

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILAR İÇİN ÜÇ BOYUTLU
BELGELEME YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ

Uğur KOÇAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Geomatik Programı

Danışman

Doç. Dr. Nedim Onur AYKUT

Kasım, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ YAPILAR İÇİN ÜÇ BOYUTLU BELGELEME
YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

Uğur KOÇAK tarafından hazırlanan tez çalışması 03.11.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nedim Onur AYKUT
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nedim Onur AYKUT, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Burak AKPINAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Oğuz SELBESOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Nedim Onur AYKUT sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Tarihi Yapılar İçin Üç Boyutlu Belgeleme Yöntemlerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Uğur KOÇAK

İmza



Sevgili Annem, Babam, Eşim

ve

Biricik Kızım Ada'ya

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca fikirleri ve yol göstericiliği ile bana destek olan danışmanım Doç. Dr. Nedim Onur AYKUT'a, değerli hocalarım Prof. Dr. Burak AKPINAR'a, Doç. Dr. Oğuz SELBESOĞLU'na ve Doç. Dr. Alper ŞEN'e,

Çalışma alanı olarak seçtiğim Üniversitemiz Davutpaşa yerleşkesinde yer alan ve restorasyonu yeni tamamlanan tarihi Sancak Köşkü'nün kullanımı için YTÜ Rektörlüğü'ne; ölçülerin toplanması için gerekli cihaz ve ekipman desteği sağlayan Limon Proje Mühendislik firmasına,

Tezimin her aşamasında yanımda olan eşim F. Duygu Demir KOÇAK'a, dostum Cumhur ÖZEN'e ve Aileme teşekkür ederim.

Uğur KOÇAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
2 MATERYAL VE YÖNTEM	6
2.1 Çalışma Alanı	6
2.2 Yersel Lazer Tarayıcı	8
2.3 Hava Fotogrametrisi	10
2.4 Yersel Fotogrametri	13
2.5 Mobil LiDAR Destekli Yersel Fotogrametri	15
3 VERİ TOPLAMA VE İŞLEME SÜREÇLERİ	19
3.1 Referans Ölçülerin Yapılması	19
3.2 Yersel Lazer Tarama Verilerinin Toplanması ve İşlenmesi	22
3.3 Hava Fotogrametrisi Verilerinin Toplanması ve İşlenmesi	23
3.4 Yersel Fotogrametrik Verilerin Toplanması ve İşlenmesi	25
3.5 Mobil LiDAR Destekli Fotogrametrik Verilerin Toplanması ve İşlenmesi	27
4 ÇIKTILAR VE KARŞILAŞTIRMA	29
4.1 Çıktılar	29
4.1.1 Nokta Bulutu	29
4.1.2 Cephe Görünüşleri	31
4.2 Sonuç Ürünlerin Karşılaştırılması	34
4.2.1 Boyutsal Doğruluk Analizi	35

4.2.2 Çok Kriterli Karar Analizi.....	38
5 SONUÇ	44
KAYNAKÇA	47
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	50



SİMGELİSTESİ

σ_d	Karesel Ortalama Hata
R	Normalizasyon Matrisi
S	Skor
X	Karar Matrisi
V	Ağırlıklı Normalize Matris
ω_i	Ağırlık

KISALTMA LİSTESİ

3B	Üç Boyutlu
3D	Three Dimensional
AHP	Analytic Hierarchy Process
ALS	Airborne Laser Scanning
AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modeling
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CRS	Close Range Photogrammetry
ÇKKA	Çok Kriterli Karar Analizi
DNG	Digital Negative
EV	Exposure Value
EXIF	Exchangeable Image File Format
FLIR	Forward Looking Infrared
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GCP	Ground Control Point
HDR	High Dynamic Range
HBIM	Heritage Building Information Modeling
IP	Ingress Protection
IP68	Toz geçirmez ve 1.5 metreye kadar su geçirmez
ISO	International Organization for Standardization
JPEG	Joint Photographic Experts Group
KOH	Karesel Ortalama Hata
LiDAR	Light Detection and Ranging
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis

MP	Megapixel
NFC	Near Field Communication
PIX4D	Fotogrametri Yazılımı
RAW	Raw Image Format
RTK	Real-Time Kinematic
SAW	Simple Additive Weighting
SfM	Structure from Motion
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus
WFD	Waveform Digitizing
YKN	Yer Kontrol Noktası

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sancak Köşkü'nün lokasyonu (GoogleEarth)	7
Şekil 2.2 Sancak Köşkü'nün Kuzey cepheden görünümü.....	7
Şekil 2.3 Leica BLK360 (G2) lazer tarayıcı.....	8
Şekil 2.4 DJI Mavic 3E insansız hava aracı	10
Şekil 2.5 İHA ile elde edilen görüntü örnekleri.....	12
Şekil 2.6 Sony A7R yersel kamerası	13
Şekil 2.7 Sony A7R ile elde edilen görüntü örnekleri.....	15
Şekil 2.8 iPhone 15 Pro	17
Şekil 2.9 iPhone 15 Pro ile elde edilen görüntü örnekleri.....	18
Şekil 3.1 Yapı çevresindeki yer kontrol noktalarının RTK GNSS ile ölçümü.....	20
Şekil 3.2 Yapı cephesinde çelik şerit metre ve total station ile yapılan ölçümler ..	21
Şekil 3.3 Leica BLK 360 yersel lazer tarayıcı ile veri toplama.....	22
Şekil 3.4 Yersel lazer tarama işlem raporu.....	23
Şekil 3.5 DJI Mavic3E İHA ile fotoğraf çekimi.....	24
Şekil 3.6 İHA ile toplanan fotoğraf pozisyonlarını gösteren plan	24
Şekil 3.7 PIX4D yazılımında fotogrametrik işlem ve kalite raporu	25
Şekil 3.8 Sony Alpha 7R ile çekilen yüksek çözünürlüklü bir fotoğraf.....	26
Şekil 3.9 Sony Alpha 7R ile çekilen fotoğraf pozisyonlarını gösteren plan.....	26
Şekil 3.10 Sony Alpha 7R verilerin fotogrametrik işlem ve kalite raporu	27
Şekil 3.11 iPhone 15 Pro kamera ve gimbal kullanılarak veri toplanması.....	28
Şekil 3.12 iPhone 15 Pro kamera verilerinin fotogrametrik işlem ve kalite raporu	28
Şekil 4.1 Yersel lazer tarayıcı verisinden üretilen RGB nokta bulutu.....	29
Şekil 4.2 İHA verisinden üretilen RGB nokta bulutu.....	30
Şekil 4.3 Yersel fotogrametri verisinden üretilen RGB nokta bulutu	30
Şekil 4.4 Mobil LiDAR destekli fotogrametri verisinden üretilen RGB nokta bulutu	30
Şekil 4.5 Cloud Compare programında cephe görünüşlerine ait ortofotoların raster formatında üretilmesi için kullanılan ayarlar	32
Şekil 4.6 Yersel lazer tarayıcı verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü.....	32

Şekil 4.7 İHA fotogrametri verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü.....	33
Şekil 4.8 Yersel fotogrametri verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü	33
Şekil 4.9 Mobil LiDAR destekli fotogrametri verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü.....	33
Şekil 4.10 Kuzey ve Batı cepheler üzerinde boyutsal karşılaştırma.....	36



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Leica BLK360 lazer tarayıcı teknik özellikleri.....	9
Tablo 2.2 Leica BLK360 cihazı ile veri toplama sırasında kullanılan ayarlar.....	10
Tablo 2.3 DJI Mavic 3E İHA teknik özellikleri.....	11
Tablo 2.4 DJI Mavic 3E ile veri toplama sırasında kullanılan uçuş ve çekim ayarları	12
Tablo 2.5 Sony A7R teknik özellikleri	14
Tablo 2.6 Sony A7R cihazı ile veri toplama sırasında kullanılan temel ayarlar...	14
Tablo 2.7 iPhone 15 Pro teknik özellikleri.....	16
Tablo 2.8 iPhone 15 Pro cihazı ile veri toplama sırasında kullanılan yazılım ve ayarlar	17
Tablo 4.1 Nokta bulutu özellikleri	31
Tablo 4.2 Boyutsal karşılaştırma.....	37
Tablo 4.3 Cephe görünüş ortofotolarının özellikleri.....	38
Tablo 4.4 Karşılaştırma kriterleri için kullanılacak değerler	40
Tablo 4.5 Kriterlerin önem düzeyleri.....	41
Tablo 4.6 Basit Ağırlıklı Toplama yöntemi performans skoru	43

Tarihi Yapılar için Üç Boyutlu Belgeleme Yöntemlerinin İncelenmesi

Uğur KOÇAK

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nedim Onur AYKUT

Kültürel miras yapılarının belgelenmesi, korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması, tarihî ve mimarî bilginin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sürecin temelini oluşturan belgelemenin, yapıya ilişkin doğru, kapsamlı ve güvenilir veriler üretmesi gerekmektedir. Ancak geleneksel belgeleme yöntemleri; manuel ölçümlere dayanmaları, yüksek zaman ve iş gücü maliyetleri ile insan hatasına açıklıkları nedeniyle karmaşık mimari unsurları yeterli doğrulukla temsil etmekte çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.

Son yıllarda hızla gelişen üç boyutlu dijital belgeleme teknolojileri, kültürel miras alanındaki uygulamalarda önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Lazer tarama, fotogrametri ve mobil LiDAR destekli fotogrametrik yöntemler, yapıların geometrik, mekânsal, doku, yüzey vb. özelliklerini çok yönlü ve ayrıntılı biçimde kaydederek bu verilerin rölöve, restitüsyon ve restorasyon süreçlerinde temel başvuru kaynağı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Literatürde bu teknolojilere yönelik pek çok çalışma bulunmasına karşın, farklı veri toplama yöntemlerinin aynı

yapı üzerinde sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği araştırmalar sınırlıdır.

Bu çalışmanın amacı, benzer kültürel miras yapılarında uygulanan farklı veri toplama teknikleri ile elde edilen üç boyutlu veri kümelerini karşılaştırarak her bir yöntemin boyutsal doğruluk, doku kalitesi, veri toplama ve işleme süreleri ile maliyet açısından güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, insansız hava aracı ile fotogrametri (DJI Mavic 3E), yersel fotogrametri (Sony A7R), yersel lazer tarama (Leica BLK360) ve mobil LiDAR destekli görüntüleme (iPhone 15 Pro) yöntemleri aynı yapı üzerinde uygulanmıştır. Farklı kaynaklardan elde edilen veri setlerinin bütüncül karşılaştırılması, teknolojilerin benzer koşullar altındaki performanslarının nesnel biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamış ve alandaki önemli bir boşluğun giderilmesine katkı sunmuştur.

Elde edilen bulguların, harita mühendisliği, mimarlık, arkeoloji, koruma ve dijital belgeleme gibi disiplinlerde çalışan uzmanlara yöntem seçimi konusunda bilimsel temelli öneriler sunması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kültürel miras, üç boyutlu belgeleme, fotogrametri, lazer tarama, MCDA

ABSTRACT

Examination of Three-Dimensional Documentation Methods for Historical Buildings

Uğur KOÇAK

Department of Geomatic Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nedim Onur AYKUT

The documentation, preservation, and transmission of cultural heritage structures to future generations are of great importance for ensuring the sustainability of historical and architectural knowledge. Documentation, which forms the foundation of this process, is expected to produce accurate, comprehensive, and reliable data regarding the structure. However, traditional documentation methods often fall short in adequately representing complex architectural elements due to their reliance on manual measurements, high time and labor requirements, and susceptibility to human error.

In recent years, the rapid advancement of three-dimensional digital documentation technologies has led to a significant transformation in cultural heritage applications. Methods such as laser scanning, photogrammetry, and mobile LiDAR enable the multifaceted and detailed recording of the geometric, spatial, texture, and surface characteristics of structures, thereby providing essential reference data for survey restitution, and restoration processes. Although the literature includes numerous studies on these technologies, research that systematically and comparatively evaluates different data acquisition methods on the same structure remains limited.

The aim of this study is to compare three-dimensional datasets obtained using various data acquisition techniques applied to similar cultural heritage structures, and to reveal the strengths and limitations of each method in terms of dimensional accuracy, texture quality, data acquisition and processing times, and cost of equipment. In this context, unmanned aerial vehicle–based photogrammetry (DJI Mavic 3E), terrestrial photogrammetry (Sony A7R), terrestrial laser scanning (Leica BLK360), and mobile LiDAR-assisted imaging (iPhone 15 Pro) were applied to the same structure. A holistic comparison of datasets acquired from different sources has enabled an objective evaluation of the technologies' performances under similar conditions and has contributed to addressing a notable gap in the field.

The findings aim to provide scientifically grounded recommendations for experts working in disciplines such as geomatics engineering, architecture, archaeology, conservation, and digital documentation regarding method selection.

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

1 GİRİŞ

Kültürel miras, toplumların tarih boyunca inşa ettiği maddi ve manevi değerlerin toplamı olarak, bir milletin kimliğini, tarihsel belleğini ve kültürel sürekliliğini yansıtan temel bir yapı taşıdır. Bu mirasın korunarak gelecek kuşaklara doğru ve Kültürel miras, toplumların tarih boyunca inşa ettiği maddi ve manevi değerlerin toplamı olarak, bir milletin kimliğini, tarihsel belleğini ve kültürel sürekliliğini yansıtan temel bir yapı taşıdır. Bu mirasın korunarak gelecek kuşaklara doğru ve eksiksiz biçimde aktarılması, yalnızca kültürel bir zorunluluk değil, aynı zamanda bilinç, bilimsel sorumluluk ve sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde değerlendirilmesi gereken kritik bir görevdir. Özellikle tarihi yapılar, anıtlar ve arkeolojik alanlar gibi somut kültürel miras öğeleri; doğal afetler, çevresel bozulmalar ve insan kaynaklı tahribatlar nedeniyle zamanla risk altına girmekte, bu durum söz konusu yapıların sistematik ve hassas bir biçimde belgelenmesini zaruri kılmaktadır.

Bu doğrultuda, kültürel miras yapılarına yönelik belgeleme çalışmaları yalnızca fiziksel korunmayı değil, aynı zamanda restorasyon, dijital arşivleme ve yeniden işlevlendirme süreçlerine de temel teşkil etmektedir. Geleneksel ölçüm yöntemleri çoğunlukla manuel tekniklere veya iki boyutlu çizimlere dayanmakta ve bu süreçler, hem zaman ve maliyet açısından verimsiz olmakta hem de karmaşık mimari detayları yeterince temsil edememektedir. Bu nedenle, kültürel mirasın doğru, hızlı ve detaylı biçimde belgelenebilmesi için çağdaş dijital teknolojilere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Son yıllarda üç boyutlu dijital belgeleme teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, bu alanda önemli bir paradigma değişimine yol açmıştır. Özellikle lazer tarama, fotogrametri ve Mobil LiDAR sistemleri gibi teknolojiler, mimari yapıların mekânsal ve yüzeysel niteliklerini yüksek doğrulukla kayıt altına alabilmekte ve bu

veriler rölöve, restitüsyon ve restorasyon süreçlerinde doğrudan kullanılabilir hale gelmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Türkiye’de bu alanda yapılan uygulamalardan biri Yakar ve Bilgi (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yalnızca bir mobil telefon kullanılarak tarihi bir yapının 3 boyutlu modellemesi gerçekleştirilmiş ve yaklaşık ± 2.5 cm düzeyinde doğruluk elde edilerek, düşük maliyetli dijital yöntemlerin kültürel miras belgelenmesinde anlamlı katkılar sağlayabileceği ortaya konmuştur. Yersel lazer tarayıcıların (TLS) sağladığı hassasiyet, yoğun nokta bulutu üretimi, detaylı yüzey modelleme ve fotogerçekçi görselleştirme olanakları, bu teknolojiyi mimari belgelemenin vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir. Abmayr, vd. (2005), gerçekleştirdikleri çalışmada tarihi yapıların hem geometrik hem de görsel özelliklerinin bütünleşmiş bir biçimde modellenbildiğini ve bu modellerin CAD ortamına entegre edilerek doğrudan mimari planlama süreçlerine aktarılabilirdiğini göstermiştir.

Günümüzde kullanılan dijital belgeleme yöntemleri yalnızca doğruluk açısından değil, aynı zamanda taşınabilirlik, veri toplama süresi ve maliyet etkinliği gibi açılardan da çeşitlilik sunmaktadır. Trier, vd. (2021), hava tabanlı lazer tarama (ALS) ile Faster R-CNN yönteminin entegrasyonu sayesinde geniş ölçekli arkeolojik haritalamalarda başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Laurent, vd. (2025), fotogrametri, fotometrik stereo ve elde taşınan tarayıcıların birlikte kullanımının yüzey detaylarının korunması açısından önemli avantajlar sunduğunu vurgulamıştır. Benzer biçimde, Li, vd. (2023), LiDAR teknolojisinin yakın mesafe fotogrametri, artırılmış gerçeklik (XR), BIM ve yapay zekâ algoritmalarıyla entegrasyonunun belgelenme süreçlerini önemli ölçüde geliştirdiğini ifade etmiştir.

Yöntem karşılaştırmalı çalışmalarda, farklı teknolojilerin performanslarının belirli koşullarda nasıl değiştiği daha net gözlemlenmektedir. Örneğin Moyano, vd. (2022), BLK360 ve RIEGL VZ400i lazer tarayıcılarının performanslarını karşılaştırmış ve taşınabilir, düşük maliyetli sistemlerin belirli toleranslar içinde etkili alternatifler sunduğunu ortaya koymuştur. Nilnoore ve Mizutani (2025), iPhone 13 Pro ile mobil LiDAR teknolojisinin GNSS ve artırılmış gerçeklik altyapısı ile entegrasyonunun, düşük maliyetli ve hızlı veri üretimi için uygun bir çözüm olduğunu göstermiştir. Paukkonen (2023) araştırmasında mobil çözümlerin

pratikliği ve sınırlılıklarını ortaya koymuştur. Kanun, vd. (2021) ise UAV fotogrametrisi ile yüksek doğrulukta 3B modeller üretilebileceğini göstermiştir.

Llabani ve Abazaj (2024), TLS'nin hızlı ve yüksek doğrulukta model üretme kapasitesine dikkat çekerken; Zachos ve Anagnostopoulos (2024), TLS ve UAV fotogrametri entegrasyonunun, dış cephe ve erişimi zor alanların detaylı belgelenmesinde üstün sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Benzer biçimde Türkiye'de yapılan bir uygulamalarda, veri füzyonunun kültürel mirasın dijital belgelenmesindeki katkılarını ortaya koymaktadır. Örneğin şenol vd. (2021), Kanlıdivane bazilikasında hem İHA hem de yersel fotogrametri verilerini birleştirerek yüksek doğruluklu bir 3B model üretmiş ve özellikle üst cephelerin belgelenmesinde İHA kullanımının kritik önem taşıdığını vurgulamıştır. Zakaria, vd. (2025), TLS ve fotogrametri yöntemlerinin birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğunu vurgulamış; Aljadire ve Khalaf (2024) ise mobil LiDAR sistemlerinin hızlı veri üretimi sağlasa da hâlen profesyonel sistemlerin doğruluğuna ulaşmakta sınırlı kaldığını ifade etmiştir. Oprea ve Badea (2025), farklı veri kaynaklarının entegrasyonunun karmaşık yapıların detaylı belgelenmesinde etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymuş; Cupers Schmid, vd. (2024) ise mobil LiDAR sistemlerinin kısa menzilli ve detay odaklı belgeleme süreçlerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Askar ve Sternberg (2023), mobil cihazlarla gerçekteştirilen belgelerin küçük ve orta ölçekli iç mekânlar için uygun olduğunu belirtmiş; Vacca (2023), mobil LiDAR sistemlerinin karmaşık geometrilerde ve detaylı yüzey dokularında hâlâ sınırlılıklar taşıdığını ifade etmiştir. Bolognesi, vd. (2014), UAV ve yersel fotogrametrinin TLS ile kıyaslandığında yaklaşık 3 cm doğruluk sağlayabildiğini göstermiştir. Shults (2017), düşük maliyetli mobil çözümlerin hızlı belgeleme uygulamaları için uygun olduğunu vurgulamıştır. Noguchi, vd. (2023), TLS, mobil LiDAR ve fotogrametri yöntemlerinin farklı ölçeklerdeki kültürel miras uygulamalarındaki avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Hevko, vd. (2024), grafiksel rekonstrüksiyon süreçlerinde düşük maliyetli dijital araçların katkılarını göstermiş; Rodríguez-Gonzálvez, vd. (2017) ise mobil LiDAR yönteminin büyük ölçekli kültürel miras alanlarında kullanım potansiyeline dikkat çekmiştir. Teppati Losè, vd. (2022), mobil LiDAR sistemlerinin hız avantajına rağmen yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda sınırlı kaldığını vurgulamıştır.

UAV tabanlı fotogrametrik sistemler, düşük maliyet, tekrar edilebilirlik ve ulaşılması zor alanlarda veri toplayabilme kapasitesi ile kültürel miras belgelenmesinde alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Everaerts (2008), UAV sistemlerinin farklı coğrafi koşullarda yüksek çözünürlüklü veri üretimindeki potansiyelini vurgulamış ve geleneksel hava platformlarına kıyasla daha esnek ve uygulanabilir çözümler sunduğunu belirtmiştir. Nuttens, vd. (2011), TLS teknolojisinin yüksek doğruluk sağlama kapasitesini sistematik olarak analiz etmiş; Liu, vd. (2023), HBIM süreçlerinde TLS' nin güçlü yönlerinin hibrit yaklaşımlarla desteklenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Grussenmeyer, vd. (2008), lazer tarama, fotogrametri ve geleneksel ölçüm yöntemlerinin doğruluk ve veri yoğunluğu açısından benzer çıktılar sunduğunu, ancak uygulama koşullarına göre teknoloji seçiminin dikkatle yapılması gerektiğini vurgulamıştır.

Bu dönüşümün Türkiye'deki yansımaları Mustafa Korumaz'ın (2016) Aksaray örneğinde gerçekleştirdiği çalışmada da açıkça görülmektedir. Söz konusu çalışma, lazer tarama teknolojisinin üç boyutlu modelleme, sanal tur üretimi ve restorasyon altyapısı oluşturmadaki katkılarını gösterirken; bu teknolojilerin kullanımında karşılaşılan yapısal ve kurumsal sınırlılıkları da kapsamlı biçimde tartışmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Literatürde dijital belgelenme teknolojileriyle gerçekleştirilen çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, farklı veri toplama yöntemlerinin aynı yapı üzerinde doğrudan karşılaştırıldığı, bu yöntemlerin sistematik olarak doğruluk, çözünürlük, estetik kalite, uygulama süresi ve maliyet açısından değerlendirildiği çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının temel amacı; Tarihi Sancak Köşkü üzerinde, hava fotogrametrisi, yersel fotogrametri, yersel lazer tarama ve Mobil LiDAR destekli teknolojiler kullanılarak elde edilen iki boyutlu ve üç boyutlu veri setlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmek ve bu yöntemlerin her birinin uygulama koşulları ve sonuç ürün özelliklerine göre sunduğu avantaj ve sınırlılıkları belirlemektir. Bu kapsamlı değerlendirme ile, kültürel miras belgelemesine yönelik uygun teknoloji seçimine ilişkin teknik temelli, uygulanabilir ve literatüre katkı sunan öneriler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışması ile tarihi bir yapının üç boyutlu belgelenmesinde kullanılan, yersel lazer tarama, hava fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve mobil LiDAR destekli fotogrametri yöntemlerinin performansları, temel kriterler dikkate alınarak karşılaştırılarak boyutsal ölçümler için doğruluk analizi ve Çok Kriterli Karar Analizi (MCDA) yaklaşımı ile hangi yöntemin veya yöntemlerin kullanımının daha efektif olduğu araştırılmıştır.

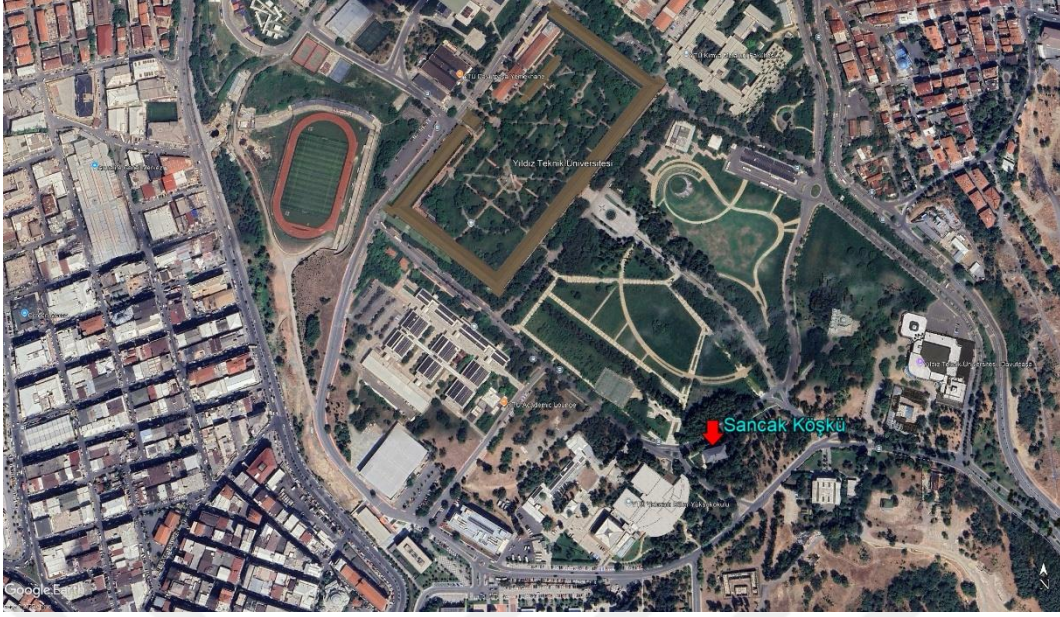


2 MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma kapsamında incelenen yapı, İstanbul'un Esenler ilçesinde konumlanan ve Osmanlı dönemine ait önemli bir kültürel miras ögesi olan Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa yerleşkesi içerisinde yer alan Sancak Köşkü'dür. Mimari özellikleri itibarıyla, dönemin estetik anlayışını ve yapı teknolojilerini yansıtan köşk; özgün plan düzeni, süsleme detayları ve kullanılan yapı malzemeleri açısından mimarlık tarihi açısından dikkat çekici örneklerden biri olarak değerlendirilmektedir. Osmanlı döneminde idari veya gözetim amaçlı kullanıldığı düşünülen yapı, 19. yüzyılda Davutpaşa Kışlası'nın askerî işlev doğrultusunda yeniden yapılandırılması sürecinde kullanım dışı kalmıştır. Bu tarihten itibaren uzun yıllar boyunca âtil durumda kalan Sancak Köşkü, çevresel faktörler, fiziksel yıpranma ve insan kaynaklı müdahaleler nedeniyle ciddi ölçüde tahrip olmuştur. Yapının kapsamlı restorasyon çalışmaları 2024 yılında tamamlanmış ve günümüzdeki durumuna kavuşturulmuştur.

Bu çalışma, hem söz konusu yapının mevcut fiziksel durumunun belgelenmesini sağlamak, hem de gelecekte gerçekleştirilecek rölöve, restitüsyon ve restorasyon çalışmalarına bilimsel bir temel oluşturmak amacıyla planlanmıştır. Üç boyutlu dijital belgeleme tekniklerinin kullanıldığı bu süreçte, yapı üzerindeki özgün mimari öğelerin korunması ve kültürel miras bilincinin artırılması hedeflenmektedir. Böylelikle, Sancak Köşkü'nün korunarak gelecek kuşaklara aktarılması yönündeki çabalar, çağdaş teknolojik olanaklarla desteklenmiş, disiplinler arası ve sürdürülebilir bir yaklaşım çerçevesinde ele alınmıştır.



Şekil 2.1 Sancak Köşkü'nün lokasyonu (GoogleEarth)



Şekil 2.2 Sancak Köşkü'nün Kuzey cepheden görünümü

Bu çalışma kapsamında kullanılan veri toplama sistemleri, kültürel miras yapılarına ait üç boyutlu (3B) belgeleme süreçlerinde doğruluk, çözünürlük, erişilebilirlik,

veri toplama ve işleme süresi gibi parametreler dikkate alınarak seçilmiştir. Her bir sistemin teknik kabiliyetleri, kullanım alanları ve operasyonel avantajları farklılık göstermekte olup, çok kaynaklı veri üretimi açısından birbirlerini tamamlayıcı niteliktedir.

2.2 Yersel Lazer Tarayıcı

Yersel lazer tarama verileri, Tablo 2.1’de detaylı teknik özellikleri sunulan Leica BLK360 G2 cihazı kullanılarak toplanmıştır (Şekil 2.3). Tam küresel tarama kapasitesine sahip olan bu sistem, yüksek doğrulukta ve yoğunlukta nokta bulutu üretimi sağlayan Uçuş Süresi Ölçümü Tekniği (ToF) ve Dalgaboyu Sayılaştırma (Waveform Digitizing) teknolojilerini bir araya getirmektedir. Kompakt yapısı, IP54 dayanıklılık sınıfı ve kablosuz kontrol özellikleri sayesinde sahada taşınabilirlik ve operasyonel verimlilik açısından kullanıcı dostu bir çözüm sunmuştur.



Şekil 2.3 Leica BLK360 (G2) lazer tarayıcı

Tablo 2.1 Leica BLK360 lazer tarayıcı teknik özellikleri (Leica, 2017)

Özellik Kategorisi	Teknik Özellikler
Fiziksel Tasarım	Yükseklik: 165 mm, Çap: 100 mm, Ağırlık: 1 kg
Montaj Mekanizması	Tek tuşla hızlı serbest bırakma sistemi
Kontrol	iPad Pro® ile kablosuz kontrol (iOS 10+) veya tek tuşla kullanım
Tarama Sistemi	Time-of-Flight (ToF) + Waveform Digitizing (WFD)
Tarama Açısı	Yatay: 360°, Dikey: 300°
Menzil	0.6 m – 60 m
Tarama Hızı	360.000 nokta/sn
Mesafe Doğruluğu	±4 mm @ 10 m, ±7 mm @ 20 m
3B Nokta Doğruluğu	±6 mm @ 10 m, ±8 mm @ 20 m
Kamera Sistemi	3 x 15 MP kamera, HDR, 150 MP küresel panorama
Termal Görüntüleme	FLIR tabanlı, 360° x 70° termal panorama
Koruma Sınıfı	IP54 – Toz ve su sıçramasına karşı korumalı
Çalışma Sıcaklığı	+5°C ila +40°C
Batarya Kapasitesi	40+ kurulum (Li-Ion batarya, Leica GEB212)
Fiyat	~30.000 USD

Tablo 2.2 Leica BLK360 cihazı ile veri toplama sırasında kullanılan ayarlar
(Leica, 2017)

Parametre	Ayarlanan Değer
Tarama Detay Modu	Yüksek Detay Modu
Görüntü Tipi	Renkli Tarama

2.3 Hava Fotogrametrisi

Hava tabanlı görüntü verilerinin elde edilmesi amacıyla, bu çalışmada Tablo 2.3'te teknik detayları sunulan DJI Mavic 3 Enterprise (M3E) insansız hava aracı kullanılmıştır (Şekil 2.4). 4/3 inç CMOS sensörlü 20 MP kamerası ve mekanik deklanşör özelliği sayesinde yüksek çözünürlükte ve bulanıklıktan arındırılmış görüntü verisi elde edilmiştir. RTK modülüyle birlikte kullanıldığında santimetre düzeyinde konumsal doğruluk sunan M3E, özellikle çatı gibi erişimi kısıtlı alanların belgelenmesinde kritik bir rol oynamıştır. Uzun uçuş süresi, geniş menzil ve çok yönlü engel algılama kabiliyeti sayesinde zorlu saha koşullarında dahi kararlı ve güvenilir bir uçuş performansı sergilemiştir.



Şekil 2.4 DJI Mavic 3E insansız hava aracı

Tablo 2.3 DJI Mavic 3E İHA teknik özellikleri (DJI, 2023)

Özellik Kategorisi	Teknik Detaylar
Ağırlık	915 g (kalkış ağırlığı: 1050g)
Boyutlar (Katlanmış)	221×96.3×90.3 mm
Kamera Sensörü	4/3" CMOS, 20 MP
Lens Özellikleri	24 mm eşdeğer, f/2.8–f/11 diyafram, 1 m – ∞ netleme
Maks. Görüntü Boyutu	5280×3956 piksel
Pozlama süresi	Elektronik: 1/8000 s, Mekanik: 1/2000 s
Fotoğraf Formatları	JPEG, DNG (RAW)
Video Aktarımı	1080p/30fps (O3 Enterprise ile)
GNSS Sistemleri	GPS + Galileo + BeiDou + GLONASS (RTK ile birlikte)
RTK Hassasiyeti	Yatay: ±1 cm, Düşey: ±1.5 cm
Uçuş Süresi (maks.)	45 dakika
Uçuş Menzili (maks.)	32 km
Pozisyonlama Hassasiyeti	Yatay: ±0.3 m, Düşey: ±0.1 m (Vision); RTK ile ±0.1 m
Çalışma Sıcaklığı	-10°C – +40°C
Engel Algılama	360° çok yönlü (ön, arka, yan, üst, alt)
İletişim	Kablosuz görüntü iletimi, canlı veri izleme (1080p)
Fiyat	~4.000 USD

Tablo 2.4 DJI Mavic 3E ile veri toplama sırasında kullanılan uçuş ve çekim ayarları (DJI, 2023)

Parametre	Ayarlanan Değer
Uçuş İrtifası	40m irtifa
Uçuş Yönetimi	Oblik + Nadir Uçuş



Şekil 2.5 İHA ile elde edilen görüntü örnekleri

Şekil 2.5’te DJI Mavic 3E insansız hava aracı tarafından çekilen görüntü örnekleri sunulmaktadır.

2.4 Yersel Fotogrametri

Çalışma kapsamındaki yersel fotogrametrik görüntüler, teknik detayları Tablo 2.5’te sunulan Sony ILCE-7R (Alpha 7R) model aynasız dijital fotoğraf makinesi ile elde edilmiştir (Şekil 2.6). Cihaz, 36.4 megapiksel çözünürlüğe sahip 35 mm tam kare Exmor® CMOS sensörü sayesinde, yüksek detay seviyesinde görüntü verisi sağlanmıştır. RAW ve JPEG formatlarında kayıt imkânı sunan cihaz, BIONZ X görüntü işlemcisi ile yüksek dinamik aralık ve renk doğruluğu sağlamıştır. Geniş ISO aralığı sayesinde düşük ışık koşullarında bile yüksek kaliteli görüntüler elde edilmiştir.

Sahada sabit odak uzaklığına sahip geniş açılı bir lens ile kullanılan cihaz, kontrast algılamalı 25 noktalı otomatik netleme sistemi ve manuel ayarlar desteği ile farklı çekim senaryolarında esnek kullanım olanağı sunmuştur. Görüntü toplama sürecinde belirli örtüşme oranları korunarak sistematik çekimler yapılmış ve bu görüntüler, taş detayları, süsleme elemanları ve küçük mimari öğelerin belgelenmesinde yüksek çözünürlük avantajı sağlamıştır. Ancak, ölçülebilir ve doğrulanabilir geometrik veri üretimi için yer kontrol noktaları (YKN) ile destekleme yapılmıştır. Taşınabilirliği, eğilebilir ekranı ve geniş vizör alanı sayesinde ILCE-7R, uzun süreli saha çalışmaları için ergonomik bir çözüm sunmuştur. Şekil 2.7’de bu kamera ile çekilen görüntü örnekleri verilmektedir.



Şekil 2.6 Sony A7R yersel kamerası

Tablo 2.5 Sony A7R teknik özellikleri (Sony, 2023)

Özellik Kategorisi	Teknik Detaylar
Sensör Tipi	35 mm full-frame Exmor® CMOS
Efektif Çözünürlük	36.4 megapiksel
Maks. Görüntü Boyutu	7360 × 4912 piksel (3:2 oran)
ISO Aralığı	ISO 50 – 25600
Netleme Sistemi	25 noktalı kontrast algılamalı AF, manuel netleme (MF) destekli
Pozlama Aralığı	1/8000 s – 30 s, ±5 EV pozlama telafisi
Görüntü İşlemcisi	BIONZ X™
Görüntü Formatları	RAW (Sony ARW 2.3), JPEG (Standard, Fine, Extra Fine)
LCD Ekran	3.0 inç, 921.600 nokta, eğilebilir (↑90°, ↓45°)
Vizör	0.5 inç elektronik vizör, 2.36 milyon nokta, %100 kapsama
Ağırlık	465 g
Bağlantılar	Multi/Micro USB, HDMI, Wi-Fi, NFC
Gövde Yapısı	Kompakt ve Taşınabilir
Fiyat	~3.000 USD

Tablo 2.6 Sony A7R cihazı ile veri toplama sırasında kullanılan temel ayarlar

Parametre	Ayarlanan Değer
Çekim Modu	Otomatik (Auto Mode)
Netleme Modu	Otomatik Netleme (Autofocus)
Görüntü Formatı	RAW + JPEG



Şekil 2.7 Sony A7R ile elde edilen görüntü örnekleri

2.5 Mobil LiDAR Destekli Yersel Fotogrametri

Mobil LiDAR destekli yersel fotogrametri tekniği, teknik özellikleri Tablo 2.7’de sunulan Apple iPhone 15 Pro cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). LiDAR sensörü ile bütünleşik çalışan çok kameralı sistemi sayesinde cihaz, özellikle tripod kullanımının sınırlı olduğu dar alanlar ve iç mekânlar gibi erişilmesi güç bölgelerde etkili bir veri toplama aracı olarak değerlendirilmiştir. 48 MP çözünürlüğündeki ana kamerası ve destekleyici ultra geniş ile telefoto lensleri, detaylı ve yüksek çözünürlüklü görsel veri üretimine olanak sağlamıştır.

LiDAR destekli derinlik haritalama kapasitesi, ARKit uyumlu uygulamalar (Polycam, Luma AI vb.) aracılığıyla 3B nokta bulutu ve mesh veri üretimini mümkün kılmış; bu yönüyle cihaz hem hızlı tarama hem de anında görselleştirme açısından önemli avantajlar sunmuştur. Apple ProRAW ve ProRes gibi gelişmiş kayıt formatları ile renk doğruluğu ve doku detaylarında yüksek kalite sağlanmış, HDR destekli Dolby Vision video kaydı ise görsel belgelendirme süreçlerini desteklemiştir.

A17 Pro çip ve 16 çekirdekli Neural Engine işlemcisi ile iPhone 15 Pro, mobil ortamda gerçek zamanlı veri işleme ve çıktı üretimi gerçekleştirebilmiş; bu da sahadaki operasyonel hız ve esnekliği artırmıştır. IP68 sertifikası, 187 gramlık hafif yapısı ve yüksek çözünürlüklü ekranı ile saha koşullarına uyum sağlayan cihaz, taşınabilirlik ve erişilebilirlik açısından mobil belgeleme süreçlerine önemli katkılar sunmuştur. Ancak, geleneksel LiDAR sistemlerine kıyasla menzil ve geometrik doğruluk açısından belirli sınırlamalar içerdiği göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 2.9’da iPhone 15 Pro tarafından çekilen görüntülere örnekler verilmiştir.

Tablo 2.7 iPhone 15 Pro teknik özellikleri (Apple, 2023)

Özellik Kategorisi	Teknik Detaylar
Ağırlık	187 g
Boyutlar	146.6 × 70.6 × 8.25 mm
Ekran	6.1” Super Retina XDR OLED, 2556×1179 px, 460 ppi
Kamera Türü	Ana Kamera
Çözünürlük	48 MP - 8000x6000 px
Video Çözünürlüğü	2160p 4K, Ultra HD, UHD (3840 x 2160 piksel)
Sensör tipi	CMOS (complementary metal-oxide semiconductor)
f no / diyafram açıklığı	f/1.8
Odak Uzaklığı:	24 mm
Piksel Boyutu	1.22 µm
Kamera Türü	İkinci Arka Kamera (Telephoto Kamerası)
Çözünürlük	12 MP
f no / diyafram açıklığı	f/2.8
Odak Uzaklığı:	77 mm
Piksel Boyutu	1.0 µm
Kamera Türü	Üçüncü Arka Kamera (Ultrawide)
Çözünürlük	12 MP
f no / diyafram açıklığı	f/2.2
Odak Uzaklığı:	13 mm
Piksel Boyutu	1.4 µm
Sensör Türü	LiDAR Scanner
Çözümleme	dToF (direct time-of-flight)
Image Sensor	SPAD (940 nm)
Driver	ASIC
Ek Sensör	Işık Sensörü
Ek Sensör	İvme Ölçer
Ek Sensör	Pusula
Ek Sensör	Gyrometre
Ek Sensör	Barometre
Fiyat	~1.800 USD



Şekil 2.8 iPhone 15 Pro

Tablo 2.8 iPhone 15 Pro cihazı ile veri toplama sırasında kullanılan yazılım ve ayarlar

Yazılım	Pix4D Catch
Parametre	Ayarlanan Değer
Netleme Modu	Otomatik Netleme (Autofocus)
Görüntü Çözünürlüğü	Maksimum Çözünürlük
Görüntü Bindirmesi	%80



Şekil 2.9 iPhone 15 Pro ile elde edilen görüntü örnekleri

3

VERİ TOPLAMA VE İŞLEME SÜREÇLERİ

3.1 Referans Ölçülerin Yapılması

Kültürel miras alanlarında gerçekleştirilen ölçme, modelleme ve değerlendirme süreçlerinde, farklı sensör teknolojilerinden elde edilen ham verilerin doğrudan karşılaştırılması çoğu zaman mümkün değildir. Bunun temel nedeni, her sensör tipinin farklı veri formatları, çözünürlükleri, gürültü seviyeleri ve konumlama yaklaşımlarına sahip olmasıdır. Bu nedenle, saha çalışmaları kapsamında elde edilen veriler, analiz ve bütünleşik değerlendirme aşamalarına geçilmeden önce çeşitli yazılımlar kullanılarak çok aşamalı bir veri işleme sürecinden geçirilmiştir. Her donanıma ve sensöre özgü bu iş akışları; veri temizleme, gürültü azaltma, hizalama, filtreleme, nokta yoğunluğu düzenleme, yüzey oluşturma, model genelleştirme ve son kontrol gibi adımları içermektedir. Söz konusu işlemler, kullanılan sensörün teknolojik yapısına (örneğin lazer tarayıcı, fotogrametrik kamera, termal kamera veya GNSS tabanlı sistem) bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Her bir yöntem için ayrı bir veri işleme protokolünün uygulanması hem model kalitesinin artırılmasına hem de sensörler arası veri karşılaştırmalarının güvenilirliğine önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Buna ek olarak, farklı yöntemlerle üretilen modellerin tek bir ortak koordinat sistemine taşınabilmesi için jeodezik doğruluk gereksinimlerini karşılayacak bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda, tarihi yapı ve çevresinde gerçekleştirilen jeodezik ölçmeler referans veri olarak değerlendirilmiş ve doğruluk analizlerinin temel bileşenini oluşturmuştur.

Tüm veri kümelerinin tutarlı ve karşılaştırılabilir bir referans sisteminde tanımlanabilmesi için yapı üzerinde hedef noktalarından oluşan bir kontrol ağı kurulmuştur. Yapı cepheleri üzerinde yer alan kontrol noktaları hem yersel

fotogrametri hem de hava fotogrametrisi sırasında çekilen görüntülerde konum referansı olarak kullanılmış; böylelikle sensörlerden bağımsız bir mekânsal bütünlük sağlanmıştır. Tarihi yapı çevresinde, yapı üzerine yapıştırılan hedef noktalarını da görecektek şekilde yer kontrol noktaları (YKN) tesis edilmiştir. YKN noktaları arasında bir poligon ağı kurulmuştur. Ayrıca, YKN noktalarının koordinat değerleri gerçek zamanlı kinematik GNSS yöntemi kullanılarak ülke koordinat sisteminde de belirlenmiştir (Şekil 3.1). Mevcut çalışmalara ek olarak yapılan ölçmeler 26.08.2025 tarihinde tamamlanmıştır. Jeodezik kontrol ağının oluşturulması, yalnızca fotogrametrik modellemenin güvenilirliğini artırmakla kalmamış; aynı zamanda lazer tarama verilerinin konumlandırılmasında da kritik bir rol oynamıştır. Kontrol noktalarının yapı üzerindeki homojen dağılımı ve yersel yöntemlerle yüksek doğruluklu ölçümleri, özellikle model karşılaştırmalarında ortaya çıkabilecek konumsal kaymaları en aza indirmiş; sonuç olarak, bütünleşik analizlerin güvenilirliği, doğruluğu ve tekrarlanabilirliği önemli ölçüde geliştirilmiştir.



Şekil 3.10 Yapı çevresindeki yer kontrol noktalarının RTK GNSS ile ölçümü



Şekil 3.11 Yapı cephesinde çelik şerit metre ve total station ile yapılan ölçümler

Şekil 3.2’de görüleceği üzere, YKN noktalarından yapının cephesinde bulunan kontrol noktalarına ve yapının karakteristik noktalarına total station cihazı ile doğrultu ve kenar ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca yapı cephesindeki pencerelerin genişliği, demir parmaklık, vb. detayların boyutları çelik şerit metre yardımıyla ölçülmüştür.

3.2 Yersel Lazer Tarama Verilerinin Toplanması ve İşlenmesi

Tarihi yapının yersel lazer tarama ölçmeleri Leica BLK360 G2 model lazer tarayıcısı ile yapılmıştır (Şekil 3.3). Ölçmelerde yapı çevresinde 49 adet istasyon kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu istasyonlardaki ölçümlerde veri toplama işlemi yüksek tarama yoğunluğu ayarında ve RGB renk modunda yapılmıştır.



Şekil 3.12 Leica BLK 360 yersel lazer tarayıcı ile veri toplama

Toplanan veriler, Leica Geosystems firması tarafından geliştirilmiş olan Cyclone Register 360 yazılımı ile işlenmiştir. Tarama noktaları arasındaki hizalama işlemi 49 adet istasyon arasında 57 adet üretilmiş bulut-bulut tabanlı eşleştirme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir; ardından global optimizasyon uygulanarak veriler üç boyutlu bütüncül bir modele dönüştürülmüştür. Elde edilen nokta bulutu verileri e57 formatında dışa aktarılmıştır. Tarihi yapıyı, yapı çevresindeki lazer tarayıcı

kurulan istasyon noktalarını ve kayıt işlemlerinin doğruluğunu, kalite metriklerini ve kullanılan yöntemleri özetleyen rapor örneği Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Yersel lazer tarama işlem raporu

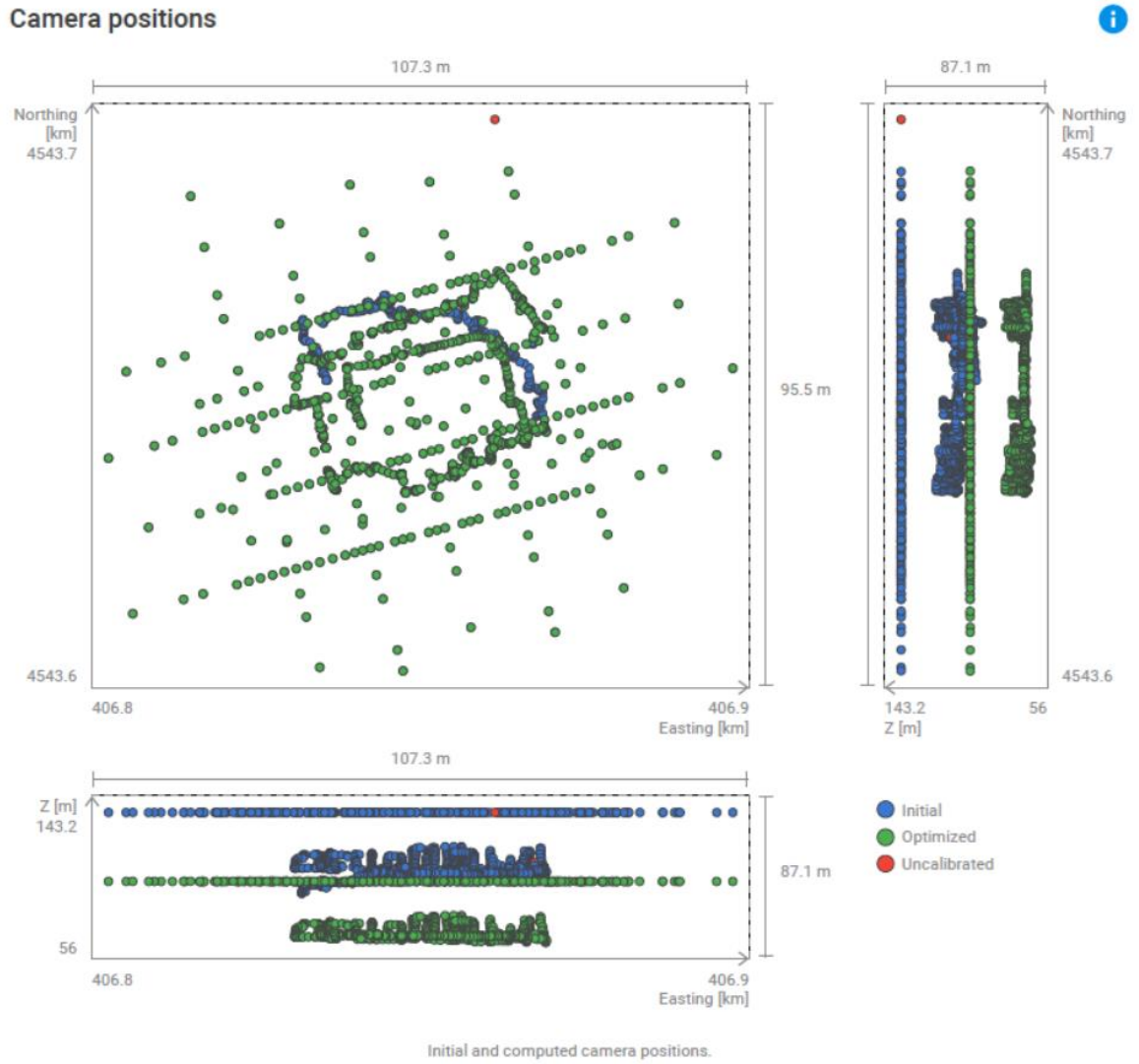
3.3 Hava Fotogrametrisi Verilerinin Toplanması ve İşlenmesi

Tarihi yapının görüntüleri, DJI Mavic 3 Enterprise model insansız hava aracı ile otonom ve manuel uçuşlar yapılarak çekilmiştir (Şekil 3.5). Yapı üstünde ve çevresinde nadir ve oblik otonom uçuşlar yapılmıştır. Buna ek olarak yapı cephelerinde manuel uçuşlarla ek fotoğraflar toplanmıştır (Şekil 3.6). Bu aşamada toplam 1315 adet fotoğraf kaydedilmiştir (Şekil 3.7). Bu fotoğraflar PIX4Dmatic

yazılımı ile, yapı üzerindeki kontrol (hedef) noktaları kullanılarak dengeleme işlemine tabii tutulmuş ve tarihi yapının üç boyutlu nokta bulutu verisi üretilmiştir.



Şekil 3.14 DJI Mavic3E İHA ile fotoğraf çekimi



Şekil 3.15 İHA ile toplanan fotoğraf pozisyonlarını gösteren plan

Quality Report

PIX4Dmatic v1.81.0



Camera	DJI_M3E_12.3_5280x3956
Area covered	1.330 ha
Average GSD	0.2 cm
Project CRS	TUREF / TM30 - EPSG:5254
Dense point count	81,473,527

Quality check

Matches	Median of 11498 matches per calibrated image	
Dataset	99.77% calibrated (1312/1315 images), 2 calibration blocks	
Camera optimization	0.04% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
GCPs	23 GCPs, Mean RMS position error 0.005 m / Sigma 0.005 The GCP position error is less than 1.5 times the average GSD.	
aITPs	546 aITPs, RMS reprojection error 0.9 px / Sigma 0.9 The aITPs reprojection error is less than 1 px.	
ATPs	3720651 ATPs	

Şekil 3.16 PIX4D yazılımında fotogrametrik işlem ve kalite raporu

3.4 Yersel Fotogrametrik Verilerin Toplanması ve İşlenmesi

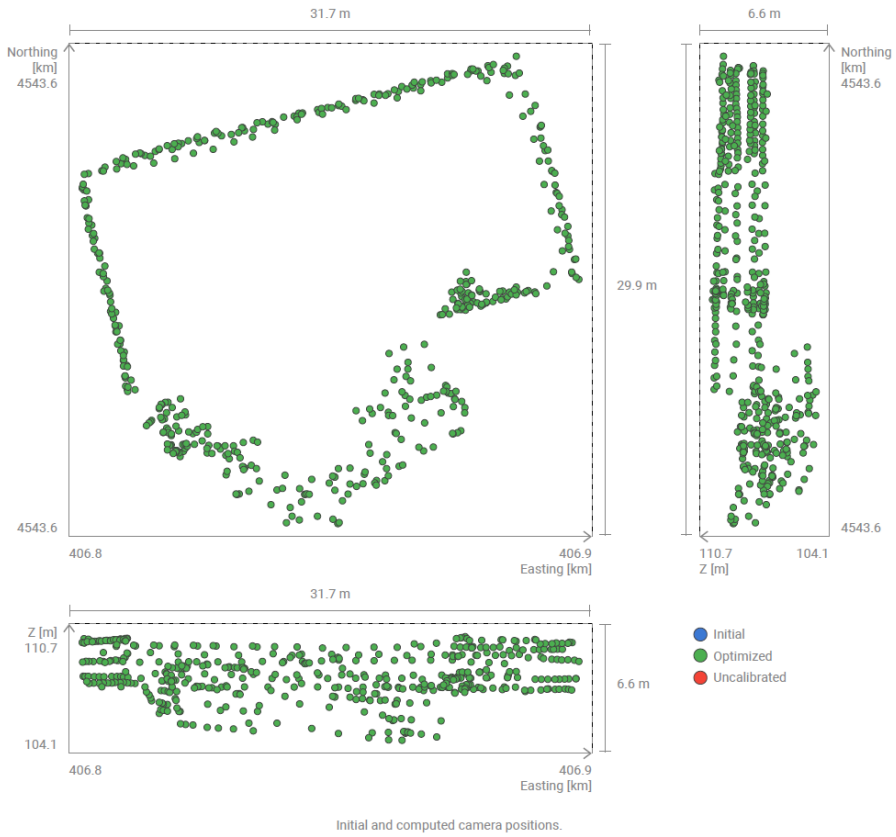
Yapı çevresinde Sony ILCE-7R (Alpha 7R) model dijital fotoğraf makinesi ile 509 adet fotoğraf çekilmiştir (Şekil 3.8). Fotoğraf çekimleri esnasında, yapının zemin katı kotundaki kısımlarından veri toplanırken fotoğraf makinesi elde kullanılmıştır. Ancak yapının insan boyundan yüksek kısımlarının çekimleri için 3 metreye kadar uzayabilen bir monopod ve deklanşör uzatma kablosundan yararlanılmıştır. Böylece yapının cephelerinden alınan fotoğraflar genel olarak tam karşıdan ve öngörülen bindirme oranlarına uygun şekilde çekilmiştir (Şekil 3.9).

Bu fotoğraflar birbirleriyle yapı üzerinde farklı noktalarda yer alan kontrol noktaları yardımıyla bilgisayar ortamında PIX4Dmatic yazılımında bütünleştirilmiş ve dengeleme işlemi sonrasında yapının yüksek çözünürlükte 3 boyutlu nokta bulutu verisi üretilmiştir. Şekil 3.10'da yer alan fotogrametrik işlem raporunda, Sony ILCE-7R ile toplanan verilerin koordinat sistemine, kapladığı alana, yer kontrol noktalarındaki hata değerine ve veri kalitesine ilişkin sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 3.17 Sony Alpha 7R ile çekilen yüksek çözünürlüklü bir fotoğraf

Camera positions



Şekil 3.18 Sony Alpha 7R ile çekilen fotoğraf pozisyonlarını gösteren plan

Quality Report

PIX4Dmatic v1.81.0



Camera	Generic_SONY_ILCE7R_FE35mmF2.8ZA_35.0_7360x4912
Area covered	1850.574 m²
Average GSD	<0.1 cm
Project CRS	TUREF / TM30 - EPSG:5254
Dense point count	85,884,170

Quality check

Matches	Median of 10762 matches per calibrated image	✓
Dataset	95.87% calibrated (488/509 images), 1 calibration block	✓
Camera optimization	1.33% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
GCPs	50 GCPs, Mean RMS position error 0.009 m / Sigma 0.009 The	✓
aITPs	92 aITPs, RMS reprojection error 0.7 px / Sigma 1.2	✓
ATPs	2015955 ATPs	

Şekil 3.19 Sony Alpha 7R verilerin fotogrametrik işlem ve kalite raporu

3.5 Mobil LiDAR Destekli Fotogrametrik Verilerin Toplanması ve İşlenmesi

iPhone 15 Pro cihazı ile PIX4Dcatch yazılımı kullanılarak otonom şekilde yapının 768 adet fotoğrafı çekilmiştir (Şekil 3.11). Bu yöntemde kullanılan sensör veri toplama esnasında sürekli olarak hareket ettirilmektedir. Bu sebeple cihazın elde tutularak işlemin yapılması durumunda oluşabilecek ani hareketler, yön değişimleri, titreşimler vb. etkilerin cihazın içindeki jiroskop, ivmeölçer, LiDAR vb. sensörleri ile toplanan veriler üzerindeki etkisini minimum düzeyde tutmak için bir gimbal (dengeleyici) kullanılmıştır (Şekil 3.11). Hareket halindeyken otonom şekilde çekilen fotoğraflarda gimbal kullanımı sayesinde sürüklenme, flu alanlar vb. düşük kaliteli veri toplanması riski de azaltılmıştır.

PIX4Dcatch yazılımı tarafından hazırlanan iPhone 15 Pro kamera verilerinin fotogrametrik işlem ve kalite raporu Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.20 iPhone 15 Pro kamera ve gimbal kullanılarak veri toplanması

YTU sancak

Quality Report

PIX4Dmatic v1.81.0

PIX4D

Camera	Apple_PIX4Dcatch.IPhone16.1_iOS_3.5_4032x3024
Area covered	779.553 m²
Average GSD	0.1 cm
Project CRS	TUREF / TM30 + Antalya height - EPSG:5254+5775 [Geoid height ~ -73.386 m]
Dense point count	23,560,401
Depth point count	1,480,649

Quality check ⓘ

Matches	Median of 7925 matches per calibrated image	✓
Dataset	100% calibrated (768/768 images), 1 calibration block	✓
Camera optimization	0.18% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
GCPs	23 GCPs, Mean RMS position error 0.009 m / Sigma 0.009	✓
aITPs	7 aITPs, RMS reprojection error 2.6 px / Sigma 0.5	✓
ATPs	804785 ATPs	

Şekil 3.21 iPhone 15 Pro kamera verilerinin fotogrametrik işlem ve kalite raporu

4.1 Çıktılar

Tarihi Sancak Köşkü'nün, yersel lazer tarama, İHA fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve mobil LiDAR destekli yersel fotogrametri yöntemleri kullanılarak elde edilen çıktılar, nokta bulutu ve cephe ortofotoları şeklinde iki kısımda incelenmiştir.

4.1.1 Nokta Bulutu

Her bir yöntemin verileri ayrı ayrı işlendikten sonra Sancak Köşkü'nün dış alanlarına ait nokta bulutu verileri üretilmiştir. Bu veriler .las formatında dışa aktarılarak farklı programlarda açılıp incelenebilir formata dönüştürülmüştür. Nokta bulutu verileri açık kaynak kodlu Cloud Compare programında incelenerek yapıya ait nokta bulutları, yersel lazer tarama, İHA fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve mobil LiDAR destekli fotogrametrik ölçme yöntemlerine dayalı olarak sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.1 Yersel lazer tarayıcı verisinden üretilen RGB nokta bulutu



Şekil 4.2 İHA verisinden üretilen RGB nokta bulutu



Şekil 4.3 Yersel fotogrametri verisinden üretilen RGB nokta bulutu



Şekil 4.4 Mobil LiDAR destekli fotogrametri verisinden üretilen RGB nokta bulutu

Söz konusu nokta bulutu verilerine ait nokta sayısı, veri boyutu, yapıda belgelenebilmiş alan miktarları (yüzdesel oran) gibi özellikler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

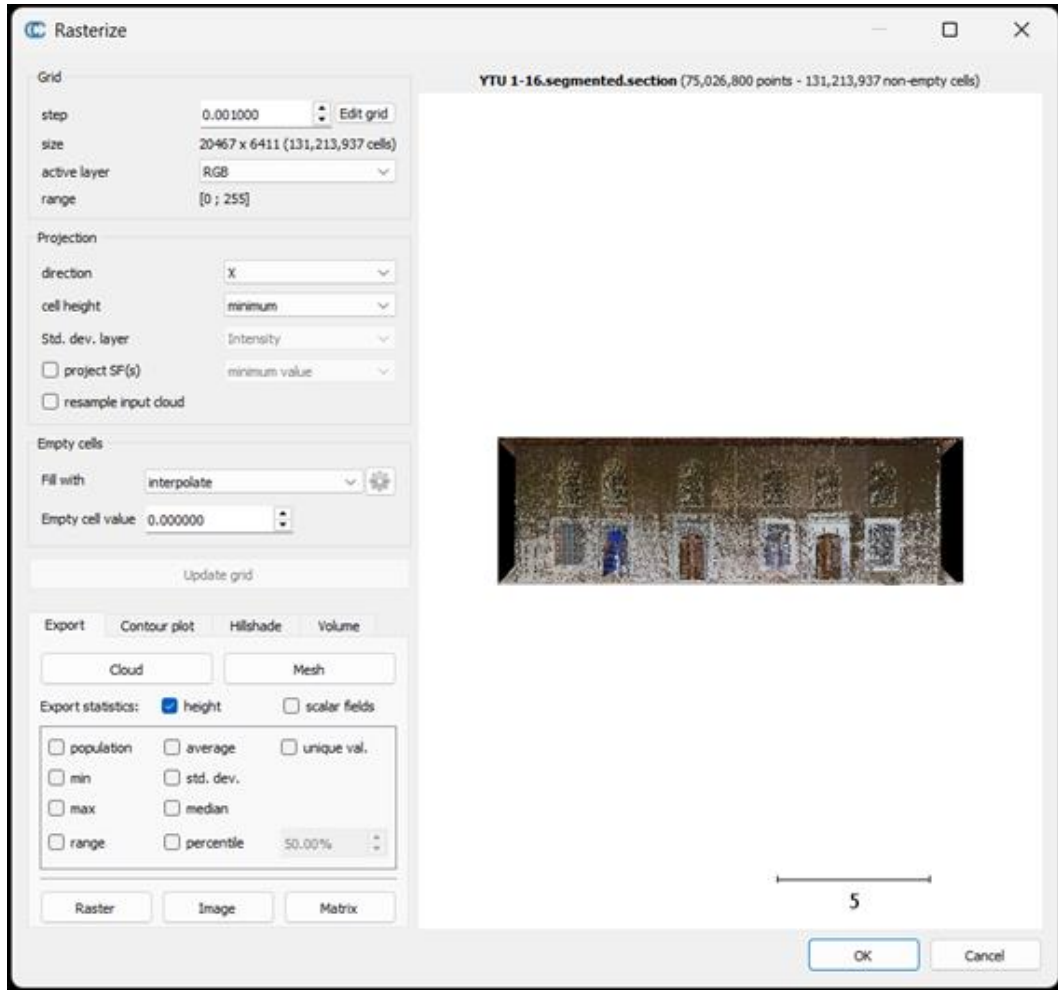
Tablo 4.1 Nokta bulutu özellikleri

Yöntem / Özellikler	Yersel Lazer Tarayıcı	İHA Fotogrametri	Yersel Fotogrametri	Mobil LiDAR Destekli Fotogrametri
Nokta Sayısı	674,219,607	71,917,355	105,884,170	75,560,401
Veri Boyutu (MB)	18,518	580	5,915	2,554
Düz Yüzeylerde Ortalama Nokta Yoğunluğu (adet/m2)	~822,000	~146,000	~251,000	~164,000
Belgelenen Alan Yüzdesi	%81	%95	%88	%89
Belgelenemeyen Alanlar (Açıklama)	Çatı üst bölgeleri	Çatı Saçak İç Tavanları (kısmen)	Çatı üst bölgeleri (kısmen)	Çatı üst bölgeleri (kısmen)

4.1.2 Cephe Görünüşleri

Elde edilen üç boyutlu nokta bulutu verilerinden, yapının kuzey ve batı cephelerine ait 2 boyutlu görünüş ortofotoları üretilmiştir. Bu ortofotolar Cloud Compare programında her biri için Şekil 4.5’te görülen aynı parametreler ve ayar setleri kullanılarak üretilmiştir. Böylelikle, sonuç ortofoto ürünlerine ait özellikler, yazılım imkân ve kabiliyetlerinden kaynaklı oluşabilecek farklılıklardan etkilenmeden belirlenebilmiştir.

Yersel lazer tarama, İHA fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve mobil LiDAR destekli fotogrametrik ölçme yöntemleriyle belirlenen, yapının kuzey cephelerine ait görünüşler, sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.



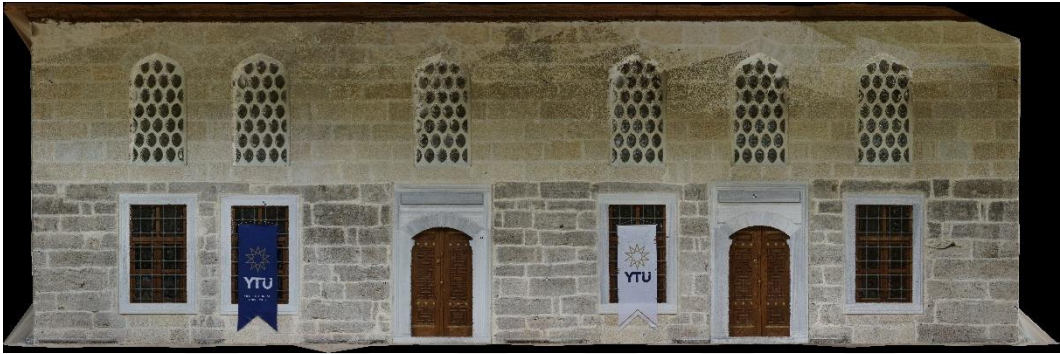
Şekil 4.1 Cloud Compare programında cephe görünüşlerine ait ortofotoların raster formatında üretilmesi için kullanılan ayarlar



Şekil 4.2 Yersel lazer tarayıcı verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü



Şekil 4.3 İHA fotogrametri verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü



Şekil 4.4 Yersel fotogrametri verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü



Şekil 4.5 Mobil LiDAR destekli fotogrametri verisinden üretilen Kuzey cephesi görünüşü

4.2 Sonuç Ürünlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde, tarihi yapılarının üç boyutlu belgelenmesinde kullanılan, yersel lazer tarama, İHA Fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve mobil LiDAR destekli yersel fotogrametrik veri toplama yöntemleri ve elde edilen sonuçlar, aşağıdaki teknik kriterler üzerinden sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma Parametreleri

- Veri toplama süresi
- Veri işleme süresi
- Hareket ve mekânsal erişim kabiliyeti
- Boyutsal doğruluk
- Çözünürlük
- Donanım maliyeti
- Estetik ve yüzey doku kalitesi

Yersel lazer tarama yöntemi, karmaşık geometrilere sahip yüzeylerin ve tırabzanlar, demir parmaklıklar, vb. mimari unsurların belgelenmesinde düşük gürültü, yüksek doğruluk ve detay seviyesi ile dikkat çekmektedir. Ancak, bu yöntemin yüksek donanım maliyeti, uzun veri toplama süresi ve istasyon kurulum zorunluluğu, sahada operasyonel sınırlılıkları oluşturmaktadır.

Hava fotogrametrisi yöntemi, geniş ve erişimi zor bölgelerin hızlı ve etkili bir şekilde belgelenmesinde ön plana çıkmaktadır. Çalışmada kullanılan DJI Mavic 3 Enterprise cihazının RTK destekli konumlandırma sistemi sayesinde veri toplama aşamasında santimetre düzeyinde konumsal doğruluk elde edilmiştir. Otomatik ve manuel modda kullanılabilen insansız hava aracı ile yaklaşık 45 dakikalık uçuş süresi ile tarihi yapının yüksek çözünürlüklü görüntüleri çekilmiştir. Yapının çevresindeki açık alanlarda ve özellikle çatı gibi ulaşılması zor bölümlerinin görüntülerinin çekilmesinde verimli olmuştur. Yapının dar ve kapalı alanlarındaki detayların görüntülenmesi aşamasında İHA'nın kullanım zorlukları dikkat çekmiştir.

Yersel fotogrametri, özellikle mimari detayların yüksek çözünürlükte belgelenmesi ve görsel dokuların detaylı olarak aktarılması açısından avantaj sağlamaktadır. Yüksek çözünürlüklü verilerden fotogrametrik modelleme gerçekleştirilerek yüzey dokularında yüksek kalite elde edilmiştir. Ancak GNSS desteğinin olmaması nedeniyle model doğruluğunun sağlanmasında yer kontrol noktalarının kullanımı zorunlu hale gelmekte, bu da sahada daha fazla zaman ve kaynak gerektirmiştir. Manuel veri toplama süreci, yöntemin toplam zaman maliyetini artırmaktadır.

Mobil LiDAR destekli yersel fotogrametri yöntemi, tripod kullanımının mümkün olmadığı dar alanlar ile erişimi zor alanlarda hızlı ve esnek veri toplama kapasitesi ile ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajları arasında hareket ve mekânsal erişim kabiliyeti, kolay kullanım ve hızlı veri toplama süresi bulunmaktadır. Buna karşın, görüntülerin nispeten düşük çözünürlükte olmasından kaynaklı detayların belirsizliği ve bu sebeple veri toplama mesafesinin kısa tutulması gerekliliği bu yöntemin dezavantajlarından.

4.2.1 Boyutsal Doğruluk Analizi

Nokta bulutu verilerinden Kuzey cephe ve Batı cepheye ait cephe ortofotoları kullanılarak boyutsal karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırmalarda total station aleti ile ölçülen değerler referans kabul edilmiştir. Şekil 4.10' da Kuzey cephe görünümünde yer alan AB uzunluğu 18.681 m, CD uzunluğu 1.109 m, GH yüksekliği 2.151 m olarak ölçülmüştür. Aynı cephede sağ altta mavi renkte gösterilen pencere sövesinde, KL kenarı 1.478 m, LM kenarı 2.258 m, NM kenarı 1.482 m ve KN kenarı 2.263 m ve pencerenin genişliği EF ise 1.078 m olarak ölçülmüştür. Batı cephe görünümünde yer alan ST uzunluğu 9.793 m olarak belirlenmiştir.

Veriler üzerinde yapılan değerlendirmelere göre her bir cephe görünüşü üzerinde belirli noktalardan alınan ölçümler ile total station ile yapılan ölçümler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda total station aleti ile yapılan ölçülerden hesaplanan uzunluklar (L_{REF}) referans olarak alınmıştır. Aradaki boyut farkları (d_i) her bir referans uzunlukla farklı yöntemlerle elde edilen her bir nokta bulutu üzerinden ölçülen uzunlukların (L_i) birbirinden çıkarılması ile hesaplanmıştır. Ölçülen uzunluklar ile sonuçlara dayalı karesel ortalama hata hesabı Tablo 4.2'de verilmiştir.

Burada 4.2 eşitliği ile hesaplanan karesel ortalama hata (KOH) değeri, farklı yöntemlerden elde edilen yatay uzunlukların karşılaştırılmasına ilişkin bilgiler verebilir.

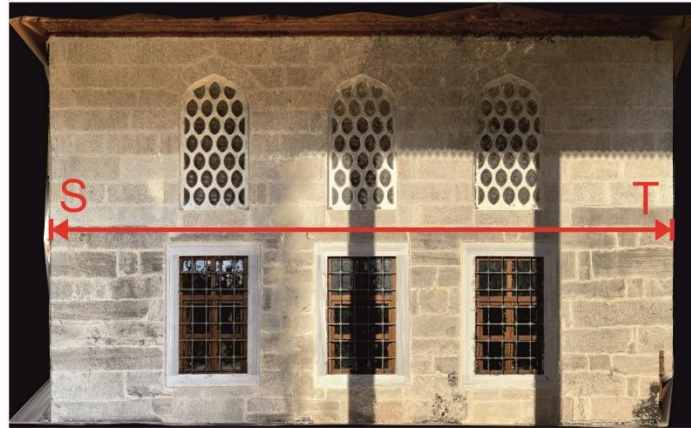
$$d_i = L_{REF} - L_i \quad (4.1)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \dots + \varepsilon_n^2}{n}} \quad (4.2)$$

Kuzey Cephe Görünümü



Batı Cephe Görünümü



Şekil 4.1 Kuzey ve Batı cepheler üzerinde boyutsal karşılaştırma

Tarihi yapı üzerinde yapılan boyutsal karşılaştırmalar sonucunda, Tablo 4.2’ de hesaplanan karesel ortalama değerleri göz önüne alındığında yersel fotogrametri yönteminin 7.36 mm’lik en düşük karesel ortalama hata değeri ile en yüksek doğruluğa sahip olduğu söylenebilir. Bu yöntemi, çalışma sahası özelinde Mavic 3E İHA Fotogrametrisi 7.75 mm’ lik bir KOH değeri ile takip etmektedir. İHA fotogrametrisinin doğruluğunun yersel fotogrametriye çok yakın olduğu görülmektedir. Yersel lazer tarama yöntemi kullanıldığında hesaplanan KOH değerinin 8.87 mm ve iPhone 15 Pro ile mobil LiDAR destekli yersel fotogrametri yönteminin ise doğruluk değerinin 10 mm olduğu görülmektedir.

Tablo 4.1 Boyutsal karşılaştırma

Ölçülen kenar (Şekil 4.10)	Total Station	Yersel Lazer Tarama	İHA Fotogrametrisi	Yersel Fotogrametri	Mobil LiDAR Destekli Yersel Fotogrametri
GH (m)	2.151	2.161	2.155	2.146	2.155
CD (m)	1.109	1.101	1.114	1.104	1.114
AB (m)	18.681	18.673	18.668	18.661	18.656
ST (m)	9.793	9.808	9.806	9.797	9.794
EF (m)	1.078	1.080	1.08	1.078	1.081
MN (m)	1.482	1.485	1.473	1.481	1.470
KN (m)	2.263	2.270	2.260	2.259	2.263
KL (m)	1.478	1.485	1.470	1.476	1.470
LM (m)	2.258	2.270	2.260	2.259	2.263
KOH (mm)		8.869	7.753	7.364	10.050

Tüm bu değerlendirmeler sonucunda söz konusu cephe görünüşlerine ait özellikler Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.2 Cephe görünüş ortofotolarının özellikleri

Veri Toplama Yöntemi	Örnekleme Aralığı (cm/px)	Veri Boyutu (MB)	Cephe Üzerindeki Uzunluk Ölçü Hassasiyeti (mm)	Referans Ölçülere göre KOH (mm)
Yersel Lazer Tarayıcı	0.6	394	± 4	8.869
İHA Fotogrametri	0.2	389	± 4	7.753
Yersel Fotogrametri	< 0.1	399	± 2	7.364
Mobil LiDAR Destekli Yersel Fotogrametri	0.1	407	± 3	10.050

4.2.2 Çok Kriterli Karar Analizi

Tarihi yapılarının üç boyutlu belgelenmesinde kullanılan yersel lazer tarama, İHA fotogrametrisi, yersel fotogrametri ile mobil LiDAR destekli yersel fotogrametri yöntemlerinin, birden fazla teknik ve operasyonel kritere göre sistematik biçimde karşılaştırılabilmesi amacıyla Çok Kriterli Karar Analizi (MCDA) yaklaşımından yararlanılmıştır.

Karar verme, yukarıda kullanılan yöntem alternatiflerinden birinin seçilmesi olarak açıklanabilir. Karar verme sürecinde kriterler önemli rol oynamaktadır. Eğer, problem yöntemlerin birtakım özelliklerine puanlar verilerek alternatiflerin değerlendirilmesi ve en iyi yöntemin seçilmesi esasına dayalı ise bu tip problemlere çok nitelikli karar verme problemleri adı verilmektedir. Karar vericinin çözüme başlarken karşılaşılabileceği problemlerden birisi de hangi yöntemin uygun yöntem olduğunun belirlenmesidir. En uygun yöntem belirlenirken, karar vericinin problemin yapısına ve sürecin özelliklerini dikkate alması gereklidir (Dalbudak ve Rençber, 2022).

MCDA tekniklerinin uygulandığı karar verme ve performans ölçüm problemlerinde karşılaşılan en önemli zorluklardan birisi değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılmasıdır (Çakır ve Perçin, 2013).

Literatürde çok kriterli karar analizi (ÇKKA) sürecinde tercih edilebilecek farklı problem çözümlerinde kullanılmış çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Entropy, Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP), İdeal Çözüme Benzerlik bakımından Sıralama

Performansı Tekniği (TOPSIS), Karmaşık Oransal Değerlendirme (COPRAS), Çok Kriterli En Uygun Uzlaşık Çözüm (VIKOR), Gerçekliği İfade Eden Eleme ve Seçim Yöntemi (ELECTRE), Basit Toplamlı Ağırlıklandırma (SAW), yöntemlerden bazılarıdır (Çakır ve Perçin, 2013; Arslan, 2017; Özdemir ve Seçme, 2009).

Çalışma kapsamında değerlendirilen veri toplama yöntemlerinin performans skorlarının hesaplanması için çok kriterli karar verme yaklaşımlarından çok yaygın olarak kullanılan Basit Ağırlıklı Toplama (SAW) yöntemi tercih edilmiştir.

4.2.2.1 Karar Kriterlerinin Tanımlanması

MCDA kapsamında kullanılacak karar kriterleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- **Veri Toplama Süresi (VT)**
Saha çalışmasının tamamlanması için gerekli süre olup, dakika birimindedir. Daha kısa süreler tercih edildiğinden, maliyet kriteridir.
- **Veri İşleme Süresi (Vİ)**
Ham verinin işlenerek analiz ve karşılaştırmaya hazır hâle getirilmesi için gereken süredir. Dakika birimindedir. Daha kısa süreler tercih edilir, maliyet kriteridir.
- **Hareket ve Mekânsal Erişim Kabiliyeti (HK)**
Yöntemin dar alanlar, iç mekânlar ve erişimi zor bölgelerde uygulanabilme yeteneğini ifade eden 1–5 arası göreceli puanlandırmadır. Daha yüksek değerler tercih edilir, fayda kriteridir.
- **Boyutsal Doğruluk (BD)**
Referans ölçümlere göre hesaplanan Karesel Ortalama Hata (KOH) değerinin ters orantısıdır, geometrik doğruluk göstergesidir. Değer büyüdükçe doğruluk artar, fayda kriteridir.
- **Örnekleme Aralığı (ÖA)**
Yapı üzerindeki genel çözünürlük seviyesini temsil eden değer olup, cm/piksel birimindedir. Örnekleme aralığı değerinin az olması daha yüksek detay düzeyini gösterdiğinden, bu kriter maliyet yapısında ele alınmıştır.
- **Donanım Maliyeti (DM)**
Veri toplama donanımlarının yaklaşık edinim maliyetini temsil eden kriterdir. Daha düşük maliyet tercih edilir, maliyet kriteridir.

- **Estetik ve Yüzey Doku Kalitesi (DK)**

Üretilen ortofoto ve nokta bulutu ürünlerinin görsel bütünlüğü, doku sürekliliği ve renk doğruluğuna ilişkin 1–5 arası göreceli puanlandırmadır.

Daha yüksek değerler tercih edilir; fayda kriteridir.

Tablo 4.4'te yöntemlerin karşılaştırma kriterleri için kullanılacak değerler görülmektedir. Tablodaki değerler veri toplama, işleme ve analiz aşamalarında elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir.

Tablo 4.1 Karşılaştırma kriterleri için kullanılacak değerler

Kriter / Yöntem	Yersel Lazer Tarayıcı	İHA Fotogrametrisi	Yersel Fotogrametri	Mobil LiDAR Destekli Yersel Fotogrametri
VT (dakika)	120	35	40	30
Vİ (dakika)	840	164	142	30
HK (Puan)*	2	4	4	4
BD (1/KOH)	0.113	0.129	0.136	0.100
ÖA (cm/px)	0.6	0.2	0.1	0.1
DM (USD)	30000	4000	3000	1800
DK (Puan)*	3	4	5	4

* 1: en düşük, 5: en yüksek olmak üzere puanlama yöntemi kullanılmıştır.

4.2.2.2 SAW Yöntemi ile Ağırlıkların Hesaplanması

Basit Ağırlıklı Toplama (SAW) yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar verme yaklaşımıdır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için kriter değerlerinin numerik ve karşılaştırılabilir yapıda olması gerekmektedir (Özbek ve Erol, 2016). Bu yöntemin amacı, her alternatif seçenek için kriterlerin performans derecelerinin ağırlıklı toplamını bulmaktır (Taherdoost, 2023). Bu yöntemde uygulanacak işlem adımları aşağıda sıralanmıştır:

- Karar matrisinin oluşturulması
- Ağırlıkların hesaplanması
- Normalizasyon
- Ağırlıklı Normalize matrisinin oluşturulması
- SAW performans skorunun belirlenmesi

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Eşitlik (4.3)'te verilen karar matrisinde X_{ji} , i . Kriterine göre j . Seçeneğinin değerini göstermektedir. n , karşılaştırılacak seçeneklerin sayısını, m ise kriterlerin sayısını göstermemektedir (Özbek ve Erol, 2016).

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n1} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Çalışmada karar matrisi (X) Tablo 4.4'ten yararlanılarak aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} 120 & 840 & 2 & 0.113 & 0.6 & 30000 & 3 \\ 35 & 164 & 4 & 0.129 & 0.2 & 4000 & 4 \\ 40 & 124 & 4 & 0.136 & 0.1 & 3000 & 5 \\ 30 & 30 & 4 & 0.100 & 0.1 & 1800 & 4 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Adım 2: Ağırlıkların Hesaplanması

Ağırlıklandırmada Tablo 4.5'te verilen kriterlerin önem derecelerinden yararlanılmıştır.

Tablo 4.2 Kriterlerin önem düzeyleri

Önem Düzeyi	Kriter
9	Boyutsal doğruluk
8	Örnekleme aralığı
7	Estetik ve yüzey doku kalitesi
7	Donanım maliyeti
6	Hareket ve Mekânsal Erişim Kabiliyeti
5	Veri toplama süresi
3	Veri işleme süresi

Ağırlıklandırma hesabında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır. Burada x_i her bir kriterin önem derecesi olup, ω_i ise ağırlık değeridir. Eşitlik 4.5 kullanılarak ağırlık matrisi (ω) elde edilmiştir. Transpoze hali Eşitlik 4.6'da verilmiştir.

$$\omega_i = \frac{x_i}{\sum x_i} \quad (4.5)$$

$$\omega^T = \begin{bmatrix} 0.111111 \\ 0.066667 \\ 0.133333 \\ 0.200000 \\ 0.177778 \\ 0.155556 \\ 0.155556 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Adım 3: Normalizasyon

Fayda kriterleri, boyutsal doğruluk, estetik ve yüzey doku kalitesi, hareket ve mekânsal erişim kabiliyeti, maliyet kriterleri ise veri toplama ve işleme süresi, örnekleme aralığı ve donanım maliyetidir. Maliyet kriterlerinin minimum değer alması beklenirken, fayda kriterlerinin ise maksimum değer alması beklenmektedir. Bu kapsamda maliyet kriteri için normalizasyon işleminde (4.7) eşitliğinden, fayda kriteri için ise (4.8) eşitliğinden yararlanılmıştır.

$$r_{ij} = \frac{\min_j X_{ij}}{X_{ij}} \quad (4.7)$$

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max_j X_{ij}} \quad (4.8)$$

Buna göre normalize edilmiş matris $R = [r_{ij}]$ aşağıda yer almaktadır. Matriste (4.9) sütunlar kriterleri, satırlar ise seçenekleri göstermektedir.

$$R \approx \begin{bmatrix} 0.250000 & 0.035714 & 0.500000 & 0.830882 & 0.166667 & 0.060000 & 0.600000 \\ 0.857143 & 0.182927 & 1.000000 & 0.948529 & 0.500000 & 0.450000 & 0.800000 \\ 0.750000 & 0.211268 & 1.000000 & 1.000000 & 1.000000 & 0.600000 & 1.000000 \\ 1.000000 & 1.000000 & 1.000000 & 0.735294 & 1.000000 & 1.000000 & 0.800000 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Adım 4: Ağırlıklı Normalize Matrisin Oluşturulması

R normalize matrisi, Eşitlik (4.10) kullanılarak ağırlıklandırılarak (4.11) biçimini alır.

$$v_{ij} = \omega_j \cdot r_{ij} \quad (4.10)$$

$$V \approx \begin{bmatrix} 0.027778 & 0.002381 & 0.066667 & 0.166176 & 0.029630 & 0.009333 & 0.093333 \\ 0.095238 & 0.012195 & 0.133333 & 0.189706 & 0.088889 & 0.070000 & 0.124444 \\ 0.083333 & 0.014085 & 0.133333 & 0.200000 & 1.777778 & 0.093333 & 0.155556 \\ 0.111111 & 0.066667 & 0.133333 & 0.147059 & 1.777778 & 0.155556 & 0.124444 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Adım 5: SAW Performans Skorunun Belirlenmesi

(4.12) Eşitliği ile her bir alternatif seçeneğin toplam skoru hesaplanmış olup, Tablo 4.6' da verilmiştir.

$$S_i = \sum_j v_{ij} \quad (4.12)$$

Tablodaki performans skoru daha yüksek olan yöntemin bu çalışmadaki yöntemler arasında Basit Ağırlıklı Toplama (SAW) yöntemine göre daha tercih edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 4.3 Basit Ağırlıklı Toplama yöntemi performans skoru

Yöntem	Performans Skoru
Yersel Lazer Tarama	0.395298
İHA Fotogrametrisi	0.713806
Yersel Fotogrametri	0.857418
Mobil LiDAR Destekli Yersel Fotogrametri	0.915948

5 SONUÇ

Bu çalışmada, kültürel miras niteliği taşıyan tarihi yapıların belgelendirilmesi amacıyla, YTÜ Davutpaşa Yerleşkesinde yer alan tarihi Sancak Köşkü, Yersel Lazer Tarama, Hava Fotogrametrisi, Yersel Fotogrametri ve Mobil LiDAR destekli Yersel Fotogrametri yöntemleri kullanılarak ölçülmüş ve sonuç ürünler Çok Kriterli Karar Analizi yaklaşımlarından biri olan Basit Ağırlıklı Toplama (SAW) yöntemine göre hesaplanan performans sonuçları doğrultusunda karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre Tablo 4.6’da görüleceği üzere Mobil LiDAR destekli yersel fotogrametri yönteminin, sahada kullanım kolaylığı, veri toplama ve işleme kolaylığı, mobilite kabiliyetleri, düşük donanım maliyeti avantajlarıyla ön plana çıktığı yapılan performans analiziyle belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan donanımın (iPhone 15 Pro) sürekli teknolojik yeniliklerle güncel versiyonlarının çıkarıldığı görülmektedir. Bu donanımların ilerleyen zamanlarda çok daha gelişmiş kameralar, LiDAR sistemleri, jiroskop, ivmeölçer vb. sensörler ile bu tip çalışmalarda çok daha iyi sonuç verebileceği öngörülmektedir.

Ayrıca bu cihazların, RTK özellikli GNSS alıcısı gibi entegre edilebilir harici ek donanımlarla çalışma verimliliğinin artırılması da mümkündür. Bunun yanı sıra bu cihazlar için geliştirilen birçok farklı mobil uygulama bulunmaktadır. Bu uygulamaların önemli bir kısmı hem SLAM algoritmalarını hem de yapay zekâ destekli işlem adımlarını kullanarak her geçen gün daha iyi sonuçlar üretmektedir. Dolayısıyla bu yöntemin hem mevcut performansıyla hem de gelecekte sergileyebileceği potansiyel performansla yüksek bir tercih edilebilirlik sunduğu anlaşılmaktadır.

Yersel fotogrametri yöntemi, yüksek çözünürlükte veri toplama kabiliyeti, yüksek örnekleme aralığı, sonuç ürünlerdeki yüksek boyut doğruluğu gibi özellikleriyle bu alanda halen en önemli yöntemlerinden biridir. Kalem işi gibi ince yüzeysel

detayların bulunduğu çalışma alanlarında bu yöntemin sunduğu sonuçlar çok daha kullanışlı bulunmaktadır. Sensör teknolojilerindeki sürekli gelişim sayesinde bu yöntem bugün ve gelecekte bu alanda kullanışlı olacaktır. Tüm bunlara rağmen yersel fotogrametri için kullanılan kameraların çoğunda, GNSS alıcısı gibi ek sensörler bulunmadığı için toplanan fotoğraf verilerinin EXIF bilgilerinde konum, eğim gibi meta bilgiler bulunmamaktadır. Bu durum sebebiyle verilerin işlenmesi esnasında güvenilir sonuçlar üretilmesi için dış yöneltme parametrelerine olan ihtiyacın diğer yöntemlere nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir.

İnsansız hava aracı ile yapılan fotogrametrik çalışmalarda, İHA ile bütünleşik RTK GNSS sistemleri ve kamera dengeleyici gimbal sisteminden gelen görüntü alma açısı gibi ek bilgiler sayesinde, sahada veri toplarken yüksek doğrulukta georeferanslama bilgisi işlenmiş veriler elde etmek, çatı, vb. ulaşılması zor alanları görüntülemek belgelemek mümkündür. Diğer Fotogrametri yöntemlerine benzer olarak her geçen gün gelişen sensör teknolojileri ile İHA fotogrametrisi yöntemi ile toplanan verilerin kalitesi artmaktadır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı kapalı ve dar alanlardaki kullanım zorluğudur. Fakat diğer veri toplama yöntemleriyle birlikte kullanıldığında özellikle ulaşılması zor olan bölgelerin eksik verilerinin toplanması ve böylece tüm yapının belgelenmesi için önemli bir tamamlayıcı yöntem olduğu görülmektedir.

Yersel lazer tarama yöntemi, performans skorlarında en düşük kalmasına rağmen, karmaşık geometriye sahip yapılarda ve yüksek boyutsal doğruluk gerektiren çalışmalarda oldukça başarılı sonuçlar sunmaktadır. Uzun yıllardır bu tip çalışmalarda kullanılan ve bu tip çalışmalara göre özel çözümler sunan bir yöntemdir. Fakat diğer yöntemlere göre donanım maliyetinin çok yüksek olması ciddi bir dezavantajdır. Veri toplama hızı geçmiş yıllara göre çok daha iyi seviyede olmasına rağmen diğer yöntemlerle kıyaslandığında geride kalmaktadır. Bu yöntemle toplanan veri setlerinin büyüklüğü sebebiyle verilerin işlenme süresi de diğer yöntemlere göre daha fazla sürmekte veya daha yüksek işlem gücüne sahip bilgisayarlar talep etmektedir. Bu yöntem ile toplanan verilerin işlenmesi için farklı yazılım alternatifleri bulunmamakta olup, tarama cihazının üreticisi tarafından bu verilerin işlenmesi için sunulan yazılımların kullanılması gerekmektedir.

Lazer Tarama yönteminin aksine fotogrametrik yöntemlerde, verilerin işlenmesi için çok sayıda ticari veya açık kaynak kodlu yazılım bulunmaktadır. Bu çeşitlilik

aynı zamanda sonuç ürünlerde hedeflenen niteliklere göre farklı yazılımlara yönelme imkânı da sunmaktadır. Örneğin fotogrametrik yöntemle toplanmış bir veri setini bir yazılımda işlediğinizde daha yoğun ve düşük gürültülü bir nokta bulutu elde edebilirken, aynı veri setini başka bir yazılımda işlediğinizde nokta bulutu özellikleri daha düşük nitelikte olmasına rağmen, mesh model veya ortofotoların detay seviyesi, estetik ve doku kalitesi çok daha iyi olabilmektedir. Bu durum, fotogrametrik verilerin hedeflenen ürüne yönelik işleme aşamalarında yüksek düzeyde esneklik sunduğunu ve sonuçların başarısını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

Tarihi yapılara yönelik dijital belgeleme çalışmaları, koruma ve restorasyon süreçlerinin bilimsel temellere dayandırılması açısından kritik bir bileşen oluşturmaktadır. Bu bağlamda gelişen lazer tarama, fotogrametri ve mobil LiDAR teknolojileri; yüksek doğrulukta mekânsal veri üretimi, tekrarlanabilir ölçüm imkânı, veri bütünlüğü ve süreç standardizasyonu gibi teknik avantajlar sağlayarak belgeleme etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Çeşitli sensör ve yazılım altyapılarının entegrasyonu, nokta bulutu tabanlı analizlerin otomasyonu, iş akışlarının dijitalleşmesi sayesinde, kültürel miras alanlarında sürdürülebilir koruma politikalarının uygulanması mümkün hâle gelmektedir. Ayrıca bu teknolojilerin gelişmesi, uzun dönemli izleme çalışmalarında karşılaştırılabilir veri setlerinin oluşturulmasını, müdahale öncesi-sonrası değerlendirmelerin teknik olarak doğrulanmasını ve kaynak kullanımının optimize edilmesini desteklemektedir. Dolayısıyla modern 3B veri toplama yöntemlerinin sürekli olarak geliştirilmesi, yalnızca belgelenen yapıların mevcut durumunun doğru biçimde kaydedilmesini değil, aynı zamanda tarihi yapıların korunması, yapı sağlığı izleme, dijital arşivleme ve karar destek sistemleri için yüksek güvenilirlikte teknik veri altyapısının oluşturulmasını sağlayarak kültürel miras yönetiminde teknik sürdürülebilirliği güçlendireceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abmayr, T., Härtl, F., Reinköster, M., & Fröhlich, C. (2005). Terrestrial laser scanning: Applications in cultural heritage conservation and civil engineering. *In Proceedings of the ISPRS working group V4*.
- Aljadire, A. A., & Khalaf, Y. H. (2024, August). A study in preserving cultural heritage using portable laser devices embedded in mobile phones. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1374(1), 012041. IOP Publishing.
- Apple Inc. (2023). *iPhone 15 Pro. Technical Specifications*. <https://support.apple.com/en-us/HT213645>
- Arslan, H.M. (2017), AHP-VIKOR Yöntemi ile En İyi Tedarikçi Seçimi ve Bir Uygulama. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi* , Cilt:16 Sayı:63, 1203-1217.
- Askar, C., & Sternberg, H. (2023). Use of smartphone lidar technology for low-maliyet 3D building documentation with iPhone 13 pro: A comparative analysis of mobile scanning applications. *Geomatics*, 3(4), 563–579.
- Bolognesi, M., Furini, A., Russo, V., Pellegrinelli, A., & Russo, P. (2014). Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 113–119.
- Cuperschmid, A. R. M., Neves de Oliveira, G., & Froner, Y. A. (2024). Exploring the use of LiDAR in smartphones: Documenting the frontispiece of Saint Francis of Assisi Church in Ouro Preto, Brazil. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–18.
- Çakır, S. ve Perçin, S. (2013), Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Lojistik Firmalarında Performans Ölçümü. *Ege Akademik Bakış / Ege Academic Review*, Cilt 13, Sayı 4, 449-459.
- Dalbudak, E. Ve Rençber, Ö.F. (2022). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Üzerine Literatür İncelemesi. *GAUNIIBFD*, Cilt/Volume:4, Sayı/Issue:1, 1-16
- DJI. (2023). *DJI Mavic 3 Enterprise – Product Specifications* [PDF]. DJI Enterprise. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>
- Everaerts, J. (2008). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(2008), 1187–1192.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T., & Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *International Archives of*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5), 213–218.

- Hevko, I. V., Potapchuk, O. I., Lutsyk, I. B., Yavorska, V. V., Hiltay, L. S., & Stoliar, O. B. (2025). A novel pedagogical approach to equipping prospective IT professionals with skills in 3D modelling and reconstruction of architectural heritage. *CEUR Workshop Proceedings*, 85–101.
- Kanun, E., Alptekin, A., & Yakar, M. (2021). Cultural heritage modelling using UAV photogrammetric methods: A case study of Kanlıdivane archeological site. *Advanced UAV*, 1(1), 24–33.
- Korumaz, M. (2016). Kültürel mirasın 3D belgelenmesinde yersel lazer tarama teknolojisinin kullanımı: Aksaray’da bir sivil mimarlık örneği.
- Laurent, A., Couprie, B., Brument, B., Mélou, J., Quéau, Y., Fritz, C., & Durou, J. D. (2025). Combining geometric and photometric 3D reconstruction techniques for cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 73, 43–51.
- Leica Geosystems AG. (2017). *Leica BLK360 Imaging Scanner – Product Specifications* [PDF]. Heerbrugg, Switzerland: Leica Geosystems.
- Li, Y., Zhao, L., Chen, Y., Zhang, N., Fan, H., & Zhang, Z. (2023). 3D LiDAR and multi-technology collaboration for preservation of built heritage in China: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116, 103156.
- Llabani, A., & Abazaj, F. (2024). 3D documentation of cultural heritage using terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Engineering Science*, 22(2), 267–271.
- Liu, J., Azhar, S., Willkens, D., & Li, B. (2023). Static terrestrial laser scanning (TLS) for heritage building information modeling (HBIM): A systematic review. *Virtual Worlds*, 2(2), 90–114.
- Mohamed, M. A., Shaker, I. F., Ragab, A. F., & Mogahed, Y. M. (2019). Accuracy assessment of terrestrial laser scanner in heritage documentation. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8, 117–123.
- Moyano, J., Justo-Estebarez, Á., Nieto-Julián, J. E., Barrera, A. O., & Fernández-Alconchel, M. (2022). Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM construction: The case study of the La Anunciación church (Seville). *Journal of Building Engineering*, 62, 105190.
- Nilnoree, S., & Mizutani, T. (2025). An innovative framework for incorporating iPhone LiDAR point cloud in digitized documentation of road operations. *Results in Engineering*, 25, 103953.
- Noguchi, A., Nakamura, R., Takata, Y., Matsuo, Y., Oya, Y., & Uchida, S. (2023). Comparison and evaluation of TLSs and mobile LiDAR scanners for multi-scale 3D documentation of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 1135–1139.
- Nuttens, T., De Maeyer, P., De Wulf, A., Goossens, R., & Stal, C. (2011). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry for cultural heritage: An accuracy assessment. *FIG Working Week, Marrakech, Morocco*, 10.

- Oprea, R. L., & Badea, A. C. (2025). 3D technology applied to preserve cultural heritage: Historical monument Castelul Fermecat. *E3S Web of Conferences*, 608, 05021.
- Özbek, A. ve Erol, E. (2016). COPRAS ve MOORA Yöntemlerinin Depo Yeri Seçim Problemine Uygulanması. *JEBPIR*, 2 (1), 2016, 23-42.
- Paukkonen, N. (2023). Towards a mobile 3D documentation solution: Video-based photogrammetry and iPhone 12 Pro as fieldwork documentation tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6(1), 143–154.
- Rodríguez-Gonzálvez, P., Jimenez Fernandez-Palacios, B., Muñoz-Nieto, Á. L., Arias-Sanchez, P., & Gonzalez-Aguilera, D. (2017). Mobile LiDAR system: New possibilities for the documentation and dissemination of large cultural heritage sites. *Remote Sensing*, 9(3), 189.
- Shults, R. (2017). New opportunities of low-maliyet photogrammetry for culture heritage preservation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 481–486.
- Sony Corporation (n.d.). *Sony ILCE-7R Specifications* [PDF]. Retrieved from <https://www.sony.com/electronics/support/e-mount-body-ilce-7-series/ilce-7r/specifications>
- 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.
- Taherdoost, H., (2023). Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a Multi-Attribute Decision Making Technique: A Step-by-Step Guide. *Journal of Management Science & Engineering Research*. 6(1): 21-24.
- Teppati Losè, L., Spreafico, A., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F. (2022). Apple LiDAR sensor for 3D surveying: Tests and results in the cultural heritage domain. *Remote Sensing*, 14(17), 4157.
- Trier, Ø. D., Reksten, J. H., & Løseth, K. (2021). Automated mapping of cultural heritage in Norway from airborne LiDAR data using faster R-CNN. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95, 102241.
- Vacca, G. (2023). 3D survey with Apple LiDAR sensor—Test and assessment for architectural and cultural heritage. *Heritage*, 6(2), 1476–1501.
- Yakar, İ., & Bilgi, S. (2019). Mobil Telefonlar Kullanılarak Elde Edilen 3 Boyutlu Modellerin Kültürel Mirasın Korunması Kapsamında Kullanılabilirliği: Iıı. Ahmet Çeşmesi Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 25-29.
- Zachos, A., & Anagnostopoulos, C. N. (2025). Using TLS, UAV, and MR methodologies for 3D modelling and historical recreation of religious heritage monuments. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 17(4), 1–23.
- Zakaria, M. H., Fawzy, H., El-Beshbeshy, M., & Farhan, M. (2025). A comparative study of terrestrial laser scanning and photogrammetry: Accuracy and applications. *Civil Engineering Journal*, 11(3).

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Uğur KOÇAK ve Nedim Onur AYKUT (2025), “Comparative Study Of Three Dimensional Documentation Methods For Historical Buildings In Terms Of Resolution, Accuracy, Efficiency And Level Of Detail”, 15th Çukurova International Scientific Researches Conference, June 15-17, 2025 / Adana, Türkiye.