

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MİMARİ MİRAS UNSURLARININ DİJİTAL ZANAATI:
13. YY. SELÇUKLU DÖNEMİ CAMİLERİNİN AHŞAP SÜTUNLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Baver BEKİROĞLU

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2024

**MİMARİ MİRAS UNSURLARININ DİJİTAL ZANAATI:
13. YY. SELÇUKLU DÖNEMİ CAMİLERİNİN AHŞAP SÜTUNLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Baver BEKİROĞLU
(523211006)**

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Yüksek Lisans Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sema ALAÇAM
Eş Danışman: Doç. Dr. Orkan Zeynel GÜZELCİ**

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DIGITAL CRAFT OF ARCHITECTURAL HERITAGE ELEMENTS:
WOODEN PILLARS OF 13TH CENTURY SELJUK MOSQUES**



M.Sc. THESIS

**Baver BEKİROĞLU
(523211006)**

Department of Informatics

Architectural Design Computing Programme

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Sema ALAÇAM
Thesis Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Orkan Zeynel GÜZELCİ**

JUNE 2024



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 523211006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Baver BEKİROĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MİMARİ MİRAS UNSURLARININ DİJİTAL ZANAATI: 13. YY. SELÇUKLU DÖNEMİ CAMİLERİNİN AHŞAP SÜTUNLARI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Sema Alaçam**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Orkan Zeynel Güzelci**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Derya Güleç Özer**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Güzden Varinlioğlu
İzmir Ekonomi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Süheyla Koç
Samsun Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 27 Haziran 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

Mimarlık lisans eğitimimin son yılında uzmanlaşmak istediğim mimari tasarımda bilişim üzerine ilgimin oluşmasını sağlayan ve bu alanda ilk çalışmalarımı yaptığım Serdar Aydın'ın dersleri ve kendisiyle atölye çalışmasında tanıştığım Güzden Varinlioğlu ile gerçekleştirdiğim fotogrametri çalışmaları tez konum çerçevesinde attığım ilk adımları oluşturdu. Daha sonra lisansüstü eğitimimde değerli danışmanım Sema Alaçam ile fotogrametri üzerine yaptığımız çalışmalar ve eş danışmanım Orkan Zeynel Güzelci ile gerçekleştirdiğimiz istişareler tez konumun belirlenmesinde etkili oldu.

Tez sürecinde danışmanımın ve eş danışmanımın yol gösteren ve destekleyici tutumları; İzzettin Kutlu'nun ve Süheyla Koç'un teknik destekleri; dostlarım Mehmet Enes Gülcan, Muhammed Salih Yurdagül, Cansu Taş, Serhat Gülmüş, Muhammed Karaaslan, Mina Turan, Ömer Vehbi Hakseven, Muhammed Çuha, Sühan Artuğ ve Ekin Ünlü'nün verdiği destekler; çalışma arkadaşlarım Abdullah Asım Divleli, Emin Selçuk Taşar, Halil İbrahim Düzenli ve Mehmet Salih Özalp'in sağladığı kolaylıklar, tez sürecimin verimli geçmesinde ve tezimi sorunsuz teslim etmemde yardımcı olmuştur.

Başarılı bir eğitim hayatı geçirmem için her türlü fedakarlığı yapan babam Mehmet Bekiroğlu, annem Çidem Bekiroğlu, abim Muhyittin Bekiroğlu, ablam Tuba Akan ve eniştem Burhan Akan'a, sayın hocalarıma, dostlarıma ve tez boyunca hep yanımda olan İlaydanur Azaklı'ya; tezimi tamamen erdirdiğim bu günde şükranlarımı sunmayı borç bilirim.

Haziran 2024

Baver Bekiroğlu



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Araştırma Soruları	3
1.2 Kültürel Mirasın Tarihçesi ve Önemi.....	3
2. KÜLTÜREL MİRASIN DİJİTALLEŞTİRİLMESİ	7
2.1 Kültürel Mirasın 3B Dijitalleştirilmesinin Motivasyonları	8
2.1.1 Görselleştirme ve etkileşim çalışmaları	9
2.1.2 Akademik çalışmalar yürütme	10
2.1.3 Uzaktan ziyaret olanağı oluşturma.....	10
2.1.4 Dijital rekonstrüksiyon ve modifikasyonlara imkan tanıma	10
2.1.5 Koruma çalışmalarına katkı sağlama	11
2.1.6 Replika (kopya) üretme.....	11
2.1.7 3B arşivler oluşturma	12
2.2 Dijital ve Fiziksel Kopyaların Etik Tartışması.....	12
2.3 Belgeleme Yöntemleri.....	14
2.3.1 Görüntü tabanlı belgelemeler.....	15
2.3.2 Görüntü tabanlı olmayan belgelemeler	16
2.3.3 Kombine yöntemler.....	17
2.4 Kültürel Mirasın Yeniden Üretimi	17
3. YÖNTEM.....	21
3.1 Veri Toplama.....	22
3.2 Dijitalleştirme.....	23
3.3 Veri İşleme	23
3.4 Fabrikasyon	24
4. SAHA ÇALIŞMASI.....	25
4.1 Anadolu'daki Ahşap Camilerin Belirlenmesi	25
4.1.1 Sivrihisar Ulu Camii	27
4.1.2 Beyşehir Eşrefoğlu Camii	27
4.1.3 Afyonkarahisar Ulu Camii	27
4.1.4 Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii	27
4.2 Fotogrametrik Veri toplama	28
4.3 Modele Dönüştürme	33
4.4 Model Düzenleme	37
4.4.1 Deneysel aşama.....	37

4.4.2 Blender ile düzenleme	37
4.4.3 Geomagic Wrap ile düzenleme	39
4.4.4 Düzenlenmiş modellerin karşılaştırılması	39
4.5 CNC Üretim Simülasyonunun Oluşturulması	42
4.6 Karşılaştırma.....	43
4.7 Bulgular	45
5. SONUÇ	47
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	57



KISALTMALAR

3B	: Üç Boyutlu
AR	: Augmented Reality (Arttırılmış Gerçeklik)
CAD	: Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarla Kontrollü İmalat)
DEM	: Digital Elevation Model (Dijital Yükselti Modeli)
HBIM	: Historic Building Information Modeling (Tarihi Bina Bilgi Modellemesi)
ICOMOS	: Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi (International Council on Monuments and Sites)
KM	: Kültürel Miras
LiDAR	: Light Detection and Ranging (Işık Algılama ve Mesafe Belirleme)
OBJ	: Object File (Nesne Dosyası)
STL	: STereoLithography
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü)
VR	: Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Belgeleme tekniklerinin sınıflandırılması, Hassani (2015)'ten uyarlanmıştır.....	15
Çizelge 2.2 : Literatürde ilgili çalışmalardan örnekler.....	19
Çizelge 4.1 : UNESCO Anadolu'nun Ortaçağ Dönemi Ahşap Hipostil Camileri.....	26
Çizelge 4.2 : Sivrihisar Ulu Camii fotogrametri verileri.....	34
Çizelge 4.3 : Sivrihisar Ulu Camii'nde elde edilen fotogrametrik modeller.....	34
Çizelge 4.4 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii fotogrametri verileri.....	35
Çizelge 4.5 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii'nde elde edilen fotogrametrik modeller.....	35
Çizelge 4.6 : Afyonkarahisar Ulu Camii fotogrametri verileri.....	35
Çizelge 4.7 : Afyonkarahisar Ulu Camii'nde elde edilen fotogrametrik modeller....	36
Çizelge 4.8 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii fotogrametri verileri.....	36
Çizelge 4.9 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii'nde elde edilen fotogrametrik modeller.....	36
Çizelge 4.10 : Prototip karşılaştırması.....	41
Çizelge 4.11 : Desenin ölçülerinin metrik karşılaştırılması.....	44



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Yöntem şeması.....	21
Şekil 3.2 : Fotogrametride kamera açıları ve konumları (Poigt, 2018).....	22
Şekil 4.1 : Sivrihisar Ulu Camii'nde belgelenen oymalı sütunların plan üzerinde gösterimi. (Altınsapan, E., 1988 Sivrihisarda Türk Mimarisi'nden alınan plan üzerine işlenmiştir.).....	29
Şekil 4.2 : Sivrihisar Ulu Camii'nde belgelenen oymalı sütunlar.....	29
Şekil 4.3 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii'nde belgelenen sütunların plan üzerinde gösterimi. (Çilek, Ü., 2020. Tezyinî Açından Beyşehir Eşrefoğlu Camii'nden alınan plan üzerine işlenmiştir.).....	30
Şekil 4.4 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii'nde belgelenen sütun başlıkları.....	30
Şekil 4.5 : Afyonkarahisar Ulu Camii'nde belgelenen sütunların plan üzerinde gösterimi. (Uysal, Z., 1993. Afyon Ulu Câmii'nin ahşap üzerine boyalı nakışları.'ndan alınan plan üzerine işlenmiştir.).....	31
Şekil 4.6 : Afyonkarahisar Ulu Camii'nde belgelenen sütun başlıkları.....	31
Şekil 4.7 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii'nde belgelenen sütunların plan üzerinde gösterimi. (Akok M.'a ait 1944 tarihli plan çizimi <i>Salt Araştırma, Ali Saim Ülgen Arşivi'nden</i> alınarak işlenmiştir.).....	32
Şekil 4.8 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii'nde belgelenen sütun başlıkları.....	32
Şekil 4.9 : Sivrihisar Ulu Camii'nde metrik veri toplama aşaması.....	33
Şekil 4.10 : Blender yazılımında model temizleme işlemleri.....	38
Şekil 4.11 : Blender yazılımında model düzenleme işlemleri.....	38
Şekil 4.12 : Geomagic Wrap yazılımında düzenleme aşamaları.....	39
Şekil 4.13 : 3B baskı ile üretilmiş 1:1 ölçekli prototipler.....	40
Şekil 4.14 : SprutCAM yazılımında CNC işleme simülasyonu.....	43
Şekil 4.15 : Desenin elle ölçümünün sonuçları.....	44
Şekil 5.1 : Netfabb yazılımı ile modellerin analizi.....	49



MİMARİ MİRAS UNSURLARININ DİJİTAL ZANAATI: 13. YY. SELÇUKLU DÖNEMİ CAMİLERİNİN AHŞAP SÜTUNLARI

ÖZET

Kültürel mirasın (KM) korunması ve gelecek nesillere aktarılması, toplumların kimliklerinin ve tarihsel sürekliliklerinin sağlanması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Kültürel miras unsurlarının belgelenmesi, bu miras öğelerine dikkat çekmek, toplumda görünürlüğünü artırmak, koruma altına almak ve gelecek nesillere aktarımını sağlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Gelişen teknolojiler ve dijital yöntemler, kültürel mirasın belgelenmesi, dijital mecralarda paylaşılması, arşivlenmesi ve gerektiğinde fiziksel veya dijital araçlarla yeniden üretilmesi süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Miras öğelerinin dijital kopyalarının oluşturulması ve gerektiğinde hızlı prototipleme veya CNC (Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol) gibi yöntemlerle fiziksel kopyalarının üretilmesi, bazı etik tartışmaları beraberinde getirirse de bu alandaki çalışmalar belirli motivasyonlar doğrultusunda devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen üç boyutlu (3B) dijitalleştirme çalışmasının ana motivasyonları üç boyutlu arşiv verisi oluşturmak ve akademik çalışmalarda ya da müzecilik faaliyetlerinde bu replikalar ile etkileşime geçmek ve bu alanda yapılabilecek çalışmalar için bir çerçeve oluşturmaktır.

Kültürel Miras unsurlarından karşımıza çıkan malzemelerden biri ahşaptır. Ahşap genel olarak beşeri ve doğal faktörlerin etkisiyle deforme olmaya yatkın bir malzeme olarak kabul görmektedir. Ahşabın çevresel iklim koşulları, doğal afetler ve insan etkilerine karşı hassas olması kültürel mirasın korunması ve belgelenmesi bakımından bu malzemeyi ön plana çıkarmaktadır. Ahşap kültürel miras öğelerinin korunması ve belgelenmesi, sadece fiziksel yapı ve bütünlüklerinin muhafaza edilmesiyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda bu eserlerin tarihi ve kültürel bağlamıyla beraber korunmasına katkı sağlamaktadır. 3 boyutlu (3B) belgeleme çalışmaları, çeşitli tarama yöntemleri ve görüntü tabanlı belgeler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Elde edilen 3B modeller ile farklı doğruluk oranlarında dijital kopyalar ve fiziksel üretimler yapılmaktadır. Bu tür belgeleme ve replika üretim teknikleri, kültürel miras öğeleriyle etkileşime geçmek için bir arayüz oluşturmakta ve kültürel miras öğelerinin orijinaline temas etme zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır. Böylelikle dijital belgeleme, kültürel miras öğelerinin geniş çevrelerce çeşitli zaman ve mekanlarda erişilebilir olmasını mümkün kılmakta ve görünürlüğünü arttırmak yollarıyla, öğelerin uzun vadede soyut ve somut değerlerini gözetken bütüncül bir yaklaşımla korunmalarına katkı sağlamaktadır.

Tez kapsamında, UNESCO (Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu) Dünya Miras Listesi'nde yer alan 13. yüzyıl Orta Çağ Ahşap Hipostil Camileri'nin oyma süslemelerinin bulunduğu ahşap sütun ve sütun başlıklarının dijital olarak 3B belgelenmesi ve yeniden üretilmesine yönelik bir çerçeve oluşturulmuştur.

Saha çalışması olarak seçilen camiler, Sivrihisar Ulu Cami, Beyşehir Eşrefoğlu Cami, Afyonkarahisar Ulu Cami ve Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camisi'dir. Bu camiler, ahşap sütunlu camilerin en eski ve özgün örnekleri olmalarının yanı sıra

sütunlarında ahşap oyma tekniği ile yapılmış süslemeler bulunması nedeniyle seçilmiştir. Bu yapıların ahşap sütun ve sütun başlıklarının dijital olarak belgelenmesi, özgün ahşap süslemelerin daha yakından inceleme olanağının sağlanması, tanınırlığının artırılması ve ihtiyaç durumunda kullanılabilecek veri arşivi oluşturulması bakımından önemlidir ve tezin temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Tezin birinci bölümünde, kültürel mirasın önemi ve tarihçesi ele alınmış ve araştırma soruları belirlenmiştir. Araştırma soruları kültürel mirasın yeniden üretilmesinin etik durumu ve bu süreçlerin düşük maliyetli ve erişilebilir yöntemlerle nasıl üretilebileceğini kapsamaktadır. Bu bölümde, kültürel mirasın korunmasının neden önemli olduğu ve günümüze uzanan tarihsel gelişim sürecinin üzerinde durulmuştur.

İkinci bölümde, kültürel mirasın dijitalleştirilme motivasyonları, eserlerin dijital ve fiziksel kopyalarının üretilmesi ile ilgili etik tartışmalar ve dijital belgeleme yöntemleri incelenmiştir. Dijitalleştirme sürecinin sağladığı avantajlar, potansiyel zorluklar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda tez kapsamında kullanılacak dijital 3B belgeleme tekniği olarak fotogrametri belirlenmiştir.

Üçüncü bölüm, çalışmanın yöntemini ve iş akışının genellenebilir adımlarını açıklamaktadır. Dijitalden fiziksele bir çerçeve sunmayı hedefleyen iş akışı, fotogrametrik veri toplama, fotogrametrik veri işleme, Blender ve Geomagic Wrap yazılımlarını karşılaştırarak veri düzenleme ve fabrikasyon adımlarını içermektedir. Her adımın detaylı açıklaması, kullanılan teknolojiler ve aşamalarla birlikte sunulmuştur. Yöntemlerin, saha çalışması için seçilen dört caminin ahşap sütun ve sütun başlıklarına uyarlanması ise dördüncü bölümde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde yer alan saha çalışmasında, camilerin belirlenme kriterleri ve fotogrametri amaçlı veri toplama aşamaları ele alınmaktadır. Daha sonra saha çalışmasında elde edilen verilerin çalışmanın ileri safhalarını nasıl yönlendirdiği ve verilerin sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Agisoft Metashape yazılımı ile seçilen ahşap sütun oyma süslemelerin fotogrametrik modellerinin üretim aşamaları anlatılmıştır. Teknik olarak fotogrametri tercih edilmesinin sebebi düşük maliyetli ve erişilebilir bir veri toplama yöntemi olmasıdır. Tez kapsamında, sergi çalışmalarında kullanılabilecek veya gerektiği durumda fiziksel replikasının üretilmesi hedeflenen dijital modeller, Blender ve Geomagic yazılımları ile düzenlenip eklemeli 3B yazıcı yöntemiyle hızlı prototiplenerek üretim için uygunlukları test edilmiştir. Bu aşamada, farklı yazılım ve tekniklerle düzenlenmiş dijital modellerin fiziksel modellerinin üretilip karşılaştırılması amacıyla eklemeli üretim yöntemiyle çalışan 3B yazıcı tercih edilmiştir. Dijital 3B modeller ve prototipler, bu iki yazılımın optimizasyon performanslarını test etmek için karşılaştırılmıştır. 3B yazıcı, hızlı prototipleme, erişilebilirlik ve karmaşık modelleri üretebilme yeteneği nedeniyle bu çalışmada tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında dijital belgeleme yöntemi olarak fotogrametri tekniği ile model oluşturma seçilmesinin başlıca sebebi, düşük maliyetli ve erişilebilir veri türleri olan fotoğraf ve video aracılığıyla model oluşturma imkanına sahip olması ve fotogrametri yazılımlarının model üretimi için kolay arayüzlere sahip olmasıdır. Model düzenlemelerinin farklı yazılımlar aracılığıyla test edilmesi ve 1:1 ölçekli prototiplerin saha çalışması kapsamında üretilmesi ele alınmaktadır. Seçilen yazılımlardan biri, endüstride tarama çalışmalarında kullanılan ve bu iş için özelleşmiş bir yazılım olup, diğeri ücretsiz ve çok yönlü bir model oluşturma-düzenleme yazılımıdır. Bu tercih, erişilebilir yöntemleri de değerlendirmeye almak ve mümkünse

bu yazılımlar üzerinden iş akışı oluşturma amacı taşımaktadır. Dijital modellerin fiziksel modellerle karşılaştırılması süreci, üretim kalitesinin ve doğruluğunun değerlendirilmesi açısından tercih edilmiştir.

Saha çalışmasının son bölümlerini oluşturan CNC ile üretim simülasyonunun hazırlanması ve karşılaştırma aşamalarında, belgelenen sütunların ahşap oyma içeren belirli bir kısmının CNC ahşap torna ile üretilme süreci için işleme takımının belirlenmesi ve üretim simülasyonlarının gerçekleştirilmesi yer alır. Üretim simülasyonu için Sprutcam yazılımı tercih edilmiştir. Karşılaştırma için ise sütun, dijital model ve prototiplerin metrik ölçülerinin karşılaştırılması bir tablo halinde sunulup tartışılmıştır.

Sonuç kısmında, belgeleme sürecinde yaşanan zorluklar, 3 boyutlu modellerin optimizasyon süreçleri ve elde edilen çıktı ürünlerle ilgili tartışmalar yapılmıştır. Üretilen prototiplerin yüzey deformasyonları ile fotogrametrik modellerin üretiminde kullanılan görüntü sayısı arasındaki ilişkiler ele alınmıştır. Bu bölümde, çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmış, öneriler sunulmuş ve gelecekte bu alanda yapılabilecek araştırmalar için yol haritaları çizilmiştir. Gelecek çalışmalar önerisinde sunulan CNC ile üretilcek 1:1 ölçekli replikanın, fotogrametri yöntemiyle yeniden dijitalleştirilmesi ve ilk üretilen 3 boyutlu modelle karşılaştırılması öngörülmüştür.



DIGITAL CRAFT OF ARCHITECTURAL HERITAGE ELEMENTS: WOODEN PILLARS OF 13TH CENTURY SELJUK MOSQUES

SUMMARY

Cultural heritage represents the collective memory through artistic, historical, archaeological, architectural, and natural assets that people have carried from the past to the present. The preservation and transmission of these heritage elements to future generations is of great importance for ensuring the identity and historical continuity of societies. Documenting cultural heritage elements plays a critical role in drawing attention to these heritage items, increasing their visibility in society, safeguarding them, and ensuring their transmission to future generations. Developing technologies and digital methods facilitate the processes of documenting cultural heritage, sharing it on digital platforms, archiving it, and reproducing it physically or digitally when necessary. Creating digital copies of heritage items and producing physical copies using methods such as rapid prototyping or CNC (Computer Numerical Control) when necessary, brings about some ethical debates, but work in this area continues with certain motivations. The main motivations for digitizing cultural heritage include preventing information loss in cases of damage, enabling the reproduction of heritage items, assisting with prototypes in studies requiring physical contact, and supporting museology and public dissemination efforts. The main motivations of the three-dimensional (3D) digitization study carried out within this work are to create a 3D archival database and to establish a framework for producing replicas that can be used for interaction and information acquisition in academic studies or museology activities.

Anatolia is a rich geography in terms of wooden heritage. However, as wood is a material prone to deformation due to human and natural factors, wooden heritage items are sensitive to climatic conditions, natural disasters, and human impacts. Therefore, the preservation and documentation of wooden heritage is of great importance. The preservation and documentation of wooden heritage items not only maintain their physical structure and integrity but also contribute to preserving the historical and cultural context of these works. 3D documentation studies can be carried out through various scanning methods and image-based documents. With the obtained 3D models, digital copies and physical productions can be made at different accuracy rates. Such documentation and replica production techniques allow for the long-term preservation of heritage items with a holistic approach that considers their abstract and tangible values by making them accessible and visible to wider audiences at various times and places without the necessity of direct contact.

The thesis established a framework for digitally 3D documenting and reproducing the carved wooden columns and column capitals with wooden decorations of the 13th-century Medieval Wooden Hypostyle Mosques listed in the UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) World Heritage List.

The selected fieldwork mosques are Sivrihisar Ulu Mosque, Beyşehir Eşrefoğlu Mosque, Afyonkarahisar Ulu Mosque, and Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Mosque. These mosques were chosen because they are among the oldest and most original examples of wooden-columned mosques and because they feature decorations made with wood carving techniques on their columns. Digitally documenting the wooden columns and column capitals of these structures is important for closely examining the original wooden decorations, increasing their recognition, and creating a data archive that can be used when needed, which constitutes the main motivation of the thesis.

In the first chapter of the thesis, the importance and history of cultural heritage are discussed in detail, and research questions are determined. The research questions cover the ethical situation of reproducing cultural heritage and how these processes can be produced using low-cost and accessible methods. This section emphasizes why the preservation of cultural heritage is important and the historical development process that extends to the present day.

In the second chapter, the motivations for digitizing cultural heritage, the ethical debates about producing digital and physical copies of the works, and digital documentation methods are examined. The advantages provided by the digitization process and potential challenges are analysed in detail. Based on these examinations, photogrammetry was determined as the digital 3D documentation technique to be used within the scope of the thesis.

The third chapter explains the methodology and the generalizable steps of the workflow of the study. The method, which aims to provide a framework from digital to physical, includes photogrammetric data collection, photogrammetric data processing, data editing by comparing Blender and Geomagic Wrap software, and fabrication steps. Detailed explanations of each step are presented along with the technologies and stages used. The adaptation of the methods to the wooden columns and column capitals of the four mosques selected for the field study is explained in the fourth chapter.

In the field study described in the fourth chapter, the criteria for selecting the mosques, data collection for photogrammetry in the selected mosques, how the obtained data from the field study directed the later stages of the work, the classification of the obtained data, and the stages of producing photogrammetric models of selected wooden column carvings using Agisoft Metashape software are explained. In the initial field study, both LiDAR and photogrammetry techniques were used, but since more successful data were obtained with photogrammetry, it was preferred as the technique to be used in the method. Photogrammetry was also chosen because it is a low-cost and accessible data collection method. The digital models, intended to be produced for exhibition works or physically reproduced if necessary, were edited with Blender and Geomagic software and prototyped using the additive 3D printer method to test their suitability for production. In this phase, a 3D printer, which operates using the additive manufacturing method, was chosen to produce and compare physical models edited with different software and techniques. Digital 3D models and prototypes were compared to test the optimization performance of these two software programs. A 3D printer is an ideal tool for such studies due to its rapid prototyping, accessibility, and ability to produce complex models.

The primary reason for selecting photogrammetry as the digital documentation method within the scope of the study is its ability to create models using photo and video,

which are low-cost and accessible data types, and the ease of use of photogrammetry software interfaces for model production. The editing of models with different software and the production of 1:1 scale prototypes within the scope of the field study were addressed. One of the selected software is specialized for scanning studies in the industry, and the other is a free and versatile model creation-editing software. This choice is aimed at evaluating accessible methods and creating a workflow through these software's if possible. The process of comparing digital models with physical models is important for evaluating production quality and accuracy.

In the final sections of the field study, the preparation and comparison of a CNC production simulation, the determination of the processing tool for the CNC wood lathe production process of a specific part of the documented columns with wood carving, and the realization of production simulations are included. Sprutcam software was chosen for the production simulation. For comparison, a table comparing the metric measurements of the column, digital model, and prototypes was presented and discussed.

In the conclusion section, the challenges encountered during the documentation process, the optimization processes of 3D models, and discussions about the output products obtained were made. The relationships between surface deformations of the produced prototypes and the number of images used in the production of photogrammetric models were discussed. Additionally, different modelling methods that can be performed with other techniques such as 3D scanning devices were evaluated for future studies. In this section, a general assessment of the study was made, recommendations were provided, and roadmaps for future research in this field were outlined. The future study proposal includes the re-digitization of the 1:1 scale replica to be produced with CNC using the photogrammetry method and comparing it with the first produced 3D model. Autodesk Netfabb software is anticipated to be used in this comparison. Netfabb is a production software used for overlaying different models to measure their geometric differences and visualizing the analysis, making it easily understandable.



1. GİRİŞ

Kültürel miras bakımından zengin bir coğrafyaya ev sahipliği yapan Türkiye, UNESCO Dünya Mirası Sözleşmesi'ne taraf olması sebebiyle, sözleşmenin gerektirdiği yükümlülükleri yerine getirmeyi hedefleyen ülkelerden biridir. Sayıları on binleri bulan tarihi eserlerin, tabii ve beşeri sebeplerle tahribata uğrama ihtimaline karşı önlem almak ve koruma kararlarına altık oluşturmalarını sağlama amacıyla belgeleme ihtiyacı doğmuştur. Ayrıca kültürel miras hakkında farkındalık ve sorumluluk oluşturmak amacıyla hızlı, doğru, kaliteli ve az maliyetli araç ve yöntemlerle sürdürülebilir bir belgeleme önemlidir. Bu ihtiyaç, üretildiği malzeme dolayısıyla dış etkenlere karşı dayanıklılığı az olan kültürel miras unsurları için öncelikli durumdadır.

Bu çalışmada, 2023 yılında UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne alınmış olan Afyonkarahisar Ulu Camii (13. yüzyıl), Beyşehir Eşrefoğlu Camii (13. yüzyıl), Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii (14. yüzyıl) ve Sivrihisar Ulu Camii (13. yüzyıl)'nin yapısal elemanlarını oluşturan ahşap sütun ve sütun başlıklarının uygun araçlarla dijital olarak belgelenmesi, belgelemenin sürdürülebilir araç ve yöntemlerle gerçekleştirilmesi ve gerektiğinde elde edilen verilerle ahşap yapı elemanlarının, üzerindeki asırların oluşturduğu tüm izlerle birlikte yeniden imal edilmesi süreci anlatılmaktadır. Ahşap sütunların tercih edilmesinin nedeni çalışma kapsamında ele alınan sütun süslemelerinin özgün örnekler olması ve bu özgün ahşap işçiliği örneklerinin tanınırlığını arttırmak ve belgeleme niteliği taşıyan bir çalışma gerçekleştirmektir. Çalışmanın birinci bölümünde kültürel mirasın tarihçesi ve önemine vurgu yaparak belgelemenin çeşitli perspektiflerden önemi açıklanmıştır. Çalışmanın amacı kültürel mirasın dijitalleştirilmesinde mevcut yöntemleri ele almak, bu yöntemler içinden fotogrametri ile 3B belgeleme yapmak, 3B modellerin dijital ortamda saklanması, belirlenen kültürel miras nesnelerinin prototiplerinin üretilmesi ve replikalarının üretilmesi amacıyla model optimizasyon araçlarının kullanımını değerlendirmek ve bu kapsamda bir çerçeve sunmaktır. Bu amaçla çalışmanın birinci bölümü kültürel mirasın tarihini ve önemini açıklamakla başlamaktadır.

3B dijital modellerin üretilmesi sanal arşivler oluşturma, sanal ortamları oluşturma ve bu ortamlar aracılığıyla farklı amaçlarla incelemelerde ve etkileşimlerde bulunma bağlamında önemlidir. Bu sebeple çalışmanın ikinci bölümünün ilk aşamasında kültürel mirasın (KM) dijitalleştirilmesinin motivasyonları ve belgelemede kullanılan yöntemler açıklanmıştır. KM nesnelerinin fiziksel prototipleri ve replikaları, öğrencilerin ve araştırmacıların KM nesnelerini eğitim materyali olarak incelemesine olanak sağlaması, etkileşimli sergi ve müze çalışmalarında (Nofal ve, 2018), ziyaretçilerin dokunarak veya yakından inceleyerek etkileşimde bulunabileceği replikalar oluşturma amacıyla veya nesnenin farklı coğrafyalarda sergilenebilmesi amacıyla kullanılmasının yanısıra deforme olma durumunda koruma çalışmalarına destek olması amacıyla kullanılır. İkinci bölümde aynı zamanda replikalar ve replika üretimi hakkındaki etik tartışmalara da yer verilmektedir.

Üçüncü bölümde yöntem bütüncül bir süreç olarak dijitalden fiziksele bir çerçeve sunulması hedeflendiğinden çalışmanın yöntemi, dijitalleştirme tekniklerinden biri olan fotogrametri kullanarak seçilen camilerin sütun ve sütun başlıklarının 3 boyutlu (3B) belgelenmesi ve oluşturulan 3B modellerin dijital arşivlerde saklanması, prototiplerinin üretilmesi, gerektiği durumlarda replika üretimi için kullanılabilecek dijital model optimizasyonlarını gerçekleştirmek ve 3B yazıcı yardımıyla üretilen prototipler aracılığıyla bu dijital düzenlemelerin fiziksel karşılığını değerlendirmektir. Yöntemdeki optimizasyon aşaması, optimizasyon amaçlı tersine mühendislikte yaygın kullanılan bir yazılım ile model düzenleme işlemleri için yaygın kullanılan ücretsiz bir yazılım karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Oluşturulan yöntemin bir sonraki aşaması saha çalışmasında toplanan verilerin, dijital model verilerinin ve prototip verilerinin karşılaştırmasını içermektedir.

Yöntemin uygulandığı saha çalışmasının anlatıldığı dördüncü bölümde, seçilen camilerin veri toplama, dijitalleştirme, fabrikasyon ve karşılaştırma aşamaları detaylı olarak açıklanmış, deneysel aşamalar yardımıyla saha çalışmasının nasıl yönlendiği ve uygulamalara dair detaylar açıklanmıştır. Daha sonrasında ahşap sütunun bilgisayar destekli üretim (CAM) yardımıyla yeniden üretimi için simülasyon çalışmasına yer verilmiştir. Sonuç bölümünde, çalışmanın kısıtlılıkları, literatüre katkısı ve gelecek çalışmalar için öneriler tartışılmıştır.

1.1 Araştırma Soruları

Tez kapsamında belirlenen araştırma soruları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Ahşap kültürel mirasın mevcut haline en yakın dijital ve fiziksel kopyalarının üretilmesi süreci tekrarlanabilir ve erişilebilir olarak nasıl ve hangi araçlarla tasarlanabilir?

Kültürel miras öğelerinin dijital yöntemlerle üretilen prototip ve replikaları, özgün kopya niteliğinde midir yoksa yalnızca “sahte” bir temsil olarak mı değerlendirilmelidir? Ayrıca bu prototip ve replikaların kullanım alanları nerelerdir?

Kültürel miras niteliği taşıyan ahşap oyma eserlerin belgelenmesinde ve yeniden üretilmesinde dijital yöntemlerin geleneksel yöntemlere kıyasla avantajları nelerdir?

Farklı bilgisayar destekli üretim araçlarından hangileri silindirik yapıdaki ahşap sütun başlığı ve gövdesin gibi yüksek detay içeren oymaların işlenmesinde etkin olarak kullanılabilmektedir?

1.2 Kültürel Mirasın Tarihçesi ve Önemi

Kültürel miras, geçmişten günümüze kadar gelen ve gelecek nesillere aktarılması gereken, insanlığın ortak değerlerini, kimliğini ve tarihini yansıtan soyut ve somut varlıklar bütünüdür (Jokilehto, 2005). Kültürel mirasın tanımı kullanıldığı bağlama göre çeşitli kapsamlarda yapılabilir. Örneğin bir diğer tanım ICOMOS Türkiye Mimari Miras Koruma Bildirge’sinde kültürel miras, günümüze kadar ulaşmış, insanların sahiplik bağı olmaksızın sürekli değişime devam eden gelenek, bilgi ve değerlerin yansımaları olan ve insanlarla tarih içerisindeki etkileşimlerin bünyesinde barındıran soyut ve somut varlıkları tümü (ICOMOS Türkiye, 2013) olarak karşımıza çıkar. İnsanlığın ortak mirası ve birikimi olarak kabul edilen, uluslararası işbirliği ile korunan bu varlıklar bilimsel, sanatsal, tarihi, arkeolojik, mimari ve tabii açılarından evrensel değerleri temsil eder. Bu tanımlar, kültürel mirasın sadece mimari yapılar veya anıtlarla sınırlı olmadığını, aynı zamanda çevresel, manevi ve toplumsal bağlamlarla da ilişkili olduğunu vurgular. Bu nedenle, kültürel mirasın korunması, sadece fiziksel yapıların korunması değil, aynı zamanda bu yapıların anlamını, işlevini ve toplumsal bağlamını da dikkate alır.

Kültürel miras kavramı, insanlık tarihi boyunca çeşitli evrelerden geçerek şekillenmiştir. Antik dönemde, Theoderic the Great'in (455-526 MS) Roma'nın tarihi eserleri ve anıtlarının korunması gerektiğini belirten yazıları, kültürel mirasın ilk izlerini taşır. Roma gibi şehirlerin antik yapıları, geçmiş medeniyetlerin görkemini yansıtan önemli miraslar olarak kabul edilmiştir. 18. Yüzyıl itibarıyla bu konudaki yaklaşım sistematik bir hal almaya başlamıştır, 1666 yılında İsveç'te yayımlanan "Antiquities Ordinance", tarihi ve arkeolojik eserlerin korunması gerektiğini belirten erken yasal düzenlemelerden biridir (Jokilehto, 2005). Kültürel miras kavramı, zaman içinde genişleyerek sadece büyük anıtları ve tarihi eserleri değil, aynı zamanda günlük yaşamın bir parçası olan daha küçük yapıları, toplumsal ritüelleri ve sözlü gelenekleri de içeren bir kapsama yolunda ilerlemiştir. Kültürel ve mimari mirasın canlandırılmasına yönelik eğilimlerin başladığı Rönesans İtalyası'ndan 19. yüzyıl Avrupası'ndaki John Ruskin, Viollet-le-Duc, Gottfried Semper gibi mimar-teorisyenlerin restorasyon ve koruma çalışmalarının nasıl yapılması gerektiğine dair tartışmaları "miras" kavramının içerik-bağlam ve yöntem açısından karmaşık ve uzun soluklu değişimine dair ipucu verir. Rönesans'ın prestij, hayranlık ve saygı dürtüsüyle antik dönem mimarisini canlandırmaya yönelik çabaların yerini 19. yüzyıldaki sanayi devriminin etkisiyle şekillenen prensip ve kurallara bırakmıştır. Kentlerdeki büyük çaplı değişimlerin tarihi yapıları tehdit etmesini, mimarlıkla yükselene ulusal kimliklerin ve tarih bilincinin güçlenmesi izlemiştir (Greenfield, 1986). Bu ortamda Ruskin, yapıların "doğal yaşlanma" sürecine izin verilmesi gerektiğini savunurken, Viollet-le-Duc, yapıların eski haline döndürülmesini savunmuştur (Ahunbay, 2019). Semper'in yaklaşımı ise, eski yapıların sadece fiziksel olarak restore edilmesi değil, aynı zamanda kültürel, tarihsel ve sosyal bağlamlarını koruma şeklindedir (Semper, 2015). Bu prensipler ve bunların üzerine oluşturulan kurumlar, günümüzde hala tarihi ve mimari mirasın tanımlanması ve korunmasında temel bir rol oynamaktadır.

20. yüzyılda dünya genelindeki savaşıardan, doğal afetlerden, insani ihmallerden veya zamana bağılı yıpranmadan kaynaklı sebeplerle kültürel miras unsurları zarar görebilmekte, daha da kötüsü yok olabilmektedir. Bu duruma karşı alınacak bir önlem olmanın dışında kültürel mirasın toplumsal farkındalığını arttırma, kültürü devam ettirme gibi istekler kültürel mirası belgeleme ihtiyacını doğurmaktadır. Bu amaçla ülkeler kendi koruma yönetmeliklerini, planlarını ve hedeflerini belirler ayrıca uluslararası tüzükler, sözleşmeler ve kurullar ile bu amaçlar desteklenir. 20. yüzyıl

boyunca, kültürel mirasın korunması uluslararası alanda önem kazanmıştır. 1931 yılında yapılan Atina Konferansı, tarihi anıtların korunmasına yönelik uluslararası ilkeler belirlemiştir. 1972 yılında Dünya Mirası Listesi'ni oluşturmak için hazırlanan UNESCO Sözleşmesi, kültürel ve doğal mirasın korunması, kültürel çeşitliliğin ve tarihi öneminin vurgulanması amacıyla Dünya çapında toplumsal belleğe ve hassasiyete sahip önemli yerleri tanımlamıştır (UNESCO, 1972). UNESCO Dünya Mirası Sözleşmesinde taraf devletlerin kültürel ve doğal mirasın tespiti korunması ile bunların gelecek nesillere aktarılması konusunda görevlerinin olduğu kabul edilmektedir ve bu çabada gerekli yasal, bilimsel, teknik, idari ve mali önlemlerin alınacağı belirtilmiştir (Soler ve diğ., 2017). Bu sebeple ki, kültürel mirasın belgelenmesi, belgeleme yöntemlerinin geliştirilmesi ve yöntemlerin verimliliği her geçen gün daha önem arz eden bir konu haline gelmiştir.

Bir kültürel miras alanı ya da nesnesinin UNESCO Dünya Mirası listesine girebilmesi için belirlenmiş olan on adet kriterden bir yada birkaçını sağlamalı, özgün ve/veya yapısal bütünlüğünü halihazırda koruyor olmalı ve de korumanın devam edebilmesi için gerekli yönetim planına sahip olmalıdır (UNESCO, 2023, 45 COM 12). 2023 yılında Anadolu'nun ahşap sütunlu beş camisi: Afyonkarahisar Ulu Cami, Konya'daki Beyşehir Eşrefoğlu Camii, Eskişehir'deki Sivrihisar Ulu Cami, Kastamonu'daki Kasabaköy Mahmut Bey Camii ve Ankara'daki Arslanhane Camii UNESCO kurulu tarafında belirlenen ii. ve iv. no'lu kriterleri ve aynı zamanda özgün olup yapısal bütünlükleri sağladıkları tespit edilerek UNESCO Dünya Mirası listesine alınmıştır (UNESCO, 2023, 45 COM 8B.46). Camilerin karşılamış olduğu kriterlerin tanımı, UNESCO tarafından yayınlanan ilgili karar bildirisinde şu şekillerde tanımlanmıştır, ii. no'lu kriter: "Mimari veya teknoloji, anıtsal sanatlar (monumental arts), şehir planlaması veya peyzaj tasarımındaki gelişmeler üzerine, belirli bir zaman aralığında veya dünyanın kültürel bir alanında insani değerlerin önemli bir değişimini sergilemek;", iv. no'lu kriter: "İnsanlık tarihinin önemli bir aşamasını (aşamalarını) gösteren bir bina, mimari veya teknolojik topluluk veya peyzaj türünün olağanüstü bir örneği olmalıdır;" (UNESCO, 2023, WHC.23/01).

Kültürel mirasın belgelenmesini önemine değinen uluslararası kuruluşların tüzük karar ve bildirilerinde kültürel mirasın yönetimi, değerlendirilmesi, arşivlenmesi ve yayınlanması amacıyla belgelemenin önemini vurgulamaktadır. Ancak bu belgeleme gereklilikleri belirli teknik kısıtlamalara tabidir. Patias (2006), ICOMOS, UNESCO ve Venedik Tüzüğüne atıfta bulunarak bu gereklilikleri aşağıdaki gibi belirler.

- Çok sayıda dört boyutlu (yani 3B artı zaman) çok kaynaklı, çok formatlı ve çok içerikli bilginin belirtilen doğruluk ve ayrıntı seviyeleriyle kaydedilmesi;
- 3 boyutlu dijital envanterler ve mümkün olduğu ölçüde tarihli tarihi görüntüler;
- 4B bilgilerinin güvenli ve rasyonel bir şekilde yönetilmesi, diğer kullanıcılarla paylaşılması ve dağıtılması için kullanılabilir hale getirilmesi;
- Bilginin kullanıcı dostu bir şekilde görselleştirilmesi ve sunulması, böylece farklı türdeki kullanıcılar İnternet ve görselleştirme tekniklerini kullanarak verileri gerçekten alabilir ve faydalı bilgiler edinebilir.

2. KÜLTÜREL MİRASIN DİJİTALLEŞTİRİLMESİ

Sayısallaştırma ile aynı anlama gelen dijitalleştirme eyleminin ilk kullanımı 20. yy.'a dayanmaktadır. Günümüzde dijitalleştirme, çeşitli biçimlerdeki analog bilgilerin elektronik cihazlar aracılığıyla dijital forma dönüştürülmesi ve bu bilgilerin dijital devreler ekipmanlar ve ağlar aracılığıyla işlenebilmesi saklanabilmesi ve iletilebilmesi anlamını taşır (Sotirova ve diğ., 2012). Kültürel mirasın dijitalleşmesi, miras değeri olan nesnenin yukarıdaki tanımdaki gibi dijital forma dönüştürülmesini ve buradan hareketle saklanabilmesini, iletilebilmesini ve işlenebilmesini kapsar. Bu bağlamda kültürel mirasın dijitalleştirilmesi belgeleme niteliği taşımaktadır. 1970'lerden bu yana galeri, kütüphane, arşiv ve müze sektörü; dijital medyanın çeşitli enkarnasyonları aracılığıyla kültürel miras materyallerine erişimi artırmak için dijitalleşmeyi yani analog bilginin dijital bilgiye dönüştürülmesini teşvik etmiştir (Terras, 2015). Dijitalleştirilmiş veriler 3B modeller, 360° görüntüler, videolar, illüstrasyonlar gibi dijital temsiller olarak çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Bu temsiller oyunlarda, akademik çalışmalarda, müzecilik veya sergileme çalışmalarında kullanılır. Varinlioğlu (2023), Kervansarayların Sürdürülebilir Bilgi Yaşam Döngüsü (SILK) projesinde tarihi yapı ve kalıntıların 3B modellerini ve 360° görüntülerini kervansaraylar hakkındaki kültürel farkındalığı artırma amacıyla kervansaray modellerini oyunlaştırmada ve VR (Virtual Reality- Sanal Gerçeklik) yoluyla görselleştirmede kullanmıştır. Sancak ve diğ. (2023), tarihsel bağlamda çok katmanlı bir yapıya sahip olan Yedikule Hisarının oyunlaştırma amacıyla dijitalleştirilmesi ve model optimizasyonunun içeren çalışmayı gerçekleştirmiştir Özer (2016). Türkiye'deki Parion Tiyatrosu'nun tarihi mirasını fotogrametri ve AR (Augmented Reality- Arttırılmış Gerçeklik) yöntemlerini kullanarak temsil etmeyi amaçlamıştır.

Yakın geçmişte elektronik ölçüm aletleri, lazer tarayıcılar, fotogrametrik kameralar ve Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design, CAD) modelleme yaklaşımları da dahil olmak üzere, 3 boyutlu dokümantasyon araçları ve bilgi teknolojisinin gelişmesi, kültürel miras alanındaki dijital verilerin katlanarak artmasına neden olmuştur.

Kültürel mirasın 3B dijitalleştirilmesi, varlığına herhangi bir sebepten ötürü erişme imkanı bulunmayan, hasar görmüş, deforme olma olasılığı yüksek olan, su altında kalan ya da çok yüksek bir noktada bulunan, restorasyonu yapılan; fiziksel objelerin, mimari eserlerin ve alanların ziyaret deneyiminin yaşanmasının mümkün kılması bakımından önemli bir avantajdır (Guidi ve Frischer, 2020).

Dijitalleştirilmiş nesne gerçek nesnede fiziksel erişimi çok zor olan noktalar dahil olmak üzere nesne üzerindeki her noktayı kontrol etme ve ölçme olanağı sağlaması ile nesne üzerinde nicel analizler yapılmasına olanak sağlar. Dijital rekonstrüksiyon modeli sayesinde nesneye dünyanın farklı yerlerinden uzaktan erişim sağlanabilir. Ayrıca KM nesnesi üzerinde yapılması planlanan düzenlenmeler ve değişiklikler, nesneye temas etmeden dijital model üzerinde denenebilir (Guidi ve Frischer, 2020).

Kültürel miras nesnelerinin 3B belgelenmesiyle farklı zaman dilimlerinde gerçekleşen, gözle görülmesi ve takibi zor olan değişimlerinin ve deformasyon düzeylerinin ölçülebilmesi mümkün olmuştur.

Endüstriyel tasarımda yaygın olarak kullanılan 3B baskı ve frezeleme işlemleri, sanat eserlerinin ve tarihi eserlerin hızlı prototiplemesini ve sergilenmesini mümkün kılar. 3B kopya üretimi hakkında etik bakımından soru işaretleri olsa da tamamen yok olmuş nesneler ve orijinaline bağlı kalmanın elzem olmadığı kopya model üretim alanlarda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına örnek olarak: ziyaretçiler tarafından temas edilebilen müze replikalarının oluşturulması, nesnenin belirli bölümlerini temsil eden modellerin oluşturulması, doğal afetler sebebiyle yok olmuş veya kısmi olarak tahrip olmuş mimari eserlerin uzmanlar tarafından yeniden üretilmesi gösterilebilir.

2.1 Kültürel Mirasın 3B Dijitalleştirilmesinin Motivasyonları

Kültürel mirasın dijitalleştirilmesinin başlıca motivasyonları Guidi ve Frischer (2020) çalışmasından uyarlanan başlıklar üzerinden incelenmiştir. Bu başlıklar tez kapsamında detaylı açıklanıp örneklendirilmiştir.

2.1.1 Görselleştirme ve etkileşim çalışmaları

Bir kültürel miras alanının ya da nesnesinin dijital 3B modelinin oluşturulması, gerçek alan ya da nesne ile kurması mümkün olmayan etkileşim biçimlerine olanak sağlar. Kültürel mirasın somut nesnelere temas ederek, detaylı olarak incelemek genellikle mümkün olmamaktadır. Bu durumun nesnelerin erişilemez noktalarda olmaları, ölçeğinin büyüklüğü ya da temas halinde zarar görme riski taşıdıkları için nesneye erişimin kısıtlanması gibi sebepleri vardır. KM nesneleriyle etkileşime girip, yakından detaylı incelemek için nesnenin 3B dijital modeli üzerinden üretilen fiziksel modeli kullanılabilir. 3B dijital model ve üretilen fiziksel model birlikte incelenebilir veya sergilenebilir. Örneğin Nofal ve diğ., tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, Sakkarâ'daki Djoser Kompleksi'nin giriş sütununun bir müzede sergilenmesi hakkında yapılan çalışmada, müze ziyaretçilerine etkileşime geçebildikleri dijital bir model ile birlikte temas edebildikleri fiziksel bir modelin birlikte sunulduğu senaryoda, salt dijital modelin sergilendiği senaryoya göre; nesnenin taşıdığı mimari özellik, kültürel değer, estetik değer, sembolik önem gibi zımni bilgi katmanlarını daha başarılı şekilde algıladıkları tespit edilmiştir (Nofal ve diğ., 2018).

KM alanlarının ve nesnelerinin dijital modelleri, sanal bir ortamın parçası olabilir ya da ortamı oluşturan ana öge olarak turistik ya da eğitim amaçlı sanal müze, video oyunu gibi biçimlerde var olabilir. Tarihi bir oyun serisi olan Assassin's Creed, oyuncuların hiçbir oyun içi görev ile karşılaşmadan, oyun için oluşturulan dijital Antik Yunan, Antik Mısır ve Viking Çağı dönemleri çevrelerini keşfedip eğitim amaçlı kullanabilmesi için, oyunlar için "Discovery Mode" (Keşif Modu) versiyonlarını yayınlamıştır (Paananen ve diğ., 2023).

Oyun için tasarlanan dünyayı eğitim amaçlı kullanıma açan Assassin's Creed'den farklı olarak, kültürel mirasın öğrenimi için tasarlanmış ciddi oyun örnekleri de mevcuttur örneğin Coenen ve diğ., (2013) tarafından yayınlanan bir makalede, MuseUs isimli bir ciddi oyun uygulaması ortaya koymuştur. Bu oyun, dijitalleştirmiş sanat eserlerini kullanarak kullanıcıların kendi anlatılarını dahil ettikleri müze rotaları tasarlamalarına ve bu rotaları diğer kullanıcılarla paylaşımlarına olanak sağlar. Böylelikle kullanıcıların KM öğeleriyle birebir bağ kurup, içselleştirmesi amaçlanmıştır (Coenen ve diğ., 2013).

2.1.2 Akademik çalışmalar yürütme

Kaybolmuş veya keşfedilmemiş kültürel miras veya kalıntıların araştırılması ve ortaya çıkarılması olan arkeoloji bilimi gibi sanat tarihi, mimarlık tarihi, turizm gibi sosyal bilimlerin olduğu sektörlerde alan, yapı ya da obje ölçeklerindeki inceleme nesnelerini, 3B dijital model sayesinde metrik ölçüyü kullanma avantajıyla araştırma imkanı bulunur. Yapıya ulaşmanın zor olduğu yerlerde dahi erişimini iki parmak arasına indirerek kolaylık sağlar. Örneğin, başlangıçta “Project Mosul” olarak adlandırılan “Rekrei” açık kaynaklı projesinde, savaş sonrası hasar gören Musul Müzesinden yola çıkarak, kaybolan ya da hasar gören KM nesneleri ve yapılarının, çeşitli kaynaklardan toplanan fotoğrafları yardımıyla fotogrametri yardımıyla 3B rekonstrüksiyonlarını oluşturarak, kaybolan KM öğelerinin imgelerinin belgelenmesi amaçlamıştır (Vincent ve diğ., 2015). Daha sonra projenin kapsamı farklı ülkelerden KM niteliği taşıyan yapıların dijital rekonstrüksiyonunu içerek şekilde genişletilmiş ve proje “Rekrei” adını almıştır (“About Rekrei”, t.y).

2.1.3 Uzaktan ziyaret olanağı oluşturma

Kolayca erişimin mümkün olmadığı ve ulaşmayı talep eden kitleye çok uzak olan miras nesnelerinin deneyimlenmesinde kullanılır. Hassas objeler, erişiminin yasak olduğu ya da izne tabi olduğu nesneler, yok olmuş nesneler gibi yerinde ziyaretin zor olduğu ya da mümkün olmadığı nesneler ve yerler, dijitalleştirme sayesinde uzaktan deneyimlenebilir. Örneğin, COVID pandemisi döneminde tüm müzeler zorunlu olarak ziyaretçi alımını durduğunda, Uffuzi Galerisi, Louvre Müzesi gibi önde gelen müzeler dahil olmak üzere dünya çapında birçok müze, ziyaretçilere sanal tur imkanları sunmuştur (Verde ve Valero, 2021). Hofman, Walters, ve Hughes imzalı 2022 tarihli çalışmada, Avustralya'daki mercan resiflerini yerinde ziyaret ve VR (Virtual Reality-Sanal Gerçeklik) ile ziyaret deneyimleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, kalabalık gruplarca yerinde ziyaret edilmesi sonucunda zarar görme ihtimali taşıyan resifleri, VR ile ziyaret eden deney grubunun, resifleri koruma konusunda yerinde ziyaret edenler kadar teşvik olduğu sonucuna varılmıştır (Hofman ve diğ., 2022).

2.1.4 Dijital rekonstrüksiyon ve modifikasyonlara imkan tanıma

Kültürel miras nesnelerinin dijital rekonstrüksiyon için üretilen 3 boyutlu modelleri, gerçek nesne üzerinde denenemeyecek ölçü alma veya yüzey modifikasyonları işlemleri için yahut yok olmuş miras nesnelerinin tekrar üretilip gözlem yapılması

amacıyla kullanılabilir. Ikeuchi ve diğ. Tarafından 2007 yılında yayınlanan çalışmada, büyük Buda Heykellerinin korunması amacıyla öncelikle heykeller lazer tarama ile kaydedilip, çeşitli birleştirme algoritmaları yardımıyla dijital modelleri oluşturulmuş böylece heykellerin mevcut durumları belgelenmiştir. Ardından heykellerde yapılması planlanan restorasyon uygulamaları öncelikle dijital modeller üzerinde uygulanarak, heykele bir işlem yapmadan önce olası işlemlerin potansiyel sonuçları gözlemlenmiştir (Ikeuchi ve diğ., 2007). Dijital rekonstrüksiyon alanı birçok farklı bilim dalının konusu olabilir, DeVries ve diğ. tarafından 2022 yılında yayınlanan ve paleontoloji alanında dijital rekonstrüksiyon üzerine olan bir çalışmada, fosillerin mevcut durumu dijital 3B model haline getirildikten sonra, fosillerdeki deformasyonların Blender kullanarak dijital restorasyonunun sağlandığı bir model önerilmiştir (DeVries ve diğ., 2022).

2.1.5 Koruma çalışmalarına katkı sağlama

Yüzey aşınmaları veya deformasyonları incelenmek istenen veya tespit edilmek istenen kültürel miras yapılarının belgelenmesinde kullanılabilir. doğal hava koşulları nem veya sıcaklık gibi zaman içerisinde nispeten yavaş deformasyon oluşturma gücü olan etkenlerin miras nesnesi üzerinde takibi ve hassas deformasyonların kontrol edilmesi veya farkına varılması amacıyla kullanılabilir. Örneğin, 2016-2019 yıllarından yürütülmüş bir Avrupa Birliği Projesi olan “HeritageCare- Tarihi ve kültürel mirasın izlenmesi ve önleyici korunması” (SOE1/P5/P0258); kültürel mirasın korunması için yapıların Tarihi Bina Bilgi Modellemesi (HBIM) ile ayrıntılı 3B boyutlu modellerinin hazırlanması, yapılardan gerçek zamanlı veriler toplanıp bu modeller üzerinden, yapıları korumak ve onarmak için gerekli eylemlerin planlanmasını kapsamaktadır (Masciotta ve diğ., 2021).

2.1.6 Replika (kopya) üretme

Hızlı prototipleme araçlarının kullanımı ile dijital fabrikasyon sürecine dahil olan modellerin yeniden üretilmesini kapsar. Burada üretilen modeller eklemeli 3B yazıcı veya eksiltmeli CNC (Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol) teknolojileri ile fiziksel bir hal alır. Bu prototipler kimi zaman orijinalinin yerine geçmeyi amaçlamaz, sadece KM nesnesine fiziksel teması kolaylaştırmayı hedefleyen replika düzeyinde hassas üretim yapılan çalışmalar da vardır. Savaşlar, doğal afetler gibi sebeplerle yok olma tehlikesi altında olan KM nesnelerinin korunması adına bir güvenlik önlemi olarak da replika üretimi yapılabilir (Balletti ve Ballarin, 2019). KM nesnesinin fiziksel

rekonstrüksiyonu için dijital yöntemlere üretilen replikalara başvurulmuş bir örneği Baumeister ve diğ., tarafından 2020 yılında yayınlanmış bir çalışmada ele alınan 17. yy.'dan kalan Cassiobury Evi Merdivenlerinin eksik başlık süsleri için uygulanan restorasyon projesinde görebiliriz. Bu proje kapsamında merdivenin mevcut özgün ahşap başlık süslemelerinden en iyi korunmuş olanının lazer tarama ile dijital modeli oluşturulmuş, ardından CNC frezeleme yöntemi ile replikaları üretilerek, eksik başlık süslemeleri bu replikalarla tamamlanmıştır (Baumeister ve diğ., 2020).

2.1.7 3B arşivler oluşturma

Miras yapılarının 3B modelden doğrudan üretimlerinin veya doğrudan kullanımının mümkün olmadığı durumlar için ayrıca sosyal medya araçları ile bütünleşmiş çalışabilen sergileme mecraları için kültürel miras nesnelerinin 3B arşivlerinin tutulması önemlidir. Örneğin, Google ve kar amacı gütmeyen kuruluş CyArk işbirliği ile hazırlanan “Open Heritage” (Açık Miras) Projesi, kültürel miras alanlarının mevcut durumlarının 3B boyutlu modellerini üretip, dijital olarak herkes tarafından ücretsiz olarak erişilmesine imkan sağlamıştır (“Open Heritage Project”, t.y.). 3B arşivlere diğer bir örnek KM nesneleri dahil olmak üzere geniş bir perspektifteki cisim, yapı ve yerlerin dijital modellerinin paylaşıldığı ve satışa sunulduğu Sketchfab web sitesidir. Bu modellere internet üzerinden kolayca erişilebildiği için, KM nesnelerinin bilinirliğini artırma konusunda etkili olma potansiyeli taşırlar. Replikalar KM nesnelerinin rekonstrüksiyonu için bir aşama olarak da kullanılabilir. Örneğin 2009 tarihli, depremde ağır hasar gören parçalara ayrılan Madonna of Pietranico heykelinin restorasyon projesinde, heykelin parçaları taranarak dijital 3B modelleri oluşturulmuş, parçaların bir araya gelme senaryoları dijital ortamda denenmiş ardından yapıştırıcı ve alçı tozu kullanan yüksek hassasiyetli bir 3B yazıcı ile parçaların fiziksel replikaları üretilerek; özgün heykele temas etmeden önce montaj işlemi bu replikalar ile denenmiştir (Arbace ve diğ., 2013).

2.2 Dijital ve Fiziksel Kopyaların Etik Tartışması

Kültürel mirasın dijital kopyalarının oluşturulması etik açıdan tartışma konusu olmuştur.

Benjamin (1969) sanat üretimlerinin aurası olduğunu ve yeniden üretimlerin eserlerin geleneksel bağlamları ile olan ilişkilerinin zayıflamasına dolayısıyla sanat eserlerinin

eşsizliğini yok ederek kitlesel varlıklara dönüştürdüğünü savunur. Fakat aynı zamanda, replikaların erişilmesi zor sanat eserleri geniş kitlelerce ulaşılabilir kılarak sanat eserlerinin demokratikleşmesine katkıda bulunduğunu da öne sürmüştür. Kültürel miras bağlamında, replika üretiminin erişebilir durumda olmayan ya da koruma amacıyla erişimi kısıtlanan KM alanlarına ve öğelerine erişim imkanı sağladığı savunulabilir.

Ch'ng (2019)'a göre dijital kopyalar daha fazla kopyalamaya tabidir ve bu nedenle orijinal ile birebir bir kopyanın dahi değeri hiçbir zaman orijinaline eşdeğer olarak algılanamaz.

Hindmarch (2019) aurayı izleyicide duygusal bir tepki uyandıracak duygusal bir güç olarak tanımlarken kültürel miras uygulamalarında 3 boyutlu modellerden bahsederken “dijital vekil” teriminin yaygın olarak kullanıldığını ve dijital modellerin vekil olarak kullanılabilmesi için sanal modelin aynı bilgi içeriğine sahip olması gerektiğini vurgulamıştır.

Foster ve Jones (2019) imzalı çalışma, replikaların çağdaş kültürel mirasta önemli bir yer tuttuğunu ve bu nesnelerin özgünlük, otantiklik ve değer yaratma süreçlerinde kritik bir rol oynadığını öne sürmektedir. Replikaların, sosyal ilişkiler, mekan ve maddesellik aracılığıyla kendi değerlerini ve otantikliklerini kazandığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, replikaların özgün nesneler kadar değerli olabileceği ve bu nesnelerin yaratıldıkları bağlam ve ilişkiler üzerinden değerlendirilmesi gerektiği savunulmaktadır. Yazarlara göre replikaların koruma ve yönetim politikalarına dahil edilmesi gereklidir ve kendi başlarına değerli ve anlamlı oldukları kabul edilmelidir.

Tucci ve diğ. tarafından 2023 yılında yayınlanan ve Michelangelo'nun "David" heykelinin ultra yüksek çözünürlüklü 3D tarama ve modelleme sürecini ele alan makalede yazarlar, kopyanın oluşturulma amacının etik değerlendirmede büyük rol oynadığını vurgulamış ve eğitim veya kırılgan nesnelerin orijinallerinin korunması amacıyla üretilen kopyalar ile ticari kazanç amacıyla üretilen kopyaların farklı değerlendirilmesi gerektiğini savunmuştur. Bu noktada, orijinal nesnenin korunması için güncel teknoloji gelişmelerden yararlanılması gerektiğini ve bu amaçla kopya üretiminin gerekli olduğunu öne sürmüşlerdir.

Tez kapsamında sunulan yeniden üretim çerçevesi, KM nesnesinin yerine geçmeyi hedeflemeden nesneye ait soyut ve somut bilginin geniş çevrelere ulaştırılmasını,

nesnenin akademik ya da sergi amacıyla daha yakından incelenmesine olanak sağlamayı amaçlamaktadır. Bu amaçla üretilen bir replika, KM nesnesinin bağlamıyla beraber incelenmesinin sağlayacak olduğu tinsel deneyimden mahrum olma dezavantajına sahip olsa da, çalışmada ele alınan ahşap süslemeler gibi özgün eserlerin bilinirliğini ve bilinirliğin artmasıyla bağıntılı olarak bu eserlere karşı olan koruma davranışını arttırma imkanı bakımından değerli görülmüştür.

2.3 Belgeleme Yöntemleri

Kültür mirası öğelerinin dijitalleştirilmesinin belgeleme bağlamında bir önemi bulunmaktadır. Kültürel mirası belgelemede geleneksel yöntemler yetersiz, zaman alan süreçler olmaktadır. Dijital yöntemler bu noktada hızla gelişmektedir. Yeni teknolojiler ve artan hesaplama güçleri ile yüksek doğruluk değerleri ve hassas ölçümler yapma imkanları azalan süre ve maliyet dijital belgeleme yöntemlerini ön plana çıkarmaktadır. Yeni teknolojiler ile hem kültürel mirasın belgelenmesi hızlanmakta aynı zamanda toplumda yaygınlaşma ve kültür mirası nesnelerinden üretilen veri sayısını arttırmaktadır. Sayısallaştırma yöntemleri kültürel miras nesnesinin türüne, boyutuna ve durumuna göre değişmektedir. Dijitalleştirme yöntemleri farklı donanım yazılım birlikteliklerinden aynı zamanda farklı iş akışlarını gerektirir. Bu iş akışlarının her biri dijitalleşmiş nesnenin özelliklerini belirler.

Somut mirasın belgelenmesinde 19. yy.'dan bu yana iki boyutlu belgeleme olan fotoğraf önemli ve etkili olmuştur. Bu araç hala arkeolojik alanların havadan görüntüleri gibi iki boyutlu nesnelerin gösteriminde etkilidir. Ancak geometrik karmaşıklığı yüksek ve her yönden belgelenme ihtiyacı olan 3 boyutlu bir kültürel miras nesnesinin, heykeller sütunlar gibi belgelenmesinde etkisiz kalmaktadır. Fotoğraftaki nesneye bir ölçek eklenmesi halinde metrik temsili yapılsa da 3B dijitalleştirilmiş bir modelde elde edilebilecek hassasiyet ve detay düzeyi çok daha fazladır (Guidi ve Frischer, 2020).

Kültürel mirasın 3 boyutlu dijitalleştirilmesinde nesnenin kendi formu ve malzemesinden kaynaklanan ve ihtiyaç duyulan dijital karmaşıklık düzeyi var olmaktadır. Bu karmaşıklık düzeyine göre farklı yöntem ve teknolojiler mevcuttur. Bu tekniklerin her birinin hedefi farklı nesne tipleri ve ölçekler için en iyi belgeleme amacını karşılamaktır (Pavlidis, 2007). Kültürel mirasın dijitalleştirilme yöntemleri uygulanan nesnenin boyutuna, veri toplamının fiziksel konumuna, yöntemde

kullanılan alete göre değişiklik gösterir ve bu şekilde adlandırılır. Bu yöntemlerin seçiminde maliyet, nesnenin boyutu, ekipman boyutu, doğruluk düzeyi, beceri gereksinimleri ve üretilen verilerin karmaşıklığı etkili olmaktadır.

Kültürel miras nesnelerinin belgelenme tekniklerinin çeşitliliği, uzmanlar tarafından farklı sınıflandırmalar yapılmasına sebep olmuştur. Tez kapsamında, metrik verilere dayandığı için, Hassani (2015)'in belgeleme teknikleri sınıflandırması referans olarak kabul edilmiştir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1: Belgeleme tekniklerinin sınıflandırılması, Hassani (2015)'ten uyarlanmıştır.

Görüntü Tabanlı	Fotogrametri	Panoramik Fotoğraf Yakın Mesafe Fotogrametrisi İnsansız Hava Aracıyla Fotoğraf
	Kızılötesi Kameralar	El ile Rölöve
	Geleneksel Yersel Rölöve	Teodolit Ölçümü Yersel Lazer Tarama
Görüntü Tabanlı Olmayan	Lazer Tarayıcı	LiDAR
	Foto-Lazer Tarayıcı	Yapılandırılmış Işık Taraması
Kombine Yöntemler	Yapılandırılmış Işık	Kinect Sensör
		David Lazer Tarayıcı

2.3.1 Görüntü tabanlı belgelemeler

Görüntü tabanlı belgeleme yöntemi fotoğraflar aracılığı ile kültürel mirasın belirli bir zamanda belgelenmesine dayanmaktadır. Arkeolojik alanların, kaybolma yada zarar görme riski altındaki KM öğelerinin, heykel sanatının ve diğer kültürel eserlerin 3 boyutlu metrik modellerinin oluşturulmasında görüntü tabanlı yöntemleri kullanarak belgelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Galeazzi, 2014).

Bu kategori altında öne çıkan yöntemlerden biri fotogrametridir. Fotogrametri, nesnelerin ve yapıların fotoğraflar aracılığıyla ölçülmesi ve bu ölçümlerin 3B modellere dönüştürülmesi sürecidir (Luhmann ve diğ., 2023). Fotogrametri yöntemi belgelenen nesnenin boyutuna, çekilen fotoğrafların konumuna ve uygulama alanına göre değişebilmektedir (Kutlu, 2023).

Resimlerin çekilme konumuna göre:

Yersel Fotogrametri: Kameranın yerde konumlandırıldığı ve veri toplandığı fotogrametri türüdür.

Hava Fotogrametrisi: Hava araçları. (İnsansız hava araçları, helikopter, balon vb.) kullanılarak veri toplanan yöntemdir. Büyük ölçekli yapılarda, arkeolojik alanlarda ve topoğrafyalarda yaygın kullanılmaktadır.

Nesnenin boyutuna göre:

Mikro Fotogrametri Küçük ölçekteki objelerin ve ayrıntıların yüksek hassasiyetle incelendiği detaylı fotogrametri tekniğidir. Bu yöntem, özellikle küçük ölçekli nesnelerin veya detay gerektiren yapısal özelliklerin dijitalleştirilmesinde kullanılır. Nesneye yakın mesafeden alınan yüksek kaliteli görüntüler, daha kesin ve detaylı 3B modellerin üretilmesini sağlar.

Makro Fotogrametri Büyük ölçekli yapılar ve alanların fotoğraflanarak belgelendiği ve incelendiği tekniktir. Bu teknikte hava araçlarının kullanımı yaygındır.

2.3.2 Görüntü tabanlı olmayan belgelenmeler

Bu teknikler, görüntü kullanmaksızın doğrudan nesnenin fiziksel özelliklerini tarama yoluyla dijital ortama aktarır. Bu kategorideki en yaygın yöntem lazer taramadır. Bu yöntemler üç başlıkta incelenebilir. Bunlar: Yersel lazer tarama, hava lazer tarama ve ışık algılama ve mesafe belirleme teknolojileridir.

Yersel lazer tarama yani yerden yapılan taramalar, büyük yapılar ve geniş alanların doğru bir şekilde üç boyutlu koordinatlarla kaydedilmesi için uygundur (Hassani, 2015). Havadan yapılan lazer taramaları ise, geniş alanları hızla tarama imkanı sunması sebebiyle özellikle arkeolojik sit alanları gibi geniş bölgelerin belgelenmesi için idealdir (Höhle, 2013). Işık Algılama ve Mesafe Belirleme (LiDAR) teknolojisi, nesnelerden yansıyan ışık pulslarını kullanarak mesafeleri ölçer ve bu verileri kullanarak yüksek çözünürlüklü 3B haritalar oluşturur (Calantropio ve Chiabrando, 2024).

2.3.3 Kombine yöntemler

Kombine yöntemler, görüntü tabanlı ve görüntü tabanlı olmayan belgeleme tekniklerini bir araya getirerek, her birinin güçlü yönlerinden faydalanır. Bu sayede daha kapsamlı, detaylı ve doğruluk oranı yüksek sonuçlar elde edilir.

Foto-lazer tarama cihazları, fotogrametrik görüntüler ve lazer tarama verilerini birleştirir. Fotogrametri, nesnelerin ve alanların fotoğraflarını kullanarak üç boyutlu modeller oluştururken, lazer tarama ise lazer ışınları kullanarak mesafe ölçümleri yapar. Bu iki yöntemin birleşimi, çok daha zengin detaylara sahip ve yüksek doğruluk oranına sahip 3B modeller üretir. Bu cihazlar, büyük yapıların ve geniş alanların belgelenmesi ve analiz edilmesinde özellikle faydalıdır (Luhmann ve diğ., 2023).

Yapılandırılmış ışık yöntemi, nesne yüzeyine özel desenlerin projeksiyonu ile çalışır. Bu projeksiyon, nesne yüzeyine ışık desenleri yansıtır ve bu desenlerin deformasyonu, nesnenin yüzey özelliklerine göre değişir. Kameralar bu deformasyonları kaydeder ve yazılımlar bu verileri analiz ederek nesnenin üç boyutlu modelini oluşturur. Yapılandırılmış ışık yöntemi, yüksek doğruluk ve detay seviyesi gerektiren durumlarda kullanılır ve özellikle endüstriyel tasarım, kalite kontrol ve arkeolojik belgeleme gibi alanlarda etkilidir.

2.4 Kültürel Mirasın Yeniden Üretimi

Kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması, toplumların kimliklerini ve tarihlerini sürdürmeleri açısından büyük önem taşımaktadır. Ahşap kültürel miras, bu sürecin önemli bir parçasını oluşturur. Geleneksel el sanatlarının ve zanaatkarların giderek azalması, bu mirasın korunmasını ve yeniden üretilmesini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, dijitalleştirme ve güncel teknolojilerin kullanımı, ahşap kültürel mirasın korunması ve yeniden üretilmesi için etkili çözümler sunmaktadır.

Geleneksel ahşap işçiliği, yüzyıllar boyunca ustadan çırağa aktarılan bilgi ve becerilere dayanır. Ancak, modern toplumlarda zanaatkarların sayısının giderek azalması ve bu mesleğe olan ilginin düşmesi, bu bilgilerin kaybolma riskini artırmaktadır. Bunun sonucunda, birçok geleneksel teknik ve desen, yeterince belgelenmeden ve dijitalleştirilmeden yok olma tehlikesiyle karşı karşıyadır.

Dijitalleştirme, ahşap kültürel mirasın belgelenmesi, korunması ve yeniden üretilmesi sürecinde önemli bir rol oynar. Güncel teknolojiler, bu süreci destekleyerek, zanaatkarların eksikliğini telafi edebilir ve kültürel mirası daha geniş kitlelere ulaştırabilir.

CNC, üretim süreçlerinde kullanılan bir kontrol sistemidir. CNC teknolojisi, makinelerin hareketlerini ve operasyonlarını bilgisayar programları aracılığıyla kontrol eder ve bu sayede daha yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlar. CNC makineleri, üretim süreçlerinde tutarlılığı artırır ve insan faktöründen kaynaklanan hataları minimize eder (Smidt, 2003). Eksiltmeli üretimi CNC makineleri ile gerçekleştirmek, endüstride yaygın kullanılan bir fabrikasyon tekniğidir. Robot kollar ve CNC makineleri endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan ve işleme faaliyetleri gibi birçok görevi yerine getirebilen bir teknolojidir. G koduyla yani geometrik programlama diliyle çalışan ve makine kodunu oluşturmak için çeşitli yazılım uygulamalarına sahip ve her uygulamanın kendi diline ve yazılımına bağlıdır (Attar ve diğ., 2023). Yakın geçmişte farklı kültürel miras öğelerinin çeşitli ölçeklerde prototipleri veya replikaları çeşitli malzemeler kullanılarak CNC araçları ile üretildiği birçok örnek mevcuttur.

Ahşap miras öğelerinin güncel yöntemler ile belgelenmesi ve yeniden üretilmesine yönelik çalışmalar Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Çalışmaların hepsinin son yıllarda gerçekleşmiş olması konunun güncel olduğunun göstergesidir. Tablodaki çalışmalarına gerçekleştirilme amaçları farklı olsa da genellenebilir yöntemleri tarama, yeniden üretim ve malzeme bakımından ortaklık gösterir. Örneğin Barbotis ve diğ. (2023)’in çalışmasında el oyma işlemini robot kol ile taklit etmeye çalışırken, Trivino-Tarradas ve diğ., (2023) çalışması kültürel mirasın kopyalanıp güncel yapılarda kullanılmasını ele alır. Tang (2023) Çalışması km kabul edilen enstrümanın yapısal özelliklerinin farklı bir enstrümana aktarılıp ses farklılıklarını inceleme üzerine yoğunlaşmıştır. Fotogrametri, lazer tarama, 3B tarayıcı (yapılandırılmış ışık) gibi farklı tekniklerin kullanıldığı ve 3B modellerin oluşturulduğu çalışmalarda miras öğelerinin dijital modelleri oluşturulurken bu modeller CNC ve robot kol teknolojileri kullanılarak üretilmiştir. Ancak çalışmaların genelinde optimizasyon adımları detaylı belirtilmemiştir. Optimizasyon aşamasını açıklayan çalışmalar ise tersine mühendislik yazılımlarının kullanılması dikkat çekmektedir. Ayrıca ahşabın çok yönlü işlenme

aşamaları detaylı açıklanmamış sonuç ürünlerin karşılaştırılması nitel olarak yapılmamıştır.

Bu bağlamda çalışma tablodaki çalışmaların aksine tüm adımları detaylı açıklamanın yanı sıra model düzenlemelerinde farklı yaklaşımları da çalışma kapsamına alıp karşılaştırmaya dahil etmiştir.

Çizelge 2.2: Literatürde ilgili çalışmalardan örnekler.

Ülke	Tarama Tekniği	Malzeme	Araç	Künye	Görsel	Özet
Rusya	Fotogrametri	Ahşap	Robot kol	Norina ve Liu (2021)		Bir kilisenin ahşap sütunu fotogrametri ile taranıp, Grasshopper'la modellenip robotik kol ve CNC ile 1/2 ölçeğinde prototipi üretilmesinin süreci açıklanıyor.
Yunan-istan	3B tarayıcı	Ahşap	5 eksen CNC	Barbouts Kamperido u ve Economidis (2023)		17. yy. tarihli manastır kapısının tamamının 3B tarayıcı yardımı ile dijitalleştirilmesi ve belirli bölümlerinin yendiden üretilerek oyma ustalarının ürettikleri ile karşılaştırılmasına yer veriliyor.
İspanya	Fotogrametri	EPS polyester	CNC	Triviño-Tarradas ve diğ., (2023)		Granada'daki tarihi bir binanın cephesindeki süslemeler taranıp yeniden üretilerek başka yapılarda kullanılmasını inceleyen bir çalışma ancak çalışmada üretim süreciyle ilgili detaylara az yer veriliyor.
İtalya	Lazer tarama	Belirtilmemiş	5 eksen CNC ve 3B yazıcı	Altadonna ve diğ. (2023)		Kilisenin kapı ve çevresinin taranıp 5 eksen CNC ve 3B yazıcı ile prototiplerinin üretilmesi ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanılabilmesi üzerinden değerlendiriliyor.
Çin	Lazer tarama	Ahşap	CNC	Tang (2023)		Tarama ile KM değeri olan müzik aletinin üretilmesi enstrümanların belirli bölümlerinin diğerine aktarılmasını kapsıyor.

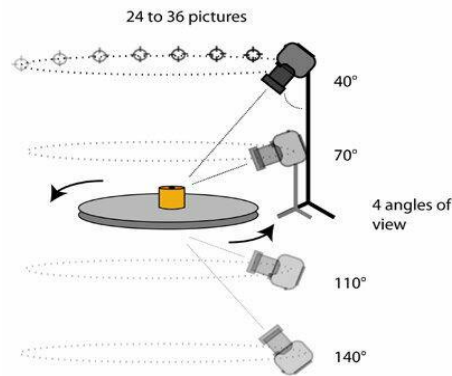
Çizelge 2.2 (devam): Literatürde ilgili çalışmalardan örnekler.

Ülke	Tarama Tekniği	Malzeme	Araç	Künye	Görsel	Özet
İtalya	El ile ölçüm ve bilgisayar ortamında modelleme	Ahşap	CNC ve 3B yazıcı	Fico ve diğ. (2023)		17. yy tarihli ahşap sütun başlığının ölçüleri alındıktan sonra bilgisayar ortamında modellenmesi ve 3B yazıcı ve CNC ile üretimi ve malzemelerin dayanımının karşılaştırılmasını içeriyor.
İspanya	Fotogrametri	Ahşap	CNC	Roma ve diğ. (2014)		Arabistan'daki ahşap süslemelerin fotogrametri ile çoğaltılıp CNC ucunun hareketlerine yönelik optimizasyonunu içeren bir dizi adımı içeriyor ancak üretim yok.
Hırvatistan/ Avusturya	Fotogrametri	Ahşap	3 eksen CNC	Bajic ve diğ. (2011)		Lira adı verilen müzik aletinin yeniden üretilmesi için fotogrametri ile tarama ve tersine mühendislik yazılımlarının CNC amaçlı kullanımını içeriyor.

3.1 Veri Toplama

Veri toplama aşaması, belgelemede düşük maliyetli iki yöntem kabul edilebilecek mobil lidar ve fotogrametrik modelleme amaçlı veri toplamayı içermektedir. Ayrıca ölçekleme ve karşılaştırma aşamalarında kullanılmak üzere sütunların metrik verileri toplanmıştır.

Fotogrametri amaçlı veri toplama aşamasında nesnenin mümkün olduğunca yüksek çözünürlüklü fotoğrafları gerekir. Tez kapsamında dijital fotogrametri tekniği kullanıldığından dijital kameralardan elde edilen görüntüler bu süreçte kullanılmaktadır. Dijital görüntüler her birinin sayısal bir karşılığı olan piksellerden oluşmaktadır. Her bir pikselin bir tam sayı konumu veya adresi bulunmaktadır (Castleman, 1996). Önceki bölümlerde açıklandığı gibi nesnenin bütün yüzeylerinin eşit ışığa maruz kalması ve yüzeylerdeki ışığın çok fazla parlamaması aynı zamanda kararmaması, oluşturulacak modelin kalitesi açısından önemlidir. Parlayan yüzeyler fotoğraf hizalama ve nokta bulutu oluşturma aşamasında yazılımlara zorluk çıkarır. Fotogrametri için fotoğraflama işleminde nesnenin etrafında birbiriyle örtüşen fotoğrafların çekilmesi gerekir (Şekil 3.2). Fotoğrafların örtüşme oranı en az %30 olmalıdır (Kutlu, 2023). Bu fotoğrafların nesneyi kuşatacak biçimde farklı açılarda veya yüksekliklerde olması gerekir. Fotoğrafların sistematik bir şekilde çekilmesi, gerekli yakınlık ve uzaklık aynı zamanda çekilen nesnenin bütününün kadraja girmesi model kalitesi açısından önemlidir (Kutlu, 2023). Fotogrametri çalışmalarında tripod, kullanımı yaygındır. Tripod ile istenilen yüksekliklerde fotoğraf makinesi sabitlenerek objenin etrafında 360° görüntü toplanabilir. Elde edilen görüntüler fotogrametri yazılımlarına aktarılmak üzere bilgisayar ortamına aktarılır.



Şekil 3.2 : Fotogrametride kamera açıları ve konumları (Poigt, 2018).

3.2 Dijitalleştirme

Tablet ve telefon entegre lidarlar düşük bütçeli, kolay yönetilebilir nokta bulutu üretebilmesi gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır (Balado ve diğ., 2022). Oluşturulan modelin doğruluk seviyesi konusunda yeteri kadar iyi olduğuna dair bir bilgi olmasa da lidar sensörlü tabletlerin yaygınlaşması belgeleme amaçlı kullanılabilirliğini gündeme getirmektedir. Mimari belgelemede değerli bir araç potansiyeli gösterse de belirli şekildeki (sütun) yapı elemanları üretimi soru teşkil etmektedir (Vacca, 2023). Tez kapsamında fotogrametri modelleri ile kıyaslama amacı ile lidar entegre tablet ile 3B modelleme yapılmıştır. Ancak elde edilen bulgular neticesinde tablet entegre lidar ile elde edilen modellerin çok yetersiz olduğu anlaşıldığından fotogrametri yöntemi ile çalışmalara devam edilmiştir. Saha çalışması bölümünde yetersiz olmasının sebeplerine değinilmiştir.

Fotogrametri yazılımları kolay arayüzler ile uzman bilgisi olmadan kullanılabilirliği giderek artan yazılımlar haline gelmeye başlamıştır. Bunun yanında yüksek doğruluk oranında modeller oluşturmayı mümkün kılarlar. Fotogrametri amaçlı kullanılan yazılımlar çeşitlilik göstermektedir. Agisoft Metashape, Reality Capture, Pix4mapper, Colmap, Autodesk Recap yaygın olarak kullanılan yazılımlardır. Metashape detaylı modelleme becerisi ve kolay kullanımıyla ön plana çıkan bir fotogrametri yazılımıdır. Metashape görüntüleri kamera koordinatlarına göre hizalama ve bu görüntülerden nokta bulutu yoğun nokta bulutu, DEM (Dijital Yükselti Modeli) verileri ve ortofotolar oluşturur. Nokta bulutundan sonraki aşamada 3B model yüzeyler aracılığı ile oluşturulur. Oluşturulan modellerin fazla noktalarının silinmesi açık yüzeylerinin kapatılması işlemlerini de olarak gerçekleştirebilmektedir.

3.3 Veri İşleme

Fotogrametri ve tarama çalışmalarında oluşturulan modeller yüksek ve düzensiz ağ yapısına sahip olmaktadır. Kullanım amacına göre bu modellerin optimizasyonlarını sağlamak önemlidir. Yüzey yapılarının, ağ kusurlarının, doku düzenlemelerinin, ölçekleme ve gereksiz kısımların silinmesi gibi aşamalar modelin üretim süreçlerinde kusursuz çalışması, dijital mecralarda paylaşılması ve arşivlenmesi için kullanılmaktadır. Geomagic Wrap, Meshlab, Fusion 360, Blender gibi yazılımlar amacına göre bu düzenleme işlemlerinde kullanılmaktadır.

3.4 Fabrikasyon

Fiziksel nesnelerin yeniden üretilmesi kapsamında, nesneler tarama ile dijitalleştirilip dijital modellerin düzenleme işlemleri gerçekleştirildikten sonra nesnelerin farklı fabrikasyon teknikleri ile yeniden üretimi sağlanabilmektedir. Eklemeli ve eksiltmeli yöntemler prototip, maket, ve replika üretimleri için kullanılabilmektedir. Eklemeli üretim yöntemlerinin temel çalışma mantığı 3B model verilerinin plastik, metal, çimento gibi farklı malzemelerin katman katman birleştirilerek ürünün oluşturulmasına dayanır. Bu süreçler malzeme israfını minimuma indirmekle beraber karmaşık geometrilerin üretilmesini sağlayan bir noktada üretim özgürlüğü sunan yöntemlerdir (Bikas ve diğ., 2016). Genellikle sentetik malzemeler kullanarak 3B yazıcı gibi araçlar yardımıyla bu modellerin fiziksel nesneye dönüşmesini sağlarken, eksiltmeli yöntemlerde ahşap gibi doğal malzemelerin işlenmesi daha yaygındır. Tez kapsamında 4 başlık halinde oluşturulan bu yöntem, saha çalışması safhası için Konya Beyşehir Eşrefoğlu Camii, Sivrihisar Ulu Cami, Kastamonu Kasabaköy Mahmutbey Camii ve Afyon Ulu Cami'lerindeki ahşap sütunlar örnek olarak seçilerek uygulanmıştır. Saha çalışmasında yöntemin ileriye ve geriye dönük adımları süreç içerisindeki değerlendirmelerden yola çıkarak uygulanmış ve tekrarlanılabilmesi için detaylı olarak paylaşılmıştır.

4. SAHA ÇALIŞMASI

Saha çalışması bölümünde çalışılacak camilerin belirlenme kriterleri, alan çalışmasında gerçekleştirilen belgeleme işlemleri ve yapı elemanları, fiziksel üretimler için gerçekleştirilen iş akışlarının deneysel aşamaları ve üretim süreci açıklanmaktadır.

4.1 Anadolu'daki Ahşap Camilerin Belirlenmesi

Anadolu, ahşap eserler açısından zengin bir mirasa sahip olmasına rağmen, mevcut eserlerin sayısının beklenenin altında olması dikkat çekicidir (Bozer, 1992). Aralık 2017'de yapılan 9. ICOMOS Genel Kurulunda kabul edilen Ahşap Mirasın Korunması İçin İlkeler arasında yer alan “Tümüyle veya kısmen ahşaptan yapılmış binaların ısı ve nem değişiklikleri, ışık, mantar, böcek saldırıları, aşınma, yıpranma, yangın, deprem veya diğer doğal afetler ile insanların yıkıcı eylemleri gibi çevresel ve iklimsel koşullara olan duyarlılığını bilmek” (ICOMOS, 2017) ilkesinde bahsedilen risk faktörleri, bu durumun olası nedenleri olarak gösterilebilir. Ahşabın iklim ve zamanla değişen kullanım koşullarından aşırı derecede etkilenmesi göz önünde bulundurulduğunda Anadolu'daki ahşap eserlerin korunması, envanterlerinin detaylı bir şekilde çıkarılması, sanatsal özelliklerinin sistematik bir biçimde araştırılması ve bu değerlerin gelecek nesillere aktarılması büyük bir önem arz etmektedir. Bu bağlamda Anadolu'daki ahşap camiler tarihi, kültürel ve mimari değerleriyle öne çıkar.

Anadolu'da camilerde ahşabın yapısal eleman olarak kullanılmaya başlanması, 13. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Ahşap sütunlar, kirişler ve başlıklar gibi yapısal elemanlar, Orta Asya mimari geleneği ile sentezlenerek Anadolu'ya özgü bir mimari stilin oluşmasına katkıda bulunmuştur (Öney, 1992). Bu bağlamda Beyşehir, Afyonkarahisar ve Sivrihisar'daki camiler, Türk yapım geleneğinin bu topraklardaki yansıması olarak kabul edilir ve bu camiler arasında Afyonkarahisar Ulu Camii ile Beyşehir Eşrefoğlu Camii, Selçuklu döneminin ahşap sütunlu yapılarında özellikle önemli yerlerde durmaktadır (Kuran, 1972). Sivrihisar Ulu Camii, Beyşehir Eşrefoğlu

Camii, Afyonkarahisar Ulu Camii ve Ankara Arslanhane Camii, ahşap camilerin en eski ve en güzel örnekleri olarak değerlendirilir. Bu camiler UNESCO Dünya Mirası Listesi'nde "Anadolu'nun Ortaçağ Dönemi Ahşap Hipostil Camileri" olarak yer almaktadır. Bu yapıların oyma işlerinin dikkat çekildiği çalışmalardan yola çıkılarak Çizelge 4.1 oluşturulmuştur. Bu yapıların ahşap sütun gövdeleri, konsol kirişleri ve sütun başlıkları, oyma teknikleri ile süslenmiş olup, özellikle Sivrihisar Ulu Camii'nin mihrabı önündeki iki sütunda görülen eğri kesim tekniğiyle yapılmış süslemeler dikkat çekicidir (Aktemur, 2002; Öney, 1971). Selçuklular, Anadolu'daki camilerde yıldız, altıgen ve üçgen gibi geometrik ve stilize edilmiş motifler kullanmışlar, bu motifler Afyonkarahisar Ulu Cami, Beyşehir Eşrefoğlu Cami ve Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Cami gibi yapılarda ön plana çıkmıştır (Aktemur, 2002). Ayrıca, Sivrihisar ve Afyonkarahisar Ulu camileri, Anadolu'ya özgü küfe tipi plan şeması örnekleri arasında yer alır (Öney, 1971). Yapılara ilişkin sadece sütunlar ve sütun başlıkları üzerinden bir inceleme yapılmıştır. Ankara Arslanhane Camii'nin oyma işlerinin bulunduğu elemanlar olan sütun başlıkları taş malzemesi olduğundan çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Çizelge 4.1 : UNESCO Anadolu'nun Ortaçağ Dönemi Ahşap Hipostil Camileri.

Cami İsmi	Yapım Yılı	Sütunlarından Bahsedilen Kaynaklar
Afyonkarahisar Ulu Camii	1272- 1277	Önge (1968), Aslanapa (1972), Kuran (1972), Aktemur (2002), Hayes (2010), Koç (2022)
Sivrihisar Ulu Camii	1274- 1275	Öney (1970 ve 1992), Aslanapa (1972), Kuran (1972), Altınsapan (1988), Aktemur (2002), Hayes (2010), Koç (2022)
Beyşehir Eşrefoğlu Camii	1297- 1299	Önge (1968), Aslanapa (1972), Kuran (1972), Akok (1976), Aktemur (2002), Hayes (2010), Koç (2022)
Arslanhane Camii	1290	Aslanapa (1972), Altun (1988), Aktemur (2002), Koç (2022)
Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii	1366	Akok (1946), Aslanapa (1972), Aktemur (2002), Aydın ve Perker (2017), Koç (2022)

4.1.1 Sivrihisar Ulu Camii

Sivrihisar Ulu Camii, 1274-1275 tarihine dayananmasına karşın farklı dönemlerde onarımlar geçirmiş ve bugünkü halini 1974 yılında yapılan restorasyondan sonra almış olup, Anadolu'daki ahşap sütunlu camiler arasında önemli bir yere sahiptir. Bu yapı, 63 ahşap sütun kullanılarak inşa edilmiş ve bunlardan dört tanesi günümüze kadar orijinal olarak korunmuştur (Aslanapa, 1972). Mihrabın önündeki iki sütun, taş başlıklı ve koyu renkli olup, zengin oyma işleri ve renkli kalem işleriyle süslenmiştir. Bu sütunlarda bulunan oyma işçiliği, Orta Asya kökenli eğri kesim tekniğiyle yapılmıştır ve bu teknik, Anadolu'da nadir görülen bir uygulamadır (Öney, 1970; Aktemur, 2002).

4.1.2 Beyşehir Eşrefoğlu Camii

Beyşehir Eşrefoğlu Camii, kitabesine göre 1296-1299 tarihine dayanmış olup döneminin en büyük ve en orijinal ahşap camilerinden biridir. Bu yapı, 41 toros sediri ahşap sütundan oluşur ve sütunların sekizgen ve yuvarlak formda olması, mimari çeşitliliği gösterir. Caminin mukarnas başlıkları beş farklı tipten oluşmaktadır ve bu başlıklar, mimari çeşitliliği ve estetik zenginliği gözler önüne serer (Koç, 2022).

4.1.3 Afyonkarahisar Ulu Camii

Afyonkarahisar Ulu Camii, 1273 yılında inşa edilmiş olup, caminin 40 adet sütun başlığından çoğu harap olmuş ve bunlardan sekizi dikkat çekici detaylarla bezenmiştir (Uysal, 1993). Bu cami, farklı dönemlerde yapılan onarımlarla önemli değişikliklere uğramış, özellikle 1950'li yıllardaki onarımlarda sütun ve kirişlerin yarısı değiştirilmiştir. Değiştirilen sütun başlıkları, orijinal olanların detaylı ve ince işçiliğine kıyasla daha sade bir tasarıma sahiptir. Onarımlar sırasında bazı sütun başlıkları müzeye taşınmıştır (Koç, 2022).

4.1.4 Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii

Mahmut Bey Camii, 1366 Kastamonu'nun Kasaba köyünde inşa edilmiş olup, iç mekanındaki tavan süslemeleri ve çok renkli kalem işi süslemeleri ile dikkat çekici bir niteliğe sahiptir (Aslanapa, 1972). Yapının ahşap çatısı, iç mekandaki dört adet çam ağacından yapılma sütunlarla taşınmaktadır ve bu ahşap strüktür çivi kullanılmadan yapılan bindirme tekniği ile inşa edilmiştir (Aydın ve Perker, 2017). Bu dört ahşap direğin ikisi dairesel diğer ikisi onikigen kesitlidir ve mihraba yakın olan iki sütunda ahşap sütun başlıkları bulunur. Akok (1946), camide uygulanan oyma ahşap

işçiliğinin, boyalı kalem işi süslemelere nizami bir zemin sağlayacak nitelikte incelikli olduğunu vurgulamıştır.

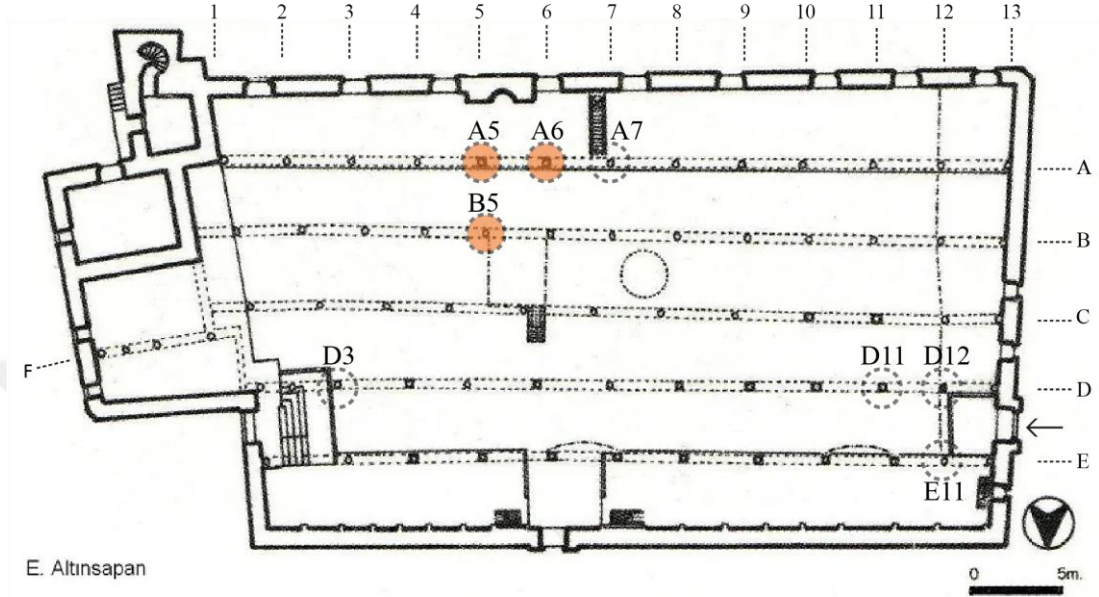
Bu dört cami, Anadolu'da ahşap mimarinin korunması ve anlaşılması açısından büyük önem taşır ve her biri, Selçuklu döneminin mimari ve estetik anlayışını yansıtan değerli örnekler olarak kabul edilir.

4.2 Fotogrametrik Veri toplama

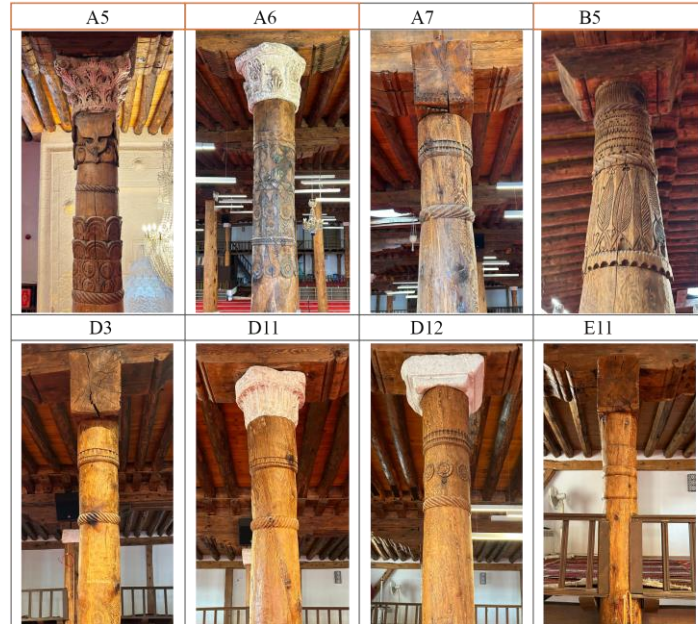
Çalışma kapsamında dört cami ziyaret edildi. Cami sütunları plan çizimleri üzerinden sınıflandırıldı. Sütunların plan düzleminde harf ve sayılarla numaralandırılmasının ardından belgeleme yapılan sütunlar işaretlendi. Sivrihisar Ulu Camiinde 67 sütun numaralandırıldı (Şekil 4.1) ve 3 sütun belgelendi. (Şekil 4.2) Beyşehir Ulu Camiinde 48 sütunun plana işlenmesinin (Şekil 4.3) ardından 4 sütun başlığı belgelendi. (Şekil 4.4) Afyonkarahisar Camiinde bulunan 40 sütunun planda gösterilmesinin ardından (Şekil 4.5) 6 tanesi fotogrametri amaçlı belgelendi. (Şekil 4.6) Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camiin’de 2 sütun planda gösterildi (Şekil 4.7) ve belgelendi (Şekil 4.8).

Cami sütunlarının ve sütun başlıklarının fotoğraflanması için tripod kullanıldı. Sivrihisar Ulu Cami ve Afyonkarahisar Ulu Cami için 3 metrelik tripod yeterli olurken, Beyşehir Eşrefoğlu Cami için 3 metrelik ve 2 metrelik tripod ilkel yöntemlerle birbirine bağlanarak görüntü toplandı. Tripodlar boy hizasının üstüne elle çıkarılıp fotoğraf çekim işlemleri gerçekleştirildi. Fotoğraf çekme işlemi Iphone 13 akıllı telefon kamerasıyla gerçekleştirildi. (4032*3024) piksel boyutunda görüntüler elde edildi. Sütunların oyma işlerinin olduğu gövde veya başlıkları etrafında 3 kademe tam tur dönülerek görüntü toplandı. Fotoğrafların yüksek oranda birbiriyle örtüşmesi amaçlanırken her caminin farklı aydınlatma koşulları ve içeriye aldığı gün ışığı çalışmanın zorluklarından biri oldu. Sütunun etrafından tam tur dönüldüğünden etraftaki farklı ışık kaynakları sütunun farklı açılarında kamera açısına girerek sütunun yüzey parlaklığını etkiledi. Bu sebeple mümkün olduğunca sütuna yakın mesafede ve dikey formatta fotoğraflama işlemi gerçekleştirmeye özen gösterildi. A5 ve A6 sütunları minberin arkasındaki iki sütun orijinalliğini koruduğundan özellikle çalışma kapsamında veri toplanmasına özen gösterilmiştir. İlk saha çalışması kapsamında modele dönüştürmede fotoğraf çekilerek üretilen modellerin bütünlüğü sağlanamadığından ikinci saha çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sütunlar aynı çözünürlükte video çekilerek belgelenmiş, video çekimi sırasında kamera odağı

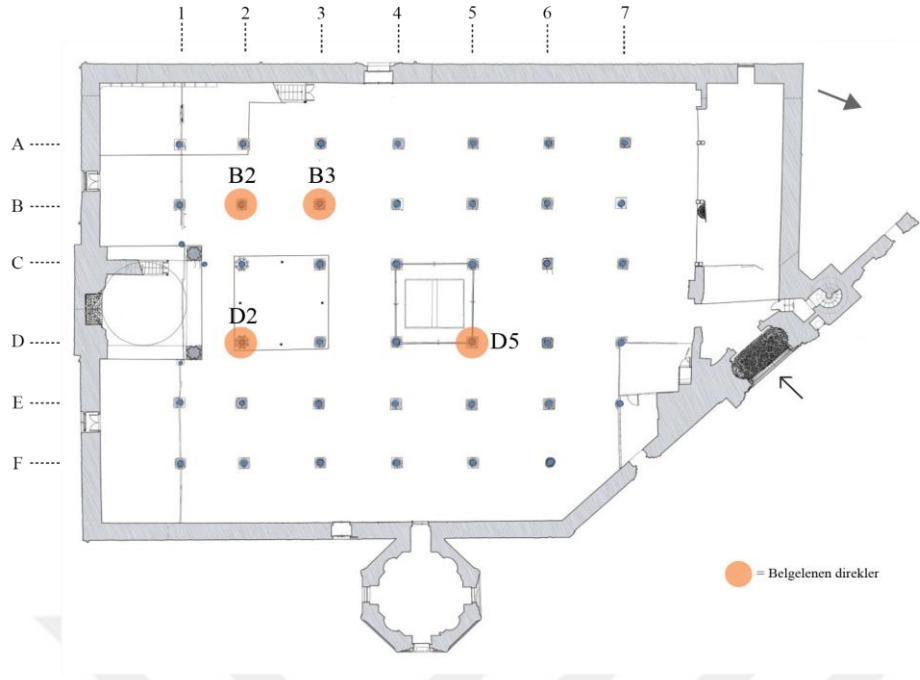
sütuna sabitlenerek görüntü bozulmalarının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Saha çalışmasında ayrıca kumpas, cetvel ve şerit metreler kullanılarak metrik ölçü toplanmıştır (Şekil 4.9).



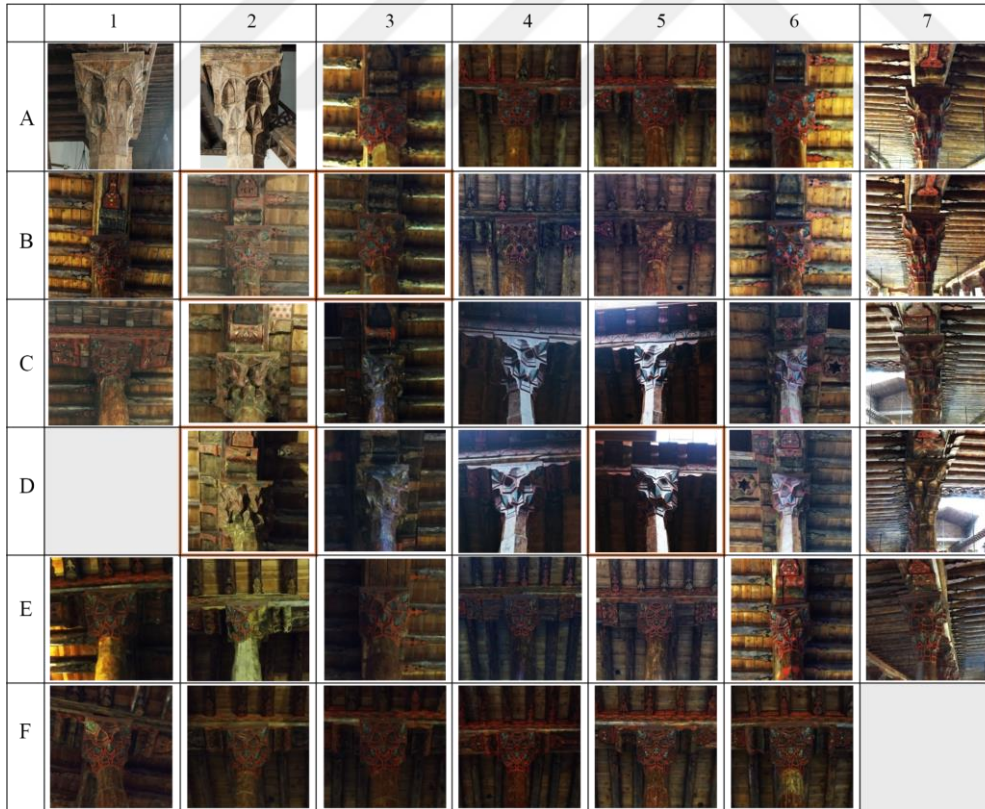
Şekil 4.1 : Sivrihisar Ulu Camii’nde oymalı sütunların plan üzerinde gösterimi. (Altınsapan, E., 1988 *Sivrihisar’da Türk Mimarisi*’nden alınan plan üzerine işlenmiştir.)



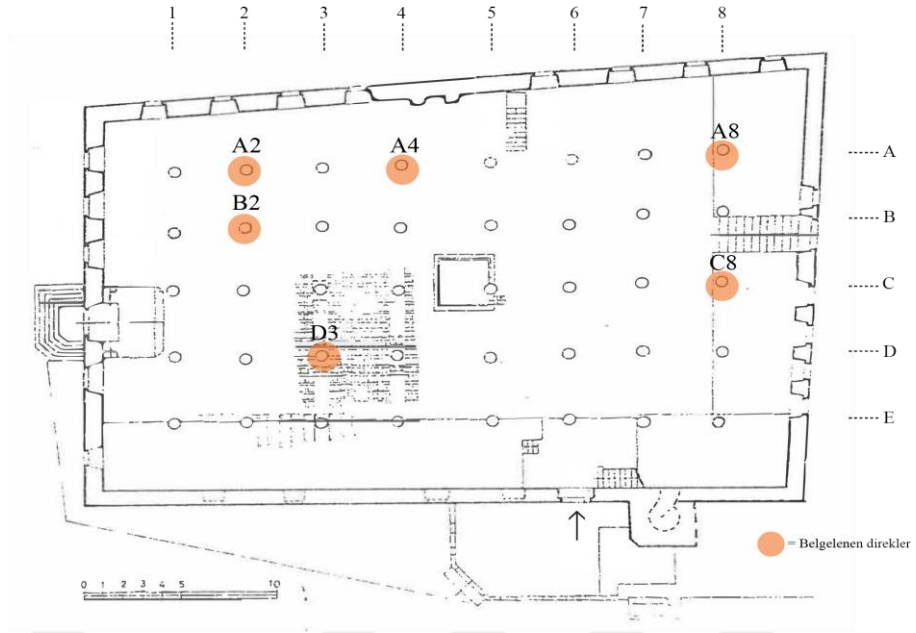
Şekil 4.2 : Sivrihisar Ulu Camii’nde belgelenen oymalı sütunlar.



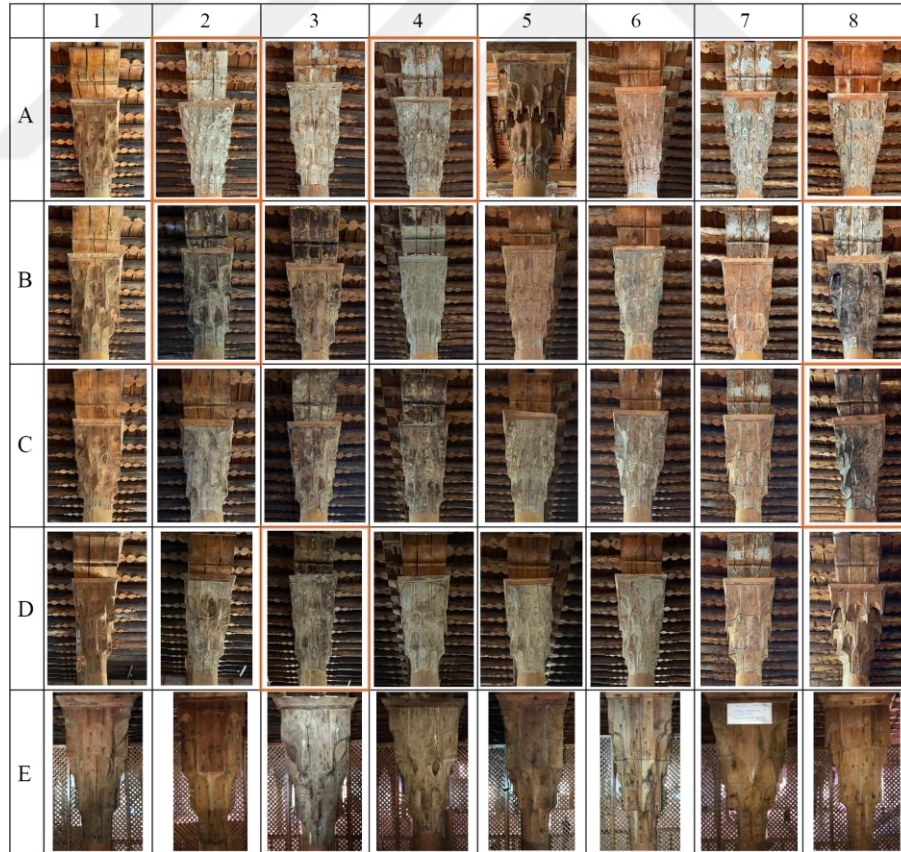
Şekil 4.3 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii’nde belgelenen sütunların plan üzerinde gösterimi. (Çilek, Ü., 2020. *Tezyinî Açısından Beyşehir Eşrefoğlu Camii*’nden alınan plan üzerine işlenmiştir).



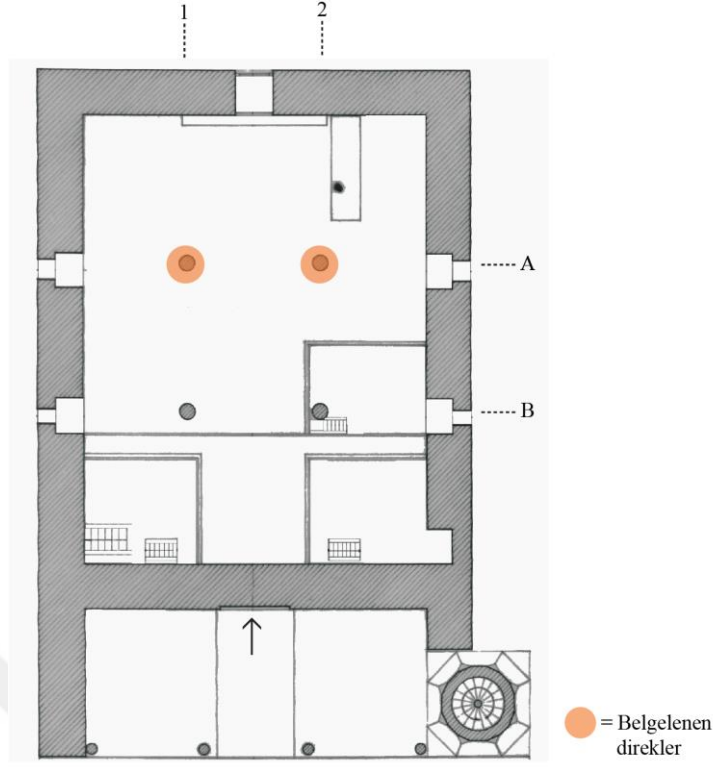
Şekil 4.4 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii’nde belgelenen sütun başlıkları.



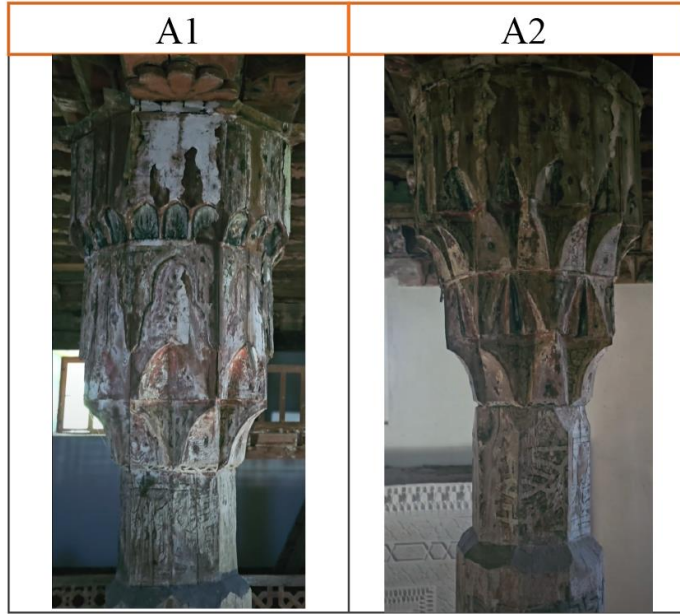
Şekil 4.5 : Afyonkarahisar Ulu Camii’nde belgelenen sütunların plan üzerinde gösterimi. (Uysal, Z., 1993. *Afyon Ulu Câmii’nin ahşap üzerine boyalı nakışları.*’ndan alınan plan üzerine işlenmiştir.)



Şekil 4.6 : Afyonkarahisar Ulu Camii’nde belgelenen sütun başlıkları.



Şekil 4.7 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii'nde belgelenen sütunların plan üzerinde gösterimi. (Akok M.'a ait 1944 tarihli plan çizimi *Salt Araştırma, Ali Saim Ülgen Arşivi'nden* alınarak işlenmiştir.)



Şekil 4.8 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii'nde belgelenen sütun başlıkları.



Şekil 4.9 : Sivrihisar Ulu Camii’nde metrik veri toplama aşaması.

4.3 Modele Dönüştürme

Veri toplama aşamasında elde edilen fotoğraflar bilgisayarda ayrıştırılarak her caminin belirlenen direği için ayrı klasörler oluşturulmuştur. Veri işleme süreci fotoğrafların, her sütun için hazırlanan klasörlerin ayrı yığınlar halinde Agisoft Metashape yazılımına aktarılmasıyla başlamıştır. Görüntüler iş akışı sekmesinde bulunan “görüntüleri hizala” komutu ile hizalanmıştır. Hizalama işlemi ile arayüzde her fotoğrafın çekildiği konumu temsil eden kamera ikonları belirlemiştir. Bu aşamada hizalanmayan fotoğrafları tespit etmek mümkün olmuştur. Fotoğraf hizalama aşaması sorunsuz gerçekleştirildikten sonra iş akışı sekmesindeki “nokta bulutu oluşturma” komutu ile nokta bulutu oluşturma aşaması, daha sonra aynı sekmede yer alan yoğun nokta bulutu oluşturma aşamaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan nokta bulutlarından yüzey ağları oluşturma işlemi için yine iş akışı sekmesinde bulunan “yüzey oluşturma komutu” kullanılmıştır. Bu aşama ile birlikte 3 boyutlu model yüzeyleri arayüzde görünür olmuştur. Modellerin tablosu Sivrihisar Ulu Cami için Çizelge 4.3’te Eşrefoğlu Cami için Çizelge 4.5’te Afyon Ulu Cami için Çizelge 4.7’de, Mahmut Bey Camii için ise Çizelge 4.9’da gösterilmiştir. Model üretiminde kullanılan fotoğraf sayısı ve modelin niceliksel verilerine ilişkin bilgiler Sivrihisar Ulu Cami için Çizelge 4.2, Eşrefoğlu Camii için Çizelge 4.3, Afyonkarahisar Ulu Cami için Çizelge 4.4, Mahmut Bey Camii için Çizelge 4.5’te gösterilmiştir. Oluşan model, çalışma

kapsamında olmayan tavan gibi kısımlar kabaca temizlendikten sonra OBJ (Object-Obj) dosya formatında dışa aktarılmıştır. Elde edilen modellerin oluşturulmasında fotoğraftan elde edilen modeller aydınlatma koşulları nedeni ile kamera kalibrasyonunun ve sütunlara odaklanma ayarlarının bozulmasından kaynaklanan hatalar sonucu yazılımın zorlandığı ve buna çözüm olarak model bütünlüğü oluşturması için sütunlara kamerayı odaklayarak video çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Videolardan Adobe Premiere Pro yazılımı ile videolardan toplu fotoğraflar elde edilip tekrar fotogrametri işlemi gerçekleştirilmiştir. Videodan elde edilen fotoğraflar sayı olarak daha fazla olduğu için elde edilen model bütünlüğü daha fazla olmuş ve yüzey boşlukları ve hataları minimuma indirilmiştir.

Çizelge 4.2 : Sivrihisar Ulu Camii fotogrametri verileri.

Sütun Kodu	Çekilen Fotoğraf Sayısı	Hizalanan Fotoğraf Sayısı	Fotogrametri Modeli Yüzey Sayısı	Fotogrametri Modeli Tie Points
A5	241	207	11,670,305	123,177
A6	362	351	12,516,695	336,653
B5	54	48	3,393,616	38,212

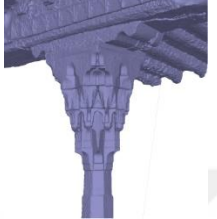
Çizelge 4.3 : Sivrihisar Ulu Camii'nde elde edilen fotogrametrik modeller.

Model Türü	A5	A6	B5
Kafes (Mesh) Model			
Dokulu (Textured) Model			

Çizelge 4.4 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii fotogrametri verileri.

Sütun Kodu	Çekilen Fotoğraf Sayısı	Hizalanan Fotoğraf Sayısı	Fotogrametri Modeli Yüzey Sayısı	Fotogrametri Modeli Tie Points
B2	777	777	3,227,503	366,590
B3	493	492	3,234,521	175,601
D2	521	521	2,809,292	224,842
D5	534	534	3,093,848	215,723

Çizelge 4.5 : Beyşehir Eşrefoğlu Camii'nde elde edilen fotogrametrik modeller.

Model Türü	B2	B3	D2	D5
Kafes (Mesh) Model				
Dokulu (Textured) Model				

Çizelge 4.6: Afyonkarahisar Ulu Camii fotogrametri verileri.

Sütun Kodu	Çekilen Fotoğraf Sayısı	Hizalanan Fotoğraf Sayısı	Fotogrametri Modeli Yüzey Sayısı	Fotogrametri Modeli Tie Points
A2	492	492	4,119,542	181,105
A4	496	494	4,694,722	236,830
A8	475	473	19,066,426	339,378
B2	476	474	9,793,653	243,425
C8	485	472	14,296,443	289,681
D3	488	486	14,404,708	348,813

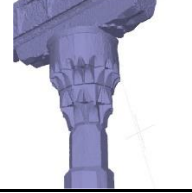
Çizelge 4.7 : Afyonkarahisar Ulu Camii’nde elde edilen fotogrametrik modeller.

Model Türü	A2	A4	A8	B2	C8	D3
Kafes (Mesh) Model						
Dokulu (Textured) Model						

Çizelge 4.8: Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii fotogrametri verileri.

Sütun Kodu	Çekilen Fotoğraf Sayısı	Hizalanan Fotoğraf Sayısı	Fotogrametri Modeli Yüzey Sayısı	Fotogrametri Modeli Tie Points
A1	502	501	11,990,206	194,932
A2	500	500	7,961,148	203,080

Çizelge 4.9 : Kastamonu Kasabaköy Mahmut Bey Camii’nde elde edilen fotogrametrik modeller.

Model Türü	A1	A2
Kafes (Mesh) Model		
Dokulu (Textured) Model		

4.4 Model Düzenleme

Modellerin farklı mecralarda paylaşılması veya üretim süreçlerinde sağlıklı bir şekilde işlenebilmesi için bu modellerin yüzeylerinin düzenlenmesi ve fazla nokta sayısından arındırılması önemlidir. Bu işlemler için Meshmixer, Geomagic, Blender gibi farklı yazılımlar kullanılabilir. Oluşturulan modellerin üretim amaçlı düzenlenmesinde ücretsiz ve erişilebilir bir modelleme ve düzenleme yazılımı olan Blender yazılımı ve Tersine mühendislik ve tarama çalışmalarında kullanılan Geomagic Wrap yazılımı model optimizasyonu için tercih edilip elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Düzenlenen modeller 3B yazıcı ile 1:1 çıktı alınarak değerlendirilmiştir.

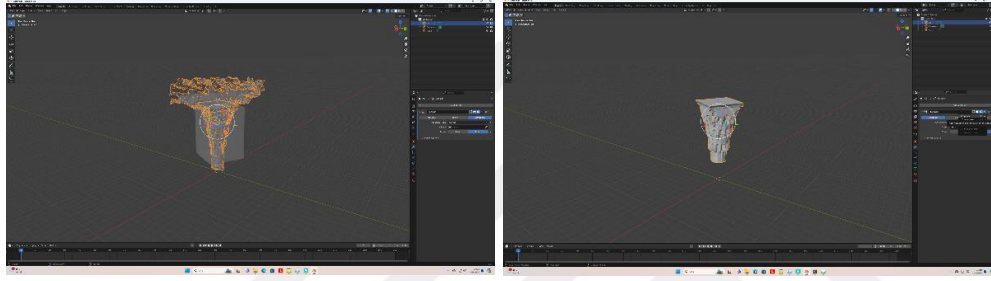
4.4.1 Deneysel aşama

Tez kapsamında Anadolu Ahşap hipostil camilerinin sütunlarının 3B dijital kopyalarını oluşturma amacıyla fotogrametri yazılımları ve mobil lidar ile 3B model üretimi yapılmıştır. Fotogrametri ile elde edilen modellerin fiziksel üretim aşaması için oluşturduğu detay seviyesi yüksek olduğundan ve mobil LiDAR ile üretilen modeller yetersiz kaldığından fotogrametri tekniği tüm modelleme işlemleri için tercih edilmiştir. Model düzenleme aşamalarının deneysel sürecinde iki farklı yazılımda gerçekleştirilen düzenleme işlemlerinin adımları farklı oranlarda gerçekleştirilip 3B yazıcı ile alınan çıktılar üzerinden değerlendirilmiştir. Creality Ender 5-S 3B yazıcı ile farklı ölçeklerde alınan çıktılar tüm modeller için en yüksek model kalitesinde üretilmiştir(0.12mm katman kalınlığı).

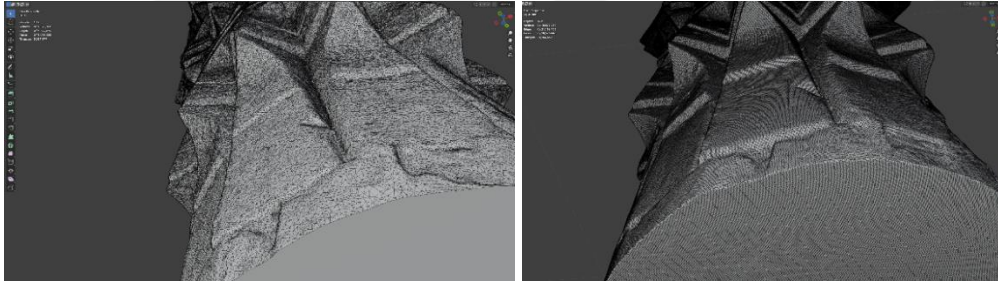
4.4.2 Blender ile düzenleme

Blender yazılımında model düzenleme işlemleri, fotogrametri yazılımından OBJ dosya formatında Blender'a dosya aktarılmasıyla başlar. Blender, ücretsiz olması ve oyun, animasyon gibi birçok sektöre hitap etmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu süreçte sırasıyla ölçekleme, Şekil 4.10'da gösterildiği gibi gereksiz kısımların silinmesi, yüzey sayısının azaltılması ve yeniden yüzey üretimi aşamaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel aşamada farklı oranlar ve sıralamalar denenerek en uygun yöntem belirlenmiştir. Yeniden yüzey üretimi aşamasından sonra yüzey azaltma komutunun yüzeyleri karmaşık hale getirdiği gözlemlendiğinden, yüzey azaltma işlemi ilk etapta yapılmıştır. Yüzey azaltma işleminin gerçekleştirildiği ve gerçekleştirilmediği durumlarda, yeniden yüzey üretimi sonucunda poligon sayısında

büyük bir değişim olmamıştır. Ancak, işlemlerin daha hızlı gerçekleştirilmesi ve programın hata vermemesi için yüksek poligon sayılı modellerde yüzey azaltma işlemi gereklidir. Blender’a aktarılan modelleri düzenlemek için öncelikle, modelde istenilen kısmı obje modunda “Modifier” sekmesinde “Boolean intersect” komutu seçilmiş ve istenilen kısmın eklenen küp ile kesişen bölümü alınmıştır. Edit modunda detaylı temizleme işlemlerinden sonra, “Decimate” komutu ile modelin optimum yüzey sayısına indirgenmesi sağlanmış, ardından “Remesh modifier” ile yüzeyler düzenli bir formata getirilmiştir (Şekil 4.11). Bu işlemler, modellerin formlarındaki ayrıntılardan ödün vermeden, dijital medyunda daha basit geometrilerle tanımlanmasını ve diğer yazılımlarda sorunsuz çalışmasını sağlamıştır.



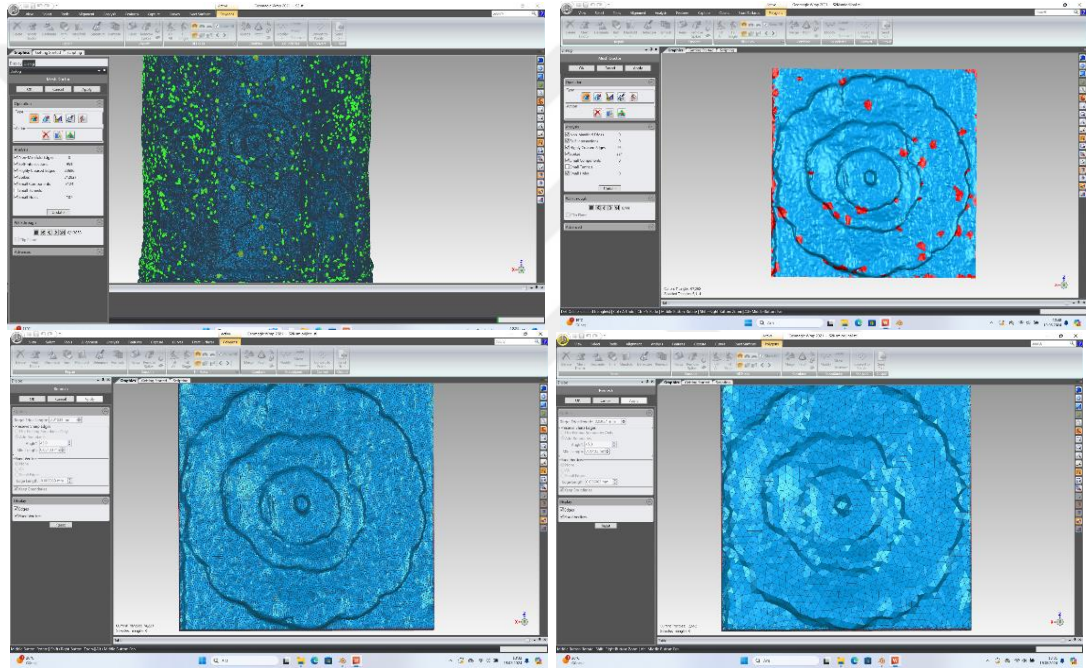
Şekil 4.10 : Blender yazılımında model temizleme işlemleri.



Şekil 4.11 : Blender yazılımında model düzenleme işlemleri.

4.4.3 Geomagic Wrap ile düzenleme

Geomagic yazılımı ücretli bir tersine mühendislik yazılımıdır. Ücretli olması, yazılımın erişilebilir olması önünde engel teşkil etmektedir. Ancak, fotogrametri modeli düzenleme konusunda başarılı bir araç olduğundan, bu karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Geomagic Wrap yazılımının en önemli avantajlarından biri yüzey ağ hatalarını otomatik tespit etme ve onarabilme yeteneğidir. Bu sebeple STL dosya formatında programa aktarılan model öncelikle yüzey hatalarını giderme işleminden, daha sonra sırasıyla: ölçeklendirme, gereksiz kısımların silinmesi, yüzey boşluklarını kapatma, yeniden yüzey üretimi ve yüzey sayısının azaltılması aşamalarından geçmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Geomagic Wrap yazılımında düzenleme aşamaları.

4.4.4 Düzenlenmiş modellerin karşılaştırılması

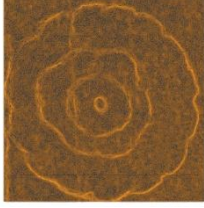
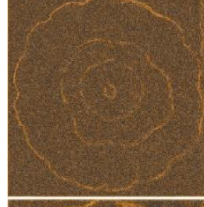
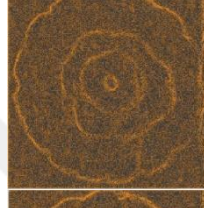
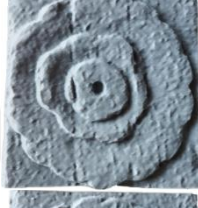
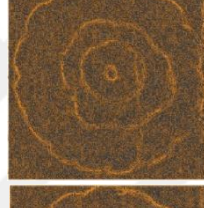
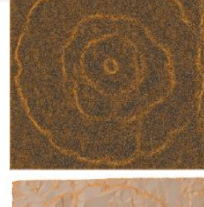
Blender yazılımı, fotogrametri modeli oluşturulurken yüzey bütünlüğü yüksek oranda tamamlanmış modellerde ve yüzey hatalarının ve boşluklarının az olduğu modellerde doğrudan kullanılabilmiştir. Ancak yüzey hatalarının yüksek olduğu modellerde Blender yazılımı zorlanmıştır. Geomagic Wrap yazılımı tersine mühendislik çalışmalarında kullanılan yüzey hatalarını indirgeyen bir yazılım olduğundan düzenleme işlemlerinde hem daha hızlı hem yüzey boşluklarını kapatmada daha verimli olmuştur.

Oluşturulan modellerin CNC ile üretim aşamasına geçmeden önce farklı ölçeklerde prototipleri 3 boyutlu yazıcı ilk etapta standart PLA ve Hyper PLA filament kullanılarak üretilmiş ve printer kalibrasyonu yapılmıştır (şekil 4.13). Ayrı Hyper PLA'nın daha iyi sonuçlar vermesi üzerine modellerin üretimine bu filamentle devam edilmiştir. Modelin belli bir bölümü optimizasyon sürecinin kontrolü için şeilmiştir ve optimizasyonun her aşamasında yapılan yüzey azaltma işlemleri ve yeniden yüzey oluşturma işlemlerinin sonucunda seçilen sütün bölümlerinin 3B yazıcı ile yeni bir prototip üretilerek, işlemlerin 1:1 prototiplere yansıyor yansımadığı kontrol edilmiştir (izelge 4.10).

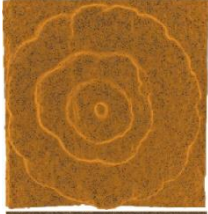
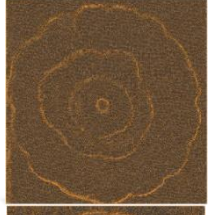
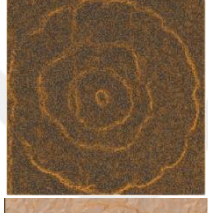
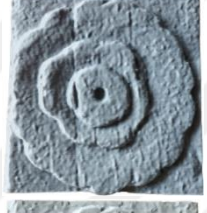
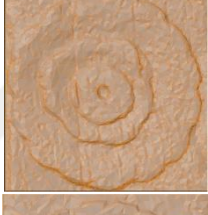
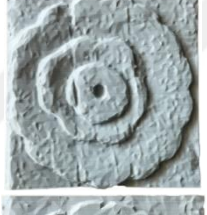
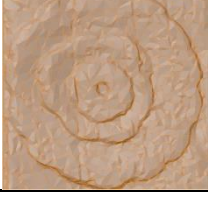


şekil 4.13 : 3B baskı ile üretilmiş 1:1 ölçekli prototipler.

Çizelge 4.10 : Prototiplerin karşılaştırılması.

Araç	Dijital Model	3B Baskı Ürün	Uygulanan İşlem	Modelin Yüz Sayısı
Ham Model			-	64,976
Geomagic Wrap			Remesh	78,470
Geomagic Wrap			Remesh + Decimate	50,330
Geomagic Wrap			%50 Decimate	33,630
Geomagic Wrap			%80 Decimate	13,452
Geomagic Wrap			%90 Decimate	9,791
Geomagic Wrap			%95 Decimate	4,893

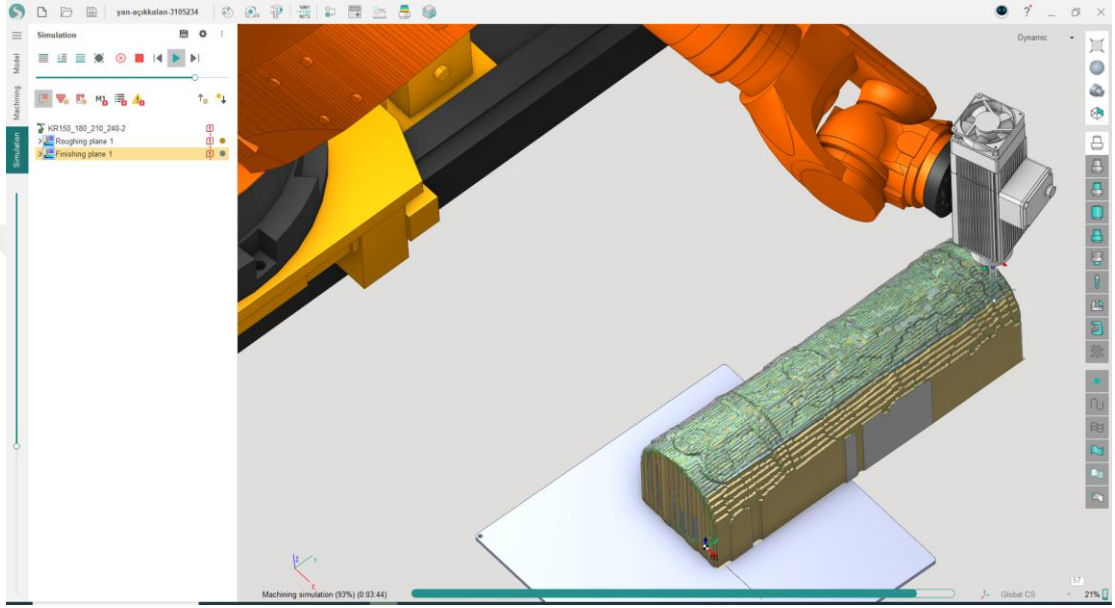
Çizelge 4.10 (devam) : Prototiplerin karşılaştırılması.

Araç	Dijital Model	3B Baskı Ürün	Uygulanan İşlem	Modelin Yüz Sayısı
Blender			Remesh + Decimate	801,754
Blender			Decimate + Remesh	104,564
Blender			%50 Decimate	33,162
Blender			%90 Decimate	6,691
Blender			%95 Decimate	3,348

4.5 CNC Üretim Simülasyonunun Oluşturulması

Karmaşık geometrilere sahip model üretimlerinin gerçekleştirilmesinde CAD modellerinin işleme sürecini kontrol edilebilir kılmak için CAM yazılımları kullanılır (Derecichei ve diğ.). Tez kapsamında Malzeme seçimine göre uygun takım yolu ve hızın belirlenmesi önemli bir aşama olarak görülmektedir. Model robot kol ile işlenmesi bağlamında SprutCAM yazılımı kullanılmıştır. SprutCAM, gelişmiş bir CAM (Bilgisayar Destekli İmalat) yazılımıdır. Bu yazılım, CNC makineleri için detaylı ve karmaşık imalat süreçlerini programlamak amacıyla kullanılır. Sütunun silindirik bir formu olması nedeni ile 6 eksenli Kuka KR200 robot kol işleme sürecini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. 16mm çapında silindirik tipte takım ile işleme

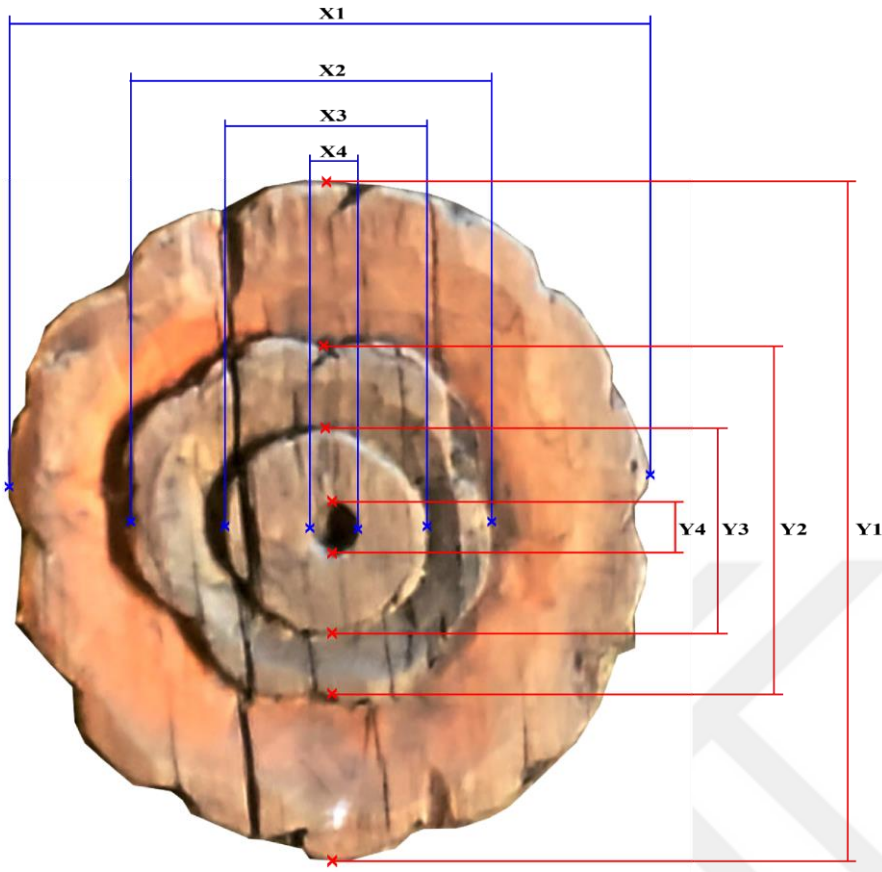
simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.14). Simülasyon sonucuna göre modelin üretim 120cm uzunluğunda olan sütun gövdesinin işlenme süresi 34dk olarak gösterilmiştir. Takım çapının 4 mm'ye düşmesiyle simülasyonun öngördüğü kaba işleme 8 saate çıkmıştır. Ancak simülasyonda malzeme tepkisinin incelenememesi simülasyonun kısıtları arasında yer almaktadır. Tez kapsamında sadece simülasyon aşaması yapılmış olup ahşabın CNC ile fiziksel üretimi maddi kısıtlar nedeni ile gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 4.14 : SprutCAM yazılımında CNC işleme simülasyonu.

4.6 Karşılaştırma

Saha çalışmasında elle ölçüm ile elde edilen metrik veriler tablolaştırılarak orijinal sütunun bir bölümünün, dijital modelinin ve 3B yazıcı ile elde edilen prototipin ölçüleri üzerinden bir karşılaştırma çizelgesi oluşturulmuştur (Çizelge 4.11). Çizelgeye göre 3B yazıcı ile üretilen prototipin boyutlarının, orijinal sütunun elle ölçülen boyutlarından (Şekil 4.15) 3mm'e kadar daha büyük olduğu görülmüştür. 1-2 mm'lik farklar ölçüm hassasiyetinde insan hatası olarak kabul edilebilecek iken daha büyük farklar model- üretim hattında bir bozulma veya deformasyona işaret etmektedir.



Şekil 4.15 : Desenin elle ölçümünün sonuçları.

Çizelge 4.11: Desenin ölçülerinin metrik karşılaştırılması.

Ölçü (cm)	Orijinal Sütun	Fotogrametrik Model	3B Yazıcı
X1	11,8	11,7	11,9
X2	6,7	6,6	6,8
X3	3,8	3,8	3,8
X4	0,9	0,8	0,7
Y1	12,3	12,3	12,4
Y2	5,9	6,1	6,4
Y3	3,7	3,5	3,8
Y4	1	1	0,9

4.7 Bulgular

Tez kapsamında gerçekleştirilen iş akışında üretim amaçlı belgelemede, fotogrametri yönteminin tablet entegre LiDAR ile yapılan belgelemeye kıyasla çok daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenen ilk bulgu olmuştur. Model düzenlemesinde Blender yazılımının çok yüksek olmayan yüzey sayısına sahip modelleri düzenlemede etkili olduğu görülürken, yüzey sayısının milyonları bulduğu model düzenlemelerinde yetersiz kaldığı ve yüksek işletim gücüne sahip bilgisayarlarda dahi yazılımın hatalar verip kapandığı tespit edilmiştir. Buna karşın doğrudan tarama modellerinin düzenlenmesi amaçlı geliştirilen Geomagic Wrap yazılımı daha hızlı ve otomatize edilmiş süreçler sunmaktadır. Fotogrametri modellerinde yüzey sayısının azaltılması uygulamasında %80 oranının üzerinde azaltma işlemlerinin 3B yazıcı ile üretilen prototip üzerinde gözle görülebilen bir deformasyona sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca model düzenlemelerinde gerçekleştirilen işlemlerin aynı olması durumunda bile sıralamaların farklı olması düzenlenmiş modelin yüzey yapısı ve sayısının farklı olmasına neden olduğu görülmüştür. 3B yazıcının modellerin yüzeylerini daha iyi işlemesi ve gözlemlerinin yapılabilmesinde hyper-PLA filamentin tercih edilmesi prototip kalitesini arttırmıştır. Sütunlardan elde edilen metrik ölçüler ışığında yapılan karşılaştırmada orijinal sütunun, fotogrametrik modelin ve üretilen prototiplerin boyutlarının ölçülmesinde 2-3 mm'nin üzerinde bozulmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Bu fark ölçüm hatası olarak nitelendirilebileceğinden modellerin ölçü bakımından birbirleriyle tutarlı olduğu söylenebilir.



5. SONUÇ

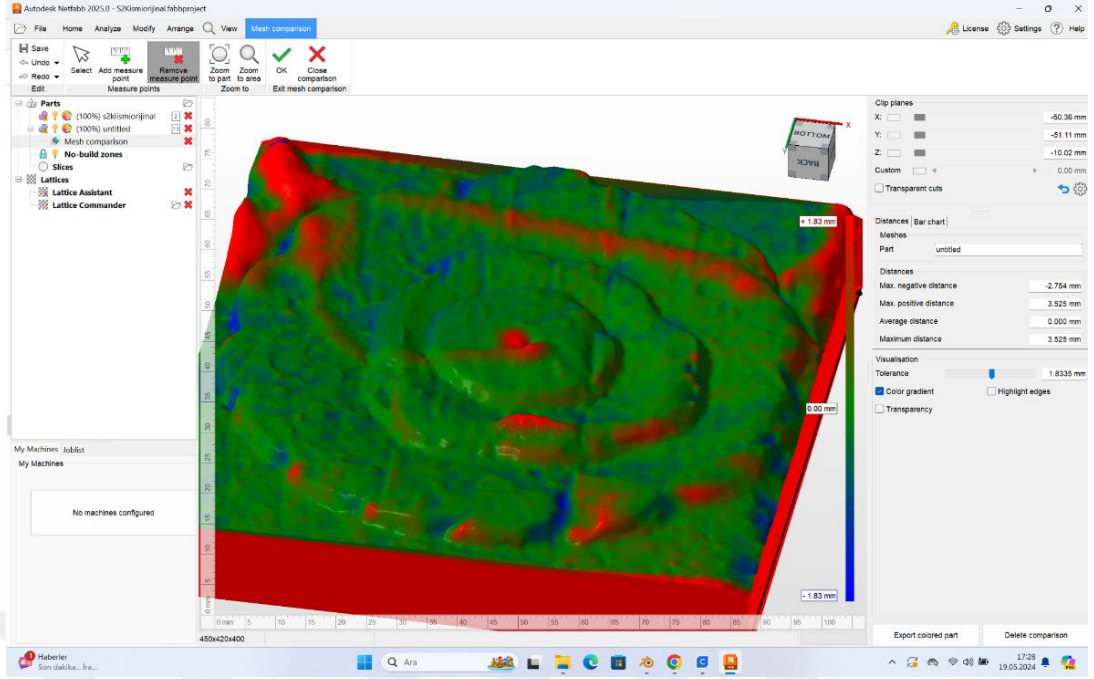
Bu çalışmada kültürel miras olarak kabul edilen Anadolu'nun Ortaçağ Dönemi Ahşap Hipostil Camileri'nin sütun ve sütun başlıklarının dijital 3B belgelenmesi gerçekleştirilmiştir. Ahşap kültürel mirasın yeniden üretilmesi amaçlı bir iş akışı sunulmuştur. Uygun iş akışı için deneysel aşamada eksiltmeli üretim araçlarının üretim maliyetinin yüksekliğinden dolayı 3B yazıcı kullanılmış olup detay seviyesinin daha yüksek olması beklentileri karşılamasını sağlamıştır. Elde edilen 3 boyutlu modeller üzerinde farklı model optimizasyon seçenekleri karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve optimizasyon seçeneklerinin üretim sürecindeki etkileri 3B yazıcı ile üretilen prototipler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen kültürel mirasın 3B dijitalleştirilme yöntemleri arasından erişilebilir, düşük maliyetli ve yüksek doğruluk oranına sahip bir teknik olması nedeniyle fotogrametri tercih edilmiştir. Üretim amaçlı belgelemede profesyonel tarama cihazları yüksek doğruluk oranında modeller oluştursa da tez kapsamında yüksek maliyetin erişilebilir bir belgeleme amacına uygun olmaması sebebiyle saha çalışması dışında bırakılmıştır. Fotogrametri tekniği ile elde edilen dijital modellerin optimizasyonunda yapılan karşılaştırma çalışmasıyla, aslen bu amaçla üretilen profesyonel yazılımların yanısıra geniş modelleme yeteneklerine sahip çok yönlü ve ücretsiz yazılımların da tercih edilebileceği ortaya konmuştur. 3B yazıcı, farklı optimizasyon süreçlerine tabii olan dijital modellerin prototiplerinin üretilmesi ve fiziksel ile dijital modellerin karşılaştırılmasında kontrol amacıyla etkin bir şekilde kullanılmıştır.

Camilerin sütun başlıklarının erişilmesi zor yüksekliklerde olması özellikle metrik veri toplama sürecinde çalışmanın zorluklarından birini oluşturmuştur. Ayrıca camilerin doğal ışık, yapay ışık ve karanlık noktaları birlikte barındıran iç mekan aydınlatma koşulları, veri toplanan sütunların farklı noktalarındaki farklı ışık koşullarına sebebiyet vermesi nedeniyle fotogrametrik veri toplama aşamasında zorluk oluşturmuştur. İlk saha çalışmasında aydınlatma konusunda yaşanan bu zorluk, ikinci saha çalışmasında fotogrametrik veri toplama biçimini yönlendirerek başlangıçta fotoğraf çekimiyle gerçekleştiren işlemin, ikinci saha çalışmasında video çekimiyle gerçekleştirilmesine

sebebi olmuştur. Tez çalışmasında uygulanan yöntemin fotogrametri tekniğiyle kötü aydınlatma koşullarına sahip mekanlarda modelleme yapabilmesi yönüyle tarama çalışmalarına; model optimizasyonu aşamasında ücretsiz bir modelleme yazılımının etkin olarak kullanılmış olması yönüyle ise dijital 3B fotogrametrik model optimizasyonu çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca ahşap mirasın CAM destekli süreçler ile yeniden üretilmesini sağlamanın müzecilik, akademik ve sergi çalışmalarına destek sağlayacağı düşünülmektedir. Koruma çalışmalarına gerektiği zamanlarda destek olması veya referanslar vermesi de ikincil avantajlarıdır. Ayrıca elde edilen dijital modellerin gerek sanal ortamlarda kullanılması gerek fiziksel üretimlerinin yapılması gerek bu amaç için özel piyasaya sürülmüş 3B arşivleme ve paylaşma siteleri için AR, VR çalışmaları için destek sağlamanın yanı sıra saha çalışması kapsamında ele alınan camilerin kültürel farkındalığını arttırma, ilgi oluşturma amaçlarına yönelik düşük maliyetli ve etkili bir yöntem paylaşılmıştır.

Yapılan çalışma ve elde edilen veriler ışığında gelecek çalışmalar için öneriler şu şekilde özetlenebilir: 3B tarayıcı ve lazer tarama yöntemleri yüksek maliyetli ekipman ihtiyacı nedeniyle tez kapsamı dışında bırakılmasına rağmen ahşap sütunların belgelenmesinde fotogrametri ve profesyonel tarama cihazlarının karşılaştırılması ilerde bu cihazların daha erişilebilir olması ihtimali göz önünde bulundurularak gelecek çalışmalar için konu olması düşünülmektedir. Yeterli maddi kaynak bulunması durumunda sütunların CNC ile üretilmesi ve elde edilecek modellerin değerlendirilmesi için öngörülen yöntem üretilen nesneyi tekrar dijitalleştirip yüzey karşılaştırma araçları ile aralarındaki farkı tespit etmedir. Bu amaçla Autodesk Netfabb yazılımı kullanılabilir. Netfabb yazılımına aktarılan 3B modeller ölçek kontrolü yapıldıktan sonra Analiz sekmesi altında yer alana karşılaştırmacı ile karşılaştırılır. Karşılaştırırken modellerin üst üste bindirilmesi ve yüzey mesafelerinin ölçülmesi prensibine dayanır. Mesafe hassasiyet barı ayarlandıktan sonra istenilen hassasiyet düzeyinde göre mesafeleri kırmızı yeşil ve mavi renkleri ile ifade eden bir grafik ekran karşımıza çıkar. Yeşil renk yüzeylerin örtüştüğünü ifade ederken kırmızı ve mavi aralarında mesafe olduğunu belirtir. Bu bağlamda Şekil 4.21 öngörülen karşılaştırma yöntemine örnek oluşturur.



Şekil 5.1 : Netfabb yazılımı ile modellerin analizi.



KAYNAKLAR

- About Rekrei (t.y.).** Rekrei Project Erişim Adresi: <https://rekrei.org/about> . Erişim Tarihi: 29.04.2024.
- Ahunbay, Z.** (2019). *Kültür Mirasını Koruma İlke ve Teknikleri*. Yem Yayınları.
- Akok, M.** (1946). “Kastamonu'nun Kasaba Koyunde Candaroğlu Mahmut Bey Camii”, *Belleten, Volume: X, Issue:38*, Ankara, s.294.
- Akok M.,** (1944). *Mahmut Akok'un Kastamonu Kasaba Köyü (Candaroğlu) Mahmut Bey Camii'ne ait çizimleri*. Erişim Adresi: <https://archives.saltresearch.org/handle/123456789/84657>
- Akok, M.** 1976, “Konya Beyşehir’de Eşrefoğlu Cami ve Türbesi”, *Türk Etnografya Dergisi*, XV, Ankara, p.5-34, 1976.
- Aktemur, A. M.** (2002). Türk Ahşap İşçiliği. *Türkler, VI*, Ankara, ss.98-106.
- Altadonna, A., Cucinotta, F., Raffaele, M., Salmeri, F., & Sfravara, F.** (2023). Environmental Impact Assessment of Different Manufacturing Technologies Oriented to Architectonic Recovery and Conservation of Cultural Heritage. *Sustainability*, 15(18), 13487.
- Altınsapan, E.** (1988). “Sivrihisarda Türk Mimarisi”, Konya Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Altun, A.** (1988) "Orta Asya Türk Sanatı İle Anadolu'da Selçuklu ve Beylikler Mimarisi." *Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri*, 1 : 33-44.
- Aslanapa, O.** (1972). *Türk sanatı*. Remzi Kitapevi. ss. 131-133; 207.
- Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Lyashenko, V., Al-qerem, A., Sotnik, S., Alharbi, N., & Solyman, A. A.** (2023). Proposed synchronous electric motor simulation with built-in permanent magnets for robotic systems. *SN Applied Sciences*, 5(6), 160.
- Aydın, H., Perker, Z.S.** (2017). “Geleneksel Mimaride Ahşap Kullanımının Kastamonu Kasaba Köyü Candaroğlu Mahmut Bey Camii Özelinde İncelenmesi”, *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, Cilt: 10, Sayı: 48*.
- Bajic, D., Celent, L., & Jozic, S.** (2011). Reverse engineering application in preservation of cultural heritage. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 1239-1241.
- Balletti, C., & Ballarin, M.** (2019). An Application of Integrated 3D Technologies for Replicas in Cultural Heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6), 285. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060285>
- Balado, J., Frías, E., González-Collazo, S. M., & Díaz-Vilariño, L.** (2022). New trends in laser scanning for cultural heritage. *In New Technologies in*

Building and Construction: Towards Sustainable Development (ss.167-186). Singapore: Springer Nature Singapore.

- Barboutis, I., Kamperidou, V., & Economidis, G.** (2023). Handcrafted Reproduction of a 17th Century Bema Door Supported by 3D Digitization and CNC Machining. *Applied Sciences*, 13(21), 11690.
- Baumeister, M., Ackerman, L., Ng, J., & Kipre, I.** (2020). Digital 3-D Reproduction and CNC Milling: Putting the Finial Touches on an Architectural Highlight, the Cassiobury House Staircase. *Wooden Artifacts Group Postprints*, 34, 39-57.
- Benjamin, W.** (1969). *The work of art in the age of mechanical reproduction*. In H. Arendt (Ed.), *Illuminations* (H. Zohn, Trans.). Schocken Books. (Orijinal Çalışma 1935’de yayımlanmıştır).
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G.** (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389-405.
- Bozer, R.** (1992). 15. yüzyılın ortasına kadar Anadolu türk sanatında ahşap kapılar.
- Calantropio, A., & Chiabrando, F.** (2024). Underwater cultural heritage documentation using photogrammetry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 413. <https://doi.org/10.3390/jmse12030413>
- Castleman, K. R.** (1996). *Digital image processing*. Prentice Hall Press.
- Ch'ng, E.** (2019). The First Original Copy and the role of blockchain in the reproduction of cultural heritage. *Presence*, 27(1), 151-162.
- Coenen, T., Mostmans, L., & Naessens, K.** (2013). MuseUs: Case study of a pervasive cultural heritage serious game. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 6. <https://doi.org/10.1145/2460376.2460379>
- Çilek, Ü.** (2020). “*Tezvinî Açısından Beyşehir Eşrefoğlu Camii*”, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Geleneksel Türk Sanatları Anasanat Dalı, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2020.
- Derecichei, L., Lucaci, C., Cheregi, G., & Lustun, L.** (2017). Simulation of sculptural surface processing in wood in 5 axis CNC with SprutCAM program. *Annals of the University of Oradea, Environmental Protection*, 29.
- DeVries, R., Sereno, P., Vidal, D., & Baumgart, S.** (2022). Reproducible Digital Restoration of Fossils Using Blender. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.833379>
- Fico, D., Rizzo, D., Montagna, F., & Esposito Corcione, C.** (2023). Fused Filament fabrication and computer numerical control milling in cultural heritage conservation. *Materials*, 16(8), 3038.
- Foster, S., & Jones, S.** (2019). The Untold Heritage Value and Significance of Replicas. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 21, 1 - 24. <https://doi.org/10.1080/13505033.2019.1588008>.

- Galeazzi, F.** (2014). Redefining Digital Archaeology: New Methodologies for 3D Documentation and Preservation of Cultural Heritage. *University of California, Merced*.
- Greenfield, J.** (1986). The return of cultural property. *Antiquity*, 60, 29 - 35. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00057598>.
- Guidi, G., & Frischer, B. D.** (2020). 3D digitization of cultural heritage. *3D Imaging, Analysis and Applications*, ss.631-697.
- Güleç Özer, D., Nagakura, T., & Vlavianos, N.** (2016). Augmented reality (AR) of historic environments: Representation of parion theater, Biga, Turkey.
- Hassani, F.** (2015). Documentation of cultural heritage: Techniques, potentials, and constraints. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 207-214.
- Hayes, K.** (2010) "The Wooden Hypostyle Mosques of Anatolia: Mosque and State Building Under Mongol Suzerainty", Ph. D. Department of Architecture Supervisor: Prof. Dr. Ali Uzay Peker, July 2010.
- Hindmarch, J., Terras, M., & Robson, S.** (2019). On virtual auras: The cultural heritage object in the age of 3D digital reproduction. *In The Routledge international handbook of new digital practices in galleries, libraries, archives, museums and heritage sites*, ss.243-256. Routledge.
- Hofman, K., Walters, G., & Hughes, K.** (2022). The effectiveness of virtual vs. real-life marine tourism experiences in encouraging conservation behaviour. *Journal of Sustainable Tourism*, 30(4), 742-766. <https://doi.org/10.1080/09669582.2021.1884690>
- Höhle, J.** (2013). Oblique aerial images and their use in cultural heritage documentation. *ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ss.349-354.
- ICOMOS.** (2017) Ahşap Mimari Mirasın Korunması İçin İlkeler Erişim Adresi: https://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_tr0633313001536913605.pdf
- ICOMOS Türkiye,** (2013). ICOMOS Türkiye Mimari Miras Koruma Bildirgesi 2013 Erişim Adresi: https://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_tr0784192001542192602.pdf
- Ikeuchi, K., Oishi, T., Takamatsu, J., et al.** (2007). The Great Buddha Project: Digitally Archiving, Restoring, and Analyzing Cultural Heritage Objects. *International Journal of Computer Vision*, 75, 189-208. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0039-y>
- Jokilehto, J.** (2005). Definition of Cultural Heritage. ICCROM Working Group 'Heritage and Society'. Orijinal: ICCROM için hazırlanmıştır, 1990. CIF için gözden geçirilmiştir: 15 Ocak 2005.
- Koç, S.** (2022). "Impacts of modernization process on conservation and restoration of traditional wooden religious buildings: A comparative study between Turkey and Japan." (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

- Kutlu, İ.** (2023). “Tarihi yapıların strüktürel analizinde fotogrametrik modelleme tekniği kullanımının Artuklu dönemi eserlerinden Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami örnekleri üzerinden değerlendirilmesi.” (Doktora Tezi) Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kuran, A.** (1972). Anadolu’da Ahşap Sütunlu Selçuklu Mimarisi. *Malazgirt Armağanı*, Ankara, Türk Tarih Kurumu Yayınları, ss.179-186.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J.** (2023). Close-range photogrammetry and 3D imaging. *Walter de Gruyter GmbH & Co KG*.
- Masciotta, M. G., Morais, M. J., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., Sánchez-Aparicio, L. J., & González-Aguilera, D.** (2021). A digital-based integrated methodology for the preventive conservation of cultural heritage: The experience of HeritageCare Project. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(6), 844-863. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1668985>
- Nofal, E., Reffat, R., Boschloos, V., Hameeuw, H., & Moere, A.** (2018). The Role of Tangible Interaction to Communicate Tacit Knowledge of Built Heritage. *Heritage*. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE1020028>
- Norina, A., & Liu, S.** (2021). Application of Digital Fabrication Technologies in Reproducing of a Wooden Component in Heritage Buildings. In *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection: 8th International Conference, EuroMed, Revised Selected Papers 8* (pp. 465-473). Springer International Publishing.
- Open Heritage Project (t.y.).** Erişim Adresi: <https://artsandculture.google.com/project/openheritage>. Erişim Tarihi: 28.04.2024.
- Öney, G.** (1970). Anadolu’da Selçuklu ve beylikler devri ahşap teknikleri. *Sanat Tarihi Yıllığı*, (3), 135-149.
- Öney, G.** (1971). *Ankara’da Türk Devri Yapıları*, Ankara.
- Öney, G.** (1992). *Anadolu Selçuklu Mimarisinde Süsleme Ve El Sanatları*, s.150
- Paananen, S., Mustonen, S., Häkkinen, J., & Colley, A.** (2023). User Experience in Virtual Museums - Evaluating Assassin’s Creed Odyssey: Discovery Tour. In *A.L. Brooks (Ed.), ArtsIT, Interactivity and Game Creation. ArtsIT 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 479. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28993-4_18
- Patias, P.** (2006). Cultural heritage documentation. *International Summer School Digital Recording and 3D Modeling*, Aghios Nikolaos, Crete, Greece, April, 24-29.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., & Chamzas, C.** (2007). Methods for 3D digitization of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 93-98.
- Poigt, T.** (2018). Weighing premonetary currency in the Iberian Iron Age.

- Roma, G. S., Alitany, A., Mateu, L. G., & Dominguez, E. R.** (2014). Development of a method for direct conversion of a photogrammetric point cloud, to points of head's movement of a CNC milling machine:(or 3D printer), for reproduction and conservation of the architectural and archaeological heritage, applied to the reproduction of the wooden ornamentation in the" roshan". In *2014 9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pp. 1-7). IEEE.
- Sancak, N., Uzun, F., Turhan, K., Saraoğlu Yumni, H. K., & Güleç Özer, D.** (2023). Photogrammetric model optimization in digitalization of architectural heritage: Yedikule fortress. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences- ISPRS Archives*.
- Semper, G.** (2015). *Mimarlığın Dört Ögesi ve İki Konferans*. Janus Yayınevi.
- Smid, P.** (2003). *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc..
- Soler, F., Melero, F. J., & Luzón, M. V.** (2017). A complete 3D information system for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 23, s. 49-57.
- Sotirova, K., Peneva, J., Ivanov, S., Doneva, R., & Dobрева, M.** (2012). Chapter 1: Digitization of Cultural Heritage – Standards, Institutions, Initiatives.
- Tang, Y.** (2023). a Scanner-Based 3d Modeling Method of Improving the Timbre of Chinese Guqin by Transplanting the BASS Bar of the Violin. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 263-268.
- Terras, M.** (2015). Cultural heritage information: Artefacts and digitization technologies. *Cultural heritage information: Access and management*, 63-88.
- Triviño-Tarradas, P., Pedraza-Tejero, J. M., Hidalgo-Fernandez, R. E., Ortiz-Cordero, R., Carranza-Cañadas, P., & García-Molina, D. F.** (2023). Applications of Photogrammetry for the Reproduction and Substitution of Ornamental Elements on the Façade. In *International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering* (pp. 1-10).
- Tucci, G., Conti, A., Bonora, V., Fiorini, L., & Pagliaricci, G.** (2023). RECORDING MICHELANGELO'S DAVID: ULTRA-HIGH RESOLUTION 3D SCANNING AND MODELING FOR DIGITAL AND PHYSICAL REPRODUCTION. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxviii-m-2-2023-1581-2023>.
- UNESCO,** (2023). Karar No: 45 COM 8B.46. Erişim Adresi: <https://whc.unesco.org/en/decisions/8427/>
- UNESCO,** (2023). 2023 Operational Guidelines WHC.23/01. Erişim Adresi: <https://whc.unesco.org/en/guidelines/>

UNESCO. (1972). Erişim Adresi: <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/rt>,

Uysal, Z. (1993). Afyon Ulu Câmii'nin ahşap üzerine boyalı nakışları. 3. *Afyonkarahisar Araştırmaları Sempozyumu Bildirileri*, 22-24.

Vacca, G. (2023). 3D Survey with Apple LiDAR Sensor—test and assessment for architectural and cultural heritage. *Heritage*, 6(2), 1476-1501.

Varinlioglu, G. (2023). New Perspectives for Cultural Heritage The Role of Digital Architects and Virtual Reality. Dimensions. *Journal of Architectural Knowledge*, 3(5), 89-108.

Verde, A., & Valero, J. M. (2021). Virtual museums and Google arts & culture: Alternatives to the face-to-face visit to experience art. *International Journal of Education and Research*, 9(2), 43-53.

Vincent, M., Gutierrez, M., Coughenour, C., Manuel, V., Bendicho, L., Remondino, F., & Fritsch, D. (2015). Crowd-sourcing the 3D digital reconstructions of lost cultural heritage. *2015 Digital Heritage*, 1.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Baver BEKİROĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2020, Mardin Artuklu Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bekiroğlu, B., Alaçam, S., & Güzelci, O. Z.** (2024). Digital tools for modeling and reproducing historical wooden columns. *In Proceedings of SIGraDi 2024: Biodigital Intelligent Systems*. (Süreç Devam Ediyor)
- **Bekiroğlu, B., Alaçam, S., & Güzelci, O. Z.** (2024). “Tarihi Ahşap Yapı Bileşenlerinin Belgelenmesi ve CNC yöntemiyle Yeniden Üretimi” XVIII. *Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu*, 1-2 Temmuz 2024, Balıkesir, Türkiye. (Süreç Devam Ediyor)