



*Araştırma Makalesi - Research Article*

# Dijital İkiz Oluşturmada Nokta Bulutlarına Dayalı Analiz

## Point Cloud-Based Analysis in Digital Twinning

Abdurahman Yasin Yiğit<sup>1\*</sup>, Murat Uysal<sup>2</sup>

*Geliş / Received: 08/11/2022*

*Revize / Revised: 02/02/2023*

*Kabul / Accepted: 14/03/2023*

### ÖZ

Teknolojinin gelişimi ile gerçek dünyadaki nesnelere sanal ortama aktarılmaya başlanarak hedef nesneye ait tüm veri akışları ve süreçleri yönetme ihtiyacı daha kolay sağlanmış olmaktadır. Dijital ikizlerin en önemli özelliği, gerçek dünyayı olabildiğince doğru ve güncel yansıtmasıdır. LiDAR ve fotogrametri yöntemi kullanımı, fiziksel ortamların üç boyutlu nokta bulutlarının oluşturulmasında oldukça popüler hale gelmiştir. Dijital ikizler, gerçek dünyayı detaylı bir şekilde temsil edebilmesinin yanı sıra en faydalı özelliklerinden biri de nokta bulutlarının doğrudan kullanıma uygun olmasıdır. Bu sayede, fazla işlem adımıyla gerek kalmadan doğrudan bir dijital ikiz için üç boyutlu geometrik model olarak nokta bulutları kullanılabilir. Üç boyutlu geometrik modeli güncellemek için değişen alanların yeniden taranması ve ardından değişimin içindeki bu nesnelere bir nokta bulutunu sağlayan değişiklik algılama operasyonlarının yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada dijital ikiz üretiminde nokta bulutlarının önemi ve doğrudan kullanımı irdelenmiş olup bu amaç doğrultusunda üç adet geometrik yapısı düzgün olmayan ve karmaşık yapıya sahip heykeller üzerinde fotogrametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler neticesinde özellikle derinlik algısının zor olduğu kısımlarda modellerin eksik olduğu gözlemlenmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Sonuç olarak dijital ikizi oluşturmak ve güncellemek için hızlı ve düşük maliyetli veri toplama SfM tabanlı fotogrametrik yazılımlar aracılığıyla üretilen nokta bulutları büyük avantaj sağladığı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler- Dijital İkiz, Nokta Bulutu, Fotogrametri, SfM**

### ABSTRACT

With the development of technology, objects in the real world are transferred to the virtual environment, making it easier to manage all data flows and processes of the target object. The most important feature of digital twins is that they reflect the real world as accurately and up-to-date as possible. The use of LiDAR and photogrammetry has become very popular in the creation of three-dimensional point clouds of physical environments. Besides being able to represent the real world in detail, one of the most useful features of digital twins is that point clouds are suitable for direct use. In this way, point clouds can be used directly as a three-dimensional geometric model for a digital twin without the need for many processing steps. To update the three-dimensional geometric model, it is necessary to rescan the changed areas, and then perform change detection operations that provide a point cloud of these objects within the change. In this study, the importance and direct use of point clouds in the production of digital twins were examined, and for this purpose, photogrammetric studies were carried out on three sculptures with irregular geometrical structures and complex structures. As a result of the data obtained in the study, it was

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [ayasinyigit@mersin.edu.tr](mailto:ayasinyigit@mersin.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-9407-8022>)

Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mersin, Türkiye

<sup>2</sup>İletişim: [muysal007@gmail.com](mailto:muysal007@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0001-5202-4387>)

Harita Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Afyonkarahisar, Türkiye

observed that the models were missing, especially in the parts where depth perception is difficult, and suggestions were made. As a result, it has been found that point clouds produced by SfM-based photogrammetric software provide a great advantage in fast and low-cost data collection to create and update the digital twin.

**Keywords- Digital Twin, Point Cloud, Photogrammetry, SfM**

## I. GİRİŞ

Nokta bulutu verilerine dayalı bir dijital ikiz oluştururken ve güncellenirken birden fazla sorun ve buna karşılık gelen zorluklar tanımlanabilir. İlk sorun, dijital ikizi oluşturulmak istenen nesne veya ortama ait başlangıç durumunda yatmaktadır [1, 2]. Dijital ikizin bir noktada yaratılması gerektiğinden; Üç Boyutlu (3B) gösterim, belirli bir zaman noktasındaki fiziksel ortamın durumunu taklit etmektedir. Bu durum, 3B gösterimin ve dolayısıyla dijital ikizin yalnızca gerçekliğin bir anlık görüntüsünü yansıttığı anlamına gelirken dijital ikizin kullanım amacına bağlı olarak başlangıç durumuna, ne zaman ve nereden başlayacağına ilişkin seçimler yapılması gerekmektedir [3-5]. Dijital ikizin oluşturulacağı nesne veya ortamın zorluğu, mümkün olduğu kadar eksiksiz ve gelecekteki değişikliklere ve güncellemelere izin veren ve dijital ikizin işlevsel gereksinimlerini karşılayan bir 3B gösterim elde etmekte yatmaktadır [6, 7]. Dijital ikiz oluşturmada hangi nesnelerin başlangıçta dâhil edileceği ve hangilerinin hariç tutulacağı konusunda seçimler yapılması gerekmektedir. Tüm bu zorluklar, en uygun başlangıç durumunu sağlamak için verilerin nasıl toplandığı ve işlendiği konusunda seçenekler gerektirir [8-10].

İkinci sorun, fiziksel ortamdaki değişikliklerin saptanma biçiminde ve bu değişikliklerin dijital ikize nasıl uygulandığında yatmaktadır. Araştırılması ve analizi yapılan nesne veya ortamın dijital ikizi yapıldıktan sonra bir şekilde fiziksel olarak ilk değişiklikler meydana geldikten sonra zaten modası geçmiş olduğundan bu değişiklikleri tespit etmek ve bunları dijital ikize uygulamak gerekir. Bu durumda zorluk, değişiklik tespitinin verimliliği ve kalitesi arasında en uygun dengeyi bulmakta yatmaktadır. Değişikliklerin çoğunlukla bir sürecin parçası olduğu için bir değişikliğin hangi noktada nihai olarak kabul edildiği dikkate alınırken değişiklik tespitinin verimliliği ve kalitesi arasındaki optimal dengenin bulunmasına ilişkin seçimlerin yapılması gerekmektedir [7-11]. Ek olarak değişikliklerin tanınması, saptanması ve doğrulanması gerekir. Buradaki zorluk ise, bu süreçlerden geçmek için yeterli olsa da en verimli yöntemleri bulmakta yatmaktadır.

Üçüncü sorun, dijital ikizin geometrik modelinin güncellenmesi ve güncel tutulmasıdır [10]. Gerçek dünyadaki değişikliklerin dijital ikize güncellenmeden önce tanınması, saptanması ve doğrulanması gerekmektedir. Gerçek dünyanın dijital bir temsiline sahip olmak, onu mevcut ve gelecekteki gelişmelerle güncel tutmak, fayda değerinin artırılabilceği yer olarak karşımıza çıkmaktadır [10-15]. Değişimi tespit etmek ve bu değişiklikleri güncellemek dinamik ve devam eden bir süreç olmalıdır. Zorluk, değişiklikleri doğru bir şekilde belirlemek ve taramaktır. Ardından dijital ikizin değişikliklere göre uygun şekilde ayarlanması gerekmekte olup ayrıca, verilerin saklanması ve önceki durumların belgelenmesi ile ilgili seçimlerin yapılması gerekmektedir [16, 17].

Dijital ikiz oluşturmada en önemli kavram elde edilen sanal objenin gerçekliği ne kadar iyi temsil ettiği ve güncellenebilir olmasıdır. Çalışmanın nihai amacı nokta bulutu verilerinin bir dijital ikizi temsil etmek ve sürdürmek için doğrudan ne ölçüde kullanılabileceği ve bu süreçlerle ilgili pratik çıkarımlar hakkında bilgi edinmek olacaktır. Daha spesifik olarak, amaç hem ulusal hem de uluslararası düzeyde devam eden gelişmeleri dikkate alırken karakteristik dijital ikizlerle ilgili mevcut durumun anlaşılmasını sağlamaktır. Çalışmada dijital ikiz oluşturmada fotogrametrik nokta bulutu verileri araştırılmıştır. Kodde (2016), fotogrametri tekniğinin hem donanım hem de algoritmalarındaki ilerlemeler ve yeni gelişmeler nedeniyle temelde aynı nesnenin veya alanın farklı perspektiflerden görüntüleri oluşturularak 3 boyutlu geometrinin elde edildiği görüntü eşleştirme yöntemlerine dayandığının ve son teknolojik gelişmeler ve yazılımların gelişmesi ile dijital ikiz oluşturmada kullanılabileceğini aktarmıştır [49].

Remondino vd. (2014), çalışmalarında dijital ikiz oluşturmada lazer tarama ve fotogrametri teknikleri kullanarak nokta bulutu verilerinin elde edilmesinin giderek yaygınlaşan yöntem olduğunu aktarmışlardır. Sonuç olarak çalışmalarında, fiziksel bir 3B ortamın nokta bulutu verilerinin toplanması daha erişilebilir hale geldiğinin ve lazer tarama tekniklerinin 3B veri yakalama için baskın teknoloji haline gelmesini aktarmışlar ve fotogrametri tekniğinin lazer tarama tekniğine alternatif olabileceğinden bahsetmişlerdir [50]. Wang vd., (2015) pek çok amaç için bir şehrin nispeten basit, düşük kaliteli bir 3B temsili, istenen işlevlerin elde edilmesi için yeterli olacağını söylemişlerdir. Bununla birlikte, 3B modelleme ve görselleştirme tekniklerindeki gelişmeler ile 3B veri toplamanın; ayrıntılı, yüksek çözünürlüklü bir 3B şehir temsili oluşturmanın zaman ve maliyet yönlerini önemli ölçüde azalttığından bahsetmişlerdir. Veri toplama tekniklerin çeşitli veri türlerine dayanabilir olduğundan fakat bunlardan nokta bulutu verilerinin, ortamı olduğu gibi 3B olarak temsil etmek için giderek daha fazla kullanıldığını aktarmışlardır [38]. Discher vd. (2019), nokta bulutunu oluşturmanın dijital ikiz temsiline çok gerçekçi bir sunum

sağladığını dile getirmiştir [51]. Zhang vd. (2021), nokta bulutu verilerinin genellikle daha fazla ayrıntı sağladıklarından dolayı raster veya vektör veri türlerine kıyasla birçok faydalı özelliğine sahip olduğunu söylemişlerdir. Yüksek nokta yoğunluğu; hassas, doğru ve yüksek kaliteli analizlere olanak tanıyacağını ve ayrıca, belirli noktaların hızlı seçilmesine ve görselleştirilmesine izin vereceğini ve farklı ayrıntı seviyelerinde iyi organize edilebileceğinden dijital temsil için nokta bulutu verilerinin önemini aktarmışlardır [46].

Sorun bildiriminde ele alındığı gibi, çeşitli sorunlar ve zorluklar tanımlanabilir. Sonuç olarak, bu araştırmanın amaçları bu zorluklardan yola çıkacaktır. Birinci amaç, fiziksel ortamın eksiksiz ve ayrıntılı bir temsili elde etmek için nokta bulutu verilerinin doğrudan kullanımına dayalı bir dijital ikiz yaratmanın mevcut yöntemlerine ve değerlendirmelerine genel bir bakış sağlamaktır [18-24]. Odak noktası, bir 3B temsil oluşturmak için bir ara ürün olmak yerine, temsilin kendisi olarak nokta bulutu üzerinde olacaktır [25, 26]. Bunu başarmak için amaç, dijital ikiz olarak işlev görmek için böyle bir temsilin temel gereksinimlerini formüle etmenin yanı sıra, bu temel gereksinimlerin bir prototip dijital ikizde nasıl uygulanabileceğini göstermektir. İkinci amaç, fiziksel ortamdaki değişiklikleri tespit etmek ve bu değişiklikleri dijital ikize güncellemek için nokta bulutu verilerinin kullanımına ilişkin yöntemler hakkında bilgi edinmektir. Ayrıca, sayısal ikizin değişim tespiti ve güncellenmesinin pratik uygulamalarına ilişkin en uygun yöntemlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Üçüncü amaç, dijital ikizin oluşturulması, değişikliğin saptanması ve güncel tutulması yöntemlerine dayalı olarak, yapıyı çevredeki değişiklikleri algılama ve dijital ikize güncelleme sıklığı konusunda bir strateji sağlamaktır.

## II. MATERYAL VE METOT

Çalışmada dijital ikiz üretmek için fotogrametrik nokta bulutları kullanılmıştır. Bu çalışma, karmaşık objelerin dijital ikizlerinin oluşturulması ve sanal dünyaya aktararak tam bir temsilin oluşturulmasını kapsamaktadır. Dijital ikizlerin gelişimi için gerekli ürünleri sağlamak amacıyla düzgün geometriye sahip olmayan karmaşık obje olarak nitelendirilebilecek üç adet heykel seçilmiştir. Heykellerin ilk olarak 3B modellemesi ve temsili için, fotogrametrik veri toplama ve işleme yöntemi uygulandı. Dijital görüntüler, yüksek çözünürlüklü mobil telefon kamerası kullanılarak her bir heykelin boyutuna, karmaşıklığına, ayrıntı düzeyine ve kısıtlamalarına göre farklı şekillerde elde edildi. Kullanılan kameranın teknik özellikleri ve objelerin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan kameranın teknik özellikleri ve objelerin boyutları

Kameranın Teknik Özellikleri		Kullanılan obje			
Öznitelik	Değer	En (cm)	Boy (cm)	Yükseklik (cm)	
Kamera Modeli	Xiaomi Mi6	Obje 1	25	20	40
Kamera Çözünürlüğü	12 Mp-1.25 µm				
Renk Sayısı	16 Milyon	Obje 2	25	20	40
Diyafram Açıklığı	F1.8				
Odak Uzaklığı	27 mm	Obje 3	30	25	60
Coğrafi Konum Etiketleme	Var				

Dikkate alınması gereken en önemli unsur kullanılan fotogrametri yönteminin ana verisi olan fotoğrafların çekimi oluşturmaktadır. Tablo 1'de verildiği üzere objeler büyük olmamakla beraber mikro boyutunda da değildir. Objeler boyutu ve hacmi küçüldükçe fotoğraf çekim teknikleri daha da önemli hale gelmektedir. Objelerin küçük olması ve karmaşık yapıları gereği bazı kısıtlamalar oluşabilmektedir. Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için, dijital görüntülerin elde tutulan kameralarla veya belirli metre yüksekliğindeki bir kamera tutucusuna monte edilen kameralarla elde edilmesi gibi başka yöntemler uygulanabilir. Ayrıca objelerin yüzeylerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve nokta bulutlarına bütünlük sağlanması için görüntü oluşturabilecek etraftaki diğer objelerin temizlenmesi gerekmektedir. Çalışmada fotoğraf çekimi uygulanırken Şekil 1'de gösterilen tasarım uygulanmıştır. Uygulana tasarıma göre telefon kamerası bir sabitleyici ile kullanılmış olup obje üzerine tam tepede olacak şekilde aydınlatma sağlamış olup bu şekilde gölgelerden kaçınılmıştır. Ayrıca telefon tutacağı ile titremelerin önüne geçilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği üzere her bir obje aynı ortamda ve kırmızı ok yönünde fotoğraf çekimleri 360° olacak şekilde çekilmiştir.

Her bir heykelin şekil veya boyutunun izdüşüm nedeniyle deformasyona uğramaması için gerekli ölçümleri minimum kısıtlamalarla yapmak için her alanda yerel bir referans koordinat sistemi kuruldu. Bu amaçla obje etrafından yazılım tarafından otomatik tanımlanan hedef işaretleri kullanıldı. Bu hedef işaretleri kullanılarak hem model istenilen referans çerçevesine getirildi hem de modelin ölçeklendirilmesi yapıldı. Alınan verilerin işlenmesi için her dokümantasyon sürecinde olduğu gibi standart fotogrametrik iş akışı takip edildi. Çalışmada, dijital görüntülerin sıralandığı, yoğun nokta bulutlarının oluşturulduğu ve daha fazla işlendiği bir görüntü tabanlı modelleme yazılım paketi (Agisoft Metashape) kullanıldı. Ardından oluşturulan nokta bulutları görüntülerden

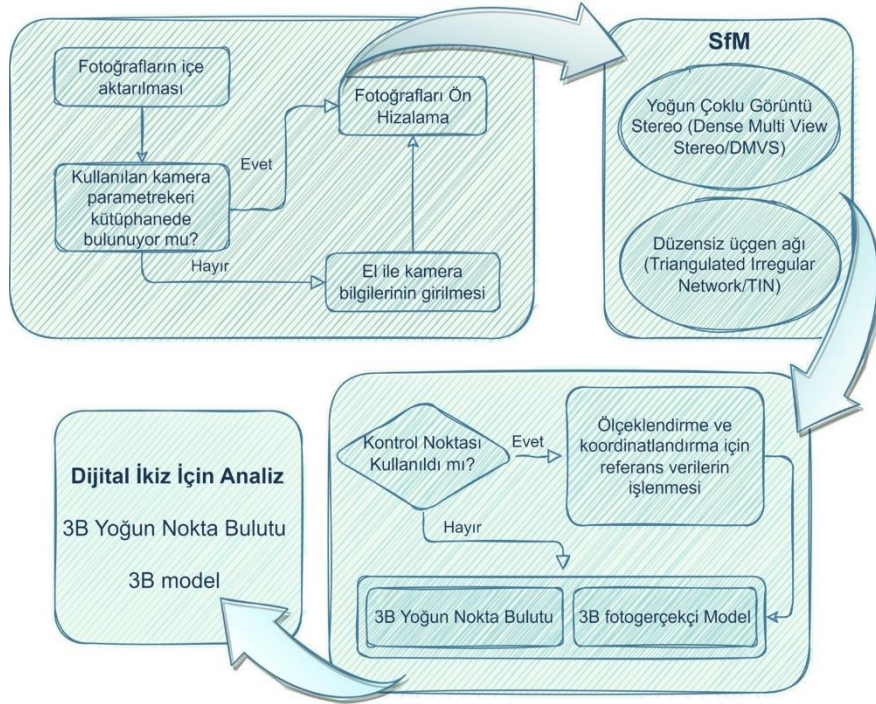
arındırıldı, referanslama ve ölçeklendirilmesi tamamlandı ve son olarak her nokta nesnesi, temsil için üçgenlenmiş düzensiz ağ yöntemi kullanılarak bir çokgen nesnesine dönüştürülerek dijital ikiz oluşturuldu.



Şekil 1. Çalışmada uygulanan fotoğraf çekim tasarımı

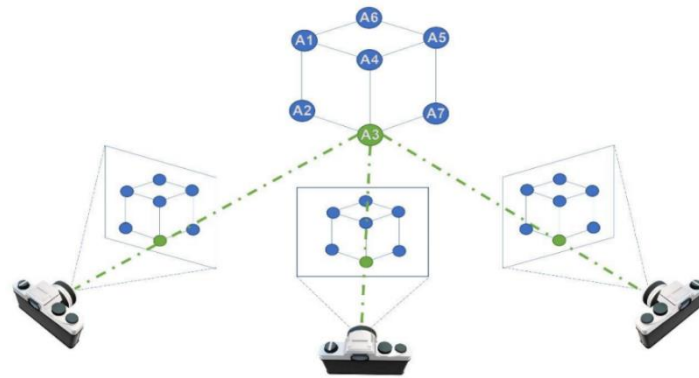
Çalışmada 3B nokta bulutu için tercih edilen fotogrametrik yöntemde süreç genellikle algoritmalar kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilir. Fotogrametrik nokta bulutu oluşturulmasında Hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from Motion/SfM) algoritması kullanılmaktadır. SfM; sahnenin geometrisini, kamera konumlarını ve oryantasyonu, bilinen 3B konumlara sahip bir hedef ağının önceden tanımlanmasını gerektirmeden otomatik olarak çözen bir fotogrametrik algoritmadır [26-30]. 3B geometri oluşturması için iki veya daha fazla örtüşen görüntüye ihtiyaç vardır. Aynı nesneyi gösteren iki veya daha fazla örtüşen görüntü arasındaki çapraz korelasyona dayanarak, görüntülerin yönü bilinerek yükseklik bilgisi belirlenebilir. Görüntülerdeki her piksel için bu işlem tekrarlanırsa 3 boyutlu nokta bulutu oluşturulabilir. Nokta bulutu verileri oluştururken LiDAR'a göre yoğun görüntü eşleştirme kullanmanın bir avantajı, renk niteliklerinin noktalar içinde otomatik olarak depolanması ve böylece hem geometri hem de RGB değerleri açısından gerçekliğin fotogerçekçi bir temsili doğrudan sağlamasıdır [30-32]. Kolay erişilebilir ve ucuz olmasından dolayı bilimsel araştırmalarda kullanımı çok yaygın hale gelen SfM algoritması; düşük maliyeti, son derece hızlı sonuçları ve basit 3B ölçüm yetenekleri nedeniyle yer bilimleri araştırmalarında dönüştürücü bir etkiye sahip olmuştur. Çalışmanın dijital ikiz üretimindeki genel iş akışı Şekil 2'de verilmiştir.





Şekil 2. Çalışmanın genel iş akış diyagramı

SfM algoritmasında, bir 3B yapı oluşturmak için bir dizi örtüşen fotoğraf çerçevesi kullanılır. Bir dizi örtüşen fotoğraftaki ortak noktaları bulup eşleştirerek çalışır (Şekil 3). Bilgisayar görselleştirme tabanlı bir ölçüm yöntemi olan SfM; dijital kamera, video kamera veya kameralı akıllı telefon kullanımı nedeniyle son zamanlarda popüler hale gelen ve ucuz olan bir yöntemdir [30 -36]. Bu algoritmaları ve yöntemleri kullanan yazılımlar önce fotoğrafları sıralar ve ön dengeleme yapar ardından seyrek nokta bulutları oluşturur. Bunun için, görüntüler arasındaki eşleşen noktaları otomatik olarak bulmak için algoritmalar kullanılır. SfM'nin bir başka aşaması, yoğun nokta bulutları oluşturma sürecidir. Bu aşamada kullanılan algoritma Yoğun Çoklu Görüntü Stereo (Dense Multi View Stereo/DMVS) algoritmasıdır [38, 39]. Yoğun nokta bulutları oluşturma sürecinde, birbirine eşlenmesi gereken pikseller ve bunların sanal 3B konumları tahmin edilerek katı modeller ve nokta bulutları oluşturulur. Son aşamada ise sanal uzayda oluşturulan modele gerçekçi ve doğal bir yüzey kazandırmak için görüntü kullanılarak foto-gerçekçi bir 3B model elde edilir.



Şekil 3. SfM algoritmasına uygun fotoğraf çekim tekniği [18]

### III. BULGULAR

3B modelleme çalışmalarında fotogrametrik değerlendirme yazılımı çok önemlidir. Günümüzde piyasada bulunan birçok yazılım bulunmaktadır. Ancak yapılan araştırmanın içeriğine göre fotogrametri yazılımı seçimi oldukça önemlidir. Her yazılımın olağanüstü yetenekleri vardır. Genel olarak en önemli nokta; sonuç, ürünün kalitesi ve işlemlerin kaç adımda ve ne kadar süre aldığıdır. Bu noktada Agisoft Metashape yazılımı, fotogrametrik

veri üretmek için SfM algoritmasını kullanan yazılımlar arasında fotogerçekçi modellerin üretiminde en fazla kullanılan yazılım olduğu için tercih edilmiştir [39].

Şekil 1’de gösterilen fotoğraf çekme senaryosuna göre obje 1, 2 ve 3 için sırasıyla 98, 78, 108 adet fotoğraf çekilmiştir. Fotoğrafların her obje için farklı sayıda olması objenin boyutu ve karmaşıklığı ile entegrelidir (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan heykellerin örnek fotoğrafları (sol: Objekt 1 – Orta: Objekt 2 – Sağ: Objekt 3)

Fotoğraflar çekildikten sonra fotogrametrik değerlendirme yazılımına fotoğraflar aktarılır. Fotoğrafları toplamak için kullanılan kameranın sensör boyutu ve odak uzaklığı yazılımın kitaplığından otomatik olarak tanımlanır. Kütüphane tarafından kullanılan nitelikler mevcut değilse, bunları manuel olarak tanımlamanız gerekecektir. Ardından görüntüleme sırası dikkate alınarak hizalama işlemi yapılır. Buradaki asıl amaç fotoğrafları sıralamak (Align model) ve bir ön model oluşturmaktır (Şekil 5).



Şekil 5. Ön dengeleme sonrasında oluşan seyrek nokta bulutu (Sol: Objekt 1 – Orta: Objekt 2 – Sağ: Objekt 3)

Yönlendirme/dengeleme sürecinden sonra yoğun nokta bulutları ve 3B modeller gibi dijital ürünlerin oluşturulması için yeni iş akışları tanımlanır [40-44]. Ön dengeleme aşamasında tüm objeler için daha doğru kamera konumu tahminleri elde etmek amacıyla en yüksek ayar seçilmiştir (Kaba kamera konumlarını daha kısa sürede elde etmek için daha düşük doğruluk ayarları kullanılabilir). En yüksek doğruluk ayarında yazılım orijinal boyuttaki fotoğraflarla çalışırken, orta ayar görüntünün 4 faktörü (her iki tarafta 2 kez) küçültülmesine neden olur, düşük doğrulukta kaynak dosyaların ölçeği 16 faktörü ile küçültülür ve en düşük değer 4 kat daha fazla küçültme anlamına gelmektedir. Çalışmada tercih edilen en yüksek doğruluk ayarı, görüntüyü 4 faktörü ile yükseltir. Bağlantı noktası konumları, kaynak görüntülerde bulunan özellik noktaları temelinde tahmin edildiğinden, bir bağlantı noktasını doğru bir şekilde lokalize etmek için bir kaynak fotoğrafı büyütme anlamlı olabilir. Bununla birlikte, En yüksek doğruluk ayarı yalnızca çok keskin görüntü verileri için ve ilgili işlemin oldukça zaman alıcı

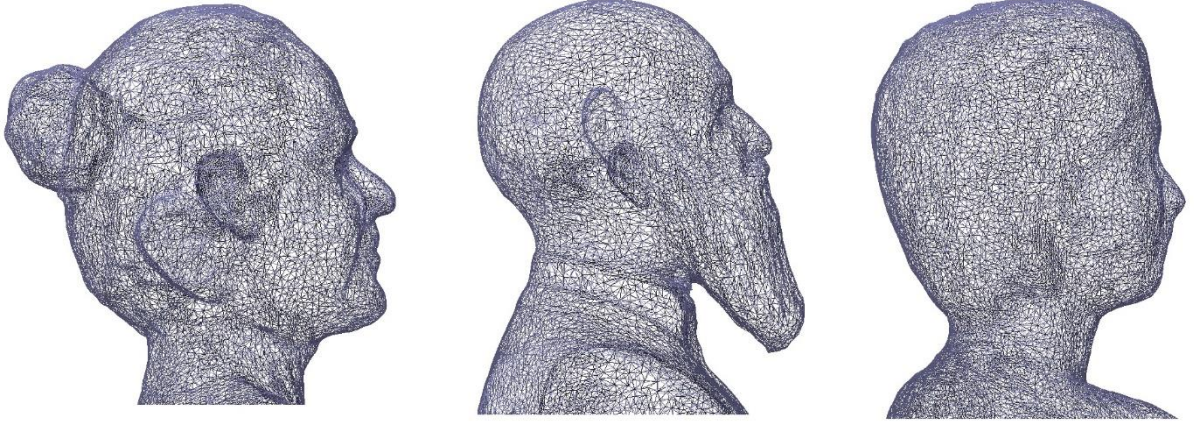
olması nedeniyle çoğunlukla araştırma amaçları için önerilmektedir. Ayrıca en yüksek seçeneği ile fotoğrafların bindirme oranı en düşük olan fotoğrafları da eşleştirirken, diğer alt seçeneklere doğru gidildikçe bindirme oranı yüksek olmayan fotoğraflar eşleştirilmez ve eşleştirilemeyen fotoğraflardan nokta üretilmez [45, 46]. Fotogrametrik değerlendirmede fotoğraf çekiminin önemi kadar yazılım ayarları da önem arz etmektedir. Çalışmada kullanılan yazılımda ve diğer tüm fotogrametrik yazılımlarda ön dengeleme ve iç yöneltme aşamasının en önemli ayarları anahtar nokta ve bağlantı noktası sınıridir. Anahtar nokta sayısı, mevcut işleme aşamasında dikkate alınacak her görüntüdeki özellik noktalarının üst sınırını gösterir. Sıfır değeri kullanmak, Metashape'in mümkün olduğu kadar çok anahtar nokta bulmasını sağlar, ancak çok sayıda daha az güvenilir nokta ile sonuçlanabilir. Çalışmada anahtar nokta sayısı sınırı olarak sıfır kullanılmıştır ve oluşturulan yoğun nokta bulutlarından gereksiz noktalar daha sonra temizlenmiştir. Bağlantı nokta sayısı ise, her görüntü için eşleşen noktaların üst sınırını gösterirken sıfır değeri kullanmak herhangi bir bağlantı noktası filtrelemesi uygulamaz ve çalışmada sıfır değeri tercih edilmiştir. Şekil 4'te gösterilen seyrek nokta bulutu oluşturulduktan sonra modeli ölçeklendirmek için yazılımın kendi üretmiş olduğu hedef işaretleri kullanılarak model ölçeklendirilmiştir. Ardından yoğun nokta bulutu oluşturmak için parametreler ayarlanmıştır. Yoğun nokta bulutu üretiminden en önemli parametre derinlik haritalarıdır ve bu parametre verinin istenen kalitesini belirtir. Daha ayrıntılı ve doğru geometri elde etmek için daha yüksek kalite ayarları kullanılmalıdır ancak bunların işlenmesi için daha uzun süre gerekir. Buradaki kalite parametrelerinin yorumu, Fotoğraf Hizalama bölümünde verilen doğruluk ayarlarına benzer. Tek fark: bu durumda Ultra Yüksek (Ultra High) Kalite ayarı, orijinal fotoğrafların işlenmesi anlamına gelirken sonraki her adım, ön görüntü boyutunun 4 kat (her iki tarafta 2 kez) küçültülmesini gerektirir. Çalışmada yoğun nokta bulutu için en yüksek ayar seçilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Her modele ait yoğun nokta bulutu (Sol: Obj 1 – Orta: Obj 2 – Sağ: Obj 3)

Yoğun nokta bulutu oluşturulduktan sonra yüzey morfolojisini temsil etmek için dijital bir araç olan düzensiz üçgen ağı (Triangulated Irregular Network/TIN) üretilmiştir. Şekil 7'de gösterilen düzensiz üçgen ağı ile; kenarları bitişik, örtüşmeyen üçgen yüzeyler oluşturur ve bir yüzeyde önemli bir rol oynayan doğrusal özelliklerin konumunu yakalamak için kullanılabilir. Örneğin sırt çizgileri veya akış yolları. Aşağıdaki grafikler bir modelin düğümlerini, kenarlarını ve yüzeylerini gösterebilmektedir.





Şekil 7. Her modele ait düzensiz üçgen ağı (Triangulated Irregular Network/TIN) (Sol: Objekte 1 – Orta: Objekte 2 – Sağ: Objekte 3)

Çalışmada kullanılan üç obje için sonuç ürünlere ait istatistiksel değerler Tablo 3'te verilmiştir.

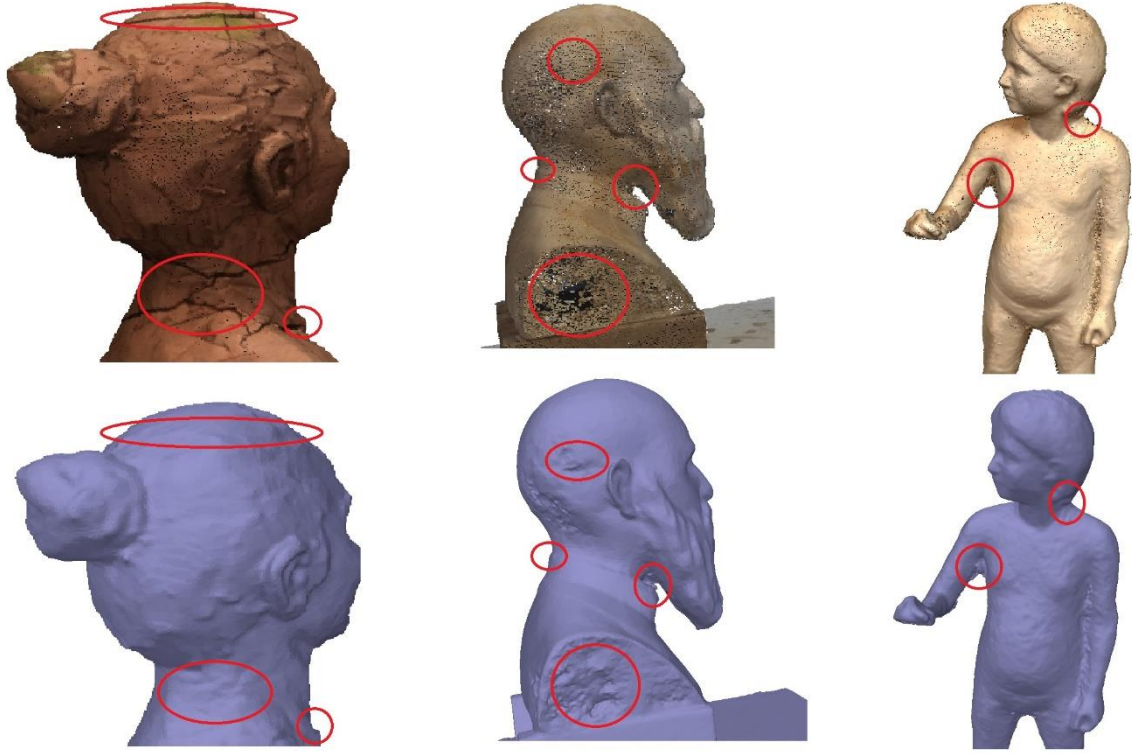
Tablo 3. Kullanılan objeler için fotogrametrik değerlendirme istatistikleri

	Fotoğraf Sayısı	Seyrek Nokta Bulutu Sayısı	Yoğun Nokta Bulutu Sayısı	Yüzey/köşe Sayısı	Süre Fotoğraf Çekimi/Fotogrametrik değerlendirme (dakika)
Objekte 1	98	54.875	431.596	107.213/53.716	12/28
Objekte 2	78	41.898	335.037	59.823/30.171	8/30
Objekte 3	108	75.878	483.598	180.000/90.126	14/34

Tablo 3 incelendiğinde üretilen yoğun nokta bulutlarının fotoğraf sayısı ile orantılı olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde oluşturulan yüzeyler yoğun nokta bulutundaki her noktanın birleşimi olduğu için gene paralellik göstermektedir. Her üç objeye ait çalışma, Intel® Xeon® CPU E5-2630 V3, 2.40 GHZ işlemcili 128 gb ram kapasiteli quadro p4000 ekran kartına sahip bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiş olup fotogrametrik süreç fotoğraf sayısı ile entegreli olsa da obje 2'ye ait süre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi diğer objelere kıyasla daha ayrıntıya sahip olması ve diğer objelerin obje 2'ye göre daha düzenli olması gösterilebilir.

Çalışmanın ana odak noktası olan dijital ikiz oluşturulmasında nokta bulutlarının kullanımında ise Şekil 8'de verilen yoğun nokta bulutları ile katı modeller arasındaki farkla incelendiğinde; nokta bulutlarında daha ayrıntılı gözükken birçok detayın katı modelde yumuşatıldığı ve gerçeklikten uzaklaştığı gözükmektedir. Ayrıca nokta bulutunda daha net gözükken kesiklikler ve derinlikler yine katı modelde yüzey doldurulmasında dolayı tam olarak algılanamamaktadır. Söz konusu kısımda oluşacak kaliteli bir düzensiz üçgen ağı (TIN) için nokta bulutlarının olabildiğince sık olması gerekmektedir. Yeterli sayıda oluşmayan nokta bulutlarının temsil ettiği kısımlar katı model oluşumunda algoritmalarla dolayı yumuşatmalar olabilmektedir. Bu sebepten dolayı aynı alan için nokta bulutundaki gösterim daha net olurken katı modeldeki gösterim gerçekliği tam olarak temsil edememektedir.





Şekil 8. Her modele ait yoğun nokta bulutu (üst), katı model (alt) (Sol: Obj 1 – Orta: Obj 2 – Sağ: Obj 3)

Bir dijital modeli tam ve eksiksiz temsil etmek için dijital ikiz üretmede gerekli veri şu anda en güncel olarak karşımıza fotogerçekçi modeller üretmemize sağlayan fotogrametri ve LiDAR veri toplama yöntemleri karşımıza çıkmaktadır. Diğer klasik dijital temsilleri oluşturulmasına imkan veren yöntemlere göre fotogrametri ve LiDAR yöntemlerinin yani nokta bulutu elde etme yöntemlerinin çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Her iki yöntemden de elde edilen nokta bulutları ile dijital temsil tam anlamıyla gerçekleştirilebilir. Nokta bulutu veri seti, binlerce noktadan oluşan bir çalışma alanının veya nesnenin dijital bir temsidir. Her ne kadar oldukça yoğun bir veri kümesi oluşması sonucu büyük veriler karşımıza çıksa da bu verilerin her biri geometrik bir koordinattır. Bu tek konumsal ölçümler kütesi bir araya gelerek 3B uzayda gerçekliği tam temsil eden ve gerçeğe bürünmüş bir model oluşturmaktadır. Bir nokta bulutundan; bir nesnenin derinliği, yüksekliği, geometrisi ve uzaydaki konumu hakkında gözlemler (ve ölçümler) yapılabilmektedir. Nokta bulutları, 3B lazer tarayıcılar kullanılarak oluşturulma eğilimindedir ve her nokta tek bir lazer tarama ölçümünü temsil etmektedir. Bunun yanı sıra fotogrametri yöntemi ile 2B fotoğraflardan nokta bulutları oluşturmakta dijital ikiz oluşturmada kullanımı giderek yaygınlaşmakta ve LiDAR yöntemlerine alternatif olmaktadır. Elde edilen bu nokta bulutu verileri ile 3B ağlar oluşturulabilir. Bu ağ dokuları sayesinde nokta bulutundaki noktalar arasında küçük üçgenler oluşturulmakta ve daha sonra her noktanın orijinal fotoğrafının küçük bir bölümünü çıkarılarak binlerce üçgenin her biri için bir doku oluşturulur. Bu sayede gerçekliği tam ve eksiksiz temsil eden bir 3B ağ veya model sonuç olarak dijital ikiz olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan bu dijital ikizler, kullanıcıların bir web tarayıcısında, bir tablette veya bir karma gerçeklik başlığıyla varlığın tamamını görselleştirmesine ve ayrıca durumu kontrol etmesine, analiz yapmasına ve tahmin ve optimizasyon için öngörüler oluşturmaya olanak tanımaktadır.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dijital ikiz oluşumunda nokta bulutunun önemi ve doğrudan kullanımının gerekliliği araştırılmış ve bu kapsamda üç adet düzensiz geometrik yapıya sahip karmaşık heykeller seçilmiştir. Çalışmanın başında irdelenen bazı sorulardan ortaya atılmış ve bunlardan ilki, bir dijital ikizi temsil etmek için doğrudan hangi nokta bulutu verilerinin kullanılabileceği olmuştur. Çalışma sonunda dijital ikizi doğrudan temsil etmek için bir nokta bulutu ne ölçüde kullanılabileceği tartışılmış olup özellikle Şekil 7 irdelendiğinde nokta bulutlarının önemi ve doğrudan kullanımı ön plana çıkmaktadır. Ayrıca bizim çalışmamızda olduğu gibi, Grasso ve ark. (2017) [5], Diaz- Vilariño ve ark. (2018) [45] ve Zhang ve ark. (2021) [46], nokta bulutlarının özelliklerini, onları gerçek dünyanın bir temsili olarak kullanıma uygun hale getirdiğini göstermektedir. Hem LiDAR hem de fotogrametri teknolojileri alanlarındaki teknolojik gelişmelerin öncülüğünde, nokta bulutlarının sunulabileceği hassasiyet, doğruluk ve detay büyük ölçüde artmıştır. Bulgular kısmında tartışıldığı gibi bir dijital ikizin gereksinimlerine

dayalı olarak bir dijital ikizin görsel bir temsil sağlaması, ek verilere erişim sağlaması, etkileşim ve sorgulama ile ilgili işlemlere izin vermesi ve belirli bir gerçeklik derecesini temsil etmesi gerekmektedir.

Bir nokta bulutunun nesnelere tam anlamıyla temsil etmesi için derinlik algısının iyi oluşturulması gerekmektedir. Çalışmada elde edilen veriler neticesinde özellikle derinlik algısının zor olduğu kısımlarda modellerin eksik olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktada modelin derinliğini oluşturan eksenlerin tam temsili için gerekirse hassas ölçümler ile desteklenmelidir. Çalışma başında değinilen diğer bir soru olarak ise temsil sağlanan 3B verilerde oluşacak değişiklikleri tespit etmenin ve bu değişiklikleri dijital ikizde güncellenmenin pratik sonuçlarıyla ilgilidir. Dijital ikizi güncellemek için değişiklik tespiti ve frekanslarla ilgili pratik uygulamalar kısmında ise güncel bilgi ve standart kullanımı gibi gerçekliğin bir temsili sunmanın temel ilkelerinde yatmaktadır ve bu noktada hızlı ve düşük maliyetli veri toplamada SfM tabanlı fotogrametrik yazılımlar aracılığıyla üretilen nokta bulutları büyük avantaj sağlamaktadır.

Kullanıcıların bir dijital ikize güvenebilmesi için, dijital ikizin temeli olarak doğru veri ve bilgilerin kullanılması esastır. Ancak, bu her zaman böyle görünmeyebilir. Özellikle nesnelere büyük bir yoğunluğunun yükseklik bilgisini içeren verilerde eksiklikler bulunmaktadır. Bu eksikliklerine LiDAR gibi veri toplama yöntemleri ile desteklenmesi gerekmektedir. Ayrıca, dijital ikizin güncellenmesine ilişkin pratik çıkarımlar, ek verilerin entegrasyonu içinde yatmaktadır. Farklı veri kaynaklarının entegrasyonu ne kadar fazla olursa, bir şey değiştiğinde o kadar fazla veri güncellenebilmektedir. Diğer bir deyişle, dijital ikiz, veri entegrasyonu miktarı arttıkça ek veri kaynaklarına daha fazla bağımlı hale gelmekte ve dijital ikizde kullanımına ilişkin çıkarımlar, entegrasyon miktarı ile ilgili olmaktadır. Ayrıca dijital ikize ait kayıtların ise çelişkili bilgiler sağlamak yerine birbirini tamamlaması gerekmektedir.

Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli doğru, hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramında geçmektedir. Bir dijital ikiz geliştirmede ise LiDAR ve fotogrametri yöntemleri modelin tam temsili için en iyi yansıtan yöntemlerdir. Elde edilen verilerin anlamlı hale getirilmesi ile ortaya çıkan dijital ikizin ise artırılmış gerçeklik gibi görselleştirme araçları ile kullanıcıya aktarılması analiz ve temsile önemli katkılar sunabilmektedir. Çalışmada çeşitli nokta bulutları toplama yöntemleri ve donanımları araştırılarak dijital ikizi en iyi temsil eden senaryolar oluşturulmuştur. Daha sonraki çalışmalarda elde edilen ürünler çeşitli görselleştirme araçları ile aktarılarak farklı kullanıcılara sunulacaktır. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine katkı sağlayacaktır.

#### KAYNAKLAR

- [1] Styliadis, A. D. (2008). Historical photography-based computer-aided architectural design: Demolished buildings information modeling with reverse engineering functionality. *Automation in construction*, 18(1), 51-69.
- [2] Boboc, R. G., Duguleană, M., Voinea, G. D., Postelnicu, C. C., Popovici, D. M., & Carrozzino, M. (2019). Mobile augmented reality for cultural heritage: Following the footsteps of Ovid among different locations in Europe. *Sustainability*, 11(4), 1167.
- [3] Carrión-Ruiz, B., Blanco-Pons, S., Weigert, A., Fai, S., & Lerma, J. L. (2019). Merging photogrammetry and augmented reality: The Canadian Library of Parliament. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W11), 367-371.
- [4] Che, E., Jung, J. & Olsen, M. (2019). Object Recognition, Segmentation, and Classification of Mobile Laser Scanning Point Clouds: A State of the Art Review. *Sensors*, 19(4).
- [5] Grasso, N., Verbree, E., Zlatanova, S., Piras, M. (2017). Strategies to evaluate the visibility along an indoor path in a point cloud representation. *International Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W4, 311-317.
- [6] Kasser, M., & Egels, Y. (2002). *Digital photogrammetry*. 2nd ed.; Taylor & Francis: New York, NY, USA, 2004; ISBN 0203305957.
- [7] Korumaz, A. G., Dülgerler, O. N., & Yakar, M. (2011). Kültürel Mirasın Belgelemesinde Dijital Yaklaşımlar. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 67-83.
- [8] Uslu, A., Polat, N., Toprak A. S., & Uysal, M. (2016). Kültürel Mirasın Fotogrametrik Yöntemle 3B Modellenmesi Örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8, 2, 165-176.
- [9] Şenol, H. İ., Polat, N., Kaya, Y., Memduhoğlu, A., & Ulukavak, M. (2021). Digital documentation of ancient stone carving in Şuayip City. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(1), 10-14.
- [10] Ulvi, A. (2022). Using UAV Photogrammetric Technique for Monitoring, Change Detection, and Analysis of Archeological Excavation Sites. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 15(3), 1-19.
- [11] Seyrek, E. C., Narin, Ö. G., & Eroğlu, M. M. (2022). Nokta Bulutu Üretiminde Cep Telefonu ve DSLR Fotoğraf Makinesi Kullanımının Araştırılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 23-29.
- [12] Erdoğan, A., Kabadayı, A., & Akın, E. S. (2021). Kültürel Mirasın Fotogrametrik Yöntemle 3B Modellenmesi: Karabıyık Köprüsü Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3 (1), 23-27.

- [13] Uslu, A., & Uysal, M. (2017). Arkeolojik Eserlerin Fotogrametri Yöntemi İle 3 Boyutlu Modellenmesi: Demeter Heykeli Örneği. *Geomatik*, 2(2), 60-65.
- [14] Narin, Ö. G. (2021). Uygulama İmar Planlarında Mobil Artırılmış Gerçeklik Uygulaması Kullanımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 875-880.
- [15] Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı Fotogrametrik Rölöve Alımı ve Üç Boyutlu Modelleme Çalışması. *Geomatik*, 2 (1), 11-17.
- [16] Şenol, H., Memduhoglu, A., & Ulukavak, M. (2020). Multi instrumental documentation and 3D modelling of an archaeological site: a case study in Kizilkoyun Necropolis Area. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11 (3), 1241-1250.
- [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] Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Tarihi Eserlerin 3B Modellenmesi ve Artırılmış Gerçeklik ile Görselleştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1032-1043.
- [19] Zeybek, M., & Kaya, A. (2020). Tarihi Yığıma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tibeti Kilisesi Örneği. *Geomatik*, 5 (1), 47-57.
- [20] Seyrek, E. C., Narin, Ö. G., Koçak, T. & Uysal, M. (2021). Yüzey araştırmalarında İHA fotogrametrisinin kullanımı: Kolankaya Siperleri örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 69-75.
- [21] Pulat, F., Yakar, M. & Ulvi, A. (2022). Three-dimensional modeling of the Kubbe-i Hasiye Shrine with terrestrial photogrammetric method. *Cultural Heritage and Science*, 3(1), 6-11.
- [22] Polat, N., Önal, M., Kaya, Y., Memduhoğlu, A., Kaya, N., Ulukavak, M., Mutlu, S., & Mutlu, S. (2021). Harran Ören Yeri Kazısında Bulunan kabartma Yazıların Üç Boyutlu Olarak Modellenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 594-601.
- [23] Mırdan, O., & Yakar, M. (2017). Tarihi Eserlerin İnsansız Hava Aracı ile Modellenmesinde Karşılaşılan Sorunlar. *Geomatik*, 2(3), 118-125.
- [24] Şenol, H. İ., Ernst, F. B., & Akdağ, S. (2018). Kentsel Dönüşüm Alanlarının Geotasarım Yöntemi ile Planlanması: Eyyübiye Örneği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 63-69.
- [25] Şasi, A., & Yakar, M. (2018). Photogrammetric modelling of hasbey dar'ülhuffaz (masjid) using an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(1), 6-11.
- [26] Memduhoglu, A., Şenol, H. İ., Akdağ, S., & Ulukavak, M. (2020). 3D Map Experience for Youth with Virtual/Augmented Reality Applications. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(3), 175-182.
- [27] Kabadayı, A. (2022). Maden Sahasının İnsansız Hava Aracı Yardımıyla Fotogrametrik Yöntemle Haritalanması. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4 (1), 19-23.
- [28] Hamal, S. N. G. (2022). Accuracy of digital maps produced from UAV images in rural areas. *Advanced UAV*, 2(1), 29-34.
- [29] Polat, N., & Kaya Y. (2021). Investigation of the Performance of Different Pixel-Based Classification Methods in Land Use/Land Cover (LULC) Determination. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3(1), 1-6.
- [30] Korumaz, A. G., Dülgerler, O. N., & Yakar, M. (2011). Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Dijital Yaklaşımlar. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 67-83.
- [31] Fidan, D., Oruç, M. E., Hamal, S. N. G., & Fidan, Ş. (2022). Tersine Mühendislik Uygulamalarında Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanım Olanaklarının Araştırılması; Klasik Otomobiller Örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(1), 1-10.
- [32] Pulat, F., Yakar, M., & Ulvi, A. (2022). Yersel Fotogrametrik Yöntem Kullanılarak Fotogrametrik Yazılımların Karşılaştırılması: Hüsrev Paşa Camii Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 30-40.
- [33] Yakar, M. (2011). Using close range photogrammetry to measure the position of inaccessible geological features. *Experimental Techniques*, 35(1), 54-59.
- [34] Hamal, S. N. G., & Ulvi, A. (2020). Su Altı Fotogrametri Yöntemi ve Kullanım Alanı Üzerine Bir Literatür Araştırması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 60-71.
- [35] Thwaites, H. (2013). Digital Heritage: What Happens When We Digitize Everything? In *Visual Heritage in the Digital Age*; Ch'ng, E., Gaffney, V., Chapman, H., Eds.; Springer London: London, UK, 327-348.
- [36] Kaya, Y., Şenol, H. İ., & Polat, N. (2021). Three-dimensional modeling and drawings of stone column motifs in Harran Ruins. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3 (2), 48-52.
- [37] Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International journal of virtual reality*, 9(2), 1-20.
- [38] Wang, C., Cho, Y. K., & Kim, C. (2015). Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. *Automation in Construction*, 56, 1-13.
- [39] Zhang, G., Verbree, E., Wang, X. (2021). An Approach to Map Visibility in The Built Environment from Airborne LiDAR Point Clouds. *IEEE Access* 9: 44150-44161 (2021).
- [40] Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Mersin Akyar Falez'i'nin 3B modeli. *Türkiye Lidar Dergisi*, 2 (1), 5-9.

- [41] Hamal, S. N. G., Sarı, B., & Ulvi, A. (2020). Using of Hybrid Data Acquisition Techniques for Cultural Heritage a Case Study of Pompeiopolis. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(2), 55-60.
- [42] Şenol, H. İ., & Kaya, Y. (2019). İnternet Tabanlı Veri Kullanımıyla Yerleşim Alanlarının Modellenmesi: Çiftlikköy Kampüsü Örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 11-16.
- [43] Uzun, S. D., Hamal, S. N. G., & Fidan, Ş. (2022). Elde Taşınabilir Lazer Tarayıcılar ile İnsan Yüzünün Modellenerek Güzellik ve Bakım Sektöründe Kullanımının Değerlendirilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(1), 17-20.
- [44] Sarı, B., Hamal, S. N. G., & Ulvi, A. (2020). Documentation of complex structure using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry method and Terrestrial Laser Scanner (TLS). *Türkiye Lidar Dergisi*, 2(2), 48-54.
- [45] Díaz-Vilariño, L., González-De Santos, L., Verbree, E., Michailidou, G., & Zlatanova, S., (2018). From point clouds to 3D isovists in indoor environments. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(4), 225-232.
- [46] Zhang, G., Verbree, E., & Wang, X. (2021). An Approach to Map Visibility in The Built Environment from Airborne LiDAR Point Clouds. *IEEE Access* 9: 44150-44161.
- [47] Yakar, M., Yılmaz, H. M., & Mutluoğlu, Ö. (2010). Close range photogrammetry and robotic total station in volume calculation. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(2), 86-96.
- [48] Yılmaz, H. M., Yakar, M., Gulec, S. A., & Dulgerler, O. N. (2007). Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 428-433.
- [49] Kodde (2016). Dense Image Matching. *Gim International*. <https://www.gim-international.com/content/article/dense-image-matching-2>. Erişim Tarihi: 29.01.2023
- [50] Remondino, F., & Campana, S. (2014). 3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage. *BAR international series*, 2598, 111-127.
- [51] Discher, S., Richter, R., & Döllner, J. (2019). Concepts and techniques for web-based visualization and processing of massive 3D point clouds with semantics. *Graphical Models*, 104, 101036.