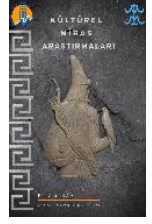




Kültürel Miras Araştırmaları
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/kulmira>
<https://www.kulmira.com/>
e-ISSN 2687-6094



Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Modern Teknolojilerin Rolü

Murat Yakar¹, Hacı Murat Yılmaz^{*2}

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye, myakar@mersin.edu.tr

²Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölüm, Türkiye, hmyilmaz@aksaray.edu.tr

Kaynak Göster: Murat Yakar, Yılmaz, H.M., (2025). Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Modern Teknolojilerin Rolü. Kültürel Miras Araştırmaları, 6(2); 58-75.

DOI:10.59127/kulmira.1805373

Anahtar Kelimeler

Lidar
Kültürel Miras
Fotogrametri
Arttırılmış Gerçeklik
Sanal Gerçeklik

Araştırma Makalesi

Geliş:16.10.2025
Revize:22.10.2025
Kabul:31.11.2025
Yayınlanma:01.12.2025



Öz

Kültürel mirasın korunması ve belgelenmesi, tarihi, sanatsal ve arkeolojik değerlerin gelecek nesillere aktarılmasında temel bir rol oynamaktadır. Geleneksel ölçüm, çizim ve fotoğraf temelli yöntemler, yüksek doğruluk gerektiren karmaşık yapılarda yetersiz kalmakta ve zaman açısından verimsizdir. Bu nedenle, modern uzaktan algılama teknolojileri, kültürel mirasın dijital olarak belgelenmesi için daha etkili ve hassas çözümler sunmaktadır. Son yıllarda özellikle tabanlı lazer tarama (Terrestrial Laser Scanning; TLS), hava tabanlı lazer tarama (Unmanned Laser Scanning; ALS), fotogrametri, İnsansız Hava Aracı (İHA; Unmanned Aerial Vehicle; UAV) görüntüleme sistemleri, 3B modelleme ve artırılmış/karma gerçeklik (Augmented/Mixed Reality; AR/VR) uygulamaları, kültürel miras alanlarının çok boyutlu analiz ve görselleştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu teknolojiler, hem geometrik hem de fotogrametrik doğruluk açısından yüksek çözünürlüklü mekânsal veri sağlamaktadır. Böylece, tarihî yapıların strüktürel deformasyonlarının, malzeme bozulmalarının ve çevresel etkiler sonucu oluşan değişimlerin detaylı olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu yöntemlerle elde edilen nokta bulutu ve 3B model verileri, restorasyon planlaması, yapısal sağlık izleme, sanal tur ve dijital arşivleme gibi uygulamalarda etkin biçimde değerlendirilmektedir.

Bu çalışma, kültürel mirasın dijital korunmasına yönelik mevcut teknolojileri karşılaştırmalı olarak incelemekte; veri toplama süreçleri, modelleme teknikleri ve görselleştirme yöntemlerinin avantajlarını tartışmaktadır. Elde edilen sonuçlar, lazer tarama ve fotogrametri tabanlı teknolojilerin, kültürel mirasın sürdürülebilir yönetimi, bilimsel belgelenmesi ve toplumla paylaşımı açısından vazgeçilmez araçlar hâline geldiğini göstermektedir. Ayrıca, bu teknolojilerin bütünlük kullanımı, gelecekte kültürel mirasın dijital ikizlerinin (digital twins) oluşturulmasına ve akıllı koruma stratejilerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

The Role of Modern Technologies in Documentation of Cultural Heritage

Keywords

Lidar
Cultural Heritage
Photogrammetry
Augmented Reality
Virtual Reality

Research Article

Received:16.10.2025
Revised:22.10.2025
Accepted:31.11.2025
Published:01.12.2025

Abstract

The preservation and documentation of cultural heritage play a vital role in transferring historical, artistic, and archaeological values to future generations. Traditional measurement and recording techniques—such as manual surveying, drawing, and photography—are often time-consuming and limited in both accuracy and detail, especially when applied to complex architectural structures. In recent years, modern remote sensing technologies have overcome these limitations by enabling the accurate and efficient digital documentation of cultural heritage sites. In particular, Terrestrial Laser Scanning (TLS), Airborne Laser Scanning (ALS), photogrammetry, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imaging, three-dimensional (3D) modeling, and Augmented/Mixed Reality (AR/VR) applications have become widely utilized for the multidimensional analysis and visualization of heritage assets.

These technologies provide high-resolution spatial data with both geometric and photometric accuracy, allowing for the precise detection of structural deformations, material

deteriorations, and environmental impacts on historical monuments. Moreover, point clouds and 3D models generated through these methods are effectively used in restoration planning, structural health monitoring, virtual exhibitions, and digital archiving.

This study presents a comparative evaluation of modern digital documentation technologies for cultural heritage preservation. It discusses their data acquisition processes, modeling techniques, visualization capabilities, and integration potential. The findings highlight that LiDAR and photogrammetry-based methods have become indispensable tools for the sustainable management, scientific documentation, and public dissemination of cultural heritage. Furthermore, the integration of these technologies provides a foundation for developing digital twins and intelligent preservation strategies in future heritage management frameworks.

1. Giriş

Kültürel miras, bir toplumun tarihsel kimliğini, sanatsal birikimini ve kolektif hafızasını yansıtan mimari yapılar, arkeolojik alanlar, sanat eserleri ve geleneksel yerleşim dokularının bütünüdür [1,2]. Bu mirasın korunması, yalnızca geçmişin kayıt altına alınması değil, aynı zamanda gelecek kuşaklara aktarılacak tarihsel bilincin ve kültürel sürekliliğin sürdürülebilir biçimde sağlanması açısından da kritik bir öneme sahiptir [3,4]. Günümüzde, hızlı kentleşme, çevresel tahribat, afet riski ve insan kaynaklı yıpranma gibi etkenler, kültürel mirasın korunması sürecini karmaşıktırarak ve bu mirasın güvenilir biçimde belgelenmesi ihtiyacını her zamankinden daha acil hâle getirmektedir.

Geleneksel belgeleme yöntemleri—örneğin manuel ölçüm, fotoğraf çekimi ve iki boyutlu (2B) çizim teknikleri—uzun yıllar boyunca arkeolojik kazılar, restorasyon projeleri ve mimari belgeleme çalışmalarında temel araçlar olarak kullanılmıştır [1,6]. Ancak bu yöntemler, ölçüm doğruluğu, veri yoğunluğu, zaman verimliliği ve mekânsal bütünlük açısından sınırlı kalmakta; ayrıca, karmaşık geometrik yüzeylerin ve ince detayların temsilinde yetersiz kalmaktadır. Özellikle organik formdaki tarihî yapı elemanlarında, manuel teknikler milimetreden daha yüksek doğruluk gerektiren deformasyon analizlerinde güvenilir sonuç verememektedir. Bu nedenle, kültürel mirasın bilimsel ve sürdürülebilir biçimde korunabilmesi için yüksek doğrulukta, üç boyutlu (3B) dijital belgeleme yöntemlerine geçiş zorunlu hale gelmiştir [5,7].

Bu bağlamda geliştirilen modern teknolojiler, kültürel mirasın dijital ortama aktarılmasında devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Özellikle yersel lazer tarama (Terrestrial Laser Scanning; TLS), hava tabanlı lazer tarama (Airborne Laser Scanning; ALS), yakın menzilli fotogrametri ve insansız hava aracı (İHA; Unmanned Aerial Vehicle, UAV) tabanlı görüntüleme sistemleri, aktif (LiDAR) ve pasif (fotogrametri) sensör teknolojilerini kullanarak yüksek doğrulukta mekânsal veri elde edilmesini sağlamaktadır. [8-15]. Aktif sensörler, nesne yüzeyine gönderilen lazer darbelerinin geri dönüş sürelerini ölçerek nokta bulutu üretirken; pasif sistemler, çoklu görüntüler arasındaki paralaks farklarını değerlendirerek 3B modeller oluşturur. Her iki yaklaşım da milimetre seviyesinde hassasiyet sunmakta, fakat sensör tipi, uçuş yüksekliği, çözünürlük ve ortam koşulları gibi faktörlere bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlılıklar içermektedir [16].

Bu teknolojiler aracılığıyla elde edilen yüksek yoğunluklu nokta bulutları, kültürel miras varlıklarının geometrik doğrulukla belgelenmesini sağlamanın yanı sıra, yapısal sağlık izleme, deformasyon analizi, malzeme bozulması tespiti ve restorasyon planlaması gibi mühendislik odaklı çalışmalara da temel veri sağlar [17,18]. Örneğin, yersel lazer tarama ile elde edilen nokta bulutları, zamansal karşılaştırmalar yoluyla taş yüzeylerdeki mikrodeformasyonların tespitine; fotogrametrik modeller ise renk ve doku bilgisiyle yüzey patinası değişimlerinin analizine olanak tanır. Böylece dijital veriler yalnızca belgelenme aracı değil, aynı zamanda disiplinler arası bir analiz platformu hâline gelir.

Son yıllarda, bu dijital modellerin artırılmış gerçeklik (Augmented Reality; AR) ve sanal gerçeklik (Virtual Reality; VR) teknolojilerine entegre edilmesiyle kültürel mirasın çok daha etkileşimli ve kapsayıcı biçimlerde sunulması mümkün hâle gelmiştir [19-21]. AR/VR tabanlı sistemler, tarihî yapıların sanal ortamlarda yeniden deneyimlenmesine, kullanıcıların dijital olarak mekân içinde gezinebilmesine ve yapının farklı dönemlerine ait rekonstrüksiyonların karşılaştırmalı olarak incelenmesine imkân tanımaktadır. Bu sayede, koruma ve restorasyon uzmanları kadar, araştırmacılar, öğrenciler ve genel ziyaretçiler de kültürel miras verilerine uzaktan erişebilmekte ve etkileşimli biçimde bilgi edinebilmektedir.

Bu dijital dönüşümün bir sonraki aşamasını, dijital ikiz (digital twin) teknolojileri oluşturmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel bir varlığın gerçek zamanlı veya zamana bağlı davranışlarını yansıtan, sürekli güncellenen bir dijital modeldir [22,23]. Kültürel miras bağlamında dijital ikiz sistemleri, sensör verileriyle güncellenen 3B modeller üzerinden yapısal bozulmaların izlenmesi, çevresel etkilerin modellenmesi ve koruma önlemlerinin simülasyonu gibi işlevler sunmaktadır. Bu yaklaşım, kültürel miras yönetiminde önleyici koruma (preventive conservation) ve akıllı izleme (smart monitoring) kavramlarının temelini oluşturmakta, veri temelli karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [24-26].

Sonuç olarak, dijital belgeleme teknolojileri kültürel mirasın korunmasında yalnızca bir ölçüm aracı değil, aynı zamanda çok boyutlu bir analiz, izleme ve paylaşım ekosistemi olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, söz konusu teknolojilerin temel prensiplerini, karşılaştırmalı avantajlarını ve uygulama örneklerini inceleyerek, kültürel miras yönetiminde dijital

dönüşümün önemini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Özellikle LiDAR, fotogrametri ve İHA sistemlerinin entegrasyonuna dayalı hibrit yaklaşımlar, gelecekte dijital ikiz tabanlı koruma sistemlerinin geliştirilmesinde ve sürdürülebilir kültürel miras yönetimi stratejilerinin oluşturulmasında temel bir çerçeve sunacaktır [27].

2. Modern Teknolojiler

2.1. Yersel lazer tarama (YLT)

Yersel lazer tarama, yüksek doğrulukta nokta bulutları üreterek yapıların ve arkeolojik alanların detaylı üç boyutlu modellenmesini sağlamaktadır [4,9,21]. Bu teknoloji, milimetre düzeyinde hassasiyet sunarak restorasyon ve durum analizine yönelik çalışmalar için önemli veri sağlamaktadır [20,28]. YLT ile elde edilen veriler, deformasyon analizleri, restorasyon planlaması ve yapıların mevcut durum belgelerinin hazırlanmasında kullanılmaktadır [4,9]. Örneğin, Şanlıurfa Kışla Camii ve Ağzıkara Han gibi tarihi yapılarda YLT uygulamaları, taş malzeme bozulmalarının analizi ve restorasyon karar süreçlerini desteklemiştir [20,21,29,30].

2.1 YLT çalışma prensipleri

Yersel Lazer Tarama (YLT) sistemleri, temel olarak zaman uçuşu (Time-of-Flight, ToF) ve faz farkı (Phase Shift, PS) yöntemlerine dayanır [7,27,31]. Her iki yöntem de lazer ışınının hedef yüzeye gönderilmesi ve geri dönüşünün ölçülmesi esasına dayanmakla birlikte, ölçüm prensipleri ve uygulama avantajları bakımından farklılık gösterir.

2.1.1 Uçuş zamanı (Time-of-Flight, ToF) yöntemi

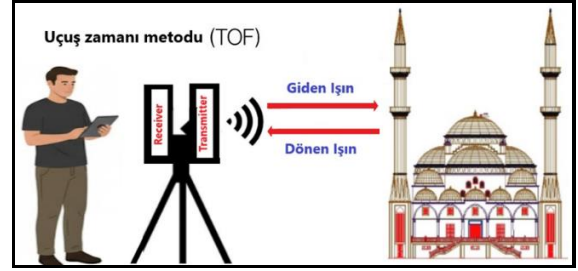
Uçuş Zamanı yönteminde, lazer ışını bir hedefe gönderilir ve geri dönmesi için geçen süre milisaniyenin çok küçük bir kesri kadar hassasiyetle ölçülür. Ölçülen bu süre, ışık hızına göre mesafeye hesaplanır. Uçuş Zamanı yöntemi (ToF) sistemleri genellikle uzun menzilli taramalarda tercih edilir ve birkaç kilometreye kadar olan uzaklıkları hassas bir şekilde ölçebilir (Şekil 1) [7,12,31]. Bu sistemlerin;

Avantajları:

- ❖ Uzun menzilli ölçümlerde yüksek doğruluk sağlar.
- ❖ Büyük alan taramalarında hızlı veri toplama kapasitesine sahiptir.
- ❖ Işık yoğunluğu düşük veya ortam koşulları değişken olsa bile güvenilir sonuç verir.

Dezavantajları:

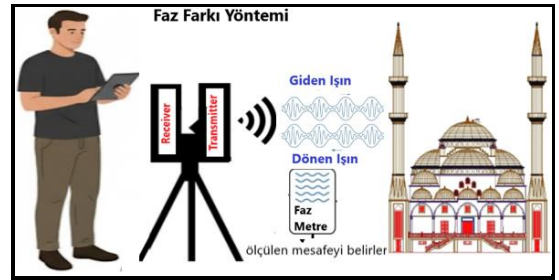
- ❖ Yüksek çözünürlük gerektiren küçük detayların ölçümünde sınırlı kalabilir.
- ❖ Tarama süresi, faz farkı sistemlerine göre genellikle daha uzundur.



Şekil 1. Uçuş zamanı modu (ToF)

2.1.2 Faz Farkı (Phase Shift, PS) Yöntemi

Faz farkı yönteminde, lazer ışınının gönderilen sinyali ile geri dönen sinyalin faz farkı ölçülerek mesafe belirlenir. Bu yöntem, kısa mesafelerde ve yüksek çözünürlük gerektiren detaylı taramalarda kullanılır [7,12,31]. Faz farkı tarayıcılar, milimetre seviyesinde hassasiyet sağlayabilir ve yoğun nokta bulutu üretiminde avantajlıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Uçuş zamanı modu (Faz Farkı)

Avantajları:

- ❖ Küçük detayların yüksek doğrulukla ölçülmesine olanak sağlar.
- ❖ Nokta yoğunluğu yüksek olduğu için yüzey deformasyonlarının ve bozulmaların tespitinde etkilidir.
- ❖ Kısa mesafeli uygulamalarda hızlı tarama yapabilir.

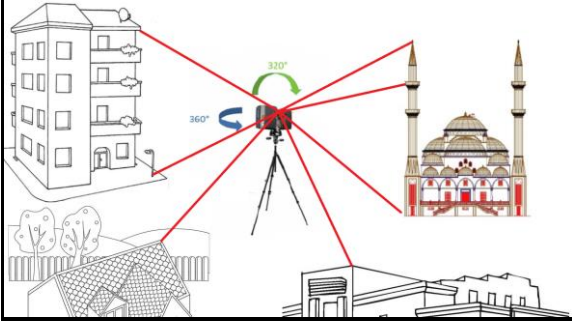
Dezavantajları:

- ❖ Ölçüm menzili, ToF sistemlerine göre daha sınırlıdır. Kısa ve orta menzil ölçümlerinde daha uygun yöntemdir.
- ❖ Ortam ışığı ve yüzey yansımaları özellikleri ölçüm hassasiyetini etkileyebilir.

2.1.3 Dairesel ve lineer tarama modları

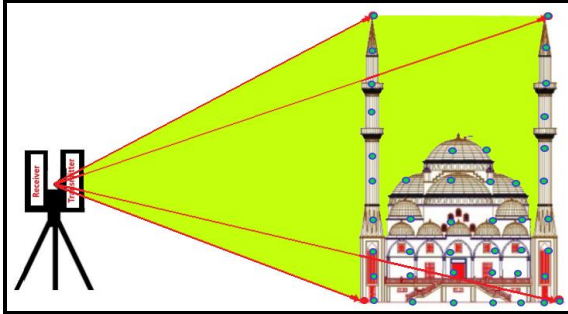
Lazer tarayıcılar, mekanik tarama hareketlerine göre dairesel (rotary) ve lineer modlarda çalışabilir.

Dairesel Tarama: Tarayıcı, kendi eksenini etrafında 360° dönerek çevresindeki tüm alanı tarar. Bu mod, büyük ölçekli açık alanların veya bina cephelerinin hızlı taranması için uygundur. Dönel taramada, tarama açısı ve dönüş hızı ayarlanarak, istenilen nokta yoğunluğu ve veri çözünürlüğü optimize edilebilir. Dönel tarama, özellikle arkeolojik alanlar, şehir meydanları ve büyük anıtların belgelenmesinde tercih edilir (Şekil 3)[4,12,31].



Şekil 3. Dairesel tarama

Lineer Tarama: Tarama hareketi belirli bir düzlem veya hat boyunca gerçekleştirilir. Bu mod, yüzeyin detaylı analizine ve hassas ölçüm gerektiren iç mekân çalışmaları veya taş yüzey deformasyonlarının incelenmesinde idealdir. Lineer tarama ile elde edilen veri yoğunluğu, dönel taramaya göre genellikle daha fazladır ve yüksek çözünürlük gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar (Şekil 4).



Şekil 4. Lineer tarama

2.1.4 Tarayıcı seçim kriterleri

YLT tarayıcı seçimi, uygulama alanının ölçeği, ölçüm doğruluğu ihtiyacı, veri toplama süresi ve çevresel koşullara göre belirlenir (Tablo 1). Örneğin:

- **Büyük yapı ve dış mekanlar:** Uzun menzilli ToF tarayıcılar ve dönel tarama tercih edilir.
- **Küçük objeler ve hassas detaylar:** Faz farkı tarayıcılar ve lineer tarama kullanılır.

- **Karma alanlar:** Her iki yöntemin entegrasyonu ve tarama modlarının kombinasyonu ile optimize edilmiş veri elde edilebilir [4,7,12].

Tablo 1. Tarayıcı seçimi

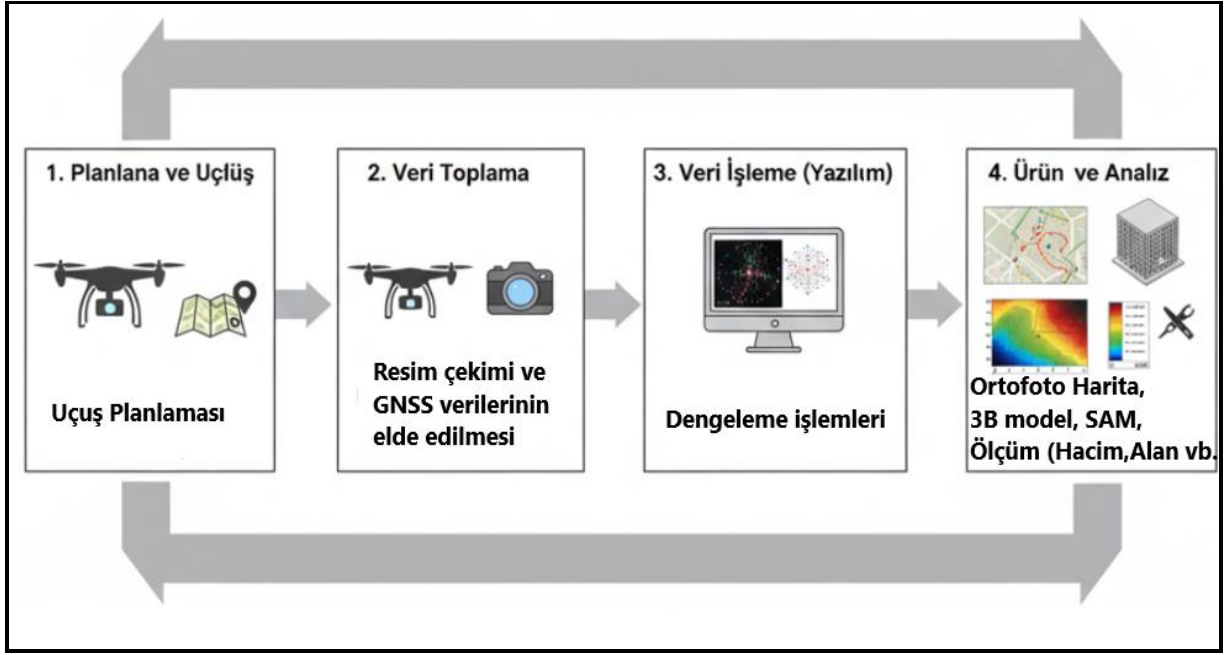
Uygulama Alanı	Önerilen Tarayıcı Tipi	Teknik Özellikler
Geniş açık alanlar, topografik çalışmalar	ToF tabanlı, uzun menzilli dönel tarayıcı	300-1000 m menzil, düşük nokta yoğunluğu, IP54 koruma
Tarihi yapı ve kültürel miras belgelenmesi	Faz farkı tarayıcı	50-200 m menzil, yüksek yoğunluk, düşük hata payı
Endüstriyel tesis ve boru hatları	Faz farkı	10-50 m menzil, yüksek hassasiyet ($\pm 1-2$ mm)
Arkeolojik kazı alanları	Taşınabilir ToF sistemleri veya entegre YLT-İHA sistemleri	Orta menzil, çoklu istasyon kabiliyeti
Tünel ve yeraltı yapıları	ToF sistemler	Düşük ışıkta çalışma, yüksek menzil çözünürlüğü

3. İHA Fotogrametrisi

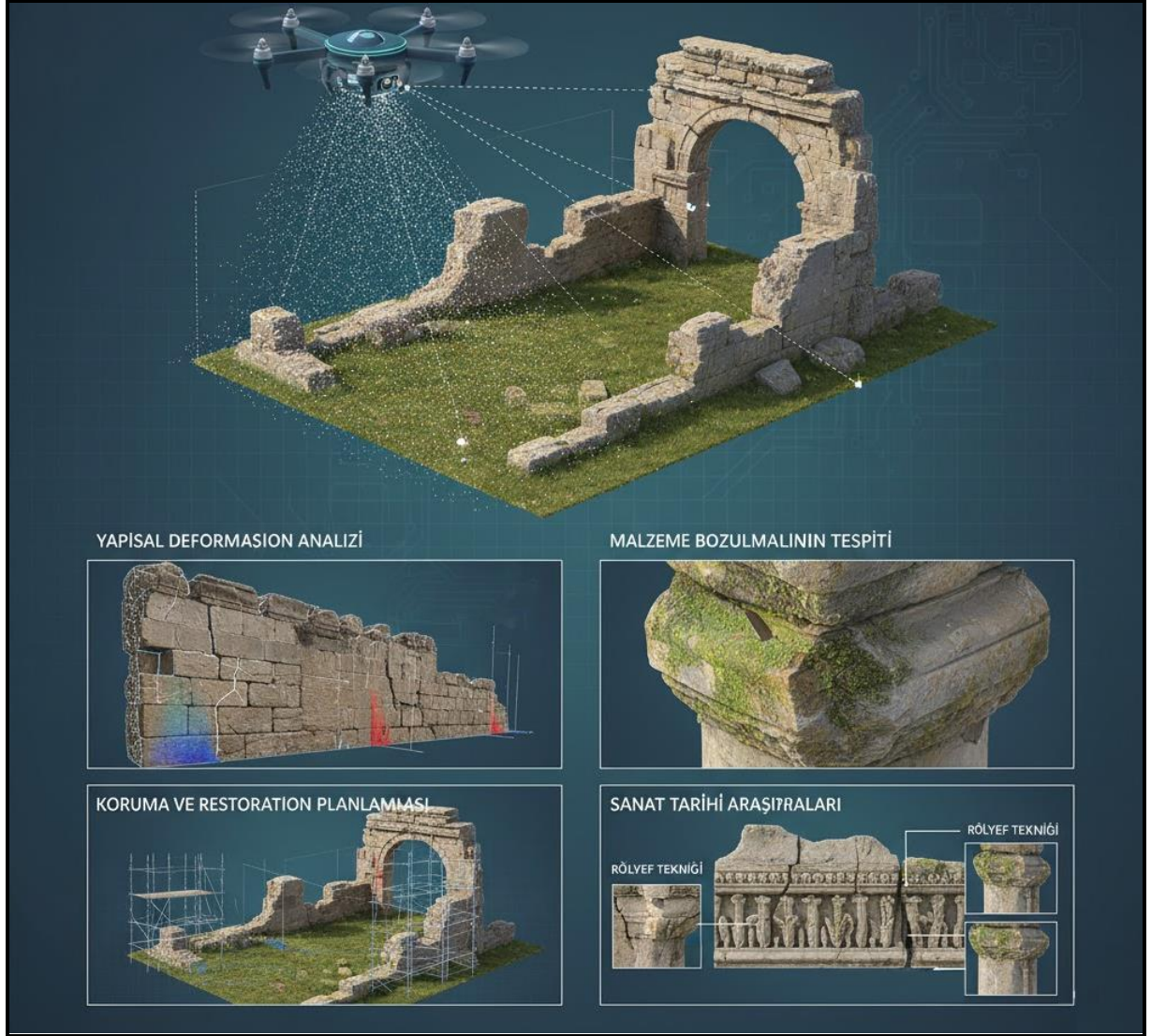
İnsansız Hava Aracı (İHA) fotogrametrisi, yüksek çözünürlüklü hava görüntülerinin fotogrametrik yöntemlerle işlenmesi sonucunda yüzeylerin üç boyutlu (3B) olarak modellenmesini sağlayan modern bir uzaktan algılama tekniğidir (Şekil 5)[2,32-35]. Bu yöntem, klasik hava fotogrametrisi sistemlerine kıyasla daha düşük maliyetli, esnek ve yüksek doğrulukta veri elde etmeye olanak tanımaktadır. İHA sistemleri; belirli uçuş yüksekliklerinde ve planlı uçuş rotaları boyunca veri toplama imkânı sağlayarak, hem küçük ölçekli (örneğin tek bir anıt veya yapısal eleman) hem de geniş kapsamlı (örneğin arkeolojik alan veya kentsel dokular) alanlarda ayrıntılı mekânsal bilgi üretimini mümkün kılmaktadır [10,22,36-38].

İHA fotogrametrisinin avantajları arasında yüksek çözünürlük ve esneklik, hızlı veri toplama ve saha erişimi sınırlı bölgelerde veri üretme yeteneği öne çıkmaktadır. Özellikle ulaşılması zor veya tehlikeli alanlarda, İHA'lar güvenli ve etkili bir veri toplama çözümü sunmaktadır. Uçuş planlaması, veri örtüşme oranları ve kamera parametrelerinin optimize edilmesiyle, milimetre-altı hassasiyetle 3B modeller üretilebilmektedir [8,10,39,40].

Veri işleme aşamasında, havai nirengi, nokta bulutu üretimi ve dijital yüzey modeli (DSM) oluşturma gibi fotogrametrik yöntemler kullanılmaktadır. Çoklu görüntülerin geometrik ve fotometrik eşleştirmesi sayesinde, yüksek detaylı ve renkli 3B modeller elde edilebilmektedir. Bu modeller, tarihî yapıların ve arkeolojik alanların yapısal deformasyonlarının analizi, malzeme bozulmalarının tespiti, koruma ve restorasyon planlaması ile sanat tarihi araştırmaları için güvenilir veri sağlamaktadır (Şekil 6).



Şekil 5. İHA iş akışı



Şekil 6. İHA ile deformasyon, malzeme bozulması tespiti

Ayrıca, İHA fotogrametrisi ile elde edilen veri setleri, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) gibi dijital platformlarla entegre edilebilmektedir. Bu bütünlük yaklaşımlar, kültürel mirasın yalnızca belgelenmesini değil, aynı zamanda etkileşimli ve görselleştirilmiş biçimde sunulmasını mümkün kılmaktadır. Örneğin AR ve VR ortamları, kullanıcıların tarihî yapılar arasında sanal olarak gezinmesine, farklı dönemlere ait restorasyon senaryolarını gözlemlemesine ve yapısal detayları yakından incelemesine olanak tanımaktadır. CBS entegrasyonu ise, mekânsal analizler, coğrafi modellemeler ve zamansal değişim izleme çalışmaları için güçlü bir altyapı sağlamaktadır (Şekil 7) [10,22,41,42].

Özellikle karmaşık geometrik yapılar ve taş yapıları alanların modellenmesinde, İHA fotogrametrisi hem yüksek doğruluk hem de yoğun veri üretme kapasitesi açısından benzersiz avantajlar sunmaktadır. Elde edilen yüksek çözünürlüklü nokta bulutları ve üç boyutlu (3B) modeller, yapı elemanlarının mikro deformasyon analizleri, malzeme bozulma ve aşınma tespitleri ile restorasyon planlamaları gibi bilimsel ve mühendislik uygulamaları için kritik bir temel oluşturmaktadır. Ayrıca, bu veri setleri, zaman serisi analizleri ve yapısal değişim izleme çalışmaları ile entegre edildiğinde, kültürel miras varlıklarının uzun vadeli korunmasına katkı sağlayacak sürdürülebilir izleme ve yönetim sistemleri için bir altyapı oluşturmaktadır (Şekil 8). İHA fotogrametrisi, kültürel mirasın dijital belgelenmesinde yalnızca veri toplama aracı olmanın ötesinde, esnek, güvenli ve çok boyutlu bir koruma ve analiz çözümü sunmaktadır. Diğer dijital belgeleme teknolojileri (örneğin yersel ve hava tabanlı LiDAR, yakın menzilli fotogrametri) ile entegre edildiğinde, kapsamlı, güncel ve yüksek doğrulukta 3B veri tabanlarına dayalı akıllı kültürel miras yönetim sistemleri oluşturulmasına imkân tanımaktadır.

İHA tabanlı fotogrametri, özellikle erişimi zor, tehlikeli veya topoğrafik açıdan karmaşık alanlarda veri toplama sürecini büyük ölçüde kolaylaştırmakta ve araştırmacılara güvenli çalışma koşulları sunmaktadır [18,20]. Bu özelliği sayesinde yöntem, arkeolojik alanlar, tarihî yapılar, kültürel yerleşim dokuları ve dağlık veya yoğun bitki örtüsüne sahip bölgeler gibi erişimi sınırlı alanlarda etkin bir şekilde uygulanabilmektedir (Şekil 9).

Elde edilen hava görüntüleri, fotogrametrik yazılımlar aracılığıyla işlenerek yoğun nokta bulutları, sayısal yüzey modelleri (DSM), sayısal arazi modelleri (DTM) ve yüksek çözünürlüklü ortofotolar üretilmektedir. Bu süreç, genellikle aerotriangülasyon, çoklu görüntü eşleştirme ve 3B model oluşturma adımlarını içermektedir. Ortaya çıkan modeller, hem geometrik doğruluk hem de fotogrametrik tutarlılık açısından yüksek güvenilirlik sunmakta, böylece yapı elemanlarının detaylı incelenmesine olanak tanımaktadır (Şekil 10) [20,42-44].

Bu yüksek doğruluklu veriler, yapısal analizler, deformasyon izleme, malzeme bozulmalarının tespiti, restorasyon planlamaları ve zaman serisi takip çalışmaları gibi uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, elde edilen 3B modeller, AR/VR

ve CBS platformlarına entegre edilerek etkileşimli görselleştirme, eğitim amaçlı sanal deneyimleme ve sürdürülebilir izleme sistemleri için veri temeli oluşturmaktadır. Böylece, İHA tabanlı fotogrametri, hem saha çalışmalarının verimliliğini artırmakta hem de kültürel mirasın dijital belgelenmesi ve yönetimi için çok boyutlu bir çözüm sunmaktadır.

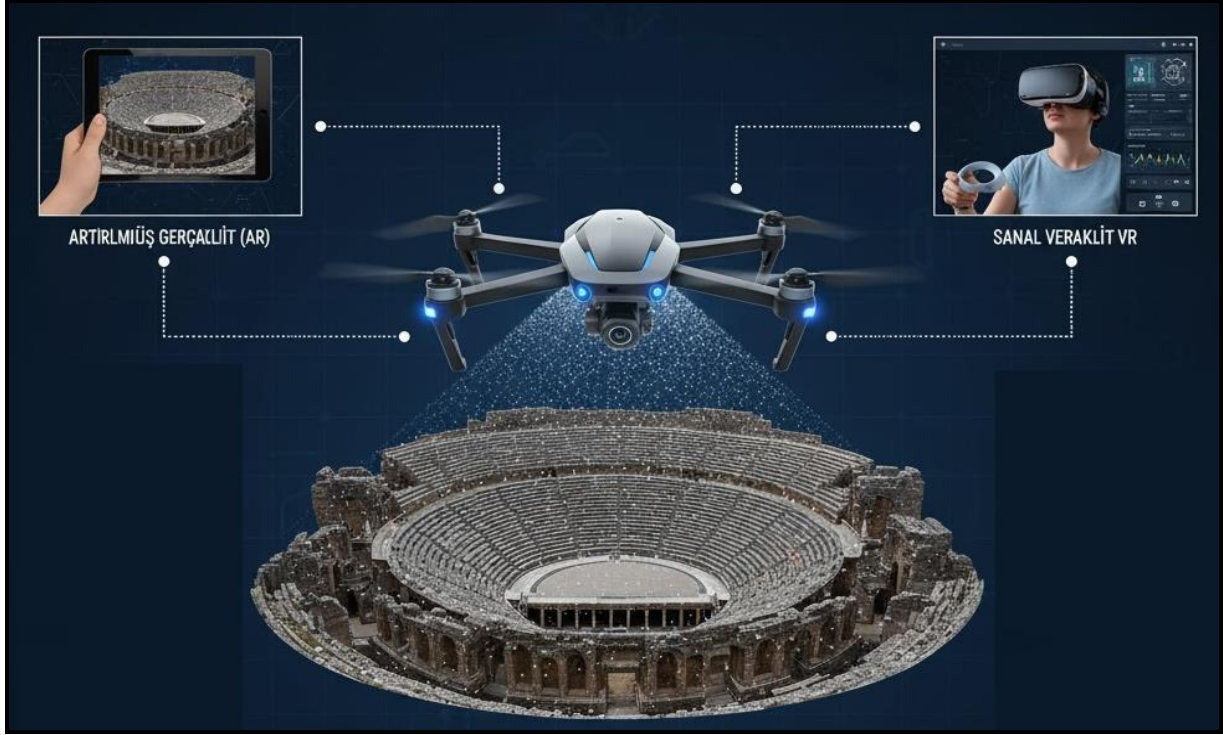
Sonuç olarak, İHA fotogrametrisi ve bu modellerin entegre kullanımı, yalnızca belgelenme aracı olmanın ötesinde, kültürel mirasın dijital dönüşümü, koruma planlaması ve bilimsel analiz süreçleri için kapsamlı bir temel sağlamaktadır.

3.1. LiDAR Teknolojisi

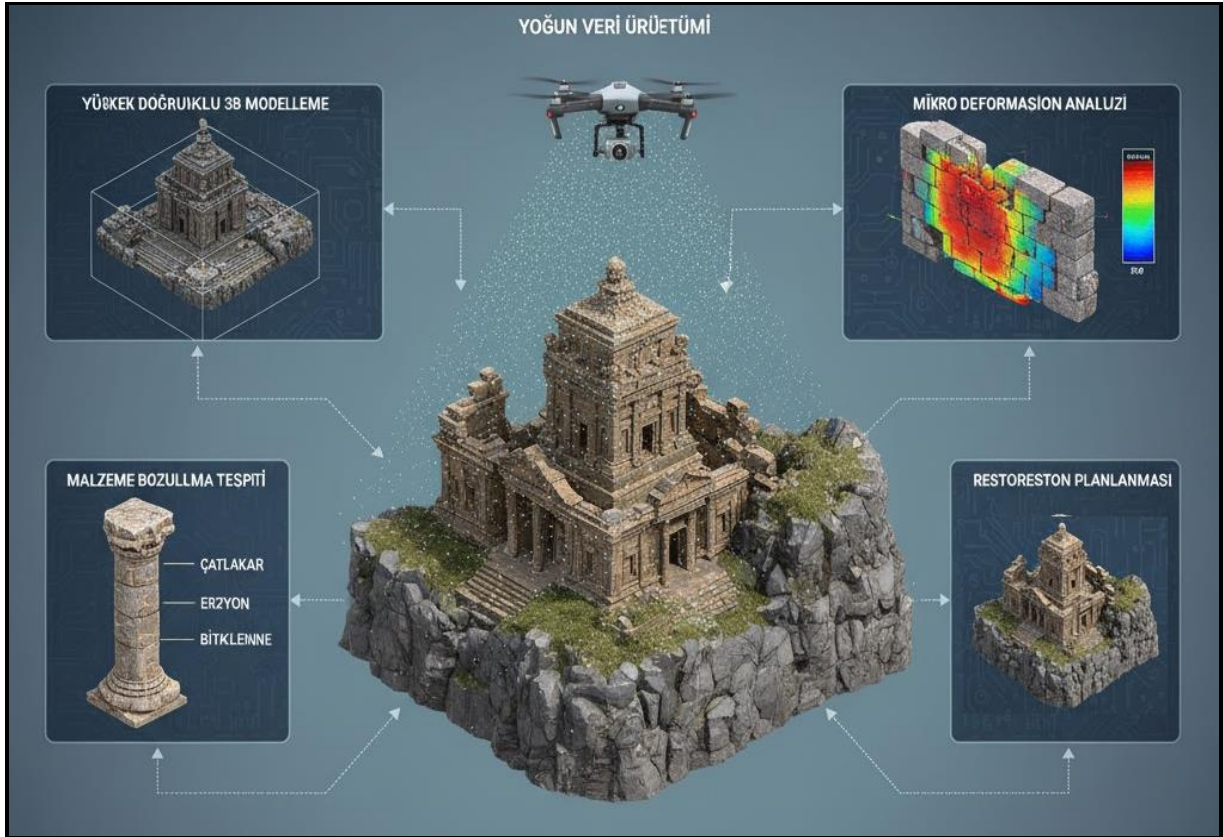
3.3.1 Hava lidar

Hava ve yer tabanlı LiDAR (Light Detection and Ranging) sistemleri, özellikle yoğun bitki örtüsü, karmaşık topoğrafya veya erişimi kısıtlı alanlar altında kalan arkeolojik ve tarihî kalıntıların tespitinde son derece etkili bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır [7,16,45-48]. LiDAR sistemleri, lazer ışınlarını hedef yüzeye gönderip geri dönen sinyallerin zamanını ve yoğunluğunu ölçerek, milimetre ile santimetre düzeyinde doğrulukta yüksek çözünürlüklü nokta bulutları üretir. Bu nokta bulutları, hem doğal topoğrafyanın hem de antropojenik yapıların morfolojik ve mimari detaylarını üç boyutlu olarak hassas biçimde temsil edebilmekte ve geleneksel ölçüm tekniklerine kıyasla çok daha yoğun ve doğru veri sağlamaktadır (Şekil 11)[7,16,27].

LiDAR ile elde edilen veriler, sadece yüzey morfolojisinin modellenmesinde değil, aynı zamanda arkeolojik alanlarda stratigrafik analiz, deformasyon tespiti, erozyon ölçümleri ve restorasyon öncesi durum belirleme gibi uygulamalarda da kullanılabilir. Hava tabanlı LiDAR sistemleri (UAV veya uçak platformlu) geniş alanlarda hızlı veri toplama imkânı sunarken, yer tabanlı LiDAR sistemleri özellikle karmaşık yapıların iç ve dış detaylarının yüksek doğrulukta modellenmesine olanak tanımaktadır [7,16,27]. Buna ek olarak, LiDAR verileri dijital arazi modelleri (DTM), dijital yüzey modelleri (DSM) ve yüksek çözünürlüklü topoğrafik haritalar üretmek için kullanılmakta ve böylece hem doğal arazi hem de tarihî yapıların detaylı analizi mümkün kılınmaktadır [45,49]. Sistemlerin yüksek veri yoğunluğu ve tekrar edilebilir ölçüm kabiliyeti, restorasyon planlaması, malzeme bozulmalarının değerlendirilmesi ve kültürel mirasın dijital korunması gibi süreçlerde kritik öneme sahiptir. Ayrıca, LiDAR verilerinin diğer teknolojilerle (UAV fotogrametri, yer tabanlı fotogrametri, giyilebilir mobil LiDAR) entegrasyonu, çoklu veri füzyonu ile hem topoğrafik hem de mimari detayların eksiksiz ve ölçekli bir şekilde belgelenmesini sağlamaktadır [49-51]. Bu modeller, sadece mevcut arazinin geometrik ve morfolojik özelliklerini analiz etmekle kalmayıp, aynı zamanda erozyon, deformasyon veya restorasyon öncesi durum tespiti gibi süreçlerde de kritik bilgi sağlamaktadır (Şekil 12)[7,16]. Ayrıca, LiDAR tabanlı veri analizi, yoğun bitki örtüsü veya kalın yapı enkazları altında kalan arkeolojik kalıntıların tespitini mümkün kılarak, keşif ve koruma süreçlerini önemli ölçüde hızlandırmaktadır.



Şekil 7. İHA ile Sanal Gerçeklik ve Arttırılmış Gerçeklik



Şekil 8. Kompleks yapıların modellemesi



Şekil 9. Dağlık ve ulaşılması zor alanlarda veri toplama

3.3.1.1.Hava Lidarın Arkeolojide kullanılması

Hava LiDAR teknolojisi, özellikle yoğun orman örtüsü veya zorlu arazi koşulları nedeniyle geleneksel yöntemlerle erişilmesi veya gözlemlenmesi güç olan arkeolojik alanların tespitinde önemli bir devrim yaratmıştır. LiDAR, lazer ışınlarını araziye göndererek yüzeyden yansıyan sinyalleri algılar ve milyarlarca nokta içeren yüksek çözünürlüklü bir nokta bulutu oluşturur. Bu sayede, yer yüzeyinin detaylı üç boyutlu bir modelini elde etmek mümkündür. Yoğun bitki örtüsü altındaki topografik ve yapısal özellikler, bu yüksek çözünürlüklü veriler sayesinde görünür hâle gelir ve gizli kalmış arkeolojik yapıların keşfine olanak tanır (Şekil 13) [1,2,27].

Özellikle Orta Amerika'daki Maya uygarlığı kalıntılarının tespitinde LiDAR teknolojisinin kullanımı, klasik arkeolojik kazı ve yüzey araştırmalarına kıyasla çok daha hızlı ve kapsamlı veri elde edilmesini sağlamıştır. Hava LiDAR taramaları, Maya şehirlerinin karmaşık yerleşim düzenlerini, tapınak ve sarayların konumlarını, yol ağlarını ve tarım teraslarını ayrıntılı biçimde haritalamaya olanak tanımıştır [3,4,52]. Bu yöntem, geleneksel saha araştırmalarında gözden kaçabilecek küçük tümülüsler, toprak yükseltileri veya yapısal deformasyonları belirlemekte de etkili olmuştur.

LiDAR verilerinin işlenmesi sürecinde, nokta bulutları arazi, bitki örtüsü ve yapı sınıflarına ayrılarak Dijital Arazi Modelleri (DTM) oluşturulur. Bu modeller, arkeolojik yüzey biçimlerinin net bir şekilde görünmesini sağlayarak, kaybolmuş yerleşim alanlarının veya önceden bilinmeyen yapı komplekslerinin keşfine olanak verir. Böylece araştırmacılar, hem geniş alanları kapsayan topografik

analizler yapabilir hem de hassas mekânsal ölçümlerle yapıların boyutlarını ve dağılımını detaylı şekilde inceleyebilirler [5].

LiDAR destekli arkeolojik keşiflerin bir diğer avantajı da, saha çalışmalarının minimum müdahale ile gerçekleştirilmesine imkân tanınmasıdır. Özellikle hassas ve korunması gereken tarihî alanlarda, LiDAR sayesinde yoğun fiziksel kazılar yerine uzaktan algılama yoluyla veri toplanabilmektedir. Bu yöntem, kültürel mirasın korunması ve sürdürülebilir arkeolojik araştırma ilkeleri açısından önemli bir katkı sağlamaktadır

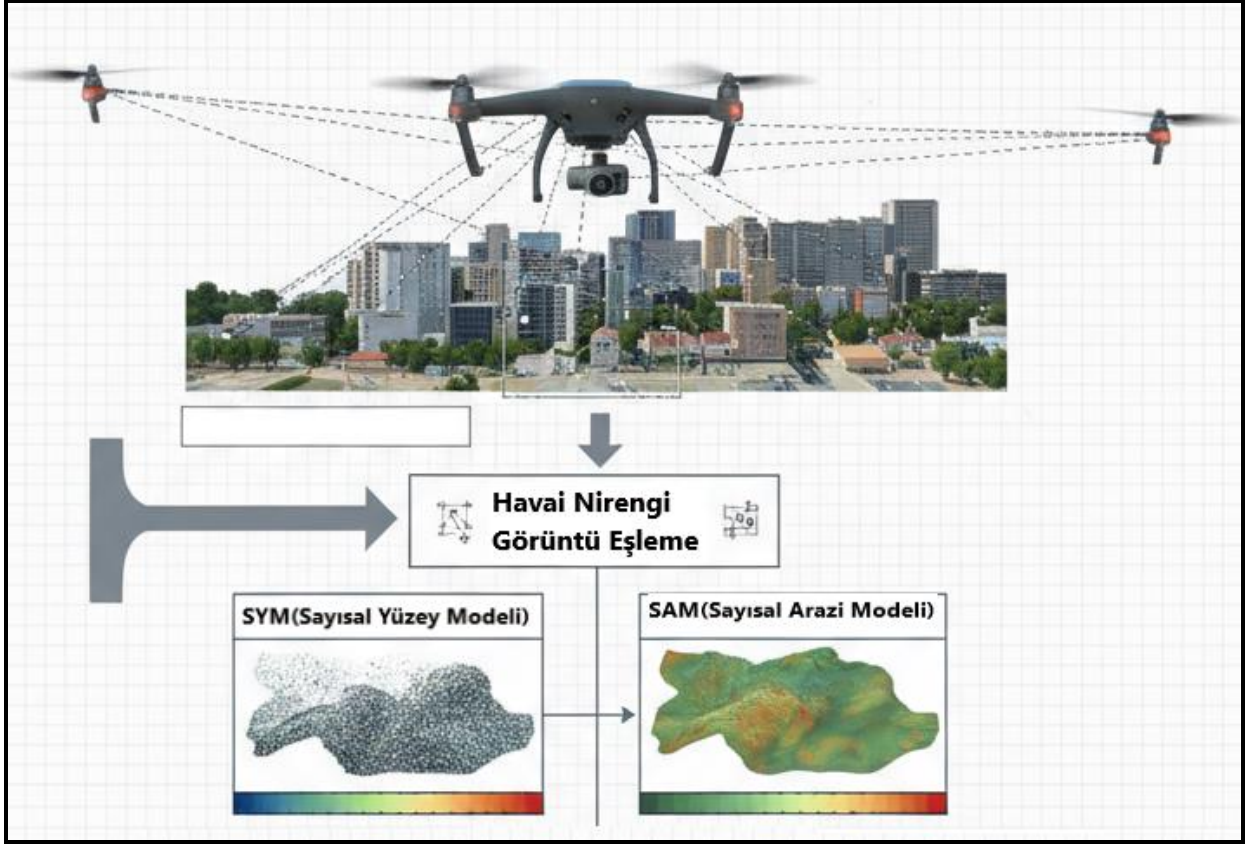
3.3.2 Giyilebilir mobil lidar

Son yıllarda geliştirilen giyilebilir mobil LiDAR sistemleri, saha ölçümlerinde yüksek esneklik, operasyonel hız ve kullanıcı mobilitesini artırarak, geleneksel tripod veya sabit LiDAR tarama sistemlerinin fiziksel ve lojistik sınırlamalarını büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır [45,49,50,51,53]. Bu sistemler, operatörün saha içinde serbestçe hareket ederken veri toplamasına imkân tanıyarak, özellikle geniş ölçekli arkeolojik alanlarda, karmaşık topoğrafyaya sahip bölgelerde veya erişimi güç tarihi yapılarda hızlı ve etkili veri elde edilmesini sağlamaktadır (Şekil 14).

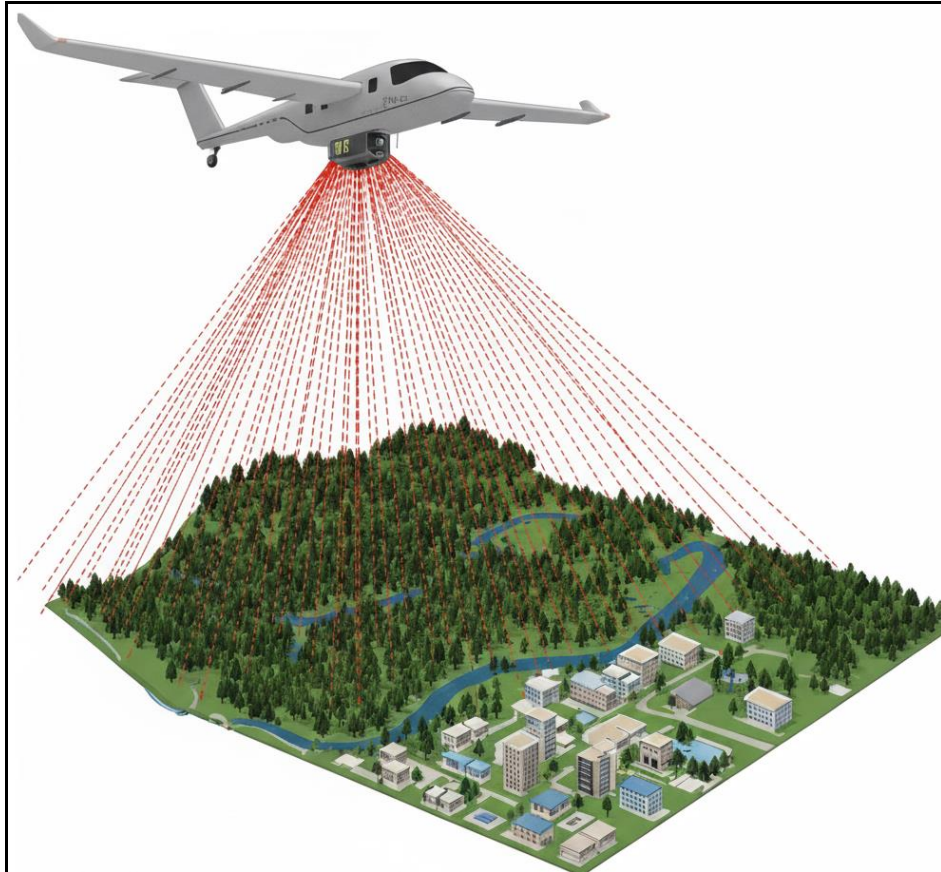
Giyilebilir LiDAR cihazları, Gerçek zamanlı ölçüm, IMU (Inertial Measurement Unit) tabanlı koordinat referanslama, GNSS entegrasyonu ve realtime odometry teknolojilerini kullanarak, hareket halindeyken ölçülen verinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır. Bu sayede, saha verisi hem yüksek çözünürlükte hem de zamana duyarlı olarak elde edilebilmekte, geleneksel LiDAR taramalarına kıyasla veri toplama süreleri önemli ölçüde azaltılmaktadır (Şekil 15)[27,45,49,50,51].

Ayrıca, giyilebilir LiDAR sistemlerinin esnekliği, operatörün dar alanlarda veya dik yüzeylerde veri toplamasını mümkün kılmakta ve saha ölçümlerinin kapsamını artırarak arkeolojik ve kültürel mirasın 3B dijital modelleme ve restorasyon öncesi analiz süreçlerini doğrudan desteklemektedir [27,45,49,50,51].

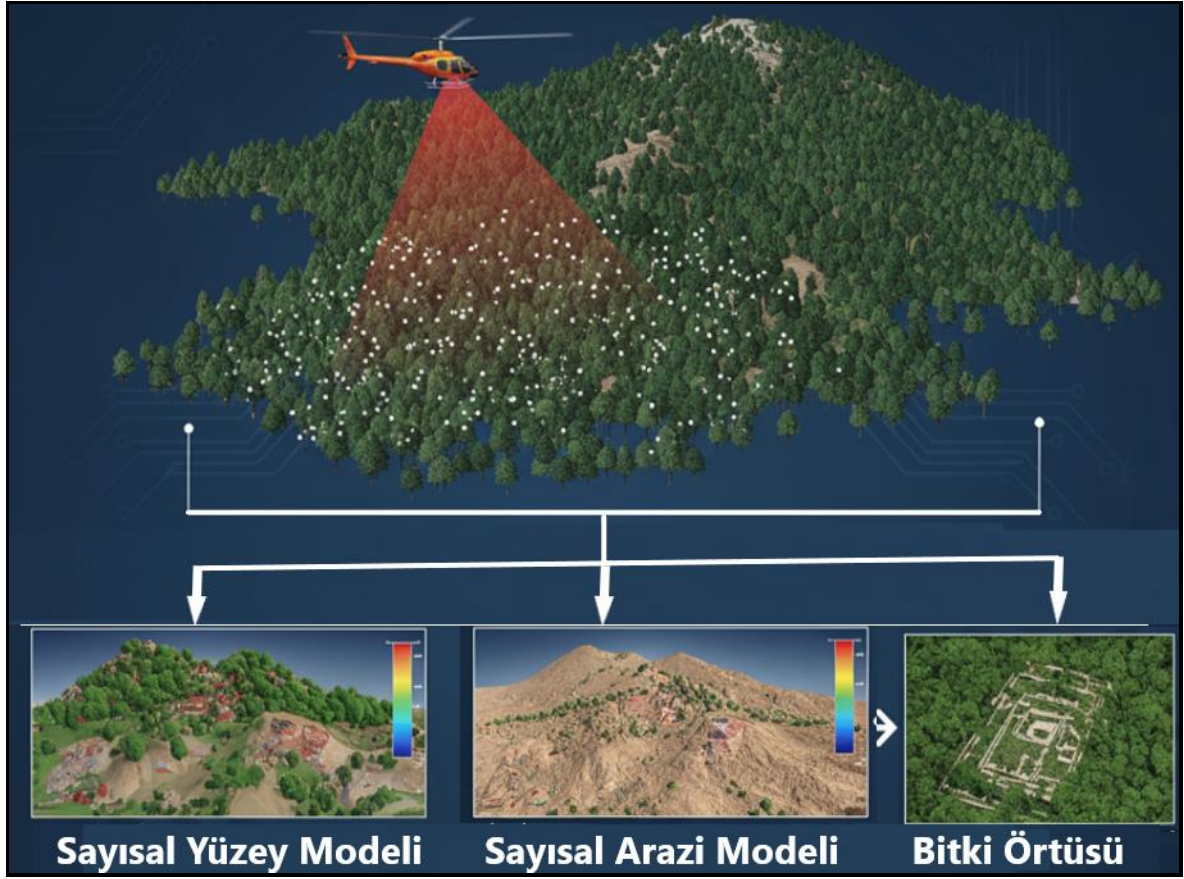
Bu sistemlerle elde edilen veri setleri, yüksek çözünürlüklü 3B nokta bulutları ve detaylı mesh modelleri oluşturmak için kullanılmakta olup, yapıların morfolojik ve mimari özelliklerinin ayrıntılı analizini mümkün kılmaktadır. Bu modeller, sadece geometrik doğruluk sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yapının yüzey dokusu, deformasyon bölgeleri ve malzeme bozulmalarının tespitini de mümkün hâle getirmektedir. Özellikle restorasyon planlaması, yapısal değerlendirme ve malzeme analizi süreçlerinde, giyilebilir mobil LiDAR sistemleri saha verisinin doğruluğu ve veri yoğunluğu sayesinde doğrudan uygulama imkânı sunmaktadır [49-51].



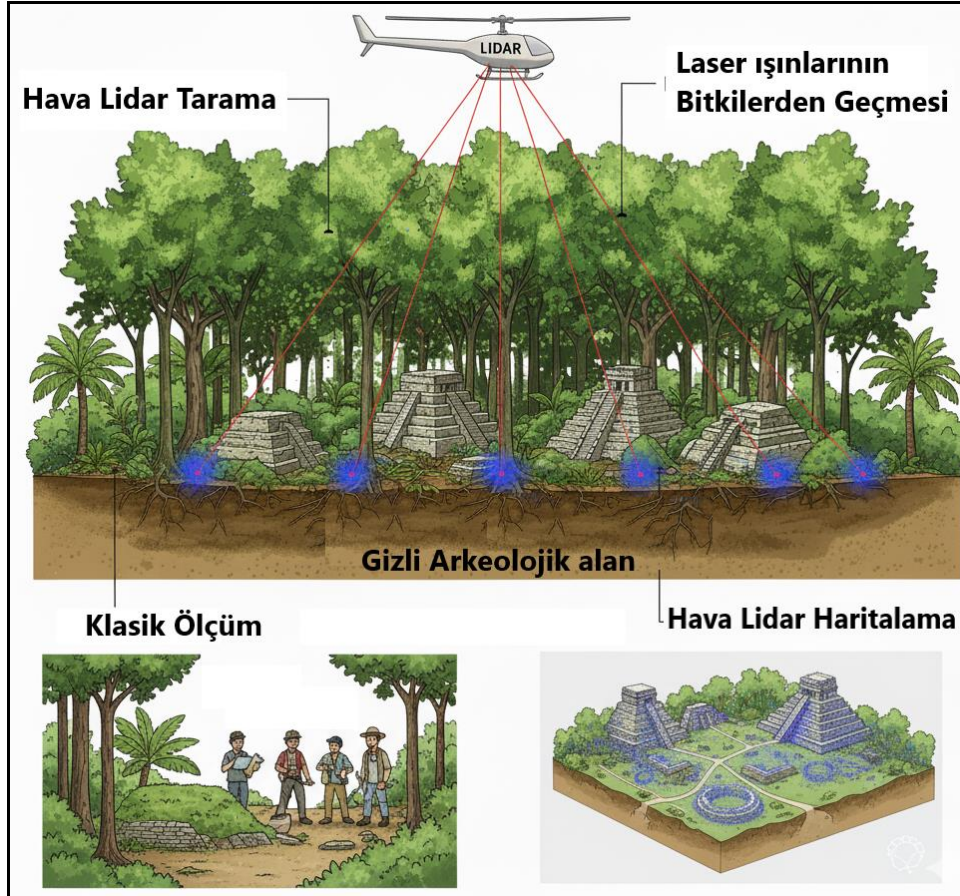
Şekil 10. İHA ile Sayısal Yüzey Modeli ve Sayısal Arazi Modeli üretimi



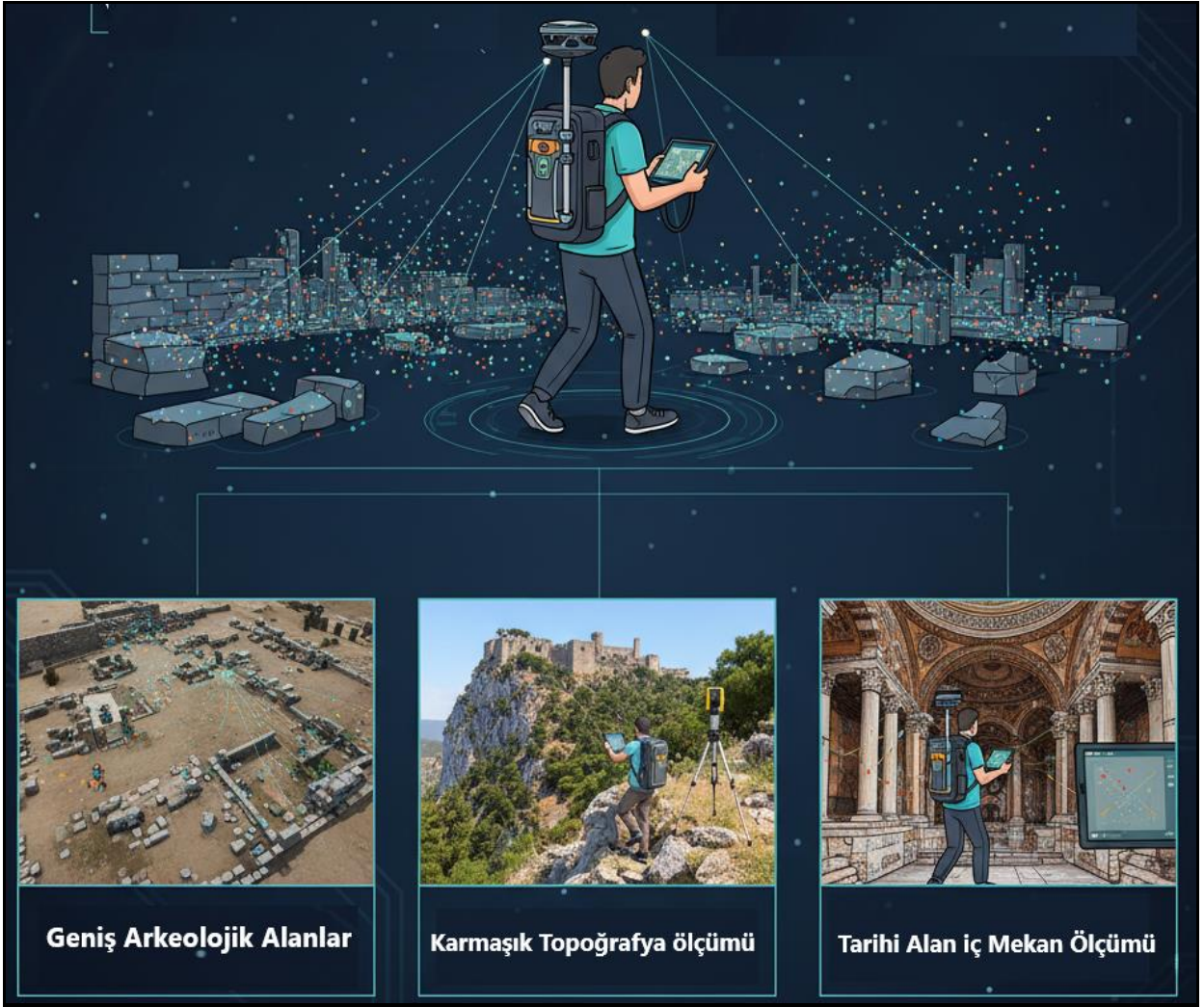
Şekil 11. Hava (Airborne) Lidar



Şekil 12. Hava Lidar Sayısal yüzey Modeli ve Sayısal Arazi Modeli



Şekil 13. Hava lidar ile gizli arkeolojik yapıların ortaya çıkarılması



Şekil 14. Giyilebilir Lidar



Şekil 15. Giyilebilir Lidar Bileşenleri

Ek olarak, bu teknolojiler, **veri entegrasyonu ve çoklu sensör füzyon teknikleri** kullanılarak UAV fotogrametri, yer tabanlı TLS (Terrestrial Laser Scanning) ve diğer ölçüm yöntemleriyle kombine edilmektedir. Bu yaklaşım, elde edilen verilerin hem **topoğrafik** hem de **mimari detaylarını** eksiksiz ve ölçekli biçimde belgelemesine olanak tanımaktadır. Sensör füzyonu sayesinde, farklı veri kaynaklarının avantajları birleştirilerek, tek bir yöntemin sağlayamayacağı doğruluk ve çözünürlük elde edilebilmektedir [49-51].

Ayrıca, bu sistemler ile elde edilen üç boyutlu veriler, dijital arşivleme, sanal restorasyon simülasyonları ve kültürel mirasın uzun dönemli korunması gibi süreçlerde de kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek çözünürlüklü nokta bulutları, veri entegrasyonu ve çoklu sensör füzyon teknikleri kullanılarak UAV fotogrametri veya yer tabanlı TLS verileri ile birleştirildiğinde, hem topoğrafik hem de mimari detayların eksiksiz ve ölçekli biçimde belgelenmesini sağlamaktadır [49-51,56,57]. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık veya erişimi zor alanlarda, geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek düzeyde veri bütünlüğü ve model güvenilirliği sunmaktadır (Şekil 16).

Bu entegrasyon, özellikle karmaşık arkeolojik alanlar, dikey ve erişimi zor yapı elemanları veya yoğun bitki örtüsüyle kaplı bölgelerde veri kalitesini ve model güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, elde edilen üç boyutlu modeller, morfolojik analizler, simülasyon çalışmaları, restorasyon planlaması ve kültürel mirasın dijital korunması gibi ileri düzey uygulamalarda doğrudan kullanılabilir. Bu sayede, saha ölçümlerinin doğruluğu ve model bütünlüğü üst seviyeye çıkarılmakta, akademik ve koruma amaçlı çalışmalara yüksek katkı sağlanmaktadır (Şekil 17) [49,51,58,59].

3.4. 3B Modelleme ve Sanal Gerçeklik

Toplanan veri setleri, ileri veri işleme algoritmaları ve yazılımları kullanılarak yüksek çözünürlüklü 3B mesh modellerine dönüştürülebilmekte ve sanal gerçeklik (VR) ile artırılmış gerçeklik (AR) ortamlarında interaktif olarak görselleştirilebilmektedir [8,18,60]. Bu yöntem, araştırmacıların sahada bulunmadan detaylı mekânsal analizler yapmasına imkân tanırken, geniş halk kitlesine de kültürel miras objelerini uzaktan ve etkileşimli biçimde deneyimleme olanağı sağlamaktadır (Şekil 18).

Oluşturulan 3B modeller, yalnızca geometrik doğruluğu sağlamakla kalmayıp, restorasyon öncesi detaylı analiz, hacim ve yüzey hesaplamaları, malzeme bozulmalarının belgelenmesi, yapısal deformasyonların izlenmesi ve sanal sergileme gibi çok yönlü uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır [24,60,61]. Ayrıca, bu modeller, veri entegrasyonu ve çoklu sensör füzyon teknikleri ile İHA fotogrametri, yer tabanlı YLT ve diğer ölçüm verileriyle kombine edilebilmekte; böylece hem topoğrafik hem de mimari detayların eksiksiz ve ölçekli bir biçimde belgelenmesi mümkün kılınmaktadır [49-51]. Bu entegrasyon,

karmaşık arkeolojik alanlarda veya erişimi sınırlı tarihi yapılarda veri bütünlüğü ve model güvenilirliğini artırmakta, 3B analiz ve simülasyon çalışmalarına önemli katkılar sağlamaktadır (Şekil 19).

Özellikle Türkiye’de, Selçuk Üniversitesi bünyesindeki ibadethaneler ve Kubbe-i Hasiye Türbesi gibi tarihî yapılar, dijital fotogrametri yöntemleriyle modellenmiş ve elde edilen üç boyutlu veriler, restorasyon planlaması, eğitim uygulamaları ve kültürel mirasın dijital korunması süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılmıştır [60,62]. Bu çalışmalar, dijital modelleme ve görselleştirme tekniklerinin kültürel miras alanında sağladığı yenilikçi yaklaşımları, uzaktan erişim imkânlarını ve multidisipliner araştırmalar için sunduğu analitik avantajları açık bir biçimde ortaya koymaktadır.

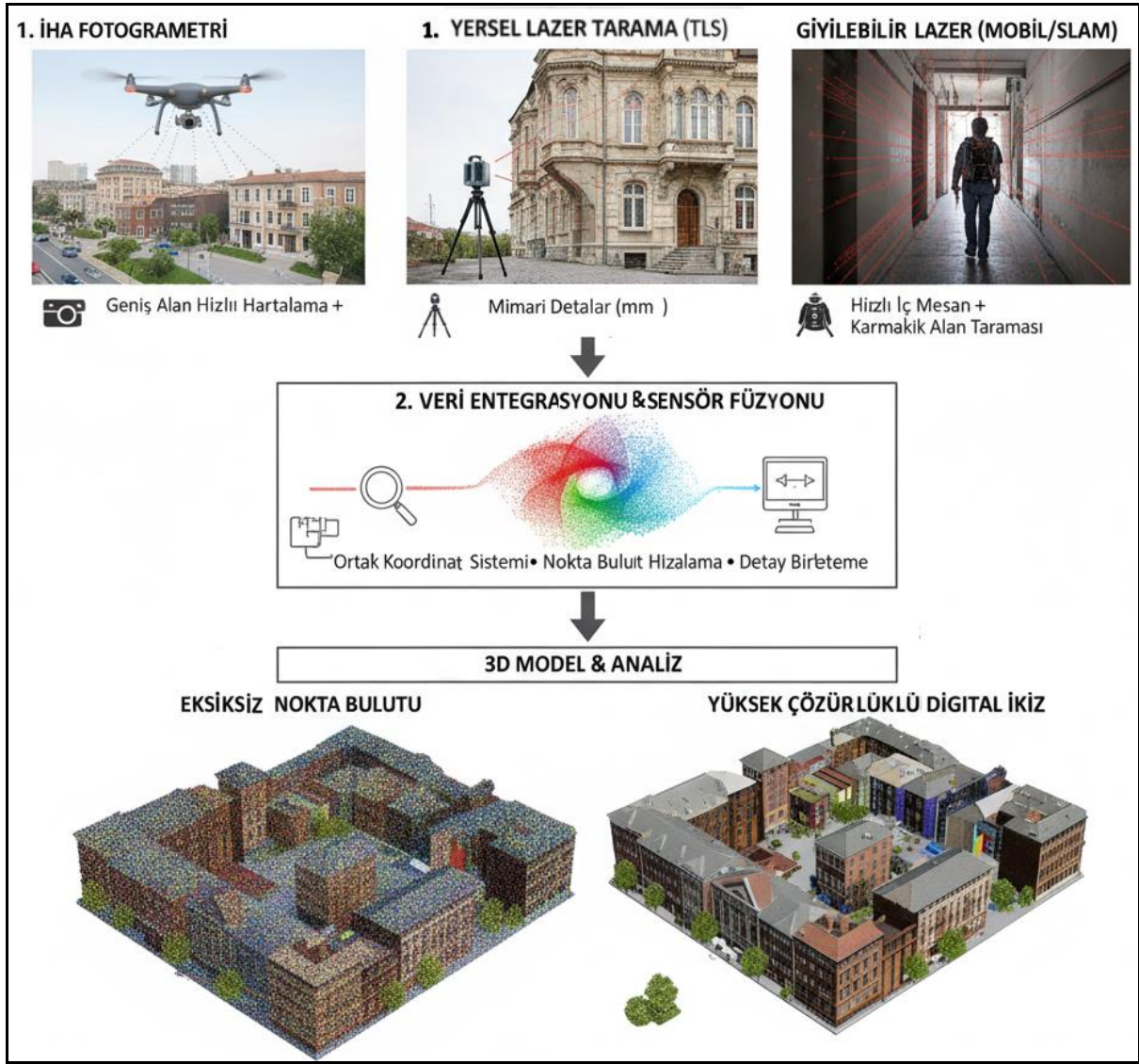
Ayrıca, bu tür üç boyutlu modeller, farklı disiplinlerden araştırmacıların aynı veri seti üzerinden analiz, simülasyon ve karşılaştırmalı çalışmalar gerçekleştirmesine imkân tanımakta, restorasyon ve koruma süreçlerinin planlanmasında veri doğruluğu ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu yaklaşım, kültürel mirasın hem akademik araştırmalar hem de kamu erişimi açısından sürdürülebilir biçimde belgelenmesini mümkün kılmaktadır [60,62].

Ek olarak, bu modeller uzaktan eğitim, sanal sergileme ve kültürel miras yönetimi gibi uygulamalarda da etkin şekilde kullanılabilir; farklı kullanıcı gruplarının aynı veri seti üzerinden etkileşimli deneyimler elde etmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, dijital belgeleme süreçlerinin çok boyutlu faydalarını ortaya koyarak, kültürel mirasın korunması, belgelenmesi ve erişilebilirliğine katkı sunmaktadır [60,62].

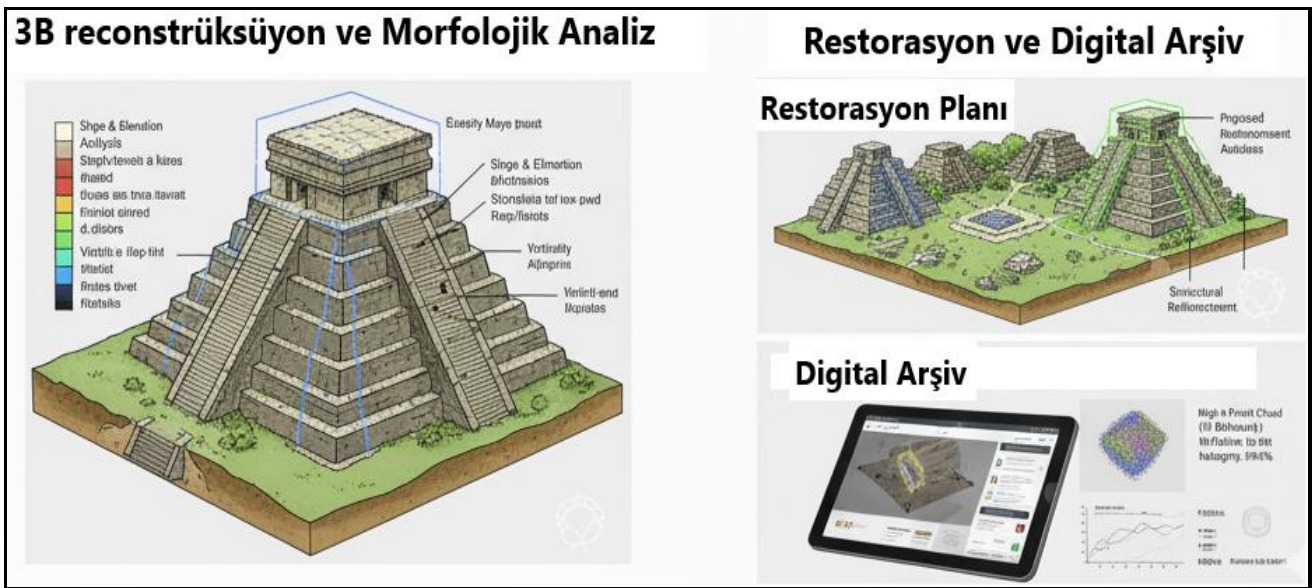
4. Uygulama Alanları

Koruma ve Restorasyon: Yüksek doğruluklu ölçümler ve üç boyutlu (3B) modeller, tarihî yapıların restorasyon süreçlerini yönlendirmede kritik bir rol oynamaktadır. LiDAR ve dijital fotogrametri ile elde edilen veriler, restorasyon planlamasında ölçümsel hassasiyet, mimari detayların korunması, malzeme bozulmalarının belgelenmesi ve restorasyon öncesi analizler açısından güvenilir bir temel oluşturmaktadır. Dolayısıyla restorasyon süreçleri, daha bilimsel, tekrarlanabilir ve veriye dayalı bir yaklaşımla yürütülebilmekte ve tarihî yapıların orijinalliği etkin biçimde korunmaktadır [5,6,16,20].

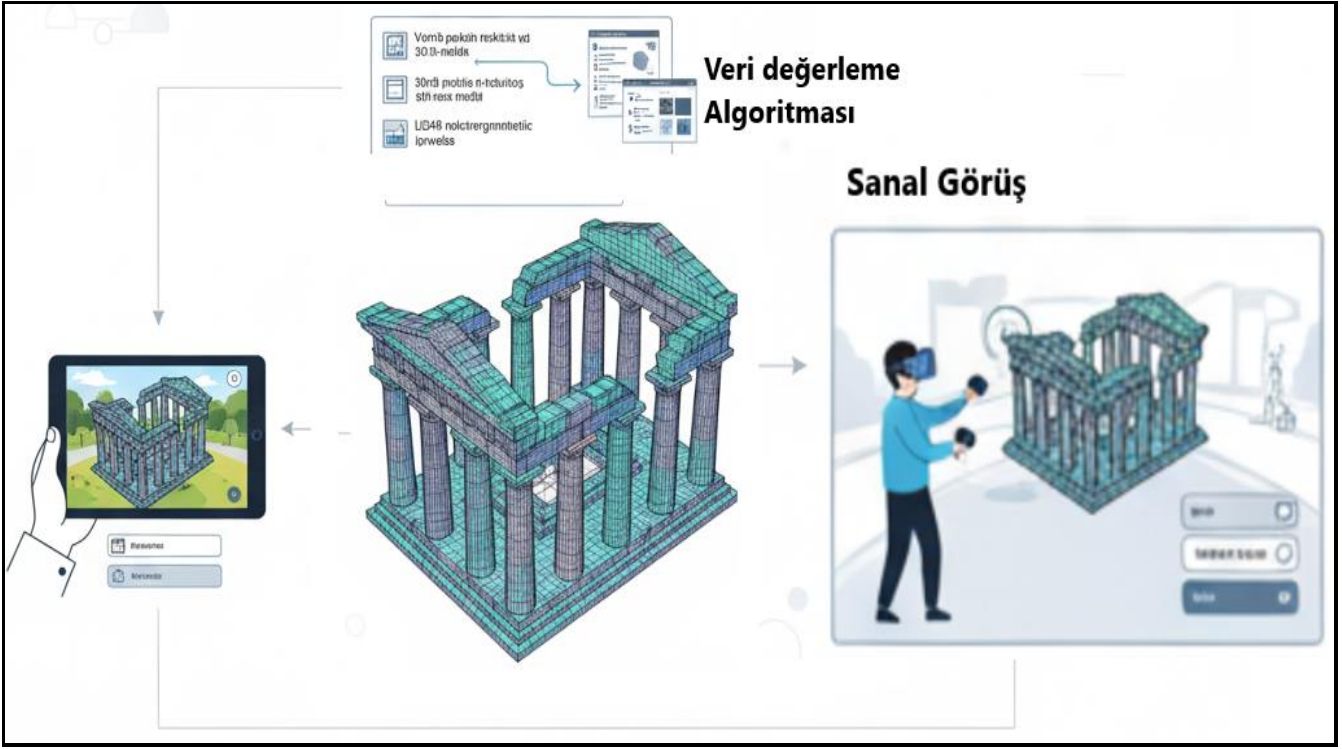
Araştırma ve Eğitim: Dijital üç boyutlu (3B) modeller, akademik araştırmalar ve eğitim materyali olarak etkin biçimde kullanılabilir. Bu modeller, araştırmacıların analiz, simülasyon ve karşılaştırmalı çalışmalar yürütmesine olanak sağlarken, öğrenciler ve saha çalışanları için uzaktan eğitim, uygulamalı öğrenme ve sanal laboratuvar deneyimleri sunmaktadır. Ayrıca, 3B veriler, disiplinlerarası araştırmalarda veri paylaşımı ve ortak çalışma imkânını desteklemektedir [3,8,18,19].



Şekil 16. İHA , giyilebilir lidar ve yersel tarayıcı verilerinin birleştirilmesi



Şekil 17. Digital arşiv ve restorasyon planlaması



Şekil 18. Kültürel mirasın VR gözlüklerle sanal görüşü



Şekil 19. Sanal ve arttırılmış gerçeklik

Sanal Turizm ve Kültürel Erişim: AR ve VR teknolojileri ile entegre edilen dijital modeller, kültürel miras alanlarına uzaktan erişim olanağı sağlamaktadır. Bu sayede, hem geniş halk kitlesi hem de araştırmacılar, fiziksel mekâna bağlı kalmadan tarihî objeleri ve yapıları etkileşimli biçimde deneyimleyebilmekte ve sanal sergileme uygulamaları aracılığıyla kültürel mirasa erişim sağlanabilmektedir [10,60].

Malzeme Bozulmalarının Analizi: Taş ve diğer yapı malzemelerindeki bozulmalar, TLS ve UAV tabanlı fotogrametri yöntemleri ile yüksek doğrulukla belgelenmektedir. Bu teknikler, malzeme yüzeyindeki mikro deformasyonların, çatlakların ve diğer bozulma belirtilerinin detaylı şekilde izlenmesine imkân tanımakta ve koruma/restorasyon çalışmalarının planlanmasına önemli katkılar sağlamaktadır [2,20,28].

Strüktürel Analiz ve Risk Değerlendirmesi: Üç boyutlu (3B) modeller, tarihî yapıların **statik ve dinamik davranışlarının** incelenmesi, yapısal deformasyonların ve çatlak gelişiminin tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu sayede, deprem, erozyon veya diğer doğal afetler öncesinde **risk analizi** ve **güvenlik planlaması** yapılabilen, restorasyon ve koruma stratejileri bilimsel temellere dayandırılabilir [7,17,20].

Arkeolojik Alanların Haritalanması: LiDAR teknolojisi, özellikle yoğun bitki örtüsü veya zorlu topoğrafya altında kalan arkeolojik kalıntıların tespitinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Dijital arazi modelleri (DTM) ve yüksek çözünürlüklü nokta bulutları sayesinde yeni yapılar ve kazı alanları belirlenebilmekte, arkeolojik keşifler hızlandırılmaktadır [7,16,45].

Hacim Hesaplamaları ve Malzeme Yönetimi: 3B modeller ve nokta bulutları, kazı alanlarında veya restorasyon öncesi malzeme hacimlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu sayede taş, tuğla ve diğer yapı malzemelerinin miktarı ve dağılımı doğru biçimde planlanabilmekte, malzeme yönetimi ve lojistik süreçleri optimize edilmektedir [24,61].

Dijital Arşivleme ve Veri Paylaşımı: Kültürel mirasın dijital olarak belgelenmesi, **uzun dönemli arşivleme**, veri tabanı oluşturma ve farklı kurumlar arasında veri paylaşımı olanağı sunmaktadır. Bu yöntem, fiziksel yapıların zarar görmesi durumunda bile detaylı bilgiye erişimi güvence altına almakta ve veri tabanlı restorasyon çalışmalarını desteklemektedir [60-63].

Sanal Rekonstrüksiyon ve Animasyon: Tarihî yapıların ve arkeolojik alanların 3B model verileri, **sanal rekonstrüksiyon**, animasyon ve tarihî ortam simülasyonları oluşturmak için kullanılabilir. Bu uygulamalar hem akademik araştırmalara hem de halka yönelik görselleştirme çalışmalarına katkı sağlamaktadır [18,19].

Turizm ve Kültürel Miras Yönetimi: VR ve AR uygulamalarının ötesinde, 3B veri ve haritalar, ziyaretçi yönetimi, yönlendirme, bilgilendirme panoları ve dijital rehber sistemlerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu sayede kalabalık yönetimi ve ziyaretçi deneyimi optimize edilmekte, kültürel miras alanlarına erişim ve etkileşim artırılmaktadır [25,60].

5. Tartışma

Modern teknolojilerin kullanımı, kültürel mirasın belgelenmesi, korunması ve yönetilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle İHA, YLT ve Hava/LiDAR tabanlı uzaktan algılama sistemleri, saha çalışmalarını hızlandırmakta, veri toplama kapasitesini artırmakta ve ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirmektedir [19,45,61]. Bu teknolojiler, geleneksel fotogrametri ve ölçme tekniklerine kıyasla daha yüksek çözünürlükte, üç boyutlu veri üretimi sağlayabilmekte ve yoğun örtü altındaki yapıları tespit edebilme imkânı sunmaktadır. Örneğin, LiDAR teknolojisi, ormanlık alanlar veya karmaşık şehir dokuları altında kalan arkeolojik kalıntıların detaylı haritalanmasını mümkün kılmakta ve saha keşiflerinde önemli yenilikler getirmektedir [22,50,64].

Ancak, bu teknolojilerin uygulanabilirliği bazı sınırlamalarla kısıtlanmaktadır. Yüksek maliyet, ileri düzey teknik bilgi ve deneyim gereksinimi, veri işleme süreçlerinin karmaşıklığı ve büyük veri yönetimi zorlukları, saha çalışmalarının yaygınlaşmasını engelleyen temel faktörler olarak öne çıkmaktadır [45]. Ayrıca, farklı teknolojilerin entegrasyonu sırasında ortaya çıkabilecek kalibrasyon uyumsuzlukları ve sensörler arası veri farklılıkları, elde edilen modellerin doğruluğunu doğrudan etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, veri işleme ve analiz süreçlerinde standartlaştırılmış metodolojilerin uygulanması kritik bir öneme sahiptir.

İHA, YLT ve LiDAR teknolojilerinin birlikte kullanımı, kültürel mirasın dijital olarak belgelenmesi ve korunması açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Multisensör veri entegrasyonu, farklı ölçeklerdeki yapısal ve çevresel bilgilerin birleşik bir veri seti hâline getirilmesine olanak tanımakta ve böylece kapsamlı mekânsal analizlerin yapılabilmesini sağlamaktadır [49,50,53]. Standartlaştırılmış veri toplama protokolleri ve iş akışları, veri paylaşımı, uzun dönemli korunma, restorasyon planlaması ve interdisipliner araştırmalar açısından kritik öneme sahiptir. Bu yaklaşımlar, yalnızca tarihi yapıların fiziksel belgelenmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda risk değerlendirmesi, yapısal analiz, restorasyon stratejileri ve artırılmış gerçeklik (AR) tabanlı eğitim ve simülasyon uygulamaları gibi ileri düzey uygulamalara da temel teşkil etmektedir [22,53].

Ayrıca, günümüzde makine öğrenmesi ve yapay zekâ tekniklerinin, LiDAR ve İHA verileriyle entegrasyonu, otomatik nesne tanıma, hasar tespiti ve arkeolojik alan sınıflandırması gibi analizlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, kültürel mirasın korunması ve yönetimi süreçlerini daha verimli, tekrarlanabilir ve doğrulanabilir hâle getirmektedir [49,61].

Sonuç olarak, modern teknolojilerin kültürel mirasın belgelenmesindeki rolü giderek artmakta olup, maliyet ve teknik sınırlamalar aşılabildiğinde, bu teknolojiler mirasın korunması, yönetimi ve araştırılması süreçlerinde sürdürülebilir ve kapsamlı çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, disiplinler arası iş birlikleri ve metodolojik standartlaşma, teknolojik

avantajların etkin şekilde kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir.

6. Sonuçlar

Kültürel mirasın belgelenmesinde modern teknolojilerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. İHA ile yapılan fotogrametri, YLT ve Hava/LiDAR sistemlerinin kombinasyonu, kültürel mirasın dijital ortamda belgelenmesi, korunması ve restorasyonu için güçlü bir altyapı sunmaktadır. Bu çoklu sensör entegrasyonu, yapıların geometrik, mekânsal ve yüzey özelliklerini hassas bir şekilde ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda veri bütünlüğünü ve doğrulanabilirliğini artırmaktadır [37]. Özellikle farklı sensörlerden elde edilen veri setlerinin birleştirilmesi, hem karmaşık yapısal detayların hem de örtü altındaki alanların üç boyutlu olarak modellenmesini mümkün kılmaktadır.

Elde edilen üç boyutlu modeller, uzun dönemli arşivleme, değişim takibi ve disiplinler arası analizler için de uygun bir temel sağlamaktadır. Bu modeller, restorasyon ve koruma planlamasında veri odaklı karar alma süreçlerini desteklerken, gelecekteki araştırmalar ve eğitim amaçlı uygulamalar için de yeniden kullanılabilir bir kaynak oluşturmaktadır. Böylece modern teknolojilerin entegrasyonu, kültürel mirasın korunması ve yönetimi süreçlerinde daha sistematik, tekrarlanabilir ve güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Ayrıca, bu dijital modeller restorasyon planlaması, risk ve hasar analizi, artırılmış gerçeklik (AR) tabanlı görselleştirme ve eğitim uygulamaları gibi ileri düzey kullanımlarına olanak tanımaktadır. Örneğin, LiDAR ile elde edilen yoğun nokta bulutları ve İHA fotogrametri verileri, arkeolojik alanlarda örtü altındaki yapıları tespit etme ve mekânsal ilişkileri detaylı şekilde inceleme imkânı sağlamaktadır [49,50,60]. Böylece modern teknolojiler, kültürel mirasın korunması ve yönetimi süreçlerinde daha sistematik, güvenilir ve tekrarlanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca günümüzde yapay zeka tabanlı uygulamaların belgeleme çalışmalarına uyarlanması ile kültürel mirasın korunması farklı bir boyuta taşınabilir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Araştırmacıların katkı oranı

Murat Yakar: Araştırma, literatür taraması, **Hacı Murat Yılmaz:** Düzenleme, yorumlama

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

1.Unal, M., Yakar, M., & Yildiz, F. (2004). Discontinuity surface roughness measurement techniques and the evaluation of digital photogrammetric method. In

Proceedings of the 20th International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS (Vol. 1103, p. 1108).

- 2.Karataş, L., Alptekin, A., Karabacak, A., & Yakar, M. (2022). Detection and documentation of stone material deterioration in historical masonry buildings using UAV photogrammetry: A case study of Mersin Sarisih Inn. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 53-61.
- 3.Yılmaz, H. M., Yakar, M., & Yildiz, F. (2008). Digital photogrammetry in obtaining of 3D model data of irregular small objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 125-130.
- 4.Yılmaz, H. M., & Yakar, M. (2006). Yersel lazer tarama teknolojisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 43-48.
- 5.Yakar, M., Orhan, O., Ulvi, A., Yiğit, A. Y., & Yüzer, M. M. (2015). Sahip Ata Külliyesi Rölöve Örneği. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası*, 10.
- 6.Yılmaz, H. M., Karabörk, H., & Yakar, M. (2000). Yersel fotogrametrinin kullanım alanları. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1.
- 7.Yılmaz, H. M., & Yakar, M. (2006). Lidar (Light Detection And Ranging) tarama sistemi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 23-33.
- 8.Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı fotogrametrik rölöve alımı ve üç boyutlu modelleme çalışması. *Geomatik*, 2(1), 11-17.
- 9.Ulvi, A., Yakar, M., Toprak, A. S., & Mutluoglu, O. (2014). Laser scanning and photogrammetric evaluation of Uzuncaburç Monumental Entrance. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 3(1), 32-36.
- 10.Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ve sensör tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73-100.
- 11.Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., (2017). Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: Dense 12.matching issues, comparison and case studies *Photogramm. Rec.*, 32 (159), pp. 206-229
- Vatan, M., Selbesoglu, M.O., Bayram, B., (2009). The use of 3D laser scanning technology in preservation of historical structures *Wiadomości Konserwatorskie*, 26, 659-669
- 13.Manajitprasert, S., Tripathi, N.K., and Sanit Arunplod, S., (2019). Three-Dimensional (3D) Modeling of Cultural Heritage Site Using UAV Imagery: A Case Study of the Pagodas in Wat Maha That, Thailand, *Applied Sciences*, 9, 3960, 1-14
- 14.Erenoglu, R.C., Akcay, O., Erenoglu, O. (2017). An UAS-Assisted multi-Sensor approach for 3D modeling and reconstruction of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 79-90.
- 15.Ergun, B., Sahin, C., and Bilucan F., (2023). Level of detail (LoD) geometric analysis of relief mapping employing 3D modeling via UAV images in cultural heritage studies, *Heritage Science*, 11,194, 2-14.
- 16.Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Mersin Akyar Falez'i'nin 3B modeli. *Türkiye Lidar Dergisi*, 2(1), 5-9.

17. Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Kaya bloklarının 3B nokta bulutunun yersel lazer tarayıcı kullanarak elde edilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 2(1), 1-4.
18. Yakar, M., Yılmaz, H.M., Yıldız, F., Zeybek, M., Şentürk, H., & Çelik, H. (2010). Silifke-Mersin Bölgesinde Roma Dönemi eserlerinin 3 boyutlu modelleme çalışması ve animasyonu. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (101).
19. Yakar, M., Yıldız, F., Uray, F., & Metin, A. (2010, June). Photogrammetric Measurement of The Meke Lake and Its Environment with Kite Photographs to Monitoring of Water Level to Climate Change. In *ISPRS Commission V Mid-Term Symposium* (pp. 613-616)..
20. Karataş, L., Alptekin, A., & Yakar, M. (2022). Analytical documentation of stone material deteriorations on facades with terrestrial laser scanning and photogrammetric methods: Case study of Şanlıurfa Kışla Mosque. *Advanced LiDAR*, 2(2), 36-47.
21. Kanun, E., Metin, A., & Yakar, M. (2021). Yersel lazer tarama tekniği kullanarak Ağzıkara Han'ın 3 boyutlu nokta bulutunun elde edilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 58-64.
22. 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.
23. Alyılmaz, C., Alyılmaz, S., & Yakar, M. (2010). Measurement of petroglyphs (rock of arts) of Qobustan with close range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 29-32.
24. Yakar, M., Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2013). 3D modeling of historical doger caravansaries by digital photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 695-698.
25. Yılmaz, H. M., Karabörk, H., & Yakar, M. (2000). Yersel fotogrametrinin kullanım alanları. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1.
26. Galeazzi, F., (2017). 3D recording, documentation and management of cultural heritage. *Int. J. Heritage Stud.* 23 (7): 671–673
27. Wang, W., Yamakawa, K., Hiroi, K., Kaji, K., Kawaguchi, N., (2015). A Mobile System for 3D Indoor Mapping Using LiDAR and Panoramic Camera. *Spec. Interest Group Tech. Rep. IPSJ*, (1), 337–340.
28. Karataş, L., Alptekin, A., & Yakar, M. (2022). Determination of Stone Material Deteriorations on the Facades with the Combination of Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetric Methods: Case Study of Historical Burdur Station Premises. *Advanced Geomatics*, 2(2), 65-72.
29. Pena-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., Ortiz-Sanz, J., (2019). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 238–246.
30. Jung, J., Yoon, S., Ju, S., Heo, J., (2015). Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM. *Sensors*, (15), 26430–26456.
31. Chung, M., Kim, C., Choi, K., Chung, D., Kim, Y., (2017). Development of LiDAR simulator for backpack-mounted mobile indoor mapping system. *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.*, (35), 91–102
32. Kanun, E., Alptekin, A., & Yakar, M. (2021). Documentation of cultural heritage by photogrammetric methods: a case study of Aba's Monumental Tomb. *Intercontinental Geoinformation Days*, 3, 168-171.
33. Gaspari, F., Ioli, F., Barbieri, F., Belcore, E., Pinto, L., (2022). Integration of UAV-lidar and UAV-photogrammetry for infrastructure monitoring and bridge assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 43, 995–1002.
34. Baranwal, E., Seth, P., Pande, H., Raghavendra, S., Kushwaha, S. K. P., (2019). Application of unmanned aerial vehicle (UAV) for damage assessment of a cultural heritage monument. In *Proc., Int. Conf. on Unmanned Aerial System in Geomatics*, 123–131. Cham, Switzerland: Springer.
35. Themistocleous, K. (2020). The use of UAVs for cultural heritage and archaeology. In *Remote sensing for archaeology and cultural landscapes* (pp. 241–269). *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Landscapes, Best Practices and Perspectives Across Europe and the Middle East*, Springer.
36. Partama, G.D.Y., Yastika, P.E., Wijaya, M.W., (2025). 3D Modeling Using UAV Photogrammetry Technique For Digital Documentation Of Cultural Heritage buildings, *International Journal of GEOMATE*, Feb., 2025 Vol.28, Issue 126, pp.61-70,
37. Gaspari, F., Ioli, F., Barbieri, F., Belcore, E., Pinto, L., (2022). Integration of uav-lidar and uav-photogrammetry for infrastructure monitoring and bridge assessment. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, XLIII-B2-2022, pp.995–1002.
38. Dasari, S., Mesapam, S., Kumarapu, K., Mandla, V. R., (2021). UAV in Development of 3D Heritage Monument Model: A Case Study of Kota Gullu, Warangal, India., *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49 (7), 1733-1737
39. Camina, J., Javier Sánchez-Aparicio, L., Mayo, C., Gonzalez-Aguilera, D., (2022). Analysis of a SLAM-based laser scanner for the 3D digitalization of underground heritage structures. A case study in the wineries of Baltanas (Palencia, Spain). In: Furferi R et al. (Eds). *The future of heritage science and technologies: ICT and digital heritage*. Cham: Springer International, vol 1645, 42-56
40. Ningsih, T. A. R., Agustiananda, P. A. P., Sholihah, A. B., (2022). Preservation of Cultural Heritage Buildings with the Adaptive Re-Use Method: A Content Analysis of Past Research. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, Vol. 6, Issue 2, 61-69.
41. Gautier, Q.K., Garrison T.G., Rushton, F., Bouck, N., Lo, E., Tueller, P., Schurgers C., Kastner, R., (2020). Low-cost 3D scanning systems for cultural heritage documentation. *J Cult Heritage Manage Sustain Dev* 10 (4): 437–455.

- 42.Hoon, Y. J., and S. Hong , (2019). Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry.” *ISPRS Int. J. Geoinf.* 8 (2): 53.
- 43.Aguera-Vega F, Carvajal-Ramirez F, Martinez-Carricondo P. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *J Surv Eng.* 2017;143(2):1-10.
- 44.Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2017). Generating 3D city models without elevation data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 1-18.
- 45.Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). Giyilebilir Mobil LiDAR'ın Kadastroda Kullanılabilirliği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(2), 52-60.
- 46.Mahmoud, A., Sadruddin, H., Coser, P., Atia, M., (2022). Integration of Wearable Sensors Measurements for Indoor Pedestrian Tracking, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* (Volume: 25, Issue: 1, February 2022)
- 47.Lee, Y., Medioni, G. (2016). RGB-D camera based wearable navigation system for the visually impaired. *Comput. Vis. Image Underst.* (149), 3-20.
- 48.Karataş, L., Alptekin, A., & Yakar, M. (2022). Investigation of Molla Hari (Halil) Süleyman Paşa Mosque's material deteriorations. *Advanced Engineering Days (AED)*, 4, 55-57.
- 49.Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). 3D Modeling of Mufti Abdullah Sıddık Mosque using Wearable Mobile LiDAR. *Advanced LiDAR*, 3(1), 01-09.
- 50.Karabacak, A., & Yakar, M. (2022). Giyilebilir Mobil LiDAR Kullanım Alanları ve Cambazlı Kilisesinin 3B Modellemesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(2), 37-52.
- 51.Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). 3D modeling of Mersin Akyar Cliffs with wearable mobile LIDAR. *Advanced Engineering Days (AED)*, 6, 86-89.
- 52.Yakar, M., Alyılmaz, C., Telci, A., Baygul, E., Çolak, S., Aydın, M., & Yılmaz, H. M. (2009). 3D laser scanning and photogrammetric measurement of Akhan caravansaray.
- 53.Yakar, M., & Karabacak, A. (2023). Giyilebilir Mobil Lidar ve Uygulamaları. *Mersin Üniversitesi Harita Mühendisliği Kitapları*.
- 54.Bosse, M., Zlot, R., Zebedee, F.P.,(2012). Design of a spring-mounted 3D range sensor with application to mobile mapping. *IEEE Trans. Robot.*(18), 1104-1119.
- 55.Gao, H., Cheng, B., Wang, J., Li, K., Zhao, J., Li, D. (2018). Object classification using conn-based fusion of vision and lidar in autonomous vehicle environment. *IEEE Trans. Industrial Inf.* 14, 4224-4231.
- 56.Guidi, G., Russo, M., Ercoli, S., Remondino, F., Rizzi, A., Menna, F., (2009). A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas. *Int. J. Archit. Comput.*,(7), 39-55.
- 57.Choi, K., and Kim , C., (2022). A Framework of Wearable Sensor-System Development for Urban 3D Modeling, *Appl. Sci.*, (12), 9061.
- 58.Liu, J., Azhar, S., Willkens, D., and Li. B., (2023). Static terrestrial laser scanning (TLS) for heritage building information modeling (HBIM): A systematic review. *Virtual Worlds* 2 (2): 90-114
- 59.Karagianni, A., (2021). Terrestrial laser scanning and satellite data in cultural heritage building documentation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVI-M-1-2021 (Aug): 361-366
- 60.Pulat, F., Yakar, M., & Ulvi, A. (2022). Three-dimensional modeling of the Kubbe-i Hasiye Shrine with terrestrial photogrammetric method. *Cultural Heritage and Science*, 3(1), 6-11.
- 61.Yakar, M., Yılmaz, H. M., & Mutluoglu, O. (2014). Performance of photogrammetric and terrestrial laser scanning methods in volume computing of excavation and filling areas. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(1), 387-394.
- 62.Mohammed, O., & Yakar, M. (2016). Yersel fotogrametrik yöntem ile ibadethanelerin modellenmesi. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 15(2), 85-95.
- 63.Ulvi, A., Yakar, M., Alyılmaz, C., & Alyılmaz, S. (2017). Using the close range photogrammetry technique in 3-dimensional work: History of obrukhan sample. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 347-355.
- 64.Lagüela, S., ID ,Dorado, I., Gesto , M., Arias , P., González-Aguilera, D., Lorenzo ,H., (2018). Behavior Analysis of Novel Wearable Indoor Mapping System Based on 3D-SLAM, *Sensors* 2018, 18, 766