

Kültürel Miras Alanlarında YLT ve İHA Tabanlı 3B Belgelenme Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Değerlendirilmesi

Ceyda Ulvi ^{1*}, Aşlı Deniz Adıgüzel ²

¹ Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 33090, Mersin, Türkiye; (ceydakaragz66@gmail.com)

² Bitlis Eren Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 13000, Bitlis, Türkiye; (adeniz4250@gmail.com)



*Sorumlu Yazar:
ceydakaragz66@gmail.com

Araştırma Makalesi

Alıntı: Ulvi, C. & Adıgüzel, A. D. (2025). Kültürel Miras Alanlarında YLT ve İHA Tabanlı 3B Belgelenme Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Değerlendirilmesi. *Türkiye LiDAR Dergisi*, 7(1), 15-23.

Geliş : 28.05.2025
Revize : 10.06.2025
Kabul : 13.06.2025
Yayınlama : 30.06.2025

Özet

Bu çalışmada, Mersin ili Mezitli ilçesinde yer alan Soli Pompeiopolis kazı alanının üç boyutlu belgelenmesine yönelik olarak Yersel Lazer Tarama (YLT) ve İnsansız Hava Aracı (İHA) fotogrametrisi yöntemleri karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Her iki yöntemle aynı çalışma alanı üzerinde veri toplanmış, elde edilen nokta bulutları konumsal doğruluk ve yüzey uyumu açısından analiz edilmiştir. Sahada toplam 16 Yer Kontrol Noktası (YKN) yerleştirilmiş; bunlardan 9'u denetleme noktası olarak değerlendirilmiştir. GNSS ile ölçülen bu noktalar aracılığıyla yapılan hata analizinde YLT verisinde RMSE 2.6 cm, İHA verisinde ise 6.2 cm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, iki yöntemle üretilen nokta bulutları CloudCompare yazılımında C2C (Cloud-to-Cloud) analizine tabi tutulmuş, YLT referanslı analizde maksimum fark 23.19 cm'ye ulaşırken İHA referanslı analizde bu değer 5.53 cm olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, YLT yönteminin detaylı modelleme ve yüksek doğruluk sağladığını; İHA fotogrametrisinin ise operasyonel hız ve geniş alan kapsama açısından avantaj sunduğunu göstermektedir. Her iki yöntemin birlikte kullanımı, kültürel miras alanlarında daha dengeli ve bütüncül bir belgelenme süreci için uygun bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yersel lazer tarama, İHA fotogrametrisi, nokta bulutu, kültürel miras, C2C analizi, 3B belgeleme.

Comparative Evaluation of YLT and UAV Based 3D Documentation Methods in Cultural Heritage Areas

*Corresponding Author:
ceydakaragz66@gmail.com

Research Article

Citation: Ulvi, C. & Adıgüzel, A. D. (2025). Comparative Evaluation of YLT and UAV Based 3D Documentation Methods in Cultural Heritage Areas. *Turkish Journal of LiDAR*, 7(1), 15-23 (in Turkish).

Received : 28.05.2025
Revised : 10.06.2025
Accepted : 13.06.2025
Published : 30.06.2025

Abstract

In this study, a comparative evaluation was conducted using Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry methods for the three-dimensional documentation of the Soli Pompeiopolis archaeological site, located in Mezitli district of Mersin, Türkiye. Spatial data were collected over the same area using both techniques, and the resulting point clouds were analyzed in terms of positional accuracy and surface consistency. A total of 16 Ground Control Points (GCPs) were placed in the field, 9 of which were used as independent checkpoints. Based on GNSS-derived reference coordinates, root mean square error (RMSE) values were calculated as 2.6 cm for TLS data and 6.2 cm for UAV data. Furthermore, point clouds were subjected to a Cloud-to-Cloud (C2C) comparison in CloudCompare software. The maximum surface deviation reached 23.19 cm when TLS data was used as the reference, while it was 5.53 cm when UAV data was taken as the reference. The results indicate that TLS provides higher geometric accuracy and detail, while UAV photogrammetry offers rapid data acquisition and broader coverage with acceptable accuracy. The combined use of both methods is recommended for achieving more balanced and comprehensive documentation of cultural heritage sites.

Keywords: Terrestrial laser scanning, UAV photogrammetry, point cloud, cultural heritage, C2C analysis, 3D documentation,

1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca toplumlar, yaşadıkları coğrafyaya iz bırakma arzusu taşıyarak çeşitli mimari ve sanatsal eserler üretmiş; bu eserler de geçmişin yaşam biçimleri, inanç sistemleri ve sosyal yapıları hakkında günümüz insanına önemli ipuçları sunmuştur. Zaman içerisinde bu eserler yalnızca birer yapı olmaktan çıkmış, ait oldukları medeniyetlerin kültürel temsili haline gelmiş ve korunmaları gereken ortak insanlık mirası olarak kabul edilmiştir. Antik kentler, anıt yapılar, ibadethaneler, nekropol alanları ve daha niceleri hem tarihsel hem de akademik değer taşıyan karmaşık yapılar olarak günümüzde çeşitli belgeleme çalışmalarıyla kayıt altına alınmaktadır.

Kültürel miras alanlarının belgelenmesi fikri, modern bir düşünce gibi görünse de temelleri oldukça eskiye dayanmaktadır (Ruther vd., 2009). İlk dönemlerde yapılan belgelenmeler, alanın krokisinin çıkarılması, önemli yapıların çizilmesi ve yazılı tanımlarla sınırlı kalmıştır. Arkeologlar ve araştırmacılar uzun yıllar boyunca basit ölçüm araçlarıyla kazı alanlarının planlarını oluşturmuş, yapıları elle çizilen eskizlerle betimlemiş ve fotoğrafla desteklemeye çalışmıştır. Bu yöntemler, dönemi açısından önemli katkılar sunsa da ölçümsel doğruluk, detay seviyesi ve üç boyutlu perspektif sunma açısından yetersiz kalmıştır. Özellikle karmaşık yapıya sahip arkeolojik alanlarda, bu tür yöntemlerin sınırlılıkları belgelenen mirasın gerçekliğini yansıtmakta önemli eksiklikler doğurmuştur.

Zamanla teknolojinin gelişimiyle birlikte, dijital ölçüm teknikleri kültürel miras alanlarına da entegre edilmeye başlanmıştır (Kabadayı, 2023a; Zeybek, 2021; Fidan & Fidan, 2021). Total station cihazları, GPS tabanlı ölçüm sistemleri ve daha sonra gelişen lazer tarayıcılar, mekânsal verinin hassas biçimde toplanmasına olanak sağlamıştır (Kabadayı & Erdoğan, 2022). Yersel Lazer Tarama (YLT) sistemleri, yüzeyin her noktasını üç boyutlu koordinatlarla ölçebilen yapısıyla bu dönüşümde öncü bir rol üstlenmiştir (Kabadayı, 2023b; Suchocki vd., 2020)). YLT ile elde edilen yoğun nokta bulutları sayesinde, yapıların geometrik karmaşıklıkları detaylı biçimde modellenebilmekte, yapının dijital ikizi üretilenmekte ve hasar analizlerinden restorasyon planlamasına kadar çok sayıda uygulama mümkün hale gelmektedir (Yiğit & Uysal, 2023).

Diğer yandan, son on yıl içinde İnsansız Hava Araçları (İHA) teknolojisinin sivil kullanıma açılması, özellikle geniş alanların belgelenmesinde yeni bir dönem başlatmıştır (Ulvi & Yiğit, 2019). Ayrıca çeşitli uygulamalarda daha iyi 3B haritalama için iki tür veri setinin geometrik birleştirilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Wu & Tang, 2015). Chiabrando vd. (2016), peyzaj ve mimari varlıklarda uygulanan TLS ve

İHA kombinasyonunun yararlılığını göstermiştir. Wu ve Tang (2015), iki tür veri kümesinin ilgili avantaj ve dezavantajlarına dayanarak, TLS ve İHA fotogrametrisinden elde edilen verilerin birleştirilmesinin, tek bir veri türü kullanılarak sağlanandan çeşitli uygulamalarda daha fazla potansiyel sağladığını öne sürmektedir.

İHA tabanlı fotogrametri, çok sayıda üstten görüntü alarak yüzeyin üç boyutlu modelini çıkarabilmekte; böylece hem geniş alanların belgelenmesi hem de topografyanın modellenmesi açısından etkin bir çözüm sunmaktadır (Akar, 2017). Bu yöntem, operasyon süresi, maliyet etkinliği ve erişilebilirlik gibi yönleriyle birçok kültürel miras sahasında tercih edilmektedir.

Ancak her iki yöntem – YLT ve İHA fotogrametrisi – birbirine karşı değil, aslında birbirini tamamlayan teknolojiler olarak değerlendirilmektedir. YLT detay düzeyinde hassasiyet sağlarken; İHA fotogrametrisi geniş alan kapsama ve operasyonel hız avantajı sunmaktadır (Yiğit & Ulvi, 2020). Her iki yöntemin de arkeolojik belgelenmede hangi koşullarda, hangi yapılar için, ne ölçüde uygun olduğu ise sahaya özgü uygulamalarla değerlendirilebilmektedir.

Bu bağlamda, Soli Pompeiopolis Antik Kenti, farklı dönemlere ait yapı kalıntılarını barındırması, karmaşık topografik yapısı ve kıyı yerleşimi özelliğiyle hem hassasiyet gerektiren dar alanların hem de geniş kapsamlı yüzeylerin belgelenmesine olan ihtiyacı bir arada sunmaktadır. Bu durum, belgeleme teknolojilerinin performanslarını karşılaştırmak açısından eşsiz bir örneklem alanı meydana getirmektedir. Antik kentin mevcut fiziksel durumu, zamanla tahribata uğrayan mimari öğeleri ve hâlen yürütülmekte olan kazı faaliyetleri, mekânsal verilerin düzenli, doğru ve karşılaştırılabilir biçimde üretilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışma, söz konusu sahada hem YLT hem de İHA fotogrametrisi yöntemleriyle veri toplanarak, iki yöntemin kazı alanı belgelenmesine uygunluklarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu çerçevede, her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları benzer koşullar altında işlenmiş ve CloudCompare yazılımı aracılığıyla sayısal analizlere (özellikle C2C – Cloud-to-Cloud metrikleri) tabi tutulmuştur. Böylece, yöntemler arasındaki farklılıklar yalnızca görsel veya niteliksel değil, aynı zamanda nicel ölçütler üzerinden de ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın özgün katkısı, iki farklı uzaktan algılama yönteminin aynı arkeolojik alan üzerinde eş zamanlı uygulanması ve bu verilerin doğrudan karşılaştırmalı analizine dayanmasıdır. Literatürde sıklıkla her yönteme ayrı ayrı odaklanan çalışmalar bulunmakla birlikte, aynı mekânsal referans sistemiyle ve aynı veri seti mantığıyla yapılan çift yönlü

değerlendirmeler oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, hem yöntemsel hem de uygulamalı bağlamda bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Bu doğrultuda, çalışmanın temel araştırma sorusu şudur: “Kazı alanlarının belgelenmesinde, YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri doğruluk, kapsam, pratiklik ve detay seviyesi açısından ne ölçüde farklılık göstermektedir ve bu farklılıklar hangi durumlarda belirleyici hale gelmektedir?”. Elde edilen bulgular, yalnızca Soli Pompeiopolis özelinde değil; benzer morfolojik ve arkeolojik özelliklere sahip kazı alanlarının belgelenmesinde de yöntem seçiminde yol gösterici olacak bilimsel çıkarımlar sunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada uygulama alanı olarak, Mersin ili Mezitli ilçesi sınırlarında yer alan Soli Pompeiopolis Antik Kenti seçilmiştir. Akdeniz kıyısında yer alan bu arkeolojik alan, tarihi M.Ö. 7. yüzyıla kadar uzanan ve Helenistik, Roma ile Bizans dönemlerine ait çok katmanlı kalıntılar barındıran önemli bir kültürel miras sahasıdır. Antik kent, özellikle Roma dönemine ait sütunlu caddeleri, hamam yapıları, mozaikleri ve mimari parçaları ile dikkat çekmektedir. Yapılan arkeolojik kazılar sayesinde, geçmiş dönemlere ait yapıların mekânsal organizasyonu, kentsel planlaması ve günlük yaşama dair ipuçları gün yüzüne çıkarılmıştır.

Soli Pompeiopolis kazı alanı, hem yerleşim dokusunun çeşitliliği hem de yüzey topografyasının karmaşıklığı açısından kültürel miras belgelenmesi için ideal bir örnek sunmaktadır. Antik kentin kıyı yerleşimi karakteri, günümüzde kıyı erozyonu, yapılaşma baskısı ve çevresel etkiler nedeniyle tehdit altında olup, alanın mevcut durumunun hassas biçimde belgelenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, farklı teknolojilerle gerçekleştirilecek belgelenme çalışmaları yalnızca bilimsel amaçlarla değil, aynı zamanda alanın korunması ve sürdürülebilir yönetimi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Çalışma alanının karmaşık mimari yapısı, açık ve yarı kapalı alanların bir arada bulunması, farklı kotlarda yapı elemanlarının yer alması gibi özellikler, hem YLT hem de İHA fotogrametrisi yöntemlerinin uygulanabilirliğini sınamak açısından uygun bir test ortamı sağlamaktadır. Bu bağlamda, Soli Pompeiopolis yalnızca arkeolojik niteliğiyle değil, aynı zamanda mekânsal veri üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilebileceği uygulamalı bir model alan niteliği taşımaktadır.

2.2. Veri Toplama Süreci

Bu çalışmada, kazı alanının belgelenmesi amacıyla hem Yersel Lazer Tarama (YLT) hem de İHA fotogrametrisi yöntemleri kullanılmıştır. Veri toplama süreci, her iki yöntemin karakteristik avantajlarını ve sınırlılıklarını dikkate alacak şekilde planlanmış ve uygulama sahasında aynı referans alanı kapsamında gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Yersel Lazer Tarama (YLT)

Yersel lazer tarama işlemleri için FARO Focus3D X330 model lazer tarayıcı kullanılmıştır. Bu cihaz, yüksek çözünürlükte ve uzun menzilde nokta bulutu elde etme yeteneği sayesinde kültürel miras alanlarının detaylı belgelenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Tarama işlemleri sırasında cihaz, farklı açılardan ve yüksekliklerden konumlandırılarak, yapılar arasındaki ölü alanların (gölge bölgelerin) en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Her bir tarama oturumu, yaklaşık 6 dakika sürmüş ve toplamda 14 tarama istasyonu kullanılarak veri elde edilmiştir.

Tarama istasyonları, yapılar arası örtüşmeyi sağlayacak biçimde yerleştirilmiş ve tüm veri seti daha sonra ortak koordinat sistemine getirilmek üzere hizalanmıştır. Tarama süreci boyunca yüksek yansıma özelliğine sahip hedef küreler kullanılarak oturumlar arası geometri bütünlüğü sağlanmıştır. Tarama sonuçları renkli (RGB) nokta bulutu olarak dışa aktarılmıştır.

Kullanılan YLT cihazına ait temel teknik bilgiler Tablo 1’de sunulmuş, cihaza ilişkin görsel ise Şekil 1 olarak verilmiştir.



Şekil 1. FARO Focus3D X330 yersel lazer tarayıcı.

Tablo 1. FARO Focus3D X330” teknik özellikleri.

Öznitelik	Değer
Lazer sınıfı	1
Ölçüm hızı	Saniyede 976,000 noktaya kadar
Mesafe	0.6-330m
Mesafe hatası	± 2mm
Multi-Sensör	GPS, Pusula Yükseklik Sensörü
Çift Eksenli Kompensatör	Var
Entegre renkli kamera	70 mio. piksele kadar
Boyut	240 x 200 x 100mm
Ağırlık	5,2 kg
Tarayıcı kumanda	Dokunmatik ekran

2.2.2. İHA Fotogrametrisi

Kazı alanının havadan belgelenmesi amacıyla, ticari sınıf hafif İHA sistemlerinden Anafi Parrot marka drone kullanılmıştır. Bu İHA, sabit odaklı kamera sistemi, yüksek çözünürlükte görüntü alma kapasitesi ve kullanıcı dostu kontrol ara yüzü sayesinde düşük irtifa fotogrametri uygulamaları için uygun bir platformdur. Uçuş planlaması, alanın genişliğine ve yapısal öğelerin dağılımına göre optimize edilmiş ve görüntülerin yüksek örtüşme oranı (%80 boyuna, %70 enine) sağlanacak şekilde düzenlenmiştir.

İHA uçuşları manuel ve yarı otonom kontrollü modda gerçekleştirilmiş, toplam 115 adet eğik ve düşey görüntü elde edilmiştir. Görüntüler .JPEG formatında, metadata bilgileriyle birlikte saklanmış ve daha sonra fotogrametrik iş akışta kullanılmak üzere değerlendirilmiştir. Yer kontrolü sağlamak amacıyla sahaya görsel olarak seçilebilir yer kontrol noktaları (YKN) yerleştirilmiş ve bu noktaların koordinatları Topcon Hiper SR (Konum belirleme hassasiyeti: RTK (L1 + L2) H: 10 mm + 1.0 ppm V: 15 mm + 1.0 ppm / Hızlı Statik (L1 + L2) H: 3 mm + 0.5 ppm V: 5 mm + 0.5 ppm) GNSS alıcısı ile ± 2 cm hassasiyetle ölçülmüştür. İHA platformuna ait temel teknik bilgiler Tablo 2’de, uçuş sırasında kullanılan İHA’nın görseli ise Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Anafi Parrot İHA.

Tablo 2. Anafi Parrot” teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Ağırlık	320 Gram
Maks. Hız (Tırmanış/İniş)	55 km/sa
Kamera & Video	21 MP & 4K
Maks. İrtifa	4500m
Uçuş Süresi	Yaklaşık 25 Dk
Pil Kapasitesi	2700 mAh
Navigasyon	GPS/GLONASS

2.3. Veri İşleme ve Nokta Bulutu Üretimi

YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleriyle elde edilen veriler, nokta bulutu üretimi ve karşılaştırmalı analiz sürecine dâhil edilmeden önce belirli işlem adımlarından geçirilmiştir. Her iki yöntemle oluşturulan veri setleri ayrı ayrı işlenmiş, ardından ortak koordinat sistemine getirilerek analiz edilebilir

hale getirilmiştir. Tüm veri işleme süreçleri, ilgili yazılımların standart iş akışları takip edilerek yürütülmüştür.

FARO Focus3D X330 cihazı ile elde edilen tarama oturumlarına ait veriler, FARO SCENE yazılımı kullanılarak işlenmiştir. İlk aşamada, her bir tarama istasyonu ayrı ayrı hizalanmış; daha sonra referans hedefler (saha içine yerleştirilen küresel reflektörler) yardımıyla tüm oturumlar tek bir birleşik veri setine dönüştürülmüştür. Oturumlar arası hizalama işlemi, otomatik hedef tanıma ve manuel düzeltme kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Hizalama sonrası, veri seti üzerinde yoğunlaştırılmış bir gürültü temizliği (noise filtering) süreci uygulanmıştır. Bu süreçte, tarayıcı menzili dışındaki veriler, yüzey dışında kalan serbest parçacıklar ve hatalı yansımalar temizlenmiştir. Ayrıca, gereksiz yoğunlukta veri içeren bölgeler yeniden örneklenerek daha homojen bir dağılım elde edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek çözünürlüklü, renkli ve eşlenmiş bir 3B nokta bulutu üretilmiştir.

Anafi Parrot İHA ile elde edilen görüntüler, Agisoft Metashape Professional yazılımında fotogrametrik işleme tabi tutulmuştur. İşlem süreci; görüntülerin hizalanması (image alignment), yoğun nokta bulutu üretimi (dense point cloud), yüzey modelleme (mesh generation) ve ortomozaik üretimi adımlarını içermektedir. Görüntü hizalaması, görüntüler arasındaki ortak nokta eşleşmelerine (tie points) dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve her bir görüntünün konumu optimize edilmiştir.

YKN fotogrametrik işleme entegre edilerek, modelin mutlak konum doğruluğu artırılmıştır. Ardından, oluşturulan yoğun nokta bulutu geometrik filtrelemeye tabi tutulmuş; çakışan, bulanık veya kenar bölgelerdeki hatalı noktalar elenmiştir. Böylece, kazı alanını kapsayan detaylı bir üstten görünüm tabanlı 3B veri seti oluşturulmuştur.

Her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları, karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi için .LAS formatında dışa aktarılmış ve ortak bir koordinat sistemine (UTM 36N, WGS84) dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sayesinde veri setleri doğrudan üst üste bindirilebilir hale gelmiş ve eş zamanlı analiz için uygun bir yapı elde edilmiştir.

Veri işleme süreci sonunda, her iki yöntemle üretilen nokta bulutları karşılaştırmalı analiz için hazır hale getirilmiş ve CloudCompare yazılımına aktarılmıştır.

2.4. Karşılaştırmalı Analiz

Kazı alanının belgelenmesine yönelik olarak kullanılan YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemlerinin doğruluk ve uyum düzeylerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla iki aşamalı analiz süreci yürütülmüştür. Bu

süreçte hem yer kontrol/denetleme noktaları üzerinden konumsal hata analizi gerçekleştirilmiş hem de elde edilen nokta bulutları, C2C (Cloud-to-Cloud) yöntemi ile 3B olarak karşılaştırılmıştır.

2.4.1. Konumsal Doğruluk Analizi (YKN ve GNSS Karşılaştırması)

Çalışma alanında toplam 16 adet YKN oluşturulmuştur. Bu noktalar, hem YLT hem de İHA fotogrametrisi süreçlerinde kullanılmak üzere farklı alanlara dengeli şekilde dağıtılmıştır. Bu noktalardan 7 tanesi model oluşturma aşamasında dengeleme (ağ ayarı) için kontrol noktası olarak, geri kalan 9 tanesi ise modelin doğruluk değerlendirmesi amacıyla bağımsız denetleme noktası olarak kullanılmıştır.

Tüm YKN koordinatları, RTK destekli GNSS alıcısı ile ± 2 cm yatay ve düşey hassasiyetle ölçülmüştür. GNSS ile ölçülen koordinatlar, hem YLT nokta bulutları hem de İHA ile oluşturulan ortofoto ve 3B modellerde eşlenen konumlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, her iki yöntem için ayrı olmak üzere, denetleme noktalarındaki farklar Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error/RMSE), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error/MAE) ve maksimum hata cinsinden hesaplanmıştır.

Bu analiz, YLT ve İHA fotogrametri yöntemlerinin mutlak konum doğruluğu bakımından ne ölçüde hassas sonuçlar verdiğini ortaya koymakta ve yöntemler arasında konum tabanlı bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır.

2.4.2. Nokta Bulutu Uyumu: C2C (Cloud-to-Cloud) Analizi

İkinci karşılaştırmalı analiz, iki farklı yöntemle elde edilen nokta bulutlarının üç boyutlu uzayda birbirine olan geometrik uyumunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için CloudCompare açık kaynaklı yazılımı kullanılmış ve yöntem olarak C2C (Cloud-to-Cloud) mesafe ölçümü tercih edilmiştir.

C2C analizinde, referans veri seti olarak YLT nokta bulutu, karşılaştırma veri seti olarak ise İHA fotogrametrisiyle üretilen nokta bulutu tanımlanmıştır. Her bir nokta, karşı bulut üzerinde en yakın komşusuyla eşleştirilmiş ve aralarındaki öklidyen mesafe hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen mesafeler, renk skalası ile görselleştirilmiş ve alanın genelinde farklılıkların dağılımı analiz edilmiştir.

C2C analizi sonucunda, minimum-maksimum sapma değerleri ile birlikte ortalama fark ve standart sapma gibi istatistiksel parametreler hesaplanarak yöntemler arası farklar sayısal olarak ortaya konmuştur. Özellikle karmaşık geometriye sahip

bölgelerde İHA fotogrametrisinin yüzey sapmaları daha yüksek çıkarken, geniş ve açık alanlarda daha homojen uyum gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu iki aşamalı analiz, hem konumsal doğruluk hem de yüzey uyumu açısından yöntemlerin performansını bütüncül biçimde ortaya koymakta ve kazı alanı gibi hassas bölgelerde hangi yöntemin hangi bağlamda avantaj sağladığını teknik olarak değerlendirme olanağı sunmaktadır.

3. Bulgular

Bu çalışmada, Soli Pompeiopolis kazı alanının belgelenmesine yönelik olarak YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri kullanılmış; her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları nicel ve nitel açıdan karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ve Şekil 4, sırasıyla YLT ve İHA fotogrametrisi kullanılarak oluşturulan nokta bulutlarını göstermektedir.

Saha uygulamaları sırasında YLT yöntemiyle toplam 14 tarama oturumu gerçekleştirilmiş ve her bir tarama yaklaşık 6 dakika sürmüştür. Taramalar sırasında tripod üzerinde sabitlenen cihaz farklı açılardan yerleştirilerek yapılar arasındaki ölü alanların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu sürecin sonunda, yaklaşık 46 milyon noktadan oluşan yüksek yoğunluklu bir 3B nokta bulutu elde edilmiştir. Verilerin SCENE yazılımında hizalanması, gürültü temizliği ve dışa aktarımı ile birlikte toplam işlem süresi yaklaşık 4.5 saat olarak gerçekleşmiştir.

Öte yandan, İHA fotogrametrisi kapsamında Anafi Parrot marka drone ile toplam 115 görüntü elde edilmiştir. Uçuşlar manuel modda gerçekleştirilmiş ve toplam uçuş süresi yaklaşık 18 dakika sürmüştür. Görüntüler Agisoft Metashape yazılımında işlenmiş ve yaklaşık 18 milyon noktadan oluşan yoğun nokta bulutu elde edilmiştir. Fotogrametrik işlem (görüntü hizalama, nokta bulutu üretimi ve temizliği) süreci yaklaşık 2.5 saat sürmüştür.

Tablo 3'te, her iki yöntemin uygulama süreci, veri büyüklüğü ve işlem sürelerine ilişkin özet karşılaştırmalar sunulmuştur.

Tablo 3. YLT ve İHA fotogrametrisi genel sonuçlar

Özellik	YLT (Yersel Lazer Tarama)	İHA Fotogrametrisi
Tarama / Görüntü Sayısı	14 tarama oturumu	115 görüntü
Uygulama Süresi (saha)	≈ 84 dakika (toplam)	≈ 18 dakika (uçuş)
Nokta Sayısı	≈ 46 milyon	≈ 18 milyon
Ortalama Nokta Yoğunluğu (yaklaşık)	2.4 milyon nokta/m ²	900 bin nokta/m ²
İşleme Süresi (masaüstü)	≈ 4.5 saat	≈ 2.5 saat
Veri Boyutu (.LAS)	3.7 GB	1.8 GB

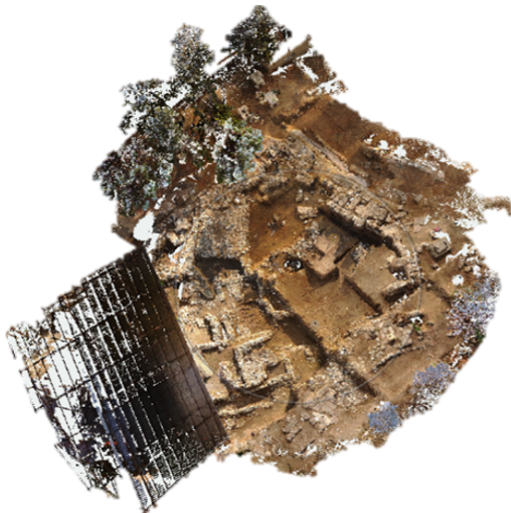
Her iki yöntemle elde edilen nokta bulutları incelendiğinde, YLT yöntemi daha yoğun ve detaylı veri üretimi sağlamış; özellikle yapı köşe noktaları, duvar kesitleri ve düşey geometrilere yüksek doğruluk elde edilmiştir. Ancak cihazın sabitlenme gerekliliği, dar alanlarda pozisyon alma zorluğu ve zaman maliyeti bu yöntemin sınırlayıcı yönleri olarak öne çıkmıştır.

İHA yöntemi ise geniş alan kapsama, operasyonel hız ve maliyet etkinliği açısından avantaj sunmuştur. Açık alanlarda ve yatay yüzeylerde detaylı modeller üretilebilmiş; ancak yapılar arası boşluklar, dikey yüzeyler ve üst örtü altındaki alanlarda veri kayıpları gözlenmiştir. Ayrıca, fotogrametrik modelleme güneş açısı, rüzgâr, görüntü bulanıklığı gibi dışsal faktörlerden daha fazla etkilenmiştir.

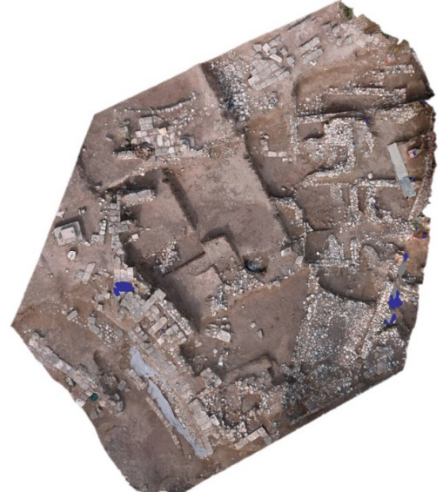
Bu karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda elde edilen genel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- YLT yöntemi, yüksek detay çözünürlüğü ve konum doğruluğu sağlamış ancak saha uygulaması açısından daha fazla zaman ve efor gerektirmiştir.
- İHA yöntemi daha hızlı veri üretimi sağlamış; ancak model kalitesi, özellikle karmaşık geometri ve düşey elemanlı bölgelerde YLT'ye göre daha düşük düzeyde kalmıştır.
- Nokta yoğunluğu bakımından YLT, İHA'ya kıyasla yaklaşık 2,5 kat daha fazla veri üretmiştir.
- İki yöntem birlikte değerlendirildiğinde, birbirini tamamlayıcı bir yapı oluşturduğu ve hibrit kullanımın kültürel miras belgelenmesinde yüksek potansiyel taşıdığı görülmüştür.

Aşağıdaki bölümlerde, bu genel bulgular doğrultusunda yapılan konumsal doğruluk ve C2C temelli 3B uyum analizine ilişkin ayrıntılı sayısal değerlendirmeler sunulacaktır.



Şekil 3. YLT verileri kullanılarak Scene yazılımında elde edilen nokta bulutu.



Şekil 4. İHA görüntüleri kullanılarak Agisoft Metashape yazılımında elde edilen nokta bulutu.

3.1. Konumsal Doğruluk Analizi

Kazı alanında uygulanan her iki yöntemin konumsal doğruluğunu belirlemek amacıyla, toplam 16 adet Yer Kontrol Noktası (YKN) sahaya yerleştirilmiş ve bu noktaların koordinatları GNSS (RTK destekli) sistem kullanılarak ± 2 cm yatay ve düşey hassasiyetle ölçülmüştür. Bu 16 noktadan 7 tanesi model üretiminde dengeleme (ağ ayarı) için kontrol noktası olarak, 9 tanesi ise dış doğrulama amacıyla denetleme noktası olarak değerlendirilmiştir.

Üretilen modeller üzerinde, denetleme noktalarının konumları belirlenmiş ve bu koordinatlar ile GNSS ölçümleri karşılaştırılarak her iki yöntem için konumsal hata değerleri hesaplanmıştır. Değerlendirme metriği olarak MAE, RMSE ve maksimum hata değeri dikkate alınmıştır.

Her iki yönteme ait denetleme noktası doğruluk analizine ilişkin özet Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. YLT ve İHA fotogrametrisi için konum hataları.

Yöntem	MAE (cm)	RMSE (cm)	Maks. Hata (cm)
YLT	1.9	2.6	4.1
İHA	4.7	6.2	10.5
Fotogrametrisi			

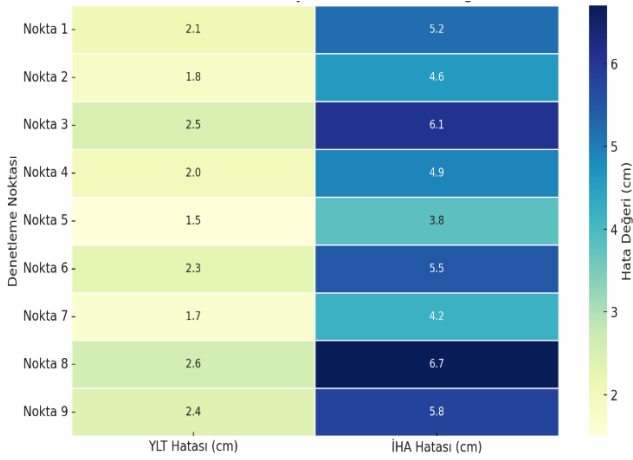
Analiz sonuçları incelendiğinde:

- YLT yöntemi, konumsal doğruluk açısından daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Ortalama sapma 2 cm'nin altında kalmış ve maksimum hata değeri 5 cm'yi geçmemiştir.
- İHA fotogrametrisi, YLT'ye kıyasla daha yüksek hata değerlerine sahiptir. Bu durum, görüntülerin düşey yönlü perspektif sınırlamaları, yer kontrol noktalarının belirginlik düzeyi ve model optimizasyonu gibi etkenlerden kaynaklanmış olabilir.

- İHA yöntemi ile elde edilen modeldeki doğruluk düzeyi, özellikle genel alan haritalama gibi uygulamalar için yeterli olsa da hassas mimari detay modellemelerinde sınırlayıcı olabilmektedir.

Bu sonuçlar, YLT yönteminin detay geometriler ve hassas ölçüm gerektiren kültürel miras belgelenmelerinde üstünlük sağladığını; İHA yönteminin ise geniş alanların hızlı belgelenmesinde etkin ancak sınırlı doğruluk sunduğunu ortaya koymaktadır.

Konumsal doğruluk analizine ilişkin detaylı bulgular Şekil 4'de sunulmaktadır. Bu ısı haritası, her bir denetleme noktasında YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri ile elde edilen konumsal hata değerlerini görselleştirmektedir. Görselde de açıkça görüldüğü üzere, tüm denetleme noktalarında YLT yöntemi daha düşük hata değerleri üretmiş, bu durum özellikle mimari detayların bulunduğu bölgelerde belirginleşmiştir. İHA yöntemi ise özellikle bazı noktalarda daha yüksek sapmalar göstermiştir. Bu farkın temel nedenleri arasında, görüntüleme açısındaki sınırlılıklar, kontrol noktalarının fotogrametrik eşleştirme sürecindeki görünürlüğü ve modelleme optimizasyonundaki varyasyonlar sayılabilir.



Şekil 5. Denetleme noktaları için konumsal hata dağılımını gösteren ısı haritası.

Ancak konumsal doğruluk analizi yalnızca belirli sayıda nokta üzerinden yapılan bir değerlendirme sunduğu için, tüm alanın üç boyutlu bütünlüğünü değerlendirmede yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, her iki yöntemle üretilen nokta bulutlarının tamamı üzerinden yapılan bir karşılaştırma daha bütüncül bir bakış sunacaktır. Bu kapsamda, bir sonraki adımda C2C (Cloud-to-Cloud) Analizi gerçekleştirilmiş ve nokta bulutları arasında yüzey temelli farklar sayısal olarak değerlendirilmiştir.

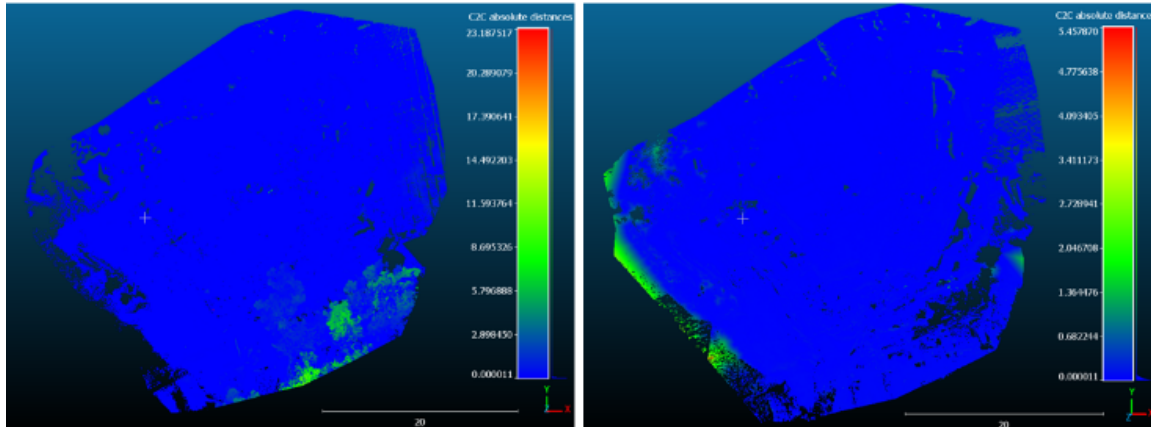
3.2. C2C Analizi Bulguları

YLT ve İHA fotogrametrisi ile elde edilen nokta bulutlarının üç boyutlu düzlemde ne derece örtüştüğünü değerlendirmek amacıyla C2C (Cloud-to-Cloud) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, her bir noktanın karşı veri setindeki en yakın nokta ile olan öklidyen mesafesi hesaplanmış ve farklar renk skalası ile görselleştirilmiştir.

Şekil 6'da, sol tarafta YLT nokta bulutunun referans kabul edildiği, sağ tarafta ise İHA nokta bulutunun referans olarak kullanıldığı iki farklı C2C analiz görseli sunulmaktadır. Her iki analizde de, karşılaştırılan veri seti ile referans veri seti arasındaki yüzey farklılıkları, minimumdan maksimuma değişen renk skalasıyla ifade edilmiştir.

Şekil 6'da mavi tonlar düşük farkları, yeşil-sarı-kırmızı tonlar ise artan sapmaları göstermektedir. Sol görselde (YLT referans), maksimum sapma 23.19 cm olarak ölçülmüş ve bu farklar daha çok eğimli yüzeylerde ve yapılar arası bağlantı noktalarında yoğunlaşmıştır. Sağ görselde (İHA referans), maksimum sapma değeri 5.53 cm olup daha homojen bir dağılım gözlemlenmiştir. Bu durum, YLT verisinin genel olarak daha yoğun ve detaylı olması nedeniyle, İHA bulutunun daha düşük çözünürlükte kalan bölgelerle karşılaştırıldığında yüksek sapmalar üretmesinden kaynaklanmaktadır.

Her iki analiz sonucunda genel hata istatistikleri Tablo 5'teki gibi özetlenmiştir:



Şekil 6. YLT verisi referans kabul edilmiş (sol) ve İHA verisi referans kabul edilmiş (sağ) C2C analizi

Tablo 5. YLT ve İHA fotogrametrisi için C2C analizi sonuçları

Referans Veri	Ortalama Sapma (cm)	Std. Sapma (cm)	Maksimum Sapma (cm)
YLT	2.97	3.46	23.19
İHA	1.84	1.63	5.53

Tablo 5'e göre YLT verisinin detay seviyesi daha yüksek olduğu için İHA verisindeki eksiklikler özellikle detay bölgelerde büyük farklar oluşturmuştur.

İHA nokta bulutunun referans alındığı analizde ise farklar daha sınırlı kalmıştır; bu durum, daha düşük çözünürlükteki modelin karşılaştırıldığı detaylı modele göre daha az "hassaslıkla" fark algılamasından kaynaklanmaktadır.

Nokta yoğunluğu ve yüzey karmaşıklığı arttıkça C2C mesafelerinin büyüdüğü gözlemlenmiş; bu da özellikle dar yapı boşlukları, duvar tabanları ve gölge bölgelerde daha belirgin hale gelmiştir.

Sonuç olarak, C2C analizi iki yöntem arasında 3B yüzey uyumu açısından belirgin farklar olduğunu ortaya koymuştur. YLT, detaylı modelleme açısından daha uygun görünürken, İHA yöntemi hızlı veri üretimi ve alan genelinde homojen kapsama sağlamada etkili olmuştur.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, Soli Pompeiopolis kazı alanı özelinde YLT ve İHA fotogrametrisi yöntemleri kullanılarak elde edilen 3B nokta bulutları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her iki yöntem, kültürel miras belgelenmesi açısından güçlü yönler sunmakla birlikte, çalışma sahasının fiziksel özelliklerine ve belgeleme hedeflerine bağlı olarak çeşitli avantajlar ve sınırlılıklar göstermiştir.

YLT yöntemi, özellikle yapı detaylarının yoğun olduğu bölgelerde yüksek konumsal doğruluk ve nokta yoğunluğu sağlamış; duvar köşeleri, geçitler ve düşey yüzeylerde daha hassas sonuçlar üretmiştir. Denetleme noktalarına dayalı hata analizinde RMSE değeri 2.6 cm olarak hesaplanmış; tüm denetleme noktalarında hata değeri 5 cm'nin altında kalmıştır. Ancak saha uygulamasında cihaz kurulum zorlukları, dar alan erişimi ve işlem süresi gibi faktörler uygulama verimliliğini sınırlamıştır.

İHA fotogrametrisi ise kısa sürede geniş alanları kapsayarak zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamıştır. Ancak modelin düşey detayları algılamadaki sınırlılığı ve kontrol noktası görünürlüğüne bağlı doğruluk sapmaları dikkat çekmiştir. RMSE değeri 6.2 cm olarak hesaplanmış, bazı noktalarda 10 cm'ye kadar hata oluşmuştur.

Ayrıca, üst örtüler altındaki bölgelerde veri kaybı meydana gelmiştir.

C2C analizi, YLT'nin detay seviyesinin yüksekliğine bağlı olarak İHA verisiyle olan yüzey uyumunun düşük olduğunu göstermiştir. YLT referans alındığında maksimum fark 23.19 cm'ye kadar ulaşırken; İHA referanslı analizde bu fark 5.53 cm ile sınırlı kalmıştır. Bu farklar, iki yöntemin veri yoğunluğu ve yüzey çözünürlüğü farklarından kaynaklanmaktadır.

Çalışmanın Sınırlılıkları olarak: Zemin gerçekliği için referans model olarak yalnızca GNSS verisi kullanılmış, yerel koordinat sistemine dayalı total station veya fotogrametrik kalibrasyon yapılmamıştır. Ayrıca mevsimsel ve iklimsel etkiler yani güneşin geliş açısı, rüzgar vb. etkiler çalışmayı sınırlayan etkilere sahiptir. YLT taramalarında bazı kapalı alanlara tripod yerleştirilememesi nedeniyle ölü bölgeler oluşmuş, bu alanlar analiz dışı bırakılmıştır. İHA görüntüleme sırasında rüzgâr ve ışık değişimi bazı görsellerde kalite düşüşüne neden olmuştur. Analiz yalnızca bir alana ait ve tek seferlik veriyle gerçekleştirilmiş, zaman serisi analiz içermemektedir.

Sonuç olarak: YLT, detay ve doğruluk öncelikli belgeleme ihtiyaçları için uygun bir yöntemdir. İHA fotogrametrisi, geniş alanların hızlı belgelenmesi ve ilk envanter oluşturma gibi durumlarda avantajlıdır. Her iki yöntem birlikte hibrit biçimde kullanıldığında, eksik ve güçlü yönler dengelenmekte, daha kapsamlı ve dengeli bir 3B model elde edilmektedir.

Bu çalışma, kültürel miras alanlarında kullanılabilecek veri toplama teknolojilerinin hem doğruluk hem de pratiklik açısından nesnel kriterlerle değerlendirilmesini sağlamış, yöntem seçiminin belgelenen alanın fiziksel özellikleri ve proje hedefleri doğrultusunda yapılması gerektiğini ortaya koymuştur.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma kapsamında veri toplama faaliyetleri için gerekli izinler, Kültür ve Turizm Bakanlığı'na bağlı olarak yürütülen Soli Pompeiopolis Kazı Başkanlığı tarafından sağlanmıştır. Kazı alanında gerçekleştirilen ölçüm ve belgeleme çalışmalarına verdikleri destekten dolayı kazı başkanı ve ekibine teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Ceyda Ulvi: Yazılım, Saha Çalışması, Metodoloji, Modelleme, Yazım;

Aslı Deniz Adıgüzel: Metodoloji, Uygulama, Kontrol, Analiz, Yazım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışma da herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akar, A. (2017). Evaluation of accuracy of DEMs obtained from UAV-point clouds for different topographical areas. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), 110–117. <https://doi.org/10.26833/ijeg.329717>
- Chiabrand, F., Di Pietra, V., Lingua, A., Maschio, P., Noardo, F., Sammartano, G., & Spanò, A. (2016). TLS models generation assisted by UAV survey. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5*, 413–420. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-413-2016>
- Fidan, D., & Fidan, Ş. (2021). Yersel lazer tarama teknolojileriyle oluşturulan 3B modellerin akıllı kent uygulamalarında kullanımı: Mersin Süslü Çeşme örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 48–57. <https://doi.org/10.51946/melid.1021819>
- Kabadayı, A. (2023a). Kültürel mirasın dijital arşivlenmesi: Emirci Sultan Türbesi ve Camii örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(2), 82–88. <https://doi.org/10.53030/tufod.1401899>
- Kabadayı, A. (2023b). Yersel lazer tarama yöntemi ile rölöve ve restitüsyon projelerinin hazırlanması; Akşehir Kale Kalıntısı örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(1), 17–25. <https://doi.org/10.51946/melid.1296772>
- Kabadayı, A., & Erdoğan, A. (2022). Application of terrestrial photogrammetry method in cultural heritage studies: A case study of Seyfeddin Karasungur. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 62–67. <https://doi.org/10.53093/mephøj.1200146>
- Ruther, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., Walker, S. J., Matmon, A., & Horwitz, L. K. (2009). Laser scanning for conservation research of African cultural heritage sites: The case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1847–1856. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.04.012>
- Suchocki, C., Damięcka-Suchocka, M., Katzer, J., Janicka, J., Rapiński, J., & Stałowska, P. (2020). Remote detection of moisture and bio-deterioration of building walls by time-of-flight and phase-shift terrestrial laser scanners. *Remote Sensing*, 12(11), 1708. <https://doi.org/10.3390/rs12111708>
- Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2019). Kültürel mirasın dijital dokümantasyonu: Taşkent Sultan Çeşmesi'nin fotogrametrik teknikler kullanarak 3B modelinin yapılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 1–6.
- Wu, B., & Tang, S. (2015). Review of geometric fusion of remote sensing imagery and laser scanning data. *International Journal of Image and Data Fusion*, 6(2), 97–114. <https://doi.org/10.1080/19479832.2015.1024175>
- Yiğit, A. Y., & Ulvi, A. (2020). İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 46–54.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikiz oluşturmada nokta bulutlarına dayalı analiz. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 318–329. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1200941>
- Zeybek, M. (2021). Extraction of road lane markings from mobile LiDAR data. *Transportation Research Record*, 2675(5), 30–47. <https://doi.org/10.1177/0361198120981948>



© Author(s) 2025.

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