



Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi

Use of photogrammetry in the development of digital twins and visualization with augmented reality

Abdurahman Yasin Yiğit^{1,*} , Murat Uysal² 

¹ Mersin Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyon Karahisar, Türkiye

Öz

Dijital ikiz oluşturmada en önemli kavram, objenin gerçekliği ne kadar iyi temsil ettiği ve güncellenebilir olmasıdır. Fotogrametri yöntemi bu noktada fotoğraflardan 3B modeller oluşturma yöntemi olduğu için gerçekliği en iyi temsil eden yöntemlerden biridir. Fotogrametri yöntemiyle bir nesnenin farklı açılardan birden fazla fotoğrafı çekilerek nesnenin 3B modeli oluşturulabilir ve bu modeller daha sonra dijital ikiz oluşturmak için kullanılabilir. Çalışmanın ana odak noktası fotoğraf verilerinden üretilen 3B fotogrametrik verilerin dijital ikiz olarak işlev görmesi için bir temsilin temel gereksinimlerini formüle etmek ve bu temel gereksinimlerin bir prototip dijital ikizde nasıl uygulanabileceğini göstermektir. Bu amaç doğrultusunda farklı boyutlarda ve karmaşık yapıdaki üç adet objenin Context Capture yazılımında fotogrametri yöntemi ve SfM algoritması ile dijital ikizi oluşturulmuştur. Son olarak üretilen dijital ikizin görselleştirilmesi ve kullanıcıya mobil veya WEB ortamında erişiminin kolay bir şekilde artırılmış gerçeklik olarak sunumu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dijital ikiz, Fotogrametri, 3B model, Artırılmış gerçeklik, WEB tabanlı görselleştirme

1 Giriş

Dijital ikiz, gerçek dünyadaki karşılığına benzeyen ve aynı şekilde davranan fiziksel bir varlığın, sürecin, sistemin veya ortamın dinamik bir sanal kopyası; bir ürünün, nesnenin, ortamın, sürecin veya hizmetin sanal bir modelidir [1]. Diğer bir deyişle fiziksel bir şeyin tam karşılığı yani sanal bir ikiz yaratmak anlamına gelmektedir. Kısacası dijital ikizler, fiziksel bir varlığın dijital temsilleridir denilebilmektedir. Bu sanal kopya bir araba, bir makine, bir tren hatta bir jet motoru bile olabilir. Dijital ikiz; bir ürünün, sürecin veya hizmetin sanal bir modelidir [2, 3]. Dijital ikiz, verileri alır ve süreçleri çoğaltır. Dijital ikiz ile gerçek dünya ürününün karşılaşılabileceği olası performans sonuçları ve sorunlar tahmin edilebilmektedir [4]. Dijital ikizler temsil ettikleri gerçek dünyadaki varlığın gerçek zamanlı durumunu yansıtmak için sürekli olarak güncellenmelidir. Bu yüzden bir dijital ikiz oluşturma en önemli parçası,

Abstract

The most important concept in digital twin creation is how well the object represents reality and how updatable it is. At this point, photogrammetry is one of the methods that best represent reality as it is a method of creating 3D models from images. With photogrammetry, multiple images of an object can be taken from different angles to create a 3D model of the object, which can then be used to create a digital twin. The focus of this paper is to formulate the basic requirements for a representation of 3D photogrammetric data generated from image data to function as a digital twin and to show how these basic requirements can be implemented in a prototype digital twin. For these purpose, digital twins of three objects of different sizes and complex structures were created by photogrammetry method and SfM algorithm in Context Capture software. Finally, the digital twin was visualized and presented to the user as augmented reality in an easy-to-access mobile or WEB based.

Keywords: Digital twin, Photogrammetry, 3D model, Augmented reality, WEB-based visualization

dijital ikizi oluşturacak hedef nesnenin gerçekliğinin sanal ortamda görsel olarak ne kadar iyi temsil edildiğidir [5].

Dijital ikizlerin gücü, gerçek dünya varlıklarını sanal bir ortamda gerçek verilerle doğru ve hassas bir şekilde bağdaştırmaktan gelmektedir. Dijital ikizler, işlevler arası ekiplerin karmaşık sistemleri etkileşimli ve sürükleyici yollarla iş birliği içinde tasarlamasını, oluşturmalarını, test etmesini, dağıtmasını ve çalıştırmasını sağlamaktadır [6]. Dijital ikizler, üreticilerin ve kullanıcıların geçmişini anlamalarına, mevcut koşulları görmelerine ve gelecekteki sorunları önlemelerine yardımcı olurlar. Gerçeği tam anlamıyla temsil eden bir üç boyutlu (3B) dijital ikiz model ve görselleştirmeler yardımıyla simülasyon ile tahmin yoluyla karar verme analiz sürecine önemli avantajlar sağlamaktadır [7]. Bu yüzden dijital ikizler, bir projenin tüm yaşam döngüsü boyunca erişilebilen ve varlıkların mevcut, geçmiş ve hatta gelecekteki durumlarını temsil etmek için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: abdurahmanyasinyigit@gmail.com (A.Y. Yiğit)
Geliş / Recieved: 11.06.2023 Kabul / Accepted: 14.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1313019

kullanılabilen tek bir görünüm sağlayabilmektedir. İyi bir dijital ikiz oluşturmak için aşağıdaki dört maddeyi temel almak önemlidir.

- Dijital ikizler, gerçek dünyadaki bir varlığın tam ve eksiksiz dijital temsili olmalıdır,
- Dijital ikizler, değerli içgörüler elde etmek ve fiziksel varlığı tam olarak anlamak için kullanılabilir olmalıdır;
- Tam ve eksiksiz veriye sahip dijital ikiz süreci beslemek için çeşitli veri kümeleri sağlanabilmelidir;
- Dijital ikiz ekosistemindeki anlayışı derinleştirmek için sürükleyici bir araç olarak ortaya çıkan Artırılmış gerçeklik (AG) ve sanal gerçeklik (SG) gibi araçlarla geliştirilmelidir [8].

Dijital ikizler, kurumsal ve nesnelerin interneti (Internet of Things) verileriyle birlikte görselleştirmek ve analiz etmek için kavramsal modeller (BIM, CAD veya GIS aracılığıyla) içe aktarılabilir veya gerçek dünyadaki fiziksel varlıkları tarayarak oluşturulur [9]. İnsan algısından daha hızlı etkileşimli içerik üreten bir bilgisayar grafik teknolojisi olan gerçek zamanlı 3B tarafından desteklenen bir dijital ikiz, birden fazla veri kaynağını (hem bilgi hem de modeller) gerçeğe yakın, etkileşimli görselleştirmeler olarak düzenleyebilir ve sunabilir [10]. Dijital ikizler, varlıkların fiziksel dünyada yaşayabileceği hareketlerin, kuvvetlerin ve etkileşimlerin sanal temsilleridir. Bu, kullanıcıların üç boyutlu ve eylemlerine gerçek zamanlı olarak yanıt veren dinamik içerikle etkileşim kurmasını sağlar [11]. Bu durumda sanal ortamda, gerçek dünya koşullarını, olasılık senaryolarını ve akla gelebilecek her türlü durumu etkin bir şekilde simüle edebilir ve sonuçları mobil cihazlar, bilgisayarlar ve artırılmış, karma ve sanal gerçeklik dahil olmak üzere herhangi bir platformda anında görselleştirebilirler.

Bir dijital modeli/ikizi tam ve eksiksiz temsil etmek için en önemli veri, hedef objeye ait en güncel halinin temsildir. Günümüzde zaman ve maliyet açısından fotogrametri yöntemi ile 2B fotoğraflardan üretilen nokta bulutu ve fotogerçekçi 3B modeller dijital ikiz oluşturmada kullanılabilir en etkin yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [8, 9]. Fotogrametri ile fotoğraflardan 3B modeller oluşturulabilirdiği için fotogerçekçi dijital ikizlerin geliştirilmesinde giderek daha popüler hale gelmektedir [12]. Dijital ikizler, tasarım ve simülasyon, denetim ve eğitim dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilen fiziksel nesnelerin veya sistemlerin sanal temsili olduğu için kullanıcılar; fotogrametriyi artırılmış gerçeklikle entegre ederek dijital ikizleri daha sürükleyici ve etkileşimli bir şekilde deneyimleyerek nesnelerin boyutunu, ölçeğini ve uzamsal ilişkilerini daha iyi anlamalarına yardımcı olabilirler [13]. Fotogrametri yönteminden elde edilen nokta bulutlarından oluşturulan fotogerçekçi 3B modeller ile dijital temsil tam anlamıyla gerçekleştirilebilir [14]. Nokta bulutu veri seti, binlerce noktadan oluşan bir çalışma alanının veya nesnenin dijital bir temsildir ve bu verilerin her biri geometrik bir koordinattır [15]. Bu tek konumsal ölçümler kütesi bir araya gelerek 3B uzayda gerçekliği tam temsil eden ve gerçeğe bürünmüş bir model oluşturur [16, 17]. Bir nokta bulutundan oluşturulan fotogerçekçi 3B modellerden

bir nesnenin derinliği, yüksekliği, geometrisi ve uzaydaki konumu hakkında gözlemler (ve ölçümler) yapılabilmektedir [18]. Elde edilen bu nokta bulutu verileri ile 3B ağlar oluşturulur ve bu ağ dokuları sayesinde nokta bulutundaki noktalar arasında küçük üçgenler oluşturularak daha sonra her noktanın orijinal fotoğrafının küçük bir bölümünü çıkararak binlerce üçgenin her biri için bir doku oluşturulmaktadır [19, 20]. Bu katı dokuya daha sonra gerçekliği tam ve eksiksiz temsil eden bir 3B ağ veya fotogerçekçi doku kaplanarak tam ve eksiksiz bir dijital ikiz model oluşturulur [21, 22]. Oluşturulan bu dijital ikizler, kullanıcıların bir WEB tarayıcısında, bir tablette veya mobil cihazda artırılmış gerçeklik ile görselleştirmesine ve ayrıca durumu kontrol etmesine, analiz yapmasına ve tahmin ve optimizasyon için öngörüler oluşturmaya olanak tanır [23].

Mohammadi vd. (2021), çalışmalarında hem İHA tabanlı fotogrametri hem de yersel lazer tarama yöntemi ile Avustralya'da bulunan bir tarihi köprünün dijital ikizini oluşturmuşlardır. Çalışmada iki yöntem ile üretilen nokta bulutları tabanlı dijital bir ikiz oluşturulmuştur. Bu vaka çalışmasının karşılaştırmalı sonuçları, bu iki büyük hacimli nokta bulutunun bir tarihi köprünün tam bir dijital ikizi değerlendirilmesinde yalnızca önerilen metodoloji ve yaklaşımların yeterliliğini kanıtlamakla kalmadı üretilen dijital ikizlerle denetimlerin yapılabileceği de vurgulanmıştır [24]. Kong ve Hucks (2023), fotogrametri teknolojilerini ve nokta bulutu işleme algoritmalarını dijital bir ikiz çerçeveye entegre ederek tarihi yapılar için yeni bir izleme girişimi sunmuşlardır. Bunu mümkün kılmak için, fiziksel yapının farklı denetim zamanlarındaki sanal modelleri ilk olarak fotogrametri ile üretmişler ardından, farklı zamanlarda üretilen sanal modelleri birbirine hizalayarak yapısal bozulmanın neden olduğu değişiklikleri daha da ayırt etmek için bir izleme yöntemi önermişlerdir. Sonuç olarak fotogrametri yöntemi ile üretilen modellerin bu noktada oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir [25]. Themistocleous vd. (2022), çalışmalarında kültürel mirasta, mekânın gerçek yaşam deneyimini doğru ve ayrıntılı bir sanal temsil yoluyla aktarmak için dijital ikiz modeller ürettiklerini bahsetmişlerdir. Ayrıca gerçeğe bir sanal ortamın kullanılması, insanların sanal ortamları gerçek dünyayla aynı şekilde algıladığı ve bunlara tepki verdiği teorisine bağlı olduğu aktarılmıştır. Bu iki temel nedenden dolayı çalışmada, Structure for Motion fotogrametrisi kullanılarak bir dijital ikiz modeli oluşturulmuş ve lazer tarama kullanılarak oluşturulan bir modelle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda üretilen dijital ikiz modellerin kültürel mirasta kullanımının, kullanıcıya ek anlamsal ve geometrik bilgiler sağlayarak mekânda 4. bir boyut sağladığını ve bunların farklı sanal ortamlarda görsel olarak sunulmasının önemli avantajlar sağladığından bahsedilmiştir [26].

Artırılmış gerçeklik, dijital ikizlerin görüntülenme ve erişilme şeklini değiştirme yeteneğine sahip olduğu için, dijital ikizleri sanal alana aktarılmasıyla modeli yapılan varlıkların kapsamlı bir görünümü sağlanabilmektedir [27, 28]. Üretilen dijital ikiz, tabletler veya akıllı telefonlar gibi mobil cihazlar aracılığıyla AG kullanılarak başka bir ortama yerleştirilerek daha iyi bir görselleştirme düzeyine izin verilebilir veya fiziki nesnenin gerçek konumu dışında dünya

üzerine aktarılabılır [29-31]. Artırılmış gerçeklik ve dijital ikiz entegrasyonunun kullanılması ile birçok çalışmada bilinçli kararlar alınmasına katkı sağlanabilmektedir. Cruz Franco vd. (2022), çalışmalarında mimari mirasın benzersiz yapılarına ait sanal ikizlerin kullanımına yönelik uygulamalı bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu ikizlerin, kültürel varlıkların korunmasını ve yayılmasını garanti edecek ve veritabanları, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik veya oyunlaştırma gibi yeni teknolojiler yoluyla evrensel erişilebilirliği teşvik edeceğinden bahsetmişlerdir. Bu evrensel erişilebilirlik, fiziksel engelleri aşmamıza ve ekonomik veya fiziksel durumları ya da konumları ne olursa olsun herhangi bir kullanıcıya ulaşmamıza olanak tanıyan deneyimler sunmak için yeni bir sanal evren olduğu vurgulanmıştır. Bu iş akışını elde etmek için fotogrametri ile elde edilen dijital ikizler kullanılmış olup mimarinin temsili ve yayılması için yeni sistemler olarak anlaşılan farklı veritabanları çalışılmıştır. Çalışma sonunda sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik ortamlarında kullanılması bir dizi önermeyi karşılayan etkili bir iş akışına entegre edilmek üzere sanal sistemlerin yerinde denetime göre oldukça başarılı olduğu vurgulanmıştır [32]. Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli; doğru, hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramından geçmektedir. Bir dijital ikiz geliştirmede ise fotogrametri yöntemi modelin tam temsili en iyi yansıtan yöntemlerin başında gelmektedir. 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 sunmaktadır.

Bu yazımızda dijital ikizlerin gelişiminde fotogrametri kullanımını ve bu dijital ikizlerin AG ile görselleştirilmesini ele alacağız. Doğruluk, verimlilik ve maliyet etkinliği dahil olmak üzere dijital ikiz oluşturma için fotogrametri kullanmanın faydaları aktarılacaktır. AG'nin dijital ikiz görselleştirme rolünü ve erişilebilirlik, esneklik ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimi dahil olmak üzere sağladığı faydalarda çalışmada incelenmiştir. Son olarak, dijital

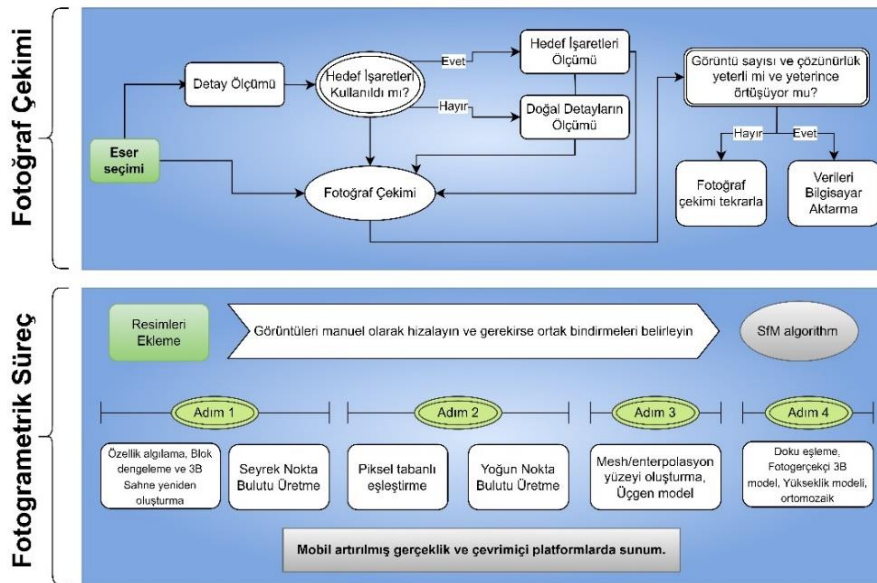
ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametri ve AG'nin geleceğine ve bu teknolojilerin mimarlık, mühendislik, inşaat ve daha fazlası gibi sektörlerde devrim yaratma potansiyeline değinilmiştir. Bu amaçla çalışmada karmaşık yapıda olan ve modellenmesi daha zor olan çeşitli objelerin fotogrametrik nokta bulutları ve fotogerçekçi 3B modelleri üretilerek dijital ikizi en iyi temsil eden senaryolar oluşturulmuştur. Çalışmada fotogrametrik ürünler (nokta bulutu ve 3B model) Context Capture yazılımında SfM algoritması ile üretilmiştir. Elde edilen ürünler, WEB tabanlı artırılmış gerçeklik görselleştirme araçlarına (augment platformu) aktarılarak farklı kullanıcılara sunulma imkânı verilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirme çalışmalarına katkı sağlayacaktır.

2 Materyal ve metot

2.1 Test nesnelere

Bu çalışma, karmaşık objelerin dijital ikizlerinin oluşturulması ve sanal dünyaya aktarılması tam bir temsiline 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.

Çalışmada genel iş akışı Şekil 1'de verilmiştir. İlk olarak dijital ikiz için fotogerçekçi 3B modellerin üretilmesi için kullanılan Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (Structure from Motion/SfM) algoritmasını kullanan fotogrametrik süreç aktarılmış olup ardından artırılmış gerçeklik (AG) ile görselleştirme sağlanmıştır.



Şekil 1. SfM algoritması ile fotogerçekçi 3B model üretiminin genel iş akışı

Tablo 1. Kullanılan kameranın teknik özellikleri ve objelerin boyutları

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

2.2 Hareket tabanlı yapısal algılama (structure from motion/SfM) ve fotogrametrik süreç

Fotogrametri, görüntülerden gerçek dünyadaki nesnelere ve sahneler hakkında güvenilir geometrik bilgi elde etme bilimi ve teknolojisidir [33, 34]. Görüntüler, kameralar veya elektronik tarayıcılarla donatılmış yer tabanlı, hava veya uzay platformlarından toplanabilir [35]. Üretilen verilerde geometrik bilgiler olarak nokta koordinatları, mesafeler, yükseklikler, alanlar, hacimler, 3B topografya ve 3B modelleri içermektedir [37]. Fotogrametri birçok farklı alanda kullanılırken, temel uygulamalardan biri de topoğrafik haritaların üretilmesinin yanında fotogerçekçi 3B modeller üretmedir. Son yirmi yılda, Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (Structure from Motion/SfM)- Çoklu Görüntü Stereo (Multi-View Stereo/MVS) algoritması, karmaşık yapı ve alanların yeniden yapılandırılmaya yönelik esnek ve düşük maliyetli yaklaşımıyla fotogrametride devrim yaratmıştır [37, 38]. SfM yaklaşımı, metrik veya metrik olmayan kameralarla toplanan görüntüleri kullanarak yüksek çözünürlüklü veriler üretmeyi mümkün kılmıştır [39]. Bu teknik, nesnenin bir dizi iki boyutlu görüntüsünü veya fotoğrafını eşleştirerek odadaki bir nesnenin üç boyutlu bir modelini yeniden oluşturur ve bu nedenle standart kullanım için yüksek maliyetli donanımlar gerektirmez. Bu teknik, özellik tespiti ve eşleştirme için fotogrametrik ilkeleri bilgisayarlı görme algoritmalarıyla birleştirmektedir [40]. Geleneksel fotogrametrinin aksine SfM, kamera yönelimleri veya yer kontrol noktalarının

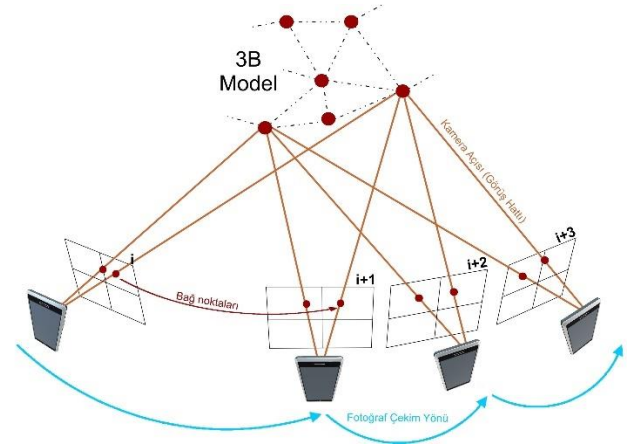
kullanımını hakkında önceden bilgi sahibi olmadan nokta bulutu oluşturmaya olanak tanımasından dolayı süreci oldukça hızlandırmıştır. Özellikle demet ayarlamaları ile birden fazla örtüşen görüntü için aynı anda kamera parametreleri ve yüzey noktası konumları çözülebilmeye süreci önemli katkılar vermiştir. MVS algoritması ise, kapsamlı nokta çıkarımı ile model çözünürlüğünü artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [41]. Ayrıca, SfM/MVS teknolojisi genellikle kırmızı-yeşil-mavi (Red-Green-Blue/RGB) dokulu 3B model üretimde başarısı ile özellikle; harita yapımı, arkeolojik ve mimari, manzaralar, anıtlardaki odalar ve çanak çömlek gibi objelerin 3B modellenmesinde giderek daha yaygın hale gelmiştir [42, 43]. SfM, eğik ve yakınsak görüntüler içeren düzensiz görüntü konfigürasyonlarından sahneyi yeniden oluşturabilir, böylece ölçüm tasarımı ve uygulamasına yönelik gereklilikler giderek azalmıştır. Ayrıca SfM tabanlı yazılımlar ile topografik veya yapı modellerin oluşturulması büyük ölçüde otomatikleştirilmiş işlemeye sahip kullanıcı dostu yazılımlar ile daha da kolaylaşmıştır. Bu faktörler, teknik uzmanlığa ve pahalı ölçme ekipmanına olan ihtiyacı etkili bir şekilde azaltarak, fotogrametriyi mühendislik projelerindeki uzmanlardan amatör fotoğrafçılara kadar geniş bir kullanıcı grubu için erişilebilir hale getirmiştir. [44]. Her ne kadar SfM ile fotogrametri yöntemi amatör kullanılacak için kullanışlı hale gelse de Şekil 2'de görüldüğü gibi bu çalışmada da yapıldığı üzere her objeye ait özel fotoğraf çekim teknikleri oluşturulmalıdır.



Şekil 2. Fotogrametri yöntemi için uygun fotoğraf çekim teknikleri

Yapılan bazı araştırmalar, SfM/MVS teknolojisi ile yapılan 3B modellerin doğruluğunun, bazı istisnalar dışında nispeten büyük nesnelere sınırlı olsa da lazer taramayla yapılanlarla karşılaştırılabilir olduğunu bildirmiştir [45]. LiDAR teknolojisi genellikle yüksek ekipman maliyetleri gerektirdiğinden ve bazen renk bilgisi elde etmek zor olabileceğinden, 2B fotoğraflardan birbiri ile eşleşen görüntüye dayalı olarak bir 3B modeli yeniden oluşturan SfM/MVS ile tam bir dijital ikiz yapılabilmektedir [46]. SfM/MVS teknolojisini kullanan uygulamalarda çok önemli bir teknik konu, fotoğraf veya görüntü elde etme sürecidir. SfM/MVS'nin sonuçları çekilen fotoğraflara bağlıdır, yani odak nesnesinin düşük kapsamı veya düşük kaliteli fotoğraflar bir 3B modelin doğruluğunu büyük ölçüde azaltabilir. Bu yöntemde genellikle algoritmalar kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilir [47]. SfM algoritması, iç yöneltme elemanları için gerekli olan kalibrasyon parametrelerini kendi kendine kalibrasyon tekniği ile çözen bir fotogrametrik algoritmadır. 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 [48, 49]. Görüntülerdeki her piksel için bu işlem tekrarlanırsa 3B 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. SfM algoritması sayesinde ürün üretim sürecinde nispeten düşük maliyet sağlanabilmektedir. Ayrıca fotogrametrik sürecin hızlandırılmasına katkı sağlamıştır. Bu yüzden özellikle 3B model üretimindeki araştırmalarda sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. SfM algoritmasında bir sahnenin 3B yeniden yapılandırılması için sıralı ve bindirmeli (ardışık fotoğraflar arasında ortak alan) fotoğraf çiftlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2). Bindirmeli fotoğraflar sayesinde ortak noktalar bulunur ve eşleştirilerek sahne tekrarda dijital ortamda üretilir.

Çalışmada dijital ikiz oluşturmak için fotogerçekçi 3B modeller Context Capture yazılımında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yöntem, önce iki fotoğrafın 3B yapısını ve kamera pozlarını ilgili pozlarına göre tahmin ederek başlar (Şekil 3). Ardından sırayla ilave kamera pozları eklenir ve sahnenin yeni bölümleri gözlemlendikçe yeni 3B yapı tahmin edilir. Yüksek kaliteli rekonstrüksiyonları sağlamak ve sürüklenmeyi önlemek için daha fazla kamera eklendikçe blok dengeleme tekrar tekrar gerçekleştirilir. SfM ardışık fotoğrafların, aykırı değerleri filtrelemek ve kamera pozlarını veya yapısını tahmin etmek için genel bir prosedür izler [50, 51]. SfM algoritmasında kamera self kalibrasyon yapılarak performans önemli ölçüde arttırılsa da ancak iyi sonuçlar elde etmek için ön kalibrasyonun hala gerekli olduğu zamanlar olabilmektedir [52].



Şekil 3. 2B fotoğraflardan SfM yöntemi ile 3B yapı ve kamera konumlarının belirlenmesi (Sweeney, 2016, geliştirilmiştir [53])

Çalışmada Context Capture yazılımı içerisindeki algoritmalar ile kameraların iç yöneltme parametreleri otomatik olarak tahmin edilmiştir. Bu aşamada ikili görelî pozlar verilen görüntülerin kamera konumu ve kameraların mutlak yönelimleri tahmin edilerek belirlenmiştir. Yani yapıdaki üçgenleme, iki veya daha fazla görüntü aracılığıyla izlenen bir görüntü koordinatının 3B konumunu hesaplamıştır. Tahmini kamera pozuna sahip tüm kameralar, bir parkurun 3B noktasını tahmin etmek için kullanılır ve yapılan blok dengeleme ile, ilk tahminden sonra bağ noktalarının izi ayarlanır (tüm kamera parametrelerini sabit tutar). Özellikleri doğru bir şekilde üçgenlemek için, noktanın derinliğine göre kameralar arasında yeterli bir taban çizgisi olmalıdır. Derinliği çok yüksek ve taban çizgisi küçük olan noktalar çok hatalıdır. Tahminin başarılı sayılması için en az bir kamera çiftinin tahmini iz için yeterli görüş açısına sahip olması gerekir. Pozlar, iki kameraların (potansiyel olarak kalibre edilmiş) pozlarıdır ve noktalar, 3B noktayı üçgenlemek için kullanılacak eşleşen özelliklerin 2B görüntü noktalarıdır. İki ışın arasındaki en yakın noktayı belirleyerek üçgenleme yapılır. Bu durumda, ışın orijinleri kamera konumlarıdır ve yönler, 3B uzaydaki özelliklerin ışın yönleridir. Bu yöntemin, yeniden yansıtma hatasını en aza indirmede yetersiz olduğu bilinir, ancak diğer üçgenleme yöntemlerinden yaklaşık 10 kat daha hızlıdır. Doğrusal olmayan optimizasyon için ve yeniden projeksiyon hatasını en aza indirmek için tüm kameraları ve 3B noktaları optimize edilir. Eşleşen geometrik olarak doğrulanmış görünüm arasındaki görelî pozları içeren görünüm çiftlerinin yanı sıra kameraların daha önce tahmin edilen genel (mutlak) yönelimleri hesaplanır. Kamera konumları, türetilmiş sınıflar tarafından belirlenen belirli stratejiler ve uygulama ile bu bilgilerden tahmin edilir. Dijital ikiz için 3B model yapım sürecinde yukarıda bahsedilen genel ayarlar yapılmalı ve ardından fotoğraf veri seti incelenerek bir 3B modelin başarıyla oluşturulabileceğini doğrulandıktan sonra sırasıyla 'Fotoğrafları Hizalama', 'Yoğun nokta bulutu oluşturma' ve 'Ağ oluşturma' aşamaları için 'yüksek kalite' seçenekleri

belirlenerek fotogrametrik yazılım aracılığıyla tam ve eksiksiz fotogerçekçi modeller üretilmiştir.

2.3 WEB ve mobil tabanlı artırılmış gerçeklik

Artırılmış Gerçeklik (AG) teknolojisi; ortamda gözlemlenen fiziksel unsurların işitsel, görsel ve fiziksel bilgilerinin bilgisayar ortamında oluşturulan 3 boyutlu model ile zenginleştirilerek farklı bir gerçeklik algısı sunan etkileşimli bir deneyimdir. Bu şekilde, herhangi bir nesne sanal ortamda yeniden oluşturulabilir ve AG uygulamaları için sanal içerik olarak kullanılabilir [54]. Klasik bir nesnenin "sanal" temsilini kullanmanın birçok avantajı vardır: dinamik öğeler içerebilir ve yapının başka türlü gizlenebilecek yönlerine erişime izin verir [55]. Bununla birlikte, dijital ikiz tekniğini kullanarak tam ve kapsamlı bir sunum oluşturmak için, geliştiricilerin ayrıca kullanıcıların sistemle veya kullanıcı arayüzüyle nasıl etkileşime girdiğini anlamaları gerekir [56]. AG uygulamalarını tasarlarken, ilgili nesneye ait bilgileri kullanıcılara aktarmak için en iyi teknoloji araçlarını seçmek önemlidir. Oluşturulan modelin, sunulan kişilerden olumlu geri dönüş alabilmesi için konunun ilgi alanlarına ve ihtiyaçlarına göre karşılık bulması gerekir. Bu nedenle AG uygulamalarının kullanılabilirliğini değerlendirmek çok önemlidir. AG nispeten yeni bir teknoloji olduğundan ve WEB/mobil teknolojinin gelişimi son yıllarda ilerlediğinden, AG uygulamalarının WEB platformlarında ve mobil cihazlar üzerinde oluşturulması "mobil veya WEB tabanlı artırılmış gerçeklik" terimini ortaya çıkarmıştır [57]. AG teknolojisinin mobil cihazlara ve WEB tabanlı görselleştirmelere yönelik uygulamaları pazarlama, oyun, endüstri, eğitim, sağlık, teknoloji, turizm, gibi farklı sektörlerde oldukça fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Artırılmış gerçeklik (AG), sanal nesnelere gerçek dünyaya harmanlayarak yeni bir etkileşim boyutu sunan bir teknolojidir [58]. WEB tabanlı AG, geliştiricilerin doğrudan WEB üzerinde çalışan AG deneyimleri oluşturmasına olanak tanıyan ve bağımsız bir uygulamaya olan ihtiyacı ortadan kaldıran, hızla gelişen bir alandır [59]. Akıllı telefonların, tabletlerin ve diğer bağlı cihazların yükselişiyle WEB tabanlı AG, AG'yi çok daha geniş bir kitleye ulaştırma potansiyeline sahip. WEB tabanlı AG'nin birincil avantajlarından biri erişilebilirliktir. İndirilmesi ve yüklenmesi gereken yerel AG uygulamalarının aksine, WEB tabanlı AG deneyimlerine basit bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir [60]. Bu, geliştiricilerin daha geniş bir kitleye ulaşmasını ve kullanıcıların AG deneyimlerini indirme veya kurulumu ihtiyaç duymadan denemelerini kolaylaştırır. WEB tabanlı AG ayrıca içerik dağıtım açısından daha fazla esneklik sunar. WEB tabanlı bir AG deneyimi ile geliştiriciler, güncellemeleri uygulama mağazalarına göndermeye gerek kalmadan içeriği gerçek zamanlı olarak güncelleyebilir. Bu, daha hızlı yineleme ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimi sağlar. WEB tabanlı AG, eğitim, pazarlama, eğlence ve daha fazlasını içeren çok sayıda uygulamaya sahiptir [61]. Örneğin, eğitimde WEB tabanlı AG, öğrencilerin gerçek dünyadaki sanal nesnelere keşfetmesine olanak tanıyan etkileşimli öğrenme deneyimleri oluşturmak için kullanılabilir. Bu, öğrenmeyi daha ilgi çekici ve etkileşimli

hale getirebilir ve öğrencilerin bilgileri daha iyi tutmasına yardımcı olabilir. Pazarlamada, WEB tabanlı AG, müşterilerin bir ürünün gerçek dünyada nasıl görüneceğini görmelerini sağlayan sanal denemeler [62] gibi etkileşimli ürün deneyimleri oluşturmak için kullanılabilir. Bu, müşteri katılımını artırmaya ve satışları artırmaya yardımcı olabilir [63]. Eğlencede, WEB tabanlı AG, gerçek ve sanal dünyalar arasındaki çizgileri bulanıklaştıran sürükleyici deneyimler oluşturmak için kullanılabilir [64]. Örneğin, sanal karakterlere gerçek dünyada hayat veren AG oyunları, tamamen yeni bir etkileşim düzeyi sunabilir.

Literatürde çeşitli WEB tabanlı artırılmış ve sanal gerçeklik platformları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır. Unity, geniş bir oyun ve simülasyon geliştirme platformudur. Dijital ikizlerinizi Unity ortamında AG ve SG içerikleri için hazırlayabilir ve web tabanlı olarak dağıtabilirsiniz. Unreal Engine, gerçekçi grafikler ve görsel efektler sunan bir oyun motorudur. Üretilen dijital ikizleri Unreal Engine üzerinde oluşturarak AG ve SG platformlarında kullanabilirsiniz. WebGL ile AG ve SG'ler diğer geliştirme platformlarına alternatif olarak, direkt olarak WebGL kullanarak web tabanlı AG ve SG içerikleri oluşturabilirsiniz. A-Frame gibi çerçeveler, bu tür içerikleri oluşturmak için kolay ve kullanıcı dostu araçlar sağlamaktadır. AR.js: AR.js, web tabanlı artırılmış gerçeklik içerikleri oluşturmak için popüler bir JavaScript kütüphanesidir. Bu sayede dijital ikizler tarayıcılar üzerinden kullanıcılara sunulabilir. WebXR, web tarayıcılarında sanal gerçeklik içeriklerinin oluşturulmasını ve kullanılmasını sağlayan bir teknoloji standardıdır. WebXR API'leri kullanarak dijital ikizlerinizi tarayıcılar aracılığıyla SG olarak deneyimlenebilir hale getirebilir. Sketchfab, 3B içeriklerin kolayca yüklenip paylaşılabileceği bir platformdur. Dijital ikizler bu platforma yüklenerek, kolayca erişilebilir ve paylaşılabilir hale getirebilir. Mozilla Hubs, çok kullanıcı sanal gerçeklik dünyalarının kolayca oluşturulup paylaşılacağı bir platformdur. Burada dijital ikizler diğer kullanıcılarla etkileşime girebileceği sanal alanlarda sergilenir. Microsoft Azure Spatial Anchors, eğer artırılmış gerçeklik içeriklerinizin dünyaya sabitlenmesini isteniyorsa, Microsoft Azure Spatial Anchors kullanılabilir. Bu sayede dijital ikizler belirli yerlere sabitlenerek kullanıcılara daha gerçekçi bir deneyim sunulabilir. Bahsedilen platformlar, dijital ikizleri farklı türdeki kullanıcılara ve cihazlara sunmak için çeşitli seçenekler sunmaktadır. Platform seçimi, hedef kitleye ve projenin gereksinimlerine göre yapılması önemlidir.

Bu çalışmada fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modeller ile yapılan dijital ikizler WEB tabanlı Augment artırılmış gerçeklik platformunda sunulmuştur. Augment, kullanıcıların AG deneyimleri oluşturmasını ve yayınlamasını sağlayan WEB tabanlı bir artırılmış gerçeklik platformudur. Platform, mobil veya WEB tabanlı AG aracılığıyla deneyimlenebilen 3B modeller, animasyonlar ve etkileşimli öğeler dahil olmak üzere AG içeriği oluşturmak ve yönetmek için araçlar sağlar. Bir e-ticaret çözümü olan Augment, kullanıcıların evlerinde veya profesyonel ortamlarında akıllı telefonları ve tabletleri aracılığıyla her türlü ürünü ve 3B nesnelere artırılmış gerçeklikte

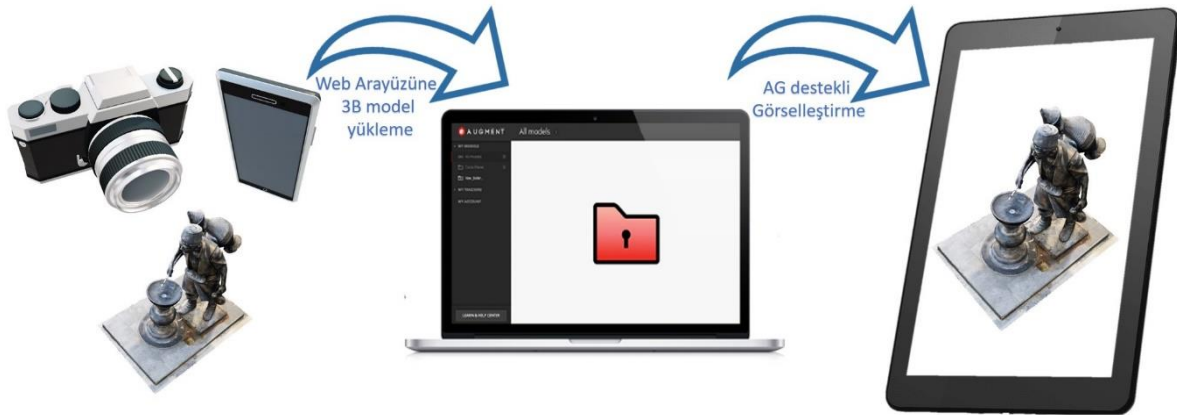
görselleştirmelerine olanak tanır. Bir satış ve pazarlama çözümü olarak ilk olarak kullanıma açılan Augment platformu, kuruluşlara ve ekiplere dönüşümü, verimliliği ve ticari başarıyı artırmak için fiziksel seyahat ve lojistik ihtiyacını azaltan araçlar sağlamaktadır. AG konusunda çok az deneyimi olan veya hiç deneyimi olmayanlar için bile kullanımı kolay olan platform, 3B modelleme araçları, gerçek zamanlı analitik ve özel markalama seçenekleri dahil olmak üzere çok çeşitli özellikler sunmaktadır. Ayrıca tasarım çözümü olarak Augment platformu, doğrulama sürecini hızlandırır ve tersine mühendislikte prototipleme maliyetlerini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Platform, insan işbirlikçi misyonunu ve değerlerini paylaşan tutkulu bir dijital uzmanlar ve profesyoneller ekibi tarafından desteklenmektedir. Augment ayrıca e-ticaret platformları, pazarlama otomasyon araçları ve 3B tasarım yazılımı dahil olmak üzere diğer araç ve platformlarla bir dizi entegrasyon sunar. Bu, kullanıcıların AG'yi mevcut iş akışlarına entegre etmelerini ve hedef kitlelerine daha etkili bir şekilde ulaşmalarını kolaylaştırır. Augment, Flaman-Belçikalı girişimciler ve yatırımcılar ile Salesforce'un kurucu ortakları ve bireysel yatırımcılar arasındaki değer odaklı bir iş birliği olan Vinteor tarafından desteklenmektedir. Platformun diğer türevlerinden ayırt edici özelliği olarak; WEB tabanlı artırılmış gerçeklik uygulaması olmasına rağmen çevrimdışı senkronizasyona sahip olması, casus bağlantı konusunda üst düzey güvenlik sağlaması, sahnelenen ürünü AG'de görüntülerken malzemeleri ve dokuları değiştirebilme özelliğinin olması, malzeme konfigürasyonuna sahip olması, nesnelere gerçek ölçeğinde sunabilmesi, Apple'ın AGKit'ini ve Google'ın AGCore'unu tam olarak desteklemesi ve özelleştirilebilir kullanıcı arabirimi, aynı anda birden çok ürünle karmaşık AG sahnelerini kolayca oluşturulabilmesi ve son olarak AG de sahnelenmesi istenen dijital ikiz ürünlerinin Şekil 4'te gösterildiği gibi kolaylıkla WEB ortamına yüklenebilmesi gibi avantajlar karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak Augment, işletmelerin ve bireylerin AG deneyimleri oluşturması ve yayınlaması için kolay ve erişilebilir bir yol sağlayan güçlü bir WEB tabanlı AG platformudur. Geniş özellik ve entegrasyon yelpazesıyla Augment, mühendislik, pazarlama ve ürün görselleştirmeden eğitim ve öğretime kadar çeşitli kullanım durumları için çok uygundur.

3 Bulgular ve tartışma

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 Context Capture yazılımı, fotogrametrik veri üretmek için SfM algoritmasını kullanan önemli yazılımlar arasında fotogerçekçi modellerin üretiminde en çok tercih edilen yazılımlardan biri olduğu için tercih edilmiştir. Şekil 2'de gösterilen fotoğraf çekme senaryosuna göre obje 1, 2 ve 3 için sırasıyla 100, 114, 105 adet fotoğraf çekilmiştir. Fotoğrafların her obje için farklı sayıda olması objenin boyutu ve karmaşıklığı ile entegrelidir.

Fotoğraflar çekildikten sonra fotogrametrik değerlendirme yazılımına fotoğraflar aktarıldı. Fotoğrafları toplamak için kullanılan kameranın sensör boyutu ve odak uzaklığı yazılımın kitaplığından otomatik olarak tanımlandıktan sonra görüntüleme sırası dikkate alınarak hizalama işlemi yapıldı. Buradaki asıl amaç fotoğrafları sıralamak ve bir ön model oluşturmaktır (Şekil 5).

İlk aşama olan fotoğrafları hizalama sürecinden sonra yoğun nokta bulutları ve 3B modeller gibi dijital ürünlerin oluşturulması için yeni iş akışları tanımlanır. Ön dengeleme aşamasında tüm objeler için daha doğru kamera konumu tahminleri elde etmek amacıyla en yüksek ayar seçilmiştir. En yüksek doğruluk ayarında yazılım orijinal boyuttaki fotoğraflarla çalışırken, orta ayar görüntünün 4 kat faktörü ile küçültülmesine neden olurken düşük doğrulukta kaynak dosyaların ölçeği 16 kat faktörü ile küçültülür ve en düşük değer 4 kat daha fazla küçültme anlamına gelmektedir. 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.



Şekil 4. WEB tabanlı artırılmış gerçeklik için iş akışı



Şekil 5. ön dengeleme sonrasında oluşan seyrek nokta bulutu (sol: obje 1 – orta: obje 2 – sağ: obje 3)

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. Şekil 5'te gösterilen seyrek nokta bulutu oluşturulduktan sonra modeli ölçeklendirmek için referans hedef işaretleri kullanılarak model ölçeklendirilmiştir. Ardından yoğun nokta bulutu oluşturmak için parametreler ayarlanmıştır. Yoğun nokta bulutu üretiminden daha ayrıntılı ve doğru geometri elde etmek için daha yüksek kalite ayarları kullanılmalıdır ancak bunların işlenmesi için daha uzun süre gerekir. Çalışmada yoğun nokta bulutu için en yüksek ayar seçilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Her modele ait yoğun nokta bulutu (sol: obje 1 – orta: obje 2 – sağ: obje 3)

Yoğun nokta bulutu oluşturulduktan sonra aykırı noktalar manuel olarak temizlenmiştir ve ardından yüzey morfolojisini temsil etmek için dijital bir araç olan düzensiz üçgen ağı üretilmiştir. Üretilen üçgen ağlarından daha sonra katı model üretilmiş ve fotoğraflardan yüksek kaliteli doku kaplanmıştır. Şekil 7'de de gösterildiği üzere son olarak 3B fotogerçekçi dijital ikizler üretilmiştir. Çalışmada kullanılan üç obje için sonuç ürünlere ait fotogrametrik süreç sonucunda ortaya çıkan istatistiksel değerler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 7. Her modele ait fotogerçekçi 3b dijital ikiz (sol: obje 1 – orta: obje 2 – sağ: obje 3)

Tablo 2. Kullanılan objeler ait fotogrametrik değerlendirme istatistikleri

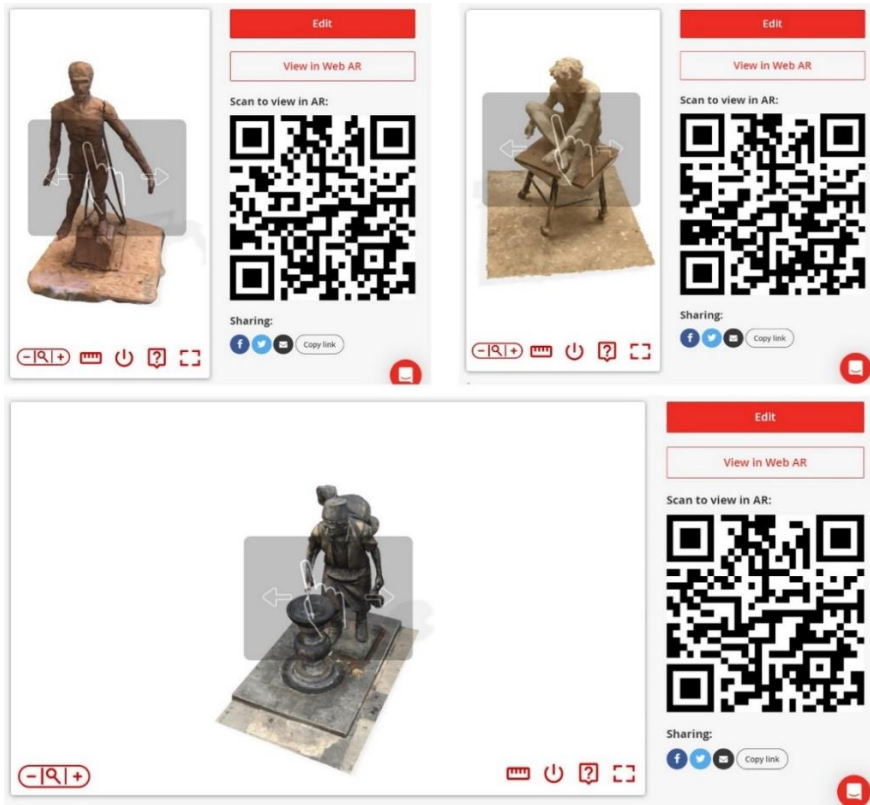
	Fotoğraf Sayısı	Seyrek Nokta Bulutu Sayısı	Yoğun Nokta Bulutu Sayısı	Yüzey/köşe Sayısı	Süre Fotoğraf Çekimi/Fotogrametrik değerlendirme (dakika)
Obje 1	100	28,428	714,947	40,806/20,720	9/28
Obje 2	114	67,840	2,553,223	633,094/366,910	14/54
Obje 3	105	62,397	881,126	584,923/293,067	12/37

Tablo 2 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® Core™ i7-9700K CPU @ 3.60GHz işlemcili 16GB ram kapasiteli, NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB ekran kartına sahip bir masaüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiş olsa da fotogrametrik süreç her objede farklılık göstermiştir. Objeler 2'ye göre daha fazla olmuştur. Bunun sebebi diğer objelere kıyasla daha ayrıntıya sahip olması ve diğer objelerin obje 2'ye göre daha düzenli olması gösterilebilir.

Fotogrametri yöntemiyle üretilen 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı artırılmış gerçeklik temsili, gerçek dünyada 3B nesnelere görselleştirmek ve keşfetmek için güçlü bir araçtır. Fotogrametri, fotoğraflardan 3B modeller oluşturma yöntemidir ve ortaya çıkan dijital ikizler, mimarlık, mühendislik, inşaat ve daha fazlasını içeren çeşitli sektörlerde kullanılabilir. Fotogrametri tabanlı üretilen 3B modeller eserlerin dijital ikizleri olarak WEB tabanlı artırılmış gerçekliğe entegre ederek, kullanıcılar 3B modelleri daha sürükleyici ve etkileşimli bir şekilde deneyimleyebilirler. Bu amaçla üretilen 3B modeller WEB tabanlı augment artırılmış gerçeklik platformuna aktarılmıştır. Kullanıcılar, cihazlarını gerçek dünya ortamına doğru tutarak, gerçek dünyadaki dijital ikizi görebilir ve nesnenin gerçek konumunda gerçekçi bir temsili sağlar. Bu, kullanıcıların nesnelere boyutunu, ölçeğini ve uzamsal ilişkilerini daha iyi anlamalarına yardımcı olabilir ve

potansiyel sorunları belirlemeyi veya tasarım kararları vermeyi kolaylaştırabilir.

WEB tabanlı artırılmış gerçeklik, erişilebilirlik avantajı da sunar. İndirme ve kurulum gerektiren yerel AG uygulamalarının aksine, WEB tabanlı AG'ye basit bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir ve bu da kullanıcıların AG deneyimine erişmesini kolaylaştırır. Ek olarak, WEB tabanlı AG, gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik dağıtımını açısından daha fazla esneklik sunar. Yüksek performanslı cihazlara duyulan ihtiyaç ve yüksek internet hızları gibi ele alınması gereken zorluklar olsa da fotogrametri yöntemiyle üretilen 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı artırılmış gerçeklik temsiline geleceği umut verici görünüyor. Teknolojide devam eden ilerlemeler ve bağlantılı cihaz pazarının büyümesiyle, önümüzdeki yıllarda bu sürükleyici ve etkileşimli deneyimlerin daha fazlasını görmeyi bekleyebiliriz. Çalışmada üretilen yüksek kalitede 3B fotogerçekçi dijital ikizler daha sonra Augment WEB tabanlı AG görselleştirme platformuna yüklenmiştir (**Şekil 8**). **Şekil 9**'da verilen sanal platformdaki dijital ikizler hem karekod okutularak WEB tabanlı görselleştirilebilir hem de artırılmış gerçeklikte kullanılabilir. Çalışmada kullanılan Objeler için, "https://agmt.it/m/6FoSShSR"; Objeler için, "https://agmt.it/m/XsFmOncT"; Objeler için, "https://agmt.it/m/uTAEERfR"; uzantılar da kullanılabilir. Ek olarak **Şekil 9**'da gösterildiği gibi bir telefon veya tablet aracılığı ile dijital ikizler AG olarak sunulabilir.



Şekil 8. Augment WEB tabanlı AG görselleştirme platformundaki dijital ikizler



Şekil 9. Fotogerçekçi dijital ikizlerin Augment uygulamasında mobil AG ile görselleştirilmesi

4 Sonuçlar

Dijital ikiz, tasarım ve simülasyon, denetim ve eğitim dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilen fiziksel bir nesnenin veya sistemin sanal bir temsidir. Dijital ikiz, gerçek zamanlı olarak veri toplamak ve performansı izlemek için kullanılabilen fiziksel nesnenin veya sistemin sanal bir kopyasının oluşturulmasına izin verir. Dijital ikiz oluşturmada genellikle CAD tabanlı çizimler kullanılmaktadır. Fakat gerçek fiziksel nesneyi tam ve eksiksiz temsil için fotogerçekçi 3B modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu anlamda fotogrametri tekniği, fotoğraflardan 3B modeller oluşturmaya imkân verdiği için fotogerçekçi 3B model üretiminde oldukça başarılıdır. Fotogrametri ile bir nesnenin farklı açılardan birden fazla fotoğrafını çekerek, nesnenin 3B modelini oluşturmada çeşitli yazılımlar olsa da kullanım amaçlarına göre fotogrametrik yazılımlar farklılık sunabilmektedir. Dijital ikizlerin yaratılmasında özellikle SfM algoritması ile fotogrametrinin kullanımının çeşitli faydaları olmuştur. Birincisi, fotogrametri, özel ekipman veya uzmanlık gerektirmediğinden, 3B modeller oluşturmada uygun maliyetli ve verimli bir yöntemdir. İkincisi, fotogrametri, bu yöntem kullanılarak oluşturulan 3B modeller gerçek dünya verilerine dayandığından, yüksek düzeyde doğruluk sağlar. Fotogrametri, küçük eserlerden binalara, köprülere kadar küçük veya büyük yapılardan ürünler ve parçalar gibi daha küçük nesnelere kadar çok çeşitli nesnelere için dijital ikizlerin oluşturulmasına izin verir. Dijital ikizlerin yaratılmasında fotogrametri kullanımı, süreçlerini, ürünlerini ve hizmetlerini iyileştirmek isteyen kuruluşlar için güçlü bir araçtır. Verimliliği, doğruluğu ve maliyet etkinliği ile fotogrametri, çeşitli amaçlar için kullanılacak dijital ikizler oluşturmak için erişilebilir ve etkili bir yöntem sağlar.

SfM ile fotoğraflardan 3B modeller oluşturma işlemi olan fotogrametri giderek fotogerçekçi dijital ikiz üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretilen 3B modelleri WEB tabanlı artırılmış gerçeklik (AG) ile birleştirerek, kullanıcılar 3B modelleri gerçek dünyada daha sürükleyici ve etkileşimli bir şekilde deneyimleyebilirler. WEB tabanlı AG'de, SfM tabanlı dijital ikizler gerçek dünyanın üzerine bindirilir ve nesnenin gerçek konumunda gerçekçi bir temsili sağlar.

Bu, kullanıcıların nesnelerin boyutunu, ölçüğünü ve uzamsal ilişkilerini anlamasını ve olası sorunları belirlemesini veya tasarım kararları almasını kolaylaştırır.

WEB tabanlı AG, AG'yi daha geniş bir kitleye ulaştırma potansiyeline sahip olsa da ele alınması gereken zorluklar da var. Ana zorluklardan biri, yüksek performanslı cihazlara ve yüksek hızlı internet bağlantılarına duyulan ihtiyaçtır. AG deneyimleri, kaynak yoğun olabilir ve optimum kullanıcı deneyimi sağlamak için yüksek performanslı cihazlar ve yüksek internet hızları gerektirebilir. Diğer bir zorluk da platformlar arası uyumluluk ihtiyacıdır. WEB tabanlı AG deneyimlerine bir WEB tarayıcısı aracılığıyla erişilebilirken, tüm tarayıcılar ve cihazlar AG'yi desteklemez ve sektörde hala bir standardizasyon eksikliği vardır. Bu zorluklara rağmen, WEB tabanlı AG'nin geleceği umut verici görünüyor. AG teknolojisindeki ilerlemeler ve bağlantılı cihaz pazarının büyümesiyle, önümüzdeki yıllarda daha fazla sayıda WEB tabanlı AG deneyimi görmeyi bekleyebiliriz. WEB tabanlı AG, sanal nesnelere gerçek dünyada hayata geçirerek yeni bir etkileşim boyutu sunan, hızla gelişen bir alandır. Erişilebilirliği, esnekliği ve sayısız uygulamasıyla WEB tabanlı AG, daha geniş bir kitleye ulaşma ve dijital dünyayla etkileşim biçimimizi dönüştürme potansiyeline sahiptir. Ele alınması gereken zorluklar olsa da WEB tabanlı AG'nin geleceği parlak görünüyor ve bu alanda sürekli büyüme ve yenilik görmeyi bekleyebiliriz. Ek olarak, WEB tabanlı AG, basit bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebildiği ve indirme veya kurulum gerektirmediği için erişilebilirlik avantajı sunar. Bu, kullanıcıların AG deneyimine erişmesini kolaylaştırır ve gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik sunumu açısından daha fazla esneklik sunar.

Sonuç olarak, SfM ve WEB tabanlı AG'nin birleşimi, gerçek dünyada 3B nesnelere görselleştirmek ve keşfetmek için büyük avantajlar sağlamaktadır. Bağlantılı cihaz pazarının büyümesi ve teknolojiye devam eden ilerlemelerle, önümüzdeki yıllarda bu sürükleyici ve etkileşimli deneyimlerin daha fazlasını görmeyi bekleyebiliriz. Kuruluşlar, fotogrametri ve AG'nin gücünden yararlanarak doğru, sürükleyici ve erişilebilir dijital ikizler

oluşturabilir ve bunları daha iyi kararlar almak, süreçleri iyileştirmek ve ürün ve hizmetlerini geliştirmek için kullanılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %9

Kaynaklar

- [1] M. W. Grieves, Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. <https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200>.
- [2] F. Tao, H. Zhang, A. Liu and A. Y. Nee, Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15 (4), 2405-2415, 2018. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- [3] X. Zheng, J. Lu, and D. Kiritsis, The emergence of cognitive digital twin: vision, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 60 (24), 7610-7632, 2022. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2014591>.
- [4] F. Tao, N. Anwer, A. Liu, L. Wang, A. Y. Nee, L. Li, and M. Zhang, Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0. *Journal of manufacturing systems*, 58, 1-2, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.005>.
- [5] K. Y. H. Lim, P. Zheng and C. H. A. Chen, State-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 1313-1337, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.
- [6] B. Carrión-Ruiz, S. Blanco-Pons, A. Weigert, S. Fai and J. L. Lerma, 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, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-367-2019>
- [7] R. F. Grasso, F. Andresciani, C. Altomare, G. Pacella, G. Castiello, M. Carassiti and B. Beomonte Zobel, Lung Thermal Ablation: Comparison between an Augmented Reality Computed Tomography (CT) 3D Navigation System (SIRIO) and Standard CT-Guided Technique. *Biology*, 10 (7), 646, 2021. <https://doi.org/10.3390/biology10070646>.
- [8] ISO/DIS 23247-1., Automation systems and integration–Digital Twin framework for manufacturing–Part 1: Overview and general principles, 2020.
- [9] C. Wang, Y. K. Cho and C. Kim, Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. *Automation in Construction*, 56, 1–13, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.001>.
- [10] Y. Yin, P. Zheng, C. Li and L. Wang, A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 81, 102515, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102515>.
- [11] E. J. Tuegel, A. R. Ingrassia, T. G. Eason and S. M. Spottswood, Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>.
- [12] J. Wilhelm, C. Petzoldt, T. Beincke and M. Freitag, Review of digital twin-based interaction in smart manufacturing: Enabling cyber-physical systems for human-machine interaction. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34 (10), 1031-1048, 2021. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1963482>.
- [13] G. Wiegand, C. Mai, Y. Liu and H. Hußmann, Early take-over preparation in stereoscopic 3d. In *Adjunct proceedings of the 10th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*, 142-146, 2018, September.
- [14] N. Kikuchi, T. Fukuda and N. Yabuki, Future landscape visualization using a city digital twin: Integration of augmented reality and drones with implementation of 3D model-based occlusion handling. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(2), 837-856, 2022. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac032>.
- [15] M. Yakar ve Y. Doğan, Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı fotogrametrik rölevo alımı ve üç boyutlu modelleme çalışması. *Geomatik*, 2 (1), 11-17, 2017. <https://doi.org/10.29128/geomatik.296763>.
- [16] A. Kabadayı ve A. Erdoğan, Application of terrestrial photogrammetry method in cultural heritage studies: A case study of Seyfeddin Karasungur. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 62-67, 2022. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1200146>.
- [17] F. Pulat, M. Yakar ve A. Ulvi, Three-dimensional modeling of the Kubbe-i Hasiye Shrine with terrestrial photogrammetric method. *Cultural Heritage and Science*, 3(1), 6-11, 2022.
- [18] N. Polat, M. Önal, Y. Kaya, A. Memduhoğlu, N. Kaya, M. Ulukavak, S. Mutlu ve S. Mutlu, Harran Ören Yeri kazısında bulunan kabartma yazıların üç boyutlu olarak modellenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 594-601, 2021. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.881781>.
- [19] O. Mırdan ve M. Yakar, Tarihi eserlerin insansız hava aracı ile modellenmesinde karşılaşılan sorunlar. *Geomatik*, 2 (3), 118-125, 2017. <https://doi.org/10.29128/geomatik.306914>.
- [20] H. İ. Şenol, F. B. Ernst ve S. Akdağ, Kentsel dönüşüm alanlarının geotasarım yöntemi ile planlanması: Eyyübiye örneği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3 (3), 63-69, 2018.
- [21] A. Şasi ve M. Yakar, Photogrammetric modelling of hasbey dar'ülhuffaz (masjid) using an unmanned aerial

- vehicle. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3 (1), 6-11, 2018. <https://doi.org/10.26833/ijeg.328919>.
- [22] A. Erdoğan, A. Kabadayı ve E. S. Akın, Kültürel Mirasın Fotogrametrik Yöntemle 3B Modellenmesi: Karabıyık Köprüsü Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3 (1), 23-27, 2021. <https://doi.org/10.51534/tiha.911147>
- [23] S. M. Sepasgozar, Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*, 10 (13), 4678, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10134678>.
- [24] M. Mohammadi, M. Rashidi, V. Mousavi, A. Karami, Y. Yu, and B. Samali. Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study. *Remote Sensing*, 13 (17), 3499, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13173499>.
- [25] X. Kong, and R. G. Hucks, Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures. *Automation in Construction*, 152, 104928, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104928>.
- [26] K. Themistocleous, E. Evagorou, C. Mettas and D. Hadjimitsis. The use of digital twin models to document cultural heritage monuments. In *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XIII*, 12268, 55-64, 2022. <https://doi.org/10.1117/12.2636332>.
- [27] P. N. Zakharov, A. V. Zhdanov, D. N. Lapaev, P. V. Strelkov and S. O. Maslov, The practice of using digital twins and augmented reality technologies for visualization of innovative products and technologies of enterprises in the region. *Growth Poles of the Global Economy: Emergence, Changes and Future Perspectives*, 1325-1333, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15160-7_135.
- [28] I. Verner, M. Reitman, D. Cuperman, T. Yan, E. Finkelstein and T. Romm, Exposing robot learning to students in augmented reality experience. In *Smart Industry & Smart Education: Proceedings of the 15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation 15*, 610-619. Springer International Publishing, 2019.
- [29] G. Koutitas, J. Jabez, C. Grohman, C. Radhakrishna, V. Siddaraju and S. Jadon, Demo/poster abstract: XReality research lab—Augmented reality meets Internet of Things. In *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 1-2, 2018, April.
- [30] Z. Wang, K. Han and P. Tiwari, Digital twin-assisted cooperative driving at non-signalized intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 7 (2), 198-209, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIV.2021.3100465>.
- [31] P. Wisely, Digital twinning within a novel human-in-the-loop verification method for HUD safety-critical approach and landing. In *Virtual, Augmented, and Mixed Reality (XR) Technology for Multi-Domain Operations II*, 11759, 124-135, 2021, April.
- [32] P. A. Cruz Franco, A. Rueda Márquez de la Plata, and E. Gómez Bernal. Protocols for the graphic and constructive diffusion of digital twins of the architectural heritage that guarantee universal accessibility through AR and VR. *Applied Sciences*, 12(17), 8785, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12178785>.
- [33] K. Kraus, *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. de Gruyter, 2007. <https://doi.org/10.1515/9783110892871.47>.
- [34] I. Marzloff, J. Ries, S. E. W. Aber and J. S. Aber, *Small-format aerial photography: principles, techniques and geoscience applications*, 2019. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03506-4>.
- [35] M. E. Oruç, Küçük objelerin modellenmesinde videogrametri ve fotogrametri yöntemlerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3 (2), 62-68, 2021. <https://doi.org/10.53030/tufod.1019385>.
- [36] S. N. G. Hamal ve A. Ulvi, Su altı fotogrametri yöntemi ve kullanım alanı üzerine bir literatür araştırması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 60-71, 2020.
- [37] M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey and J. M. Reynolds, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 179, 300–314, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- [38] K. Anderson, M. J. Westoby and M. R. James, Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43 (2), 163–173, 2019. <https://doi.org/10.1177/0309133319837454>.
- [39] D. Fidan, M. E. Oruç, S. N. G. Hamal and Ş. Fidan, Tersine Mühendislik Uygulamalarında Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanım Olanaklarının Araştırılması; Klasik Otomobiller Örneği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4 (1), 1-10, 2022.
- [40] M. W. Smith, J. L. Carrivick, and D. J. Quincey, Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40 (2), 247-275, 2016. <https://doi.org/10.1177%2F0309133315615805>.
- [41] H. İ. Şenol ve Y. Kaya, İnternet tabanlı veri kullanımıyla yerleşim alanlarının modellenmesi: çiftlikköy kampüsü örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1 (1), 11-16, 2019.
- [42] S. N. G. Hamal, B. Sarı ve A. Ulvi, Using of hybrid data acquisition techniques for cultural heritage a case study of Pompeiopolis. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2 (2), 55-60, 2020.
- [43] S. D. Uzun, S. N. G. Hamal ve Ş. Fidan, Elde taşınabilir lazer tarayıcılar ile insan yüzünün modellenerek güzellik ve bakım sektöründe kullanımının değerlendirilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4 (1), 17-20, 2022. <https://doi.org/10.51946/melid.1131186>.

- [44] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle and J. Boehm, Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (3rd edition). Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [45] B. Sarı, S. N. G. Hamal ve A. Ulvi, Documentation of complex structure using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry method and Terrestrial Laser Scanner (TLS). Türkiye Lidar Dergisi, 2 (2), 48-54, 2020.
- [46] Y. Kaya, H. İ. Şenol ve N. Polat, Three-dimensional modeling and drawings of stone column motifs in Harran Ruins. Mersin Photogrammetry Journal, 3 (2), 48-52, 2021. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1012937>.
- [47] A. Memduhoglu, H. İ. Şenol, S. Akdağ ve M. Ulukavak, 3D Map Experience for Youth with Virtual/Augmented Reality Applications. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 5(3), 175-182, 2020. <https://doi.org/10.46578/humder.771954>.
- [48] M. Yakar, H. M. Yılmaz ve Ö. Mutluoğlu, Close range photogrammetry and robotic total station in volume calculation. International Journal of the Physical Sciences, 5 (2), 86–96, 2010.
- [49] N. Polat ve Y. Kaya, 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, 2021. <https://doi.org/10.51534/tiha.829656>.
- [50] H. M. Yılmaz, M. Yakar, S. A. Gulec ve O. Dulgerler, Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. Journal of Cultural Heritage, 8 (4), 428-433, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.07.004>.
- [51] M. Yakar, Using close range photogrammetry to measure the position of inaccessible geological features. Experimental Techniques, 35 (1), 54-59, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.17471567.2009.00583.x>.
- [52] F. Remondino and S. Campana, 3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage. BAR international series, 2598, 111-127, 2014.
- [53] C. Sweeney, Theia vision library, 2016. URL <http://www.theia-sfm.org/sfm.html>.
- [54] R. G. Boboc, F. Gîrbacia and E. V. Butilă, The application of augmented reality in the automotive industry: A systematic literature review. Applied Sciences, 10 (12), 4259, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10124259>.
- [55] U. Gürel, Artırılmış gerçeklik yardımı ile öğrenme deneyimi. Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi, 2 (1), 42-45, 2021.
- [56] H. Thwaites, 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, 2013.
- [57] D. W. F. Van Krevelen and R. A. Poelman, Survey of augmented reality technologies, applications and limitations. International journal of virtual reality, 9 (2), 1-20, 2010.
- [58] A. Atanasyan and J. Rossmann, An architecture for ar-based human-machine interaction with application to an autonomous mobile robot platform. In ISR 2020; 52th International Symposium on Robotics. 1-6, 2020, December.
- [59] S. Discher, R. Richter and J. Döllner, Concepts and techniques for web-based visualization and processing of massive 3D point clouds with semantics. Graphical Models, 104, 101036, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2019.101036>.
- [60] A. Prouzeau, Y. Wang, B. Ens, W. Willett and T. Dwyer, Corsican twin: Authoring in situ augmented reality visualisations in virtual reality. In Proceedings of the international conference on advanced visual interfaces, 1-9, 2020, September.
- [61] B. Demirezen, Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojisinin turizm sektöründe kullanılabilirliği üzerine bir literatür taraması. Uluslararası Global Turizm Araştırmaları Dergisi, 3 (1), 1-26, 2019.
- [62] F. Bilici, Pazarlamada artırılmış gerçeklik ve karekod teknolojileri: tüketicilerin artırılmış gerçeklik teknoloji algılamaları üzerine bir alan araştırması (Doktora tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye, 2015.
- [63] F. N. Koç, Dijital pazarlamanın metaverse fenomenine sunduğu fırsatlar ve sınırlılıklar: Tekstil sektörü incelemesi Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2023.
- [64] İ. Demirbağ, Üç boyutlu sanal dünyalar. Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi, 6 (4), 97-112, 2020.

