

e-ISSN
2717-6797

TÜRKİYE

LiDAR DERGİSİ

Turkish Journal of LiDAR



Cilt/Vol: 7
Sayı/ Issue: 1
Haziran/June, 2025



Türkiye LiDAR Dergisi



Dergi Hakkında

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

Amaç & Kapsam

Türkiye LiDAR Dergisi,

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

Türkiye LiDAR Dergisinin kapsamı;

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

Yayınlanma Sıklığı

Yılda 2 sayı (Haziran-Aralık)

ISSN

2717-6797

WEB

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

İletişim

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



Türkiye LiDAR Dergisi



About Journal

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

Aim & Scope

Turkish Journal of LIDAR,

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

The scope of Turkish Journal of LIDAR;

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

Publication frequency

Biannual (June-December)

ISSN

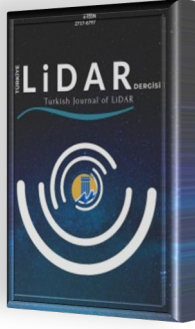
2717-6797

WEB

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

Contact

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



Türkiye LiDAR Dergisi

Turkish Journal of LiDAR

EDİTÖR / EDITOR

Abdurahman Yasin Yiğit

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

Editör Yardımcısı/ Assistant Editor

Fatih Varol

Selçuk Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Rekreasyon Yönetimi, Konya, Türkiye

Yayın veya Danışma Kurulu/ Editorial or Advisory Board

Abdullah Varlık, Ph.D.

avarlik@erbakan.edu.tr

Necmettin Erbakan University, TÜRKİYE

Ahmet Güngör, Ph.D.

ahmet.gungor21@gmail.com

Sabancı University, TÜRKİYE

Alaattin Başoda, Ph.D.

academy.absd@gmail.com

Aksaray University, TÜRKİYE

Alias Abdul Rahman, Ph.D.

alias@utm.my

University Teknologi Malaysia, MALEZYA

Aliihsan Şekertekin, Ph.D.

aliihsan.sekertekin@igdir.edu.tr

İğdir Üniversitesi, TÜRKİYE

Alper Akar, Ph.D.

alperakar24@gmail.com

Erzincan Binali Yıldırım University, TÜRKİYE

Burhan Ulaş, Ph.D.

burhan.ulas@inonu.edu.tr

İnönü University, TÜRKİYE

Elliot Hartley, Ph.D.

elliott@gd3d.co.uk

Garsdale Design Limited, UNITED KINGDOM

Fatih Adıgüzel, Ph.D.

fadiguzel@beu.edu.tr

Bitlis Eren University, TÜRKİYE

Hasan Bilgehan Makineci, Ph.D.

hbmakineci@ktun.edu.tr

Konya Technical University, TÜRKİYE

João Pedro Matos-carvalho, Ph.D.

joao.matos.carvalho@ulusofona.pt

Universidade Lusófona, PORTUGAL

Khalil Valizadeh Kamran, Ph.D.

valizadeh@tabrizu.ac.ir

University of Tabriz, IRAN

Mehmet Doğruluk, Ph.D.

mehmet.dogruluk@hacettepe.edu.tr

Hacettepe University, TÜRKİYE

Mehmet Ali Dereli, Ph.D.

mehmet.dereli@giresun.edu.tr

Giresun University, TÜRKİYE

Murat Uysal, Ph.D.

muysal007@gmail.com

Afyon Kocatepe University, TÜRKİYE

Mustafa Zeybek, Ph.D.

mzeybek@selcuk.edu.tr

Selçuk University, TÜRKİYE

Mustafa Ulukavak, Ph.D.

mulukavak@harran.edu.tr

Harran University, TÜRKİYE

Mustafa Üstüner, Ph.D.

mustafa.ustuner@samsun.edu.tr

Samsun Ondokuz Mayıs University, TÜRKİYE

Naryngul Margazieva, Ph.D.

naryngul.margazieva@manas.edu.kg

Turkish Manas University, KYRGYZ

Nizar Polat, Ph.D.

nizarpolat@harran.edu.tr

Harran University, TÜRKİYE

Omer Faruk Guven

o.guven@student.fontys.nl

Fontys University of Applied Science, NETHERLANDS

Osman Orhan, Ph.D.

osmanorhan44@gmail.com

Mersin University, TÜRKİYE

Oğuz Şimşek, Ph.D.

oguzsimsek@harran.edu.tr

Harran University, TÜRKİYE

Ragıp Onur Öztornacı, Ph.D.

onur.oztornaci@gmail.com

Bristol University, ENGLAND

Rui Filipe Antunes, Ph.D.

rui.antunes@ulusofona.pt

Universidade Lusófona, PORTUGAL

Seyil Najimudinova, Ph.D.

seyil.najimudinova@manas.edu.kg

Turkish Manas University, KYRGYZ

Ulus Tepebaş, Ph.D.

utepebas@mersin.edu.tr

Mersin University, TÜRKİYE

Vahdettin Demir, Ph.D.

vahdettin.demir@karatay.edu.tr

Karatay University, TÜRKİYE

Ümit Dikmen, Ph.D.

dikmenumt@gmail.com

Turkish Manas University, KYRGYZ

Mizanpaj Editörleri / Layout Editors

Res. Asst. Mehmet Özgür Çelik, Mersin University

mozgurcelik@nmersin.edu.tr

Res. Asst. İsmet Vapur, Mersin University

ivapur@mersin.edu.tr

İçindekiler

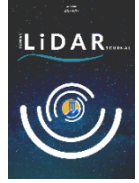
Contents

Makaleler/Articles;

Araştırma/Research**

Derleme/Review*

Sayfa/Page No	Makale Adı ve Yazar Adı Article Name and Author Name
01-07**	<i>PS-InSAR Verileri Üzerinden Makine Öğrenimi ile Yerkabuğu Hareketlerinin Analizi ve Tahmini</i> <i>Analysis and Prediction of Crustal Movements Using Machine Learning on PS-InSAR Data</i> Sinan Kuçur & Murat Uysal
08-14**	<i>Tarihi Çeşmelerin Modellenmesinde Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanımı</i> <i>The Use of Terrestrial Laser Scanners in Modelling Historical Fountains</i> Yunus Kaya
15-23**	<i>Kültürel Miras Alanlarında YLT ve İHA Tabanlı 3B Belgelenme Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Değerlendirilmesi</i> <i>Comparative Evaluation of YLT and UAV Based 3D Documentation Methods in Cultural Heritage Areas</i> Ceyda Ulvi & Aslı Deniz Adıgüzel
24-32**	<i>Mimari Karmaşıklığa Sahip Cami Yapıların Üç Boyutlu Belgelenmesinde Yersel Lazer Tarama Uygulaması</i> <i>Three-dimensional Documentation of Architecturally Complex Mosques Using Terrestrial Laser Scanning</i> Muhammed Emin Bıyık & Adem Kabadayı



PS-InSAR Verileri Üzerinden Makine Öğrenimi ile Yerkabuğu Hareketlerinin Analizi ve Tahmini

Sinan Kucur ^{1,2*}, Murat Uysal ^{3,4}

¹ Nuri Şeker Uşak Şeker Fabrikası, 64400, Uşak, Türkiye; (sinankucur@gmail.com)

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Programı, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye; (sinankucur@gmail.com)

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye; (muysal@aku.edu.tr)

⁴ Afyon Kocatepe Üniversitesi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye; (muysal@aku.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
sinankucur@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Kucur, S. & Uysal, M. (2025). PS-InSAR Verileri Üzerinden Makine Öğrenimi ile Yerkabuğu Hareketlerinin Analizi ve Tahmini. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 7(1), 01-07.

Geliş : 29.04.2025
Revize : 13.05.2025
Kabul : 19.05.2025
Yayınlama : 30.06.2025

Özet

Bu çalışmada, Bolvadin bölgesindeki zemin hareketleri Yapay Açıklı Uydu Radar İnterferometrisi (InSAR) tekniği ile analiz edilmiştir. Kalıcı Saçıcı (PS) InSAR yöntemi kullanılarak farklı yıllara ait yüzey deformasyonları belirlenmiş ve zaman serisi verileri oluşturulmuştur. Elde edilen hız verileri temel alınarak, Random Forest makine öğrenimi algoritmasıyla gelecekteki hareketler tahmin edilmiştir. Modelleme sürecinde iki yıllık veri seti dört döneme ayrılmış, ilk üç döneme ait verilerle yapılan eğitim sonucunda dördüncü dönemin hareketleri başarıyla tahmin edilmiş ve ardından ileriye yönelik tahminler gerçekleştirilmiştir. Modelin dördüncü döneme yönelik tahminleri, gözlemlerle yüksek uyum göstermiş ve farkların büyük kısmı ± 1.5 mm sınırları içinde kalmıştır. Sonuçlar, makine öğrenimi destekli InSAR analizlerinin, zemin hareketlerinin daha güvenilir ve hassas bir şekilde belirlenmesine katkı sağladığını göstermektedir. Farklı yıllara ait hız verilerinin modellenmesi, zamansal eğilimlerin tespit edilmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, elde edilen deformasyon tahminleri, bölgedeki zemin hareketlerinin mekansal ve zamansal dağılımını daha ayrıntılı inceleme olanağı sağlamıştır. Bu yöntemle, deformasyon süreçleri daha kapsamlı biçimde değerlendirilerek büyük hacimli uydu verilerinin etkin kullanımı mümkün hale gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sentinel-1, PS-InSAR, makine öğrenimi, rastgele orman.

Analysis and Prediction of Crustal Movements Using Machine Learning on PS-InSAR Data

*Corresponding Author:
sinankucur@gmail.com

Research Article

Citation: Kucur, S. & Uysal, M. (2025). Analysis and Prediction of Crustal Movements Using Machine Learning on PS-InSAR Data. *Turkish Journal of LiDAR*, 7(1), 01-07 (in Turkish).

Received : 29.04.2025
Revised : 13.05.2025
Accepted : 19.05.2025
Published : 30.06.2025

Abstract

In this study, ground movements in the Bolvadin region were analyzed using the Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) technique. Surface deformations over different years were identified using the Persistent Scatterer (PS) InSAR method, and corresponding time series data were generated. Based on the obtained velocity data, future ground displacements were predicted using the Random Forest machine learning algorithm. During the modeling process, the two-year dataset was divided into four temporal periods. The model was trained using the first three periods to successfully predict deformation in the fourth, after which forward estimations were generated. The model's predictions for the fourth period showed a high level of agreement with the observations, with the majority of differences falling within the ± 1.5 mm range. The results demonstrate that machine learning-supported InSAR analyses contribute to the more reliable and precise detection of ground movements. Modeling velocity data from different years provides valuable insights into the identification of temporal trends. Additionally, the predicted deformations enabled a more detailed examination of the spatial and temporal distribution of ground movements in the region. This approach allows for a more comprehensive assessment of deformation processes and facilitates the effective utilization of large-scale satellite data.

Keywords: Sentinel-1, PS-InSAR, machine Learning, random forest.

1. Giriş

Tarihi Radar interferometri, yeryüzünün belirli bir bölgesine ait iki radar görüntüsü arasındaki faz farklarını analiz ederek haritalama yapılmasını sağlayan bir ölçüm yöntemidir. Piksel düzeyinde hesaplanan bu faz farkları, interferogram adı verilen ve yer ile radar uydusu arasındaki mesafeyi eşyükselti eğrileriyle gösteren bir harita oluşturur. Farklı zamanlarda ve konumlardan elde edilen görüntüler sayesinde, bölgenin topoğrafik yapısı, atmosfer koşulları, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile bu özelliklerdeki zaman içindeki değişimler belirlenebilir. Ancak, bu verilerin doğruluğu ve güvenilirliği, yöntemin uygulanış biçimine ve kullanılan parametrelere bağlıdır. Uydularda kullanılan SAR (Synthetic Aperture Radar), yani yapay açıklıklı radar tekniği, mikrodalga frekanslarıyla çalışır. Bu özellik, sistemin gece-gündüz fark etmeksizin, her türlü hava koşulunda yüzeyin geometrik ve elektriksel özelliklerini görüntüleyebilmesini sağlar (Rosen vd., 1998). InSAR tekniği ise iki SAR görüntüsünü karşılaştırarak bir interferogram oluşturur. Bu interferogram, hedef bölgenin yüksekliğine (topoğrafyasına) dair bilgi sunarken, aynı zamanda iki görüntü arasında geçen sürede yer mesafesindeki küçük değişimleri de ortaya koyar. SAR görüntüsü, radar sinyallerinin yüzeyden yansmasıyla oluşan genlik ve faz verilerini içerir. Genlik yansıma özelliklerini, faz ise hedefe olan uzaklığı temsil eder. InSAR, iki görüntünün karşılık gelen piksellerindeki faz farklarını hesaplayarak interferogram üretir (Bürgmann vd., 2000). Bu yöntem, hem topoğrafya hem de yeryüzü deformasyonlarının ölçümünde etkili bir araçtır.

Son yıllarda, InSAR verilerinin daha etkin analiz edilmesi için makine öğrenimi yöntemleri giderek daha fazla benimsenmektedir. Özellikle Random Forest gibi gözetimli öğrenme algoritmaları, büyük hacimli zamansal deformasyon verilerinden eğilimleri öğrenerek gelecekteki hareketleri tahmin etmede başarılı sonuçlar verebilmektedir. Makine öğrenimi, geleneksel istatistiksel yöntemlere kıyasla daha esnek modelleme yetenekleri sunarak, yer hareketlerinin daha doğru tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, veri seti olarak 10 Ekim 2022 ile 11 Ekim 2024 tarihleri arası 25 uydu görüntüsü seçilerek, iki yıllık veri seti altı aylık dört döneme ayrılmıştır. PS-InSAR yöntemi ile elde edilen nokta bazlı hız verileri kullanılarak, ilk üç altı aylık ölçümlerine dayalı olarak dört dönemin hareketi tahmin edilmiştir. Daha sonra, bu tahmin modeli genişletilerek beşinci dönem için çıkarımda bulunulmuştur. Çalışmanın temel amacı,

PS-InSAR verilerinden faydalanarak makine öğrenimi tabanlı bir yaklaşım ile zemin hareketlerini modellemek ve tahmin etmektir. Böylece, farklı yıllara ait verilerin entegrasyonu ile InSAR analizlerinin doğruluğu artırılarak, gelecekteki deformasyonların daha güvenilir bir şekilde belirlenmesi sağlanabilir.

2.1. Çalışma Alanı

Bolvadin, üçüncü ve dördüncü jeolojik devirlerde oluşmuş bir ovadır. İlçenin güneyinde Sultandağları, kuzeydoğusunda Emirdağları ve kuzeybatısında Paşadağları bulunmaktadır. Coğrafi olarak, 31°2' doğu meridyeni ile 38°43' kuzey paralelinin kesişim noktasında, geniş ve derin bir alüvyon ovası üzerine kurulmuştur. İç Batı Anadolu'nun Ege Bölgesi sınırları içinde yer alan Bolvadin, genellikle düz ve verimli arazilerden oluşmaktadır.

Deniz seviyesinden ortalama 1.016 metre yükseklikte bulunan ilçenin yüzölçümünün %12,84'ünü ova alanları oluşturur. Tarımsal faaliyetler açısından önemli bir bölge olan Bolvadin'de, arazinin yaklaşık %40'ı tarım alanı olarak kullanılmaktadır. Yeraltı su kaynakları bakımından oldukça zengin olan ilçe, yüzey akarsuları açısından ise sınırlı su varlığına sahiptir.

2.2. Sentinel Uydusu

Sentinel-1A, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen ve Copernicus Programı kapsamında 3 Nisan 2014 tarihinde Fransız Guyanası'ndan Soyuz roketiyle uzaya fırlatılan bir radar görüntüleme uydusudur (ESA, 2014). Bu uydu, Dünya'yı kesintisiz bir şekilde izleme kapasitesiyle çevresel izleme, afet yönetimi ve iklim değişikliği gibi konularda kritik veriler sunmak amacıyla tasarlanmıştır. Sentinel-1A, ikiz uydusu Sentinel-1B ile birlikte çalışarak Dünya yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini toplar ve bu veriler bilim insanları, hükümetler ve araştırmacılar için önemli bir kaynak oluşturur (Torres vd., 2012).

Yapay Açıklıklı Radar (SAR) teknolojisiyle donatılmıştır. SAR, uydunun hava koşullarından veya gün ışığından bağımsız olarak çalışmasını sağlar (Woodhouse, 2006). Bulut örtüsü, karanlık veya yoğun sis gibi faktörler optik uyduların veri toplamasını engellerken, Sentinel-1A'nın C-bant radar sistemi bu koşullarda dahi kesintisiz çalışır (ESA, 2020). Uydu, 250 kilometrelik bir alanı tarayabilir ve 5x5 metrelik bir çözünürlükle detaylı görüntüler elde edebilir (Potin vd., 2016). Yörünge süresi yaklaşık 12 gün olan Sentinel-1A, Dünya'nın hemen hemen her noktasını düzenli olarak tarar ve bu özellik, zaman içindeki değişikliklerin izlenmesi için kritik bir altyapı sunar.

Copernicus Programı'nın bir parçası olarak Sentinel-1A, çevresel sürdürülebilirlik ve afetlere hazırlık gibi alanlarda önemli bir rol oynar. Uydunun sağladığı veriler, tarım alanlarının izlenmesi, orman kaybının takibi, deniz buzullarının gözlemlenmesi ve okyanus akıntılarının analizi gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Malenovsky vd., 2012). Ayrıca, afet durumlarında hızlı müdahale gerektiren bölgelerde gerçek zamanlı veri sağlayarak kurtarma ekiplerine destek olur (Joyce vd., 2009). Örneğin, 2015 Nepal depremi sonrası yer hareketlerinin analizi Sentinel-1A verileriyle yapılmıştır (ESA, 2015). İklim değişikliğiyle mücadeledeki katkıları da dikkat çekicidir. Buzulların hareketlerini ve erime oranlarını izleyerek küresel ısınmanın etkilerini anlamada araştırmacılara yardımcı olur (Strozzi vd., 2017). Deniz seviyesindeki değişiklikler ve kıyı erozyonu gibi süreçlerin gözlemlenmesinde de önemli bir rol oynar (Ponte vd., 2019). Fırlatıldığı günden bu yana Dünya üzerindeki birçok önemli olayı belgeledi, 2019 Amazon orman yangınlarının izlenmesi ve 2020'de Arktik buzulların rekor düzeyde erimesinin analizi gibi olaylarda uydunun verileri hem bilimsel çalışmalar hem de insani yardım çabaları için temel teşkil etti (ESA, 2020). İkiz uydusu Sentinel-1B'nin 2016'da fırlatılmasıyla birlikte, sistemin veri toplama sıklığı ve kapsama alanı daha da genişledi (Potin vd., 2016).

2.3. Snap2StaMPS

Snap2StaMPS, Sentinel-1 radar verilerini kullanarak yer yüzeyindeki deformasyonları analiz etmek için SNAP yazılımını StaMPS ile entegre eden açık kaynaklı bir araçtır. Bu sistem, Yapay Açıklıklı Radar (SAR) interferometrisi (InSAR) tekniklerini kullanarak, özellikle Persistent Scatterer Interferometry (PSI) yöntemiyle zaman serisi analizlerini gerçekleştirmek için tasarlanmıştır (Hooper vd., 2004). Snap2StaMPS'in temel mantığı, SNAP'in güçlü veri işleme kapasitesini kullanarak ham Sentinel-1 verilerini StaMPS'in PSI analizine uygun hale getirmektir. Bu süreç, karmaşık InSAR iş akışlarını otomatikleştirerek araştırmacıların deformasyon haritaları oluşturmasını kolaylaştırır (Foumelis vd., 2018).

Snap2StaMPS, Sentinel-1 SLC (Single Look Complex) verilerinden başlayarak, interferogram oluşturma, faz açılımı ve nihayetinde StaMPS ile PSI analizine kadar olan süreçleri kapsar. SNAP, veri ön işleme adımlarını gerçekleştirirken, StaMPS bu verileri kullanarak zaman serisi boyunca kalıcı saçıcı noktaları (persistent scatterers) tespit eder ve bu noktaların hareketlerini hesaplar. Sistem, atmosferik etkileri ve topografik hataları ayırıştırarak yüksek hassasiyetli deformasyon ölçümleri sağlar (Ferretti vd., 2001).

Snap2StaMPS'in avantajı, bu iki yazılımın yeteneklerini birleştirerek manuel müdahaleyi en aza indirmesi ve tekrarlanabilir bir iş akışı sunmasıdır.

Snap2StaMPS, deprem izleme, heyelan analizi ve altyapı stabilitesi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Blasco vd., 2019). Ancak, sistemin başarısı veri kalitesine, bölge topoğrafyasına ve atmosferik koşullara bağlıdır. Yoğun bitki örtüsü veya hızlı değişen yüzeyler, PSI analizinde sınırlamalara yol açabilir (Hooper vd., 2012).

2.4. Makine Öğrenimi

Zemin hareketlerinin analizi ve tahmini, jeodezik ve jeofizik çalışmalarda kritik bir öneme sahiptir. Bu açıdan, makine öğrenimi teknikleri, büyük veri setlerinin işlenmesi ve karmaşık modellerin geliştirilmesi için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle Random Forest algoritması, makine öğrenimi yöntemleri arasında öne çıkar. Leo Breiman tarafından geliştirilen bu algoritma, çok sayıda karar ağacını bir araya getirerek toplu bir tahmin modeli oluşturur ve overfitting riskini azaltarak yüksek doğruluk sağlar (Beriman, 2001). Random Forest, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde etkili bir performans sergiler ve bu özellikleriyle zemin deformasyonlarının zaman serisi analizinde tercih edilmiştir. Bu çalışmada, Random Forest algoritması, InSAR verilerinden elde edilen hız ölçümleriyle gelecekteki zemin hareketlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Modelin başarısı, farklı yıllara ait verilerin zamansal ve mekansal korelasyonlarını değerlendirme yeteneğine dayanır. Random Forest'in güçlü yapısının, gürültülü veri setlerinde bile güvenilir sonuçlar ürettiğini vurgulanmaktadır (Hastie vd., 2009). Bu nedenle, Bolvadin bölgesindeki deformasyon süreçlerinin modellenmesinde, algoritmanın sunduğu esneklik ve hassasiyet önemli bir avantaj sağlamıştır. Makine öğrenimi destekli yaklaşımlar, uydu verilerinin etkin kullanımını mümkün kılarak bilimsel araştırmalara katkı sunmaktadır.

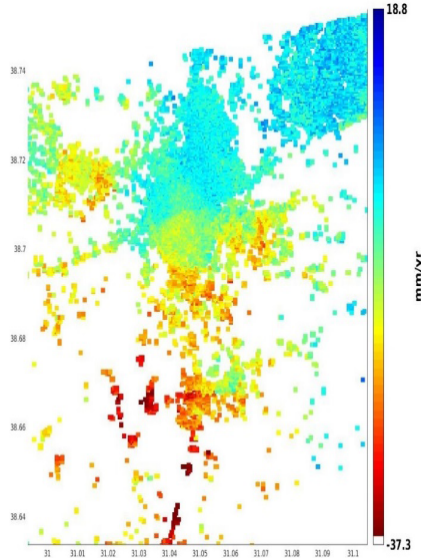
Random Forest algoritması, ağaç sayısı 100 ve maksimum derinlik 20 olacak şekilde yapılandırılmıştır. Veriler %70 eğitim ve %30 test oranında ayrılmış, modelin genellenebilirliğini artırmak ve aşırı öğrenme (overfitting) riskini azaltmak amacıyla eğitim verisi üzerinde 5 katlı çapraz doğrulama (5-fold cross-validation) uygulanmıştır. Modelin nihai performansı, test verisi üzerinde hesaplanan RMSE = 2.5 mm ve $R^2 = 0.82$ başarı metrikleriyle değerlendirilmiştir.

Bu sonuçlar, modelin oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin yapabildiğini ve aşırı öğrenme eğilimi göstermediğini ortaya koymaktadır. Özellikle PS-InSAR verilerine dayalı regresyon modelleri

açısından, bu düzeyde düşük hata değerleri modelin güvenilirliğini desteklemektedir.

3. Bulgular

Sentinel-1 uydu görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen PS-InSAR analizleri sonucunda, Bolvadin bölgesi genelinde toplam 38.013 adet PS noktasına ulaşılmıştır. PS noktalarının özellikle yapılaşmış ve yüksek yansıtıcılığa sahip alanlarda daha yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.



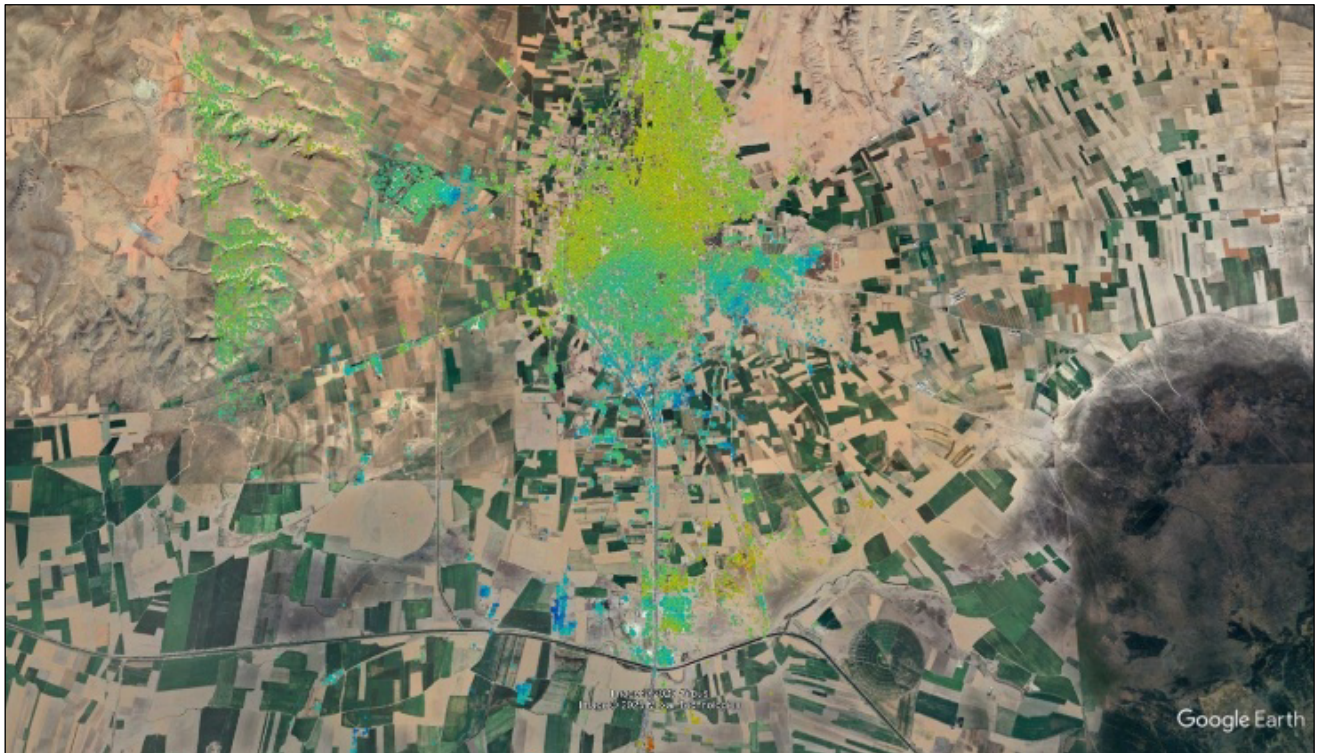
Şekil 1. Oluşturulan PS noktalarının mekansal dağılım haritası. Sıcak renkler uydu bakış doğrultusunda çökmeyi gösterirken soğuk renkler uydu bakış doğrultusunda yükselmeyi temsil etmektedir.

İki yıllık gözlem sürecine ait veriler, her biri altı aylık olmak üzere dört eşit döneme ayrılmıştır. Elde edilen zaman serisi hız verileri temel alınarak, ilk üç döneme ait ölçümlerden oluşan eğitim seti ile dördüncü döneme ait yüzey deformasyonları, Random Forest algoritması aracılığıyla tahmin edilmiştir.

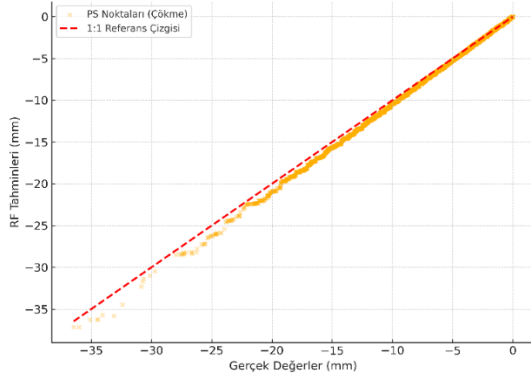
Bu doğrultuda model, çalışma alanındaki tüm PS noktaları için dördüncü dönem deformasyonlarını yüksek başarı oranıyla öngörebilmiştir. Dördüncü döneme yönelik tahmin doğruluğunun değerlendirilmesinin ardından, model üzerinde beşinci bir dönem için projeksiyon yapılmıştır. Henüz gözlemlenmemiş olan bu sonraki altı aylık döneme ilişkin öngörüler, modelin eğitildiği verilerden öğrenilen zamansal eğilimler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Böylece, çalışma yalnızca geçmişe dönük modelleme ile sınırlı kalmayıp, ileriye dönük tahmin kapasitesini de ortaya koymuştur.

Mekansal dağılım analizi, PS noktalarının yoğunlaştığı alanlarda deformasyon hızlarının da arttığını göstermiştir. Özellikle Bolvadin merkez ve güneydoğu bölgelerinde çökme eğilimlerinin daha belirgin olduğu kuzey ve kuzeybatı kesimlerde ise daha stabil yüzey hareketlerinin gözlemlendiği tespit edilmiştir.

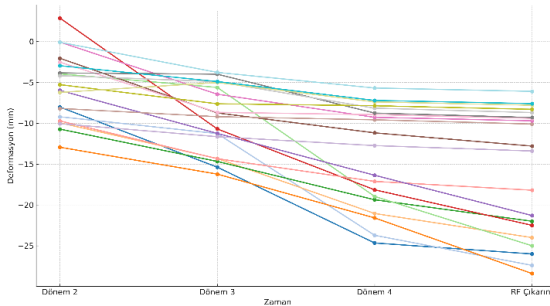
Şekil 3 incelendiğinde, noktaların 1:1 referans çizgisi etrafında yoğunlaştığı ve modelin çökme eğilimlerini yüksek doğrulukla öngörebildiği görülmektedir. Bu durum, tahmin performansının güvenilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Oluşturulan PS noktalarının yeryüzündeki konumu. Soğuk renkler uydu bakış doğrultusunda çökmeyi gösterirken sıcak renkler uydu bakış doğrultusunda yükselmeyi temsil etmektedir.



Şekil 3. Random Forest algoritması tarafından tahmin edilen deformasyon değerleri ile PS-InSAR yöntemiyle elde edilen çökme gözlemleri arasındaki uyumu gösteren regresyon grafiği.



Şekil 4. Seçilmiş 20 PS noktasına ait 2., 3. ve 4. dönem gözlemsel deformasyon değerleri ile Random Forest modeli tarafından yapılan tahmin değerinin zaman serisi grafiği.

Şekil 4'te, her bir çizgi, seçilmiş 20 PS noktasından birine karşılık gelmekte olup, bu noktaların 2., 3. ve 4. dönemlerdeki gözlemsel deformasyon değerleri ile Random Forest algoritması tarafından tahmin edilen sonraki dönem çıkarım değerlerini içermektedir. Grafik, zamansal eğilimlerin her bir noktada nasıl geliştiğini görsel olarak yansıtarak, modelin geçmiş deformasyon verilerinden öğrenerek sonraki dönem için nasıl bir tahminde bulunduğunu değerlendirme imkanı sunmaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

PS-InSAR yöntemiyle elde edilen PS noktaların ilk dört döneme ait yüzey deformasyon hızları kullanılarak, Random Forest algoritması ile beşinci döneme ait yüzey hareketlerinin tahmin edilmesini amaçlamıştır. Modelleme sürecinde, iki yıllık zaman serisi verileri her biri altı aylık olmak üzere dört eşit döneme ayrılmış ve ilk üç dönemin verileriyle eğitilen model, dördüncü dönem için tahminlerde bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, modelin bu dönemdeki hareketleri yüksek doğruluk oranıyla öngörebildiğini göstermiştir. Dördüncü döneme yönelik tahminler ile gerçek gözlemler arasında büyük ölçüde uyum olduğu ve farkların genellikle $\pm 1,5$ mm sınırları içerisinde kaldığı görülmüştür.

Modelin dördüncü döneme ilişkin tahmin performansı doğrulandıktan sonra, mevcut veriler kullanılarak henüz gözlemlenmemiş olan beşinci dönem için projeksiyon gerçekleştirilmiştir. Bu sayede çalışma yalnızca geçmiş verilerin analiziyle sınırlı kalmamış, aynı zamanda ileriye dönük tahmin kapasitesiyle de değerlendirilmiştir. Beşinci döneme ilişkin tahminlerde, çökme eğilimlerinin bazı bölgelerde ivme kazandığı, bazı alanlarda ise durağanlaşma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların, yerel zemin özellikleri, su seviyeleri, yapılaşma yoğunluğu ve diğer çevresel faktörlerle ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir.

PS noktalarının mekansal dağılımı, deformasyon hızlarının bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle Bolvadin ilçe merkezi ve güneydoğu kesimlerinde çökme eğilimlerinin daha yoğun olduğu, kuzeybatı ve kuzey bölgelerde ise daha stabil bir zemin hareketi gözlemlendiği belirlenmiştir. Örnek olarak, ilçe merkezine yakın bir konumda bulunan 38.631611 derece kuzey enlemindeki ve 31.067768 derece doğu boylamındaki bir PS noktasında, iki yıllık süreçte $-24,6$ mm'lik bir yer değiştirme gözlemlenmiş, model bu noktadaki hareketi beşinci dönemde $-26,1$ mm olarak öngörmüştür. Benzer şekilde, 38.633648 derece kuzey enleminde ve 31.066811 derece doğu boylamında yer alan bir başka noktada $-21,6$ mm'lik gözlemsel yer değişimi, model tarafından $-23,4$ mm olarak öngörülmüştür.

Özellikle deformasyon eğilimlerinin kuvvetli olduğu alanlarda modelin öngörü kabiliyetinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Modelin güçlü tahmin kabiliyeti, veri setinin yapısal bütünlüğü ve zamansal devamlılığı ile doğrudan ilişkilidir. Eğitim sürecinde kullanılan ilk üç döneme ait veriler, deformasyon dinamiklerini yeterli düzeyde temsil etmiş ve bu durum modelin genelleme başarısını artırmıştır. Ayrıca, kullanılan Random Forest algoritması, çok boyutlu verilerle çalışabilme ve karmaşık ilişkileri öğrenebilme yeteneği sayesinde, bölgedeki hareketleri başarıyla modelleyebilmiştir.

PS-InSAR verilerinin deformasyon analizinde etkin biçimde kullanılabileceği, bu alandaki önceki çalışmalarla da ortaya konmuştur. PS noktaların yüksek hassasiyetle yer değiştirme ölçümlerinde kullanılabilirliği daha önce gösterilmiştir. Ayrıca, makine öğrenimi algoritmalarının, özellikle Random Forest yaklaşımının mekansal verilerle başarılı bir biçimde entegre edilerek yüksek öngörü performansı sağlayabileceği çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir (Ferretti vd., 2001; Ghorbanzadeh vd., 2019). Söz konusu literatürle paralel biçimde, PS-InSAR ve makine öğrenimi entegrasyonunun zemin hareketlerinin modellenmesinde etkili bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 1. Bazı PS noktalarına ait 2 yıllık hızları ile RF modeli ile çıkarılmış 5. dönem hızları. ($R^2 = 0.82$, RMSE = 2.5 mm).

Enlem	Boylam	4. dönem hareket (mm/yıl)	RF ile çıkarım (mm/yıl)
31.631611	38.631611	-24,7	-26,0
31.067921	38.631504	-23,7	-24,4
31.066811	38.633648	-21,6	-23,4
31.066856	38.633652	-21,1	-22,0
31.068411	38.632343	-19,4	-20,5
31.069904	38.618248	-19,0	-19,7
31.004787	38.654396	-18,2	-19,1
31.061237	38.688156	-17,1	-18,2
31.068380	38.632851	-16,4	-17,2

Random Forest modeli deterministik karar ağaçlarıyla çalıştığı için doğrudan istatistiksel bir güven aralığı üretmese de, elde edilen düşük hata değerleri ve tahminlerin gözlemlerle yüksek uyumu, modelin öngörü potansiyelinin güvenilir olduğunu göstermektedir.

Elde edilen RMSE değeri, literatürde benzer amaçlarla gerçekleştirilen çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça tatmin edicidir. Örneğin, Çin'in Xi'an bölgesinde gerçekleştirilen bir çalışmada, PS-InSAR verileriyle birlikte Random Forest, Support Vector Regression ve XGBoost gibi makine öğrenimi modelleri kullanılarak mevcut deformasyonların analizi yapılmış, RF modeliyle 2.3 mm ile 3.9 mm arasında RMSE değerleri elde edilmiştir (Guo vd, 2023). Ancak söz konusu çalışmada yalnızca mevcut deformasyonlar değerlendirilmiş, geleceğe yönelik bir tahmin yapılmamıştır.

Random Forest algoritması, yüksek doğruluk sunmasına rağmen bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Modelin deformasyon eğilimlerini güçlü şekilde yakalamasına rağmen, çok kısa süreli anomaliler veya ani zemin değişimleri gibi durumlarda tahmin performansı düşebilir. Benzer şekilde, PS yoğunluğunun düşük olduğu alanlarda modelin tahmin güvenilirliği azalabilir. Gelecek çalışmalarda, RF modelinin LSTM veya GRU gibi zamansal bağımlılık içeren derin öğrenme algoritmalarıyla desteklenmesi bu sınırlamaları azaltabilir.

Bu çalışma ile PS-InSAR verilerinin makine öğrenimi modelleriyle entegre edilerek yer yüzeyindeki deformasyonların yüksek doğrulukla tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur. Random Forest algoritması, geçmiş verilere dayanarak hem mevcut dönemleri modelleyebilmiş hem de ileriye dönük tahminler üretme konusunda etkin bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır. Bu yaklaşım, yalnızca akademik analizlerle sınırlı kalmayıp, çeşitli pratik uygulamalara da doğrudan katkı sunmaktadır. Örneğin, kentleşme ve altyapı yönetimi süreçlerinde zemin stabilitesi açısından riskli bölgelerin belirlenmesi, deformasyon eğilimlerinin izlenmesi

sayesinde daha güvenli yapılaşma stratejilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, ani çökmelerin önceden öngörülebilmesi, afet riski azaltımı, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve tarım alanlarının korunması gibi alanlarda karar vericilere erken uyarı sağlayabilecek bir temel sunmaktadır.

Yazarların Katkısı

Sinan Kucur: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Görselleştirme, Analiz ve yorumlama, Yazma – orijinal taslak.

Murat Uysal: Denetleme/danışmanlık, Proje yönetimi.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışma da herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Blasco, J. M. D. (2019). Persistent scatterer interferometry: A review of methods and applications. *Remote Sensing*, 11(8), 934. <https://doi.org/10.3390/rs11080934>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1), 169–209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Foumelis, M., Delgado Blasco, J. M., Brito, F., Pacini, F., Papageorgiou, E., Pishehvar, P., & Bally, P. (2022). SNAPPING services on the Geohazards Exploitation Platform for Copernicus Sentinel-1 surface motion mapping. *Remote Sensing*, 14(23), 6075. <https://doi.org/10.3390/rs14236075>
- Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Gholamnia, K., Meena, S. R., Tiede, D., & Aryal, J. (2019). Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection. *Remote Sensing*, 11(2), 196. <https://doi.org/10.3390/rs11020196>

- Guo, X., Zhao, C., Li, G., Peng, M., & Zhang, Q. (2023). A multifactor-based random forest regression model to reconstruct a continuous deformation map in Xi'an, China. *Remote Sensing*, 15(19), 4795. <https://doi.org/10.3390/rs15194795>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). Springer.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23611. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., & Glassey, P. J. (2009). A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography*, 33(2), 183–207. <https://doi.org/10.1177/0309133309339563>
- Malenovsky, Z., Rott, H., Cihlar, J., Schaepman, M. E., García-Santos, G., Fernandes, R., & Berger, M. (2012). Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of land, oceans, and ice. *Remote Sensing of Environment*, 120, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.026>
- Ponte, R. M., Carson, M., Cirano, M., Domingues, C. M., Jevrejeva, S., Marcos, M., ... & Zhang, X. (2019). Towards comprehensive observing and modeling systems for monitoring and predicting regional-to-coastal sea level. *Frontiers in Marine Science*, 6, 437. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00437>
- Potin, P., Rosich, B., Miranda, N., & Grimont, P. (2016). Sentinel-1 mission status. *Procedia Computer Science*, 100, 1297–1304. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.179>
- Strozzi, T., Wiesmann, A., Kääb, A., & Schellenberger, T. (2017). Glacial and periglacial environment monitoring in the Swiss Alps using Sentinel-1 SAR interferometry. *Remote Sensing*, 9(12), 1238. <https://doi.org/10.3390/rs9121238>
- Torres, R., Snoei, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Woodhouse, I. H. (2006). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315272573>

İnternet kaynakları

- European Space Agency (ESA). (2024, May 1). *Sentinel-1 mission overview*. Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- European Space Agency (ESA). (2024, May 1). *Sentinel-1A launch*. Retrieved from https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1A_launch
- European Space Agency (ESA). (2024, May 1). *Nepal earthquake displacement maps from Sentinel-1A*. Retrieved from https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Sentinel-1/Nepal_earthquake



© Author(s) 2025.

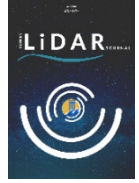
This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Türkiye LiDAR Dergisi

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

e-ISSN 2717-6797



Tarihi Çeşmelerin Modellenmesinde Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanımı

Yunus Kaya ^{1*}

¹ Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 63000, Şanlıurfa, Türkiye; (yunuskaya@harran.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
yunuskaya@harran.edu.tr

Araştırma Makalesi

Alıntı: Kaya, Y. (2025). Tarihi Çeşmelerin Modellenmesinde Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanımı. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 7(1), 08-14.

Geliş : 21.11.2024
Revize : 22.05.2025
Kabul : 10.06.2025
Yayınlama : 30.06.2025

Özet

Tarihi yapılar, bir toplumun tarihini, kültürel kimliğini ve estetik değerlerini yansıtan önemli unsurlardır. Bu yapılar, geçmişten günümüze aktarılan bilgi, sanat ve yaşam tarzlarını barındırarak, toplumsal hafızanın korunmasına katkıda bulunur. Tarihi yapıların korunması ve belgelenmesi, bu mirasın gelecek nesillere aktarılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Tarihi yapıların modellenmesi, bu yapıların mevcut durumlarının yüksek doğrulukla kaydedilmesini ve dijital arşivler oluşturulmasını sağlar. Üç boyutlu (3B) modeller, restorasyon ve koruma çalışmalarında büyük avantajlar sunar ve yapıların orijinal hallerine sadık kalınarak yenilenmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışma, Konya ili Selçuklu ilçesi Yükselen Mahallesi'nde bulunan tarihi bir çeşmenin yersel lazer tarayıcı (YLT) kullanılarak üç boyutlu modelinin oluşturulmasını amaçlamaktadır. FARO FocusS 350 yersel lazer tarayıcı kullanılarak çeşmenin geometrik verileri milimetre düzeyinde hassasiyetle toplanmış ve bu veriler kullanılarak çeşmenin detaylı 3B modeli oluşturulmuştur. Elde edilen yüksek çözünürlüklü veriler, çeşmenin restorasyon ve koruma çalışmalarında kullanılmak üzere dijital olarak arşivlenmiştir. Ayrıca, YLT'nin sağladığı zaman ve emek tasarrufu, geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Sonuçlar, YLT teknolojisinin tarihi yapıların belgelenmesi ve korunmasında sağladığı yüksek doğruluk, hızlı veri toplama ve çok yönlü kullanım imkanı gibi avantajları açıkça ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yersel lazer tarama, tarihi çeşme, nokta bulutu, 3B model.

The Use of Terrestrial Laser Scanners in Modelling Historical Fountains

*Corresponding Author:
yunuskaya@harran.edu.tr

Research Article

Citation: Kaya, Y. (2025). The Use of Terrestrial Laser Scanners in Modelling Historical Fountains. *Turkish Journal of LiDAR*, 7(1), 08-14 (in Turkish).

Received : 21.11.2024
Revised : 22.05.2025
Accepted : 10.06.2025
Published : 30.06.2025

Abstract

Historical structures are important elements that reflect the history, cultural identity and aesthetic values of a society. These structures contribute to the preservation of social memory by harbouring the knowledge, art and lifestyles transferred from the past to the present. Preservation and documentation of historical buildings play a critical role in transferring this heritage to future generations. Modelling of historical structures enables the current state of these structures to be recorded with high accuracy and digital archives to be created. Three-dimensional (3D) models offer great advantages in restoration and conservation works and allow the buildings to be renovated faithfully to their original state. This study aims to create a three-dimensional model of a historical fountain located in Yükselen Neighbourhood of Selçuklu District of Konya Province by using a terrestrial laser scanner (TLS). The geometric data of the fountain were collected with millimetre-level precision using a FARO FocusS 350 local laser scanner and a detailed 3D model of the fountain was created using these data. The high-resolution data were digitally archived for use in the restoration and conservation of the fountain. In addition, the time and labour saving provided by TLS offers significant advantages compared to traditional methods. The results clearly demonstrate the advantages of TLS technology in the documentation and conservation of historical structures, such as high accuracy, fast data collection and versatility of use.

Keywords: Terrestrial laser scanning, historical fountain, point cloud, 3D model.

1. Giriş

Kültürel miras, bir toplumun tarihini, kimliğini ve değerlerini yansıtan en önemli unsurlardan biridir. Bu miras, geçmişten günümüze aktarılan bilgi, sanat, gelenek ve yaşam tarzlarını içerir. Kültürel mirasın korunması, sadece fiziksel yapıların muhafaza edilmesi değil aynı zamanda bu yapıların taşıdığı anlamların, hikayelerin ve bilgilerin gelecek nesillere aktarılmasını da kapsar (Kabadayı ve Erdoğan, 2023). Tarihi yapılar, anıtlar, arkeolojik alanlar ve diğer kültürel varlıklar, bir toplumun kolektif hafızasını oluşturur ve bu hafızanın korunması, toplumsal kimliğin ve aidiyet duygusunun sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır (Döş ve Yiğit, 2022; Kabadayı, 2023). Bu nedenle, kültürel mirasın korunması ve belgelenmesi hem bilimsel hem de toplumsal açıdan kritik bir rol oynar (Yılmaz & Uysal, 2017; Kaya vd., 2021).

Kültürel mirasın korunması, tarihi yapıların belgelenmesi ve dijitalleştirilmesi, günümüz teknolojilerinin sunduğu olanaklarla daha hassas ve detaylı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Döş vd., 2021; Kabadayı ve Kaya, 2024). Bu bağlamda, yersel lazer tarayıcılar (YLT) gibi ileri teknolojiler, tarihi yapıların ve alanların üç boyutlu (3B) modellerinin oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır (Bennat vd., 2014; Kabadayı, 2023). Bu teknolojiler, yapıların mevcut durumlarını yüksek doğrulukla kaydederek, restorasyon ve koruma çalışmalarında, yapıların orijinal hallerine sadık kalınarak yenilenmesini sağlamaktadır (Llabani ve Abazaj, 2024). Ayrıca, dijital arşivler oluşturarak, yapıların gelecekteki araştırmalar için korunmasına katkıda bulunmaktadır (Alptekin vd. 2019; Alptekin & Yakar, 2021; Döş ve Yiğit, 2023; Balci & Ulvi, 2024).

LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, lazer ışınları kullanarak nesnelerin uzaklıklarını ölçen ve bu sayede yüksek çözünürlüklü üç boyutlu (3B) modeller oluşturan bir uzaktan algılama yöntemidir. LiDAR teknolojisi, hem hava hem de yersel platformlarda kullanılabilir ve geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Hava LiDAR sistemleri, geniş alanların topoğrafik haritalarının çıkarılmasında ve kentsel yol ağlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zeybek, 2022). Bu sistemler, yüksek doğruluk ve çözünürlükte veri sağlayarak, mühendislik projeleri, kentsel planlama ve çevresel izleme gibi alanlarda önemli avantajlar sunar (Cheng vd., 2014; Ulukok & Ulvi, 2023).

Yersel lazer tarayıcılar ise, yapıların geometrik verilerini toplamak için kullanılan yüksek hassasiyetli cihazlardır. Bu cihazlar, lazer ışınları kullanarak yapıların yüzeylerini tarar ve milyonlarca nokta verisi elde eder. Bu veriler, nokta bulutu olarak adlandırılan 3B veri setlerini oluşturur. Nokta bulutları, yapıların

detaylı ve hassas modellerinin oluşturulmasında kullanılır. Yersel lazer tarayıcılar, tarihi yapıların belgelenmesi ve korunmasında büyük avantajlar sunar. Kabadayı (2023), tarihi köprülerin cephe verilerinin 3B ortamda belgelenmesi için yersel lazer tarama teknolojisinin kapasitesini değerlendirmiştir. Çalışmada, FARO lazer tarayıcı sistemi kullanılarak, tarihi köprüünün geometri verileri kaydedilmiş ve renk bilgileri entegre edilerek fotogerçekçi 3B modeller oluşturulmuştur. Benzer şekilde, Karataş ve Dal (2023), Bursa Ziraat Mektebi idare binasının mimari özelliklerini yersel lazer tarama yöntemiyle belgeleyerek, lazer taramanın tarihi yapıların mimari özelliklerinin belgelenmesinde zaman ve emek tasarrufu sağladığını doğrulamıştır. Çalışmada, yersel lazer tarayıcı ile elde edilen veriler kullanılarak, yapının detaylı ve hassas modelleri oluşturulmuş ve bu modeller, restorasyon ve koruma çalışmalarında kullanılmıştır.

Ulvi ve Yiğit (2022), giyilebilir mobil lazer tarayıcıların kültürel mirasın korunmasında geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında doğruluk ve hassasiyet açısından üstün olduğunu göstermiştir. Çalışmalarında, giyilebilir mobil lazer tarayıcılar kullanılarak elde edilen verilerin, tarihi yapıların detaylı ve hassas modellerinin oluşturulmasında büyük avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, Yiğit vd. (2023), Wearable Mobile Laser Scanner (WMLS) kullanarak, mevcut altyapı hatlarının tespit edilmesi ve haritalanması üzerine yaptıkları çalışmada, bu teknolojinin veri toplama ve 3B model oluşturma süreçlerinde etkin bir yöntem olduğunu vurgulamıştır. Balci ve Ulvi (2024), Mersin İli Tarsus İlçesindeki Tarihi Nusret Mayın Gemisi örneğinde, yersel lazer tarama ve İHA fotogrametri nokta bulutu verilerinin karşılaştırılması ve entegrasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, her iki yöntemin nokta bulutu çıktıları karşılaştırılmış ve kombinasyonlarının, istenen eserin tam kapsamını sağladığı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, Konya ili Selçuklu ilçesi Yükselen Mahallesi'nde yer alan tescilli bir tarihi çeşme, yersel lazer tarayıcı kullanılarak üç boyutlu (3B) olarak belgelenmiştir. Çeşmenin mevcut durumuna ait yüksek çözünürlüklü geometrik veriler toplanmış, bu veriler aracılığıyla detaylı bir 3B model oluşturulmuştur. Bu model, yapının özgün mimari öğelerinin korunarak restorasyon ve gelecek nesillere aktarımı sürecinde kullanılmak üzere dijital bir arşiv niteliği taşımaktadır.

Literatüre katkı açısından, bu çalışma Türkiye'de nispeten küçük ölçekli, tekil tarihi yapılara yönelik YLT uygulamalarının detaylı bir örneğini sunmakta ve bu tür yapıların belgelenmesinde lazer tarayıcı teknolojisinin sağladığı hassasiyet ve bütüncül veri kapasitesini somut bir örnek üzerinden ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu çalışma, tarihi çeşme gibi

detaylı yüzey formlarına sahip yapıların 3B belgelenmesinde lazer tarayıcı kullanımının pratik zorlukları ve avantajlarını değerlendiren sınırlı sayıdaki uygulamalı araştırmalara katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

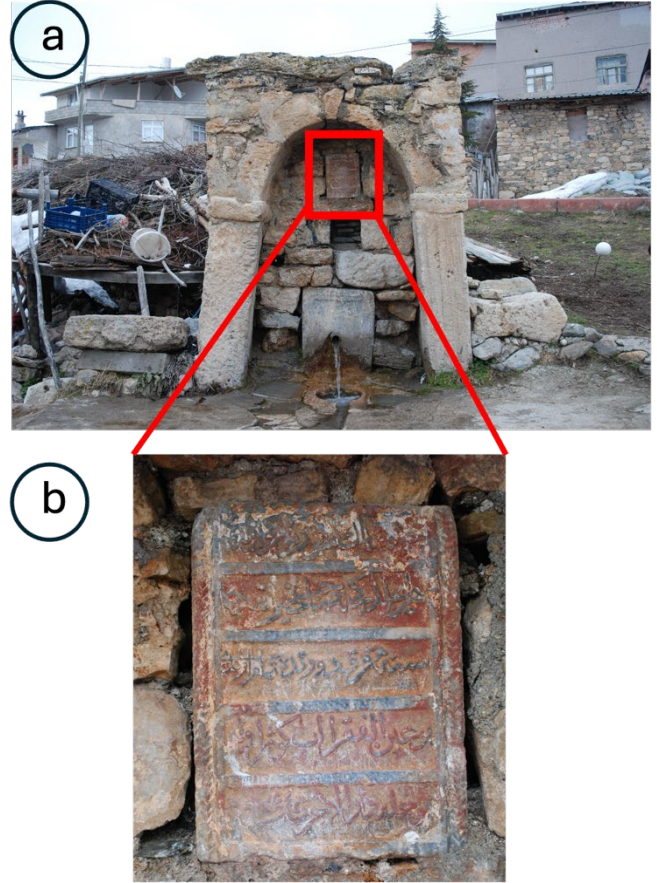
2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Konya ili Selçuklu ilçesi Yükselen Mahallesi'nde bulunan tarihi bir çeşmenin yersel lazer tarayıcı ile taranarak üç boyutlu modelinin oluşturulmasını amaçlamaktadır. Çalışma alanı, tarihi ve kültürel öneme sahip olan bu çeşmenin mevcut durumunun detaylı bir şekilde belgelenmesi ve korunması için seçilmiştir.

Konya, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan ve tarihi zenginlikleriyle bilinen bir şehirdir. Selçuklu ilçesi, adını Selçuklu İmparatorluğu'ndan almış olup, tarihi yapıları ve kültürel mirası ile dikkat çekmektedir. Yükselen Mahallesi ise, bu ilçenin önemli yerleşim alanlarından biridir ve çeşitli tarihi yapıları barındırmaktadır. Çalışma alanı olarak seçilen tarihi çeşme, bu mahallenin önemli kültürel varlıklarından biridir.

Çeşmenin tarihi ve mimari özellikleri, yersel lazer tarayıcı kullanılarak detaylı bir şekilde belgelenmiştir. Çeşme, geçmişte su kaynağı olarak kullanılmış olmasının yanı sıra, estetik ve sosyal bir buluşma noktası olarak da hizmet vermiştir. Bu nedenle, çeşmenin mevcut durumunun belgelenmesi ve korunması, kültürel mirasın sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. 3B modeli yapılan çeşme Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1b'de gösterilen kitabe çeşme nişinin üzerinde, aynalığın içerisine yerleştirilmiştir. Kitabe, 0.36x0.26 metre ölçülerinde dikdörtgen formda olup taş malzeme üzerine celi sülüs hatla işlenmiştir. Kitabe, beş satırdan oluşmakta ve her satır, 0.21 metre uzunluğunda ve 6 cm genişliğinde dikdörtgen formulu kartuşlar içinde yer almaktadır. Satırlar birbirinden 1 cm genişliğinde cetvellerle ayrılmıştır ve kitabenin iki yan kenarları balıksırtı motifleri ile sınırlandırılmıştır. Kitabe üzerinde yazan metin çeşmenin hayır için yapıldığını ve 1244 (Hicri) yılında inşa edildiğini anlatmaktadır. Çeşme miladi takvime göre 1828-1829 yılında inşa edilmiştir. Kitabe, hem çeşmenin inşa tarihini hem de hayırsever sahibini belirtmekte, aynı zamanda çeşmenin manevi değerini vurgulamaktadır. Kitabenin üzerindeki süslemeler ve yazı stili, dönemin sanat anlayışını yansıtmakta ve çeşmenin estetik değerini artırmaktadır.



Şekil 1. a) Tarihi çeşme, b) Çeşmenin duvarında bulunan kitabe.

2.2. Materyal

Bu çalışmada, çeşmenin taranması için FARO FocusS 350 yersel lazer tarayıcı kullanılmıştır. FARO FocusS 350, yüksek hassasiyetli ve hızlı veri toplama yeteneklerine sahip bir yersel lazer tarayıcıdır. Çalışmada kullanılan yersel lazer tarayıcı Şekil 2'de, tarayıcıya ait teknik özellikler ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. FARO Focus S 350 lazer tarayıcı.

Tablo 1. Kullanılan yersel lazer tarayıcının teknik özellikleri.

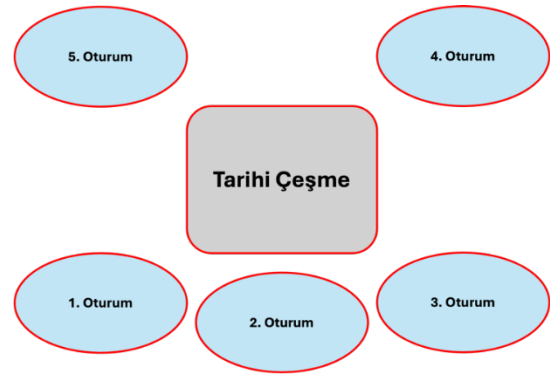
Özellik	Değer
Tarama Mesafesi	0.6 m - 350 m
Çözünürlük	1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/16, 1/20, 1/32
Kalite	2x, 3x, 4x, 6x
Ölçüm Hızı	976.000 nokta/saniye
İç Düzlük	±1 mm
Ağırlık	4.2 kg
Boyut	230x183x103 mm
Görüş Açısı	300°/360°
Çalışma Sıcaklığı	-20 °C - +55 °C
Toz ve Su Geçirmezlik Standardı	Var (IP54)
Çoklu sensör	Dâhili GPS, Pusula, Termometre, Barometre
Dâhili HDR Dijital Kamera	Var (165 MP)

2.3. Yöntem ve Uygulama

Yersel lazer tarama (YLT), mekânsal verilerin hızlı, temassız ve hassas bir şekilde toplanmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, lazer ışınlarının nesne yüzeyine gönderilmesi ve geri yansıyan sinyallerin analiz edilmesi prensibine dayanır. YLT, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapıların detaylı bir şekilde modellenmesi için kullanılmaktadır (Balci ve Ulvi, 2024). Lazer tarama işlemi arazi çalışması ve ofis çalışması olarak iki başlıkta gerçekleştirilmektedir.

Arazi işlemlerinde ilk önce çalışma yapılacak alanın belirlenmesi ve tarama planının yapılması gerekmektedir. Bu aşamada, tarama yapılacak alanın detaylı bir şekilde incelenmesi ve tarama noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Tarayıcının konumları ve tarama açılarının planlanması, elde edilecek verinin kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada toplam 5 farklı oturumda çeşmenin taraması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Tarama noktalarının seçiminde, çeşmenin mimari özellikleri, görünüş hattı, gölge alanların en aza indirilmesi ve örtüşen görüş alanlarının sağlanması gibi kriterler dikkate alınmıştır. Her bir tarama konumu, yapının farklı cephelerini doğrudan görebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Özellikle nişler, yazıtlar ve karmaşık süsleme öğeleri gibi detaylı yüzeylerin yüksek doğrulukla belgelenebilmesi için, bu öğelerin doğrudan görüldüğü açılardan tarama yapılması hedeflenmiştir. Beş oturumlu tarama planı, veri setlerinde boşluk oluşmasını önlemek, geometrik sürekliliği sağlamak ve daha sonra yapılacak veri birleştirme işlemini kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. Tarama açılarındaki bu çeşitlilik sayesinde, 3B modelin genel doğruluğu artırılmış, yüzey detaylarının daha eksiksiz yakalanması sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan FARO FocusS 350 tarayıcı, planlanan noktalara kurulmuş ve tarama işlemi başlatılmıştır. Saha çalışması sırasında

veri kalitesini etkileyebilecek bazı çevresel zorluklarla da karşılaşmıştır. Özellikle çeşmenin bulunduğu alanın dar ve yapılaşmış olması, bazı tarama açılarını sınırlamış ve gölgelenmelerin önüne geçmek adına ek tarama noktaları planlanmasını gerektirmiştir. Ayrıca, tarama sırasında güneş ışığı yönü ve yansıma etkileri göz önünde bulundurularak oturum zamanları dikkatle seçilmiştir. Havanın nispeten rüzgarlı olduğu anlarda, tarayıcının stabilitesi kontrol edilmiş ve gereksiz veri kaybı önlenmiştir. Tarama işlemi yapılırken cihazın dahili GPS, pusula, termometre ve barometre gibi sensörleri, çevresel verileri de kaydedilmektedir. YLT, aynı zamanda HDR dijital kameraya sahip olduğu için tarama işleminin ardından taranan bölgenin renkli görüntüsü de elde edilmiştir. Bu veri nokta bulutunun renklendirilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Çalışmanın ofis aşamasında ise, arazide toplanan tarama verileri FARO SCENE yazılımı kullanılarak işlenmektedir. Bu yazılımda tarama verilerinin birleştirilmiş ve 3B yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur.



Şekil 3. Yersel lazer tarayıcı konumları.

Yersel lazer tarama işlemi, yüksek hassasiyet ve hızlı veri toplama imkanı sunmaktadır. Bu yöntem, özellikle arkeolojik alanların belgelenmesi, tarihi eserlerin korunması ve inşaat projelerinin planlanması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. YLT, milimetre düzeyinde hassasiyetle veri toplama imkanı sunmakta ve geniş alanların hızlı bir şekilde taranmasını sağlamaktadır. Ayrıca karmaşık geometrilere sahip yapıların detaylı 3B modellerinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada ilk olarak çeşmenin etrafına homojen bir şekilde dağıtılmış 5 farklı lazer tarama oturumlarında veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmasında elde edilen lazer tarama verileri FARO Scene yazılımında işlendi ve nokta bulutundan nokta bulutuna (Cloud to Cloud) yöntemiyle birleştirildi. Tarihi çeşmeye ait nokta bulutu Şekil 4'te verilmiştir.



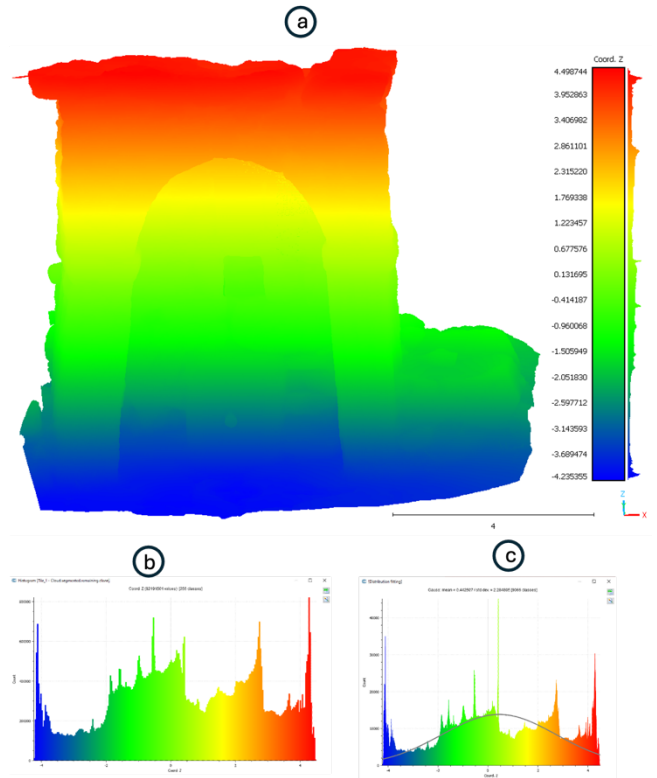
Şekil 4. Tarihi çeşmenin nokta bulutunun farklı açılardan görünümü.



Şekil 5. Tarihi çeşmenin farklı açılardan 3B model görünümü.



Şekil 6. Kitabenin 3B modeli.



Şekil 7. Tarihi çeşmenin 3B modelinin a) yükseklik bilgisi, b) yüksekliğe bağlı nokta dağılımları, c) Gauss eğrili yüksekliğe bağlı nokta dağılımları.

Lazer tarama nokta bulutundan elde edilen 3B modelden örnek görünümeler Şekil 5'te, kitabenin 3B modeli ise Şekil 6'da verilmiştir. Modelin Z eksenine göre yükseklik dağılımları Şekil 7'de gösterilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Konya ili Selçuklu ilçesi Yükselen Mahallesi'nde bulunan tarihi bir çeşmenin yersel lazer tarayıcı (YLT) kullanılarak üç boyutlu (3B) modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, yersel lazer tarayıcıların tarihi yapıların belgelenmesi ve korunmasında sağladığı avantajları açıkça ortaya koymaktadır.

YLT teknolojisinin sağladığı yüksek çözünürlüklü veriler, çeşmenin mevcut durumunun detaylı bir şekilde belgelenmesini sağlamıştır. Bu, restorasyon ve koruma çalışmalarında büyük bir avantaj sunmaktadır. Çeşmenin geometrik verilerinin milimetre düzeyinde hassasiyetle kaydedilmesi, restorasyon sürecinde orijinal yapıya sadık kalınarak çalışmaların yürütülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, dijital arşivlerin oluşturulması, gelecekte yapılacak araştırmalar ve koruma çalışmaları için önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, YLT'nin zaman ve emek tasarrufu sağlamasıdır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, YLT ile veri toplama süreci çok daha hızlı ve etkilidir. Bu, özellikle büyük ve karmaşık geometrilere sahip tarihi yapılar için büyük

bir avantaj sağlamaktadır. YLT'nin bir diğer önemli avantajı, elde edilen verilerin çok yönlü kullanılabilirliğidir. Çeşmenin 3B modeli, sadece restorasyon ve koruma çalışmalarında değil, aynı zamanda eğitim ve turizm gibi alanlarda da kullanılabilir. Dijital modeller, tarihi yapıların sanal ortamda incelenmesine olanak tanıyarak, geniş kitlelere ulaşmasını sağlar. Bu, kültürel mirasın tanıtılması ve korunması açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ancak, YLT teknolojisinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Bu sınırlamalardan en önemlisi, cihazların maliyeti ve veri işleme sürecinin karmaşıklığıdır. Ayrıca, dış mekanlarda yapılan taramalarda çevresel faktörler (örneğin, hava koşulları) veri kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle, YLT kullanımı sırasında dikkatli bir planlama ve uygun koşulların sağlanması önemlidir.

Sonuç olarak, bu çalışma, yersel lazer tarayıcıların tarihi yapıların belgelenmesi ve korunmasında sağladığı avantajları ve potansiyel kullanım alanlarını ortaya koymaktadır. YLT teknolojisi, yüksek doğruluk, hızlı veri toplama ve çok yönlü kullanım imkanı sunarak, kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Yazarların Katkısı

Çalışma tek yazarlıdır ve tüm katkı sorumlu yazara aittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışma da herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Alptekin, A., & Yakar, M. (2021). 3D model of Üçayak Ruins obtained from point clouds. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 37–40.
- Alptekin, A., Çelik, M. Ö., & Yakar, M. (2019). Anıtmezarın yersel lazer tarayıcı kullanarak 3B modellenmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 1(1), 1–4.
- Balcı, D., & Ulvi, A. (2024). Kültürel mirasların korunmasına yönelik LiDAR ve İHA fotogrametrisi yöntemlerinin birlikte kullanımı. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 6(1), 10–29.
- Bernat, M., Janowski, A., Rzepa, S., Sobieraj, A., & Szulwic, J. (2014). Studies on the use of terrestrial laser scanning in the maintenance of buildings belonging to the cultural heritage. In *14th*

Geoconference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, SGEM (Vol. 3, pp. 307–318). Albena, Bulgaria.

- Cheng, L., Wu, Y., Wang, Y., Zhong, L., Chen, Y., & Li, M. (2014). Havadaki LiDAR verilerini kullanarak büyük çok katmanlı değişim köprüsünün üç boyutlu yeniden inşası. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2), 691–708.
- Döş, M. E., & Yiğit, A. Y. (2022). Tarihi minberlerin fotogrametri yöntemi ile belgelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(2), 58–65.
- Döş, M. E., & Yiğit, A. Y. (2023). Küçük ölçekli tarihi eserlerin fotogrametri yöntemi ile 3B modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 20–28.
- Döş, M. E., Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Documenting historical monuments using smartphones: A case study of Fakih Dede Tomb, Konya. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 53–60.
- Kabadayı, A. (2023). Kültürel mirasın dijital arşivlenmesi: Emirci Sultan Türbesi ve Camii örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(2), 82–88.
- Kabadayı, A. (2023). Yersel lazer tarama yöntemi ile röleve ve restütasyon projelerinin hazırlanması; Akşehir Kale Kalıntısı örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(1), 17–25.
- Kabadayı, A. (2023). Yersel lazer tarayıcıların tarihi köprülerin modellenmesinde kullanımı. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 5(2), 68–75.
- Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2023). İHA fotogrametrisi kullanarak Yozgat Çilekçi Türbesi'nin 3 boyutlu nokta bulutu ve modelinin üretilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 29–35.
- Kabadayı, A., & Kaya, Y. (2024). Tarihi sütunların yersel fotogrametri yöntemiyle 3 boyutlu modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 48–53.
- Karataş, L., & Dal, M. (2023). Bir asırlık Bursa Tarihi Ziraat Mektebi İdare Binası'nın mimari özelliklerinin, yersel lazer tarama yöntemiyle belgelenmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 5(1), 26–37.
- Kaya, Y., Yiğit, A. Y., Ulvi, A., & Yakar, M. (2021). Arkeolojik alanların dokümantasyonunda fotogrametrik tekniklerinin doğruluklarının karşılaştırmalı analizi: Konya Yunuslar örneği. *Harita Dergisi*, 165, 57–72.
- Llabani, A., & Abazaj, F. (2024). 3D documentation of cultural heritage using terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Engineering Science*, 22(2), 267–271.
- Ulukok, A., & Ulvi, A. (2023). Yerel yönetimlerde kaçak yapı tespitinde İHA kullanımı: Keçiören Belediyesi örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 7–19.
- Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2022). Comparison of the Wearable Mobile Laser Scanner (WMLS) with other point cloud data collection methods in cultural heritage: A case study of Diokaisareia. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(4), 1–19.

Yılmaz, M., & Uysal, M. (2017). Comparing uniform and random data reduction methods for DTM accuracy. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(1), 9–16.

Yiğit, A. Y., Hamal, S. N. G., Yakar, M., & Ulvi, A. (2023). Investigation and implementation of new technology wearable mobile laser scanning (WMLS) in transition to an intelligent geospatial

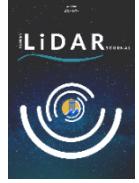
cadastral information system. *Sustainability*, 15(9), 7159.

Zeybek, M. (2022). Havasal LiDAR nokta bulutlarından kentsel yol ağlarının çıkarımı, Bergama test alanı. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(2), 53–59.



© Author(s) 2025.

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



Kültürel Miras Alanlarında YLT ve İHA Tabanlı 3B Belgelenme Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Değerlendirilmesi

Ceyda Ulvi ^{1*}, Aşlı Deniz Adıgüzel ²

¹ Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 33090, Mersin, Türkiye; (ceydakaragz66@gmail.com)

² Bitlis Eren Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 13000, Bitlis, Türkiye; (adeniz4250@gmail.com)



*Sorumlu Yazar:
ceydakaragz66@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Ulvi, C. & Adıgüzel, A. D. (2025). Kültürel Miras Alanlarında YLT ve İHA Tabanlı 3B Belgelenme Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 7(1), 15-23.

Geliş : 28.05.2025
Reviz : 10.06.2025
Kabul : 13.06.2025
Yayın : 30.06.2025

Özet

Bu çalışmada, Mersin ili Mezitli ilçesinde yer alan Soli Pompeiopolis kazı alanının üç boyutlu belgelenmesine yönelik olarak Yersel Lazer Tarama (YLT) ve İnsansız Hava Aracı (İHA) fotogrametrisi yöntemleri karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Her iki yöntemle aynı çalışma alanı üzerinde veri toplanmış, elde edilen nokta bulutları konumsal doğruluk ve yüzey uyumu açısından analiz edilmiştir. Sahada toplam 16 Yer Kontrol Noktası (YKN) yerleştirilmiş; bunlardan 9'u denetleme noktası olarak değerlendirilmiştir. GNSS ile ölçülen bu noktalar aracılığıyla yapılan hata analizinde YLT verisinde RMSE 2.6 cm, İHA verisinde ise 6.2 cm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, iki yöntemle üretilen nokta bulutları CloudCompare yazılımında C2C (Cloud-to-Cloud) analizine tabi tutulmuş, YLT referanslı analizde maksimum fark 23.19 cm'ye ulaşırken İHA referanslı analizde bu değer 5.53 cm olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, YLT yönteminin detaylı modelleme ve yüksek doğruluk sağladığını; İHA fotogrametrisinin ise operasyonel hız ve geniş alan kapsama açısından avantaj sunduğunu göstermektedir. Her iki yöntemin birlikte kullanımı, kültürel miras alanlarında daha dengeli ve bütüncül bir belgelenme süreci için uygun bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yersel lazer tarama, İHA fotogrametrisi, nokta bulutu, kültürel miras, C2C analizi, 3B belgeleme.

Comparative Evaluation of YLT and UAV Based 3D Documentation Methods in Cultural Heritage Areas

*Corresponding Author:
ceydakaragz66@gmail.com

Research Article

Citation: Ulvi, C. & Adıgüzel, A. D. (2025). Comparative Evaluation of YLT and UAV Based 3D Documentation Methods in Cultural Heritage Areas. *Turkish Journal of LiDAR*, 7(1), 15-23 (in Turkish).

Received : 28.05.2025
Revised : 10.06.2025
Accepted : 13.06.2025
Published : 30.06.2025

Abstract

In this study, a comparative evaluation was conducted using Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry methods for the three-dimensional documentation of the Soli Pompeiopolis archaeological site, located in Mezitli district of Mersin, Türkiye. Spatial data were collected over the same area using both techniques, and the resulting point clouds were analyzed in terms of positional accuracy and surface consistency. A total of 16 Ground Control Points (GCPs) were placed in the field, 9 of which were used as independent checkpoints. Based on GNSS-derived reference coordinates, root mean square error (RMSE) values were calculated as 2.6 cm for TLS data and 6.2 cm for UAV data. Furthermore, point clouds were subjected to a Cloud-to-Cloud (C2C) comparison in CloudCompare software. The maximum surface deviation reached 23.19 cm when TLS data was used as the reference, while it was 5.53 cm when UAV data was taken as the reference. The results indicate that TLS provides higher geometric accuracy and detail, while UAV photogrammetry offers rapid data acquisition and broader coverage with acceptable accuracy. The combined use of both methods is recommended for achieving more balanced and comprehensive documentation of cultural heritage sites.

Keywords: Terrestrial laser scanning, UAV photogrammetry, point cloud, cultural heritage, C2C analysis, 3D documentation,

1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca toplumlar, yaşadıkları coğrafyaya iz bırakma arzusu taşıyarak çeşitli mimari ve sanatsal eserler üretmiş; bu eserler de geçmişin yaşam biçimleri, inanç sistemleri ve sosyal yapıları hakkında günümüz insanına önemli ipuçları sunmuştur. Zaman içerisinde bu eserler yalnızca birer yapı olmaktan çıkmış, ait oldukları medeniyetlerin kültürel temsili haline gelmiş ve korunmaları gereken ortak insanlık mirası olarak kabul edilmiştir. Antik kentler, anıt yapılar, ibadethaneler, nekropol alanları ve daha niceleri hem tarihsel hem de akademik değer taşıyan karmaşık yapılar olarak günümüzde çeşitli belgeleme çalışmalarıyla kayıt altına alınmaktadır.

Kültürel miras alanlarının belgelenmesi fikri, modern bir düşünce gibi görünse de temelleri oldukça eskiye dayanmaktadır (Ruther vd., 2009). İlk dönemlerde yapılan belgelenmeler, alanın krokisinin çıkarılması, önemli yapıların çizilmesi ve yazılı tanımlarla sınırlı kalmıştır. Arkeologlar ve araştırmacılar uzun yıllar boyunca basit ölçüm araçlarıyla kazı alanlarının planlarını oluşturmuş, yapıları elle çizilen eskizlerle betimlemiş ve fotoğrafla desteklemeye çalışmıştır. Bu yöntemler, dönemi açısından önemli katkılar sunsa da ölçümsel doğruluk, detay seviyesi ve üç boyutlu perspektif sunma açısından yetersiz kalmıştır. Özellikle karmaşık yapıya sahip arkeolojik alanlarda, bu tür yöntemlerin sınırlılıkları belgelenen mirasın gerçekliğini yansıtmakta önemli eksiklikler doğurmuştur.

Zamanla teknolojinin gelişimiyle birlikte, dijital ölçüm teknikleri kültürel miras alanlarına da entegre edilmeye başlanmıştır (Kabadayı, 2023a; Zeybek, 2021; Fidan & Fidan, 2021). Total station cihazları, GPS tabanlı ölçüm sistemleri ve daha sonra gelişen lazer tarayıcılar, mekânsal verinin hassas biçimde toplanmasına olanak sağlamıştır (Kabadayı & Erdoğan, 2022). Yersel Lazer Tarama (YLT) sistemleri, yüzeyin her noktasını üç boyutlu koordinatlarla ölçebilen yapısıyla bu dönüşümde öncü bir rol üstlenmiştir (Kabadayı, 2023b; Suchocki vd., 2020)). YLT ile elde edilen yoğun nokta bulutları sayesinde, yapıların geometrik karmaşıklıkları detaylı biçimde modellenebilmekte, yapının dijital ikizi üretilmekte ve hasar analizlerinden restorasyon planlamasına kadar çok sayıda uygulama mümkün hale gelmektedir (Yiğit & Uysal, 2023).

Diğer yandan, son on yıl içinde İnsansız Hava Araçları (İHA) teknolojisinin sivil kullanıma açılması, özellikle geniş alanların belgelenmesinde yeni bir dönem başlatmıştır (Ulvi & Yiğit, 2019). Ayrıca çeşitli uygulamalarda daha iyi 3B haritalama için iki tür veri setinin geometrik birleştirilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Wu & Tang, 2015). Chiabrando vd. (2016), peyzaj ve mimari varlıklarda uygulanan TLS ve

İHA kombinasyonunun yararlılığını göstermiştir. Wu ve Tang (2015), iki tür veri kümesinin ilgili avantaj ve dezavantajlarına dayanarak, TLS ve İHA fotogrametrisinden elde edilen verilerin birleştirilmesinin, tek bir veri türü kullanılarak sağlanandan çeşitli uygulamalarda daha fazla potansiyel sağladığını öne sürmektedir.

İHA tabanlı fotogrametri, çok sayıda üstten görüntü alarak yüzeyin üç boyutlu modelini çıkarabilmekte; böylece hem geniş alanların belgelenmesi hem de topografyanın modellenmesi açısından etkin bir çözüm sunmaktadır (Akar, 2017). Bu yöntem, operasyon süresi, maliyet etkinliği ve erişilebilirlik gibi yönleriyle birçok kültürel miras sahasında tercih edilmektedir.

Ancak her iki yöntem – YLT ve İHA fotogrametrisi – birbirine karşı değil, aslında birbirini tamamlayan teknolojiler olarak değerlendirilmektedir. YLT detay düzeyinde hassasiyet sağlarken; İHA fotogrametrisi geniş alan kapsama ve operasyonel hız avantajı sunmaktadır (Yiğit & Ulvi, 2020). Her iki yöntemin de arkeolojik belgelenmede hangi koşullarda, hangi yapılar için, ne ölçüde uygun olduğu ise sahaya özgü uygulamalarla değerlendirilebilmektedir.

Bu bağlamda, Soli Pompeiopolis Antik Kenti, farklı dönemlere ait yapı kalıntılarını barındırması, karmaşık topografik yapısı ve kıyı yerleşimi özelliğiyle hem hassasiyet gerektiren dar alanların hem de geniş kapsamlı yüzeylerin belgelenmesine olan ihtiyacı bir arada sunmaktadır. Bu durum, belgeleme teknolojilerinin performanslarını karşılaştırmak açısından eşsiz bir örneklem alanı meydana getirmektedir. Antik kentin mevcut fiziksel durumu, zamanla tahribata uğrayan mimari öğeleri ve hâlen yürütülmekte olan kazı faaliyetleri, mekânsal verilerin düzenli, doğru ve karşılaştırılabilir biçimde üretilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışma, söz konusu sahada hem YLT hem de İHA fotogrametrisi yöntemleriyle veri toplanarak, iki yöntemin kazı alanı belgelenmesine uygunluklarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu çerçevede, her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları benzer koşullar altında işlenmiş ve CloudCompare yazılımı aracılığıyla sayısal analizlere (özellikle C2C – Cloud-to-Cloud metrikleri) tabi tutulmuştur. Böylece, yöntemler arasındaki farklılıklar yalnızca görsel veya niteliksel değil, aynı zamanda nicel ölçütler üzerinden de ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın özgün katkısı, iki farklı uzaktan algılama yönteminin aynı arkeolojik alan üzerinde eş zamanlı uygulanması ve bu verilerin doğrudan karşılaştırmalı analizine dayanmasıdır. Literatürde sıklıkla her yönteme ayrı ayrı odaklanan çalışmalar bulunmakla birlikte, aynı mekânsal referans sistemiyle ve aynı veri seti mantığıyla yapılan çift yönlü

değerlendirmeler oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, hem yöntemsel hem de uygulamalı bağlamda bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Bu doğrultuda, çalışmanın temel araştırma sorusu şudur: “Kazı alanlarının belgelenmesinde, YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri doğruluk, kapsam, pratiklik ve detay seviyesi açısından ne ölçüde farklılık göstermektedir ve bu farklılıklar hangi durumlarda belirleyici hale gelmektedir?”. Elde edilen bulgular, yalnızca Soli Pompeiopolis özelinde değil; benzer morfolojik ve arkeolojik özelliklere sahip kazı alanlarının belgelenmesinde de yöntem seçiminde yol gösterici olacak bilimsel çıkarımlar sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada uygulama alanı olarak, Mersin ili Mezitli ilçesi sınırlarında yer alan Soli Pompeiopolis Antik Kenti seçilmiştir. Akdeniz kıyısında yer alan bu arkeolojik alan, tarihi M.Ö. 7. yüzyıla kadar uzanan ve Helenistik, Roma ile Bizans dönemlerine ait çok katmanlı kalıntılar barındıran önemli bir kültürel miras sahasıdır. Antik kent, özellikle Roma dönemine ait sütunlu caddeleri, hamam yapıları, mozaikleri ve mimari parçaları ile dikkat çekmektedir. Yapılan arkeolojik kazılar sayesinde, geçmiş dönemlere ait yapıların mekânsal organizasyonu, kentsel planlaması ve günlük yaşama dair ipuçları gün yüzüne çıkarılmıştır.

Soli Pompeiopolis kazı alanı, hem yerleşim dokusunun çeşitliliği hem de yüzey topografyasının karmaşıklığı açısından kültürel miras belgelenmesi için ideal bir örnek sunmaktadır. Antik kentin kıyı yerleşimi karakteri, günümüzde kıyı erozyonu, yapılaşma baskısı ve çevresel etkiler nedeniyle tehdit altında olup, alanın mevcut durumunun hassas biçimde belgelenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, farklı teknolojilerle gerçekleştirilecek belgelenme çalışmaları yalnızca bilimsel amaçlarla değil, aynı zamanda alanın korunması ve sürdürülebilir yönetimi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Çalışma alanının karmaşık mimari yapısı, açık ve yarı kapalı alanların bir arada bulunması, farklı kotlarda yapı elemanlarının yer alması gibi özellikler, hem YLT hem de İHA fotogrametrisi yöntemlerinin uygulanabilirliğini sınamak açısından uygun bir test ortamı sağlamaktadır. Bu bağlamda, Soli Pompeiopolis yalnızca arkeolojik niteliğiyle değil, aynı zamanda mekânsal veri üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilebileceği uygulamalı bir model alan niteliği taşımaktadır.

2.2. Veri Toplama Süreci

Bu çalışmada, kazı alanının belgelenmesi amacıyla hem Yersel Lazer Tarama (YLT) hem de İHA fotogrametrisi yöntemleri kullanılmıştır. Veri toplama süreci, her iki yöntemin karakteristik avantajlarını ve sınırlılıklarını dikkate alacak şekilde planlanmış ve uygulama sahasında aynı referans alanı kapsamında gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Yersel Lazer Tarama (YLT)

Yersel lazer tarama işlemleri için FARO Focus3D X330 model lazer tarayıcı kullanılmıştır. Bu cihaz, yüksek çözünürlükte ve uzun menzilde nokta bulutu elde etme yeteneği sayesinde kültürel miras alanlarının detaylı belgelenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Tarama işlemleri sırasında cihaz, farklı açılardan ve yüksekliklerden konumlandırılarak, yapılar arasındaki ölü alanların (gölge bölgelerin) en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Her bir tarama oturumu, yaklaşık 6 dakika sürmüş ve toplamda 14 tarama istasyonu kullanılarak veri elde edilmiştir.

Tarama istasyonları, yapılar arası örtüşmeyi sağlayacak biçimde yerleştirilmiş ve tüm veri seti daha sonra ortak koordinat sistemine getirilmek üzere hizalanmıştır. Tarama süreci boyunca yüksek yansıma özelliğine sahip hedef küreler kullanılarak oturumlar arası geometri bütünlüğü sağlanmıştır. Tarama sonuçları renkli (RGB) nokta bulutu olarak dışa aktarılmıştır.

Kullanılan YLT cihazına ait temel teknik bilgiler Tablo 1’de sunulmuş, cihaza ilişkin görsel ise Şekil 1 olarak verilmiştir.



Şekil 1. FARO Focus3D X330 yersel lazer tarayıcı.

Tablo 1. FARO Focus3D X330” teknik özellikleri.

Öznitelik	Değer
Lazer sınıfı	1
Ölçüm hızı	Saniyede 976,000 noktaya kadar
Mesafe	0.6-330m
Mesafe hatası	± 2mm
Multi-Sensör	GPS, Pusula Yükseklik Sensörü
Çift Eksenli Kompensatör	Var
Entegre renkli kamera	70 mio. piksele kadar
Boyut	240 x 200 x 100mm
Ağırlık	5,2 kg
Tarayıcı kumanda	Dokunmatik ekran

2.2.2. İHA Fotogrametrisi

Kazı alanının havadan belgelenmesi amacıyla, ticari sınıf hafif İHA sistemlerinden Anafi Parrot marka drone kullanılmıştır. Bu İHA, sabit odaklı kamera sistemi, yüksek çözünürlükte görüntü alma kapasitesi ve kullanıcı dostu kontrol ara yüzü sayesinde düşük irtifa fotogrametri uygulamaları için uygun bir platformdur. Uçuş planlaması, alanın genişliğine ve yapısal öğelerin dağılımına göre optimize edilmiş ve görüntülerin yüksek örtüşme oranı (%80 boyuna, %70 enine) sağlanacak şekilde düzenlenmiştir.

İHA uçuşları manuel ve yarı otonom kontrollü modda gerçekleştirilmiş, toplam 115 adet eğik ve düşey görüntü elde edilmiştir. Görüntüler .JPEG formatında, metadata bilgileriyle birlikte saklanmış ve daha sonra fotogrametrik iş akışta kullanılmak üzere değerlendirilmiştir. Yer kontrolü sağlamak amacıyla sahaya görsel olarak seçilebilir yer kontrol noktaları (YKN) yerleştirilmiş ve bu noktaların koordinatları Topcon Hiper SR (Konum belirleme hassasiyeti: RTK (L1 + L2) H: 10 mm + 1.0 ppm V: 15 mm + 1.0 ppm / Hızlı Statik (L1 + L2) H: 3 mm + 0.5 ppm V: 5 mm + 0.5 ppm) GNSS alıcısı ile ± 2 cm hassasiyetle ölçülmüştür. İHA platformuna ait temel teknik bilgiler Tablo 2’de, uçuş sırasında kullanılan İHA’nın görseli ise Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Anafi Parrot İHA.

Tablo 2. Anafi Parrot” teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Ağırlık	320 Gram
Maks. Hız (Tırmanış/İniş)	55 km/sa
Kamera & Video	21 MP & 4K
Maks. İrtifa	4500m
Uçuş Süresi	Yaklaşık 25 Dk
Pil Kapasitesi	2700 mAh
Navigasyon	GPS/GLONASS

2.3. Veri İşleme ve Nokta Bulutu Üretimi

YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleriyle elde edilen veriler, nokta bulutu üretimi ve karşılaştırmalı analiz sürecine dâhil edilmeden önce belirli işlem adımlarından geçirilmiştir. Her iki yöntemle oluşturulan veri setleri ayrı ayrı işlenmiş, ardından ortak koordinat sistemine getirilerek analiz edilebilir

hale getirilmiştir. Tüm veri işleme süreçleri, ilgili yazılımların standart iş akışları takip edilerek yürütülmüştür.

FARO Focus3D X330 cihazı ile elde edilen tarama oturumlarına ait veriler, FARO SCENE yazılımı kullanılarak işlenmiştir. İlk aşamada, her bir tarama istasyonu ayrı ayrı hizalanmış; daha sonra referans hedefler (saha içine yerleştirilen küresel reflektörler) yardımıyla tüm oturumlar tek bir birleşik veri setine dönüştürülmüştür. Oturumlar arası hizalama işlemi, otomatik hedef tanıma ve manuel düzeltme kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Hizalama sonrası, veri seti üzerinde yoğunlaştırılmış bir gürültü temizliği (noise filtering) süreci uygulanmıştır. Bu süreçte, tarayıcı menzili dışındaki veriler, yüzey dışında kalan serbest parçacıklar ve hatalı yansımalar temizlenmiştir. Ayrıca, gereksiz yoğunlukta veri içeren bölgeler yeniden örneklenerek daha homojen bir dağılım elde edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek çözünürlüklü, renkli ve eşlenmiş bir 3B nokta bulutu üretilmiştir.

Anafi Parrot İHA ile elde edilen görüntüler, Agisoft Metashape Professional yazılımında fotogrametrik işleme tabi tutulmuştur. İşlem süreci; görüntülerin hizalanması (image alignment), yoğun nokta bulutu üretimi (dense point cloud), yüzey modelleme (mesh generation) ve ortomozaik üretimi adımlarını içermektedir. Görüntü hizalaması, görüntüler arasındaki ortak nokta eşleşmelerine (tie points) dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve her bir görüntünün konumu optimize edilmiştir.

YKN fotogrametrik işleme entegre edilerek, modelin mutlak konum doğruluğu artırılmıştır. Ardından, oluşturulan yoğun nokta bulutu geometrik filtrelemeye tabi tutulmuş; çakışan, bulanık veya kenar bölgelerdeki hatalı noktalar elenmiştir. Böylece, kazı alanını kapsayan detaylı bir üstten görünüm tabanlı 3B veri seti oluşturulmuştur.

Her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları, karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi için .LAS formatında dışa aktarılmış ve ortak bir koordinat sistemine (UTM 36N, WGS84) dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sayesinde veri setleri doğrudan üst üste bindirilebilir hale gelmiş ve eş zamanlı analiz için uygun bir yapı elde edilmiştir.

Veri işleme süreci sonunda, her iki yöntemle üretilen nokta bulutları karşılaştırmalı analiz için hazır hale getirilmiş ve CloudCompare yazılımına aktarılmıştır.

2.4. Karşılaştırmalı Analiz

Kazı alanının belgelenmesine yönelik olarak kullanılan YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemlerinin doğruluk ve uyum düzeylerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla iki aşamalı analiz süreci yürütülmüştür. Bu

süreçte hem yer kontrol/denetleme noktaları üzerinden konumsal hata analizi gerçekleştirilmiş hem de elde edilen nokta bulutları, C2C (Cloud-to-Cloud) yöntemi ile 3B olarak karşılaştırılmıştır.

2.4.1. Konumsal Doğruluk Analizi (YKN ve GNSS Karşılaştırması)

Çalışma alanında toplam 16 adet YKN oluşturulmuştur. Bu noktalar, hem YLT hem de İHA fotogrametrisi süreçlerinde kullanılmak üzere farklı alanlara dengeli şekilde dağıtılmıştır. Bu noktalardan 7 tanesi model oluşturma aşamasında dengeleme (ağ ayarı) için kontrol noktası olarak, geri kalan 9 tanesi ise modelin doğruluk değerlendirmesi amacıyla bağımsız denetleme noktası olarak kullanılmıştır.

Tüm YKN koordinatları, RTK destekli GNSS alıcısı ile ± 2 cm yatay ve düşey hassasiyetle ölçülmüştür. GNSS ile ölçülen koordinatlar, hem YLT nokta bulutları hem de İHA ile oluşturulan ortofoto ve 3B modellerde eşlenen konumlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, her iki yöntem için ayrı olmak üzere, denetleme noktalarındaki farklar Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error/RMSE), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error/MAE) ve maksimum hata cinsinden hesaplanmıştır.

Bu analiz, YLT ve İHA fotogrametri yöntemlerinin mutlak konum doğruluğu bakımından ne ölçüde hassas sonuçlar verdiğini ortaya koymakta ve yöntemler arasında konum tabanlı bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır.

2.4.2. Nokta Bulutu Uyumu: C2C (Cloud-to-Cloud) Analizi

İkinci karşılaştırmalı analiz, iki farklı yöntemle elde edilen nokta bulutlarının üç boyutlu uzayda birbirine olan geometrik uyumunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için CloudCompare açık kaynaklı yazılımı kullanılmış ve yöntem olarak C2C (Cloud-to-Cloud) mesafe ölçümü tercih edilmiştir.

C2C analizinde, referans veri seti olarak YLT nokta bulutu, karşılaştırma veri seti olarak ise İHA fotogrametrisiyle üretilen nokta bulutu tanımlanmıştır. Her bir nokta, karşı bulut üzerinde en yakın komşusuyla eşleştirilmiş ve aralarındaki öklidyen mesafe hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen mesafeler, renk skalası ile görselleştirilmiş ve alanın genelinde farklılıkların dağılımı analiz edilmiştir.

C2C analizi sonucunda, minimum-maksimum sapma değerleri ile birlikte ortalama fark ve standart sapma gibi istatistiksel parametreler hesaplanarak yöntemler arası farklar sayısal olarak ortaya konmuştur. Özellikle karmaşık geometriye sahip

bölgelerde İHA fotogrametrisinin yüzey sapmaları daha yüksek çıkarken, geniş ve açık alanlarda daha homojen uyum gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu iki aşamalı analiz, hem konumsal doğruluk hem de yüzey uyumu açısından yöntemlerin performansını bütüncül biçimde ortaya koymakta ve kazı alanı gibi hassas bölgelerde hangi yöntemin hangi bağlamda avantaj sağladığını teknik olarak değerlendirme olanağı sunmaktadır.

3. Bulgular

Bu çalışmada, Soli Pompeiopolis kazı alanının belgelenmesine yönelik olarak YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri kullanılmış; her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları nicel ve nitel açıdan karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ve Şekil 4, sırasıyla YLT ve İHA fotogrametrisi kullanılarak oluşturulan nokta bulutlarını göstermektedir.

Saha uygulamaları sırasında YLT yöntemiyle toplam 14 tarama oturumu gerçekleştirilmiş ve her bir tarama yaklaşık 6 dakika sürmüştür. Taramalar sırasında tripod üzerinde sabitlenen cihaz farklı açılardan yerleştirilerek yapılar arasındaki ölü alanların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu sürecin sonunda, yaklaşık 46 milyon noktadan oluşan yüksek yoğunluklu bir 3B nokta bulutu elde edilmiştir. Verilerin SCENE yazılımında hizalanması, gürültü temizliği ve dışa aktarımı ile birlikte toplam işlem süresi yaklaşık 4.5 saat olarak gerçekleşmiştir.

Öte yandan, İHA fotogrametrisi kapsamında Anafi Parrot marka drone ile toplam 115 görüntü elde edilmiştir. Uçuşlar manuel modda gerçekleştirilmiş ve toplam uçuş süresi yaklaşık 18 dakika sürmüştür. Görüntüler Agisoft Metashape yazılımında işlenmiş ve yaklaşık 18 milyon noktadan oluşan yoğun nokta bulutu elde edilmiştir. Fotogrametrik işlem (görüntü hizalama, nokta bulutu üretimi ve temizliği) süreci yaklaşık 2.5 saat sürmüştür.

Tablo 3'te, her iki yöntemin uygulama süreci, veri büyüklüğü ve işlem sürelerine ilişkin özet karşılaştırmalar sunulmuştur.

Tablo 3. YLT ve İHA fotogrametrisi genel sonuçlar

Özellik	YLT (Yersel Lazer Tarama)	İHA Fotogrametrisi
Tarama / Görüntü Sayısı	14 tarama oturumu	115 görüntü
Uygulama Süresi (saha)	≈ 84 dakika (toplam)	≈ 18 dakika (uçuş)
Nokta Sayısı	≈ 46 milyon	≈ 18 milyon
Ortalama Nokta Yoğunluğu (yaklaşık)	2.4 milyon nokta/m ²	900 bin nokta/m ²
İşleme Süresi (masaüstü)	≈ 4.5 saat	≈ 2.5 saat
Veri Boyutu (.LAS)	3.7 GB	1.8 GB

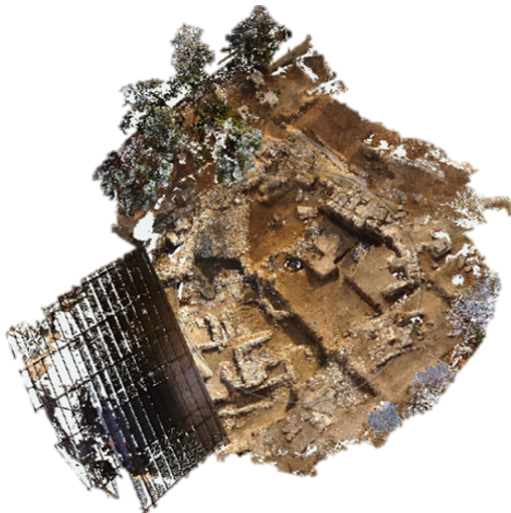
Her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları incelendiğinde, YLT yöntemi daha yoğun ve detaylı veri üretimi sağlamış; özellikle yapı köşe noktaları, duvar kesitleri ve düşey geometrilere yüksek doğruluk elde edilmiştir. Ancak cihazın sabitlenme gerekliliği, dar alanlarda pozisyon alma zorluğu ve zaman maliyeti bu yöntemin sınırlayıcı yönleri olarak öne çıkmıştır.

İHA yöntemi ise geniş alan kapsama, operasyonel hız ve maliyet etkinliği açısından avantaj sunmuştur. Açık alanlarda ve yatay yüzeylerde detaylı modeller üretilebilmiş; ancak yapılar arası boşluklar, dikey yüzeyler ve üst örtü altındaki alanlarda veri kayıpları gözlenmiştir. Ayrıca, fotogrametrik modelleme güneş açısı, rüzgâr, görüntü bulanıklığı gibi dışsal faktörlerden daha fazla etkilenmiştir.

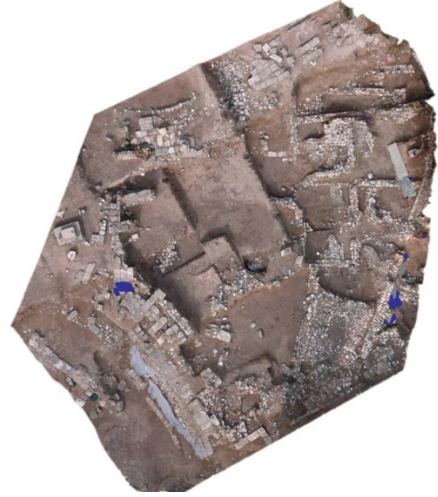
Bu karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda elde edilen genel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- YLT yöntemi, yüksek detay çözünürlüğü ve konum doğruluğu sağlamış ancak saha uygulaması açısından daha fazla zaman ve efor gerektirmiştir.
- İHA yöntemi daha hızlı veri üretimi sağlamış; ancak model kalitesi, özellikle karmaşık geometri ve düşey elemanlı bölgelerde YLT'ye göre daha düşük düzeyde kalmıştır.
- Nokta yoğunluğu bakımından YLT, İHA'ya kıyasla yaklaşık 2,5 kat daha fazla veri üretmiştir.
- İki yöntem birlikte değerlendirildiğinde, birbirini tamamlayıcı bir yapı oluşturduğu ve hibrit kullanımın kültürel miras belgelenmesinde yüksek potansiyel taşıdığı görülmüştür.

Aşağıdaki bölümlerde, bu genel bulgular doğrultusunda yapılan konumsal doğruluk ve C2C temelli 3B uyum analizine ilişkin ayrıntılı sayısal değerlendirmeler sunulacaktır.



Şekil 3. YLT verileri kullanılarak Scene yazılımında elde edilen nokta bulutu.



Şekil 4. İHA görüntüleri kullanılarak Agisoft Metashape yazılımında elde edilen nokta bulutu.

3.1. Konumsal Doğruluk Analizi

Kazı alanında uygulanan her iki yöntemin konumsal doğruluğunu belirlemek amacıyla, toplam 16 adet Yer Kontrol Noktası (YKN) sahaya yerleştirilmiş ve bu noktaların koordinatları GNSS (RTK destekli) sistem kullanılarak ± 2 cm yatay ve düşey hassasiyetle ölçülmüştür. Bu 16 noktadan 7 tanesi model üretiminde dengeleme (ağ ayarı) için kontrol noktası olarak, 9 tanesi ise dış doğrulama amacıyla denetleme noktası olarak değerlendirilmiştir.

Üretilen modeller üzerinde, denetleme noktalarının konumları belirlenmiş ve bu koordinatlar ile GNSS ölçümleri karşılaştırılarak her iki yöntem için konumsal hata değerleri hesaplanmıştır. Değerlendirme metriği olarak MAE, RMSE ve maksimum hata değeri dikkate alınmıştır.

Her iki yönteme ait denetleme noktası doğruluk analizine ilişkin özet Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. YLT ve İHA fotogrametrisi için konum hataları.

Yöntem	MAE (cm)	RMSE (cm)	Maks. Hata (cm)
YLT	1.9	2.6	4.1
İHA	4.7	6.2	10.5
Fotogrametrisi			

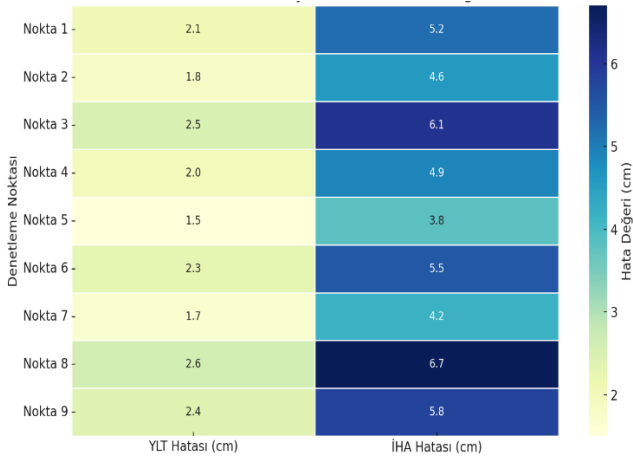
Analiz sonuçları incelendiğinde:

- YLT yöntemi, konumsal doğruluk açısından daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Ortalama sapma 2 cm'nin altında kalmış ve maksimum hata değeri 5 cm'yi geçmemiştir.
- İHA fotogrametrisi, YLT'ye kıyasla daha yüksek hata değerlerine sahiptir. Bu durum, görüntülerin düşey yönlü perspektif sınırlamaları, yer kontrol noktalarının belirginlik düzeyi ve model optimizasyonu gibi etkenlerden kaynaklanmış olabilir.

- İHA yöntemi ile elde edilen modeldeki doğruluk düzeyi, özellikle genel alan haritalama gibi uygulamalar için yeterli olsa da hassas mimari detay modellemelerinde sınırlayıcı olabilmektedir.

Bu sonuçlar, YLT yönteminin detay geometriler ve hassas ölçüm gerektiren kültürel miras belgelenmelerinde üstünlük sağladığını; İHA yönteminin ise geniş alanların hızlı belgelenmesinde etkin ancak sınırlı doğruluk sunduğunu ortaya koymaktadır.

Konumsal doğruluk analizine ilişkin detaylı bulgular Şekil 4'de sunulmaktadır. Bu ısı haritası, her bir denetleme noktasında YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri ile elde edilen konumsal hata değerlerini görselleştirmektedir. Görselde de açıkça görüldüğü üzere, tüm denetleme noktalarında YLT yöntemi daha düşük hata değerleri üretmiş, bu durum özellikle mimari detayların bulunduğu bölgelerde belirginleşmiştir. İHA yöntemi ise özellikle bazı noktalarda daha yüksek sapmalar göstermiştir. Bu farkın temel nedenleri arasında, görüntüleme açısındaki sınırlılıklar, kontrol noktalarının fotogrametrik eşleştirme sürecindeki görünürlüğü ve modelleme optimizasyonundaki varyasyonlar sayılabilir.



Şekil 5. Denetleme noktaları için konumsal hata dağılımını gösteren ısı haritası.

Ancak konumsal doğruluk analizi yalnızca belirli sayıda nokta üzerinden yapılan bir değerlendirme sunduğu için, tüm alanın üç boyutlu bütünlüğünü değerlendirmede yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, her iki yöntemle üretilen nokta bulutlarının tamamı üzerinden yapılan bir karşılaştırma daha bütüncül bir bakış sunacaktır. Bu kapsamda, bir sonraki adımda C2C (Cloud-to-Cloud) Analizi gerçekleştirilmiş ve nokta bulutları arasında yüzey temelli farklar sayısal olarak değerlendirilmiştir.

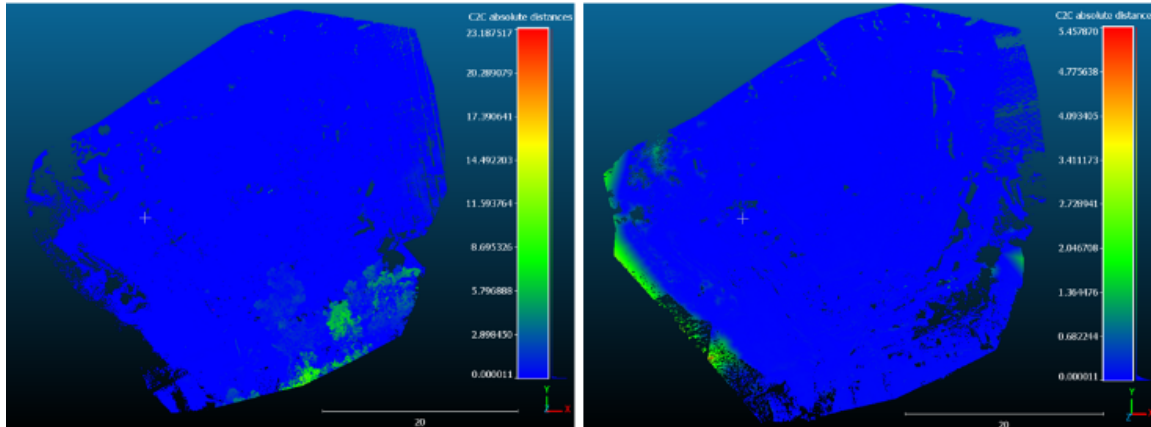
3.2. C2C Analizi Bulguları

YLT ve İHA fotogrametrisi ile elde edilen nokta bulutlarının üç boyutlu düzlemde ne derece örtüştüğünü değerlendirmek amacıyla C2C (Cloud-to-Cloud) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, her bir noktanın karşı veri setindeki en yakın nokta ile olan öklidyen mesafesi hesaplanmış ve farklar renk skalası ile görselleştirilmiştir.

Şekil 6'da, sol tarafta YLT nokta bulutunun referans kabul edildiği, sağ tarafta ise İHA nokta bulutunun referans olarak kullanıldığı iki farklı C2C analiz görseli sunulmaktadır. Her iki analizde de, karşılaştırılan veri seti ile referans veri seti arasındaki yüzey farklılıkları, minimumdan maksimuma değişen renk skalasıyla ifade edilmiştir.

Şekil 6'da mavi tonlar düşük farkları, yeşil-sarı-kırmızı tonlar ise artan sapmaları göstermektedir. Sol görselde (YLT referans), maksimum sapma 23.19 cm olarak ölçülmüş ve bu farklar daha çok eğimli yüzeylerde ve yapılar arası bağlantı noktalarında yoğunlaşmıştır. Sağ görselde (İHA referans), maksimum sapma değeri 5.53 cm olup daha homojen bir dağılım gözlemlenmiştir. Bu durum, YLT verisinin genel olarak daha yoğun ve detaylı olması nedeniyle, İHA bulutunun daha düşük çözünürlükte kalan bölgelerle karşılaştırıldığında yüksek sapmalar üretmesinden kaynaklanmaktadır.

Her iki analiz sonucunda genel hata istatistikleri Tablo 5'teki gibi özetlenmiştir:



Şekil 6. YLT verisi referans kabul edilmiş (sol) ve İHA verisi referans kabul edilmiş (sağ) C2C analizi

Tablo 5. YLT ve İHA fotogrametrisi için C2C analizi sonuçları

Referans Veri	Ortalama Sapma (cm)	Std. Sapma (cm)	Maksimum Sapma (cm)
YLT	2.97	3.46	23.19
İHA	1.84	1.63	5.53

Tablo 5'e göre YLT verisinin detay seviyesi daha yüksek olduğu için İHA verisindeki eksiklikler özellikle detay bölgelerde büyük farklar oluşturmuştur.

İHA nokta bulutunun referans alındığı analizde ise farklar daha sınırlı kalmıştır; bu durum, daha düşük çözünürlükteki modelin karşılaştırıldığı detaylı modele göre daha az "hassaslıkla" fark algılamasından kaynaklanmaktadır.

Nokta yoğunluğu ve yüzey karmaşıklığı arttıkça C2C mesafelerinin büyüdüğü gözlemlenmiş; bu da özellikle dar yapı boşlukları, duvar tabanları ve gölge bölgelerde daha belirgin hale gelmiştir.

Sonuç olarak, C2C analizi iki yöntem arasında 3B yüzey uyumu açısından belirgin farklar olduğunu ortaya koymuştur. YLT, detaylı modelleme açısından daha uygun görünürken, İHA yöntemi hızlı veri üretimi ve alan genelinde homojen kapsama sağlamada etkili olmuştur.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, Soli Pompeiopolis kazı alanı özelinde YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri kullanılarak elde edilen 3B nokta bulutları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her iki yöntem, kültürel miras belgelenmesi açısından güçlü yönler sunmakla birlikte, çalışma sahasının fiziksel özelliklerine ve belgeleme hedeflerine bağlı olarak çeşitli avantajlar ve sınırlılıklar göstermiştir.

YLT yöntemi, özellikle yapı detaylarının yoğun olduğu bölgelerde yüksek konumsal doğruluk ve nokta yoğunluğu sağlamış; duvar köşeleri, geçitler ve düşey yüzeylerde daha hassas sonuçlar üretmiştir. Denetleme noktalarına dayalı hata analizinde RMSE değeri 2.6 cm olarak hesaplanmış; tüm denetleme noktalarında hata değeri 5 cm'nin altında kalmıştır. Ancak saha uygulamasında cihaz kurulum zorlukları, dar alan erişimi ve işlem süresi gibi faktörler uygulama verimliliğini sınırlamıştır.

İHA fotogrametrisi ise kısa sürede geniş alanları kapsayarak zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamıştır. Ancak modelin düşey detayları algılamadaki sınırlılığı ve kontrol noktası görünürlüğüne bağlı doğruluk sapmaları dikkat çekmiştir. RMSE değeri 6.2 cm olarak hesaplanmış, bazı noktalarda 10 cm'ye kadar hata oluşmuştur.

Ayrıca, üst örtüler altındaki bölgelerde veri kaybı meydana gelmiştir.

C2C analizi, YLT'nin detay seviyesinin yüksekliğine bağlı olarak İHA verisiyle olan yüzey uyumunun düşük olduğunu göstermiştir. YLT referans alındığında maksimum fark 23.19 cm'ye kadar ulaşırken; İHA referanslı analizde bu fark 5.53 cm ile sınırlı kalmıştır. Bu farklar, iki yöntemin veri yoğunluğu ve yüzey çözünürlüğü farklarından kaynaklanmaktadır.

Çalışmanın Sınırlılıkları olarak: Zemin gerçekliği için referans model olarak yalnızca GNSS verisi kullanılmış, yerel koordinat sistemine dayalı total station veya fotogrametrik kalibrasyon yapılmamıştır. Ayrıca mevsimsel ve iklimsel etkiler yani güneşin geliş açısı, rüzgar vb. etkiler çalışmayı sınırlayan etkilere sahiptir. YLT taramalarında bazı kapalı alanlara tripod yerleştirilememesi nedeniyle ölü bölgeler oluşmuş, bu alanlar analiz dışı bırakılmıştır. İHA görüntüleme sırasında rüzgâr ve ışık değişimi bazı görsellerde kalite düşüşüne neden olmuştur. Analiz yalnızca bir alana ait ve tek seferlik veriyle gerçekleştirilmiş, zaman serisi analiz içermemektedir.

Sonuç olarak: YLT, detay ve doğruluk öncelikli belgeleme ihtiyaçları için uygun bir yöntemdir. İHA fotogrametrisi, geniş alanların hızlı belgelenmesi ve ilk envanter oluşturma gibi durumlarda avantajlıdır. Her iki yöntem birlikte hibrit biçimde kullanıldığında, eksik ve güçlü yönler dengelenmekte, daha kapsamlı ve dengeli bir 3B model elde edilmektedir.

Bu çalışma, kültürel miras alanlarında kullanılabilecek veri toplama teknolojilerinin hem doğruluk hem de pratiklik açısından nesnel kriterlerle değerlendirilmesini sağlamış, yöntem seçiminin belgelenen alanın fiziksel özellikleri ve proje hedefleri doğrultusunda yapılması gerektiğini ortaya koymuştur.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma kapsamında veri toplama faaliyetleri için gerekli izinler, Kültür ve Turizm Bakanlığı'na bağlı olarak yürütülen Soli Pompeiopolis Kazı Başkanlığı tarafından sağlanmıştır. Kazı alanında gerçekleştirilen ölçüm ve belgeleme çalışmalarına verdikleri destekten dolayı kazı başkanı ve ekibine teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Ceyda Ulvi: Yazılım, Saha Çalışması, Metodoloji, Modelleme, Yazım;

Aslı Deniz Adıgüzel: Metodoloji, Uygulama, Kontrol, 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.

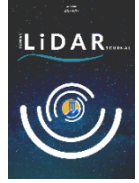
Kaynaklar

- Akar, A. (2017). Evaluation of accuracy of DEMs obtained from UAV-point clouds for different topographical areas. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), 110–117. <https://doi.org/10.26833/ijeg.329717>
- Chiabrand, F., Di Pietra, V., Lingua, A., Maschio, P., Noardo, F., Sammartano, G., & Spanò, A. (2016). TLS models generation assisted by UAV survey. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5*, 413–420. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-413-2016>
- 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. <https://doi.org/10.51946/melid.1021819>
- Kabadayı, A. (2023a). Kültürel mirasın dijital arşivlenmesi: Emirci Sultan Türbesi ve Camii örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(2), 82–88. <https://doi.org/10.53030/tufod.1401899>
- Kabadayı, A. (2023b). Yersel lazer tarama yöntemi ile röle ve restitüsyon projelerinin hazırlanması; Akşehir Kale Kalıntısı örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(1), 17–25. <https://doi.org/10.51946/melid.1296772>
- Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2022). Application of terrestrial photogrammetry method in cultural heritage studies: A case study of Seyfeddin Karasungur. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 62–67. <https://doi.org/10.53093/mephøj.1200146>
- Ruther, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., Walker, S. J., Matmon, A., & Horwitz, L. K. (2009). Laser scanning for conservation research of African cultural heritage sites: The case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1847–1856. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.04.012>
- Suchocki, C., Damięcka-Suchocka, M., Katzer, J., Janicka, J., Rapiński, J., & Stałowska, P. (2020). Remote detection of moisture and bio-deterioration of building walls by time-of-flight and phase-shift terrestrial laser scanners. *Remote Sensing*, 12(11), 1708. <https://doi.org/10.3390/rs12111708>
- Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2019). Kültürel mirasın dijital dokümantasyonu: Taşkent Sultan Çeşmesi'nin fotogrametrik teknikler kullanarak 3B modelinin yapılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 1–6.
- Wu, B., & Tang, S. (2015). Review of geometric fusion of remote sensing imagery and laser scanning data. *International Journal of Image and Data Fusion*, 6(2), 97–114. <https://doi.org/10.1080/19479832.2015.1024175>
- Yiğit, A. Y., & Ulvi, A. (2020). İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 46–54.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikiz oluşturmada nokta bulutlarına dayalı analiz. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 318–329. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1200941>
- Zeybek, M. (2021). Extraction of road lane markings from mobile LiDAR data. *Transportation Research Record*, 2675(5), 30–47. <https://doi.org/10.1177/0361198120981948>



© Author(s) 2025.

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



Mimari Karmaşıklıkla Sahip Cami Yapıların Üç Boyutlu Belgelenmesinde Yersel Lazer Tarama Uygulaması

Muhammed Emin Bıyık ^{1*}, Adem Kabadayı ²

¹ Bağımsız Araştırmacı, Harita Mühendisi, Ankara, Türkiye; (muhammedeminbiyik3301@gmail.com)

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Şefaati Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 66800, Yozgat, Türkiye; (adem.kabadayı@bozok.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
muhammedeminbiyik3301@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Bıyık, M. E. & Kabadayı, A. (2025). Mimari Karmaşıklıkla Sahip Cami Yapıların Üç Boyutlu Belgelenmesinde Yersel Lazer Tarama Uygulaması. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 7(1), 24-32.

Geliş : 21.05.2025
Revize : 12.06.2025
Kabul : 20.06.2025
Yayınlama : 30.06.2025

Özet

Günümüzde kültürel miras unsurlarının belgelenmesi, yalnızca tarihî yapıların korunması açısından değil, aynı zamanda bu yapıların dijital çağda erişilebilir, analiz edilebilir ve sürdürülebilir biçimde arşivlenebilmesi bakımından da büyük önem taşımaktadır. Dijital belgelenme yöntemleri, tarihî ve mimari yapıların fiziksel özelliklerinin detaylı biçimde kaydedilmesine imkân tanırken, aynı zamanda restorasyon planlamasından eğitim ve sanal turizm uygulamalarına kadar pek çok alanda kullanılabilir nitelikte veriler sunmaktadır. Özellikle dini mimarinin temsilcileri olan cami yapıları, estetik, mühendislik ve kültürel değerleriyle öne çıkan, belgelenmesi gereken özgün yapılardır. Bu çalışmada, kültürel miras kapsamında değerlendirilen cami yapılarına ait mimari unsurların üç boyutlu (3B) belgelenmesi amacıyla Yersel Lazer Tarama (YLT) yöntemi kullanılmıştır. Uygulama alanı olarak Mersin ili Yenişehir ilçesinde yer alan Müftü Abdullah Sıddık Camii seçilmiş; yapının iç ve dış mekân geometrisi, yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verileriyle detaylı biçimde modellenmiştir. Toplam 18 tarama oturumu gerçekleştirilmiş; elde edilen veriler üzerinde hizalama, gürültü temizliği ve mesh tabanlı 3B modelleme işlemleri uygulanmıştır. Modelin doğruluğu, hedef işaretleri ve uzunluk bazlı karşılaştırmalar yoluyla değerlendirilmiştir. Doğruluk analizinde ortalama fark 1.1 cm, RMSE değeri ise 0.011 m olarak elde edilmiştir. Bulgular, YLT'nin cami gibi mimari karmaşıklıkla yüksek yapılarda etkili ve güvenilir bir belgeleme aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, yüksek kotlu unsurların (ör. minare tepesi) eksik taranması, görüş açısı kısıtları ve dış ortam etkileri gibi bazı sınırlılıklar da gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, çok kaynaklı veri birleşimi ve otomatik veri işleme teknikleri ile yöntemin etkinliğinin artırılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yersel lazer tarama, 3B modelleme, Kültürel miras, Cami belgelenmesi, Nokta bulutu, Doğruluk analizi.

Three-dimensional Documentation of Architecturally Complex Mosques Using Terrestrial Laser Scanning

*Corresponding Author:
muhammedeminbiyik3301@gmail.com

Research Article

Citation: Bıyık, M. E. & Kabadayı, A. (2025). Three-dimensional Documentation of Architecturally Complex Mosques Using Terrestrial Laser Scanning. *Turkish Journal of LiDAR*, 7(1), 24-32 (in Turkish).

Received : 21.05.2025
Revised : 12.06.2025
Accepted : 20.06.2025
Published : 30.06.2025

Abstract

Today, the documentation of cultural heritage elements is of great importance not only for the preservation of historical structures but also for ensuring their accessibility, analyzability, and sustainable archiving in the digital age. Digital documentation methods allow for the detailed recording of the physical characteristics of historical and architectural structures, while also providing usable data for a wide range of applications, from restoration planning to education and virtual tourism. In particular, mosque structures, as representatives of religious architecture, stand out with their aesthetic, engineering, and cultural values, and are unique buildings that warrant documentation. In this study, the Terrestrial Laser Scanning (TLS) method was employed for the three-dimensional (3D) documentation of architectural elements of mosque structures considered as cultural heritage. The Müftü Abdullah Sıddık Mosque, located in the Yenişehir district of Mersin, Türkiye, was selected as the application area. The mosque's interior and exterior geometries were modeled in detail using high-resolution point cloud data. A total of 18 scanning sessions were conducted, followed by point cloud registration, noise filtering, and mesh-based 3D modeling processes. The accuracy of the model was assessed through target-based registration and length-based comparisons. The accuracy analysis revealed a mean deviation of 1.1 cm and an RMSE value of 0.011 m. The findings demonstrate that TLS is an effective and reliable tool for documenting architecturally complex structures such as mosques. However, certain limitations were observed, such as incomplete scanning of high-elevation elements (e.g., minaret tops), restricted line-of-sight conditions, and environmental interferences in outdoor settings. It is recommended that the effectiveness of the method can be enhanced through multi-source data integration and the implementation of automated data processing techniques.

Keywords: Terrestrial laser scanning, 3D modeling, Cultural heritage, Mosque documentation, Point cloud, Accuracy analysis.

1. Giriş

Tarihi yapılar, geçmişten günümüze ulaşan, mimari, estetik ve kültürel değerler taşıyan önemli varlıklardır. Bu yapılar, sadece fiziksel öğeler değil; aynı zamanda geçmişle bağ kurmamızı sağlayan, toplumların tarihsel hafızasını ve kültürel kimliğini yansıtan yapılardır. UNESCO başta olmak üzere birçok uluslararası kurum, bu yapıların belgelenmesini, dijital olarak arşivlenmesini ve erişilebilirliğinin sağlanmasını sürdürülebilir miras yönetiminin ayrılmaz bir parçası olarak kabul etmektedir. Dijital teknolojilerin kültürel miras alanında yaygınlaşması, geleneksel koruma yaklaşımlarını tamamlayarak, veri güvenliği, uzun vadeli erişim ve çoklu analiz olanakları sunmaktadır.

Bu nedenle tarihi yapıların belgelenmesi, korunması ve gelecek nesillere aktarılması, kültürel sürdürülebilirliğin temel koşullarından biridir. Kültürel mirasın hasara uğramadan aktarılabilmesi için öncelikli adım, mevcut durumun doğru, ayrıntılı ve güvenilir biçimde belgelenmesidir (Campana & Remondino, 2008; Uslu vd., 2016).

Tarihi yapıların belgelenmesinde kullanılan yöntemler, zaman içinde teknolojinin gelişimine paralel olarak çeşitlenmiştir (Capolupo, 2021). Geleneksel yöntemler, şerit metre, şakül, karbon kâğıdı, jalon, prizma, mira, nivo ve teodolit gibi temel araçlarla yürütülmüştür. Ancak bu yöntemler, özellikle karmaşık geometrili, detaylı ve hasarlı yapılarda ölçüm hataları, zaman kaybı ve düşük hassasiyet gibi önemli sınırlılıklar taşımaktadır. Bu durum, mimari belgeleme süreçlerinde daha hızlı, hassas ve kapsamlı veri sağlayabilen modern tekniklerin kullanımını zorunlu kılmıştır (Şenol vd., 2021).

Günümüzde bu ihtiyaca karşılık veren en etkili tekniklerden biri Yersel Lazer Tarama (YLT) yöntemidir. Lazer tarama sistemleri, bir nesne yüzeyine gönderilen lazer ışınlarının geri dönüş sürelerine dayanarak üç boyutlu (3B) konum bilgisi üretmektedir (Fangi vd., 2002; Xiong vd., 2013). Bu yöntemle kısa sürede, yüksek yoğunluklu ve yüksek doğruluklu nokta bulutları elde edilmekte; bu bulutlardan 3B modeller, kesitler, planlar ve çeşitli grafik çıktılar üretilmektedir. Özellikle karmaşık geometriye sahip mimari yapılarda lazer tarama, yüksek çözünürlüklü ve detaylı belgelemeyi mümkün kılar (Yiğit vd., 2024; Kabadayı ve Kaya, 2024).

YLT teknolojisinin etkin şekilde kullanılabilmesi, uygun tarama stratejilerinin belirlenmesi ve veri işleme süreçlerinin titizlikle yürütülmesine bağlıdır. Tarama sırasında cihaz konumlarının doğru planlanması, nokta bulutlarında boşlukların oluşmaması ve yapı geometrisinin eksiksiz yakalanması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca elde edilen ham nokta bulutu

verileri, çeşitli yazılımlar aracılığıyla hizalama, filtreleme ve mesh oluşturma gibi işlemlerden geçirilerek kullanılabilir hâle getirilir. Bu süreçte özellikle renkli tarama (RGB destekli) ve çoklu çözünürlük kullanımı, hem belgelenen yüzeylerin görsel detaylarını artırmakta hem de son ürünlerin sunum ve analiz kalitesini yükseltmektedir. Böylece, YLT sadece veri toplama aracı değil; aynı zamanda bütüncül bir belgeleme ve analiz sisteminin temel bileşeni olarak işlev görmektedir (Ulvi & Yiğit, 2022).

YLT sistemlerinin sağladığı avantajlar arasında; hızlı veri toplama, ulaşılamayan alanların belgelenebilmesi, eksiksiz 3B veri üretimi, aydınlatma koşullarından bağımsız çalışma ve maliyet etkinliği sayılabilir. Bu özellikler, lazer taramayı özellikle kültürel miras alanlarında vazgeçilmez bir belgeleme aracı haline getirmiştir (Yiğit & Uysal, 2023; Go vd., 2013). Geleneksel fotogrametri yöntemleri, özellikle dış mekân uygulamalarında yüksek çözünürlüklü görüntülerle etkili sonuçlar verebilse de iç mekânlarda ışık koşulları, erişim kısıtları ve perspektif bozulmaları gibi sınırlamalar nedeniyle veri kalitesi düşebilmektedir. Benzer şekilde, İHA tabanlı belgelenme teknikleri geniş alanlar ve dış cephe geometrileri için avantaj sağlasa da dar geçiş alanları, kubbe içleri veya minarelerin alt kotları gibi bölgelerde görüntüleme yetersiz kalabilmektedir (Capolupo, 2021; Zachos, 2023). Buna karşın YLT hem iç hem dış mekânda yüksek detaylı ve yoğun nokta bulutu üretme kapasitesi sayesinde, özellikle cami gibi karmaşık mimariye sahip yapılarda geometrik sürekliliği bozmadan kapsamlı 3B modellemeyi mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle, YLT tekniği diğer yöntemlerle birlikte veya onlara alternatif olarak, bütüncül ve hassas bir belgeleme yaklaşımı sunmaktadır.

Bu kapsamda, dini yapıların belgelenmesi de özel bir öneme sahiptir. İslam dünyasında camiler, sadece ibadet alanı değil, aynı zamanda sosyal ve kültürel hayatın da merkezinde yer alan yapılardır (İmtiaz vd., 2024; Lolytasari vd., 2021). Minareleri, kubbeleri, mihrapları ve zarif süslemeleri ile camiler, İslam mimarisinin estetik ve mühendislik birikimini yansıtır. Coğrafyaya göre farklılık gösteren mimari tarzları ve yapı teknikleri, her camiyi özgün ve belgelenmeye değer birer kültürel varlık haline getirmektedir (Zachos, 2023; Kwoczynska vd., 2018).

Bu çalışmada, bir cami yapısının yersel lazer tarama tekniğiyle üç boyutlu olarak belgelenmesi hedeflenmektedir. Çalışmanın temel amacı; TLS yönteminin kültürel miras belgelenmesindeki doğruluk, hız, maliyet ve kullanım kolaylığı açısından etkinliğini ortaya koymak, yöntemin avantaj ve sınırlılıklarını değerlendirmek ve gelecekte benzer yapılarda kullanılabilirliğine katkı sağlamaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada YLT tekniği ile 3B belgelenmesi gerçekleştirilen yapı, Mersin ili Yenişehir ilçesi Çiftlik Mahallesi sınırları içerisinde yer alan Müftü Abdullah Sıddık Camii'dir (Şekil 1). Çalışma alanı yaklaşık olarak $36^{\circ}47'18.9''$ kuzey enlemi ve $34^{\circ}32'13.6''$ doğu boylamı koordinatlarında konumlanmaktadır.

Müftü Abdullah Sıddık Camii; kubbeleri, minareleri, cephe düzenlemeleri ve dini mimariye özgü zarif süslemeleri ile hem estetik açıdan zengin hem de kültürel ve dini bağlamda anlamlı bir yapıdır. Farklı geometrilere ve detaylara sahip mimari öğeler içermesi nedeniyle, bu yapı karmaşık yüzey morfolojisinin modellenmesi açısından uygun bir örnek teşkil etmektedir. Bu özellikleri, caminin belgelemeye değer bir tarihi ve mimari karakter taşımasına olanak sağlamaktadır.

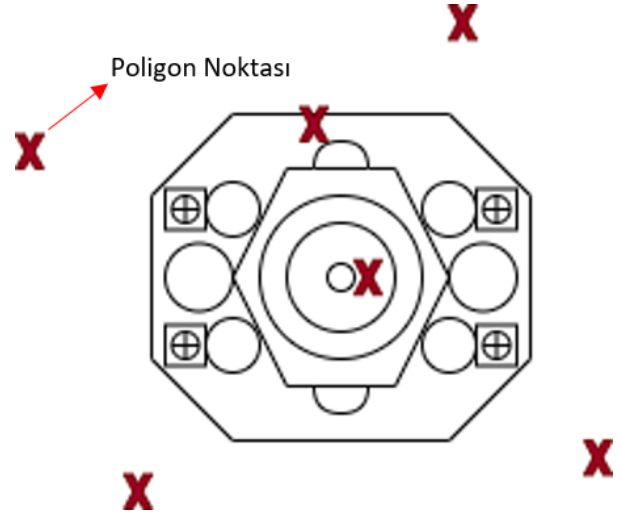


Şekil 1. Çalışma Alanı.

2.2. Materyal

YLT, yüzeylerin üç boyutlu olarak konumlandırılmasında yüksek hassasiyet sunan bir uzaktan algılama yöntemidir (Zeybek vd., 2015; Çelik vd., 2020). Sistem, lazer tarayıcıdan darbe şeklinde gönderilen ışının nesneye çarpıp geri dönmesi esasına dayanır. Lazer ışınının gönderilme ve geri dönme süresi arasındaki fark hesaplanarak, mesafe bilgisi elde edilir. Bu işlem, yüksek hassasiyetli sensörler yardımıyla gerçekleştirilir (Lemmens & Lemmens, 2011; Buckley vd., 2008).

Bu çalışmada, Müftü Abdullah Sıddık Camii'nin belgelenmesi amacıyla hem YLT hem de Total Station ölçümleri bir arada kullanılmıştır. İlk aşamada, yapı çevresine uygun konumda poligon noktaları yerleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Poligon noktaları.

Poligon noktaları, arazinin referans sistemine dayalı olarak tanımlanmasına ve tarama oturumlarının hizalanmasına olanak sağlamıştır. Her poligon noktasına, Topcon GM-50 Series Total Station cihazı ile ölçüm yapılmış; açı ve mesafe verileri elde edilerek ağ dengesi kurulmuştur (Şekil 3).

Veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla, belirlenen poligon noktaları ile tutarlı olacak şekilde homojen dağılımlı hedef işaretleri yerleştirilmiştir. Bu noktalar, tarama verisinin yerel koordinat sistemine oturtulmasında kullanılmıştır.



Şekil 3. Hassas Ölçüm Cihazı ve hedef işareti.



Şekil 4. Yersel lazer tarama cihazı.

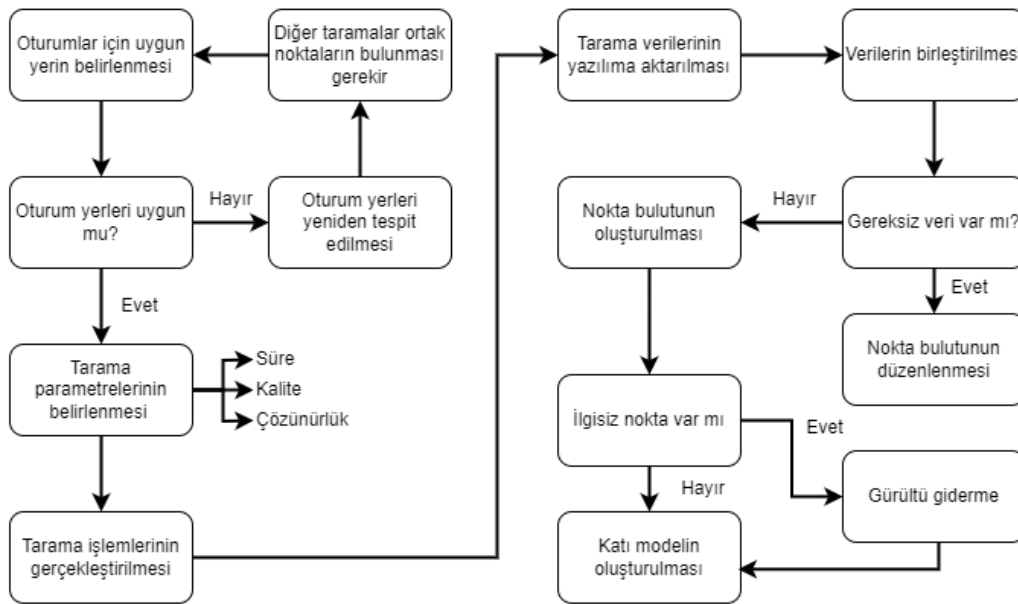
YLT verileri, FARO Focuss350 lazer tarayıcı ile toplanmıştır (Şekil 4). Tarama işlemleri hem cami içi hem de cami dışı alanları kapsayacak şekilde, bindirmeli oturumlarla gerçekleştirilmiştir. Her tarama oturumu yaklaşık 8 dakika sürmüş, cihaz iç ve dış mekân için sırasıyla 20 metre ve üzeri menzil ayarlarında yapılandırılmıştır. Tarama sırasında cihaz ile hedef yüzey arasında görüş hattının kesilmemesine özen gösterilmiş; veri kalitesini etkileyebilecek

yansıma, gölge veya fiziksel engeller minimize edilmiştir.

Elde edilen veriler, FARO Scene yazılımı kullanılarak işlenmiş, farklı oturumlara ait nokta bulutları ortak referans noktaları yardımıyla birleştirilmiştir. İşlem sırasında gürültü giderme ve gereksiz veri temizliği yapılmıştır. Tüm veri işleme süreci, Şekil 5'te sunulan iş akış şeması çerçevesinde yürütülmüştür. Cihazın teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Faro Focus özellikleri.

Öznitelikler	Değer
Netlik aralığı	614 metrede saniyede 122-488 bin nokta; 307 metrede saniyede 976 bin nokta
Mesafe	Kapalı veya açık alan ve %90'a kadar yansıtıcı yüzeyde normal geliş açısında 0.6m – 330m arası
Ölçümleme hızı	122.000/ 244.000/ 488.000/ 976.000 nokta/saniye
Mesafe hatası	±2mm (0,6 m-300 m arası)
Çözünürlük	Renkli 70 megapiksele kadar
Görüş aralığı (dikey/yatay)	300° / 360°
GNSS	Tümleşik GPS & GLONASS
Çözünürlük	Maksimumu 165 mega piksel



Şekil 5. Yersel lazer tarayıcı iş akış şeması.

2.3. Metot

Belgeleme süreci, caminin mimari karmaşıklığını ve fiziksel sınırlamalarını dikkate alacak şekilde önceden planlanmıştır. Yapı içi ve dışı olmak üzere toplamda 18 tarama oturumu gerçekleştirilmiş, oturum noktalarının seçiminde görüş alanı açıklığı, tarayıcı menzili, yüzey morfolojisi ve yansıma riskleri gibi kriterler gözetilmiştir. Dış mekân taramaları için 20–25 metre, iç mekân taramaları için ise 8–12 metre menzil aralığında çalışılmıştır. Tüm oturumlar arasında en az %60 oranında bindirme sağlanarak veri

sürekliliği ve hizalama doğruluğu artırılmıştır (Oruç ve Ulvi, 2023).

Tarama işlemleri, 1/4 çözünürlük ve 3× kalite ayarlarında gerçekleştirilmiş, her bir oturum yaklaşık 8 dakika sürmüştür. Bu ayar kombinasyonu, hem veri toplama süresini optimum seviyede tutmak hem de yapıdaki mimari detayları (süslemeler, kemer geçişleri, bordür çizgileri vb.) yeterli yoğunlukta yakalayabilmek amacıyla tercih edilmiştir. 1/4 çözünürlük, ortalama 20–25 milyon nokta üreterek hem iç hem dış mekân için yeterli ayrıntı düzeyi sağlarken; 3× kalite, özellikle kenar geçişlerinde oluşabilecek yansıma kaynaklı bozulmaları minimize

etmeye yardımcı olmuştur. Bu ayarlar, karmaşık yüzey morfolojisine sahip dini yapılarda önerilen minimum kalite standardını karşılamaktadır.

Veriler, FARO Scene 2020 yazılımına aktarılmış ve burada işleme alınmıştır. Scene yazılımı, hedef tabanlı ve bulut tabanlı kayıt (registration) yöntemlerini desteklemekte olup, bu çalışmada özellikle “Top View Based Registration” ve “Cloud to Cloud Fine Registration” modülleri tercih edilmiştir.

İlk aşamada, üstten görünüş temelli hizalama ile kaba konumlandırma sağlanmış, ardından C2C (Cloud-to-Cloud) yöntemi ile daha hassas eşleştirme gerçekleştirilmiştir. Top View yöntemi, dış mekânda geniş açıklıklı alanlarda hızlı hizalama için uygundur; C2C ise yapının karmaşık mimari yapısı (örneğin minare iç yüzeyi, mihrap alanı gibi) gibi detaylarda yüksek doğruluk sağlamaktadır. İki yöntemin birlikte kullanımı, özellikle hedef işaretlerinin sınırlı olduğu durumlarda daha güvenilir ve dengeli hizalama çıktısı vermiştir.

Oturumlar arası hizalama, referans hedeflerin sınırlı olduğu durumlarda nokta bulutlarının geometrik eşleştirilmesi ile gerçekleştirilmiş ve ortalama sapma değeri <2.5 mm olacak şekilde optimize edilmiştir.

Veri işleme sürecinde, ilk olarak ham nokta bulutları yazılım ortamında birleştirilmiş; ardından sahaya özgü gereksiz veriler (bitki örtüsü, insanlar, geçici nesneler) manuel olarak temizlenmiştir. Gürültü temizliği için, istatistiksel aykırı değer analizi temelli “Statistical Outlier Removal (SOR)” ve çevresel yoğunluk analizi temelli “Radius Outlier Removal (ROR)” algoritmaları uygulanmıştır. Bu filtreleme adımları, özellikle dış mekân taramalarında oluşabilecek veri kalitesizliğini azaltmada etkili olmuştur.

Gürültü temizliği sırasında iki farklı algoritma kullanılmıştır. Statistical Outlier Removal (SOR) için her nokta çevresinde komşu sayısı = 30 ve standart sapma eşik değeri = 1.0 olarak belirlenmiştir. Bu sayede nokta bulutundaki rastlantısal uç değerler (örneğin yapıya temas eden kuş, insan hareketleri, yansıma bozulmaları) temizlenmiştir. Radius Outlier Removal (ROR) algoritmasında ise yarıçap = 0.3 m ve minimum komşu sayısı = 10 olarak seçilmiştir. Özellikle dış mekânda oluşabilecek seyrek bölgeler bu yöntemle elenmiş ve nokta yoğunluğu homojenleştirilmiştir.

Temizlenmiş nokta bulutu, üç boyutlu modelleme süreçlerine uygun formatlarda dışa aktarılmış ve daha sonra mesh oluşturma işlemleri için CloudCompare ve MeshLab yazılımları kullanılmıştır. Ön işlenmiş nokta verileri üzerinde Greedy Projection Triangulation (GPT) ve Poisson Surface Reconstruction algoritmaları uygulanarak, detaylı yüzey geometrisini yansıtan deliksiz bir 3B katı model elde edilmiştir. GPT yöntemi, yüzey ağı oluşturmak için kullanılırken; Poisson

yaklaşımı daha homojen ve analitik bir yüzey üretimini mümkün kılmıştır.

Model üretiminin ardından yapı üzerinde tanımlanan yüzeylerde, geometrik süreklilik, detay koruma kapasitesi ve eksik bölge durumu görsel olarak incelenmiştir. Nihai çıktı, üç boyutlu sayısal model olarak arşivlenmiş ve ileri analizler için kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Tüm süreç, Şekil 5’te sunulan iş akış şemasına uygun şekilde yürütülmüştür.

2.4. Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi, üretilen üç boyutlu modelin geometrik güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, arazide total station ile ölçülen koordinat değerleri ile üç boyutlu model üzerinden elde edilen karşılık gelen değerler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, nokta çiftleri arasındaki doğrusal mesafeler üzerinden yapılmış ve sonuçlar istatistiksel hata metrikleri ile değerlendirilmiştir (Duran vd., 2017, Yakar vd., 2009; Borkowski & Józków, 2012).

Analiz kapsamında toplam 20 referans noktası kullanılmıştır. Bunların 12’si kontrol verisi, 8’i test verisi olarak tanımlanmıştır. Kontrol verileri, modelin koordinat sistemine entegrasyon sürecinde referans olarak kullanılmış; test verileri ise analizde bağımsız doğrulama noktaları olarak değerlendirilmiştir. Her test noktası için, arazi verisi ile modelden hesaplanan değer arasındaki fark hesaplanmış, bu farklardan türetilen hata metrikleri kullanılarak genel doğruluk düzeyi belirlenmiştir.

Değerlendirmede uzunluk bazlı karşılaştırma yapılmış; örnek olarak iki nokta arasındaki arazi uzunluğu ile modelden elde edilen karşılık gelen mesafe kıyaslanmıştır. Ölçümlerden elde edilen sapmalar doğrultusunda Karesel Ortalama Hata (Root Mean Square Error - RMSE) değeri hesaplanmış, bu metrik modelin genel doğruluk seviyesini göstermede temel alınmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |l_i|^2}{n}} \quad (1)$$

RMSE = Karesel ortalama hata

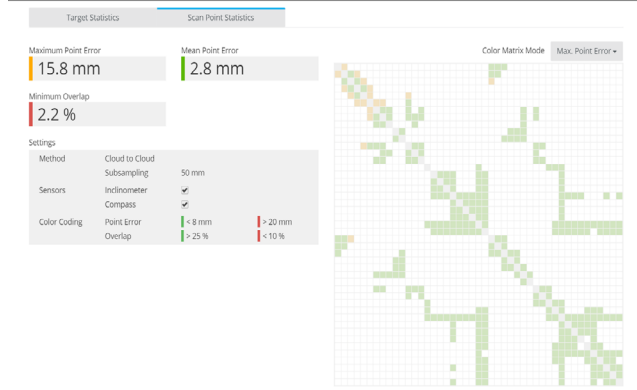
l_i = Gerçek uzunluk ile modeldeki uzunluk farkı

n = Ölçü sayısı.

3. Bulgular

YLT tekniği ile elde edilen veriler, yüksek doğrulukla işlenmiş ve cami yapısına ait detaylı bir üç boyutlu model oluşturulmuştur. Veri işleme aşamasında kullanılan Cloud to Cloud (C2C)

eşleştirme yöntemi ile yapılan kayıt sonrası dengeleme raporu, tarama oturumları arasındaki hizalama kalitesini göstermektedir (Şekil 6). Bu rapora göre, maksimum nokta hatası 15.8 mm, ortalama nokta hatası ise yalnızca 2.8 mm olarak hesaplanmıştır. Örtüşme oranının minimum %2.2 olarak belirlenmesine rağmen, genel hata seviyeleri kabul edilebilir mühendislik sınırları içerisinde. Bu durum, modelin genel geometrik tutarlılığının yüksek olduğunu göstermektedir.



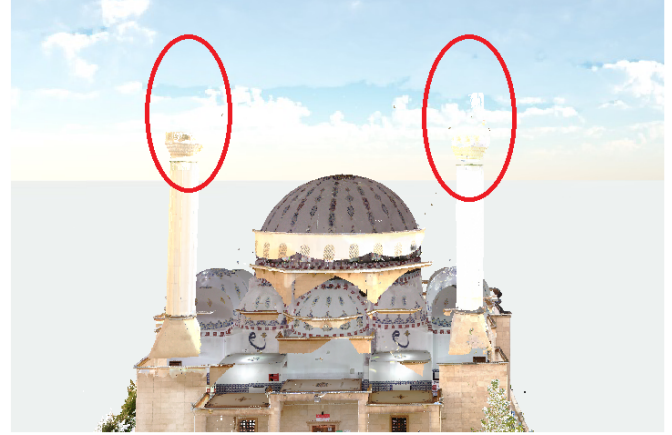
Şekil 6. YLT dengeleme raporu.

Modelin nokta bulutu verisi, dış cephe, kubbeler, minareler ve mimari süslemeler dâhil olmak üzere tüm detayları kapsamaktadır. Nokta bulutu hem renkli (RGB) bilgi hem de geometrik yoğunluk bakımından yüksek kalite sunmaktadır (Şekil 7). Tarama oturumları sonucunda elde edilen nokta bulutu yoğunluğu, yapı bölümlerine göre değişkenlik göstermiştir. Özellikle mihrap, sütun başlıkları ve kubbe iç yüzeyi gibi detaylı alanlarda ortalama noktalaşma sıklığı 2,500–3,000 pts/m² düzeyindeyken, minare tepe bölgesine doğru bu değer 800 pts/m²'ye kadar düşmektedir. Nokta yoğunluğu haritası üzerinden yapılan bu değerlendirme, yapı üzerindeki veri zenginliğini görsel olarak da ortaya koymaktadır. Bu çıktı, kültürel miras yapılarının dijital arşivlenmesi açısından oldukça değerli bir veri sağlamaktadır.



Şekil 7. Caminin nokta bulutu verisi.

Bununla birlikte, yapıdaki bazı elemanların tam olarak modellenemediği alanlar da tespit edilmiştir. Özellikle cami minarelerinin üst bölümleri, erişim kısıtları, gökyüzüne karşı düşük kontrast ve açısal görüş zorlukları nedeniyle eksik taranmıştır (Şekil 8). Bu eksiklikler, lazer ışınının minare tepelerine ulaşamaması veya geri dönen sinyalin zayıf kalması ile ilişkilidir. Görüş engelleri ve geri yansımanın düşük olması gibi etkenler, YLT'nin belirli açılarda veri kaybı yaşamasına neden olabilir.



Şekil 8. Minarenin çıkmayan kısımları.

Modelin özellikle üst kubbe yapılarında detaylı geometri üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 9). Kubbe pencereleri, kemerler ve süslemeler tarama sonucunda yüksek doğrulukla elde edilmiştir. Bu bölge hem detay seviyesi hem de nokta yoğunluğu açısından modelin en güçlü kısımlarından biridir.



Şekil 9. Caminin üst kısmı.

Mesh modeli üzerinden yapılan yerel incelemeler, YLT verisinin karmaşık eğrisel yüzeylerde detaylı geometrik temsil sağladığını ortaya koymuştur. Özellikle kubbe eteğinde yer alan pencere kemerleri, mihrap girintisi ve süsleme bordürleri, deliksiz ve sürekliliği yüksek yüzeylerle modellenmiştir. Buna karşın, minarenin en üst kısmında yüzey sürekliliğinin

zayıfladığı ve küçük boşluklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, önceden belirtilen nokta yoğunluğu düşüklüğü ile ilişkilidir.

Elde edilen model, sadece görsel sunum amaçlı değil; aynı zamanda restorasyon planlaması, mimari analiz, yapısal deformasyon izleme ve dijital arşivleme gibi çok sayıda uygulamaya yönelik kullanılabilecek niteliktedir. Bu kapsamda oluşturulan modelin sonraki bölümde yapılan doğruluk analizinde de güvenilir olduğu ortaya konmuştur.

Elde edilen 3B model, yalnızca görsel sunum açısından değil; aynı zamanda restorasyon planlaması, yapısal analiz, mimari değerlendirme ve dijital arşivleme gibi çok çeşitli uygulama alanları açısından da kullanılabilir niteliktedir. Modelin bu tür uygulamalara uygunluğunu değerlendirebilmek için, arazi ölçümleriyle model üzerinden alınan veriler karşılaştırılmış ve sayısal bir doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hem kontrol noktaları hem de test verileri kullanılarak belirli uzunluklar üzerinden yapılan karşılaştırmalarla modelin geometrik tutarlılığı değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Uzunluk ölçümlerine göre doğruluk analizi

Nokta Çifti	Gerçek Uzunluk (m)	Model Uzunluğu (m)	Fark (m)	Hata (%)
T1-T2	5.384	5.392	0.008	0.15%
T2-T3	6.240	6.226	0.014	0.22%
T3-T4	4.980	4.972	0.008	0.16%
T4-T5	3.752	3.765	0.013	0.35%
T5-T6	7.112	7.101	0.011	0.15%
T6-T7	6.033	6.042	0.009	0.15%
T7-T8	5.600	5.590	0.010	0.18%
T8-T9	3.248	3.263	0.015	0.46%
Ortalama	—	—	0.011	0.23%

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, Müftü Abdullah Sıddık Camii'nin üç boyutlu belgelenmesi için YLT yöntemi uygulanmış ve elde edilen verilerle yüksek doğrulukta bir 3B model üretilmiştir. Süreç boyunca 18 oturumda toplanan nokta bulutu verileri hem dış hem iç mekân detaylarını kapsayacak şekilde işlenmiş ve doğruluk analizleri ile değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, cami gibi mimari karmaşıklığı yüksek yapılarda YLT'nin detaylı, yüksek çözünürlüklü ve güvenilir belgeler üretebildiğini göstermektedir. Nokta bulutu yoğunluğu, geometrik süreklilik ve kayıt doğruluğu gibi teknik kriterler açısından değerlendirildiğinde, sistemin ortalama sapma değeri 2.8 mm, doğruluk analizinde hesaplanan RMSE değeri ise 0.011 m olarak elde edilmiştir. Bu

değerler, kültürel miras belgelenmesinde kabul edilebilir sınırlar içindedir.

YLT tekniği; klasik ölçme yöntemlerine kıyasla daha hızlı veri toplama, daha yüksek detay seviyesi ve zor ulaşılan bölgelerde çalışma imkânı gibi belirgin avantajlar sunmaktadır. Özellikle yapı dış cephesinde yer alan kubbeler, süslemeler, pencere kemerleri gibi mimari unsurlar, nokta bulutu üzerinden başarıyla modellenmiştir. Modelin bu yönüyle dijital arşivleme, restorasyon planlaması ve sanal sergileme gibi çok boyutlu uygulamalarda kullanılabilirliği yüksektir.

Ancak çalışmanın bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle, minarelerin üst bölümleri gibi bazı yapısal alanlarda yeterli tarama verisi elde edilememiştir. Bu eksiklikler, özellikle dar görüş açısı, tarayıcı ile hedef yüzey arasında yeterli yansıma sağlanamaması ve yüksek kotlardaki detayların doğrudan erişilememesi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, dış mekân taramalarında değişken ışık koşulları ve hareketli nesneler (insan, araç vb.) veri kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir.

Özellikle minarelerin üst bölümlerinde yeterli veri elde edilememesi, YLT sistemlerinin görüş hattına dayalı çalışma prensibinden kaynaklanmaktadır. Bu tür yüksek ve dar yapı unsurlarının eksiksiz belgelenebilmesi için veri toplama stratejisinin genişletilmesi gerekmektedir. Örneğin, düşük irtifadan uçabilen mikro İHA sistemleri ile üst kotlardan alınacak eğik (oblique) görüntüler, bu boşlukları doldurmak için fotogrametrik olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, iPad Pro gibi mobil LiDAR destekli cihazlar ile minare iç kısımlarında ya da dar alanlarda ek veri toplama yapılabilir. Bunun yanı sıra, sabit platform üzerine yerleştirilmiş eğilebilir açılı lazer tarayıcılarla üst kotlara yönelik özel oturumlar planlanması da çözüm sağlayabilir. Bu tekniklerin bir arada kullanılması, sadece eksik bölge sorununu azaltmakla kalmaz; aynı zamanda tüm yapının çok kaynaklı (multi-source) ve daha homojen bir modellemesini mümkün kılar. Dolayısıyla, gelecekte benzer belgelenme çalışmalarında, hibrit sensör kombinasyonlarına dayalı sistematik veri toplama protokollerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Bunun yanında, veri işleme aşamaları önemli ölçüde manuel müdahale gerektirmiştir. Özellikle nokta bulutunun temizlenmesi, hizalanması ve modelleme aşamaları, operatör deneyimine ve yazılım yetkinliğine bağlı olarak zaman alıcı olabilmektedir. Bu durum, otomasyon potansiyelinin hâlâ sınırlı olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, YLT yöntemi cami gibi tarihi ve kültürel yapılar için son derece uygun bir belgelenme aracıdır. Ancak yöntemin etkinliğini artırmak için, yüksek nokta yoğunluğu, hassas yer kontrol noktaları, görüş engellerinin azaltılması ve farklı veri kaynaklarının (örneğin İHA, fotogrametri, iPad LiDAR

vb.) entegre edilmesi faydalı olacaktır. Gelecek çalışmalarda, çoklu veri kaynaklarının birleştirilerek daha kapsamlı ve bütüncül modellerin oluşturulması önerilmektedir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen belgelenme faaliyetlerinden önce, ilgili yapının sorumluluğu altında bulunduğu Mersin Yenışehir İlçe Müftülüğü ile iletişime geçilmiş; proje hakkında bilgi verilmiş ve gerekli izinler resmi olarak alınmıştır. Çalışmanın tüm aşamaları, kurum bilgisi ve izni dâhilinde gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları destek ve iş birliği için Yenışehir İlçe Müftülüğü'ne teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Muhammed Emin Bıyık: Yazılım, Saha Çalışması, Metodoloji, Modelleme, Yazım;
Adem Kabadayı: Metodoloji, Uygulama, Kontrol, 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

- Borkowski, A., & Józków, G. (2012). Accuracy assessment of building models created from laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 253–258.
- Buckley, S. J., Howell, J. A., Enge, H. D., & Kurz, T. H. (2008). Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, 165(3), 625–638.
- Campana, S., & Remondino, F. (2008). Fast and detailed digital documentation of archaeological excavations and heritage artifacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 1–6. (Not: Eksik cilt veya sayfa varsa lütfen kontrol ediniz)
- Capolupo, A. (2021). Accuracy assessment of cultural heritage models extracting 3D point cloud geometric features with RPAS SfM-MVS and TLS techniques. *Drones*, 5(4), 145.
- Çelik, M. Ö., Hamal, S. N. G., & Yakar, İ. (2020). Yersel lazer tarama (YLT) yönteminin kültürel mirasın

dokümantasyonunda kullanımı: Alman Çeşmesi örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 2(1), 15–22.

- Duran, Z., Atik, M. E., & Çelik, M. F. (2017). Yersel fotogrametrik yöntem ile yersel lazer taramanın karşılaştırılması ve doğruluk analizi. *Harita Dergisi*, 158, 20–25.
- Fangi, G., Fiori, F., Gagliardini, G., & Malinverni, E. S. (2002). Fast and accurate close range 3D modelling by laser scanning system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/C7), 196–203.
- Go, J. S., Jeong, I. H., Shin, H. S., Choi, Y. S., & Cho, S. K. (2013). A study on the construction of indoor spatial information using a terrestrial LiDAR. *Spatial Information Research*, 21(3), 89–101.
- Imtiaz, S., Arif, S., Nawaz, A., & Shah, S. A. R. (2024). Conservation of socio-religious historic buildings: A case study of Shah Yousuf Gardez Shrine. *Buildings*, 14(7), 2116.
- Kabadayı, A., & Kaya, Y. (2024). Tarihi sütunların yersel fotogrametri yöntemiyle 3 boyutlu modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 48–53.
- Kwoczyńska, B., Piech, I., Polewany, P., & Gora, K. (2018, June). Modeling of sacral objects made on the basis of aerial and terrestrial laser scanning. In *2018 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)* (pp. 275–282). IEEE.
- Lemmens, M. (2011). Terrestrial laser scanning. In M. Lemmens (Ed.), *Geo-information: Technologies, applications and the environment* (pp. 101–121). Springer.
- Lolytasari, L., Sulistiono, B., Basuki, S., & Rahiem, M. D. H. (2021). The archival works at three historic mosques in Indonesia: The documentation of the society's religious and social life. *Journal Name Missing? (Lütfen dergi adını belirtiniz)*
- Oruç, M. E., & Ulvi, A. (2023). Maden sahalarındaki deformasyonların İHA'lar ile izlenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(2), 43–57.
- Şenol, H. İ., Yiğit, A. Y., Kaya, Y., & Ulvi, A. (2021). İHA ve yersel fotogrametrik veri füzyonu ile kültürel mirasın 3 boyutlu (3B) modelleme uygulaması: Kanlıdivane örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(1), 29–36.
- Uslu, A., Polat, N., Toprak, A. S., & Uysal, M. (2016). Kültürel mirasın fotogrametrik yöntemle 3B modellenmesi örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 165–176.
- Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2022). Comparison of the wearable mobile laser scanner (WMLS) with other point cloud data collection methods in cultural heritage: A case study of Diokaisareia. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(4), 1–19.
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325–337.

- Yakar, M., Yılmaz, H. M., & Mutluoğlu, Ö. (2009). Hacim hesaplamalarında laser tarama ve yersel fotogrametrinin kullanılması. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1372–1384.
- Yiğit, A. Y., Hamal, S. N. G., Ulvi, A., & Yakar, M. (2024). Comparative analysis of mobile laser scanning and terrestrial laser scanning for the indoor mapping. *Building Research & Information*, 52(4), 402–417.
- Zachos, A., & Anagnostopoulos, C. N. (2023). Using terrestrial laser scanning, unmanned aerial vehicles and mixed reality methodologies for digital survey, 3D modelling and historical recreation of religious heritage monuments. *arXiv Preprint arXiv:2401.01380*.
- Zeybek, M., Şanlıoğlu, İ., & Genç, A. (2015). Yüksek çözünürlüklü yersel lazer tarama verilerinin filtrelenmesi ve filtrelemelerin heyelan izlemeye etkisi. *Harita Dergisi*, 153, 35–43.



© Author(s) 2025.

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