



Türkiye Fotogrametri Dergisi

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

e-ISSN 2687-6590



Tarihi Cami Yapılarının Dijital Korunmasında İHA Tabanlı 3B Fotogrametri Yöntemi

Efsa Yiğit ^{*1} & Adem Kabadayı ¹

^{1*} Yozgat Bozok Üniversitesi, Şefaati Meslek Yüksek Okulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Yozgat, Türkiye; (efsaaaygtt@gmail.com; 36601123031@ogr.bozok.edu.tr; adem.kabadayi@bozok.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:

efsaaaygtt@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Yiğit, E. & Kabadayı, A. (2025). Tarihi Cami Yapılarının Dijital Korunmasında İHA Tabanlı 3B Fotogrametri Yöntemi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 7(2), 64-71.

Geliş : 30.11.2025
Revize : 21.12.2025
Kabul : 24.12.2025
Yayınlama : 31.12.2025

Özet

Kültürel miras yapılarının yüksek doğrulukla belgelenmesi, hem restorasyon süreçlerinin bilimsel temele oturtulması hem de dijital koruma ve arşivleme çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Yozgat ilinde yer alan Tokmak Hasan Paşa Camii'nin dış kabuğu, İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı fotogrametri yöntemiyle üç boyutlu (3B) olarak modellenmiş ve üretilen modelin konumsal ve geometrik doğruluğu nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla cami etrafında planlanan uçuşlarla toplam 178 adet yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmiş, görüntüler Agisoft Metashape yazılımında işlenerek seyrek nokta bulutu, yoğun nokta bulutu, üçgen ağ (mesh) ve doku kaplamalı 3B model üretilmiştir. Model, GNSS-RTK yöntemiyle ölçülen Yer Kontrol Noktaları (YKN) ile ölçeklendirilmiş ve dünya koordinat sistemine bağlanmıştır. Doğruluk analizi kapsamında, YKN koordinatları ile fotogrametrik çözümleme sonrası hesaplanan değerler karşılaştırılmış; ortalama planimetrik hata 0.015 m, düşey hata 0.021 m ve 3B RMSE değeri 0.027 m olarak elde edilmiştir. Ayrıca, duvar uzunluğu, giriş açıklığı, minare gövde çapı ve saçak yüksekliği gibi yapısal elemanlar için hesaplanan ortalama mutlak hata 0.014 m, görelî hata ise %0.57 düzeyinde bulunmuştur. Elde edilen bulgular, İHA tabanlı fotogrametrinin küçük ölçekli tarihi camilerin dış cephe belgelenmesinde santimetre düzeyinde doğruluk sağladığını ve kültürel miras dokümantasyonu için etkili bir yöntem sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, benzer ölçekteki tarihi dini yapıların dijital belgelenmesi ve restorasyon öncesi analizleri için uygulanabilir ve tekrarlanabilir bir yöntem çerçevesi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kültürel Miras, İnsansız Hava Aracı (İHA), Üç Boyutlu (3B) Modelleme, Fotogrametrik İş Akışı, Doğruluk Analizi, Kültürel Miras Belgelenmesi, Cami Modellemesi.

UAV-Based 3D Photogrammetry Method in the Digital Preservation of Historic Mosque Structures

*Corresponding Author:
efsaaaygtt@gmail.com

Research Article

Citation: Yiğit, E. & Kabadayı, A. (2025). UAV-Based 3D Photogrammetry Method in the Digital Preservation of Historic Mosque Structures. *Turkish Journal of Photogrammetry*, 7(2), 64-71 (in Turkish).

Received : 30.11.2025
Revised : 21.12.2025
Accepted : 24.12.2025
Published : 31.12.2025

Abstract

Accurate documentation of cultural heritage structures is essential for preserving architectural information, supporting restoration planning, and enabling long-term digital conservation. In this study, the outer shell of the Tokmak Hasan Paşa Mosque, located in Yozgat (Turkey), was modeled in three dimensions (3D) using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based photogrammetric workflow, and the spatial and geometric accuracy of the resulting model was quantitatively assessed. A total of 178 high-resolution images were acquired through a multi-directional UAV flight plan and processed in Agisoft Metashape to generate the sparse point cloud, dense point cloud, triangular mesh, and textured 3D model. The model was scaled and georeferenced using Ground Control Points (GCPs) measured with GNSS-RTK. Accuracy assessment was performed by comparing the photogrammetric GCP coordinates and field measurements, yielding an average planimetric error of 0.015 m, vertical error of 0.021 m, and a 3D RMSE of 0.027 m. In addition, comparisons between field-measured architectural elements (wall length, entrance opening, minaret shaft diameter, and eave height) and model-derived values resulted in a mean absolute error of 0.014 m and an average relative error of 0.57%. The findings demonstrate that UAV-based photogrammetry provides centimeter-level accuracy for documenting small-scale historical mosques and offers a rapid, accessible, and cost-effective method for cultural heritage documentation.

Keywords: Cultural Heritage, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), 3D Modeling, Photogrammetry Workflow, Accuracy Assessment, Heritage Documentation, Mosque Modeling.

1. Giriş

Kültürel miras yapılarının doğru ve sürdürülebilir biçimde belgelenmesi, geçmişe ait mekânsal bilgilerin korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması açısından kritik öneme sahiptir. Tarihi camiler, köprüler, hanlar ve diğer anıtsal yapılar hem mimari çeşitlilikleri hem de zaman içindeki müdahaleler nedeniyle karmaşık geometrilere sahiptir. Bu nedenle, bu tür yapıların mevcut durumlarının doğru şekilde kaydedilmesi, restorasyon projelerinin planlanması ve yapısal bozulmaların izlenmesi için güvenilir ölçme ve modelleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Ancak geleneksel belgeleme yöntemleri—elle ölçüm, klasik fotogrametri veya iki boyutlu çizimler—hem zaman alıcı hem de yorum farkına açık oldukları için karmaşık mimari yapılarda yetersiz kalabilmektedir [2-4].

Dijital belgeleme teknolojilerinin gelişimi, kültürel mirasın korunmasına yönelik yaklaşımları kökten değiştirmiştir. Fotogrametri, lazer tarama (LiDAR) [5]; [6], mobil tarama, RTK/GNSS destekli ölçme teknikleri ve hibrit veri birleştirme çözümleri sayesinde kültürel miras alanlarının çok daha ayrıntılı, hızlı ve maliyet-etkin bir şekilde belgelenmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu dönüşüm yalnızca mekânsal doğruluğu artırmakla kalmamış, aynı zamanda kültürel mirası dijital ortamlarda yaşatmayı mümkün kılmıştır. Özellikle Avrupa ve Asya'daki birçok uluslararası araştırma girişimi, UNESCO tarafından korunan alanların 3B dijital ikizlerinin oluşturulmasını stratejik bir gereklilik olarak tanımlamaktadır. Böyle projeler, yapının geçirdiği müdahalelerin belgelendiği arşivler oluşturmakta; zamansal değişim analizleri, yapısal bozulma takibi ve restorasyon öncesi risk senaryoları gibi yeni uygulama alanları yaratmaktadır.

Kültürel mirasın belgelenmesinde farklı ölçme teknolojilerinin avantaj ve sınırlılıkları uzun süredir tartışılmaktadır. Yersel lazer tarama (YLT), yüksek doğrulukta yoğun nokta bulutları sağlarken, maliyetli ekipman gerektirmesi ve dış cephelerde görüş engelleri nedeniyle bazı durumlarda sınırlı kalabilmektedir [7-9]. Mobil LiDAR sistemleri geniş alanlarda hız ve verimlilik sunsa da, dar avlular veya detaylı mimari elemanlarda gürültü artışı ile karşılaşılabilir [10]. Klasik yersel fotogrametri yöntemleri ise hem zaman hem insan kaynağı açısından yoğun çaba gerektirmektedir. Tüm bu teknolojilerin arasında İnsansız Hava Araçları (İHA), özellikle dış cephe geometrisinin kapsamlı şekilde belgelenmesi açısından benzersiz bir avantaj ortaya koymaktadır. Uçuş yüksekliği ve bakış açısı çeşitliliği sayesinde yapının üst kotlarında bile veri kaybı minimuma inmektedir [11-12].

Kültürel miras fotogrametrisinde güncel araştırma eğilimleri de İHA kullanımını desteklemektedir.

Literatürde özellikle üç konu öne çıkmaktadır: Yüksek çözünürlüklü görüntülerden hızlı bir şekilde üç boyutlu modellerin üretilmesi, karmaşık yapılardaki yapısal deformasyonların ve yüzey bozulmalarının üç boyutlu olarak ayrıntılı biçimde sayısallaştırılabilmesi ve restorasyon planlamasına temel oluşturacak gerçek-ölçekli dijital modellerin güvenilir şekilde oluşturulabilmesi. Bu eğilimler, İHA tabanlı fotogrametrinin kültürel miras alanlarında yalnızca hızlı veri toplama imkânı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda konservasyon kararlarını destekleyen kapsamlı bir analitik altyapı sağladığını göstermektedir [13]. Bu kapsamda Remondino ve Rizzi gibi araştırmacılar, İHA fotogrametrisini doğruluk, operasyonel verimlilik ve erişilebilirlik bakımından öne çıkan yöntemlerden biri olarak değerlendirmektedir. Özellikle kubbe, minare, saçağa geçiş bölgeleri ve hareketli çatı çizgileri gibi erişimi güç alanların belgelenmesinde İHA'ların sağladığı manevra kabiliyeti ve farklı bakış açılarından veri toplama kapasitesi, son yıllarda pek çok çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmuştur. Bunun sonucunda kültürel miras yapılarının yüksek çözünürlüklü dijital ikizlerinin üretilmesi, dijital arşivleme, yapı sağlığı izleme, dijital turizm, sanal sergileme ve eğitim gibi çeşitli kullanım alanlarında önemli avantajlar sağlamaktadır.

Bu tartışmalar ışığında, İHA fotogrametrisi kültürel miras çalışmalarında erişilebilirlik, hız, maliyet etkinlik ve yeterli doğruluk arasında dengeli bir çözüm sunarak öne çıkan yöntem hâline gelmektedir. Maliyetli yersel lazer tarayıcıların gerektirdiği altyapıya kıyasla, düşük bütçeli ekipmanlarla dahi yüksek kaliteli modeller üretilmesi, özellikle yerel yönetimler, üniversiteler ve küçük ölçekli projeler tarafından yürütülen belgelenme çalışmalarında İHA tabanlı yaklaşımları daha cazip bir seçenek hâline getirmiştir. Bu özellikleri nedeniyle yöntem, Anadolu'daki küçük ölçekli cami, han, köprü ve türbe gibi kültürel miras yapılarının belgelenmesi açısından da son derece uygun bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Tarihi camiler; kubbe, minare, mukarnas, kemer ve dış cephedeki karmaşık yüzey geometrileri nedeniyle üç boyutlu modelleme açısından önemli zorluklar içermektedir [14]. Geniş hacimli olmaları, üst kotlarda erişimin güçleşmesi ve yüzeylerdeki karmaşık geometrik geçişler, klasik ölçme yöntemleriyle ayrıntılı belgeleme yapılmasını sınırlandırmaktadır [15]. Bu bağlamda, özellikle Osmanlı ve Selçuklu dönemlerinden günümüze ulaşan camilerin dijital belgelenmesinde İHA tabanlı fotogrametri; bütüncül veri üretimi, yüksek çözünürlük ve erişilebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, cami mimarisinin yapısal karmaşıklığı nedeniyle yüksek

doğruluklu dış cephe modellerinin üretilmesinde İHA tabanlı veri setlerinin etkili olduğunu ortaya koymaktadır [16, 17]. Bu çalışma, Tokmak Hasan Paşa Camii örneği üzerinden, İHA fotogrametrisi kullanılarak bir kültürel miras yapısının yüksek doğruluklu üç boyutlu modelinin üretilmesini ve model doğruluğunun arazi ölçümleriyle nicel olarak değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında uçuş planlaması, görüntü toplama, fotogrametrik iş akışı ve doğruluk analizi aşamaları sistematik bir biçimde yürütülmüştür.

Elde edilen bulgular, İHA tabanlı fotogrametrinin küçük ve orta ölçekli tarihi camilerin dış cephe belgelenmesinde santimetre düzeyinde doğruluk sağladığını ve kültürel mirasın dijital korunmasına yönelik uygulanabilir ve tekrarlanabilir bir yöntem sunduğunu göstermektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı ve Veri Toplama Tasarımı

Bu çalışma, Yozgat ili sınırlarında yer alan Tokmak Hasan Paşa Camii'nde gerçekleştirilmiştir. Osmanlı dönemi mimarisinin karakteristik unsurlarını taşıyan yapı; merkezi kubbe, yan birimler, dış cephe taş dokusu ve minare gibi fotogrametrik modelleme açısından karmaşık geometrilere sahiptir. Bu nedenle, çalışmanın veri toplama tasarımı, yapının bütün dış yüzeylerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerle elde edilmesini sağlayacak şekilde planlanmıştır.

Arazi çalışması öncesinde yapının çevresi incelenmiş, uçuş güzergâhlarının güvenli biçimde uygulanabilmesi için açık alanlar, dar geçişler ve engelleyici unsurlar değerlendirilmiştir. Uçuş planı, farklı kotlardan ve değişen bakış açılarından görüntü elde edilecek şekilde tasarlanmış; özellikle kubbe ve çatı geçiş bölgelerinin görünürlüğünü artırmak amacıyla eğimli açıdan çekimler tercih edilmiştir.

Ayrıca, modelin ölçeklendirilebilmesi ve koordinat doğruluğunun yükseltilmesi amacıyla cami çevresine yer kontrol noktaları (YKN) yerleştirilmiş ve bu noktaların küresel koordinatları Hi-Target GNSS alıcıları ile ölçülmüştür. Böylece, görüntülerin fotogrametrik iş akışında dünya koordinat sistemine doğru şekilde entegre edilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan İnsansız Hava Aracı, entegre RGB kameraya sahip olup fotogrametrik veri toplama amacıyla yapı çevresinde manuel uçuş gerçekleştirilmiştir. İHA kamerası yaklaşık 20 MP çözünürlüğe, 1 inç CMOS sensöre ve sabit odak uzaklığına (≈ 24 mm eşdeğeri) sahiptir. Görüntüler JPEG formatında ve otomatik pozlama ayarlarıyla elde edilmiş, çekim sırasında fotogrametrik çözümlemeye uygun olacak şekilde yüksek bindirme oranları korunmuştur.

2.2. İHA Tabanlı Görüntüleme Süreci

Veri toplama aşamasında optik kameralı bir İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak caminin farklı yön ve yüksekliklerden yüksek çözünürlüklü fotoğrafları çekilmiştir. Uçuş öncesinde hava koşulları değerlendirilmiş; rüzgâr hızı, ışık koşulları ve güneş konumu veri kalitesini etkileyebilecek faktörler olarak dikkate alınmıştır.

İHA uçuşu manuel kontrol ile yapı etrafında dairesel bir rota izleyerek gerçekleştirilmiş; cephelerin daha iyi görüntülenebilmesi için hem yatay hem eğimli açılardan fotoğraflar alınmıştır. Çekim süreci sırasında bindirme oranları boyuna %75, enine %70 olacak şekilde ayarlanmış ve fotogrametrik işleme için yeterli sayı ve yoğunlukta görüntü elde edilmiştir.

Toplam uçuş süresi yaklaşık 20 dakika olup, farklı kotlardan gerçekleştirilen çekimler sayesinde yapının üst kotları ve kubbe geometrisi için veri kaybı minimuma indirilmiştir.

2.3. Fotogrametrik İş Akışı ve 3B Model Üretimi

Elde edilen tüm görüntüler, fotogrametrik işlemler için Agisoft Metashape yazılımına aktarılmıştır. İş akışı dört temel aşamada yürütülmüştür:

- Görüntü hizalama ve özellik çıkarımı: Görüntüler arasındaki ortak noktalar (tie points) otomatik olarak tespit edilmiş, yapının kabaca geometrisini temsil eden seyrek nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu aşamada YKN koordinatları yazılıma dahil edilmiş ve model küresel koordinat sistemine bağlanmıştır.
- Yoğun nokta bulutu üretimi: Hizalanmış görüntüler üzerinden piksel düzeyinde stereo çözümleme yapılarak caminin üç boyutlu geometrisini temsil eden yüksek yoğunluklu bir nokta bulutu oluşturulmuştur.
- Mesh model oluşturma: Yoğun nokta bulutundan üçgen ağ (mesh) modeli türetilmiş; yüzey geometrisinin daha anlaşılır olması için yüksek detay seviyesinde bir yüzey rekonstrüksiyonu yapılmıştır. Çatı, duvar dokuları ve minare gövdesi gibi karmaşık bölgelerde yüzey sürekliliğinin korunmasına özen gösterilmiştir.
- Doku kaplama (texturing): Model üzerine görüntülerden üretilen yüksek çözünürlüklü dokular kaplanmış, böylece hem görsel hem yapısal olarak gerçekçi bir 3B temsil elde edilmiştir.

2.4. Doğruluk Analizi ve Referans Ölçümler

Oluşturulan üç boyutlu modelin güvenilirliğini değerlendirmek için fotogrametrik veri setinin hem geometrik hem de konumsal doğruluk bileşenleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Doğruluk değerlendirmesi iki temel veri kaynağına dayanmaktadır: (i) sahada total station ve GNSS ile elde edilen referans ölçümler ve (ii) fotogrametrik çözümleme sonucu Agisoft Metashape yazılımı tarafından üretilen model değerleri. Bu yaklaşım, bir kültürel miras yapısının dijital ortamdaki temsiline ilişkin hem ölçek hem konum tutarlılığının nicel olarak ortaya konmasını amaçlamaktadır.

İlk aşamada, cami üzerinde kolay erişilebilir ve yapısal bütünlüğü temsil eden mimari elemanlara ait fiziksel ölçümler referans veri olarak kullanılmıştır. Duvar uzunlukları, giriş açıklığı, saçak yüksekliği ve minare gövde çapı gibi doğrusal ve dairesel bileşenler sahada Hi-Target Total Station ve GNSS RTK sistemi ile ölçülmüştür. Fotogrametrik model üzerinde aynı elemanlara ait karşılık gelen mesafeler hesaplanmış ve iki veri seti arasındaki farklar üzerinden mutlak hata (MAE) ve kök ortalama kare hata (RMSE) değerleri türetilmiştir. Bu analiz, modelin geometrik tutarlılığını ve ölçek doğruluğunu değerlendirmede temel ölçüt olarak kullanılmıştır.

İkinci aşamada, fotogrametrik çözümleme sürecine dâhil edilen yer kontrol noktalarının (YKN) yazılım tarafından hesaplanan koordinatları ile arazi ölçümlerinden elde edilen gerçek koordinatlar karşılaştırılmıştır. Her bir YKN için planimetrik (ΔE , ΔN) ve yükseklik (Δh) farkları hesaplanmış; nokta tabanlı konumsal hatalar ve ortalama hata büyüklükleri değerlendirilmiştir. Bu süreç, modelin dünya koordinat sistemine entegrasyonundaki doğruluğu ve fotogrametrik çözümlemenin konumsal stabilitesini ortaya koymaktadır.

Her iki analiz bileşeninin birlikte ele alınması, İHA tabanlı fotogrametrinin küçük ölçekli kültürel miras yapılarında ne ölçüde güvenilir sonuç verdiğini bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Böylece, hem modelin fiziksel gerçekliğe olan uyumu hem de konumsal referans doğruluğu bilimsel olarak nicel biçimde ortaya konmuştur.

3.1. Fotogrametrik İşlem Performansı ve Üretilen 3B Veri Ürünleri

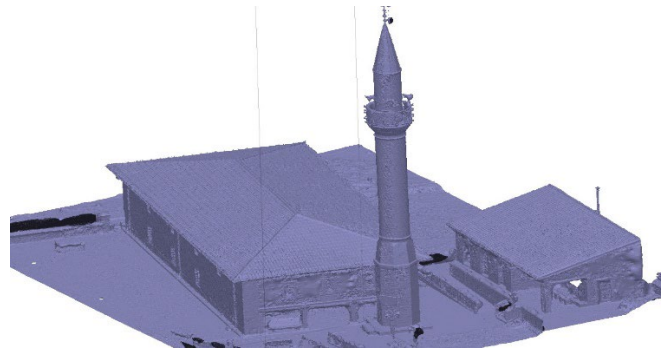
Tokmak Hasan Paşa Camii'ne ait görüntü seti, İHA ile gerçekleştirilen çok yönlü uçuş planı sonucunda elde edilen toplam 178 adet yüksek çözünürlüklü fotoğraftan oluşturulmuştur. Görüntüler Agisoft Metashape yazılımına aktarılmış ve "Align Photos" aşamasında 171 kameranın başarıyla hizalandığı görülmüştür. Bu aşamada oluşturulan

seyrek nokta bulutu (sparse cloud), yapı geometrisini temsil eden yeterli sayıda özellik noktası içermektedir. Kamera kalibrasyonundan sonra hesaplanan ortalama yeniden izdüşüm hatası (reprojection error), fotogrametrik kalite açısından kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır.

Hizalama işleminden önce yapının çevresine Yer Kontrol Noktaları (YKN) yerleştirilmiş ve bu noktaların koordinatları GNSS-RTK yöntemiyle ölçülmüştür. YKN'ler Metashape projesine "Markers" olarak eklenmiş, ancak bu aşamada yalnızca modelin küresel koordinat sistemine bağlanması amacıyla kullanılmıştır. YKN'lere ilişkin sayısal doğruluk değerlendirmeleri 3.2 başlığında ayrıntılı olarak sunulacaktır.

Derinlik haritalarının üretilmesi (Build Depth Maps) ve yoğun nokta bulutu (Build Dense Cloud) işleminin tamamlanmasıyla yapıyı temsil eden yüksek yoğunluklu bir nokta seti oluşturulmuştur. Bu nokta bulutu, kubbe eğriliği, beden duvarları, taş dokusu ve minarenin silindirik geometrisi gibi karmaşık mimari detayların doğru biçimde temsil edilmesini sağlamıştır.

Yoğun nokta bulutundan oluşturulan üçgen ağ (mesh) modeli, yapının temel topolojisini yüksek doğrulukla yansıtmaktadır. Şekil 1'de verilen katı model (mesh), caminin geometrik formunun bütünsel ve hatasız bir temsiline olanak sağlamıştır. Minare gövdesi, kubbe yüzeyi ve saçak geçişleri gibi bölgelerde yüzey sürekliliğinin korunduğu görülmektedir.



Şekil 1. Tokmak Hasan Paşa Camii'ne ait yoğun nokta bulutundan türetilen üçgen ağ (mesh) modeli; yapının genel geometrik formunu ve mimari bütünlüğünü göstermektedir.

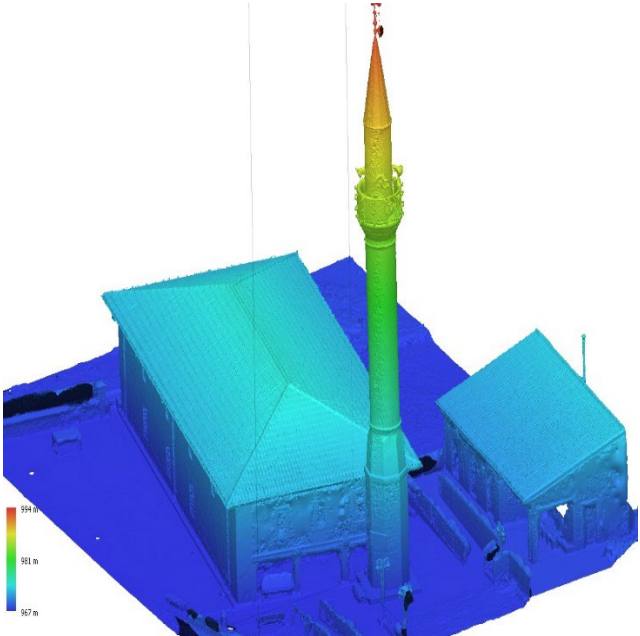
Ardından elde edilen doku kaplamalı (textured) 3B model, yapı üzerindeki taş yüzey dokusu, kemer geçişleri ve çatı kaplamasının görsel bütünlüğünü başarıyla yansıtmaktadır. Şekil 2'de görülen bu model, hem geometrik bütünlük hem de estetik doğruluk açısından fotogrametrik sürecin etkinliğini ortaya koymaktadır.

Son aşamada, yoğun nokta bulutundan türetilen yükseklik kodlamalı model üretilmiştir. Şekil 3'te

sunulan bu yüzey modeli, yapının dikey mimari elemanlarının (kubbe tepe noktası, minare yüksekliği, saçak seviyeleri) renk skalası üzerinden net biçimde ayrışmasını sağlamaktadır.



Şekil 2. Doku kaplamalı fotogerçekçi 3B model; taş yüzey dokuları, kemer geçişleri ve mimari detayların görsel doğrulukla temsilini göstermektedir.



Şekil 3. Yükseklik kodlamalı yüzey modeli; kubbe, minare ve saçak seviyeleri arasındaki düşey farklılıkları renk skalası üzerinden göstermektedir.

Bu üç temel çıktı, fotogrametrik iş akışının hem görsel hem geometrik yönden tutarlı sonuçlar ürettiğini ve caminin dijital belgelenmesi için gerekli kaliteyi sağladığını göstermektedir.

Modelin mimari ölçek doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, caminin belirli yapısal elemanları arazi ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda batı beden duvarı uzunluğu, giriş açıklığı, minare gövde çapı ve saçak yüksekliği gibi elemanlar hem sahada total station ve lazer metre ile ölçülmüş hem de üç boyutlu model üzerinden hesaplanmıştır. Tüm fiziksel ölçümlere karşılık gelen model ölçümlerinin farkları Tablo 2’de verilmiştir. Farkların 0.012–0.016 m aralığında, göreceli hata yüzdeliklerinin ise %0.09–1.15 arasında değiştiği görülmektedir. Ortalama mutlak hata (MAE) 0.014 m, ortalama göreceli hata ise %0.57 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, fotogrametrik modelin mimari ölçekte yaklaşık 1–1.5 cm hassasiyet ürettiğini ortaya koymaktadır.

3.2. Doğruluk Analizi

Üretilen üç boyutlu modelin konumsal ve geometrik doğruluğu, Yer Kontrol Noktalarının (YKN) fotogrametrik çözümleme sonrası hesaplanan koordinatları ile GNSS-RTK ölçümlerinden elde edilen gerçek koordinatların karşılaştırılması ve ayrıca yapısal elemanların arazi ölçümleriyle model ölçümlerinin kıyaslanması yoluyla değerlendirilmiştir. Arazi çalışması sırasında cami çevresine yerleştirilen beş adet YKN, Metashape projesine “Markers” olarak eklenmiş ve fotogrametrik ölçekleme işlemi bu noktalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. YKN’lerin planimetrik ve düşey bileşenlerde gösterdiği farklar Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Yer Kontrol Noktalarının konumsal doğruluk sonuçları.

Nokta	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Planimetrik Hata (m)	3B Hata (m)
YKN-1	0.011	0.014	0.021	0.018	0.028
YKN-2	0.006	0.009	0.017	0.011	0.021
YKN-3	0.013	0.012	0.024	0.018	0.031
YKN-4	0.008	0.015	0.019	0.017	0.026
YKN-5	0.010	0.011	0.022	0.015	0.028

Tablo 2. Yapısal eleman doğruluk karşılaştırması

Eleman	Arazi Ölçümü (m)	Model Ölçümü (m)	Fark (m)	Göreceli Hata (%)
Batı duvar uzunluğu	17.842	17.826	0.016	0.09%
Giriş kapısı açıklığı	1.684	1.671	0.013	0.77%
Minare gövde çapı	1.296	1.281	0.015	1.15%
Saçak yüksekliği	4.210	4.198	0.012	0.28%

Sonuçlar, planimetrik farkların 0.006–0.015 m, düşey farkların ise 0.017–0.024 m aralığında değiştiğini göstermektedir. Ortalama planimetrik hata 0.015 m, ortalama düşey hata 0.021 m, üç boyutlu kök ortalama kare hata (RMSE_{3D}) ise 0.027 m olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, modelin global koordinat sistemine santimetre düzeyinde başarıyla oturduğunu göstermektedir.

YKN doğrulukları ile yapısal eleman karşılaştırmaları birlikte değerlendirildiğinde, modelin hem konumsal hem de mimari ölçek doğruluğunun literatürde İHA fotogrametrisi için bildirilen hata aralıklarıyla uyumlu olduğu ve kültürel miras belgeleme çalışmalarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır. Ortalama 2–3 cm konumsal doğruluk ve 1–1.5 cm geometrik doğruluk düzeyi, modelin hem restorasyon ön hazırlıkları hem de dijital arşivleme amaçlı olarak yeterli hassasiyeti sağladığını göstermektedir.

3.3. Genel Değerlendirme

Tokmak Hasan Paşa Camii için gerçekleştirilen fotogrametrik modelleme çalışması, hem görsel hem de geometrik doğruluk açısından tatmin edici sonuçlar üretmiştir. Fotogrametrik iş akışı, Metashape ortamında görüntü hizalama, yoğun nokta bulutu üretimi ve mesh modelleme süreçlerinin tümünde yüksek tutarlılık sağlamış; yapının mimari özelliklerini temsil eden detay seviyesini korumuştur. Özellikle kubbe yüzeyi, minare gövdesi, taş duvar dokusu ve saçak geçişleri gibi karmaşık bölgelerde elde edilen model kalitesi, kullanılan görüntü setinin yeterli örtüşme oranlarına ve çözünürlüğüne işaret etmektedir.

Doğruluk analizleri, modelin hem global koordinat sistemine entegrasyonunda hem de mimari ölçek doğruluğunda santimetre düzeyinde sapmalarla çalıştığını göstermiştir. YKN tabanlı konumsal doğruluk değerlerinin 2–3 cm aralığında, yapısal eleman karşılaştırmalarının ise 1–1.5 cm seviyesinde gerçekleşmesi, modelin kültürel miras belgelenmesi, dijital arşiv oluşturma ve restorasyon projelerine ön hazırlık amacıyla kullanılabilir nitelikte olduğunu doğrulamaktadır.

Elde edilen üç boyutlu modelin doku kalitesi ve yüzey sürekliliği, yapının mimari bütünlüğünün dijital ortamda yüksek doğrulukla temsil edilmesine olanak sağlamıştır. Çalışmanın genel sonuçları, İHA tabanlı fotogrametrisinin küçük ölçekli kültürel miras yapılarında hem hızlı hem de maliyet etkin bir dokümantasyon yöntemi sunduğunu; üretilen modelin ileride yapılacak çizim, planlama, bakım-onarım ve izleme çalışmalarına sağlam bir dijital temel oluşturduğunu göstermektedir.

4. Tartışma

Bu çalışma, Tokmak Hasan Paşa Camii'nin İHA tabanlı fotogrametri yöntemiyle belgelenmesine yönelik bütüncül bir değerlendirme sunmuş ve elde edilen bulgular, tek yapı ölçeğinde gerçekleştirilen kültürel miras çalışmalarında bu yöntemin hem pratik hem de yüksek doğruluklu bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Fotogrametrik iş akışının tamamı, görüntü toplama–hizalama–yoğun nokta bulutu üretimi–mesh modelleme–doku kaplama aşamalarının her birinde tutarlı sonuçlar üretmiş; üretilen modeller yapının mimari bütünlüğünü yüksek seviyede temsil etmiştir. Bu yönüyle çalışma, İHA fotogrametrisinin özellikle küçük ve orta ölçekli tarihi yapılarda hızlı, erişilebilir ve maliyet etkin bir dokümantasyon aracı olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır.

Yapılan doğruluk analizleri, modelin hem global koordinat sistemine bağlanmasında hem de mimari ölçek doğruluğunda santimetre düzeyinde performans sergilediğini ortaya koymuştur. YKN tabanlı doğrulukların 2–3 cm, yapısal eleman bazlı farkların ise 1–1.5 cm aralığında olması, İHA görüntülerinin nitelikli bir veri toplama altyapısıyla birleştiğinde restorasyon projelerinin ön hazırlığında güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Bu doğruluk düzeyi, literatürde benzer çalışmalar için bildirilen sapma aralıklarıyla uyumludur ve kullanılan görüntü setinin yeterliliğini, modelleme sürecinin ise istikrarını ortaya koymaktadır. Özellikle taş duvar dokusu, kubbe yüzeyi ve minare gövdesi gibi ayrıntılarda elde edilen topolojik süreklilik, modelin mimari analiz ve görsel belgelenme açısından taşıdığı değeri artırmaktadır.

Bununla birlikte çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Saçak altı bölgeleri, minarenin üst kotu ve kuzey cephedeki gölgeli yüzeyler, görüntülerin görüş açısı ve ışık koşulları nedeniyle kısmen eksik veya düşük doku kontrastıyla temsil edilmiştir. Bu durum, İHA fotogrametrisinin özellikle dik yüzeyler, gölge geçişleri ve yüksek kotlardaki karmaşık geometrilerde karşılaştığı bilinen sınırlılıklardan biridir. Ayrıca, çalışmada yalnızca dış cephe modellemesi gerçekleştirilmiş; iç mekân fotogrametrisi veya lazer tarama ile entegrasyon yapılmamıştır. Bu durum, yapının bütüncül dijital ikizinin oluşturulması açısından önemli bir tartışma alanı sunmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Tokmak Hasan Paşa Camii örneği üzerinden İHA tabanlı fotogrametrisinin kültürel miras yapılarının dijital belgelenmesinde yüksek doğruluklu ve uygulanabilir bir yöntem sunduğunu ortaya koymuştur. Santimetre

düzeyinde elde edilen konumsal ve geometrik doğruluk değerleri, yöntemin hem dijital arşivleme hem de restorasyon öncesi belgeleme süreçlerinde güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Düşük maliyetli ekipmanlarla dahi yüksek kaliteli üç boyutlu modeller üretilmesi, yöntemin yerel yönetimler, üniversiteler ve koruma uzmanları açısından önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

6. Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalar kapsamında, İHA fotogrametrisinin yer tabanlı lazer tarama veya mobil lazer tarama teknolojileriyle birleştirilmesi, özellikle dik yüzeylerdeki veri boşluklarını ortadan kaldırarak daha hassas hibrit modellerin üretilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, yapı üzerinde çatlak, yüzey bozulması veya taş erozyonu gibi problemlerin izlenmesine yönelik yarı otomatik ya da derin öğrenme tabanlı hasar tespit algoritmalarının uygulanması, modelin operasyonel değerini artıracaktır. İç mekân-dış mekân bütünleşik modelleme çalışmaları, yapının hem mimari hem de yapısal analizler için daha kapsamlı bir dijital arşiv haline getirilmesini mümkün kılabilir. Son olarak, bu çalışma kapsamında üretilen modellerin sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik ortamlarına aktarılması, kültürel mirasın erişilebilirliği ve dijital turizm uygulamaları açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Danışmanlığını Öğr. Gör. Adem Kabadayı'nın yaptığı Efsa Yiğit'in 1919B012476457 numaralı Tübitak 2209-A projesi kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Bu makaleye yazarlar eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

[1] Kaya, Y., & Yiğit, A. Y. (2020). Dijital el kameraları kullanılarak kültürel mirasın belgelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 33–38.

- [2] Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites: Techniques, problems, and examples. *Applied Geomatics*, 2(3), 85–100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>
- [3] Bagnolo, V., & Paba, N. (2019). UAV-based photogrammetry for archaeological heritage site survey and 3D modeling of the Sardus Pater Temple (Italy). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W17, 139–146.
- [4] Fernández-Hernández, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P., & Mancera-Taboada, J. (2015). Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: An effective, low-cost tool for archaeology applications. *Archaeometry*, 57(1), 128–145. <https://doi.org/10.1111/arcm.12078>
- [5] Fidan, Ş., Ulvi, A., Yiğit, A. Y., Hamal, S. N. G., & Yakar, M. (2023). Combination of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry for heritage building information modeling: A case study of Tarsus St. Paul Church. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 89(12), 897–908.
- [6] Yakar, M., Ulvi, A., Fidan, Ş., Karabacak, A., Villi, O., Yiğit, A. Y., & Hamal, S. N. G. (2023). *İnsansız hava aracı teknolojisi ve operatörlüğü eğitim kitabı*. Mersin: Mersin Üniversitesi Harita Mühendisliği Yayınları.
- [7] Fidan, Ş., & Ulvi, A. (2022). Tarsus Aziz Pavlus Kilisesi'nin yersel lazer tarama teknikleri ile üç boyutlu modelinin oluşturularak sanal gerçekliğe hazırlanmasının değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 4(2), 60–70.
- [8] Alptekin, A., Fidan, Ş., Karabacak, A., Çelik, M. Ö., & Yakar, M. (2019). Üçayak Örenyeri'nin yersel lazer tarayıcı kullanılarak modellenmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 1(1), 16–20.
- [9] Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>
- [10] Uzun, S. D., Hamal, S. N. G., & Fidan, Ş. (2022). Elde taşınabilir lazer tarayıcılar ile insan yüzünün modellenerek güzellik ve bakım sektöründe kullanımının değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 4(1), 17–20.
- [11] Fidan, Ş. (2025). Antik kentlerin giriş kapılarının insansız hava araçları ile üç boyutlu modellenerek belgelenmesi: Anavarza Ören Yeri Zafer Kapısı örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 7(1), 27–38.

- [12] Şenol, H. İ., Yiğit, A. Y., Kaya, Y., & Ulvi, A. (2021). İHA ve yersel fotogrametrik veri füzyonu ile kültürel mirasın üç boyutlu (3B) modelleme uygulaması: Kanlıdivane örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(1), 29–36
- [13] Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: Current status and future perspectives. In *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)* (pp. 25–31). Zurich, Switzerland: ISPRS.
- [14] Döş, M. E., & Yiğit, A. Y. (2022). Tarihi minberlerin fotogrametri yöntemi ile belgelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(2), 58–65.
- [15] Mumcuoğlu Türker, S. S. (2024). Wooden pillar mosques in Yozgat centre and districts. In *10th International "Artemis" Scientific Research Congress* (pp. 1–15). Bucharest, Romania.
- [16] Kabadayı, A., & Türker, S. S. M. (2025). Dijital koruma yöntemleriyle mimari miras: Eski Şefaati Camii'nin fotogrametri tabanlı modellenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 7(1), 1–9.
- [17] Ulvi, A., Varol, F., & Yiğit, A. Y. (2019). 3D modeling of cultural heritage: The example of Mui Mubarek Mosque in Uzbekistan (Hz. Osman's Mushafi). In *International Congress on Cultural Heritage and Tourism (ICCHT)* (Vol. 115, p. 123).



© Author(s) 2025.

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