

İHA Fotogrametrisi Kullanarak Tarihi Alanların Üç Boyutlu Belgelenmesi: Soli Pompeiopolis Antik Kenti Örneği

Elif Haksun Karakaya^{1*}, Ali Ulvi¹

¹ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye; (haksunkarakaya@gmail.com; aliulvi@mersin.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
haksunkarakaya@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Karakaya, H. E., & Ulvi, A. (2024). İHA Fotogrametrisi Kullanarak Tarihi Alanların Üç Boyutlu Belgelenmesi: Soli Pompeiopolis Antik Kenti Örneği, 6(2), 39-47.

Geliş : 05.11.2024
Revize : 27.11.2024
Kabul : 29.11.2024
Yayınlama : 31.12.2024

Özet

Bu çalışma, Mersin'in Soli Pompeiopolis antik kentinde yer alan tarihi sütunlu caddenin üç boyutlu (3B) modellemesini gerçekleştirerek, kültürel miras alanlarının dijital belgelenmesinde İHA fotogrametrisi ve dijital modelleme tekniklerinin etkinliğini incelemektedir. İnsansız Hava Araçları (İHA) kullanılarak gerçekleştirilen fotogrametrik modelleme ile yüksek hassasiyette bindirmeli fotoğraflar toplanmış; Agisoft Metashape yazılımında nokta bulutu ve yüzey dokusu oluşturulmuştur. Ardından SketchUp yazılımında sütunların detaylı vektörel modelleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, sütunlu caddenin mimari detaylarının yüksek doğrulukta dijital kayıt altına alındığı ve bu modellerin restorasyon, koruma ve akademik araştırmalar için stratejik bir kaynak sunduğu görülmüştür. Dijital kayıtların kültürel mirasın korunması, erişilebilirliğinin artırılması ve sürdürülebilir yönetimi açısından önemli katkılar sunduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemlerin, dünya genelinde kültürel miras alanlarının korunmasında yaygın olarak kullanılabilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İHA fotogrametrisi, üç boyutlu modelleme, kültürel miras, dijital belgeleme, Soli Pompeiopolis.

Three-Dimensional Documentation of Historical Sites Using UAV Photogrammetry: The Case of Soli Pompeiopolis Ancient City

*Corresponding Author:
haksunkarakaya@gmail.com

Research Article

Citation: Karakaya, H. E., & Ulvi, A. (2024). Three-Dimensional Documentation of Historical Sites Using UAV Photogrammetry: The Case of Soli Pompeiopolis Ancient City. *Turkish Journal of Photogrammetry*, 6(2), 39-47 (in Turkish).

Received : 05.11.2024
Revised : 27.11.2024
Accepted : 29.11.2024
Published : 31.12.2024

Abstract

This study examines the effectiveness of UAV photogrammetry and digital modelling techniques in the digital documentation of cultural heritage sites by performing three-dimensional (3D) modelling of the historical colonnaded street in the ancient city of Soli Pompeiopolis in Mersin. With photogrammetric modelling using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), high-precision overlay photographs were collected; point cloud and surface texture were created in Agisoft Metashape software. Then, detailed vector models of the columns were obtained in SketchUp software. As a result of the study, it was observed that the architectural details of the colonnaded street were digitally recorded with high accuracy and these models provide a strategic resource for restoration, conservation and academic research. It has been determined that digital records make important contributions to the protection, accessibility and sustainable management of cultural heritage. It is suggested that these methods can be widely used in the conservation of cultural heritage sites worldwides.

Keywords: UAV photogrammetry, three-dimensional modelling, cultural heritage, digital documentation, Soli Pompeiopolis.

1. Giriş

İnsan İnsanlık, tarih boyunca kültürel değerler, yapılar ve kalıntılar aracılığıyla geçmişten günümüze zengin bir miras bırakmıştır. Bu kültürel ve tarihi miras, geçmiş medeniyetlerin izlerini taşıyarak modern toplumlara aktarılmakta ve insanlığın ortak hafızasını oluşturmaktadır [1, 2]. Tarihi alanlar, yalnızca fiziksel yapılar olmaktan öte, bir toplumun kültürel ve sosyal dokusunu, değerlerini, geleneklerini ve yaşam biçimini yansıtan, geçmişle günümüz arasındaki bağı kuran önemli izlerdir. Bu alanlar, insanlığın tarih boyunca oluşturduğu bilgi ve birikimi geleceğe taşıyarak kültürel sürekliliği sağlamada tartışmasız bir öneme sahiptir [3]. Geçmiş medeniyetlerin somut kanıtları olarak karşımıza çıkan tarihi yapılar, bu nedenle korunmalı ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmelidir; zira bu yapıların kaybı, yalnızca fiziksel varlıkların değil aynı zamanda bir toplumun hafızasının da silinmesi anlamına gelir [4]. Bu bağlamda, tarihi alanların belgelenmesi ve korunması, hem gelecek nesillere aktarılacak kültürel bir miras bırakmak hem de tarihsel sürekliliği sağlamak adına son derece önemlidir [5].

Tarihi mirasın korunması ve aktarılması sürecinde belgeleme, önemli bir aşama olarak karşımıza çıkar. Belgeleme, bir yapının ya da alanın fiziksel özelliklerinin kaydedilmesinin ötesinde, tarihi yapıların kültürel ve tarihsel bağlamda da incelenmesini sağlar. Bu süreç, kültürel mirasın korunması, arkeolojik kazılarda bilgi temini, turizm ve kültür tanıtımlarında tanıtım materyalleri sağlama, restorasyon ve koruma projelerine destek gibi pek çok alanda hayati bir rol oynar [1, 3, 6, 7]. Geleneksel belgeleme yöntemleri, çizimler, yazılı ve görsel dokümanlar, bilgi formları gibi farklı teknikler içermektedir [8]. Ancak, bu yöntemlerin kopyalanma riski, depolama ve koruma güçlükleri ve zamanla bozulma gibi çeşitli dezavantajları bulunmaktadır [9].

Son yıllarda gelişen teknoloji, bu zorlukları aşmak amacıyla yenilikçi çözümler sunarak, belgeleme alanında modern tekniklerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Dijital teknolojiler sayesinde kültürel miras unsurları artık daha hassas, hızlı ve etkili bir şekilde belgelenmekte, bu da tarihi eserlerin gelecek kuşaklara sağlıklı bir şekilde aktarılmasına olanak tanımaktadır [4]. Günümüz teknolojileri, tarihi ve kültürel alanların üç boyutlu (3B) modellerini üretebilme kapasitesine sahiptir; bu durum, belgeleme sürecinde doğruluk, hassasiyet, veri güvenliği ve depolama açısından yeni olanaklar sunmaktadır. Üç boyutlu modeller, hem yapının gerçek zamanlı bir temsili olarak işlev görmekte hem de kültürel mirasın korunması ve tanıtılması açısından etkin bir araç oluşturmaktadır.

Bu bağlamda fotogrametri, tarihi ve kültürel varlıkların üç boyutlu dokümantasyonu için kullanılan ileri teknoloji yöntemlerinden biridir. Fotogrametrinin sunduğu yüksek çözünürlüklü ve detaylı veri sağlama imkânı, depolama sorunlarını azaltması ve doğruluğu artırması, bu yöntemi tarihi yapıların belgelenmesinde son derece etkili hale getirmektedir [10]. Üç boyutlu fotogrametrik modeller, yapıların detaylı bir temsili sunarak restorasyon, analiz ve koruma çalışmalarında önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

Son yıllarda, İnsansız Hava Araçları (İHA) fotogrametrik çalışmalarla birleştirilerek üç boyutlu modelleme sürecine yeni bir hız ve doğruluk kazandırmıştır. İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), maliyet ve zaman tasarrufu nedeniyle kültürel miras yapılarının modellenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir [11, 12]. İHA'lar, insan müdahalesi olmaksızın uzaktan kontrol edilerek veri toplayabilme yeteneği sunan modern sistemlerdir. Fotogrametrik tekniklerle entegrasyonları, daha hızlı, güvenilir ve yüksek çözünürlüklü veriler elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikler, tarihi yapıların etrafıca belgelenmesini sağlarken erişim zorunluluğu olmayan, ulaşılması güç alanlardan bile veri toplama imkânı sunarak belgeleme sürecinde esneklik sağlamaktadır [5, 13]. İHA fotogrametrisi, yapıların detaylı ve hassas bir şekilde incelenmesine olanak tanırken, aynı zamanda zaman ve iş gücü açısından verimlilik sağlamakta, bu sayede daha geniş kapsamlı koruma ve restorasyon projelerinin hayata geçirilmesine katkı sunmaktadır.

Bilimsel literatürde, İHA'ların kullanımının tarihi miras hakkında kesin veriler sağladığı gösterilmiştir [14]. Kültürel öneme sahip alanların ve binaların belgelenmesi ve temsili, genellikle 3B yeniden yapılandırmalar oluşturmak için iki boyutlu (2B) görüntülerin kullanımını içerir [15, 16]. Hem ortofotolar hem de 3B modeller diğer Dijital Teknolojilerle (DT) entegre edilebilir [18]. Çok sayıda araştırmacı, kültürel mirasın korunmasıyla ilgili çabalarda İHA'ları Bina Bilgi Modellemesi (BIM) ve/veya Tarihi Bina Bilgi Modellemesi (HBIM) ile birleştirmiştir [19, 20]. Bu yalnızca geometrik verilerin yakalanmasını değil, aynı zamanda binanın bileşen malzemeleri ve tarihi geçmişi hakkında bilgi eklenmesini de içerir. Diğer çalışmalarda, dinamik analizler yapmak için 3B ve HBIM modellerinden Sonlu Elemanlar Modelleri (FEM) oluşturulmuştur [18]. Son olarak, son araştırmalar, tarihi binalardaki bilgilere erişimi artırmak için İHA sonuçlarını Sanal Gerçeklik ve Genişletilmiş Gerçeklik teknolojileriyle entegre etmiştir [21, 22]. Konu ile alakalı literatür incelendiğinde Ergün ve ark. 2023 yılında yapmış oldukları çalışmada İHA fotogrametri yöntemi ile çekilen 418 adet fotoğraf ile LoD 0-1-2-3 seviyelerinde çizimler oluşturulmuştur. Ayrıca aynı LoD'de cephe

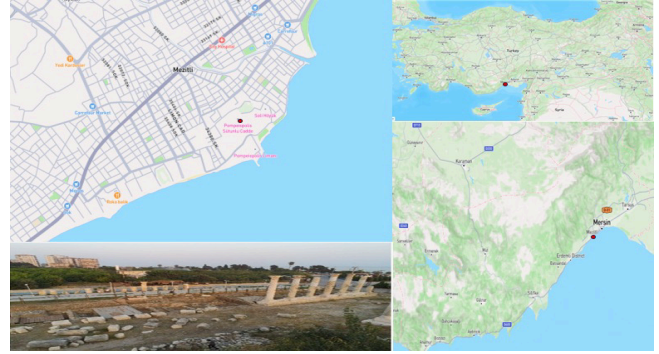
detayına ait konservatif ve İHA ölçümleri doğruluk açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, LoD3 standardında X, Y ve Z eksenleri için RMSE değerleri sırasıyla 1,394 cm, 0,861 cm ve 0,694 cm olarak hesaplanmıştır. İHA fotogrametri yöntemi kullanılarak kültürel yapıya ait yüksek doğruluklu LoD modellerinin istenilen doğrulukta üretilbileceği sonucuna varmışlardır [23]. Arslan ve Şekertekin 2024 yılında yaptıkları çalışmada kervansarayın çoklu görünüm açısından görüntülerinin alınmasını takiben, fotogrametrik yöntemler kullanılarak metrik 3B modeli üretilmişlerdir. X, Y, Z koordinatlarındaki Karesel ortalama Hataları (RMSE'ler), Yer Kontrol Noktaları (YKN'ler) ve karşılık gelen model koordinatlarına dayanarak hesaplamışlardır. X, Y, Z koordinatları için RMSE'ler sırasıyla 0,019 m, 0,025 m ve 0,033 m olarak hesaplamışlardır [24]. Stanga ve ark. 2023 yılındaki çalışmalarında Roma'daki Tor Fiscale Parkı'ndaki Claudius Anio Novus su kemerine odaklanarak arkeolojik kalıntıların tasvirini iyileştirmek için tarama-HBIM-XR işleminin ve insansız hava aracı (İHA) fotogrametrisinin kullanımını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda İHA fotogrametrisinin başarılı bir şekilde uygulanması, yapı arkeolojisinin temsilini geliştirme potansiyellerini göstermişlerdir [25].

Bu çalışma kapsamında, İHA fotogrametrisi ile tarihi sütunların üç boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, tarihi yapıların fiziksel yapısını ve detaylarını dijital ortamda muhafaza ederek hem kültürel mirasın korunmasını hem de bu mirasın gelecek nesillere aktarılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Elde edilen 3B modeller, yalnızca görsel belgeler sunmakla kalmayıp aynı zamanda restorasyon, koruma ve kültürel tanıtım süreçlerinde stratejik bir araç olarak da işlev görmektedir.

2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak seçilen Soli Pompeiopolis antik kenti, Mersin, Türkiye'de bulunmaktadır (Şekil 1). MÖ 700 yılları civarında Rodos adasından gelen Dorlar tarafından kurulan antik kent, Helenistik, Roma ve Bizans dönemlerine ait kültürel izler taşımaktadır (URL-1). Antik kentin girişinde yer alan çalışma alanında, geçmişte yaklaşık iki yüz sütun bulunmaktaydı; ancak günümüzde bu sütunlardan yalnızca otuz üç tanesi ayakta kalmıştır. Bu sütunların 4'ü batı, 29'u ise doğu sütun dizisine aittir. Korinth düzeninde tasarlanmış sütun başlıklarının bir kısmı figürlerle süslenmiştir; bazı sütunlar ise Roma imparatorları veya yüksek rütbeli yöneticilerin büstlerini taşımaktadır (URL-2). Şu anda düzensiz bir mimari yapıya sahip olan bu alan, karmaşık yapısı ve ciddi derecede yıpranmış olması nedeniyle çalışma

için seçilmiştir (Şekil 2). Mersin'in önemli tarihi yapılarından biri olan Soli Pompeiopolis antik kentinin sütunları, 36° 44' 35" K enlemi ve 34° 32' 24" D boylamı üzerinde yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı.



Şekil 2. Sütunlu cadde.

3. Materyal ve Metodoloji

Bu çalışmada, tarihi yapıların 3B modellemesi için fotogrametri tekniği kullanılmıştır. Fotogrametri, nesnelere ölçümünü ve analizini fotoğraflar üzerinden gerçekleştiren bir tekniktir. Bu teknik, nesnelere fiziksel boyutlarını, şekillerini, konumlarını ve yönelimlerini belirlemek için fotoğrafların geometrik özelliklerinden faydalanır [26, 27]. Fotogrametrik işlem, belirli bir nesnenin fotoğrafı çekildiğinde, bu fotoğrafın izdüşümünü ve nesnenin görüntüdeki konumunu kullanarak gerçek dünya koordinatları ve boyutları hakkında bilgi sağlamaktadır [1, 4-7].

Fotogrametrinin özel bir alt dalı olan hava fotogrametrisi, İHA kullanılarak gerçekleştirilen bir fotogrametrik belgeleme tekniğidir. Hava fotogrametrisi, özellikle büyük alanlar veya erişimi zor yapılar üzerinde veri toplama sürecinde hız ve verimlilik sağlamaktadır [27-29]. İHA kullanımı, nesnelere fiziksel olarak yaklaşımdan hızlı, yüksek doğruluk ve hassasiyetle veri toplanabilmesini mümkün kılmaktadır [30]. İHA fotogrametrisi, geleneksel yöntemlerin erişim zorluklarını ve zaman

kısıtlamalarını ortadan kaldırarak kültürel mirasın belgeleme sürecinde devrim niteliğinde avantajlar sunar.

Bu çalışmada, tarihi sütunların 3B modellemesini gerçekleştirmek amacıyla İHA fotogrametrisi tercih edilmiştir. Bu bağlamda veri toplama işlemi için Parrot Anafi modeli İHA kullanılmıştır. Parrot Anafi, çalışma alanında yüksek doğrulukta veri elde etmek için uçuş menzili, uçuş süresi ve yüksek çözünürlüklü kamerası gibi özellikleri sayesinde uygun bir seçim olarak değerlendirilmiştir. Bu İHA, 4K HDR çözünürlükte görüntüler kaydedebilmekte ve 180 derece eğilebilen gimbal kamerasıyla geniş bir perspektif sunmaktadır (Tablo 1). Uygulama sürecinde, İHA uçuş rotası belirlenmiş, uygun irtifa, örtüşme oranı ve hız parametreleri ayarlanarak sistematik bir uçuş planı uygulanmıştır. Böylece, çalışma alanının tüm detaylarını kapsayacak şekilde yüksek çözünürlüklü fotoğraflar elde edilmiştir (Şekil 3).

Toplanan görüntüler, fotogrametrik modelleme işlemlerinde Agisoft Metashape ve SketchUp yazılımlarında işlenmiştir. Agisoft Metashape, dijital görüntülerin fotogrametrik işlenmesini gerçekleştiren, çok aşamalı iş akışına sahip bir yazılım olup; görüntülerin hizalanması, nokta bulutu oluşturulması, modelleme ve ortofoto üretimi gibi işlemleri otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. Bu yazılım, fotogrametrik analizlerin yüksek doğrulukta yapılmasına ve detaylı 3B modellerin üretilmesine olanak tanımaktadır. SketchUp ise, 3B model üzerinde detaylı düzenlemeler yapabilen, x, y, z eksenlerinde çizim yapılmasını sağlayan ve kullanımı kolay bir mimari modelleme programıdır. Çalışmada elde edilen 3B model, nokta bulutu ve katı model formatında hibrit bir yapıya dönüştürülerek kullanılmıştır.

Fotogrametrinin temel matematiksel modeli, merkezi izdüşüm prensibine dayanmaktadır. Merkezi izdüşüm, bir fotoğrafın odak noktasından alınan nesnelerin görüntüsünü, perspektif özelliklerini koruyarak izdüşüm düzlemine taşır. Bu yöntem, görüntülerin derinlik ve uzaklık bilgilerini de içeren 3B veriler elde edilmesini sağlar. Merkezi izdüşüm modeli, bir fotoğraf üzerindeki nesnelerin konum, şekil, büyüklük, görünüş gibi özelliklerini belirlemek için önemli bir matematiksel altyapı sunar. Fotogrametrik işlemler sırasında merkezi izdüşüm modeli kullanılarak fotoğraf üzerindeki her pikselin gerçek dünyadaki koordinatları hesaplanabilmektedir.

Fotogrametrik işlemdeki yöneltme aşamaları iç yöneltme ve dış yöneltme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İç yöneltme, kameranın iç parametrelerinin belirlenmesini ve piksel koordinatlarından görüntü koordinat sistemine geçişi içerir. Bu işlem, görüntülerin geometrik özelliklerinin korunmasını sağlar ve elde edilen görüntülerin doğru

bir şekilde işlenmesine olanak tanır. Dış yöneltme ise, görüntü koordinatlarından arazi koordinatlarına geçişi sağlayarak görüntülerin gerçek dünya üzerindeki doğru konumlarını belirler. Dış yöneltme süreci iki aşamadan oluşur: karşılıklı yöneltme ve mutlak yöneltme. Karşılıklı yöneltme aşamasında, birbirini örtüşen görüntüler arasındaki ortak noktalar eşleştirilerek görüntülerin hizalanması sağlanır. Mutlak yöneltme aşamasında ise, bu eşleştirilen görüntüler dünya koordinat sistemi ile ilişkilendirilerek, görüntülerin 3B arazi koordinat sistemine aktarılması sağlanır.

Bu çalışmada ayrıca, Hareket ile Nesne Oluşturma (Structure from Motion - SfM) tekniği kullanılmıştır. SfM, sırayla çekilen 2B görüntülerden 3B modeller oluşturmayı sağlayan bir fotogrametri yöntemidir. SfM, nesnelerin 3B modelini oluşturmak için stereo görüntü tekniğini kullanır ve görüntülerdeki ortak noktaları belirleyerek 3B yapıyı oluşturur. SfM algoritması, görüntülerdeki ortak referans noktalarını tespit ederek iç yöneltme ve dış yöneltme parametrelerini otomatik olarak hesaplar. Bu işlem, operatör müdahalesini minimuma indirerek iş yükünü azaltır ve süreci hızlandırır. SfM yönteminin kullanımı, karmaşık geometrik yapıya sahip nesnelerin yüksek doğrulukta modellenmesine imkân tanır ve geniş veri kümelerinin işlenmesinde etkin bir çözüm sunar. SfM'nin sağladığı otomatik hizalama ve eşleme yetenekleri sayesinde 3B modelleme süreci oldukça verimli bir şekilde tamamlanmaktadır.

Bu yöntemlerin birleşimi sayesinde, tarihi yapıların 3B modelleri yüksek doğrulukta ve detaylı bir şekilde elde edilmiş; böylece kültürel mirasın korunması ve geleceğe aktarılması için gerekli altyapı oluşturulmuştur.



Şekil 3. Parrot anafi.

Tablo 1. Parrot anafi teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Ağırlık	315 g.
Maksimum iletim mesafesi	4km
Maksimum uçuş süresi	26dk.
Maksimum yatay hız	34mph.
Maksimum dikey hız	4m / s.
Maksimum rüzgar direnci	31mph.
Maksimum çalışma yüksekliği	Deniz seviyesinden 4.500 m.

3.1. Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi, üç boyutlu modelleme çalışmalarında elde edilen verilerin güvenilirliğini ve hassasiyetini değerlendirmek için temel bir süreçtir. Bu analiz, kullanılan veri toplama yöntemlerinin etkinliğini, modelleme sürecindeki hata paylarını ve sonuçların doğruluk seviyesini belirlemek amacıyla yapılır. Fotogrametrik işlemler sırasında doğruluk analizi, genellikle nokta bulutu modelleri, yüzey dokuları ve YKN gibi referans veriler üzerinden gerçekleştirilir.

Fotogrametri tabanlı modellemede doğruluk analizi iki temel aşamada incelenir. İlk aşamada, modelin oluşturulmasında kullanılan iç ve dış yöneltme parametrelerinin doğruluğu değerlendirilir. İç yöneltme, kameranın optik özelliklerini ve görüntülerin geometrik uyumluluğunu test ederken, dış yöneltme, modelin gerçek dünya koordinatlarına göre doğru bir şekilde hizalanmasını sağlar. Dış yöneltme sırasında, model ile YKN arasında sapma miktarı hesaplanarak, modelin gerçek dünya ile ne kadar uyumlu olduğu belirlenir. Bu aşamada kullanılan doğruluk ölçütlerinden biri, ortalama karesel hata (RMSE) değeridir. RMSE, modeldeki sapmaların büyüklüğünü sayısal olarak ifade eder ve modelin genel doğruluk seviyesinin bir göstergesi olarak kullanılır. RMSE için Denklem 1 kullanılmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2]} \quad (1)$$

Burada:

n: Toplam Yer Kontrol Noktası (YKN) sayısı.

$\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$: Ölçülen değer ile referans değer arasındaki farklar.

Bir diğer kritik doğruluk analizi adımı, modelin yüzey dokusunun değerlendirilmesidir. Yüzey dokusu, üç boyutlu modelin fiziksel gerçekliği ne kadar doğru yansıttığını gösteren önemli bir unsurdur. Bu analizde, modelde yer alan dokusal detaylar fiziksel örneklerle karşılaştırılır. Örneğin, tarihi yapıların yüzeyindeki figürler, desenler veya aşınma izleri gibi detaylar, modelin gerçekliği ne derece yansıttığını ölçmek için referans alınır. Yüzey dokusunun analizi, hem görsel hem de metrik karşılaştırmalar yoluyla yapılır.

Fotogrametrik modellerde doğruluğu etkileyen faktörler arasında, fotoğrafların çekim kalitesi, örtüşme oranı, uçuş parametreleri ve yazılım tabanlı işleme teknikleri yer alır. Özellikle İHA fotogrametrisi gibi modern yöntemlerde, veri toplama sürecinde yüksek örtüşme oranları sağlanması ve uygun uçuş rotalarının belirlenmesi, doğruluk seviyesini artıran

önemli unsurlardır. Ayrıca, kullanılan yazılımın işlem algoritmaları, nokta bulutu oluşturma ve yüzey modeli üretme süreçlerinde doğruluğu doğrudan etkiler.

Sonuç olarak, doğruluk analizi, 3B modelleme çalışmalarının güvenilir bir temel üzerinde ilerlemesini sağlayan kritik bir adımdır. Bu süreçte elde edilen bulgular, modelleme çalışmalarının yalnızca görsel doğruluğunu değil, aynı zamanda metrik hassasiyetini de ortaya koyar. Doğruluk analizine ilişkin bu teorik çerçeve, fotogrametrik modellemenin bilimsel ve teknik yeterliliğini değerlendirmek için standart bir yöntem sunar.

4. Bulgular

Bu çalışmada, Mersin'in Soli Pompeiopolis antik kentinde yer alan tarihi sütunlu caddenin 3B modeli, İHA fotogrametrisi ve modern dijital modelleme teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Çalışma, fotogrametrik modelleme süreçlerinin tüm aşamalarını detaylı bir şekilde ele alarak antik kent gibi tarihi alanların belgelenmesine yönelik geniş kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, antik kentteki mimari unsurların dijital olarak korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından önemli veriler sağlamaktadır.

4.1. Veri Toplama Süreci ve Fotoğraf Hizalama

Veri toplama sürecinde, çalışma alanı olan sütunlu cadde üzerinde Parrot Anafi İHA kullanılarak 57 adet bindirmeli fotoğraf çekilmiştir. Çekim sırasında İHA'nın uçuş irtifası, hız, fotoğrafların örtüşme oranı gibi parametreler optimum düzeyde ayarlanarak, sütunların detaylarını tam anlamıyla yansıtan yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Bindirme oranı, her fotoğrafın bitişik karelerle örtüşme düzeyini artırarak modeldeki doğruluğu artırmak amacıyla yaklaşık %70-80 olarak belirlenmiştir. Bu oran, fotogrametrik işlemler sırasında ortak referans noktalarının tespit edilmesini kolaylaştırmış ve modelin daha stabil bir yapıda oluşturulmasına katkı sağlamıştır.

Elde edilen görüntüler, Agisoft Metashape yazılımına aktarılmış ve fotoğrafların hizalanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf hizalama sürecinde yazılım, her bir görüntü çifti arasındaki bağ noktalarını (Tie Points) algılayarak fotoğrafları sütunların konumuna göre hizalamıştır. Bu süreç, sütunların izdüşümleri üzerinden konum ve perspektif özelliklerinin belirlenmesini sağlayarak modelin temel altyapısını oluşturmuştur. Hizalama işleminin ardından fotoğrafların örtüşen alanları detaylı olarak işlenmiş, bu sayede yüksek doğrulukta bir nokta bulutu modeli elde edilmiştir.

4.2. Nokta Bulutu ve 3B Yüzeysel Modelinin Oluşturulması

Fotoğrafların hizalanması ile oluşturulan temel bağ noktaları doğrultusunda, yoğun bir nokta bulutu (Dense Point Cloud) model oluşturulmuştur. Nokta bulutu, sütunların üç boyutlu olarak temsilini sağlayan ve yapının her bir detayıyla ilgili hassas veriler içeren bir veri seti sunmaktadır. Bu yoğun nokta bulutu, sütunların dokusal ve geometrik özelliklerinin sayısal olarak kaydedilmesini mümkün kılmıştır. Nokta bulutunun yoğunluğu, modelin doğruluğunu ve detay düzeyini artırmakta kritik bir rol oynamış ve sütunların ayrıntılı bir yapısal analizine olanak sağlamıştır. Nokta bulutu modeli, sütunlu caddenin detaylı bir temsilini sunmakta ve bu aşamanın tamamlanmış halini Şekil 4'te görebilirsiniz.

Nokta bulutu modeli oluşturulduktan sonra, sütunların yüzey özellikleri işlenmiş ve yüzey dokusu (Texture) oluşturulmuştur. Yüzey dokusu işlemi, sütunların mevcut durumlarını detaylı bir şekilde yansıtmakta ve yapının tarihi dönemine ait izleri korumaktadır. Fotogrametrik işleme sürecinin bu aşamasında, her bir noktanın gerçek dünyadaki karşılığı sistemli bir şekilde yapılandırılarak sütunlu caddenin üç boyutlu yüzey modeli tamamlanmıştır. Elde edilen bu yüzey modeli, sütunların konum, yükseklik, çap ve yüzey detaylarının doğru bir şekilde dijital ortama aktarılmasını sağlamıştır.



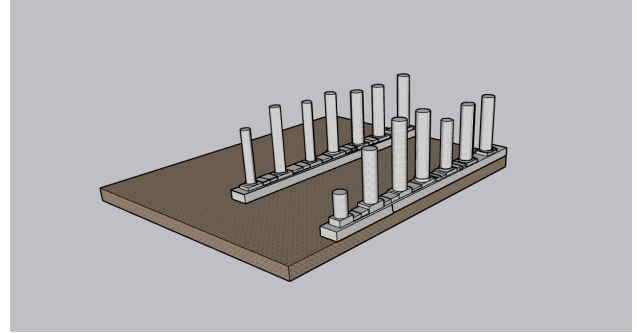
Şekil 4. 3B nokta bulutu.

4.3. Vektörel Modelleme ve Detaylı Ölçüm İşlemleri

Fotogrametrik yüzey modelinin ardından, SketchUp yazılımında vektörel modelleme süreci gerçekleştirilmiştir. Vektörel modelleme, sütunların yüksek çözünürlüklü 3B modelinin doğrulayıcı ölçüm ve çizim işlemleri ile yeniden yapılandırılmasına imkân tanımıştır. Bu aşamada, Agisoft Metashape yazılımında elde edilen model üzerinden sütunların yükseklik, genişlik, uzunluk ve çap gibi ölçüm verileri toplanmış ve SketchUp yazılımında bu parametreler kullanılarak sütunların vektörel çizimleri yapılmıştır. Bu çizimlerde, sütunların taban alanı ve üst kısımlarına dair ölçümler, sütunların mimari özelliklerine uygun olarak detaylandırılmıştır. SketchUp yazılımında

çizim komutları (line, offset, push-up) kullanılarak her bir sütun için ayrı ayrı üç boyutlu vektörel modeller üretilmiştir (Şekil 5).

Vektörel modelleme sürecinde sütunların detaylı özellikleri dikkate alınarak kalınlık, yükseklik gibi detaylar en ince ayrıntısına kadar modellenmiştir; ayrıca sütun başlıklarının Korinth düzeninde olması, figürlü ve imparator büstleri içeren detaylarının modelde görünür olması sağlanmıştır. Böylece, elde edilen vektörel model, sütunların sanatsal ve mimari unsurlarını gerçekçi bir şekilde yansıtmış ve tarihi alana dair kapsamlı bir dijital kayıt sunmuştur.



Şekil 5. 3B vektörel model.

4.4. Modelin Potansiyel Kullanım Alanları

Oluşturulan 3B nokta bulutu ve vektörel modeller, tarihi sütunlu caddenin dijital ortamda korunmasını ve belgeleme sürecini önemli ölçüde desteklemektedir. Bu modellerin restorasyon projelerinde altlık olarak kullanılması, tarihi yapının fiziksel özelliklerinin güncel durumuyla uyumlu şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen modeller, sütunların orijinal boyutları, açıları ve mimari özelliklerine dair detaylı veriler içermektedir. Bu durum, restorasyon çalışmaları sırasında yapısal bozulmaların tespiti ve eski haline uygun restorasyon yapılması açısından önemli bir kaynak sağlamaktadır.

Ayrıca, üç boyutlu modellerin dijital kütüphanelerde saklanarak çeşitli akademik çalışmalar ve disiplinler arası araştırmalar için erişilebilir hale getirilmesi, bu tür tarihi eserlerin korunmasına yönelik bilinç oluşturma açısından değerli bir katkı sunmaktadır. Elde edilen dijital kayıtlar, farklı uzmanlık alanlarındaki araştırmacılar için referans niteliği taşıırken, aynı zamanda kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılmasında da önemli bir rol oynamaktadır.

4.5. Avantajlar ve Karşılaşılan Zorluklar

Bu çalışmada kullanılan İHA fotogrametrisi ve dijital modelleme teknikleri, veri toplama sürecinde sağladıkları hassasiyet, hız ve verimlilik gibi avantajlarıyla dikkat çekmiştir. İHA fotogrametrisi,

tarihi yapılara yaklaşımadan, güvenli ve yüksek doğrulukta veri toplamayı sağlamış; ayrıca büyük miktarda verinin kısa sürede işlenmesini mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, bu yöntemin bazı dezavantajları da ortaya çıkmıştır. Veri uyum zorlukları, başlangıç maliyetlerinin yüksekliği ve İHA kullanımında güvenlik/gizlilik sorunları gibi sınırlamalar, çalışmanın karşılaştığı temel zorluklar arasında yer almıştır.

Çalışmanın bulguları, İHA fotogrametrisi ve modern modelleme tekniklerinin tarihi yapılar üzerinde yüksek doğruluk ve detay düzeyi sunarak güvenilir dijital belgeler oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen 3B modeller, restorasyon, koruma ve akademik çalışmalar için stratejik bir kaynak olarak değerlendirilebilmekte; tarihi yapıların dijital ortamda korunması ve gelecek nesillere aktarılması için önemli bir altlık sağlamaktadır. Elde edilen dijital verilerin dijital kütüphanelerde saklanarak bilimsel çalışmalara katkı sağlaması, kültürel mirasın sürdürülebilir yönetimi açısından büyük bir avantaj sunmaktadır.

4.6. Doğruluk Analizi ve Değerlendirilmesi

Doğruluk analizi, çalışmada elde edilen 3B modellerin güvenilirliğini ve hassasiyetini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, modelleme sürecinin her aşamasında doğruluk testleri yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Çalışmada elde edilen yoğun nokta bulutu modeli, YKN ile karşılaştırılmıştır. Doğruluk analizi için sahada ölçülen 12 YKN kullanılmıştır.

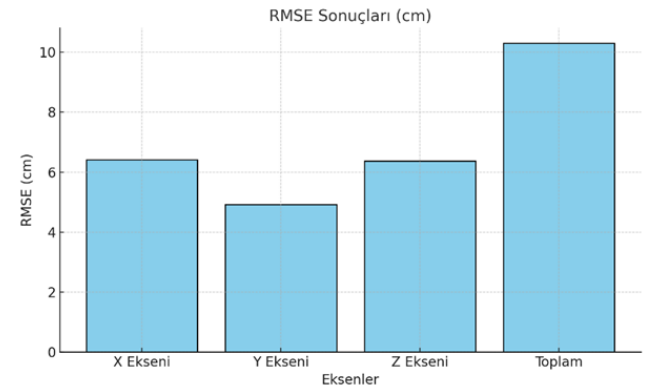
Agisoft Metashape yazılımında oluşturulan modelin X, Y ve Z eksenlerindeki sapmaları hesaplanmış, RMSE değerleri sırasıyla 6.41 cm, 4.93 cm ve 6.97 cm olarak bulunmuştur. Sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Bu sonuçlar, modelin yüksek doğruluk seviyesine sahip olduğunu ve saha ölçüleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Toplam RMSE ise 10.30 cm hesaplanmıştır. RMSE sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

Ayrıca, modelin yüzey dokusunun doğruluğu da analiz edilmiştir. Sütun yüzeylerindeki dokusal detaylar, fiziksel ölçümlerle karşılaştırılmış ve yaklaşık %95 oranında bir uyumluluk tespit edilmiştir. Bu durum, sütunların üzerindeki figürler, desenler ve aşınma izlerinin dijital modelde doğru bir şekilde temsil edildiğini ortaya koymaktadır. Fotogrametrik modelleme sürecinde kullanılan iç ve dış yönelme parametrelerinin doğruluğu, YKN ile fotoğrafların hizalanması sonucu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, fotogrametrik modellemenin genel olarak %0.85'lik bir sapma ile yüksek doğruluk düzeyinde olduğunu göstermiştir.

Yapılan analizler, modelin genel doğruluk seviyesinin oldukça yüksek olduğunu ve kullanılan İHA fotogrametrisi yönteminin, geleneksel ölçüm tekniklerine kıyasla üstün bir hassasiyet sağladığını ortaya koymuştur. Bu doğruluk seviyesi, tarihi yapıların dijital belgelenmesi ve korunması açısından İHA fotogrametrisi yönteminin güvenilir ve etkin bir araç olduğunu kanıtlamaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemlerin sonuçları, gelecekteki restorasyon ve koruma projelerinde referans alınabilecek nitelikte bir veri seti sunmaktadır.

Tablo 2. YKN doğruluk analizi ve RMSE hesaplama sonuçları.

YKN	Fark (X) (cm)	Fark (Y) (cm)	Fark (Z) (cm)
YKN1	-2.5	6.6	-0.9
YKN2	9.0	-5.8	5.7
YKN3	4.6	-6.4	-6.0
YKN4	2.0	-6.3	0.3
YKN5	-6.9	-3.9	1.8
YKN6	-6.9	0.5	-9.1
YKN7	-8.8	-1.4	2.2
YKN8	7.3	-4.2	-6.6
YKN9	2.0	2.2	-8.7
YKN10	4.2	-7.2	9.0
YKN11	-9.6	-4.2	9.3



Şekil 6. YKN için X, Y, Z eksenleri ve toplam RMSE değerleri.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, Mersin'deki Soli Pompeiopolis antik kentinde bulunan tarihi sütunlu caddenin 3B modellemesini gerçekleştirerek, kültürel miras alanlarının dijital olarak belgelenmesinde İHA fotogrametrisi ve dijital modelleme tekniklerinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Çalışma boyunca kullanılan İHA fotogrametrisi tekniği, yüksek hassasiyet ve detay seviyesinde veri sağlayarak, tarihi yapının dijital olarak korunmasına ve gelecekteki restorasyon projelerine referans oluşturulmasına katkı sağlamıştır. Dijital modellerin elde edilmesiyle,

yapının mevcut durumu detaylı bir şekilde kayıt altına alınmış, bu sayede yapının zaman içerisindeki bozulmalarının takip edilmesi ve geçmişe uygun bir restorasyon yapılması mümkün hale gelmiştir.

Elde edilen 3B modellerin, kültürel mirasın korunması açısından sunduğu avantajlar oldukça fazladır. Dijital kayıtlar, yapının mimari ve sanatsal detaylarını yüksek doğrulukla yansıtarak restorasyon, koruma ve analiz süreçlerinde temel bir kaynak olarak kullanılabilir. Bu çalışma, üç boyutlu modellerin sadece fiziksel belgelerden öte, sanal ortamlarda kültürel mirası sürdürülebilir bir şekilde koruma, gelecek nesillere aktarım ve kültürel mirasın erişilebilirliğini artırma konusunda da önemli katkılar sunmaktadır.

Sonuçlar, İHA fotogrametrisi ile elde edilen verilerin, yalnızca yapının geometrik özelliklerini değil, aynı zamanda yüzey dokusu gibi detayları da doğru bir şekilde aktardığını göstermektedir. Bu durum, üç boyutlu modellerin arkeolojik ve mimari araştırmalar için değerli bir araç haline gelmesini sağlamaktadır. İHA fotogrametrisi ile dijital modelleme, yalnızca Türkiye’de değil, dünya genelinde kültürel miras alanlarının korunmasında kullanılacak verimli ve maliyet etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Çalışmanın sunduğu teknikler ve elde edilen bulgular, farklı tarihi alanların belgelenmesi, korunması ve sürdürülebilir yönetimi için örnek teşkil etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, dijital belgeleme sürecinin gelişmiş teknolojik yöntemlerle entegrasyonu ve yaygınlaştırılması önerilmektedir. Dijital modellerin dijital kütüphanelerde saklanarak farklı disiplinlerdeki araştırmacılar ve koruma uzmanları tarafından erişilebilir hale getirilmesi, kültürel mirasın korunmasında sürdürülebilir bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye olan katkıları eşittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

[1] Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2023). İHA fotogrametrisi kullanarak Yozgat Çilekçi

Türbesi’nin 3 boyutlu nokta bulutu ve modelinin üretilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 29-35. <https://doi.org/10.53030/tufod.1313200>

- [2] Hamal, S. N. G., & Ulvi, A. (2022). 3B kent modelleri oluşturma sürecinde İHA fotogrametrisi ve CBS entegrasyonu: Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 4(2), 97-105.
- [3] Erdoğan, A., Görken, M., & Coşkun, T. (2024). İHA verileri ile CBS tabanlı 3B kent modeli örneği; Şefahtli Yeni Mahalle. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(1), 1-6. <https://doi.org/10.51534/tiha.1379633>
- [4] Akın, E. S., & Erdoğan, A. (2022). İnsansız hava araçları (İHA) ile arkeolojik alanlarda belgeleme: Sarıkaya Roma Hamamı (Therma Basilica) örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(3), 335-343. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1038407>
- [5] Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2024). Automatic crack detection and structural inspection of cultural heritage buildings using UAV photogrammetry and digital twin technology. *Journal of Building Engineering*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109952>
- [6] Atici, A., Paksoy, M. F., & Kabadayı, A. (2024). Maden sahalarındaki stok miktarının İHA yardımıyla belirlenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(1), 8-13. <https://doi.org/10.53030/tufod.1489122>
- [7] Kabadayı, A., & Uysal, M. (2020). Çok yüksek çözünürlüklü İHA verilerinden bina tespiti. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(2), 43-48.
- [8] 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>
- [9] Yiğit, A. Y., & Kaya, Y. (2024). Açık maden ocağındaki stok/pasa yığınının hacim hesaplamasında GNSS/CORS ve İHA ölçümlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(1), 7-20. <https://doi.org/10.51534/tiha.1466284>
- [10] Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2025). Virtual reality visualization of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry. *Measurement*, 242(Part B). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>
- [11] Yılmaz, A., & Ulvi, H. (2022). Kentsel hava sahasında insansız hava aracı sistemleri trafik yönetimi için verilmesi gereken hizmetler ve kullanılacak bazı teknolojiler. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 8-18. <https://doi.org/10.51534/tiha.1103761>
- [12] Kabadayı, A. (2022). Açık maden ocağında hacim hesabı için GNSS ve İHA ölçümlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma örneği. *Türkiye İnsansız*

- Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 52-57. <https://doi.org/10.51534/tiha.1179910>
- [13] Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2024). Detection of cracks in cultural heritage buildings using UAV photogrammetry-based digital twin. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1145/3703634>
- [14] Fiorillo, F., Perfetti, L., & Cardani, G. (2023). İHA fotoğrametrisi ile sismik bölgelerdeki tarihi binalardaki çatı hasarının otomatik haritalanması. *Procedia Structural Integrity*, 44, 1672–1679. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.214>
- [15] Hamal, S. N. G. (2023). Investigation of Underwater Photogrammetry Method: Challenges and Photo Capturing Scenarios of the Method. *Advanced Underwater Sciences*, 3(1), 19–25.
- [16] Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Yero-Paneque, L., & Agüera-Vega, F. (2020). Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage: Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain). *Building Research & Information*, 48, 140–159. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1626213>
- [17] Kaçarlar, Z., & Hamal, S. N. G. (2021). Küçük Objelerin Üç Boyutlu (3B) Modellenmesinde Yersel Lazer Tarama (YLT) Tekniği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 65-70.
- [18] Lancaster, J. (2018). Pre-and post-arson three-dimensional reconstructions of the Lichtenwalter schoolhouse, Green, Ohio. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 8, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.02.001>
- [19] Etxepare, L., Leon, I., Sagarna, M., Lizundia, I., & Uranga, E. J. (2020). Advanced intervention protocol in the energy rehabilitation of heritage buildings: A Miñones barracks case study. *Sustainability*, 12, 6270. <https://doi.org/10.3390/su12156270>
- [20] Lin, G., Giordano, A., & Sang, K. (2021). From site survey to HBIM model for the documentation of historic buildings: The case study of Hexinwu village in China. *Conservation Science in Cultural Heritage*, 20, 111–123. <https://doi.org/10.6092/ISSN.1973-9494/12793>
- [21] Banfi, F., & Previtali, M. (2021). Human-computer interaction based on scan-to-BIM models, digital photogrammetry, visual programming language, and extended reality (XR). *Applied Sciences*, 11, 6109. <https://doi.org/10.3390/app11136109>
- [22] Ursini, A., Grazzini, A., Matrone, F., & Zerbinatti, M. (2022). From scan-to-BIM to a structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation. *Automation in Construction*, 142, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104518>
- [23] Ergun, B., Sahin, C., & 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. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01041-z>
- [24] Arslan, E., & Şekertekin, A. (2024). Tarihi ve kültürel mirasın 3 boyutlu belgelenmesinde insansız hava araçlarının kullanımı: Ceyhan Kurtkulağı Kervansarayı örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 641–649. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1389048>
- [25] Stanga, C., Banfi, F., & Roascio, S. (2023). Enhancing building archaeology: Drawing, UAV photogrammetry and scan-to-BIM-to-VR process of ancient Roman ruins. *Drones*, 7(8), 521. <https://doi.org/10.3390/drones7080521>
- [26] Döş, M. E., & Yiğit, A. Y. (2023). Küçük ölçekli tarihi eserlerin fotogrametri yöntemi ile 3B modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 20–28. <https://doi.org/10.53030/tufod.1293789>
- [27] Kabadayı, A. (2022). Unmanned aerial vehicle usage in rough areas and photogrammetric data generation. *Advanced UAV*, 1(1), 8–14.
- [28] Döş, M. E., & Yiğit, A. Y. (2022). Tarihi minberlerin fotogrametri yöntemi ile belgelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(2), 58–65. <https://doi.org/10.53030/tufod.1197086>
- [29] Erdoğan, A., Görken, M., & Kabadayı, A. (2022). Study on the use of unmanned aerial vehicles in open mine sites: A case study of Ordu Province Mine Site. *Advanced UAV*, 2(2), 35–40.
- [30] Döş, M. E., Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Documenting historical monuments using smartphones: A case study of Fakih Dede Tomb, Konya. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 53–60. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1026039>



© Author(s) 2024.

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