Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi® www.esosder.org
Electronic Journal of Social Sciences® ISSN:1304-0278
Nisan/April(2023) - Cilt/Volume:22 - Sayı/Issue:86 (520-533)

ARKEOLOJİK ESER BELGELEMELERİNDE TERSİNE MÜHENDİSLİK UYGULAMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA: BEÇİN KALESİ KAZISI KÜÇÜK ESERLERİ

A STUDY ON THE APPLICATION OF REVERSE ENGINEERING FOR DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL ARTIFACTS: SMALL ARTIFACTS OF BEÇİN CASTLE EXCAVATION

Göknil ARDA[1]

Öz

Arkeolojik kazılarda ortaya çıkarılan pişmiş topraktan kapların yanı sıra çeşitli malzemelerden yapılmış üretimleri sınıflandırma, tanımlama ve yorumlama yöntemleri arkeolojik alanların tarihlendirme çalışmaları için çok önemlidir. Bu çalışmada Beçin Kalesi'nde bugüne kadar yapılmış arkeolojik çalışmalarda ortaya çıkarılmış buluntulardan 2018-2019 yılına ait bir grup eser incelenmiştir. 3D tarayıcı kullanmak suretiyle etüdlük ve envanterlik nitelikteki pişmiş toprak, metal, cam vb eserlerin bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak fotoğraf görüntüleri alınmış ve çizimleri yapılmıştır. Eser, bu sistemler kullanılarak sayısallaştırılır ve CAD modeli oluşturulmaya hazır hale getirilir. 3D modeller aynı zamanda üretilecek 3 boyutlu bir cismin temelini oluştururlar ve 3D yazıcılar tarafından gerçek bir objeye dönüştürülürler. Katı modelleme, modellenecek cismin gerçek hacmiyle birlikte görüntüsünü yansıtır. Yüzey modellemede ise hacim modellenmez. Sadece var olan objenin kabuksu kısmı sınır teşkil etmesi açısından modellenir. Bu tarz modeller daha kolay ortaya çıkar ancak üretim için katı modelleme kadar yeterli değildir. Arkeolojik buluntuların yukarıda bahsedilen 3D tarayıcıyla belgelenmesi ve tersine mühendislik uygulaması ile tümlenmesi sayesinde, ünik eserlerin çizim vb çalışmalar sırasındaki olası mekanik ve kimyasal hasarları önlenebilmektedir. Beçin Kalesi Kazısı eserlerinin bu yöntemle belgeleme çalışmalarının tamamlanmasından sonra, seçilen tersine mühendislik yöntemiyle yazdırma ve tümleme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu buluntuların 3D tarayıcı ile belgelenmesi çalışması, temassız olarak algılanan objelerin ≥ 0,05 mm hassasiyetle orijinal ölçeklerinde sayısallaştırılması ve yeniden oluşturulması yoluyla özellikle kazı sonucunda ele geçen tek örnek (*uniq*) malların belgelenmesi, korunması, saklanması ve eserlerle ilgili bilginin sonraki nesillere doğru bir şekilde aktarılmasında önemli ve tartışılmaz bir katkı sağlayacağını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: 3D Tarama, Beçin Kalesi, 3D Tarayıcı, 3D Restorasyon, Tersine Mühendislik.

Abstract

Classification, description and interpretation methods of the ceramic vessels as well as the products made of metal, glass etc. unearthed during the archaeological excavations are very important tools for dating archaeological sites. In this study, from the finds uncovered during the archaeological excavations of Beçin Castle, which have been carried out until today a group of artifacts found in the years 2018-2019 was examined. The three-dimensional digital images of ceramic, metal, glass artifacts selected for inspection and inventory were taken in computer environment by using 3D scanner and their drawings were made. Using these systems object is digitized and become ready for CAD design. 3D models serve also as the basis of the three-dimensional objects to be produced and are converted to solid objects by 3D printers. Solid modeling represents the actual volume and the appearance of the object to be modeled. On the other hand, in surface modeling volume is not modeled. Only the shell of the physical object is modeled to represent the boundaries. This type of models is created more easily but doesn't completely suffice for production in comparison to solid modeling. By means of documentation of archaeological findings using above mentioned 3D scanner and completing/reproducing them using 3D printers, potential mechanical and chemical damages which may occur in the unique artifacts during the performance of the studies such as drawing etc. can be avoided. After finishing the documentation studies of artifacts obtained from the Excavation in Beçin Castle with this method, 3D printing and completion/reproduction trials were performed in selected groups. This study based on the non-contact 3D scanning method through digitization and reconstruction of the objects in original scales with a sensitivity of ≥ 0,05 mm showed that this method makes a significant and indisputable contribution to documentation, protection, preservation of the especially unique objects obtained in the excavation and passing down the artifacts and their information to future generations accurately.

Keywords: 3D Scanning, Beçin Castle, 3D Scanner, 3D Restoration, Reverse Engineering.

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Ardahan Üniversitesi, İnsani Bilimler ve Edebiyat Fakültesi, Tarih Bölümü, Eskiçağ Tarihi Anabilim Dalı, goknilarda@ardahan.edu.tr, Orcid: 0000-0003-3643-8787

Makale Türü: Araştırma Makalesi – Geliş Tarihi: 21.11.2022 – Kabul Tarihi: 11.03.2023

DOI:10.17755/esosder.1208213

Atıf için: Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 2023;22(86): 520-533

GİRİŞ

Arkeolojik kazı ve araştırma çalışmaları sırasında taş, kil, metal, cam vd. malzemelerden üretilmiş alet, çanak çömlek, figürin, heykel, süs eşyası gibi çeşitli obje ve nesnelerle karşılaşılmaktadır. Bütün bu buluntuların iyi yapılmış bir belgelemesi değerlendirme aşamasında çalışmalara en önemli katkıyı sağlamaktadır. Bunların arasında en yoğun ele geçen malzeme grubu olarak çanak çömlek üzerinden örnek verildiğinde: seramiklerin çizimleri sonrasında tipolojisi yapılarak işlevleri belirlenebilir. Buluntu merkezindeki seramik yoğunluğu, yerel ve ithal seramik gruplarının varlığı ortaya konulabilir. Buluntu merkezinin diğer kültür bölgeleri ile ilişkileri ve etkileşimleri saptanabilir. Bu sorulara çanak çömlek dışındaki diğer buluntu gruplarının da benzer şekilde incelenmesi ve değerlendirilmesiyle cevap bulunabilir (Arda, 2010; Arda, 2011_a; Arda, 2011_b; Arda, 2012).

Gün yüzüne çıkartılan arkeolojik eserlerin belgelenmesinde fotoğraflama ve tanımlamanın yanı sıra en önemli aşamalardan biri, çizimdir (Türkoğlu, 2020). İlk olarak arkeolojik kazı alanında kayıt altına alınan eserler kazı evine getirilir; gerekli temizlik çalışmalarından sonra çizimleri yapılır. Eser çizimi bilimsel çalışmaların en hassas ve dikkat gerektiren kısmıdır. Çünkü esere ait en ufak bir yanlış çizim yukarıda bahsedilen konularda hatalı sonuçlara ve yorumlamalara neden olabilir. Çizimler önce kâğıt üzerine elde, sonra da bilgisayar ortamına aktarılmak suretiyle çeşitli çizim programları kullanılarak yapılmaktadır. Elde yapılan çizimler uzun soluklu ve sabır gerektiren çalışmalardır. Kazı ekibindeki herkes gerek lisans eğitimleri sırasında gerekse kazıda bulundukları süre içinde çizim tekniklerini öğrenir ve geliştirirler. Ancak el hassasiyetinin de önem taşıdığı bu çizim çalışmalarında teknikleri bilmekle birlikte herkes aynı derecede başarılı olamamakta, çizim faaliyetlerinden uzak durmaya çalışmaktadır. Genelde az sayıda kişiyle yürütülmeye çalışılan eser çizim çalışmaları hem hızlı olmayı gerektiren hem de zaman alan çalışmalardır. Belgeleme çalışmalarında, hatalı/yanlış çizim kaynaklı sorunlar ve buluntuların dayanıklılık sorunlarıyla da karşılaşılmaktadır. Eserler uzun süre toprak altında kalıp gün yüzüne çıkartıldığında her ne kadar koruma uygulamaları yapılsa da hızlı bir şekilde nem kaybederler, bu durum eserlerin kırılganlığını etkileyerek parçalanmasına neden olabilmektedir. Buluntularda, özellikle ünik eserlerde çizim sırasında kullanılan aletler, belgelemenin bir diğer aşaması olan fotoğraf çekimi ile restorasyon çalışmalarında da mekanik ve kimyasal hasarlar oluşabilmektedir. Arkeolojik buluntuların belgelemesinin 3D tarayıcıyla yapılması ve tersine mühendislik uygulamasıyla tümlenmesi, eserlerin çizim, restorasyon vd. belgeleme çalışmaları sırasında yaşanabilecek mekanik ve kimyasal hasarlarını önleyebilecektir (Uslu, 2016; Uslu, Uysal, 2017; Archeorient, 2018).

2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu-Korunması Gerekli Taşınır Kültür ve Tabiat Varlıkları Madde 23 ve 24'de ayrıntılı tanımı yapılan taşınır kültür varlıkları ile ilgili çalışmalar hakkında aynı Kanun, Madde 34'de *"Kültür ve Turizm Bakanlığına bağlı ören yerleri ve müzelerdeki taşınır ve taşınmaz kültür varlıklarının öğretim, eğitim, bilimsel araştırma ve tanıtma amacı ile fotoğraflarının ve filmlerinin çekilmesi, mulaj ve kopyalarının çıkartılması Kültür ve Turizm Bakanlığının iznine bağlıdır."* ifadesi yer almaktadır. Son yıllarda özellikle gelişim gösteren bu teknoloji gelecekte daha pratik ve ekonomik şartlarda kültürel mirasın korunması ve kollanmasında çok büyük bir katkı sağlayacaktır. Arkeolojik çalışmalarda kullanılması mutlaka gerekli olan 3D tarama yöntemleri, bilhassa küçük eser envanteri yapılırken en doğru sonuca, esere verilecek en az zararla çok kısa bir sürede ulaşmayı sağlamaktadır. Küçük eser restorasyonu uygulamalarında 3D yazıcılarla birlikte kullanıldığında ise daha sağlıklı çalışmaların ortaya çıkacağı bir gerçektir. Eserlerde geleneksel *CAD* yöntemleriyle modellenmesi uzun zaman ve tecrübe isteyen serbest yüzeylere sahip modellerin optik tarayıcılarla ile taranıp tersine mühendislik programı ile yüksek hassasiyetle modellenmesine imkanlar dahilinde çalışılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. 3D teknolojisi

CAD yetisini başlangıç veya orta seviyeden daha ötesine ilerletmek isteyen arkeolojik kazı ekibi, arkeoloji ve sanat tarihi bölümlerinde okuyan öğrenciler için ileri bir CAD tecrübesi, yeni teknolojiler ve yöntemler sunmaktadır. Böylece taşınabilir kültür varlıklarının modellerinin Tersine Mühendislik tekniği ile elde edilmesi, gerekli değişikliklerin, yeniliklerin yapılması gibi bilgi ve beceriler kazanılabilir.

1. Beçin Kalesi Kazısı Küçük Eserleri: Belgeleme için 3D Tarama ve Tersine Mühendislik Uygulaması Üzerine Bir Çalışma

Bir nesnenin lazer ve optik yöntemlerle 3D tarama cihazları kullanılarak sayısallaştırılması ve farklı formatlarda bilgisayara atılması üç boyutlu tarama ile gerçekleştirilir. Bu işlemler esnasında taranacak nesnenin gönderilen ışık topu ile genel hatlarının tanımlaması yapılır ve merkezi nokta bulutları oluşturulur (Matter and Form, 2017; Üç Dörtgen, 2020; Metatechtr, 2021; 3D3 Technology, 2018). Bir objenin 3D modelini oluşturmak, objeyi en küçük ayrıntılarına kadar modellemek, gerçek yapıyı 3D modeliyle ilişkilendirerek haritalamak gibi amaçlarla kullanılan üç boyutlu sayısallaştırma-tarama işlemi (Işık, 2020; Taubin vd., 2014; Chaudhary vd., 2018), kısaca dokunmalı ve dokunmasız yöntemler kullanarak iş parçalarından sayısal veri toplamak için uygulanan bu sistemde var olan fiziksel bir objenin üç boyutlu bilgisayar modelini elde etme yöntemi olarak açıklanabilir (Broggiato vd., 2001). 3D modeller aynı zamanda üretilecek üç boyutlu bir cismin temelini oluştururlar ve 3D yazıcılar tarafından gerçek bir objeye dönüştürülürler. 3D sayısallaştırma çözümlerinde, iş parçalarının yüksek çözünürlükteki CCD *(Charge Coupled Device)* kameralar aracılığıyla çeşitli açılardan elde edilen görüntüleri gelişmiş fotogrametri tekniklerini kullanan özel bir yazılım ile üç boyutlu standart veri formatlarına dönüştürülmektedir. Üç boyutlu optik taramada kâğıt veya markalama kullanmadan yapılan ölçümlerde veri kaybı yaşanmamakta; kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda ise *indeks mark* olarak adlandırılan bu markaların altında kalan bölgelerde de yüksek kaliteli sonuçlara ulaşılabilmektedir. Tarama işleminde sayısallaştırılmış gerçek nesne ile dijital hali arasında, taranacak nesnenin yüzeyinin parlak, kirli, girintili çıkıntılı olması, taranacak yüzeyin alanının büyüklüğünün artmasına bağlı olarak hacmin de artması vb. sebepler bazen hata oranının fazlalaşmasına neden olabilmektedir (Akdoğan vd., 2003; Görür, 2003). Bu olası durumlar lazer verisinde kullanılan yazılımlarla filtre edilebilmekte; oluşan parazitler azaltılabilmektedir (Olympos Tasarım, 2003).

Tersine mühendislik *(reverse engineering)* ise var olan bir nesnenin üç boyutlu uzayda sayısal tasarım bilgilerinin - *CAD (Computer Aided Design)* verisi - bulunmadığı durumlarda nesneyi yeniden geliştirebilmek veya üretebilmek için ürünün *CAD* verisinin elde edilmesidir (Önçağ vd., 2018). Tersine mühendisliğin adımlarından biri olan üç boyutlu tarayıcıda nesnenin yapısı analiz edilir. Tersine mühendislik ve uzaktan algılama uygulamaları 3D sayısallaştırma tekniklerini kullanarak bir iş parçasına ait nokta bulutu verilerinin – mimari, arkeolojik alan, tarihi yapılar (Barcelo vd., 2003; Benavides López vd., 2016; Lo Brutto, Meli, 2012) ve objelerin modellemesi (Campana, 2014; Mergen, 2019; Solvotek, 2022; Archäologie Online, 2020; Georgieva, 2013), endüstriyel parçalar vb. – toplanmasını ve *CAD* modelinin yaratılmasını mümkün kılar (Hatzopoulos vd., 2017; Kayalıoğlu, 2020; The Pipettepen, 2020).

Makaleye konu çalışma "Beçin Kalesi Kazısı Buluntularının Lazer Tarayıcı Teknolojisi Kullanılarak Dokümantasyonu ve Değerlendirilmesi" projesi (Ardahan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No. 2017/013) kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Muğla İli Milas İlçesi'ne yaklaşık 5 km mesafedeki Beçin Kalesi, antik dönemde Karia (Caria) olarak adlandırılan bölgede yer almaktadır. Tarih öncesi dönemler ile antik dönemler, Anadolu Beylikleri ve Osmanlı dönemlerinin yaşandığı bir yerleşim yeri, 13.

yüzyılın ikinci yarısından-15. yüzyılın başlarına kadar Menteşe Beyliği'nin yönetim merkezlerinden biri olan Beçin Kalesi 2012 yılında UNESCO Dünya Mirası Geçici Listesine alınmıştır (Apaydın, 2022; Muğla İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2022).

Beçin Kalesi 2018-2019 yılı kazı çalışmalarında elde edilen etütlük nitelikteki bir grup buluntuya 3D tarama yöntemi kullanılmak suretiyle belgeleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamanın teknik aşamaları ve elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Birinci aşamada 3D tarama için kullanılacak makinenin montajı yapılıp çalışmaya hazır hale getirilmiştir. 3D tarayıcı cihazının çalışması ve taramaların kaydedilmesi için bilgisayar ile bağlantı kurularak gerekli bilgisayar yazılımının kurulumu yapılmıştır (Şekil 1).

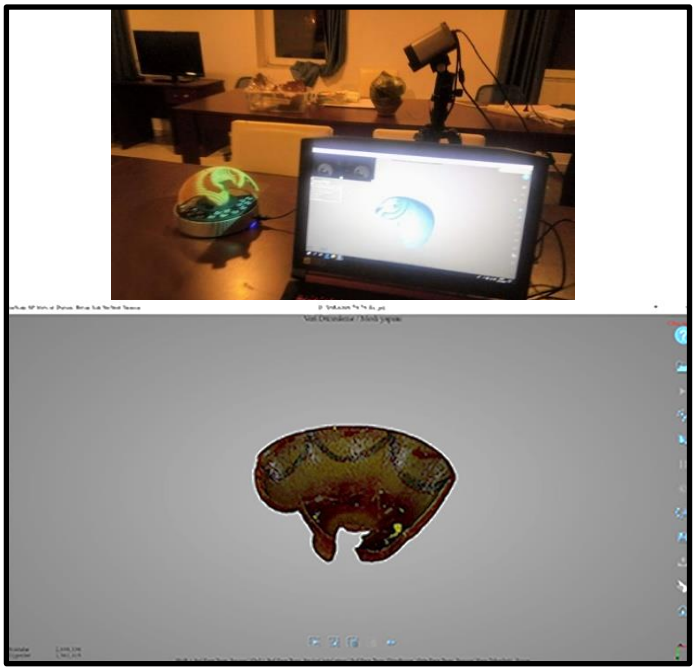


Şekil 1. 3D tarayıcı (G. Arda arşivi).

İkinci aşama olan sayısallaştırmada, aynı kaba ait seramik parçalarının restoratör tarafından tümlemeye yönelik birleştirildiği kâseye (Şekil 2), 3D tarayıcı ile 8 turlu standart dönüşlü tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada taranan obje 2.648.136 adet/nokta, 2.562.315 adet/üçgen poligon bulut olarak sayısallaştırılmıştır (Şekil 3).

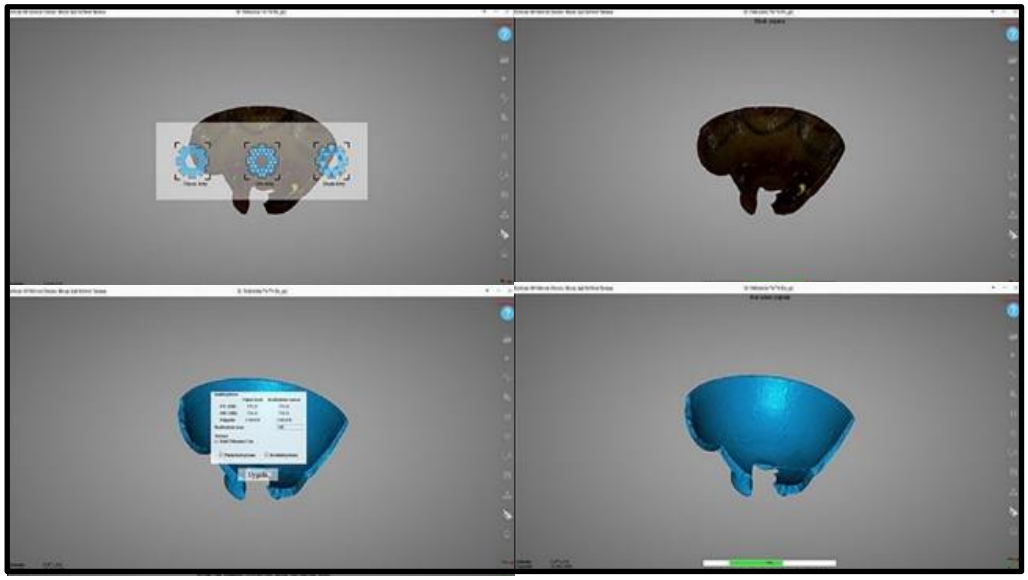


Şekil 2. Kırık parçaları birleştirilmiş kâse.



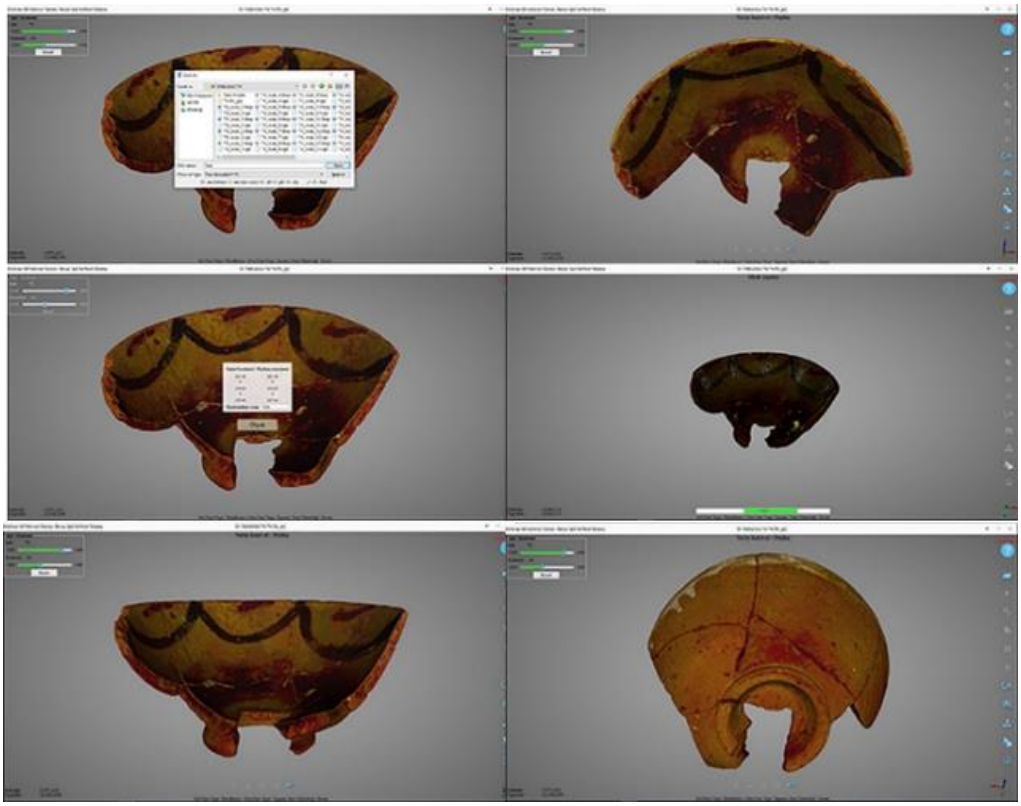
Şekil 3. Kâsenin 3D tarayıcı ile taranarak sayısallaştırılması.

Sayısallaştırmadan sonraki üçüncü aşama ise sayısal bulut taramanın noktalarının birleştirilmesidir *(Mesh)*. Bu aşamada tarama sonucu elde edilen nokta/üçgen bulutunun aralarında bulunan boşlukların ağ örgü olarak 5.971.944 adet/nokta ve 11.943.944 adet/üçgen tamamlaması yapılmıştır (Şekil 4).



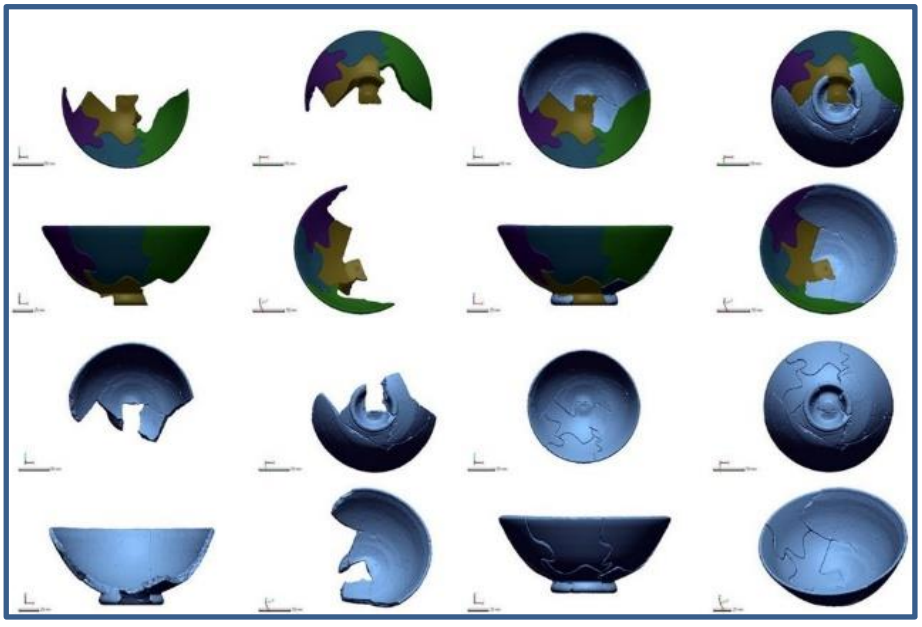
Şekil 4. Sayısallaştırılan objenin boşluklarının tamamlanması.

Dördüncü aşamada, *Mesh* işlemi sonrasında nokta/üçgen poligonların birleşmesiyle tamamlanan çalışma, *obj, ply, stl, mtl, 3mf, jpeg* biçimlerindeki kayıt etme seçenekleriyle işlem ihtiyacı belirlenerek dosyaya kaydedilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. 3D taraması tamamlanan objenin kayıt edilme seçenekleri.

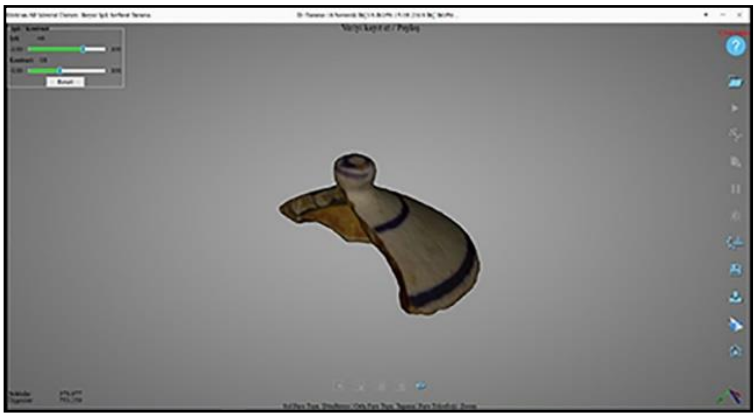
Beşinci aşamada, taranan objenin noktalardan oluşan *mesh* yapısı, hatalarının giderilerek *CAD* modelinin elde edilmesi için tersine mühendislik yazılımına *(Geomagic Design X* ve/veya *Solid Edge)* aktarılmış ve fiziksel modellerin, *CAD* modeli oluşturulmuştur. Ardından mevcut tersine mühendislik yazılımını kullanarak elde edilen model üzerinde yenilikler/geliştirmeler yapılmıştır. Objenin bütünlüğünü sağlayabilmek adına parçalı eskitme ve *mesh*e eskitme uygulanmış; restorasyon için obje tamamlanarak 3D yazıcıdan çıktısı alınacak duruma getirilmiştir. (Şekil 6).



Şekil 6. Tersine mühendislik uygulamasıyla tümlenen eserin tasarım görüntüleri.

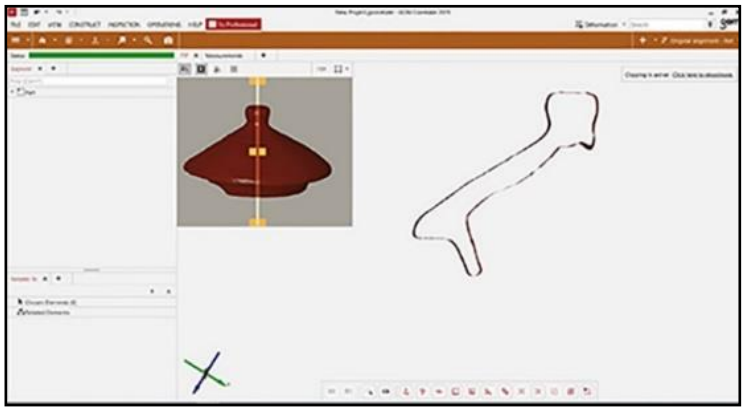
Tersine mühendislik ve 3D yazıcıda tamamlama uygulaması ayrı ve pahalı bir işlem olmasının yanı sıra sunulan Bilimsel Araştırma Projesinde (BAP) yer almayan bir uygulama olduğu için sadece bir eser üzerinde tersine mühendislik ile restorasyon denemesi yapılabilmiş, ancak 3D yazıcıda tamamlanma işlemi gerçekleştirilememiştir.

Beçin Kalesi'ndeki kazılarda bulunmuş bir kapak parçası örneğinde, 3D tarayıcı ile yapılan çizim uygulaması incelendiğinde; yukarıda da anlatıldığı üzere önce objenin 3D taraması yapılarak sayısallaştırılmıştır (Şekil 7).

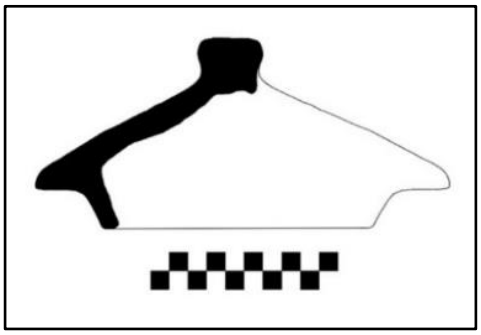


Şekil 7. Sayısallaştırılan obje.

Daha sonra taranan objenin noktalardan oluşan *mesh* yapısı, *CAD* modelinin elde edilmesi için tersine mühendislik yazılımına - *Geomagic Design X, Geomagic Essentials I, Solid Edge, GOM Correlate* - aktarılmıştır. Bu çalışma *GOM Correlate 2019* yazılımının ücretsiz sürümünün izin verdiği ölçüde gerçekleştirilmiş; kesiti alınarak çizim tamamlanmıştır (Şekil 8, 9).

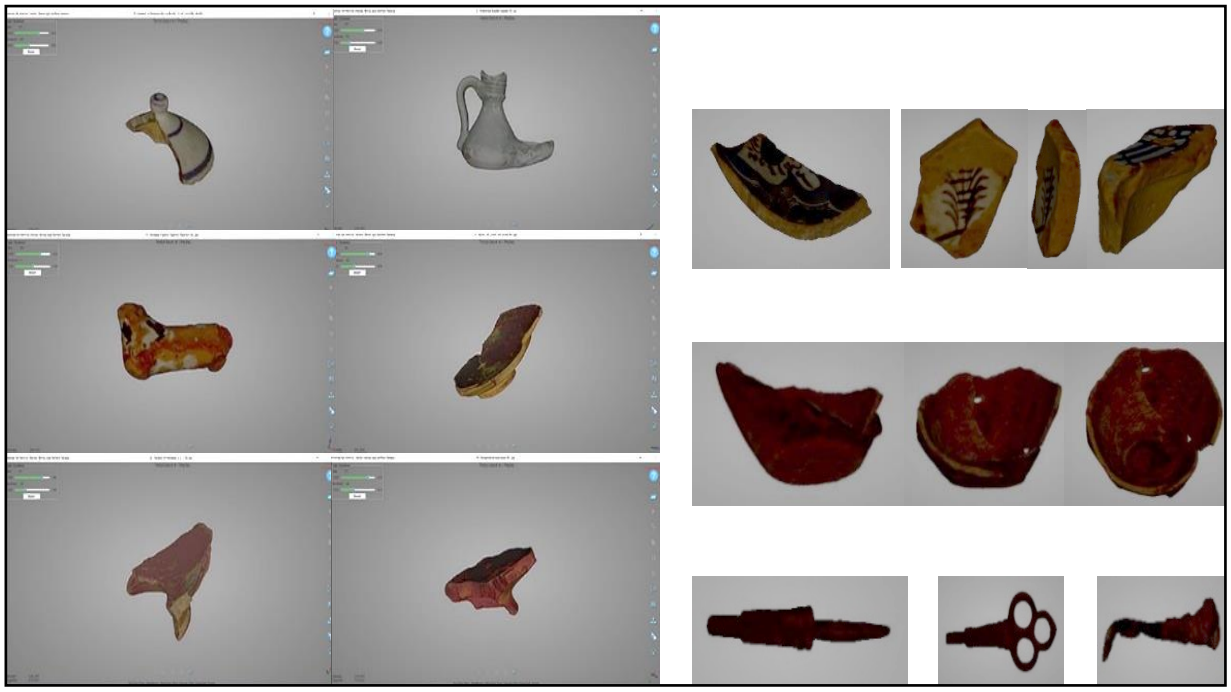


Şekil 8. Tersine mühendislik çalışması.



Şekil 9. 3D tarama ile ölçekli çizim.

Böylece eserin hem kazı arşivi için belgelemesi yapılmış hem de eser bilimsel çalışmalarda kullanılabilecek duruma getirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Beçin Kalesi Kazısı buluntuları-3D tarama örnekleri.

DEĞERLENDİRME ve SONUÇ

Beçin Kalesi Kazısı buluntularından seçilmiş 100 adet etütlük eser, 3D tarama yöntemi kullanılmak suretiyle belgelenmiş, değerlendirme ve restorasyon uygulamalarına yönelik olarak çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada geleneksel *CAD* yöntemleriyle modellenmesi uzun zaman ve tecrübe isteyen serbest yüzeylere sahip modellerin imkanlar dahilinde optik tarayıcılarla taranıp tersine mühendislik uygulaması ile yüksek hassasiyetle modellenmesine çalışılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Spesifikasyonlar büyük ölçüde orijinaliyle aynıdır: doğruluk 0,1 mm, tarama hacimleri otomatik tarama için 200x200x200 mm ve döner tabla olmadan sabit tarama için 700x700x700 mm'dir (Şekil 11).

EinScan-SP SPECS Desktop 3D Scanner

Home / EinScan-SP /

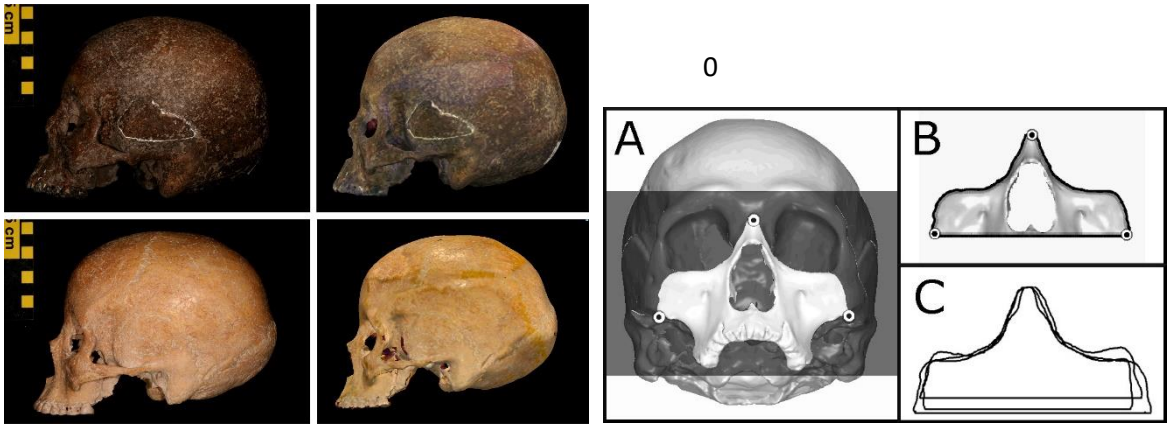
Scan Mode	Fixed Scan with Turntable	Fixed Scan without Turntable
Mode of Alignment	Turntable; Feature; Markers; Manual; Turntable Coded Targets	Feature; Markers; Manual
Single Shot Accuracy	≤0.05 mm	
Minimum Scan Volume	30 × 30 × 30 mm	
Maximum Scan Volume	200 ×200×200mm	700×700×700mm
Range of Single Capture	200×150 mm	
Scan Speed	Single Scan<1 s Turntable<45 s	
Point Distance	0.17 mm ~ 0.2 mm	
Texture	Yes	
File Format	OBJ, STL, ASC, PLY, 3MF	
Camera Resolution	1.3 Mega Pixels	
Light Source	White LED	
Stand-off Distance	290 ~ 480 mm	
Computer Requirements (Required)	USB: 1 ×USB 2.0 or 3.0; OS: Win 7, 8 or 10 (64 bit); Graphic Card: Nvidia series; Graphic memory: > 1G; CPU: Dual-core i5 or higher; Memory: > 8G	
Computer Requirements (Recommended)	Graphic Card: Independent Graphic Card，NVIDIA GTX660 or higher；Graphics memory: > 2 G; CPU: Dual Core I5 or higher；Memory: > 16 G	
Scanner Body Weight	2.5 kg	
Software Included	EXScan S; Solid Edge SHINING 3D Edition	
Dimension	570×210×210 mm	
Power Supply	40 w	
Input Voltage	DC：12 v, 3.33 A	
Calibration Board	HD	
Turntable	Turntable with coded targets	
Load Capacity of Turntable	5 kg	

Şekil 11: Çalışmada kullanılan 3D tarayıcının hassasiyet verileri (Einscan 2023).

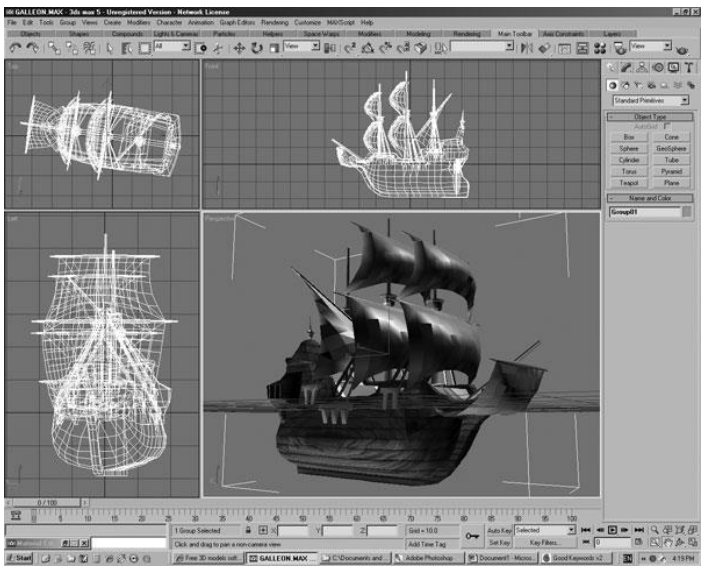
Proje yapıldığı dönemde, Türkiye'deki arkeolojik kazılar içinde 3D tarayıcının kullanıldığı ilk çalışmalardan biridir. Ülkemizde son yıllarda kullanımının daha yaygın olmaya başlamasıyla birlikte özellikle Avrupa ülkelerinde doğruluk oranı çok yüksek olduğundan sıklıkla başvurulan bir yöntem olmuştur (Şekil 12-14).



Şekil 12: 3D tarama örneği, Wehlitz **(**Archäologie Online, 2020).



Şekil 13: 3D modelleme ve çizim örneği **(**Archeorient, 2018).



Şekil 14: 3D modelleme ve çizim örneği **(**Georgieva, 2013).

Bilişim teknolojilerindeki bu hızlı gelişim söz konusu 3D tarayıcının farklı sahalarda kullanımına olanak sağlamıştır. Anadolu Medeniyetleri Müze Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen bir uygulama, buna güzel bir örnek teşkil eder. Söz konusu uygulamada 22 adet tarihi eserin yüksek çözünürlüklü taramaları, modellemeleri yapılmış ve 3D yazıcılardan çıktıları alınmıştır (Anadolu Ajansı, 2022; Arkeolojik Haber, 2022): *"Eserlerin az gören bireyler için de erişilebilir olması amacıyla siyah ve gri zemin üzerinde sarı renk ve üzerinde özel aydınlatmalarla kontrası netleştirildi, sesli betimlemelerle desteklendi. Böylece, Anadolu Medeniyetleri Müzesi'nde yer alan eğitim ve deneyim alanında sergilenen eserlerin modellemeleri, görme engelli bir bireyin esere dokunarak inceleyebilmesi, Braille alfabesiyle hazırlanan açıklamayı okuyabilmesi ve eserin hammaddesinin örneğine dokunarak eseri hissedebilmesi için hazırlandı. Eserler ayrıca, görsel ve işitsel materyallerle de desteklenerek ziyaretçiler için hazır hale getirildi."* (Şekil 15).



Şekil 15: 3D modelleme ve 3D yazdırma çalışması **(**Anadolu Ajansı, 2022; Arkeolojik Haber, 2022).

Bu çalışma, temassız bir şekilde algılanan objelerin ≥ 0,05 mm hassasiyetle, ölçekli olarak sayısallaştırılması yoluyla, özellikle arkeolojik ve etnografik eserlerin, objelerin özellikle de tek, eşşiz, benzeri olmayan *(uniq)* malların belgelenmesi, korunması, saklanması, eserlerin sonraki nesillere doğru bir şekilde aktarılmasını ve bilimsel çalışmalara çok büyük bir katkı sağlayacağını açık bir şekilde göstermiştir.

3D tarama çalışmasıyla, arkeolojik-etnografik buluntuların belgelemesinin 3D tarayıcıyla yapılıp, tersine mühendislik uygulamasıyla tümlenmesi neticesinde eserlerin çizim, restorasyon vd. belgeleme çalışmaları sırasında yaşanabilecek mekanik ve kimyasal hasarlarını önleyebildiği görülmüştür.

Son yıllarda hızlı bir gelişimin izlendiği 3D teknolojisi, gelecekte daha pratik ve uygun ekonomik şartlarda kültürel mirasın korunması ve kollanmasında geniş bir kullanım alanı bulacaktır. Arkeolojik çalışmalarda kullanılması mutlaka gerekli olan 3D tarama yöntemleri özellikle mimari ve küçük eser envanteri ve arşivlemesi yapılırken en doğru

sonuca, esere verilecek en az zararla ve çok kısa bir sürede ulaşmayı sağlamaktadır. 3D taramaları küçük eser restorasyonu uygulamalarına bir altlık oluşturduğu için 3D yazıcılarla birlikte kullanıldığında daha başarılı çalışmaların ortaya çıkacağı bir gerçektir. 3D tarama yöntemleri arkeolojik belgeleme için yüksek doğruluklu sonuçlar ve çözümler sunan bir uygulamadır.

Son dönemlerde sanal turlar, sanal gezinti, sanal müze, e-müze gibi kavramlarla daha sık karşılaşılmaktadır. Kültür eserlerine uygulanacak ve uygulanan 3D modeller bu sanal müze uygulamalarına önemli katkılar sunabilir ve e-tanıtımlarda kullanılabilir. Müzelerdeki arkeolojik, etnografik vd. eserlerin 3D tarayıcı ve yazıcı kullanılmak suretiyle kopyaları hızlı, doğru ve daha düşük maliyetli olarak üretilebilir. Dünya müzelerinde de örneklerini gördüğümüz gibi bu tıpkı üretimlerin gerek hediyelik eşya stantlarında gerekse sanal alışveriş pazarlarında satışının yapılması suretiyle müzelere ve ören yerlerine ayrıca bir ekonomik getiri sağlayabilir.

3D teknolojisi, ileri bir *CAD* tecrübesi, yeni teknolojiler ve yeni yöntemler sunmaktadır. Böyle bir uygulama ile sadece arkeoloji ve sanat tarihi bölümlerinde okuyan öğrencilerin değil, aynı zamanda kazı/araştırma ekibi üyelerinin de *CAD* modelleri bulunmayan parçalara ait *CAD* modellerinin tersine mühendislik uygulaması ile elde edilmesi, gerekli değişikliklerin, yeniliklerin ve geliştirmelerin yapılması vb. 3D uygulamaları hakkında bilgi ve beceriler kazanması hedeflenebilir. Üniversitelerin Arkeoloji, Sanat Tarihi, Kültür Varlıkları Koruma ve Onarım Bölümü ve Eser Koruma bölümlerinde eğitim sırasında verilmekte olan çizim derslerinin yanı sıra 3D tarayıcı, 3D yazıcı, Lidar vd. teknolojik aletlerin kullanılmasına yönelik olarak "Dijital Arkeoloji" adıyla bir dersin lisans ve lisansüstü eğitim müfredatına eklenmesi de faydalı olacaktır.

Kaynakça

Akdoğan, A. B., Görür, V., Yurci, M. E., Durakbaşa, M. N. (2003). Comparsion of Coordinate Measuring Machines Digitizing Capability and an Optical Digitizer. *Proceedings of 4th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration,* 261-269.

Anadolu Ajansı. (2022). Görme engelliler için tarihi eserlerin üç boyutlu modellemeleri hazırlandı. https://www.aa.com.tr/tr/yasam/gorme-engelliler-icin-tarihi-eserlerin-uc-boyutlu-modellemeleri-hazirlandi/2558709, Erişim tarihi: 17.02.2023.

Apaydın, T. D. (2022). Beçin Kalesi Kazısında Ortaya Çıkarılan (2014-2021) Tek Renk Sırlı Seramik Kapların Form Özellikleri. *Sanat Tarihi Yıllığı,* 31, 57-82.

Archäologie Online. (2020). Archaeologische Funde aus Sachsen in 3D. https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/archaeologische-funde-aus-sachsen-in-3d-4542/, Erişim tarihi: 15.10.2022.

Archeorient. (2018). 3D modeling of archaeological object: Advantages, limitations, and applications. https://archeorient.hypotheses.org/6720, Erişim tarihi: 12.06.2022.

Arda, G. (2012). Eski Ahlat Şehri Kazısı 2010 Yılı Seramik İstatistiği ve Tipolojisi. *Uluslararası Katılımlı XV. Ortaçağ ve Türk Dönemi Kazıları ve Sanat Tarihi Araştırmaları Sempozyumu,* 19-21 Ekim 2011, 55-66.

Arda, G. (2011_a). Eski Ahlat Şehri Kazısı 2008-2009 Yılları Seramik İstatistiği ve Tipolojisi. *XIV. Ortaçağ ve Türk Dönemi Kazıları ve Sanat Tarihi Araştırmaları Sempozyumu*, 20-22 Ekim 2010, 19-40.

Arda, G. (2011_b). Eski Ahlat Şehri 2007 Yılı Kazısı Seramiklerinin İstatistiksel Değerlendirmesi. *IV. Uluslararası Van Gölü Havzası Sempozyumu,* 17-21 Haziran 2008, 80-97.

Arda, G. (2010). Eski Ahlat Şehri 2006-2009 Yıllarına Ait Sırsız Seramik Tipolojisi. *XIII. Ortaçağ ve Türk Dönemi Kazıları ve Sanat Tarihi Araştırmaları Sempozyumu,* 14-16 Ekim 2009, 41-48.

Arkeolojik Haber. (2022). Anadolu Medeniyetleri Müzesi yüzüncü yılına engelleri aşarak giriyor. https://www.arkeolojikhaber.com/haber-anadolu-medeniyetleri-muzesi-yuzuncu-yilina-engelleri-asarak-giriyor-35926/, Erişim tarihi: 17.02.2023.

Barceló, J. A., De Castro, O., Travet, D., Vicente, O. (2003). A 3D Model of an archaeological excavation. M. Doerr ve A. Sarris (Ed.). *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology,* Hellenic Ministry of Culture, Archive of Monuments and Publications, Heraklion, 85-87.

Benavides López, J. A., Aranda Jiménez, G., Sánchez Romero, M., Alarcón García, E., Fernández Martín, S., Lozano Medına, Á., Esquivel Guerrero J. A. (2016). 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports,* 10, 495-506.

Broggiato, G. B., Campana, F., Gerbino, S. (2001). Shape deviation analysis on sheet-metal parts through reverse engineering techniques. *Proceedings of the 12th ADM International Conference on Design Tools and Methods in Industrial Engineering,* Sept. 5th-7th, Italy, D3-11.

Campana, S. (2014). 3D modeling in archaeology and cultural heritage-Theory and best practices. F. Remondino ve S. Campana (Ed.). *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage,* BAR International Series, United Kingdom, 7-12.

Chaudhary, D. G., Gore, R. D., Gawali, B. W. (2018). Inspection of 3D Modeling Techniques for Digitization. *International Journel of Computer Science and Information Security (IJCSIS),* 16 (2), 8-20.

Einscan. (2023). SPECS Desktop 3D Scanner. https://www.einscan.com/einscan-sp/einscan-sp-specs/, Erişim tarihi: 17.02.2023.

Georgieva, K. (2013). 3D Modelling in Archaeology. https://computationalarchaeology.wordpress.com/2013/01/20/3d-modelling-in-archaeology/, Erişim tarihi: 12.06.2022.

Görür, B. V. (2003). *Kalıpta Biçimlendirilen Sac Parçaların Geometrik Spesifikasyonları ile Biçim ve Boyut Sapmalarının İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), İstanbul.

Hatzopoulos, J., Stefanakis, D., Georgopoulos, A., Tapinaki, S., Pantelis, V., Liritzis, I. (2017). Use of various surveying technologies to 3D digital mapping and modelling of cultural heritage structures for maintenance and restoration purposes: The Tholos in Delphi, Greece. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 17 (4), 311-336.

Işık, E. (2020). 3D CAD *Yazılımları Kullanarak Üç Boyutlu Tarama Verisi İle Tersine Mühendislik Uygulaması*. Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Kütahya.

Kayalıoğlu, A. C., Hakan, E. (2020). Üç Boyutlu Tarayıcı ve Üç Boyutlu Yazıcı Yardımıyla Seramik Form Şekillendirme. *İdil,* 74, 1533-1540.

Lo Brutto, M., Paola M. (2012). Computer Vision Tools for 3D Modeling in Arcaeology. *Progress in Cultural Heritage Preservation-EUROMED*, 1-6.

Matter and Form. (2017). How do 3D Scanners Work? https://matterandform.net/blog/how-do-3d-scanners-work, Erişim tarihi: 15.10.2022.

Mergen. (2019). Arkeolojik Belgeleme. https://www.mergen3d.com/arkeolojik-belgeleme-ve-lazer-tarama-uygulamalari/, Erişim tarihi: 19.10.2022.

Metatechtr. (2021). 3D tarayıcılar nasıl çalışır? https://store.metatechtr.com/3d-tarayicilar-nasil-calisir, Erişim tarihi: 16.10.2022.

Muğla İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2022). Beçin Kalesi. https://mugla.ktb.gov.tr/TR-177908/becin-kalesi.html, Erişim tarihi: 15.10.2022.

Olympos Tasarım. (2003). 3D Taramanın Genel Prensipleri. https://sites.google.com/a/olympostasarim.com/olympostasarim/3d-taramanin-genel-prensipleri, Erişim tarihi: 22.10.2022.

Önçağ, A. Ç., Tekcan, Ç., Özden, H. (2018). Mekanik Parçaların Tersine Mühendislik ile Modellenmesinin Değerlendirilmesi ve Bir Uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (1), 43-49.

Solvotek, 2022. Arkeolojide 3D Lazer Taramanın Kullanımı, 17 Ekim 2022 tarihinde, https://www.solvo-tek.com/arkeolojide-3d-lazer-taramanin-kullanimi/ adresinden erişildi.

Taubin, G., Moreno, D., Lanman, D. (2014). 3D scanning for personal 3D printing: Build, your own desktop 3D scanner. *Vancouver Siggraph*, http://mesh.brown.edu/desktop3dscan/, Erişim tarihi: 16.10.2022.

The Pipettepen. (2020). Modern Technology, Ancient Past: 3D Modeling in Archaeology. http://www.thepipettepen.com/modern-technology-ancient-past-3d-modeling-in-archaeology/, Erişim tarihi: 02.04.2022.

Türkoğlu, İ. (2020). Arkeolojik Küçük Buluntu Çizimi Teknikleri. Ege Yayınları, İstanbul.

Uslu, A. (2016). *Kültürel Mirasın Üç Boyutlu Modellenmesi ve Web Ortamında Sunulması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Ana bilim Dalı (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Afyonkarahisar.

Uslu, A., Uysal, M. (2017). Arkeolojik Eserlerin Fotogrametri Yöntemi İle Üç Boyutlu Modellenmesi: Demeter Heykeli Örneği. *Geomatik Dergisi*, 2 (2), 60-65.

Üç Dörtgen. (2020). 3D tarama nedir hangi alanlarda kullanılır? https://blog.3dortgen.com/3d-tarama-nedir-hangi-alanlarda-kullanilir/, Erişim tarihi: 16.10.2022.

3d3 Technology. (2018). 3D tarayıcı nedir? 3D tarayıcı seçerken nelere dikkat edilmeli? https://3d3teknoloji.com/blog/3d-tarayici-nedir, Erişim tarihi: 16.10.2022.

Teşekkür

Makaleye konu proje çalışmasına verdikleri izin için Beçin Kalesi Kazı Başkanı Sayın Prof. Dr. Kadir PEKTAŞ'a, destekleri için Ardahan Üniversitesi Rektörlüğü'ne, Arkeolog Alp Oğuz TURAN'a ve çevirmen Nilgün ERCAN'a teşekkürü bir borç bilirim.