



Antik Kentlerin Giriş Kapılarının İnsansız Hava Araçları ile Üç Boyutlu Modellenerek Belgelenmesi: Anavarza Ören Yeri Zafer Kapısı Örneği

Şafak Fidan ^{1*}

¹ Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Harita ve Kadastro Programı, 33110, Mersin, Türkiye; (safakfidan@mersin.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
safakfidan@mersin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Alıntı: Fidan, S. (2025). Antik Kentlerin Giriş Kapılarının İnsansız Hava Araçları ile Üç Boyutlu Modellenerek Belgelenmesi: Anavarza Ören Yeri Zafer Kapısı Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 7(1), 27-38.

Geliş : 22.03.2025
Revize : 19.05.2025
Kabul : 28.05.2025
Yayınlama : 30.06.2025

Özet

Bu çalışma, Adana ili sınırlarında yer alan Anavarza Antik Kenti'ndeki üç kemerli Roma yapısı Zafer Kapısı'nın İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı fotogrametri yöntemiyle üç boyutlu (3B) olarak belgelenmesini ve üretilen dijital modelin geometrik doğruluğunun analiz edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, yapıdan modele fotogrametrik iş akışı kapsamında 220 adet yüksek çözünürlüklü görüntü Agisoft Metashape yazılımında işlenmiş; nokta bulutu, mesh model ve ortofoto üretimi gerçekleştirilmiştir. Modelin konumsal doğruluğunun artırılması amacıyla altı adet Yer Kontrol Noktası (YKN) ile aerotriangülasyon yapılmış, modelin harici doğrulaması altı adet Kontrol Noktası (KN) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Doğruluk analizi sonucunda ortalama kök-ortalama kare hata (RMSE) değeri 0.027 m olarak hesaplanmış; bu sonuç, yapı ölçeğinde yüksek geometrik doğrulukta bir model elde edildiğini göstermektedir. Elde edilen 3B model, Zafer Kapısı'nın taş işçiliği, kemer geometrisi ve mevcut fiziksel durumu gibi mimari detayları hassas biçimde temsil etmektedir. Çalışma ayrıca fotogrametri tabanlı belgelenme sürecinde karşılaşılan ışık koşulları, yüzey dokusu, örtüşme oranı ve uçuş planlaması gibi teknik zorluklara da metodolojik çözüm önerileri sunmaktadır. Sonuçlar, İHA tabanlı fotogrametri yöntemlerinin, özellikle büyük ölçekli ve mimari olarak karmaşık kültürel miras yapılarının belgelenmesinde yüksek doğruluk, zaman ve maliyet etkinliği sağladığını göstermektedir. Elde edilen 3B modelin dijital arşivleme, restorasyon planlaması, sanal sergi ve eğitim gibi alanlarda çok amaçlı olarak kullanılabileceği vurgulanmakta; çalışma, kültürel mirasın dijital dönüşümüne yönelik uygulamalı bir örnek sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Anavarza Zafer Kapısı, insansız hava araçları, üç boyutlu modelleme, arkeolojik belgelenme, dijital kültürel miras.

Documentation of Ancient Cities' Entrance Gates by Using Three-Dimensional Models with Unmanned Aerial Vehicles: Anavarza Archaeological Site Victory Gate Example

* Corresponding Author:
safakfidan@mersin.edu.tr

Research Article

Citation: Fidan, S. (2025). Documentation of Ancient Cities' Entrance Gates by Using Three-Dimensional Models with Unmanned Aerial Vehicles: Anavarza Archaeological Site Victory Gate Example. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 7(1), 27-38. (in Turkish).

Received : 22.03.2025
Revised : 19.05.2025
Accepted : 28.05.2025
Published : 30.06.2025

Abstract

This study aims to document and generate a three-dimensional (3D) digital model of the Triumphal Arch located within the ancient city of Anavarza, Adana Province, Türkiye, using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based photogrammetric methods. A total of 220 high-resolution images were processed in Agisoft Metashape following a Structure-from-Motion (SfM) workflow to produce dense point clouds, textured mesh models, and orthophotos. To enhance the spatial accuracy of the model, six Ground Control Points (GCPs) were integrated during the aerial triangulation phase, and the external accuracy was assessed using six independent Check Points (CPs). As a result of the accuracy assessment, the Root Mean Square Error (RMSE) was calculated as 0.027 m, demonstrating that the generated 3D model achieves high geometric precision at the architectural scale. The model effectively preserves and visualizes architectural features such as masonry details, arch curvature, and structural deformations. Moreover, this study discusses several technical challenges encountered during the documentation process, including lighting conditions, surface texture complexity, image overlap ratio, and flight planning, and offers practical solutions for each. The results indicate that UAV-based photogrammetry offers a fast, cost-effective, and highly accurate alternative for documenting large-scale and architecturally complex cultural heritage sites. The resulting 3D model provides a valuable digital record that can be utilized for archival preservation, restoration planning, virtual exhibitions, and educational purposes. This work serves as an applied example of digital heritage documentation, contributing to the broader discourse on the digital transformation of cultural heritage.

Keywords: Anavarza Victory Gate, unmanned aerial vehicles, three-dimensional modeling, archaeological documentation, digital cultural heritage.

1. Giriş

Kültürel miras alanlarının belgelenmesi, günümüz teknolojilerinin sunduğu imkânlarla yeniden tanımlanmakta; özellikle arkeolojik yapılar, üç boyutlu dijital modeller aracılığıyla hem bilimsel analizlere hem de koruma planlamalarına konu olmaktadır. Bu çalışma, Adana ili sınırlarında yer alan ve Roma döneminin en görkemli yapılarından biri olan Anavarza Zafer Kapısı'nın İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı görüntülerle belgelenerek üç boyutlu modellenmesini amaçlamaktadır.

Geliştirilen yöntem, geleneksel ölçüm tekniklerine alternatif olarak dijital belgelenmenin sağladığı avantajları ortaya koymakta ve kültürel mirasın sürdürülebilirliği açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışmanın bilimsel özgünlüğü, Zafer Kapısı gibi çok kemerli ve yüksek yapısal kompleksiteye sahip bir mimari unsurun fotogrametrik modelleme süreçlerini ayrıntılı biçimde ele alması; üretilen modelin doğruluğunu yer kontrol noktaları (YKN) ve kontrol noktaları (KKN) yardımıyla sayısal olarak değerlendirmesiyle pekiştirilmektedir. Ayrıca modelleme sürecinde karşılaşılan teknik zorluklar ve çözüm önerileri de tartışılarak, benzer projelere metodolojik rehberlik sağlanması hedeflenmektedir.

Bu kapsamda, giriş bölümü aşağıdaki alt başlıklarla yapılandırılmıştır:

1.1. Antik Kentlerin ve Giriş Kapılarının Önemi: Kültürel mirasın belgelenmesinde giriş kapılarının simgesel ve tarihsel anlamı aktarılmakta; çalışmanın tematik çerçevesi kurulmaktadır.

1.2. Anavarza Ören Yeri ve Zafer Kapısı: Çalışma alanı olan Anavarza Ören Yeri'nin tarihsel arka planı sunulmakta, Zafer Kapısı'nın mimari özgünlüğü açıklanmaktadır.

1.3. Geleneksel Belgelenme Yöntemlerinin Sınırlamaları: Alanda yaygın olarak kullanılan klasik yöntemlerin sınırlılıkları örneklerle ele alınmakta; yeni teknolojilere duyulan ihtiyaç temellendirilmektedir.

1.4. İHA ve Üç Boyutlu Modelleme: İHA teknolojisinin arkeolojik belgelenmedeki artan rolü vurgulanmakta, alana ilişkin güncel literatür katkılarıyla desteklenmektedir.

1.5. Üç Boyutlu Modelleme Teknolojileri: Çalışmada kullanılan fotogrametrik modelleme teknolojileri tanıtılmakta, seçilen yazılımların özellikleri ile bilimsel gerekçeleri açıklanmaktadır.

Bu alt başlıklar aracılığıyla, çalışma yalnızca belirli bir yapının modellenmesi değil; aynı zamanda dijital belgelenme sürecinin bütüncül bir değerlendirmesini de sunmayı amaçlamaktadır.

1.1. Antik Kentlerin ve Giriş Kapılarının Önemi

Antik kentler, geçmiş uygarlıkların sosyal, kültürel, ekonomik ve mühendislik bilgilerini yansıtan eşsiz mekânlardır. Bu kentler, yalnızca birer yaşam alanı değil, aynı zamanda dönemin toplumsal düzenini, dinsel ritüellerini ve politik yapısını temsil eden kompleks yerleşimlerdir (Akurgal, 2000). Bu bağlamda, antik kentlerin giriş kapıları, yalnızca mimari bir unsur değil; aynı zamanda kentin kimliğini, siyasi gücünü ve estetik anlayışını yansıtan simgesel yapılar olarak değerlendirilmektedir (Avrami, 2000).

Tarihsel bağlamda giriş kapıları, çoğu zaman zafer anıtları veya sınır belirleyici yapılar olarak işlev görmüştür. Özellikle Roma döneminde inşa edilen kapılar, çok kemerli, yüksek oranlı ve zengin süslemeli yapılarıyla dikkat çeker. Bu mimari öğeler, dönemin teknik kapasitesini ve mühendislik becerisini ortaya koyarken; bir yandan da sosyal prestij ve otoriteyi görünür kılmayı hedeflemiştir (Campana, 2017). Aynı zamanda bu yapılar, tören geçitleri, ticari giriş-çıkış kontrolü ve kentsel organizasyonun temel bileşenlerinden biri olarak işlevsel roller üstlenmiştir.

Ancak günümüzde, bu yapılar hem doğal afetler hem de insan müdahalesi nedeniyle ciddi yıpranmalara maruz kalmaktadır. Koruma ve restorasyon faaliyetleri genellikle geleneksel tekniklerle yürütülmekte olup, birçok ayrıntının belgelenmesinde yetersiz kalılabilmektedir (Balcı & Ulvi, 2024). Bu noktada dijital modelleme teknikleri, giriş kapılarının hem görsel hem de metrik anlamda eksiksiz biçimde belgelenmesini ve geleceğe taşınmasını mümkün kılmaktadır.

Bu bağlamda, Anavarza Zafer Kapısı gibi hem tarihsel hem de mimari açıdan yüksek değere sahip yapılar için İHA ile desteklenen üç boyutlu modelleme yöntemleri, çok katmanlı bir belgelenme ve analiz süreci sunmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu yapının belgelenmesine yönelik dijital yaklaşımlar kullanılmış; elde edilen bulgular doğrultusunda hem bilimsel hem de kültürel miras yönetimine katkı sağlanması amaçlanmıştır (bkz. 1.2, 1.4).

1.2. Anavarza Ören Yeri ve Zafer Kapısı

Anavarza Antik Kenti, Adana ili Kozan ilçesi sınırları içerisinde yer almakta olup, Anadolu'nun tarihsel katmanlarını barındıran en önemli arkeolojik alanlardan biridir. Kentin geçmişi Roma dönemine uzanmakta, sonraki Bizans, Ermeni Krallığı ve İslam dönemlerine ait izler de kapsamlı biçimde izlenebilmektedir (Erten, 2018). Anavarza, antik dönemde "Caesarea ad Anazarbus" ismiyle anılmış ve özellikle Roma İmparatorluğu döneminde Kilikya bölgesinin idari ve askeri merkezi konumuna

gelmiştir. Kentte yer alan surlar, tiyatro, stadyum, bazilika, su kemerleri ve hamam gibi yapılar, kentin gelişmiş kentleşme düzeyini ve mimari çeşitliliğini ortaya koymaktadır.

Anavarza'nın en dikkat çekici yapılarından biri olan Zafer Kapısı, kentin güneybatı girişinde yer almakta olup üç kemerli ve çok katmanlı yapısıyla tipik bir Roma zafer takı örneğidir. Mimarisi, Roma dönemine ait tekniklerin ve estetik anlayışın gelişmiş bir yansımasıdır. Kapı, yalnızca giriş-çıkış kontrolü sağlayan bir yapı değil, aynı zamanda siyasi bir mesaj taşıyan anıtsal bir semboldür. Özellikle çok kemerli tasarımı, dönemsel otoriteyi ve mimari kudreti simgelemektedir (Özdemir, 2015).

Mevcut literatürde, Zafer Kapısı üzerine yapılan çalışmalar genellikle yapının tarihi geçmişi, mimari üslubu ve restorasyon potansiyeline odaklanmıştır. Ancak, bu çalışmaların çoğu geleneksel ölçüm yöntemlerine dayanmaktadır. Ölçüm ve belgeleme faaliyetleri genellikle manuel tekniklerle sınırlı kalmış; yapının yüksekliği, taş işçiliği gibi kritik detaylar dijital olarak belgelenememiştir (Önal et al., 2023). Bu eksiklik, yapının hem mimari analizinde hem de restorasyon sürecinde ölçülebilir eksiklikler yaratmaktadır.

Bu çalışma ise, Zafer Kapısı'nın İHA ile çekilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden elde edilen üç boyutlu fotogrametrik model aracılığıyla belgelenmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca görsel temsil sunmakla kalmamak; aynı zamanda yapının geometrik doğruluğunu değerlendirme ve uzun vadeli koruma süreçlerine katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır. Kapının üst bölümleri, arşitrav ve alınlık kısımları gibi geleneksel yöntemlerle erişilmesi zor alanlar, İHA'lar aracılığıyla etkili şekilde belgelenmiş; modelleme süreci ile restorasyon simülasyonlarına uygun yüksek doğruluklu dijital veri setleri elde edilmiştir.

1.3. Geleneksel Belgelenme Yöntemlerinin Sınırlamaları

Arkeolojik yapıların belgelenmesi sürecinde uzun yıllar boyunca başvurulmuş geleneksel yöntemler; elle çizim, klasik fotoğrafçılık, elle alınan ölçümler ve manuel plan çıkarımı gibi teknikleri içermektedir. Bu yöntemler, belirli ölçüde görsel kayıt ve mimari analiz imkânı sunmuş olsa da özellikle büyük, karmaşık ve yüksek yapılar için çeşitli zorluklar barındırmaktadır (Remondino & El-Hakim, 2006).

Geleneksel ölçme teknikleri, ayrıntılı bir yapı analizi gerçekleştirmek için yoğun emek, zaman ve uzmanlık gerektirir. Özellikle anıtsal ve çok katmanlı mimari unsurlarda (örneğin çok kemerli giriş kapıları veya anıtsal zafer takları gibi) erişimi zor bölgelerin

belgelenmesi, fiziksel engeller ve güvenlik riskleri nedeniyle çoğu zaman ya mümkün olamamakta ya da yetersiz verilerle sınırlı kalmaktadır (Kabadayı & Mumcuoğlu Türker, 2025; Kabadayı, 2021). Zafer Kapısı gibi yüksekliğe sahip bir yapının üst bölümlerine erişim, iskele kurulumu veya vinç desteği gerektirebilir ki bu da hem maliyetli hem de zamana bağlı bir süreçtir (Verhoeven, 2011).

Ayrıca, klasik yöntemlerle elde edilen belgeler (örneğin çizimler veya iki boyutlu fotoğraflar), yapıların hacimsel ilişkilerini, topoğrafik konumlarını veya geometrik deformasyonlarını yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Bu durum, restorasyon ve koruma çalışmalarının doğruluğunu da doğrudan etkilemektedir. Örneğin bir kemerin yatay düzlemdeki eğimi veya bir taş bloğun eksenel kayması, yalnızca görsel belgelerle tam anlamıyla fark edilemeyebilir (Ulukok & Ulvi, 2023).

Ayrıca belgelerin standartlaşmasında da sorunlar yaşanabilmektedir. Farklı ekiplerin farklı dönemlerde yaptığı belgeler arasında tutarsızlıklar oluşabilir. Bu durum, özellikle uzun soluklu arkeolojik kazı ve restorasyon projelerinde ciddi koordinasyon eksikliklerine yol açabilir. Bu nedenle, yüksek doğrulukta, tekrarlanabilir ve dijital olarak saklanabilir belgeleme yöntemlerine olan ihtiyaç artmaktadır.

İşte bu noktada, İnsansız Hava Aracı (İHA) destekli üç boyutlu modelleme yöntemleri, hem belgeleme kalitesini hem de sürecin verimliliğini artırmak adına geleneksel yöntemlere önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmanın önerdiği dijital yöntemler, geleneksel sınırlamaların üstesinden gelmeyi hedeflemekte ve arkeolojik belgelenme pratiğini çağdaş bir düzleme taşımaktadır.

1.4. İnsansız Hava Araçları (İHA) ve Üç Boyutlu Modelleme

Günümüzde arkeolojik yapıların belgelenmesinde İHA kullanımı giderek artan bir ivmeyle yaygınlaşmaktadır. Özellikle yüksek, geniş ve ulaşılması zor mimari unsurların belgelenmesinde İHA sistemleri, zaman ve emek açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda İHA'lar, sadece veri toplama aracı değil, aynı zamanda dijital belgeleme sürecinin merkezinde yer alan teknolojik bir bileşen haline gelmiştir (Campana, 2017; Verhoeven, 2011; Mumcuoğlu Türker & Kabadayı, 2025).

İHA'lar sayesinde yapıların tüm yüzeyleri farklı açılardan görüntülenebilmekte, kısa sürede çok sayıda yüksek çözünürlüklü görsel elde edilebilmektedir. Bu görüntüler, fotogrametrik iş akışları ile üç boyutlu modellere dönüştürülerek, yapıların hacimsel geometrisi, detaylı yüzey yapıları ve mevcut deformasyonları analiz edilebilmektedir (Remondino

& El-Hakim, 2006; Kabadayı et al., 2020). Bu çalışmada kullanılan İHA ile elde edilen görüntüler, Zafer Kapısı'nın üst kotlarındaki detayların da eksiksiz olarak belgelenmesine olanak sağlamıştır. Geleneksel yöntemlerle erişilemeyecek ya da belgelenmesi oldukça zahmetli olan bu bölümler, İHA ile güvenli, hızlı ve sistematik bir şekilde görüntülenmiştir.

Ayrıca İHA'lar, sabit kanatlı veya çok rotorlu (multikopter) yapılarına göre farklı avantajlar sunmaktadır. Özellikle çok rotorlu sistemler, düşük irtifada hassas manevralar yaparak karmaşık yapılara yakın uçuşlar gerçekleştirebilir. Bu da anıtsal yapılarda, mimari detayların daha fazla görüntülenmesine ve modelleme kalitesinin artmasına katkı sağlar (Karakaya & Ulvi, 2024).

İHA'ların fotogrametrik modelleme ile entegrasyonu, yalnızca görsel belgelenmeyle sınırlı kalmaz. Aynı zamanda bu modeller, ölçümsel (metrik) doğruluk da içerdiğinden; restorasyon planlaması, hasar analizi, yapı sağlığı izlemesi ve sanal gerçeklik (VR) uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilir hale gelmektedir. Bu çalışmada, Zafer Kapısı'nın hem görsel hem de metrik olarak doğru bir şekilde modellenmesi, ileride yapılacak müdahaleler için sayısal referans teşkil etmesi bakımından önem arz etmektedir.

Son olarak, İHA ile görüntüleme süreci çevresel koşullardan etkilenebilir. Rüzgâr, ışık kontrastı ve atmosferik şartlar, veri kalitesini doğrudan etkileyebilir. Bu çalışma özelinde, uygun hava koşulları altında planlanan uçuş sayesinde yüksek kaliteli görüntüler elde edilmiş, görüntü sayısı ve örtüşme oranı dikkatle seçilmiştir. Bu yaklaşım, modelin bütünlüğünü ve doğruluğunu artırmış; fotogrametrik iş akışının sağlıklı ilerlemesini mümkün kılmıştır.

1.5. Üç Boyutlu Modelleme Teknolojileri

Üç boyutlu modelleme teknolojileri, kültürel mirasın belgelenmesinde hem görselleştirme hem de ölçümsel doğruluk açısından yeni bir paradigma sunmaktadır. Özellikle fotogrametri (Structure from Motion – SfM) ve Lazer Taramaya (Light Detection and Ranging–LiDAR) dayalı teknikler, arkeolojik yapıların karmaşık geometrilerini detaylı biçimde yeniden oluşturma kapasitesine sahiptir. Bu teknolojiler sayesinde yapının yalnızca görsel özellikleri değil, aynı zamanda metrik bilgileri de yüksek doğrulukla dijital ortama aktarılabilir (Remondino et al., 2006; Doneus et al., 2013).

Bu çalışmada, Zafer Kapısı'nın üç boyutlu modellenmesi amacıyla fotogrametri temelli bir iş akışı tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, maliyet etkinliği, taşınabilirlik, çevresel etkiye duyarsızlık ve görsel-

metrik bütünlüğü ile ön plana çıkmaktadır (Şenol et al., 2021). İHA ile çekilen yüzey görüntüleri, yüksek örtüşme oranı ve yeterli açısal çeşitlilik sayesinde fotogrametrik işleme uygun hale getirilmiş; yapı, nokta bulutu (point cloud), yüzey ağları (mesh) ve doku kaplamaları (texture mapping) ile detaylı biçimde yeniden modellenmiştir.

Çalışmada kullanılan yazılım, Agisoft Metashape Professional olup, SfM-MVS (Multi View Stereo) algoritmalarını destekleyen gelişmiş bir fotogrametrik modelleme paketidir. Bu yazılımın tercih edilme nedenleri arasında; kullanıcı dostu arayüzü, detaylı kalite ayarları, yer kontrol noktası (YKN) ve kontrol noktası (KKN) entegrasyon yeteneği ile çıktı doğruluk analizlerinin güvenilirliği bulunmaktadır. Metashape, özellikle kültürel miras yapılarına ilişkin çalışmalar için yaygın bir araç olarak önerilmekte ve literatürde birçok başarılı örnekle desteklenmektedir (Remondino et al., 2014; Özdemir, 2015).

Nokta bulutu üretiminde kullanılan parametreler –örneğin yoğunluk seviyesi, bağlanma eşiği, anahtar nokta limiti– model kalitesini doğrudan etkileyen unsurlardır. Bu çalışmada yüksek detayda nokta bulutu üretimi yapılmış, daha sonra bu bulut, üçgen ağına (mesh) dönüştürülerek yüzey modellemesi gerçekleştirilmiştir. Ardından, RGB görüntülerden elde edilen dokular modele kaplanmış ve yapı hem görsel hem de metrik olarak bütüncül bir dijital form kazanmıştır. Modelleme süreci boyunca kullanılan her adım, daha sonra gerçekleştirilecek restorasyon, simülasyon veya yapısal analiz çalışmalarına doğrudan katkı sağlayacak nitelikte yapılandırılmıştır.

Ancak fotogrametri temelli üç boyutlu modelleme, bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Özellikle gölgelenmiş alanlar, bitki örtüsüyle kaplı yüzeyler veya homojen dokulu bölgeler (örneğin düz duvarlar) gibi unsurlar, fotogrametrik algoritmaların doğru eşleme yapmasını zorlaştırabilir. Bu çalışmada, böyle bölgeler için gerekirse ek görüntü çekimleri yapılarak boşluklar minimize edilmiş; yapı bütünlüğü korunmuştur.

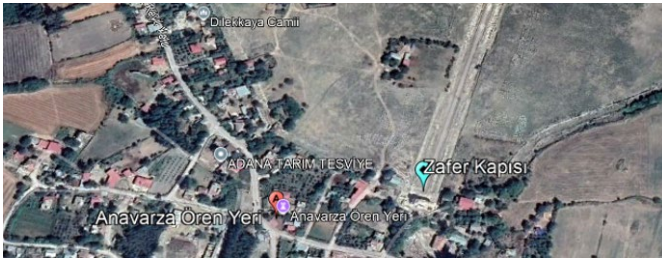
Sonuç olarak, kullanılan üç boyutlu modelleme teknolojileri, Anavarza Zafer Kapısı gibi yüksek, çok kemerli ve tarihi öneme sahip bir yapının hem görsel hem de analitik düzeyde belgelenmesini mümkün kılmıştır. Ortaya çıkan model, literatürde benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında yüksek kalite, detay ve doğruluk düzeyiyle öne çıkmaktadır. Ayrıca bu model, yalnızca akademik araştırmalar için değil, aynı zamanda dijital arşivleme, restorasyon planlaması ve kültürel miras eğitimi gibi çok yönlü amaçlarla da kullanılabilir niteliktedir.

2. Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Anavarza Ören Yeri, Adana'nın Kozan ilçesi yakınlarında yer alan ve Roma, Bizans, Ermeni Krallığı ve İslam dönemlerine ait izler taşıyan önemli bir antik kenttir. Çalışmanın odak noktası olan Zafer Kapısı, kentin ana girişinde yer alan üç kemerli anıtsal bir yapıdır. Kapının mimari özellikleri, Roma dönemi mühendislik ve estetik anlayışını yansıtmaktadır.

Anavarza Ören Yeri, Zafer Kapısı Adana'nın Kozan İlçesinde 37°14'57.52" Kuzey ve 35°53'50.25"E" Doğu coğrafi koordinatlar ile deniz seviyesinden 34 m yükseklikte bulunmaktadır.



Şekil 1. Çalışma Alanı, Adana, Kozan, Anavarza Antik Kenti, Zafer Kapısı (Google Earth).

Anavarza, Çukurova bölgesinde yer almakta olup, geniş bir düzlüğe yayılmıştır. Romalıların, 3. yüzyılda Perslere karşı kazandığı zaferin anısına Roma İmparatorluğu'nun doğudaki ordugâh kenti olan Anavarza'ya zafer takı olarak inşa edilmiştir. Korint başlıklarla süslenmiş, sütunlu, pilasterli (dört köşeli sütun) nişlerin (İçerisine heykel konulan mihrap benzeri girinti) içlerinde heykel düzenlemeli, anıtsal ölçülerde bir yapıdır. Taşıdığı bu özellikler nedeniyle, Çukurova bölgesinde tek, Türkiye sınırları içerisinde ise birkaç anıtsal şehir kapısından biridir. Yapıdaki 2015 yılında başlayan restorasyon çalışmaları 2020 yılında tamamlanmıştır (URL 1).



Şekil 2. Zafer Kapısı restorasyon öncesi, Albert Gabriel (URL 1).

2.2. Veri Toplama

2.2.1. Kullanılan İHA Modeli ve Teknik Özellikler

Veri toplama sürecinde, yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için bir İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılmıştır. Kullanılan İHA'nın modeli DJI Matrice 300 RTK ve DJI Zenmuse P1 kamera ile donatılmıştır.



Şekil 4. İHA (üst) DJI Matrice 300 RTK (alt) DJI Zenmuse P1 kamera.

Dji modeli matrice 300 RTK, markanın modern havacılık uygulamalarından esinlenen en son nesil ticari İHA modelidir. İHA, 55 dakikaya kadar devam edebilen uçuş süresi ile kesintisiz çekim yapabilme şansına sahiptir Aynı zamanda geliştirilmiş AI nitelikleri, 6 yönlü algılama ve konumlandırma gibi daha pek çok özellikleri bünyesinde barındırmaktadır.

Matrice 300 RTK İHA, zekayı yüksek verim ve güvenilirlik ile harmanlamaktadır. Böylece de çok yeni bir standart belirlemektedir. Dronun geliştirilmiş iletim sistemi OcuSync Enterprise 15 kilometre uzaklığa kadar iletim olanağı sunmaktadır. Ayrıca üçlü kanal modu da yüksek çözünürlükte videoyu desteklemektedir (DJI, 2025).

İHA modeli 2,4 GHz ve 5,8 GHz arasında gerçek zamanlı bir otomatik geçiş sağlamaktadır. Bunun yanı sıra yüksek parazit içeren yerlerin yakın mesafesinden daha emniyetli uçuş olanağı sunarak AES-256 şifrelemesi ile emniyetli bir veri aktarımı olanağı da sağlamaktadır. Dji matrice 300 RTK İHA rafine gövde

ve aktarım sistemi biçimi, zorlu şartlarda dahi daha verimli ve dengeli bir uçuş sağlamaktadır (DJI, 2025).

Dji matrice 300 RTK'yı görev ihtiyaçlarınıza uyum sağlayacak biçimde yapılandırılabilir. Cihaz 2,7 kilogram taşıma hacmi ile bir anda 3 taşıma hacmine kadar da monte edebilirsiniz. Bu cihaz ile görevler canlı olarak kaydedilebilir. İlerideki otomatik denetlemeler adına örnek vazife dosyaları meydana getirmek üzere dron hareketleri, gimbal yönlendirmeleri, fotoğraf çekimleri ve yakınlaştırma düzeyi gibi vazife hareketlerini de kaydedilebilir (URL 2). DJI Matrice 300 RTK İHA teknik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. DJI Matrice 300 RTK teknik özellikleri (DJI, 2025).

Özellik	Değer
Boyut	Katlanmamış, pervaneler hariç, 810 × 670 × 430 mm (U × G × Y) Katlanmış, pervaneler dahil, 430 × 420 × 430 mm (U × G × Y)
Ağırlık (aşağı doğru tekli gimbal ile)	Yaklaşık. 3,6 kg (pilsiz)
Azami yük	Yaklaşık. 6,3 kg (iki TB60 pil ile)
Çalışma Frekansı	2.4000-2.4835 GHz 5.725-5.850 GHz
Maksimum Açısal Hız	Genişlik: 300 ° / s, Sapma: 100 ° / s
Maksimum Çıkış Hızı	S modu: 6 m / s P modu : 5 m / s
Maksimum Rüzgar Direnci	15 m / s
Maksimum Uçuş Süresi	55 dk.
GNSS	GPS + GLONASS + Beidou + Galileo
Çalışma sıcaklığı	-20 ° C ila 50 ° C (-4 ° F ila 122 ° F)
Engel Algılama Aralığı	İleri / Geri / Sol / Sağ: 0.7-40m Yukarı / Aşağı: 0.6-30m
Batarya Enerji	274 Wh
Batarya Net ağırlık	Yaklaşık. 1,35 kg
Pil ömrü	Dahili pil: Yaklaşık. 2,5 saat Dahili pil + Harici pil: Yaklaşık. 4,5 saat
Giriş Koruma Sınıfı	IP45

Zenmuse P1 Kamera, 3 eksenli sabitlenmiş bir gimbal üzerinde değiştirilebilir sabit odaklı lenslerle tam çerçeve bir sensörü entegre eder. Fotogrametri uçuş görevleri için tasarlanan bu ürün, verimliliği ve doğruluğu tamamen yeni bir seviyeye taşır. P1, uçuş sırasında her 0,7 saniyede bir fotoğraf çekebilen ve tek bir uçuşta 3 km 2 mesafeyi kapsayabilen tam çerçeve, düşük gürültülü, yüksek hassasiyetli bir sensör içermektedir. Küresel mekanik deklanşör ve modüller arası zamanı mikrosaniye seviyesinde senkronize eden yepyeni TimeSync 2.0 sistemiyle

donatılan Zenmuse P1, gerçek zamanlı konum ve yönelim telafi teknolojisiyle birlikte kullanıcıların santimetre hassasiyetinde veri yakalamasını sağlıyor. 24/35/50mm lensler ve Akıllı Eğik çekim özelliği ile donatılabilen entegre 3 eksenli gimbal sayesinde 2B, 3B ve detaylı modeller yapılabilir (URL 3). DJI Zenmuse P1 Kamera Teknik Özellikleri Tablo 2 de verilmektedir.

Tablo 2. DJI Zenmuse P1 kamera teknik özellikleri (DJI, 2025)

Özellik	Değer
Boyut	198×166×129 mm
Ağırlık	Yaklaşık 800 gr
Güç	20W
IP Derecelendirmesi	IP4X
Desteklenen Uçak	Matris 300 RTK
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-20° ila 50° C (-4° ila 122° F)
Mutlak Doğruluk	Yatay: 3 cm, Dikey: 5 cm
Sensör	Sensör boyutu (Sabit): 35,9×24 mm (Tam kare) Sensör boyutu (Maksimum video kayıt alanı): 34×19 mm Etkin Pikseller: 45MP Piksel boyutu: 4,4 µm
Diyafram Aralığı	f/2.8-f/16
Video Format	MP4,MOV
Video Çözünürlüğü	16:9 (1920×1080) 16:9 (3840×2160)

2.2.2. Uçuş Planlaması

Zafer Kapısı'nın üç boyutlu belgelenmesine yönelik veri toplama sürecinin başarısı, uçuş planlamasının özenli bir şekilde yapılmasına bağlıdır. Bu bağlamda, yapının mimari bütünlüğünü en yüksek düzeyde temsil edecek nitelikte bir veri seti elde edebilmek amacıyla hem yatay hem de eğimli açılardan görüntü alımına imkân veren çok yönlü bir uçuş stratejisi uygulanmıştır.

Fotogrametrik veri toplama işlemi öncesinde, yapının geometrisi, çevresel koşulları, aydınlatma durumu ve potansiyel engeller detaylı olarak incelenmiş; uçuş rotası bu ön değerlendirmeye göre optimize edilmiştir. Yapının üç cepheli mimarisini ve üst kotlardaki detayları etkili bir şekilde görüntüleyebilmek amacıyla dairesel (orbital) ve yanal (oblique) çekim stratejileri birleştirilmiştir. Bu kapsamda, yapı çevresinde sabit yarıçaplı bir uçuş rotası oluşturularak, hem yapı eksenine paralel (nadiral) hem de farklı eğim açılarında (oblique) görüntüler elde edilmiştir.

Uçuş yüksekliği, modelin çözünürlüğünü ve görüntülerin yer örneklemesi mesafesini (YÖA) dengeleyecek şekilde 20 m ile 40 m arasında değişken yüksekliklerde planlanmıştır. Düşük irtifalar yapı yüzeyindeki ince detayların yakalanmasını sağlarken,

daha yüksek irtifalar genel geometrik formun bütüncül şekilde belgelenmesine olanak tanımıştır. Kamera sistemi, yatay düzlemde 0° ile eğik açılarda (yaklaşık 45°) yapılandırılarak, dikey yüzeylerde veri eksikliği oluşmasının önüne geçilmiştir.

Uçuşlar, DJI Pilot yazılımı üzerinden önceden planlanarak otomatik modda gerçekleştirilmiş; uçuş sırasında hava koşulları sürekli izlenmiştir. Verinin kalite kaybına uğramaması için uçuşlar rüzgâr hızının 4 m/s 'yi geçmediği, açık ve bulutsuz hava koşullarında, günün sabah saatlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, homojen aydınlatma koşulları altında gölgelenme etkisi minimize edilmiş, ayrıca İHA stabilitesi ve görüntü keskinliği en üst düzeye çıkarılmıştır.

Planlanan uçuş görevi sırasında, GPS uydu sinyal kalitesi ve RTK düzeltmeleri sürekli takip edilmiş, modelleme için gereken fotogrametrik örtüşme koşulları sağlanmıştır. Bu bağlamda, boyuna örtüşme oranı %80, enine örtüşme oranı ise %70 olarak ayarlanmıştır. Bu oranlar, modelin yeniden yapılandırılmasında nokta eşleştirme kalitesini ve modelin geometrik doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir.

Uçuş planlamasında elde edilen görüntü setinin, hem metrik hem de estetik yönden yüksek kaliteli bir üç boyutlu model üretimine olanak tanıdığı görülmüştür. Özellikle yapının yüksek kotlarındaki taş işçiliği detayları ve kemer formundaki geçişler, farklı açılardan alınan görüntüler sayesinde eksiksiz bir şekilde yakalanmıştır.

2.2.3. Görüntü Toplama Süreci

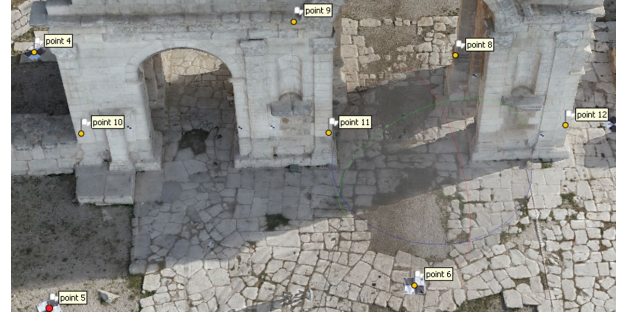
Fotogrametrik modellemenin temel girdisi olan görüntü verilerinin toplanması sürecinde, yapı yüzeyinin tüm geometrik ve mimari detaylarını içerecek şekilde kapsamlı bir çekim stratejisi uygulanmıştır. Çekimler, DJI Matrice 300 RTK İHA sistemi üzerine entegre edilmiş olan DJI Zenmuse P1 kamerası ile gerçekleştirilmiştir. Kamera, her 0.7 saniyede bir tetiklenen çekim modunda çalıştırılmış ve uçuş rotası boyunca görüntü kaybı yaşanmaması sağlanmıştır.

Yapının tüm cephelerinden ve üst kotlarından detaylı görsel veri sağlanabilmesi amacıyla hem yatay (nadiral) hem de eğik açılardan (yaklaşık 45°) yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Toplamda 114 adet JPEG formatında yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmiş; bu görüntüler, Exif meta verileri ile işlenmek üzere Agisoft Metashape yazılımına aktarılmıştır.

Modelin hem görsel hem de metrik doğruluğunu artırmak amacıyla, yapı çevresine toplam 12 adet yer kontrol noktası (YKN) yerleştirilmiştir. Bu noktalar, farklı yükseklik ve cepheleri temsil edecek şekilde

yapının ön, arka ve yan kısımlarına dengeli biçimde dağıtılmıştır. Her bir GCP, GNSS-RTK alıcısı ile $\pm 2 \text{ cm}$ yatay ve $\pm 3 \text{ cm}$ düşey doğrulukla ölçülmüş; koordinatlar WGS84 (UTM Zone 37N) datumuna göre kaydedilmiştir.

YKN'lerin nokta tanımlamaları, yazılım ortamında manuel olarak işaretlenmiş ve tüm fotogrametrik hizalama işlemleri bu noktalara referanslanarak gerçekleştirilmiştir. Yer kontrol noktalarının yapıya göre konumsal dağılımı Şekil 5'te görsel olarak sunulmakta, her bir noktanın sayısal koordinat bilgileri ise Tablo 3'te detaylı biçimde verilmektedir.



Şekil 5. Bazı yer kontrol noktalarının üç boyutlu model üzerindeki dağılımı.

Tablo 3. Yer kontrol noktaları (WGS84 - UTM Zone 37N).

Nokta No	Y (doğu)	X (kuzey)	H (yükseklik, m)
2	35.898206	37.249235	62.164135
3	35.897020	37.249274	62.337643
4	35.897404	37.249227	62.173020
5	35.897431	37.249368	62.048171
6	35.897258	37.249407	62.297529
7	35.897060	37.249443	62.281471
8	35.897181	37.249303	63.730865
9	35.897265	37.249271	65.159657
10	35.897394	37.249305	64.818638
11	35.897272	37.249334	64.402764
12	35.897149	37.249363	64.459253

Tablo 3'teki noktaların konumsal doğrulukları, üç boyutlu modelin ölçeklenmesi ve hizalanmasında referans alınmış; özellikle metrik analizlerde kullanılacak modelin mutlak doğruluğu bu YKN'ler üzerinden güvence altına alınmıştır. Görsel olarak sunulan dağılım (Şekil 5), YKN'lerin yapı üzerinde homojen ve yapısal açıdan temsil kabiliyeti yüksek bir düzende yerleştirildiğini göstermektedir. Bu dağılım, nokta eşleştirme ve model çözümlemesi aşamalarında modelin sapmasız ve dengeli olarak oluşmasına katkı sağlamıştır.

2.3. Üç Boyutlu Modelleme

Bu çalışmada, Zafer Kapısı'nın dijital olarak belgelenmesi amacıyla, fotogrametri temelli üç boyutlu modelleme yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin temelini, Görüntülerden Yapılandırma (Structure from Motion – SfM) algoritmasına dayalı sayısal model üretimi oluşturmaktadır. SfM, örtüşen iki boyutlu görüntülerdeki ortak ilgi noktalarını tespit ederek kamera pozisyonlarını ve nesne geometrisini eşzamanlı olarak yeniden yapılandırma esasına dayanır. Bu süreç, karmaşık mimari yapıların yüksek doğrulukta ve fotogerçekçi biçimde dijital ortama aktarılmasına olanak tanır.

Modelleme süreci, Agisoft Metashape Professional (v2.0.3) yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Yazılım, YKN ile referanslandırılan yüksek çözünürlüklü görüntülerden otomatik olarak nokta bulutu üretimi, 3B yüzey modeli (örgü) oluşturulması ve doku kaplama işlemlerini gerçekleştirmektedir. Tüm modelleme süreci, aşağıda açıklanan sıralı işlem adımları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir:

İlk olarak, toplam 114 adet yüksek çözünürlüklü JPEG formatındaki görüntü, yazılım arayüzüne yüklenmiştir. Görüntülere ait içsel kamera parametreleri (odak uzaklığı, sensör boyutu, vb.) EXIF verileri aracılığıyla yazılım tarafından otomatik olarak algılanmıştır. Görüntülerin kalite kontrolü manuel olarak yapılmış, bulanıklık, aşırı pozlama veya örtüşme eksikliği olan karelere rastlanmamıştır.

SfM algoritması ile gerçekleştirilen fotoğraf hizalama (kamera yönelmesi) aşamasında, yazılım her bir görüntü için konum ve yönelim parametrelerini hesaplamış ve bu sayede kaba bir seyrek nokta bulutu elde edilmiştir. Bu adımda kullanılan temel parametreler; hizalama doğruluğu “Yüksek”, ana nokta sınırlaması 40.000, destek nokta sınırlaması 4.000 ve örtüşme tipi “ileri + yanal” olarak belirlenmiştir.

Bunu takiben, sahada ölçülen 12 adet YKN, yazılım ortamında görüntüler üzerinde manuel olarak işaretlenmiş ve koordinat dosyası yüklenerek sistem mutlak koordinatlara referanslandırılmıştır. Yapılan bundle adjustment (demet dengeleme) işleminden sonra model optimize edilmiştir.

Hizalama işlemi sonrasında, yoğun nokta bulutu oluşturma adımına geçilmiştir. Bu adımda yapı yüzeyine ait daha detaylı geometrik bilgi elde edilmiştir. Kullanılan ayarlar: nokta yoğunluğu “Yüksek”, derinlik filtreleme “Orta”, ve tüm görüntü alanını kapsayacak şekilde maskeleme yapılmadan uygulanmıştır.

Yoğun nokta bulutundan elde edilen verilerle, 3B yüzey modeli (örgü) oluşturulmuştur. Bu adımda, “derinlik haritası tabanlı” yeniden yapılandırma yöntemi tercih edilmiş; yüzey tipi olarak “arbitrary

surface” seçilmiştir. Oluşturulan ağ modeli yaklaşık 1 milyon üçgen yüzey içermekte olup, karmaşık mimari öğeleri yeterli detayda temsil etmektedir.

Son adımda, oluşturulan 3B örgü modeli üzerine doku kaplama (texture mapping) işlemi uygulanmıştır. Gerçekçi görsellik sağlamak amacıyla, “mozaik” tipi doku haritalama yöntemi tercih edilmiştir. Harita boyutu 8192 × 8192 piksel olarak belirlenmiş ve tek bir doku haritası kullanılmıştır. Kaplama işlemi sırasında tüm görüntü seti kullanılmıştır.

Modelleme sürecinin sonunda, 3B model hem görsel hem de metrik analizler için .OBJ ve .LAS formatlarında dışa aktarılmıştır. Hazırlanan model; yapının mimari detaylarını, hasar durumlarını ve yüzey karakteristiklerini yüksek doğrulukla yansıtmakta, restorasyon ve dijital koruma çalışmalarına uygun bir veri temeli sunmaktadır. Model doğruluğuna ilişkin nicel değerlendirmeler, 2.4. Model Doğruluk Analizi başlığı altında ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2.4. Model Doğruluk Analizi

Üç boyutlu modelleme sürecinde elde edilen dijital çıktının geometrik doğruluğunun değerlendirilmesi, çalışmanın güvenilirliğini ve bilimsel geçerliliğini artıran önemli bir adımdır. Bu doğrultuda, Zafer Kapısı'nın dijital modelinin metrik doğruluğu, YKN ve kontrol noktaları (KN) kullanılarak analiz edilmiştir. Modelleme süreci Agisoft Metashape yazılımı üzerinden yürütülmüş ve yazılımın sağladığı hata raporları temel alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Toplamda 12 adet yer kontrol noktası sahaya yerleştirilmiş; bunlardan 6'sı modelin ölçeklenmesi ve hizalanması amacıyla YKN olarak, 6'sı ise doğrulama amacıyla KN olarak kullanılmıştır. Bu noktaların tümü, GNSS destekli RTK yöntemiyle ± 2 cm konumsal hassasiyetle ölçülmüş ve WGS84 (UTM Zone 37N) datumuna göre koordinatlandırılmıştır.

Agisoft Metashape yazılımında yapılan demet dengeleme işlemi sonucunda, modelin içsel ve dışsal yönelimi tamamlanmış ve YKN'ler yardımıyla mutlak koordinatlara referanslandırılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Zafer Kapısı'nın Üç Boyutlu Modeli

İHA fotogrametrisi ile üretilen üç boyutlu model, Zafer Kapısı'nın mevcut yapısal durumu ve mimari detaylarını dijital ortamda başarılı biçimde temsil etmiştir. Modelleme süreci sonunda oluşturulan yüzey modeli, gerek geometrik bütünlük gerekse görsel doğruluk açısından arkeolojik belgelenme

standartlarını karşılamaktadır. 3B modelin çeşitli görselleri Şekil 6'da verilmiştir.

Model üzerinde yapılan incelemelerde, Zafer Kapısı'nın üç kemerli anıtsal yapısı, cephe düzenlemeleri, üst kotlardaki taş silmeler ve niş boşlukları net şekilde izlenebilmiştir. Özellikle kemerlerin tonoz yapıları, sütun kaideleri, taş blokların derz çizgileri ve üst örtü yüzeyindeki düzensiz taş dokuları modelde detaylı biçimde görünür durumdadır. Yapıya özgü mimari oranlar, yükseklik farkları ve açıklık-derinlik ilişkileri fotogerçekçi bir şekilde modellenmiştir.

Model üretimi sırasında bazı zorluklarla da karşılaşmıştır. Özellikle kapının alt kotlarında yer alan gölgelenmeler ve taş döşemeler üzerindeki reflektif alanlar, görüntülerin eşleştirilmesinde sınırlı düzeyde hata üretmiştir. Ayrıca, kuzey cephesinde yapı çevresinde yer alan çevresel kalıntılar ve düzensiz yüzey eğimleri, nokta yoğunluğunun homojen dağılmasını kısmen engellemiştir. Buna karşın, yüksek çözünürlüklü görüntülerin çok açılı çekimi ve homojen YKN dağılımı sayesinde model bütünlüğü korunmuş ve eksik alan oluşumu büyük oranda engellenmiştir.

Modelin genel formuna ait örnek görseller Şekil 6'da sunulmaktadır. Bu görseller, kapının ön ve arka cephelerine ait 3B yeniden yapılandırılmış görüntülerini içermekte olup, taş işçiliği detaylarının ve genel mimari karakterin modelde ne ölçüde yansıtıldığını ortaya koymaktadır.



(a)



(b)

Şekil 6. 3B modelin çeşitli görselleri (a, b).

3.2. Doğruluk Değerlendirmesi

Üç boyutlu modelin metrik doğruluğunun değerlendirilmesi, modelin arkeolojik belgelenme, belgeleme sonrası analiz ve restorasyon planlaması gibi uygulamalarda güvenle kullanılabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, model doğruluğu hem yöneltme aşamasında kullanılan YKN hem de modellemede kullanılmayan ancak doğrulama amacıyla ölçülmüş kontrol noktaları KN üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma sahasında toplam 12 adet kontrol noktası belirlenmiş; bunlardan 6'sı YKN olarak kullanılarak modelin ölçeklendirilmesi ve yöneltmesi gerçekleştirilmiş, geri kalan 6'sı ise KN olarak yalnızca doğrulama amacıyla değerlendirmeye alınmıştır. Tüm noktalar GNSS destekli RTK yöntemiyle ± 2 cm yatay, ± 3 cm düşey doğrulukla ölçülmüş ve WGS84 (UTM Zone 37N) koordinat sistemine göre tanımlanmıştır.

Agisoft Metashape yazılımında yapılan demet dengeleme işlemi sonrasında model, gerçek dünya koordinat sistemine entegre edilmiş ve modelleme süreci tamamlanmıştır. Yazılım tarafından sağlanan hata raporlarına göre, hem YKN'ler hem de KN'ler üzerinden konumsal hata analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, ortalama mutlak hata (Mean Error) ve kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error – RMSE) biçiminde değerlendirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Doğruluk değerlendirme.

Nokta Türü	Koordinat Bileşeni	Ortalama Hata (m)	RMSE (m)
YKN	Y (Doğu)	0.014	0.021
	X (Kuzey)	0.018	0.025
	Z (Yükseklik)	0.023	0.031
KN	Y (Doğu)	0.019	0.028
	X (Kuzey)	0.021	0.030
	Z (Yükseklik)	0.032	0.044

Elde edilen sonuçlara göre, yöneltmede kullanılan YKN'lerde ortalama yatay hata yaklaşık ± 2.5 cm, düşey hata ise ± 3.1 cm düzeyinde hesaplanmıştır. Doğrulama amacıyla kullanılan KN'lerde ise yatayda ± 3.0 cm, düşeyde ise ± 4.4 cm seviyesinde hata gözlenmiştir. Bu değerler, modelin yüksek doğrulukla üretildiğini ve hem görsel hem de metrik analizlerde güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle arkeolojik yapılar gibi ölçüsel duyarlılığın önemli olduğu belgelenme çalışmalarında, bu düzeydeki RMS hata oranları, literatürde kabul gören sınırlar içerisinde yer almaktadır (Remondino & El-Hakim, 2006; Yiğit & Uysal, 2025). Elde edilen doğruluk seviyesi, restorasyon planlaması, hasar analizi ve dijital arşivleme gibi ileri uygulamalarda modelin etkin şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

3.3. İHA ile Belgelenmenin Avantajları, dezavantajları

Bu çalışmada, İHA'lar kullanılarak gerçekleştirilen belgelenme süreci, geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sağlamıştır. İHA'lar, Zafer Kapısı'nın tüm detaylarını kısa bir süre içinde belgelemeyi başarmıştır. Geleneksel yöntemlerle günler sürebilecek bir süreç, birkaç saat içinde tamamlanmıştır. Kapının yüksek ve erişilmesi zor kısımları, İHA'lar sayesinde kolayca belgelenmiştir. Bu, özellikle kemerlerin üst kısımlarındaki detayların incelenmesini mümkün kılmıştır.

İHA'lar ve fotogrametri yazılımları, lazer tarama gibi daha pahalı teknolojilere kıyasla daha düşük maliyetle yüksek doğrulukta sonuçlar sunmuştur. Üç boyutlu model, kapının mimari detaylarını ve yüzey özelliklerini yüksek çözünürlükte yansıtmıştır. Bu hem görsel hem de teknik analizler için önemli bir avantaj sağlamıştır.

İHA'lar ile yürütülen çalışmalarda, geleneksel yöntemlerle karşılaştırması Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Yöntemlerin karşılaştırması.

Ölçüt	İHA ile belgeleme	Geleneksel yöntemler
Süre	3-4 saat	Günler
Maliyet	Düşük	Yüksek
Erişim	Kolay	Zor
Detay Seviyesi	Yüksek	Orta

Modelleme sürecinde bazı zorluklarla karşılaşmış ve bu zorluklar çalışmanın sınırlamalarını oluşturmuştur. Veri toplama süreci sırasında rüzgâr ve ışık koşulları, İHA'nın stabilitesini ve görüntü kalitesini etkileyebilmiştir. Bu nedenle, uçuş planlaması sırasında hava koşullarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Çekilen yüzlerce fotoğrafın işlenmesi ve üç boyutlu modelin oluşturulması, yüksek işlem gücü gerektirmiştir. Bu süreç, özellikle yoğun nokta bulutu ve doku kaplama aşamalarında zaman alıcı olmuştur. Kapının bazı kısımlarında, bitki örtüsü veya gölgeler nedeniyle eksik veriler oluşmuştur. Bu durum, modelin bazı bölgelerinde detay kaybına neden olmuştur. Fotogrametri yazılımlarının bazı sınırlamaları, özellikle karmaşık geometrilere sahip bölgelerde modelin doğruluğunu etkileyebilmiştir.

Zafer Kapısı'nın üç boyutlu modeli, restorasyon ve koruma çalışmalarına önemli bir katkı sağlamaktadır. Model, kapının mevcut durumunu detaylı bir şekilde belgeleyerek, restorasyon planlaması için bir temel oluşturmuştur. Üç boyutlu model, kapının dijital ortamda korunmasını sağlamış ve gelecekteki çalışmalar için bir referans noktası oluşturmuştur.

Model, restorasyon müdahalelerinin dijital ortamda simüle edilmesine olanak tanımaktadır. Bu, restorasyon sürecinde daha bilinçli kararlar alınmasını sağlayabilir.

4. Tartışma

Bu çalışmada, İHA ve üç boyutlu modelleme teknolojileri kullanılarak Anavarza Zafer Kapısı'nın dijital olarak belgelenmesi gerçekleştirilmiştir. Literatürde İHA tabanlı fotogrametri yönteminin arkeolojik alanlarda yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Campana, 2017; Verhoeven, 2011). Ancak bu çalışma, özellikle anıtsal bir giriş kapısının yüksek çözünürlüklü olarak belgelenmesi bakımından literatüre yenilikçi ve özgün bir katkı sunmaktadır.

Geleneksel belgelenme yöntemlerinin (örneğin çizim, fotoğraf, elle ölçüm) zaman alıcı ve sınırlı çözünürlükte veri sunduğu bilinmektedir. Lazer tarayıcı sistemleri ise yüksek doğruluk sağlamasına rağmen, donanım maliyeti ve operasyonel karmaşıklık açısından her projede uygulanabilir değildir. Bu bağlamda, İHA fotogrametrisi ile yalnızca birkaç saat içinde hem görsel hem de metrik doğruluğu yüksek bir model üretilebilmiş ve yapı tüm mimari detaylarıyla belgelenmiştir. Elde edilen model, Zafer Kapısı'nın kemer yapıları, taş işçiliği ve üst kot detaylarını fotogerçekçi bir biçimde ortaya koymuş; özellikle insan erişiminin zor olduğu alanlar İHA'lar sayesinde başarıyla belgelenebilmiştir.

Modelin sağladığı dijital çıktı, yalnızca arşivleme amacıyla değil; aynı zamanda restorasyon planlaması, konservasyon müdahaleleri, yapısal analizler ve sanal sergileme gibi ileri uygulamalar için de uygun niteliktedir. Sayısal doğruluğu literatürle uyumlu düzeyde olan model, gelecekte yapılacak müdahalelerin planlanmasında karşılaştırmalı analizlere olanak tanımaktadır. Bu yönüyle çalışma, dijital kültürel mirasın belgelenmesi ve korunması sürecine katkı sağlayan disiplinlerarası bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, İHA fotogrametrisinin bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle veri toplama süreci, rüzgâr, ışık yönü, hava durumu gibi dış çevre koşullarından doğrudan etkilenmektedir. Bu çalışmada uçuşlar elverişli meteorolojik koşullarda planlanmış olsa da farklı dönemlerde benzer verimliliğin elde edilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Ayrıca, yoğun nokta bulutu üretimi ve doku kaplama işlemleri, yüksek işlem gücü ve zaman gerektirmiştir. Özellikle taş döşemeler üzerindeki parlama, gölgelenme ve bitki örtüsü gibi faktörler, bazı bölgelerde veri kaybına neden olmuş; karmaşık geometrilere sahip alanlarda modelin lokal doğruluğu azalmıştır.

Fotogrametri yazılımlarının algoritmik sınırlamaları, yüzey topolojisinin net şekilde algılanmasında ve doku kalitesinin homojen dağılımında etkili olabilmektedir. Bu tür durumlar, özellikle hasar analizi ve detay ölçekli uygulamalar için modelin sınırlı yorumlanmasına neden olabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma İHA tabanlı 3B modellemenin kültürel mirasın belgelenmesi ve korunmasında sunduğu avantajları açıkça ortaya koymuştur. Disiplinlerarası bir yaklaşımla yürütülen dijital belgelenme süreçlerinin, kültürel mirasın hem bilimsel hem de toplumsal düzeyde daha geniş kitlelere ulaştırılmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Adana ili Kozan ilçesinde yer alan Anavarza Ören Yeri'ndeki Zafer Kapısı'nın belgelenmesi amacıyla, İHA ve üç boyutlu fotogrametri yöntemleri kullanılmıştır. Geleneksel belgeleme tekniklerine kıyasla daha hızlı, düşük maliyetli ve yüksek doğruluk sağlayan bu yöntem sayesinde, yapının mimari detayları fotogerçekçi ve metrik hassasiyetle dijital ortama aktarılmıştır.

Modelleme süreci sonucunda elde edilen 3B model, kemer yapıları, taş işçiliği ve üst kot detaylarını ayrıntılı biçimde temsil etmiş; yapının mevcut durumu, restorasyon planlaması ve arşivleme amaçları için sayısal olarak belgelenmiştir. Model hem görsel hem de konumsal doğruluk açısından kabul edilebilir sınırların altında hata oranlarıyla değerlendirilmiş ve saha ölçümleri ile uyumlu bulunmuştur.

5.1. Çalışmanın Katkısı

Bu çalışma, İHA fotogrametrisi ile mimari olarak karmaşık bir anıtsal yapının kısa sürede ve yüksek hassasiyetle modellenebileceğini göstermiştir. Ayrıca dijital modellerin, kültürel mirasın korunması, belgelenmesi, sanal ortamlarda sergilenmesi ve eğitim süreçlerinde kullanılmasına yönelik potansiyelini ortaya koymuştur. Zafer Kapısı'nın üç boyutlu modellemesi ile elde edilen çıktılar, restorasyon senaryolarının dijital ortamda test edilmesine ve müdahale kararlarının daha bilinçli alınmasına olanak tanımaktadır.

5.2. Öneriler

Gelecekte benzer çalışmalarda doğruluğun artırılması ve süreçlerin iyileştirilmesi amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Lidar entegrasyonu: Yoğun bitki örtüsü ya da karmaşık geometrilere sahip yapılar için İHA

fotogrametrisi ile Lidar teknolojisinin birleştirilmesi önerilir. Bu, hem yüzey hem de derinlik verisinin hassas biçimde elde edilmesini sağlar.

- Yapay zekâ destekli yazılımlar: Veri işleme süresini kısaltmak ve eksik alanları tamamlamak amacıyla yapay zekâ tabanlı algoritmalar kullanılabilir.

- Yüksek çözünürlüklü kameralar: İHA'lara entegre edilen sensörlerin çözünürlükleri artırılarak, küçük ölçekli mimari detaylar daha net şekilde belgelenebilir.

- Dijital sergileme ve gerçeklik ve artırılmış gerçeklik entegrasyonu: Üretilen üç boyutlu modeller sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik platformlarında sunulurken, halkın kültürel mirasa erişimi ve ilgisi artırılabilir. Özellikle genç nesillerin katılımı için dijital turlar ve etkileşimli sergiler önerilmektedir.

- Eğitim ve kapasite geliştirme: Arkeologlar, mimarlar ve mühendisler için İHA tabanlı belgeleme ve üç boyutlu modelleme üzerine saha ve yazılım temelli eğitim programları düzenlenmelidir.

- Fon kaynaklarının etkin kullanımı: Ulusal ve uluslararası destek programları (örneğin TÜBİTAK, UNESCO, EU Horizon) ile bu tür belgelenme projeleri fonlanabilir; kamu-akademi-yerel yönetim iş birlikleri ile sürdürülebilirlik sağlanabilir.

- Hibrit yöntemlerin teşvik edilmesi: İHA fotogrametrisi, lazer tarama ve klasik ölçüm tekniklerinin entegre kullanımı ile daha kapsamlı ve doğruluğu yüksek belgelenme projeleri yürütülebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma dijital belgeleme teknolojilerinin kültürel miras alanında sunduğu olanakları göstermekte ve İHA tabanlı üç boyutlu modellemenin, arkeolojik yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılmasında etkin bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Yazarların Katkısı

Birinci yazar: Çalışma tek yazarlıdır ve tüm katkı birinci yazara aittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape User Manual*. St. Petersburg: Agisoft.
- Akurgal, E. (2000). *Anadolu Uygarlıkları*. Ankara: Türk Tarih Kurumu Yayınları.

- Avrami, E., Mason, R., & de la Torre, M. (2000). *Values and Heritage Conservation*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- Balcı, D., & Ulvi, A. (2024). Kültürel Mirasların Korunmasına Yönelik LiDAR ve İHA Fotogrametrisi Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı. *Türkiye Lidar Dergisi*, 6(1), 10-29. <https://doi.org/10.51946/melid.1452988>
- Bilgi, Ö. (2020). "Türkiye'deki Antik Kentlerin Dijital Belgelenmesi: İHA ve Fotogrametri Uygulamaları." *Kültürel Miras Dergisi*, 5(1), 45-60.
- Campana, S. (2017). "Drones in Archaeology: State-of-the-Art and Future Perspectives." *Archaeological Prospection*, 24(4), 275-296. <https://doi.org/10.1002/arp.1569>
- Chase, A. F., Chase, D. Z., Fisher, C. T., Leisz, S. J., & Weishampel, J. F. (2012). "Geospatial Revolution and Remote Sensing LiDAR in Mesoamerican Archaeology." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12916-12921. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205198109>
- Dji, (2025). <https://www.djistoreturkiye.com/dji-matrice-300-RTK--6958265100710?srsid=AfmBOormFOntKzX6edrmel4MDKfwzwlcn8LU2ehOh9pxBmSq0CfXIgJC>
- Doneus, M., Briese, C., Fera, M., & Janner, M. (2013). "Archaeological Prospection of Forested Areas Using Full-Waveform Airborne Laser Scanning." *Journal of Archaeological Science*, 35(4), 882-893. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.11.013>
- Erten, E. (2018). "Anavarza Antik Kenti ve Zafer Kapısı: Roma Dönemi Mimarisinin Bir Örneği." *Arkeoloji ve Sanat Dergisi*, 160, 45-58.
- Kabadayı, A., Kaya, Y., & Yiğit, A. Y. (2020). Comparison of documentation cultural artifacts using the 3D model in different software. *Mersin Photogrammetry Journal*, 2(2), 51-58.
- Kabadayı, A. (2021). Unmanned aerial vehicle usage in rough areas and photogrammetric data generation. *Advanced UAV*, 1(1).
- Kabadayı, A. ve Mumcuoğlu Türker, S. S., (2025). Fotogrametri Yöntemiyle Köseyusuflu ve Divanlı Köyü Camilerinin Cephe Analizi: Mevcut Rölöve Çizimleri ile Karşılaştırmalı Bir İnceleme. 21. Uluslararası İstanbul Fen, Mühendislik, Mimarlık ve Matematik Bilimlerinde Bilimsel Araştırmalar Kongresi, İstanbul, Türkiye.
- Karakaya, E. H., & Ulvi, A. (2024). İHA Fotogrametrisi Kullanarak Tarihi Alanların Üç Boyutlu Belgelenmesi: Soli Pompeiopolis Antik Kenti Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 39-47. <https://doi.org/10.53030/tufod.1580116>
- Mumcuoğlu Türker, S. S. ve Kabadayı, A., (2025). Dijital İkiz Teknolojisi İle Ahşap Tavanlı Yozgat Tekkeyenicesi Köyü Camii'nin Mimari Özelliklerinin Belgelenmesi. 21. Uluslararası İstanbul Fen, Mühendislik, Mimarlık ve Matematik Bilimlerinde Bilimsel Araştırmalar Kongresi, İstanbul, Türkiye.
- Önal, G., Fidan, D., & Ulvi, A. (2024). Açık Ocak Maden Sahalarının İHA Teknolojisi Kullanılarak Tespiti ve Değerlendirilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 31-38. <https://doi.org/10.53030/tufod.1585916>
- Özdemir, K. (2015). "Anavarza Antik Kenti'nin Tarihi ve Arkeolojik Önemi." *Adana Kültür ve Tarih Araştırmaları Dergisi*, 12(3), 23-34.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). "Image-Based 3D Modelling: A Review." *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269-291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Şahin, S. (2014). "Türkiye'de Arkeolojik Alanların Belgelenmesinde Yeni Teknolojiler." *Türk Arkeoloji Dergisi*, 58(2), 89-102.
- 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.
- Ulukok, A., & Ulvi, A. (2023). Yerel Yönetimlerde Kaçak Yapı Tespitinde İHA Kullanımı: Keçiören Belediyesi Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 7-19. <https://doi.org/10.53030/tufod.1288584>
- Ulvi, A., Yiğit, Y., (2020). İHA Fotogrametrisi Tekniği Kullanarak 3B Model Oluşturma: Yakutiye Medresesi Örneği, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2020; 2(2); 46-54
- Verhoeven, G. (2011). "Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-Dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with PhotoScan." *Archaeological Prospection*, 18(1), 67-73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>
- Yiğit, A.Y., Uysal, M., (2025). Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry, *Measurement*, Volume 242, id.115931,
- URL 1: <https://kulturenvanteri.com/yer/anazarbos-kent-kapisi/#17.1/37.249329/35.897266>
- URL 2: https://www.dronmarket.com/urun/dji-matrice-300-RTK-p1-kamera-fotogrametri-yazilimi?srsid=AfmBOoqPG-wL68dPTLSu4OUeRjoCup956N3U_jBJ5iSCaRB74ii5eDnT
- URL 3: <https://enterprise.dji.com/zenmuse-p1>



© Author(s) 2025.

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