeling were analyzed and then they were compared using C2C and M3C2 deviation analysis methods. Considering the results, the accuracy of the 3D models obtained with smart mobile devices embedded with innovative technological sensors has revealed that these devices are a dominant alternative for the use of these devices in many different sectors in terms of the spatial information industry.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *tocalan@yildiz.edu.tr, duyguaricann@gmail.com, rezamolmola128@gmail.com, cgul@yildiz.edu.tr, ntunali@yildiz.edu.tr / Tel: +90 212 383 5302

1. Giriş (Introduction)

Mühendislik ölçmeleri başta olmak üzere mimarlık, sanat ve tasarım, grafik ve görselleştirme, sinema ve televizyon, bilgisayar oyun sektörü gibi alanlarda konuma dayalı farklı doğruluk ve çözünürlüğe sahip mekânsal verilerin üretilmesine gereksinim duyulmaktadır. Bununla birlikte, bunların görüntü, lazer tarama gibi nokta bulutundan 3 boyutlu (3B) model oluşturulmasında kullanılan; donanım, cihaz ve donanımlar, geleneksel olarak maliyetleri yüksek profesyonel kamera ve lazer tarama sistemleridir. İleri teknoloji sensörlerin mobil akıllı cihazlarda kullanımının giderek artması ve yaygınlaşması, belirtilen alanlara veri sağlama sürecinin devamlılığında başta maliyet kriteri olmak üzere, yapılacak çalışmanın amacı ve gereksinim duyulan doğruluk ölçütlerine bağlı olarak obje çıkarımında ve 3B modellemede önemli bir alternatif haline gelmiştir. 2020-2021 yılları itibarıyla dünyada lazer tarayıcı (Light Detection and Ranging, LiDAR) sensörüne sahip, artırılmış gerçeklik uygulaması da sağlayan mobil akıllı telefon ve tabletler üretilmeye başlanmıştır. Bu durum, bütünleşik kamera+LiDAR özelliklerine sahip akıllı mobil cihazlar kullanılarak fotogrametrik ürünlerin elde edilebilirliği ve doğruluk analizlerine ilişkin çalışmalara da olanak sağlamıştır [1].

Son 20 yılda yaşanan teknolojik gelişmelerle günümüzde, yersel, mobil ve hava lazer tarama sistemleri geniş alanların haritalama çalışmalarında yaygın olarak kullanılır hale gelerek [2, 3]; jeomorfoloji [4-7], arkeoloji [8-11], ekoloji [12-14] ve mühendislik-mimarlık [15-17] gibi pek çok farklı disiplin için hızlı, güvenilir, yüksek çözünürlüklü yoğun bilginin elde edilmesine imkan sağlamıştır. Yersel lazer tarama sistemlerinin, özellikle küçük alanların modellenmesinde hassas ve etkin bir araç olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir [18-21]. Yersel lazer tarama, hava LiDAR ve sentetik açıklıklı radar (synthetic aperture radar, SAR) gibi uzaktan algılama tabanlı sistemler, 3B yüzey modellerinin oluşturulmasında güvenilir ve hassas yöntemler olmalarına rağmen, uygulamada nesne yüzeyine çarpıp dönen sinyallerin kalitesi ilgili yüzeyin pürüzlülüğü ile sınırlıdır ve bu sistemler yüksek maliyetlidir. Dolayısıyla söz konusu sistemlerin kullanımları da kısıtlıdır [22, 23]. Bununla beraber sayısal fotogrametrik tabanlı ölçme çalışmalarında, görüntü işleme yöntemlerinin gelişmesi ile hassas sayısal yükseklik modellerinin bahsedilen diğer yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetle ve daha kısa sürede üretilmesi, bu alanda güncel bir araştırma konusu oluşturmuştur [24-26]. LiDAR tekniği haritalama çalışmalarının dışında; LiDAR verileri kullanılarak oluşturulan hassas 3B nesne modelleri üzerinden endüstriyel tasarım ve tersine mühendislik uygulamalarında [27, 28], akıllı kent sistemleri için ontoloji destekli nesne tabanlı sınıflandırmada [29], mimari çalışmalarda [15, 30] ve otomotiv sanayiinde otonom araç sistemlerinin geliştirilmesinde de [17, 31] kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yöntemin uygulanmasında metrik ve metrik olmayan kameraların kullanılabilmesi [23] uygulama alanlarının artması yönünden bir avantajdır.

2019-2020 döneminde Apple firması, Birleşik Devletler Patent ve Ticari Marka Dairesi'nden (United States Patent and Trademark Office, USPTO) akıllı telefonlarda kamera ile nesne arasında mesafenin belirlenmesini ve nesnelerin derinliklerinin algılanmasını sağlayan, uçuş süresi (Time-of-Flight, ToF) kamera sisteminde LiDAR tekniğinin kullanımına dair patent almıştır [32, 33]. Bu gelişmeden sonra Apple'ın iPhone Pro model akıllı telefon ve iPad tabletindeki ToF kamera sistemi LiDAR teknolojisi ile desteklenmiş ve LiDAR teknolojisine sahip akıllı telefon modelleri ilk olarak ortaya çıkmıştır. Akıllı telefonlarda bulunan LiDAR teknolojisi ToF kamera sistemlerinin yanı sıra düşük bütçeli 3B modelleme çalışmaları için de veri desteği sağlamıştır. Kamera, küresel navigasyon uyduları sistemleri (GNSS), ataletsel ölçme ünitesi (IMU), ivmeölçer gibi pek çok sensör

teknolojisinin akıllı cihazlarda yer alması, düşük bütçe hedefleyen çalışmalarda bu cihazların kullanımını tercih edilmesine olanak sağlamış, böylece güncel bir araştırma konusu da ortaya çıkmıştır.

Literatürde, LiDAR verisi ve sayısal görüntü kullanılarak fotogrametrik yöntemlerle 3B modelleme konusunda yapılan çok sayıda doğruluk analizi çalışması bulunmasının yanında, yakın zamanda güncel araştırma konusu haline gelen akıllı cihazlardan artırılmış gerçeklik modellerine ve akıllı cihazlar üzerinden fotogrametrik ürünlerin elde edilebilirliği ve doğruluk analizlerine ilişkin araştırmalara da ilgi artmıştır [34-37]. Akıllı cihazlarda bulunan kameralarda yaşanan gelişmelerle görüntü çözünürlüklerinin artması, bu cihazlardan elde edilen sayısal görüntülerin modelleme için kullanılabilirliğinin de araştırılmasını beraberinde getirmiştir. Akıllı cihazlar profesyonel yersel, mobil ve hava lazer tarayıcı aletleri gibi mevcut fotogrametrik harita üretimine dayalı donanımlarla karşılaştırıldığında oldukça düşük maliyetlere sahiptirler. Bununla birlikte, akıllı cihazların yüksek kamera çözünürlüklerine sahip olması, ayrıca 3G/4G ile birlikte yakın gelecekte etkin olması planlanan 5G teknolojisi ile sürekli konum bilgisine ulaşılabilir olması, araştırmacıları bu cihazların sensörlerinden elde edilen veri ve ürün doğruluklarının araştırılmasına yöneltmiştir.

Küçük ölçekli haritalama ve 3B modelleme çalışmalarında, yersel ya da hava LiDAR teknolojisini kullanmak ekonomik olmamaktadır [34]. Bu yüzden araştırmacılar, özellikle tek nesne 3B modelleme ve küçük alanların yüzey modellerinin oluşturulmasında, akıllı cihazlarla sunulan teknolojik gelişmeleri araştırmaya yönelmiştir. Bu kapsamda, Wróżyński vd. [38], akıllı telefon ve sayısal kameralardan elde edilen görüntülerden Hareket ile Nesne Oluşturma (Structure-from-Motion, SfM) yöntemini kullanarak 3B model oluşturmuş, modelleri hacimsel olarak değerlendirmiş, laboratuvar ve arazi testleri olmak üzere iki farklı alanda sonuçları analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, SfM yöntemi kullanılarak sayısal kamera ve akıllı telefon verileri ile başarılı bir şekilde sayısal yüzey modellerinin elde edilebileceğini göstermişlerdir. Benzer bir diğer çalışmada ise, Jeong vd. [34] akıllı telefon görüntülerinin fotogrametrik yöntemlerle değerlendirilmesi ile oluşturulan sayısal arazi modelinin inşaat sahalarında hacim hesaplamaları için kullanılabilirliğine dair doğruluk analizi yapmışlardır. Modellerin karşılaştırılması için referans yüzey, yersel ve hava LiDAR verilerinden üretilmiştir. Çalışmada, akıllı telefon ile çekim sırasında oluşan kayan fotoğraf etkisi (rolling-shutter), referans yüzeyden farklılık ve toprak işi hesaplamalarında kullanım için elde edilecek hacimsel değerlerin doğruluğu araştırılmıştır. Çalışmada, her ne kadar toprak işi hesaplamaları için görece yüksek bir hata (% 4,9) bulunsada da, gelişen teknoloji ve yöntemlerle daha iyi sonuçların elde edilebileceği vurgulanmaktadır. Lazer teknolojisinin akıllı telefon ve tablet ile kullanımına dair ilk çalışmalardan birisi ise Stitt vd. [39] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, akıllı cihazlara monte edilebilen lazer doğrulamalı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Akıllı cihazların LiDAR ile bütünleşik kullanımı özellikle, fauna içinde doğal yaşamın sürdürülebilirliği için önemli olan ağaç oyukları gibi küçük boyuttaki oluşumların boyut tespitinde test edilmiştir. Özellikle ulaşılması zor alanlarda, hedef yüksekliği, tarama açısı, belirlenecek nesne boyutları ve tarama mesafesi bakımından yapılan incelemenin daha sonraki çalışmalar için altlık oluşturacak iyi sonuçlar ürettiği belirtilmiştir. Güncel veriye sürekli ihtiyaç duyulan orman envanterinin çıkarılması konusunda, akıllı cihazların bütünleşik bir sensör sistemiyle değerlendirildiği çalışma ise Fan vd. [40] tarafından yapılmıştır. Çalışmada, ağaç gövde çapı, yüksekliği vb. gibi orman envanter verileri referans verilerle karşılaştırılarak bu alanda kullanılabilirliği gösterilmiştir. Luetzenburg vd. [36]'nin SfM yöntemi ile akıllı telefon ve tablet LiDAR sensörünün yer bilimleri çalışmalarındaki performansını incelemek üzere yaptıkları çalışmada, LiDAR teknolojisi ile 10 cm'den küçük kenarlara sahip nesnelerin 1

cm doğrulukla, 130x15x10m boyutlarına sahip sahil falezlerinin ise 10 cm doğrulukla modellenebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Tavani vd. [41] ise akıllı cihazlarda LiDAR performansını değerlendirdiklerinde Luetzenburg vd. [36] ile benzer sonuçlar bulduklarını, bununla birlikte akıllı cihazlardaki LiDAR'ın performansında sınırlı çözünürlük, pil tüketimi nedeniyle toplanan veri sayısının sınırlanması ve coğrafi referanslandırma desteğinin eksikliği gibi kısıtlamaların olduğunu belirtmişlerdir. King vd. [42], akıllı telefon LiDAR ile kar kalınlığı tespiti üzerine yaptıkları çalışmada günlük kar kalınlığı değişimlerinin mm düzeyinde tespit edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Güncel literatür incelendiğinde, akıllı cihazların 3B model ve yüzey modellerinin üretilmesinde doğruluk, güvenilirlik ve maliyet bakımından irdelendiği ve mevcut ölçme sistemlerine uygulama alanları farklı olan disiplinler için bir alternatif oluşturmaya başladığı görülmektedir. Bu amaçla, çalışma kapsamında akıllı cihazların 3B modelleme performans analizleri nesnelere ait nokta bulutları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, sayısal kamera ve akıllı cihaz görüntüleri, akıllı cihaz LiDAR sistemlerine ait sensörlerden elde edilen veriler değerlendirilmiş, araştırma kapsamında referans kabul edilen yüksek maliyetli profesyonel yersel lazer tarama cihazı ile elde edilen nokta bulutu verileri ile karşılaştırılmıştır.

2. Metodoloji (Methodology)

Çalışmada, taşınabilir akıllı cihazların nokta bulutu üretimindeki performanslarının değerlendirilmesi için iki temel metodoloji izlenmiştir. İlk metodoloji, SfM yöntemi kullanılarak akıllı cihazlardan elde edilen görüntülerden fotogrametrik değerlendirme ile nokta bulutu üretilmesine dayanmaktadır. SfM yöntemi, temelde fotogrametrik stereo değerlendirme ile aynı temel ilkeye sahip olmakla birlikte, bindirmeli çekimi yapılan bir dizi görüntüden eşlenik özelliklerin bulunmasına ve pozisyonların üçgenleme ile belirlenmesine dayanmaktadır. Yöntemde, geleneksel fotogrametriden farklı olarak, kamera konumu ve dönüklüğü ile model geometrisi birlikte çözüldüğünden kamera kalibrasyonuna ihtiyaç duyulmamaktadır [43, 44]. SfM yönteminde ilk olarak SIFT (Scale Invariant Feature Transform) algoritması ile görüntünün parlaklık, dönüklük ve ölçeklendirmeye karşı değişmeyen bölgesel özelliklerinin (features) her bir görüntü üzerinde belirlenmesi sağlanır. Bu algoritma yardımı ile her bir görüntü üzerinde belirlenen anahtar noktalar yaklaşık en yakın komşuluk (approximate nearest neighbor) yöntemi kullanılarak karşılıklı olarak eşleştirilir. Nokta bulutu üretimi için minimum iki anahtar noktası ve üç görüntü gerekmektedir. Belirlenen anahtar noktaların yardımı ile ışın demeti dengelemesi (bundle block adjustment) yöntemi kullanılarak düşük yoğunlukta veya seyrek nokta bulutu olarak adlandırılan noktalar üretilir. SfM yönteminde, seyrek (sparse) nokta bulutu ve yoğun (dense) nokta bulutu olmak üzere iki veri seti oluşturulur. Burada, seyrek veri seti görüntülerin çekim yerlerine göre hizalanması için kullanılır. Hizalama işleminin ardından yoğun veri seti elde edilir.

Çoklu Görüntü Stereo (Multi-View Stereo, MVS) algoritmaları, üç boyutlu yüzey bilgisi elde etmek için aynı anda bir dizi görüntüden alınan ölçümler arasındaki korelasyonlara dayanır [45]. MVS yöntemlerinin çoğu, tüm görüntüleri aynı anda yeniden oluşturmayı amaçlar. Bu nedenle, daha büyük veri kümeleriyle çalışırken bu yaklaşım pratik olmamaktadır. Bunun yerine, veri kümesinden bir alt küme seçmek ve bunları uygun örneklerle kümelemek daha verimli bir uygulama sağlar. Bu yaklaşım Kümelenebilir Çoklu Görüntü Stereo (Clustering View for Multi-view Stereo, CMVS) olarak adlandırılmaktadır.

Yama Tabanlı Çoklu Görüntü Stereo (Patch-based Multi-View Stereo, PMVS) yöntemi ise yüzeyin yerel bir teğet düzlem

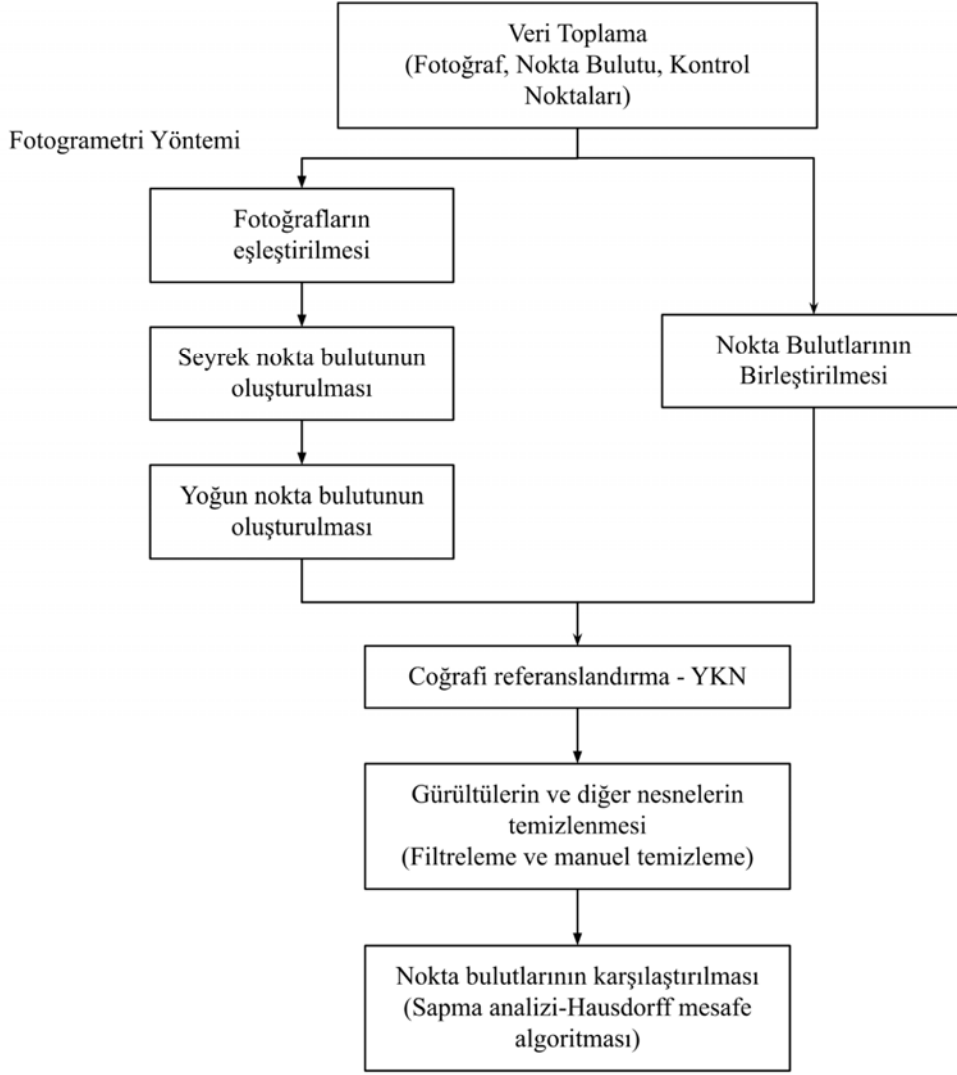
yaklaşımıyla temsil edilmesine dayanır. Uygulaması kolay ve etkilidir. PMVS yaklaşımında, yoğun ve doğru dikdörtgen yamalar oluşturmak için görüntünün dönüklük parametreleri, seyrek nokta bulutu ve projeksiyon matrisleri kullanılır. PMVS, eşleştirme, genişletme ve filtreleme adımlarından oluşur [46].

Elde edilen nokta bulutu katı model (solid model) oluşturulmasında da kullanılabilir. Sonuç olarak elde edilen modelin metrik özelliklere sahip olması için yer kontrol noktalarının (YKN) kullanılması gerekir. Çalışma kapsamında dikkate alınan ikinci metodoloji, akıllı cihaz LiDAR sensörü ile 3B nokta bulutu üretilmesidir. Çalışmada, bu amaçla son yıllarda gelişen ve taşınabilir akıllı cihaz olarak görece düşük maliyetli LiDAR tarayıcı sensörüne sahip akıllı telefon (Apple iPhone 12 Pro Max) ve tablet (Apple iPad Pro 11) kullanılmıştır. Akıllı mobil cihazlardan sağlanan görüntü ve lazer tarama verileri ile elde edilen 3B nokta bulutları, yüksek maliyetli profesyonel yersel lazer tarayıcı (YLT) kullanılarak elde edilen referans nokta bulutu ile karşılaştırılmış, model sapmalarına bağlı doğruluk analizleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Veri değerlendirme aşamasında, literatürde yaygın olarak kullanılan açık kaynak kodlu VisualSfM [47] ve CloudCompare [48] yazılımları kullanılmıştır.

3. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Bu çalışma kapsamında farklı sensörlerden üretilen nokta bulutlarının değerlendirilmesi amacıyla iç mekân ve dış mekân ortamında farklı materyal ve geometrilere sahip iki nesnenin veri setleri yersel alım yöntemi ile elde edilmiştir. Nesne seçiminde, dış mekân için mermer sütun (N1), iç mekânda ise mavi renkli seramik demlik (N2) belirlenmiştir. Alım için, Faro Focus^{3D} X 130 marka profesyonel yersel lazer tarayıcı (menzil: 0,6 m – 130 m; menzil hatası (sistemik hata): ±2 mm; ölçme hızı (nokta/sn): 122.000/ 244.000/ 488.000/ 976.000), Apple iPhone 12 Pro Max model akıllı telefon, Apple iPad Pro 11 model tablet (Çözünürlük: 12 MP) ve Nikon D3100 sayısal kamera (50 mm sabit odak uzaklıklı lense sahip, çözünürlük: 14.2 MP; görüntü boyutu (piksel): 4608x3072) olmak üzere 4 farklı cihaz kullanılmıştır. Çalışmada izlenen ana iş adımlarını gösteren iş akış diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur. Yersel alımda kullanılmak üzere nesnelerin üzeri ve çevresine olacak biçimde; N1 için 6 adet, N2 için 9 adet YKN tesis edilmiştir. N1 nesnesi için YKN'lere ait ITRF96 datumu 2005.000 referans epoğundaki üç boyutlu koordinatlar CHC i90 model jeodezik sınıf GNSS alıcısı ile gerçek zamanlı kinematik (real-time kinematic, RTK) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu YKN koordinatları için Türkiye genelinde ulusal yapıda hizmet veren, ağırlıklı olarak Ağ-RTK ilkesiyle gerçek zamanlı kinematik GNSS uygulamalarında kullanılan Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağ-Aktif (TUSAGA-AKTIF) sisteminden yararlanılmıştır. N2 nesnesinin iç mekânda bulunması nedeniyle bu nesneye ait YKN koordinatları elektronik takeometre (total station) kullanılarak gerçekleştirilen açım-mesafe ölçümlerine dayalı olarak yerel koordinat sisteminde belirlenmiştir. Bu işlem ile üretilen veri setlerinin coğrafi referanslandırılması sağlanmıştır. Elde edilen veri setleri ve veri setlerine ait özellikler Tablo 1'de sunulmuştur. Buna göre, nesne etrafında ve alımı yapılan nesne özelliklerinin çıkarımına olanak sağlayacak şekilde YLT ile N1 için 7, N2 için 9 farklı istasyonda; akıllı telefon/tablet görüntü alımı için ise N1 için 84, N2 için 80 farklı istasyonda ölçme işlemi gerçekleştirilmiştir. Akıllı telefon/tablet nokta bulutu alımları ise tek bir oturumda obje etrafında hareket edilerek yapıldığından dolayı her iki nesne için 1 olarak verilmiştir.

Veri değerlendirmede ilk aşamada nesnelere ait görüntüler kullanılarak fotogrametrik değerlendirme yöntemlerinden SfM yöntemi ile nokta bulutu üretimi gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutu üretiminde VisualSfM açık kaynak kodlu yazılımından yararlanılmış ve bu aşamada SfM/CMVS/PMVS yaklaşımları kullanılmıştır. Buna göre SfM yönteminde öncelikle görüntüler üzerinde anahtar noktalar



Şekil 1. İş-akış diyagramı (Flowchart)

Tablo 1. Veri setlerinin ait genel bilgiler (General information regarding dataset)

Nesne	Veri Kaynağı	Veri	Görüntü/Tarama İstasyon Sayısı
N1	Yersel Lazer Tarayıcı	Nokta Bulutu (YLT)	7
	Akıllı Telefon	Nokta Bulutu (V1)	1
	Tablet	Nokta Bulutu (V2)	1
	Tablet	Görüntü (V3)	84
	Sayısal Kamera	Görüntü (V4)	84
N2	Yersel Lazer Tarayıcı	Nokta Bulutu (YLT)	9
	Akıllı Telefon	Nokta Bulutu (V1)	1
	Tablet	Nokta Bulutu (V2)	1
	Tablet	Görüntü (V3)	80
	Sayısal Kamera	Görüntü (V4)	80

SIFT algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen anahtar noktalar yardımı ile ışın demeti dengelemesi yöntemi ile düşük yoğunlukta, seyrek nokta bulutu üretilmiştir. Ardından CMVS kümeleri kullanılarak en uygun bakış açıları ve kümeler seçilmiş ve yoğun nokta bulutlarının üretimi için de PMVS algoritması kullanılmıştır.

Yersel lazer tarama yönteminde, nesnenin tamamını kapsayan 3B konum verisi tek bir tarama istasyonundan alınan veri ile

oluşturulamamaktadır. Bu nedenle tarama alanları ortak olacak şekilde birden fazla sayıda tarama istasyonlarına lazer tarayıcı kurularak nokta bulutu alımı gerçekleştirilmiştir. Her bir tarama istasyonundan elde edilen nokta bulutları, kendi yerel koordinat sistemlerinde oldukları için bu nokta bulutları ortak tarama alanları yardımıyla ötelenip döndürülerek tek bir koordinat sistemine taşınmış, birleştirilerek tek bir nokta bulutu haline getirilmiştir. Bu çalışmada, literatürde de sıklıkla kullanılan İteratif En Yakın Nokta, İEYN (Iterative Closest Point, ICP) [49, 50] yöntemi dikkate

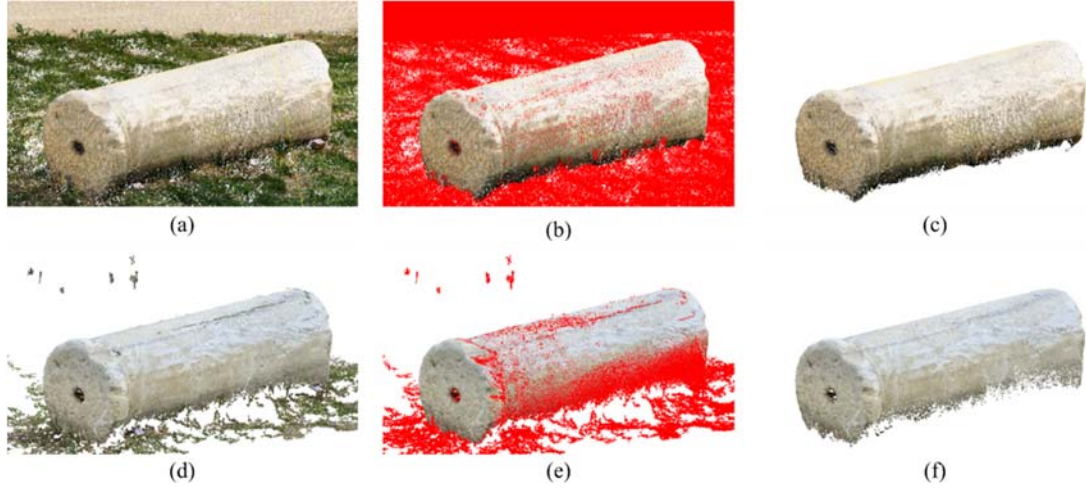
alınmıştır. Tüm nokta bulutları, alım sırasında oluşan ölçüm hataları veya görüntülerdeki anahtar noktaların hatalı eşleştirilmesi gibi nedenlerle gürültü içermektedir (Şekil 2, Şekil 3a, Şekil 3b). Bu nedenle nokta bulutlarına öncelikle CloudCompare açık kaynak kodlu yazılımında istatistiksel kaba hata eliminasyonu (Statistical Outlier Removal, SOR) filtresi uygulanmıştır. SOR filtresi kaba hataların eliminasyonu için veri kümesindeki komşu noktalara olan mesafelerin dağılımının hesaplanması yaklaşımına dayanır. Her nokta için tüm komşulara olan ortalama mesafe hesaplanır ve bu mesafelerin dağılımının bir ortalama ve bir standart sapma ile normal dağılımlı olduğu varsayılır. Ortalama mesafeleri, global mesafelerin ortalaması ve standart sapma ile tanımlanan aralığın dışında olan tüm noktalar kaba hata olarak tespit edilir ve veri kümesinden çıkarılır. Bu çalışmada komşuluk ilişkisi için her noktada hesaplanacak komşu nokta sayısı 5 ve standart sapma 1 olarak alınmıştır.

Şekil 2 ve Şekil 3a'da sırasıyla N1 ve N2 için yersel lazer tarayıcı ile alımı yapılmış, ICP yöntemi kullanılarak birleştirilmiş nokta bulutu; Şekil 2 ve Şekil 3d'de ise tablet kamerasından üretilen nokta bulutu

gösterilmiştir. Fotogrametri yöntemiyle üretilen nokta bulutunda yanlış eşleştirmelerden dolayı kümelenmiş halde oluşan gürültüler ve kaba hatalar ortadan kaldırılamadığı için bu gibi hatalar ve nesne çevresinde alınan Şekil 2, Şekil 3b ve Şekil 3e'de kırmızıyla gösterilen diğer noktaların manuel olarak silinmesi sağlanmıştır. Tüm veri setlerine hem SOR filtresi hem de manuel temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gürültü ve kaba hataları giderilmiş olan nokta bulutları sırasıyla, Şekil 2, Şekil 3c ve Şekil 3f'de görülmektedir.

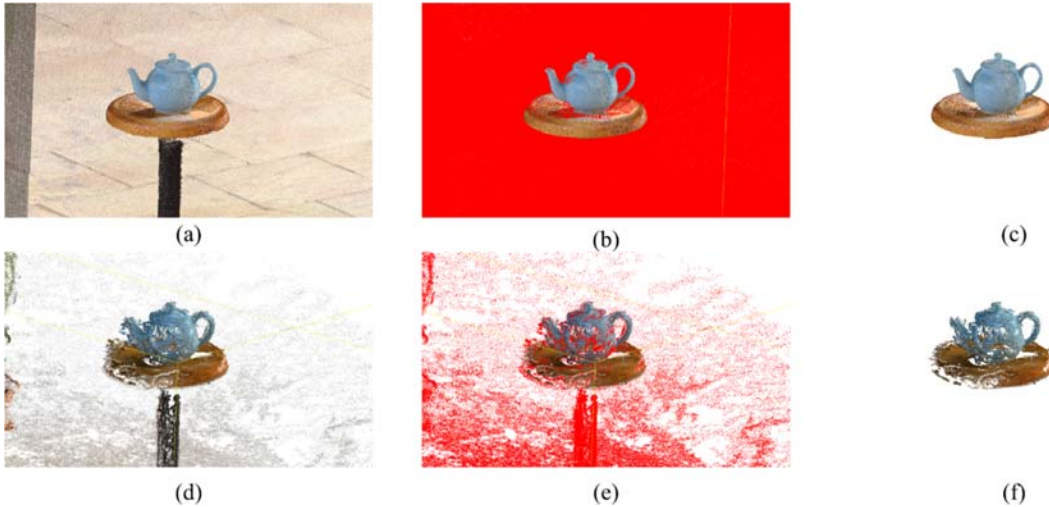
3.1. Doğruluk Analizleri (Accuracy Analyses)

Nokta bulutlarının karşılaştırılmasında her iki nesne için de YLT ile alınan nokta bulutları referans nokta bulutu olarak seçilmiş ve karşılaştırmalar temizlenmiş nokta bulutları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma süreci, noktalar arasındaki mesafenin hesaplanarak iki nokta bulutu arasındaki sapmaların tespit edilmesine dayanmaktadır. En yakın komşu noktalar arasındaki mesafeyi temel alarak mutlak farkların hesaplandığı Cloud-to-Cloud (C2C) [51] mesafe karşılaştırması yapılmıştır. Bu mesafe Hausdorff



Şekil 2. N1 için YLT ile alınmış: a) ham nokta bulutu b) ham nokta bulutundan silinen noktalar c) temizlenmiş nokta bulutu; tablet ile alınan görüntülerle üretilmiş: d) nokta bulutu e) nokta bulutundan silinen noktalar f) temizlenmiş nokta bulutu. (Point clouds acquired by terrestrial laser scanner

(TLS) for N1: a) raw b) removed c) filtered; point clouds captured by tablet: d) raw e) removed f) filtered)



Şekil 3. N2 için YLT ile alınmış: a) ham nokta bulutu b) ham nokta bulutundan silinen noktalar c) temizlenmiş nokta bulutu; tablet ile alınan görüntülerle üretilmiş: d) nokta bulutu e) nokta bulutundan silinen noktalar f) temizlenmiş nokta bulutu.

(Point clouds acquired by TLS for N2: a) raw b) removed c) filtered; point clouds captured by tablet: d) raw e) removed f) filtered)

uzaklık algoritmasından faydalanarak en yakın komşular arasındaki uzaklığın hesaplanmasıyla bulunur [52]. Yerel model olarak en küçük kareler düzlemi (least square plane) belirlenmiş ve k-en yakın komşuluk (K-Nearest Neighbors, KNN) algoritmasına göre en yakın 6 komşuya göre hesaplanmıştır. Bununla birlikte, karşılaştırma sonucu elde edilen farkların normal dağılıma uyup uymadıklarını belirlemek amacıyla, nokta bulutları arasında Çok Ölçekli Modelden Modele Nokta Bulutu Karşılaştırması (Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)) yapılmıştır. C2C yöntemine dayalı karşılaştırmadan farklı olarak M3C2 yönteminde, nokta bulutları arasındaki mesafe referans veri setindeki nokta merkez seçilmek üzere belirlenen yarıçap ve yükseklik değerleri ile oluşturulan silindirik içerisinde kalan noktalara göre yapılmaktadır [53].

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Çalışmada elde edilen nokta bulutlarına ait nokta sayısı bilgileri Tablo 2’de sunulmuştur. Buna göre, N1 ve N2 nesnelere için sırasıyla akıllı telefon LiDAR sensörü ile üretilen nokta bulutlarının %84,4 ve %99,7’si; tablet tarama verisinin %92,3 ve %99,6’sı; tablet görüntü verisinin %27,9 ve %85,3’ü; sayısal kamera görüntüleri ile üretilen verinin ise %11,4 ve %16,1’i obje dışı nokta olarak tanımlanmış ve silinmiştir. Alımlar esnasında, nesnelere ait noktaların bulunduğu ortama ait verilerin de ham nokta bulutunun içinde yer alması “Ham Nokta Bulut’undaki” nokta sayısı ile nesneye ait noktaları tanımlayan “Temizlenmiş Nokta Bulutu” verisi arasında fark oluşturmuştur. Burada, “Temizlenmiş Nokta Bulutu” başlığında verilen nokta sayıları nesneyi temsil eden ve karşılaştırmada kullanılan nokta sayılarını ifade etmektedir.

Tablo 2. Nokta bulutu bilgileri (Information of the Point Clouds)

Nesne	Veri	Ham Nokta Bulutu (nokta)	Temizlenmiş Nokta Bulutu (nokta)
N1	YLT	14401065	334389
	V1	199785	31163
	V2	134653	10349
	V3	1636804	1180275
	V4	7593128	6730421
N2	YLT	170380794	108353
	V1	816353	2480
	V2	210106	785
	V3	2262756	332199
	V4	279517	234639

C2C yaklaşımına göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen ortalama mesafeler, ortalama mesafelerin standart sapmaları (σ) ve model doğruluğu için karesel ortalama hata (KOH) değerleri Tablo 3’te verilmiştir. N1 için YLT ile yapılan tüm karşılaştırmalarda ve N2 için tablet (LiDAR) nokta bulutu ortalama mesafesi hariç (1,32 cm) tüm karşılaştırmalarda ortalama mesafe milimetre (mm) seviyesinde hesaplanmıştır. Her iki nesne için görüntü temelli SfM yöntemine dayalı üretilen nokta bulutlarının (V3, V4) ortalama mesafelerinin ve onların standart sapmalarının, LiDAR tabanlı üretime (V1, V2) göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Farkların ortalama değerleri ve standart sapma değerleri incelendiğinde, büyüklük olarak birbirine yakın değerde oldukları görülmüştür. Bu durum elde edilen veri setlerinde farkların küçük değerlerde olmasına rağmen, kısmi saçılma miktarının fazla olduğunu göstermiştir. KOH değerleri model doğruluğu ile ilişkilidir. Bununla birlikte, elde edilen KOH değerleri incelendiğinde, N1 için hem sayısal kamera (görüntü, V4) hem de tablet (görüntü, V3) ile 0,0019 m olarak mm mertebesinde, en düşük sonuçlar hesaplanmıştır. Bu değer, en düşük KOH değerinin akıllı telefonda (LiDAR, V1) 2 ve tablette (LiDAR, V2) yaklaşık 3 katı oranındadır. N1’e göre oldukça küçük ve daha yuvarlak geometrik özelliklere sahip olan N2 için ise sayısal kamera (görüntü, V4) ve tablet (görüntü, V3) fark KOH değerleri 0,0032 ve 0,0048 m olarak mm mertebesinde hesaplanmıştır. Aynı nesnedeki LiDAR sensörüne dayalı alımı yapılan her iki veride de KOH değerleri cm mertebesinde bulunmuştur.

Tablo 3. Nesnelere ait karşılaştırma sonuç istatistikleri (Statistics of comparison results regarding objects)

Nesne	Referans Veri Seti	Karşılaştırılan Veri Seti	Ortalama Mesafe ve Standart Sapması (m)	Karesel Ortalama Hata (m)
N1	YLT	V1	0,0027±0,0026	0,0038
		V2	0,0037±0,0047	0,0060
		V3	0,0015±0,0012	0,0019
		V4	0,0015±0,0012	0,0019
N2	YLT	V1	0,0094±0,0067	0,0115
		V2	0,0132±0,0099	0,0165
		V3	0,0034±0,0034	0,0048
		V4	0,0022±0,0023	0,0032

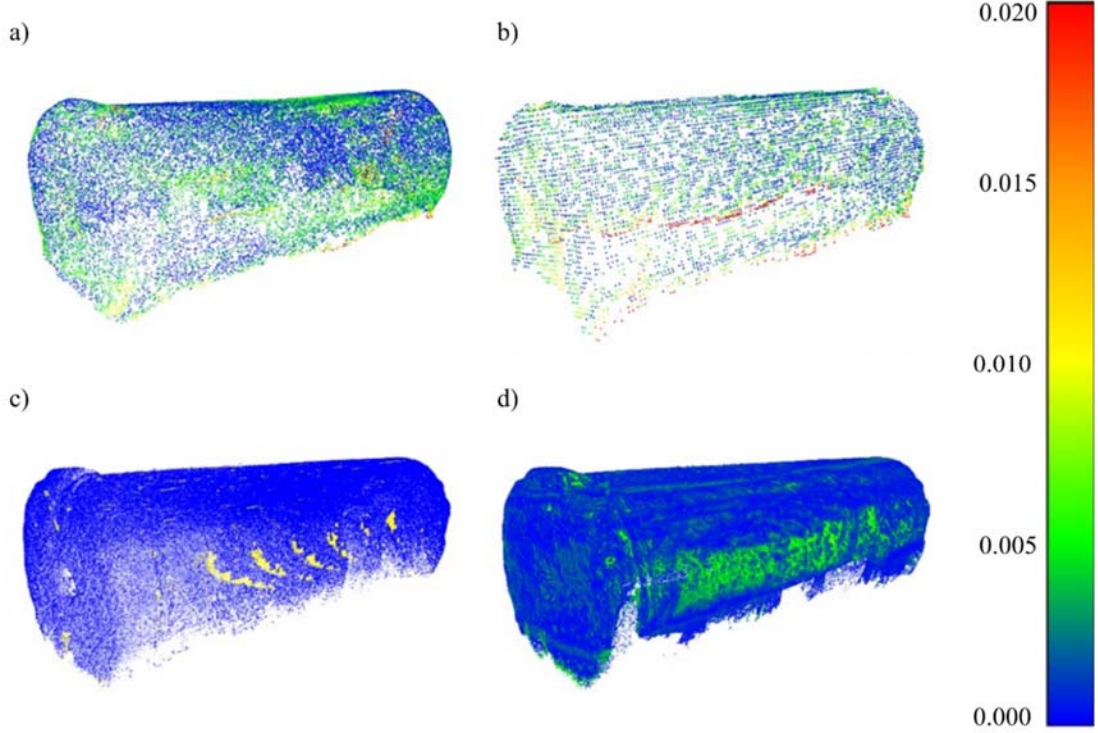
Bununla birlikte, nokta bulutları arasında hesaplanan sapma değerlerini gösteren mutlak farklar; 1σ - 6σ aralığında olmak üzere;

Tablo 4. Nesnelere ait karşılaştırma fark değerleri ve farkların yüzdesel dağılımı (Percentage distribution and differences of comparisons regarding objects)

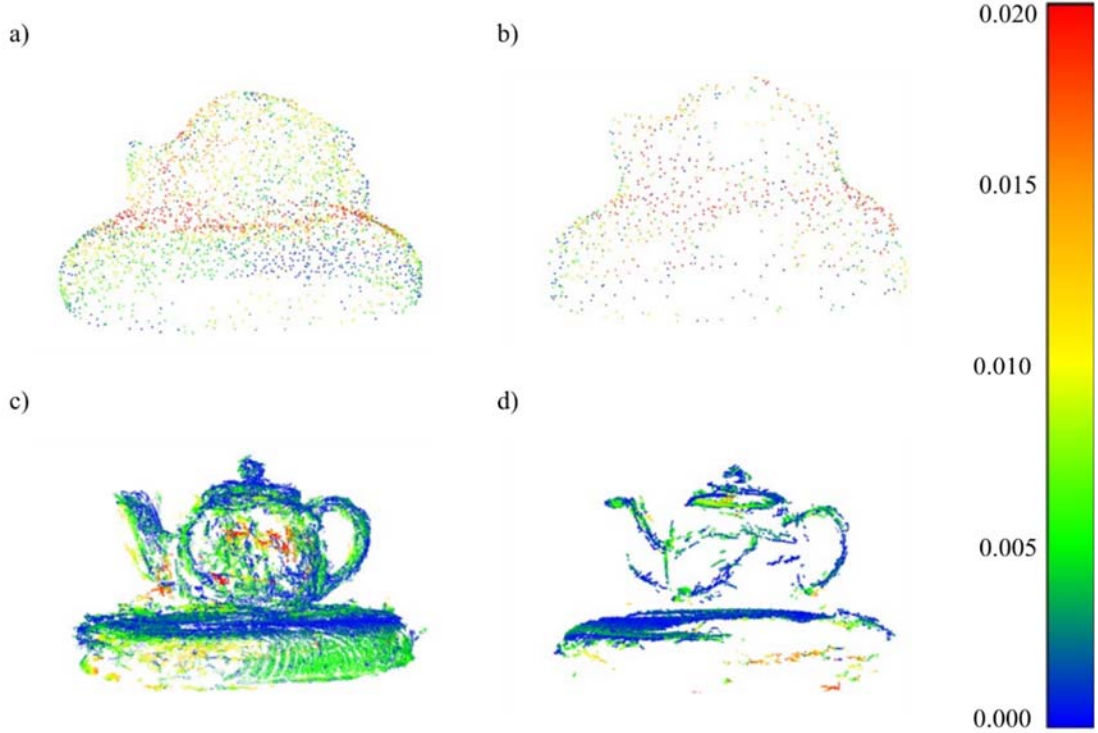
Nesne	Referans Veri Seti	Karşılaştırılan Veri Seti	Karşılaştırılan Nokta Sayısı	Fark Aralıkları ve Yüzdesel Değerleri				
				$<1\sigma$	$\geq 1\sigma$	$\geq 2\sigma$	$\geq 3\sigma$	$\geq 6\sigma$
				%	%	%	%	%
N1	YLT	V1	31163	18793	8193	2702	1351	124
				60,31	26,29	8,67	4,33	0,40
		V2	10349	7760	1899	381	223	86
				74,98	18,35	3,68	2,15	0,84
V3	1180275	592598	360538	151880	74248	1011		
		50,21	30,55	12,87	6,29	0,08		
V4	6730421	3299300	2186468	786286	453052	5315		
		49,02	32,49	11,68	6,73	0,08		
N2	YLT	V1	2480	1000	882	404	194	-
				40,32	35,56	16,29	7,83	-
		V2	785	343	260	129	53	-
				43,69	33,12	16,43	6,76	-
V3	332199	201254	95308	22281	11113	2243		
		60,58	28,69	6,71	3,35	0,67		
V4	234639	156053	51285	16148	9702	1451		
		66,51	21,86	6,88	4,13	0,62		

$<1\sigma$, $\geq 1\sigma$ - $<2\sigma$, $\geq 2\sigma$ - $<3\sigma$, $\geq 3\sigma$ - $<6\sigma$ ve $\geq 6\sigma$ 5 değer aralığında, aralıklara düşen nokta sayıları ve veri setindeki yüzdesel değerleri hesaplanarak Tablo 4'te verilmiştir. Her iki nesne için tüm karşılaştırma analizlerinde mutlak sapma için 50 mm farkın üzerinde bir değer bulunmamaktadır. Dış mekânda bulunan N1 ve iç mekânda bulunan N2 için farklı sensörler kullanılarak üretilen nokta

bulutlarının YLT ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen C2C sapma analiz sonuçları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Referans nokta bulutuna olan mesafeler 0,00 – 0,02 m skalasına göre renklendirilmiştir. Şekil 4'te N1 nesnesinin referans nokta bulutuna en uzak olan noktaların, V1 veri seti ile ele edilen nokta bulutunda nesne ile zeminin kesiştiği kısımlar olduğu tespit edilmiştir. Bu



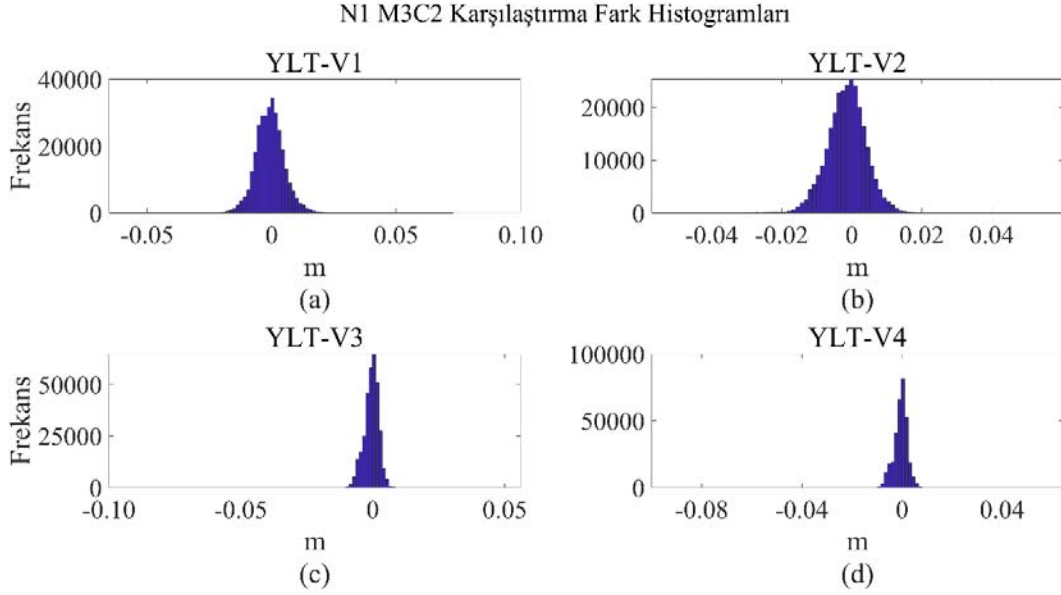
Şekil 4. N1 için YLT ile karşılaştırma: a) V1 b) V2 c) V3 ve d) V4 (Comparison for N1 between TLS and: a) V1 b) V2 c) V3 and d) V4)



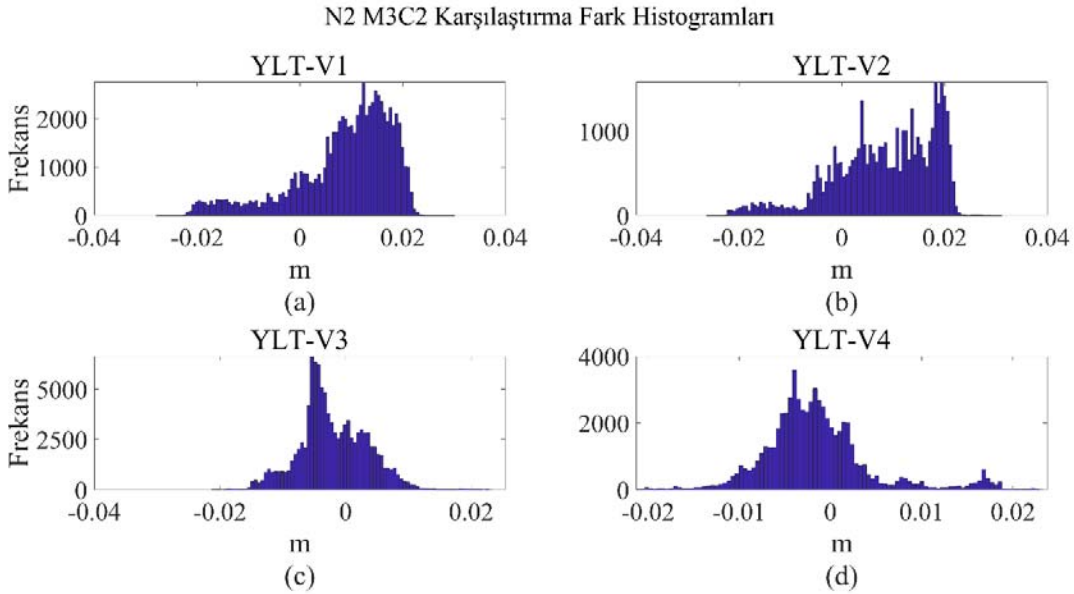
Şekil 5. N2 için YLT ile karşılaştırma: a) V1 b) V2 c) V3 ve d) V4 (Comparison for N2 between TLS and: a) V1 b) V2 c) V3 and d) V4)

farkların ölçme işleminin dış mekanda gerçekleştirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5'te ise N2 nesnesine ait referans nokta bulutu ile sırasıyla V1, V2, V3 ve V4 veri setlerinden üretilen nokta bulutları arasındaki mesafeler 0,00 – 0,02 m skalasına göre renklendirilmiştir. V1 ve V2 veri setlerinden üretilen nokta bulutlarının objenin formunu tamamen yansıtmadığı görülmüştür. Bunun sonucunda mevcut akıllı telefon ve tablet LiDAR sensörü ile farklı materyal ve boyutlardaki objelerin modellenmesi çalışmalarında başarılı sonuçlar elde edilemeyeceği düşünülmektedir. Ayrıca boyut ve materyal farklılıkları nedeniyle N2 nesnesine ait tüm nokta bulutlarında nesne üzerinde eksiklikler olduğu tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, karşılaştırma sonucu elde edilen farkların normal dağılıma uyup uymadığını belirlemek amacıyla, nokta bulutları arasında M3C2 karşılaştırması yapılmıştır. C2C yöntemine dayalı karşılaştırmadan farklı olarak M3C2 yönteminde, nokta bulutları arasındaki mesafe doğrudan karşılaştırılmaktadır. Elde edilen farkların frekans dağılım grafikleri N1 ve N2 için sırasıyla, Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. Her iki nesne için de YLT ile karşılaştırıldığında elde edilen farklar üzerinden Kolmogorov-Smirnov testi uygulanmıştır. Kolmogorov-Smirnov testi için, $\alpha = 0.05$ seçilerek MATLAB yazılımında kstest fonksiyonu kullanılmış, elde edilen test istatistikleri Tablo 5'te sunulmuştur. Uygulanan test



Şekil 6. N1 için M3C2 karşılaştırma fark histogramları: (a) YLT ve V1 arasında; (b) YLT ve V2 arasında; (c) YLT ve V3 arasında; (d) YLT ve V4 arasında
(Histograms of differences obtained from M3C2 comparison for N1 between: a) TLS and V1 b) TLS and V2 c) TLS and V3 d) TLS and V4)



Şekil 7. N2 için M3C2 karşılaştırma fark histogramları: (a) YLT ve V1 arasında; (b) YLT ve V2 arasında; (c) YLT ve V3 arasında; (d) YLT ve V4 arasında
(Histograms of differences obtained from M3C2 comparison for N2 between: a) TLS and V1 b) TLS and V2 c) TLS and V3 d) TLS and V4)

sonucunda, tüm farklar için test büyüklüklerinin kritik değerlerden daha büyük olduğu ve normal dağılıma uymadıkları görülmüştür. M3C2 karşılaştırmasında, N1 nesnesi için YLT ile V1, V2, V3 ve V4 veri setleri arasında sırasıyla, %4,8 - %17,0 - %3,0 ve %3,1 oranında nokta eşleşmemiş ve karşılaştırmaya alınmamıştır. Burada, en yüksek karşılaştırma V3 ile ve en az karşılaştırma V2 veri seti ile sağlanmıştır. N2 nesnesi için YLT ile V1, V2, V3 ve V4 veri setleri arasında sırasıyla, %30,8 - %62,0 - %1,6 ve %40,6 oranında nokta eşleşmemiş ve karşılaştırmaya alınmamıştır. Burada, en yüksek karşılaştırma yine V3 ile ve en az karşılaştırma V2 veri seti ile sağlanmıştır. Ancak, N1 nesnesine kıyasla N2 nesnesinde nokta bulutunun kısmi olduğu ve nesneyi temsil eden geometrik yapının tam olarak meydana gelmediği görülmektedir. Bu durumun, seçilen iki nesne arasındaki detay, boyut ve materyal farkından kaynaklandığı ön görülmektedir.

Tablo 5. Kolmogorov-Smirnov Test İstatistikleri (Kolmogorov-Smirnov Test Statistics)

Nesne	Referans Veri Seti	Karşılaştırılan Veri Seti	Test Büyüklüğü	Kritik Değer
N1	YLT	V1	0,0351	0,0024
		V2	0,0275	0,0026
		V3	0,0393	0,0024
		V4	0,0564	0,0024
N2	YLT	V1	0,1082	0,0050
		V2	0,0777	0,0067
		V3	0,0635	0,0042
		V4	0,1053	0,0054

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma, son yıllarda farklı mühendislik disiplinlerine ait uygulamaları ve görselleştirme çalışmalarına yönelik 3B modelleme için görece daha düşük maliyetli sensör sistemlerine sahip akıllı mobil cihazların (telefon+tablet) kullanılabilirliğini, doğruluk analizleri sonucu elde edilen istatistiksel değerler ile ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Bununla birlikte, LiDAR sensörüne sahip akıllı mobil cihazların 3B nokta bulutu üretme performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bu sensöre sahip cihazların modelleme performanslarının fotogrametrik yöntemlere yaklaştığı tespit edilmiştir. Lutzenberg vd. [36], SfM/MVS ve LiDAR teknolojilerinin ikisinin de yüzeyin bir temsilini oluşturduğunu ancak sonuçların göreceli olduğunu belirtmişlerdir. LiDAR teknolojisi, sensör ile hedef arasındaki mesafeyi doğrudan ölçerken, SfM/MVS farklı bakış açılarına göre dolaylı olarak mesafe hesaplanmasına dayanmaktadır. LiDAR ile yapılan ölçümlerde hataların birçoğunun iPhone'un IMU sensöründen kaynaklandığı tespit etmişlerdir. Buna göre, gelecekte akıllı cihazların donanımsal ve yazılımsal iyileştirmelerle LiDAR sensörlerinin profesyonel amaçlı uygulamalarda kullanılabilir hale geleceği ön görülmektedir.

Akıllı mobil cihazlarda kullanılan sensörlerin yakın gelecekte daha gelişmiş modellerle desteklenecek olması, mühendislik-mimarlık alanı başta olmak üzere sanat ve tasarım, grafik ve görselleştirme, sinema ve televizyon, bilgisayar oyun sektörü gibi sektörlerde bu cihazların etkin kullanımını artıracaktır. Mühendislik ölçmeleri perspektifiyle bakıldığında bu cihazlar doğruluk ve maliyet açısından güçlü bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle tüm dünyada büyük bir pazar oluşturan ve gittikçe büyüyen mekânsal bilgi/bilişim endüstrisi kapsamında gerek iç mekân, gerekse dış mekândaki nesnelerin ölçülmesi ve modellenmesi çalışmaları için bu cihazlar etkin kullanım potansiyeli oluşturmaktadır. Yakın gelecekte akıllı şehirler, kapalı alan konum belirleme ve harita üretimi, yüksek tanımlı harita (High-Definition map, HD-map), coğrafi bilgi sistemleri-yapı bilgi modelleme (CBS/GIS-YBM/BIM) entegrasyonu, konuma dayalı görselleştirme (GeoVisualization) gibi

yenilikçi sektörlerde bu cihazlardan etkin biçimde yararlanılacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2021-4295 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Duygu Arıcan, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Programı kapsamında YÖK tarafından belirlenen 100 ulusal öncelikli alandan biri olan "CBS ve Bilişim Uygulamaları" alanında doktora bursiyeridir.

Kaynaklar (References)

- Dabove P., Grasso N., Piras M., Smartphone-based photogrammetry for the 3D modeling of a geomorphological structure, *Appl. Sci.*, 9 (18), 3884, 2019.
- Roering J.J., Mackey B.H., Marshall J.A., Sweeney K.E., Deligne N.I., Booth A.M., Handwerker A.L., Cerovski Darriau C., 'You are HERE': Connecting the dots with airborne lidar for geomorphic fieldwork, *Geomorphology*, 200, 172-183, DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.04.009, 2013.
- Jazayeri I., Rajabifard A., Kalantari M., A geometric and semantic evaluation of 3D data sourcing methods for land and property information, *Land Use Policy*, 36, 219-230, DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.08.004, 2014.
- McKean J., Roering J., Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry, *Geomorphology*, 57, 331-351, DOI: 10.1016/S0169-555X (03)00164-8, 2004.
- Ventura G., Vilaro G., Terranova C., Sessa E.B., Tracking and evolution of complex active landslides by multitemporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy), *Remote Sens. Environ.*, 115, 3237-3248, DOI:10.1016/j.res.2011.07.007, 2011.
- Jerolmack D.J., Ewing R.C., Falcini F., Martin R.L., Masteller C., Phillips C., Reitz M., Buynevich I., Internal boundary layer model for the evolution of desert dune fields, *Nat. Geosci.*, 5, 206-209, DOI: 10.1038/ngeo1381, 2012.
- Dietrich J.T., River scape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology*, 252, 144-157, DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.008, 2016.
- Barazzetti L., Binda L., Scaioni M., Taranto P., Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: Application to the 'G1' temple in Myson, Vietnam, *J. Cult. Heritage*, 12, 253-262, DOI: 10.1016/j.culher.2010.12.004, 2011.
- Dorshow W.B., Modeling agricultural potential in Chaco Canyon during the Bonito phase: a predictive geospatial approach, *J. Archaeol. Sci.*, 39, 2098-2115, DOI:10.1016/j.jas.2012.02.004, 2012.
- Baier W., Rando C., Developing the use of Structure-from-Motion in mass grave documentation, *Forensic Sci. Int.*, 261, 19-25, DOI: 10.1016/j.forsciint.2015.12.008, 2016.
- Hesse R., Combining Structure-from-Motion with high and intermediate resolution satellite images to document threats to archaeological heritage in arid environments, *J. Cult. Heritage*, 2, 192-201, DOI: 10.1016/j.culher.2014.04.003, 2016.
- Tsui O.W., Coops N.C., Wulder M.A., Marshall P.L., Integrating airborne LiDAR and space-borne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass, *Remote Sens. Environ.*, 139, 340-352, DOI: 10.1016/j.res.2013.08.012, 2013.
- Reese H., Nyström M., Nordkvist K., Olsson H., Combining airborne laser scanning data and optical satellite data for classification of alpine vegetation, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 27, 81-90, DOI:10.1016/j.jag.2013.05.003, 2014.
- Leon J.X., Roelfsema Ch.M., Saunders M.I., Phinn S.R., Measuring coral reef terrain roughness using 'Structure-from-Motion' close-range photogrammetry, *Geomorphology*, 242, 21-28, DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.030, 2015.
- Armesto J., Roca-Pardiñas J., Lorenzo H., Arias P., Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods, *Eng. Struct.*, 32, 607-615, DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.11.007, 2010.
- Bhatla A., Choe S.Y., Fierro O., Leite F., Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital camera, *Autom. Constr.*, 28, 116-127, DOI:10.1016/j.autcon.2012.06.003, 2012.

