



**FOTOREALİSTİK DİJİTAL İKİZ İLE SANAL GERÇEKLİK
ENTEGRASYONU VE YAPISAL DENETİMDE KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Abdurahman Yasin YİĞİT

Danışman

Prof. Dr. Murat UYSAL

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

Bu tez çalışması 23.FEN.BİL.17 numaralı proje ile AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**FOTOREALİSTİK DİJİTAL İKİZ İLE SANAL GERÇEKLİK
ENTEGRASYONU VE YAPISAL DENETİMDE KULLANIMI**

Abdurahman Yasin YİĞİT

Danışman

Prof. Dr. Murat UYSAL

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Abdurahman Yasin YİĞİT tarafından hazırlanan “Fotorealistik dijital ikiz ile sanal gerçeklik entegrasyonu ve yapısal denetimde kullanımı” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 22 / 07 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat UYSAL

Başkan : Prof. Dr. Murat YAKAR
Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Murat UYSAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. İbrahim YILMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Nizar POLAT
Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah VARLIK
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.....

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

22 / 07 / 2024

Abdurahman Yasin YİĞİT

ÖZET

Doktora Tezi

FOTOREALİSTİK DİJİTAL İKİZ İLE SANAL GERÇEKLİK ENTEGRASYONU VE YAPISAL DENETİMDE KULLANIMI

Abdurahman Yasin YİĞİT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat UYSAL

Dijital ikiz teknolojisi son yıllarda önemli bir ivme kazanmış ve çeşitli amaçlar için giderek daha popüler hale gelmiştir. Dijital ikiz, simülasyon, izleme ve kestirimci bakım dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için fiziksel bir nesnenin sanal bir temsilini oluşturma sürecidir. Dijital ikiz oluşturmamanın temel zorluklarından biri, temsil edilen fiziksel nesne hakkında doğru ve güncel 3B veriler elde etmektir. Fiziksel nesne hakkında gerçek dokusal bilgiler de dahil olmak üzere 3B verileri toplamada en uygulanabilir yöntem fotogrametridir. Fotogrametri yöntemi kullanılarak fotorealistik 3B modellerden üretilen dijital ikizler en uygun çözümleri belirlemek için kullanılabilir. Özellikle maliyetli yerinde incelemeler yerine yapısal denetimlerde fotorealistik dijital ikizlerin kullanılması alternatif bir yöntem oluşturmaktadır. Bu yöntemle elde edilen dijital ikizlerin sanal gerçeklik teknolojileri ile entegrasyonu ile özellikle sanal ortamda interaktif denetimlere ve analizlere imkân vermektedir. Bu sayede dijital ikizlerin daha etkili bir şekilde kullanılması kolaylaşmakta ve fiziksel nesnelerin daha etkileşimli ve ayrıntılı bir şekilde incelenmesi sağlanmaktadır. Bu tezde, fotorealistik 3B model ile fiziksel nesnenin diğer yapısal bilgilerinin entegre edilmesiyle oluşturulan dijital ikiz, sanal gerçeklik teknolojileriyle entegre edilerek farklı inceleme perspektifleri sunulmaktadır. Geleneksel denetim yöntemlerine göre daha hızlı ve daha verimli olan bu yöntemler, özellikle yapısal denetimlerde hasar analizleri için önemlidir. Önerilen metodoloji farklı yapı türleri üzerinde test edilmiştir. Sonuç olarak, fotogrametrik 3B model ve otomatik olarak tespit edilen çatlaklar birleştirilerek bir hasarla artırılmış dijital ikiz (3B model+çatlak)

oluşturulmuştur. Ayrıca yapısal denetimlere farklı bir bakış açısı sunmak için termal fotoğraflar ile izleme ve inceleme çalışması da yapılmıştır. Üretilen dijital ikizler sanal gerçeklik ortamında farklı kullanıcılara aktarılarak etkileşimli evrimii denetimlere olanak sağlanmış ve yerinde yapısal denetimlere alternatif bir çözüm sunulmuştur.

2024, xiii + 132 sayfa

Anahtar Kelimeler: Dijital ikiz, Fotorealistik, Fotogrametri, atlak tespiti, Yapısal denetim, Sanal gerçeklik



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INTEGRATION OF PHOTOREALISTIC DIGITAL TWIN WITH VIRTUAL REALITY AND ITS USE IN STRUCTURAL INSPECTION

Abdurahman Yasin YİĞİT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat UYSAL

One Digital twin technology has gained significant momentum in recent years and has become increasingly popular for a variety of purposes. Digital twin is the process of creating a virtual representation of a physical object for a variety of purposes, including animation, monitoring, and predictive maintenance. One of the primary challenges associated with the creation of a digital twin is the accurate and timely acquisition of 3D data about the physical object in question. The most applicable method for the collection of 3D data, including the acquisition of real textural information about the physical object in question, is photogrammetry. Digital twins generated from photorealistic 3D models using photogrammetry can be employed to ascertain optimal solutions. In particular, the utilisation of photorealistic digital twins in structural inspections in lieu of costly on-site inspections represents an alternative methodology. The incorporation of digital twins derived from this methodology with virtual reality technologies facilitates interactive inspections and analyses, particularly within a virtual environment. In this manner, digital twins can be utilized in a more efficacious manner, and physical objects can be examined in a more interactive and detailed way. This thesis presents a methodology for integrating digital twins, which are created by integrating photorealistic 3D models with other structural information about physical objects, with virtual reality technologies. This integration allows for the presentation of different inspection perspectives. These methods, which are more rapid and efficient than traditional inspection methods, are

particularly valuable for damage analysis in structural inspections. The proposed methodology was subjected to testing on a variety of structural types. Consequently, a refined digital twin (3D model + crack) representing damage is generated by combining the photogrammetric 3D model and automatically detected cracks. Furthermore, a monitoring and inspection study utilising thermal images by UAV was conducted to provide an alternative perspective on structural inspections. The digital twins were then conveyed to disparate users in a virtual reality setting, thereby facilitating interactive online inspections and offering an alternative to on-site structural inspections.

2024, xiii + 132 pages

Keywords: Digital twin, Photorealistic, Photogrammetry, Crack detection, Structural inspection, Virtual reality

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Murat UYSAL'a, değerli vakitlerini benimle paylaşarak görüş ve önerilerini sunan tez izleme kurulu üyelerim olan Sayın Prof. Dr. Murat Yakar ve Dr. Öğretim Üyesi Abdullah VARLIK'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen ve her zorlukta sürekli destek olan manevi danışmanım ve abim Sayın Doç. Dr. Ali ULVİ'ye, tez araştırmalarım ve sürecinde verdikleri destekten dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi ve Mersin Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü akademik ve idari personellerine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Doktora sürecimin her döneminde beni cesaretlendiren, çalışmamın bitmesi için bana sürekli destek olan ve tez çalışması boyunca her türlü manevi desteğinden dolayı değerli arkadaşım Arş. Gör. Halil İbrahim ŞENOL'a, beni daha çok çalışmaya motive eden, sürekli olarak her aşamada desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Yunus KAYA'ya, tez araştırmam sürecinde yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Eren Can SEYREK'e, akademik hayatıma ve bana kattığı vizyon ve misyonlardan dolayı Sayın Doç. Dr. Osman ORHAN ve Dr. Ahmet GÜNGÖR'e, tez jüri üyelerimden değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. İbrahim YILMAZ ve Doç. Dr. Nizar POLAT'a, tanıdığım günden bu yana çalışkanlığını, abiliğini ve insanlığını örnek aldığım meslektaşım Uğur ÖZTORNACI'ya, bu süreçte karşılaştığım maddi manevi tüm sorunlarda desteğini esirgemeyen can arkadaşım Mithat BAŞTUĞ'a, eleştirileri ile beni yönlendirmeye çalışan ve her zaman desteğini esirgemeyen Seda Nur Gamze HAMAL'a, araştırmamda uygulama desteği veren Fatih İLHAN ve Burak Can KAYA'ya ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde sağlamış oldukları maddi ve manevi destekleri ile bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan annem Sultan YİĞİT'e, babam Ali YİĞİT'e teşekkürü borç bilirim.

Bu araştırmada Maden sahasına ait verileri ücretsiz bir şekilde vererek araştırma sonuçlarına destek olan abim Harita Mühendisi Burak Çelik'e, Mezgit Kalesi'nin tarihi hakkında detaylı bilgileri ile destek olan Hocam Dr. Bilhan SUBAŐI'na ve giriş yapısına ait verilerin toplanması ve analizinde verdiği desteklerinin yanında bu süre boyunca eğlenmeme yardımcı olan değerli arkadaşım Arş. Gör. İsmet VAPUR'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamı 23.FEN.BİL.17 numaralı proje ile maddi olarak desteklediği ve çalışmalarımın yürütülmesinde kolaylık sağladığı için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)'ne teşekkür ederim.

Abdurahman Yasin YİĞİT
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ | vii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Tezin Önemi ve Amacı | 6 |
| 1.2 Araştırma Problemi ve Hipotez | 7 |
| 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ | 9 |
| 2.1 Dijital İkiz ve Fotogrametrik 3B Model | 10 |
| 2.2 Dijital İkizlerin Yapısal Denetimlerde Kullanımı | 14 |
| 2.2.1 Kültürel Miras Yapılarında Dijital İkiz ile Yapısal Denetim..... | 20 |
| 2.2.2 Köprü Yapılarında Dijital İkiz ile Yapısal Denetim | 22 |
| 2.2.3 Kaya Kütleli ve Maden Ocağında Dijital İkiz ile Yapısal Denetim | 26 |
| 2.3 Yapısal Denetimlerde Çatlak Tespiti | 27 |
| 2.4 Fotorealistik Dijital İkiz ile SG Entegrasyonu..... | 32 |
| 3. MATERYAL ve METOT | 35 |
| 3.1 Fotogrametri Tekniği ile Fotorealistik Dijital İkiz Üretimi | 37 |
| 3.2 Sanal Gerçeklik..... | 41 |
| 3.3 Çatlak Tespiti | 44 |
| 3.4 Doğruluk Analizi | 49 |
| 3.5 Çalışma Nesneleri ve Alanları | 50 |
| 3.5.1 Kiriş Örneği..... | 51 |
| 3.5.2 Merdiven Örneği | 52 |
| 3.5.3 Elvanlı Köprüsü Örneği | 53 |
| 3.5.4 Mezgıt Kale Örneği..... | 58 |
| 3.5.5 Kebir Kayası Örneği | 61 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 3.5.6 Maden Ocağı Örneği | 62 |
| 4. BULGULAR | 63 |
| 4.1 Kiriş Örneği | 63 |
| 4.2 Merdiven Örneği..... | 67 |
| 4.3 Elvanlı Köprüsü Örneği..... | 71 |
| 4.4 Mezgıt Kalesi Örneği..... | 86 |
| 4.5 Kebir Kayası Örneği | 95 |
| 4.6 Maden Ocağı Örneği..... | 98 |
| 4.7 Genel Bulgular..... | 101 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ | 105 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 107 |



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|-------|--|
| m | Metre |
| km | Kilometre |
| mm | Milimetre |
| cm | Santimetre |
| n(p) | Bir noktanın p çevresinde belirli bir yarıçap r içinde kalan tüm noktaların kümesini temsil eder |
| p | Nokta kümesi |
| q | P noktasının komşusu |
| P | Nokta bulutu |
| r | Komşuluk mesafesi |
| K(p) | P noktasının eğriliği |
| k1(p) | P noktasının birincil eğriliği |
| k2(p) | P noktasının ikincil eğriliği |
| c(p) | P noktasının çatlak olup olmadığı |
| K(p) | P noktasının eğriliğinin mutlak değeri |
| t | Eşik değeri |
| ts | Total-station ile ölçülen referans koordinatlar |
| D | Referans çatlak uzunluğu ile tespit edilen çatlak uzunluk farkı |
| n | Kontrol noktası-hedef sayısı/çatlak sayısı |

Kısaltmalar

| | |
|-------|--|
| 2B | İki boyutlu |
| 3B | Üç boyutlu |
| Dİ | Dijital ikiz |
| DMVS | Dense multi view stereo (Yoğun çok bakışlı stereo) |
| GNSS | Global navigation satellite system |
| HADİ | Hasarla artırılmış dijital ikiz |
| ID | Insight detector |
| İHA | İnsansız hava aracı |
| KN | Kontrol noktası |
| LiDAR | Light detection and ranging |
| LOD3 | Level of detail 3 (Detay seviyesi 3) |
| MVS | Multi view stereo (Çoklu bakışlı stereo) |
| RMSE | Root mean squared error (Karesel ortalama hata) |
| SfM | Structure from motion (Hareket tabanlı yapısal algılama) |
| SG | Sanal gerçeklik |
| SIFT | Scale invariant feature transform |
| YKN | Yer kontrol noktası |
| YÖA | Yer örnekleme aralığı |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Şekil 3.1 Tez çalışması genel iş akışı..... | 36 |
| Şekil 3.2 Veri toplama ve SfM iş akışı (Yiğit ve Uysal 2021)..... | 40 |
| Şekil 3.3 Modern kiriş elemanı için veri toplama. | 51 |
| Şekil 3.4 Merdiven elemanının genel görünümü ve ayrıntılı bir kısım..... | 52 |
| Şekil 3.5 Elvanlı köprü yapısının konumu. | 54 |
| Şekil 3.6 Bindirme oranları ve YÖA..... | 56 |
| Şekil 3.7 Uçuş planlamaları..... | 56 |
| Şekil 3.8 Köprü çalışmasında kullanılan uçuş planlaması. | 57 |
| Şekil 3.9 Köprü yapısı için arazi çalışması sırasında YKN ve KN ölçülmesi. | 58 |
| Şekil 3.10 Mezgit Kalesi'nin konumu ve topografik yapısına genel bir bakış..... | 59 |
| Şekil 3.11 GNSS alıcısı ve Total-station ile hedeflerin ölçülmesi ve saha çalışması. ... | 60 |
| Şekil 3.12 Kebir Kaya'sının konumu ve alanın genel görünümü. | 61 |
| Şekil 3.13 Maden sahasının konumu genel görünümü..... | 62 |
| Şekil 4.1 Kiriş nesnesinin 3B doku modelinin detaylı görüntüsü. | 64 |
| Şekil 4.2 Kiriş nesnesinin çatlakları ve çatlak uzunluğu ölçümleri. | 65 |
| Şekil 4.3 Kiriş nesnesinin 3B Dİ modelinin SG platformunda sunulması..... | 66 |
| Şekil 4.4 Yakın mesafe fotogrametrisine uygun fotoğraf çekim senaryosu..... | 67 |
| Şekil 4.5 Seyrek nokta bulutu (a) ve fotoğraf üzerinde ortak eşleşen noktalar (b). | 68 |
| Şekil 4.6 Merdiven yapısının 3B model genel görünümü ve yakın gösterimi. | 68 |
| Şekil 4.7 Merdiven için otomatik tespit edilen çatlakların (mavi çizgiler) gösterimi.... | 68 |
| Şekil 4.8 Merdiven için HADİ modelinin WEB tabanlı SG bağlantısı..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.9 Merdiven yapısının SG başlığı ve WEB tabanlı SG arayüzü. | 71 |
| Şekil 4.10 WEB tabanlı SG’de merdiven için HADİ ile yapısal denetim. | 71 |
| Şekil 4.11 Köprüye ait 3B model (Kuzey Cephesi). | 72 |
| Şekil 4.12 Köprüye ait 3B model (Güney Cephesi). | 73 |
| Şekil 4.13 Kolonlarda ve üst destekte otomatik tespit edilen çatlaklar. | 74 |
| Şekil 4.14 Yan cephede ve üst destekte otomatik tespit edilen çatlaklar. | 74 |
| Şekil 4.15 Yan destek ve orta kolondaki otomatik tespit edilen çatlaklar. | 74 |
| Şekil 4.16 Köprüye ait HADİ modelin SG platformda görüntülenmesi. | 77 |
| Şekil 4.17 SG’de köprünün Dİ modelinden (a) ve 3B modelden (b) ölçüm. | 77 |
| Şekil 4.18 SG’de köprü Dİ modelden (a) ve 3B modelden (b) ölçüm. | 78 |
| Şekil 4.19 Köprü yapısı için SG platformda çevrim içi oda kurulumu. | 78 |
| Şekil 4.20 Köprü yapısı için SG platformda çevrim içi odaya katılım. | 79 |
| Şekil 4.21 Köprü yapısı için interaktif denetim (a-A kullanıcı, b-B kullanıcı). | 79 |
| Şekil 4.22 Köprü için detaylı interaktif denetim (a: 1. kullanıcı, b: 2. kullanıcı). | 80 |
| Şekil 4.23 Köprü yapısı için çevrimiçi alternatif denetim araçları. | 81 |
| Şekil 4.24 Köprü yapısının termal 3B model görüntüsü. | 83 |
| Şekil 4.25 Köprü yapısının kuzey tarafına ait termal dokulu Dİ model. | 83 |
| Şekil 4.26 Köprü yapısının güney tarafına ait termal dokulu Dİ model. | 84 |
| Şekil 4.27 Köprü yapısının korozyona uğramış bölgede termal dokulu Dİ model. | 86 |
| Şekil 4.28 Kale için çift grid uçuş planı (a) ve dairesel uçuş planı (b). | 87 |
| Şekil 4.29 Kale yapısının yüksek çözünürlüklü 3B fotorealistik modelleri. | 87 |
| Şekil 4.30 Kale yapısının 3B doku modellerinin detaylı tasviri. | 88 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.31 Kale için HADİ modelinin farklı cephelerdeki çatlaklar. | 89 |
| Şekil 4.32 Kale yapısında bir cephe üzerindeki çatlak uzunluğu ölçümü. | 89 |
| Şekil 4.33 Kalenin çatlak+LOD3 (HADİ) modeli. | 90 |
| Şekil 4.34 Kale yapısı için HADİ modelin SG platformuna aktarılması. | 94 |
| Şekil 4.35 Kale yapısının HADİ modeli ile SG platformunda denetim. | 94 |
| Şekil 4.36 Kale yapısının SG ortamında hareket özellikleri ve denetim. | 95 |
| Şekil 4.37 Kaya yapısının 3B modeli. | 96 |
| Şekil 4.38 Kaya yapısının 3B HADİ modeli. | 96 |
| Şekil 4.39 Kaya yapısının 3B HADİ modeli. | 97 |
| Şekil 4.40 Kaya yapısının 3B HADİ modeli. | 98 |
| Şekil 4.41 Kaya yapısının 3B HADİ modeli. | 98 |
| Şekil 4.42 Mermer ocağı yapısının 3B HADİ modeli. | 99 |
| Şekil 4.43 Mermer ocağı yapısının 3B HADİ modeli. | 99 |
| Şekil 4.44 Mermer ocağına ait HADİ modelinin SG platformunda gösterimi. | 100 |
| Şekil 4.45 Mermer ocağına ait HADİ model ile SG platformunda yapısal denetim.... | 101 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Çizelge 3.1 Çalışma da kullanılan İHA'nın temel teknik özellikler (Anafi, 2021). | 55 |
| Çizelge 4.1 Kiriş nesnesi için 3B modelin doğruluk analizi. | 65 |
| Çizelge 4.2 Kiriş nesnesinde otomatik tespit edilen çatlaklar için doğruluk analizi..... | 66 |
| Çizelge 4.3 Merdiven yapısı için üretilen 3B modelin geometrik doğruluk analizi. | 69 |
| Çizelge 4.4 Merdiven yapısı için tespit edilen çatlakların doğruluk analizi. | 69 |
| Çizelge 4.5 İHA ile hava fotoğrafları toplamak için uçuş parametreleri. | 72 |
| Çizelge 4.6 Köprü için 3B model doğruluk değerlendirmesi..... | 73 |
| Çizelge 4.7 Köprü için otomatik tespit edilen çatlakların doğruluk analizi..... | 75 |
| Çizelge 4.8 Kale için 3B Dİ model doğruluk analizi. | 91 |
| Çizelge 4.9 Kale yapısının 3B Dİ modeli için doğruluk analizi. | 93 |
| Çizelge 4.10 Kaya kütesini 3B Dİ model için doğruluk analizi. | 97 |
| Çizelge 4.11 Kaya yapısına ait çatlak uzunlukları doğruluk analizi. | 97 |
| Çizelge 4.12 Mermer ocağının 3B modelinin doğruluk analizi. | 100 |
| Çizelge 4.13 Mermer ocağında tespit edilen çatlakların doğruluk analizi..... | 100 |
| Çizelge 4.14 Çalışma nesnelere/alanları için genel doğruluk analizi. | 103 |

1. GİRİŞ

Dijital ikizler (Dİ) fiziksel nesnelere dijital temsilleridir ve modern mühendislik, üretim, sağlık ve enerji de dâhil olmak üzere (Qin ve Gruen 2014; Qi vd. 2021) birçok alanda kullanılan bir teknolojidir. Dijital ikizler, analiz ve simülasyon yapabilme yetenekleri sayesinde fiziksel nesnelere performansını, güvenliğini ve bakımını geliştirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Rosen vd. 2015; Mohammadi vd. 2021). Dijital ikizlerin önemi, çok sayıda avantajdan gelmektedir (Osadcha vd. 2023; Haibt 2024). Öncelikle Dİ'ler, nesnelere gerçek verilere dayalı olarak izlenmesini kolaylaştırır. Fiziksel nesnelere toplanan verilerle sürekli olarak güncellenebilen Dİ'ler böylece nesnelere süreçteki anlık durumlarının izlenmesine ve yönetilmesine olanak sağlamaktadır (Kritzinger vd. 2018). Dijital ikizlerin bu önemli işlevselliği, özellikle mühendislik ve operasyonel süreçler bağlamında önemli avantajlar sunmaktadır. Geçmiş ve güncel verilerin analizi yoluyla bakım stratejilerinin geliştirilmesinde de kullanılmakta olan Dİ'ler ile potansiyel sorunların önceden tespit edilmesi sağlanmaktadır (Bukhsh 2019). Sorunların erken aşamada tespit edilmesi ve önlenmesi maliyetleri azaltarak operasyonel verimliliği artırmaktadır (Dubois ve Gadde 2002; Succar vd. 2012; Tao vd. 2018a). Bu durum, farklı operasyonel stratejilerin ve tasarım değişikliklerinin etkilerinin sanal ortamda değerlendirilmesini ve en uygun çözümlerin belirlenmesini sağlamaktadır (Hoskere vd. 2018).

Dijital ikizler verimliliğin yanı sıra ürün ve hizmetlerin geliştirilmesinde yenilikçiliği teşvik etmektedir (Boschert vd. 2018). Dİ'ler ile sanal ortamda gerçekleştirilen görselleştirmeler, sürdürülebilirlik, enerji verimliliğini optimize etmek, kaynak kullanımını azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için de kullanılabilir. Dijital ikizler fiziksel ve dijital dünyalar arasındaki boşluğu dolduran sanal bir temsildir (Wang vd. 2015; Obradović vd. 2020). Dijital ikizler, küçük ölçekten büyük ölçeğe kadar herhangi bir nesnenin üç boyutlu (3B) modellerinin aktarımı olabilir (Haibt 2024). Üretilen Dİ, fiziksel bir nesnenin veya sürecin sanal bir kopyası olsa da nesne hakkındaki tüm verileri içeren bir temsil olduğu için 3B modelden daha fazlasıdır (Mohammadi vd. 2021; Osadcha vd. 2023).

Dijital ikizlerin etkinliği, son derece doğru ve ayrıntılı 3B modellerin mevcudiyetine bağlıdır (Obradović vd. 2020; Wang vd. 2024). Çünkü Dİ oluşturma sürecinin ilk aşaması, nesneyi doğru bir şekilde temsil eden kapsamlı, doğru ve sürdürülebilir bir 3B modelin oluşturulmasıdır (Mohammadi vd. 2021). Yüksek doğruluklu 3B modeller, fiziksel nesnelerin mevcut durumunun doğru dijital temsillerinin oluşturulmasında çok önemli rol oynar ve böylece ayrıntılı incelemelere ve analizlere olanak tanır. Bu modeller fiziksel nesnelerin gerçekçi bir temsilini sağlayarak kapsamlı analizleri kolaylaştırır (Wang vd. 2024). Bu tür modeller, kapsamlı bir analizi sağlamak için doğru geometrik verileri toplayan sensör ve diğer veri kaynaklarıyla entegre edilebilir (Haibt 2024). Dijital ikizler, gerçek bir nesnenin dijital temsili olduğu için temsil ettiği nesneye ait geometrik veriler ile güncellenmesi gerekmektedir. Bu amaca en uygun olan fotogrametri yöntemi Dİ oluşturmada geometrik doğruluk açısından avantaj sağmaktadır (Wang vd. 2024). Bu noktada Dİ oluşturmada fotorealistik 3B modellerin kullanılması; çeşitli senaryoların simülasyonu, optimizasyonu, nesnelere uzaktan takip etme ve yönetme anlamında kolaylık sağlamaktadır (Tadeja vd. 2021; Kong ve Hucks 2023). Sonuç olarak fotogrametri ile fotoğraflar aracılığıyla üretilen fotorealistik 3B modeller gerçeklik yoluyla Dİ yaratılmasının temelini oluşturulmaktadır (Mohammadi vd. 2021; Cruz Franco vd. 2023).

Fotogrametri ile son derece hassas ve ayrıntılı 3B modellerin üretilmesi, özellikle doğruluk ve hız için optimize edilmiş, bağımsız, gelişmiş bir 3B Dİ temeli oluşturur (Li vd. 2023; Kong ve Hucks 2023). Dijital ikizlerin başarısı, bu modellerin doğruluğuna ve ayrıntı düzeyine bağlıdır (Haibt 2024). Bu doğruluk, özellikle mühendislik ve yapısal denetim uygulamalarında kritik öneme sahiptir (Obradović vd. 2020). Fotogrametri yöntemi ile elde edilen 3B modeller, LiDAR (Light detection and ranging), GNSS (Global Navigation Satellite System), multispektral ve hiperspektral görüntüler, radar verileri ve termal kameralar gibi diğer sensör verileri ve veri kaynaklarıyla kolayca entegre edilebilir (Wang vd. 2024). Bu entegrasyon, Dİ'nin nesneye ait gerçek veriler ile güncellenmesini ve kapsamlı bir analiz yapılmasını sağlamaktadır (Wang vd. 2015; Kong ve Hucks 2023). Bunun yanı sıra fotorealistik görselleştirme ve analiz için coğrafi bilgi sistemleri teknolojisi ve harita üretim sistemleri ile veriler hızlıca işlenebilmekte ve paylaşılabilmektedir (Obradović vd. 2020). Fotogrametri, lazer tarama gibi diğer 3B

tarama yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve düşük maliyetli veri toplama imkânı sunmaktadır (Mohammadi vd. 2021; Yiğit ve Uysal 2023). Fotogrametri yöntemi zaman içinde çekilen fotoğraflar aracılığıyla nesnenin zamansal değişimlerinin takibi için de Dİ'lerin etkinliğini artırmada kullanılabilir. Bu sayede, geçmişteki ve gelecekteki durumları sanal ortamda simüle edebilir (Kong ve Hucks 2023; Akay ve Özcan 2023). Burada bahsedilen ve diğer birçok avantajından dolayı fotogrametri ile üretilen modeller ile desteklenen Dİ birçok sektörde devrim yaratma potansiyeline sahiptir (Bevilacqua vd. 2022; Yiğit ve Uysal 2023; Osadcha vd. 2023).

Teknolojinin gelişmesi ile fotogrametri yönteminde, hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from Motion/SfM) ve çok bakışlı stereo (Multi View Stereo/MVS) algoritmaları kullanılarak yüksek kaliteli fotorealistik 3B modeller kolaylıkla oluşturulabilmektedir (Fonstad vd. 2013; Yamazaki ve Liu 2016; Angjeliu vd. 2020; Hou vd. 2021; Uslu ve Uysal 2021; Konstantakis vd. 2023). Yüksek doğrulukta fotorealistik 3B modeller üretilmesi, veri entegrasyonu, gerçekçi görselleştirme ve optimizasyon gibi avantajlar fotogrametrinin Dİ için önemini vurgulamaktadır (Rainieri vd. 2022; Kong ve Hucks 2023). Özellikle fotogrametri yöntemi kullanılarak gerçek dokularla oluşturulmuş Dİ'nin sanal gerçeklik (SG) teknolojileri ile entegrasyonunun oluşturulması Dİ'lerin daha etkili kullanılmasını sağlamaktadır (Harrington vd. 2022). Dahası fotogrametri ile elde edilen 3B modeller ve nesneye ait diğer yapısal bilgilerin bütünleştirilmesi ile oluşturulan ve son zamanlarda ön plana çıkan Hasarla Artırılmış Dijital İkiz (HADİ) (Pantoja-Rosero vd. 2023; Yiğit ve Uysal 2023; Yiğit ve Uysal 2024) modeli bu entegrasyonun bir parçası olmaktadır. Bu entegrasyon, fiziksel nesnelerin daha etkileşimli ve detaylı bir şekilde incelenmesini mümkün kılar (Bevilacqua vd. 2022; Yiğit ve Uysal 2023).

Sanal gerçeklik ile görselleştirilen bu Dİ'ler, yapıların hasar durumlarını ve karakterizasyonlarını içeren uçtan uca bir çözüm sunar. Bu çözüm yapıların uzaktan ve detaylı bir şekilde incelenmesini mümkün kılmaktadır (Wang vd. 2024). Geleneksel denetim yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve daha verimli olan bu yöntemler, özellikle çatlak tespiti gibi hasar tespiti analizlerinde büyük önem taşır (Angjeliu vd. 2020; Hou vd. 2021; Tanbour ve Tanbour 2023). Sonuç olarak, fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modellerle desteklenen Dİ'lerin SG ile görselleştirilmesi, mühendislik ve yapısal

denetimlerde yenilikler sunmakta ve yapıların güvenliğini ve performansını artırmak için etkili çözümler sağlamaktadır (Bevilacqua vd. 2022; Pantoja-Rosero vd. 2023). Bu teknolojiler, fiziksel nesnelerin daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesini sağlar (Jouan ve Hallot 2019; Bevilacqua vd. 2022). Özellikle yapıların belgelenmesi, mevcut durumlarının izlenmesi ve geleceğe aktarılmasında bu teknolojilerin yapı ve altyapıların denetimlerinde bütünlük kullanımı birçok avantajı beraberinde getirebilmektedir.

Günümüzde özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, yapı ve altyapıların yanında modern ve kültürel miras yapılarını korumak, muhafaza etmek ve geleceğe taşımak açısından bütünlük denetim mekanizmasına sahip olmak zorundadır (Zollini vd. 2020; Mandirol vd. 2022). Bu zorundalıkla sahip olan ülkelerdeki en büyük sorunlardan birisi eskiyen altyapıların/yapıların tespiti ve bunların iyileştirilmesi için mevcut durumların belirlenmesidir (Masciotta vd. 2017; Dorafshan ve Maguire 2018; Kao vd. 2022). Yapıların süreç içerisinde kullanılmasından kaynaklanan olağan yaşlanmasıyla ilgili sayısız problemin ortaya çıkışından başlayarak zaman içinde yapının güvenliğinin kontrolüne ve yeterli bakımlarının sağlanmasına ihtiyaç vardır (De Stefano vd. 2016; Zeybek ve Kaya 2020; Latifi vd. 2023). Bu da sürekli olarak yapı hakkında güncel bilgilere ihtiyaç duyan ve analiz edilen bir süreç ile yapıları periyodik olarak izleyen ve kontrol eden yöntem ve tekniklerin uygulanmasıyla mümkündür. Altyapı sistemleri ve yapılar, düzenli olarak veya bir doğal afetin hemen ardından yapısal yönetmeliğe göre sorumlu mühendisler tarafından görsel olarak yerinde denetlenmektedir (Masciotta vd. 2017; Hoskere vd. 2018; Hou vd. 2023). Uygun bir değerlendirme süreci, hasarlı yapıların potansiyel problemlerini önlemekte olup insan yaşamı ve ekonomik kayıplar için herhangi bir tehlike oluşturabilecek sonuçların en aza indirilmesine katkı sağlamaktadır (Fidan ve Ulvi 2022).

Bir inceleme sırasında mühendisler, yapısal bileşenlerdeki hasarları görsel olarak yapı üzerindeki yerini belirlemeye çalışırlar. Daha sonra incelenen bu yapının; hizmet vermeye uygunluğu, ek analiz ihtiyacı, güçlendirme gereksinimi veya yıkılması gerekip gerekmediği sorumlu denetçi veya mühendis tarafından belirlenmeye çalışılmaktadır (De Stefano vd. 2016). Özellikle çatlaklar, beton veya duvar gibi kırılabilir yapılarda inceleme

sırasında en sık gözlemlenen hasar şeklidir ve bu da çatlakları yapısal denetimde çok önemli hale getirmektedir (Zhang vd. 2017; Debroy ve Sil 2022). Bu yüzden çatlakların sürekli olarak denetlenmesi gerekmektedir. Bu süreç uzun yıllardır geleneksel yöntemlerle yapılmaktadır (Al-Thelaya vd. 2023). Fakat geleneksel yapı denetimlerinin başlıca sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle nesnellikten yoksun olması, uzun uygulama süresi, önemli maliyetler ve zararları belgelemenin zorluğu ön plana çıkmaktadır (Zhou ve Song 2020). Bu dezavantajlar yapısal denetimde çatlak tespitine yardımcı olacak yeni değerlendirme metodolojilerine olan ihtiyacı giderek artırmaktadır. Özellikle uzun yıllar önce yapılmış kültürel miras yapıları ve sıklıkla kullanılan yapılarda (örneğin köprü vb.), hizmet ömrü arttıkça çatlaklar meydana gelmekte ve bu yapılar çeşitli derecelerde güvenlik risklerine maruz kalmaktadır (Stepinac vd. 2022). Bu yüzden sürekli tehlike altında olan yapıların güvenliğini belirlemek ve işletimini sürdürmek için düzenli denetim yapılması gerekir (Hallermann ve Morgenthal 2014; Chan vd. 2015; Yu ve Nishio 2022). Düzenli denetim yapılması her ne kadar yapı sağlığı için önemli olsa da bu denetimlerin olabildiğince hızlı yapılması gerekmektedir.

Yapıların hızlı bir şekilde denetlenmesine yönelik mevcut prosedürler subjektif, zaman alıcı ve belgelenmesi külfetli olduğundan dolayı süreci otomatikleştirmek ve eksiklikleri ortadan kaldırmak için yeni teknolojiler kullanılmalıdır (Gattulli vd, 2016; Ying vd. 2022; Ernst vd. 2024). Hasar değerlendirmesinde mevcut en son teknoloji olarak yapay zekâ algoritmaları ve fotogrametri yöntemleri (Ubertini vd, 2016; Jiang vd. 2021; Al-Thelaya vd. 2023; Kong ve Hucks 2023) dâhil olmak üzere bilgisayarla görme teknikleri ile görüntü verilerini kullanan SG destekli Dİ teknolojisi karşımıza çıkmaktadır (Jouan ve Hallot 2019; Fidan ve Ulvi 2022; Rainieri vd. 2022). Bu teknoloji ile yapılan modern denetimler ile süreç geleneksel denetimlere göre olabildiğince hızlı ve doğru olması en önemli avantaj olarak gösterilebilir (Blanco vd, 2018; Kabadayı ve Erdoğan 2022; Yiğit ve Uysal 2023). Dijital ikiz ile gerçekleştirilecek bu sürecin ilk ve en önemli aşaması tam ve eksiksiz bir 3B model üretilmesinden geçmektedir. Çünkü geometrik olarak yüksek doğruluklu ve gerçek dokularla kaplanmış bir Dİ ile yapılan denetimin doğruluğu direkt 3B modelden etkilenmektedir (Angjeliu vd. 2020; Hou vd. 2021).

1.1 Tezin Önemi ve Amacı

Manuel denetimler veya yerinde yapılan araştırmalar gibi geleneksel yöntemler zaman alıcıdır ve yoğun emek istemektedir (Pantoja-Rosero 2023). Fotorealistik 3B modeller ile üretilen Dİ'ler, nesnenin zaman içindeki durumunu izlemek, olası bakım sorunlarını belirlemek, denetim ve bakım programlarını optimize etmek için kullanılabilme potansiyeli geleneksel denetimlere alternatif olarak giderek artan bir araştırma alanıdır (Adreani vd. 2022; Fawzy vd. 2023; Xu vd. 2024). Fotogrametri ile veriler çok daha hızlı ve daha az insan gücüyle toplanabilir ve sonuç olarak önemli maliyet tasarrufları sağlanabilir. Yapısal denetimler, yapının başta fiziksel durumunun belirlenmesini, objektif olarak değerlendirilmesini ve muhafaza edilmesi için uygun önlemlerin belirlenmesini gerektirir (Masciotta vd. 2017; Zollini vd. 2020). Yapının veya nesnesinin fiziksel durumuna ilişkin bir değerlendirme yapısal inceleme sürecini başlatır. Bu değerlendirme, yapısal sağlamlığının değerlendirilmesini, herhangi bir zarar veya bozulma belirtisinin tespit edilmesini ve analiz edilmesini içerir (Latifi vd. 2023). Belirli kurumlar ve uzmanları bu görevi rutin olarak yerine getirmektedir (De Stefano vd. 2016).

Bu noktada yapılan çalışmalar incelendiğinde yerinde ve anında denetimin zor olduğu nesnelerin yapısal denetimini yapılması için yeni yöntemlerin uygulanması gerektiği görülmüştür. Çözüm hedefi olarak gerçek dünyadaki nesnelerin dijital ortamda tam bir temsilini oluşturmada fotorealistik dijital ikiz bunların SG entegrasyonu ile temsillerin getirdiği başarıyı artırmak için uygulamalı bir araştırmayı kapsamaktadır. Bu amaçla yapısal denetimin en önemli parçalarından olan çatlakların otomatik tespiti sonucu üretilen vektör bilgiler ile fotorealistik 3B modeli bütünleştirilen bir HADİ model üretilmiştir. HADİ modeli, alanında uzman kişilere SG platformu aracılığıyla aktararak yerinde yapısal denetimlere alternatif bir çözüm üretilmiştir. Bununla birlikte, Dİ'lerle mevcut yapı yönetimi uygulamasında hangi zorlukların desteklenebileceği ve Dİ'lerin bu özel durumlara nasıl katkıda bulunabileceği henüz net değildir (Vuoto vd. 2023). Net olmayan konuların araştırılmaya değer olması bu tez çalışmasına yöneltmiştir. Bu araştırmanın amacı, yapı yönetiminde mühendislik çalışmalarına en uygun Dİ kullanım durumları için fonksiyonel bir tasarım geliştirmektir ve diğer yandan yapı yönetiminde Dİ'lerin kullanım durumlarını belirlemektir.

Fotorealistik Dİ'lerin çeşitli SG araçları kullanarak diğer uzmanlara aktarılması eksik olan yapısal kusurların sanal ortamda tamamlanması açısından çözüm sunmaktadır. Bu yüzden Dİ'ler ile sanal ortamda yapılan yapısal denetimlerin SG platformlarına entegrasyonu henüz çok fazla araştırmaya konu olmamış ve irdelenmesi gereken alanların başında gelmektedir (Vicente vd. 2022; Yiğit ve Uysal 2023; Xu vd. 2024). Fotogrametri ile elde edilen 3B Dİ modeller, SG teknolojileri ile entegre edilerek Dİ'lerin daha etkili kullanılmasını sağlamaktadır. Bu entegrasyon, fiziksel nesnelerin daha etkileşimli ve detaylı bir şekilde incelenmesini mümkün kılar (Wang vd. 2024). Sanal gerçeklik ile aktarılan 3B Dİ'ler, somut, soyut ya da artık var olmayan veya ağır tahribata uğramış yapıların sanal ortamda hayata geçirilmesi için farklı yenilikçi çözümler önermektedir (Jouan ve Hallot 2019; Bevilacqua vd. 2022). Sanal gerçeklik uygulamaları, sanal müzelerden dijital yeniden yapılandırılmalara, yapısal denetimlerden sanal keşiflere ve eğitici eğlenceye kadar çeşitli konuları kapsamakta ve düşük maliyetli içerik yayma ve iletişim çözümleri sunmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, fotogrametri ile üretilen fotorealistik 3B Dİ ve SG entegrasyonu ile işlevsel bir tasarım geliştirerek yapı yönetimindeki mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarına nasıl katkıda bulunabileceğini araştırmak ve çözüm üretmektir. Üretilen bu Dİ'ler SG gibi görselleştirme araçları ile uzman kişilere uzaktan (çevrimiçi platformlar ile) aktarılması ile analiz sürecine ve temsile önemli katkılar sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen yapısal 3B modellerin denetim ve analizleri yapılarak çeşitli görselleştirme araçları ile uzmanlara aktarılması yerinde denetimlere alternatif olan bir yapısal denetim oluşturmuştur. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, 3B modeller üzerinden denetim ve analizlerin yapılmasına, gelecekteki Dİ çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine ve bunların entegreli 3B modellerinin (HADİ modeli) çeşitli platformlar aracılığı ile sunumuna katkı sağlamıştır.

1.2 Araştırma Problemi ve Hipotez

Yapıların incelenmesi ve korunması için yerinde yapısal denetimler, zaman ve maliyet, erişim zorlukları, insan hatası, sürekli izleme eksikliği, güvenlik riskleri ve

detaylı veri eksikliği gibi nedenlerle yetersiz kalmaktadır (Dorafshan ve Maguire 2018; Hoskere vd.2018; Ayele vd. 2020; Kao vd. 2022).

Yerinde yapısal denetimlere alternatif olarak fotogrametri yöntemi ile üretilen fotorealistik 3B modeller ile sanal ortamlarda alternatif çözümler üretilebilir. Bu modeller, yapıların belgelenmesi ve korunması için karakteristik ve yaratıcı bir yaklaşım sunarak yapısal denetime katkı verebilir fakat tek başına yeterli olmayıp diğer denetim mekanizmaları ile bütünleştirilmesi gerekmektedir. Birden fazla verinin birleştirilmesi ile sanal ortamda fiziksel nesnelere temsilini sağlayan Dİ'ler büyük avantajlar sağlayabilir. Özellikle yapı üzerindeki çatlakların vektör verileri ile fotorealistik 3B modellerin entegre edilmesiyle oluşturulan Dİ'lerin kullanımıyla nesnelere daha kapsamlı bir yapısal sağlık analizi sağlanabilir. Yapıların incelenmesinde veya denetlenmesinde 3B hasarla artırılmış Dİ kullanılımasının önemli bir avantajı, zaman içindeki değişiklikleri ve bozulmaları izleme potansiyeli gösterilebilir. Bu potansiyel, yapılara yerinde erişim imkânı olmayan diğer uzman kişilere SG ile aktararak yerinde denetimlere tam bir alternatif çözüm üretilmesine katkı sağlayabilir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu tez çalışmasında temel olarak; fiziksel nesnelerin sanal ortamdaki kopyalarını temsil eden Dİ'lerin avantajlarının çeşitli disiplinlerde potansiyel kullanımı uygulamalı olarak incelenmektedir. Bu avantajlar; gerçek verilerle izleme, öngörücü bakım, verimlilik artışı, hataların ve risklerin azaltılması, kaynak tasarrufu, karar destek sistemi, kapsamlı analiz ve uzaktan yönetim ve kontrol olarak gösterilebilir. Dijital ikizlerin mevcut potansiyelini geliştirmek için, Dİ tarafından temsil edilen fiziksel nesne hakkında kapsamlı ve doğru veri toplamanın önemi yapılan çalışmalarla vurgulanmıştır. Bu yüzden, Dİ'lerin oluşturulmasında önemli bir aşamayı temsil eden kapsamlı ve doğru veri toplama araştırılması gereken ilk adımdır.

Dijital ikizlerin oluşturulmasına ilişkin literatürde çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen bu çalışmaların büyük çoğunluğunun kullanıcı odaklı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar Dİ'nin kullanımı ve etkinliği üzerine yoğunlaşmaktadır. Dİ'lerin en önemli aşamasını oluşturan tam ve doğru veri toplamaya yönelik donanım ve yöntemleri inceleyen çalışma sayısı ise sınırlıdır (Pantoja-Rosero vd. 2023a; Yiğit ve Uysal 2024). Bu verilerin güncellenme sürecini inceleyen çalışmalar da eksiktir. İncelenen çalışmalar sonucunda çeşitli disiplinlerde kullanılmaya başlanan fotogrametri destekli Dİ'lerin yapı denetimlerde henüz yeni bir kullanım alanına sahip olması önemli bir noktadır. Özellikle fotogrametri yöntemiyle üretilen fotorealistik Dİ'lerle işlevsel bir tasarımın geliştirilmesi yoluyla yapısal denetimlerde mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarını ilerletme potansiyeli bu tez çalışmasının konusunu yeni ve özgün hale getirmektedir. Çalışmanın bir diğer odak noktası olan Dİ'ler ile yapısal denetim ve sonuç ürünlerin diğer kullanıcılara interaktif bir şekilde iletilmesini içeren SG kısmı ise kendi içerisinde önemli ve güncel bir konudur. Sanal gerçeklik üzerine olan çalışmalar genel olarak süreç ve 3B modelin üretilmesi aşamalarını içermekte olup büyük bir çoğunluğu sunulan 3B modellerin belirli alanlardaki rolünü araştırmaktadır. Bu çalışma kapsam olarak hem fotogrametri yöntemiyle üretilen fotorealistik Dİ'nin hem de bu modelin SG entegrasyonu ile kullanımını içermektedir. Bu entegrasyon, Dİ'lerin etkin kullanımı konusunda yeni bir bakış açısı sağlamayı ve Dİ'lerin mevcut potansiyelini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde fotorealistik Dİ'lerin sanal ortamda gerçekleştirilen yapısal denetimlerde potansiyelinin giderek arttığı görülmüştür. Özellikle yerinde yapısal denetimlerin ilk ve en önemli adımı olan çatlak tespiti ve hasar değerlendirmelerinin sanal ortamda Dİ'ler ile izlenmesi denetimlere katkılar sunmaktadır. Bu yüzden fotogrametrik 3B model ve yapı üzerinde bulunan çatlakların entegrasyonu ile oluşturulan fotorealistik Dİ modellerinin SG yoluyla uzmanlara aktarılması tez konusunu belirlemiştir. Fotorealistik Dİ ile SG entegrasyonu ve yapısal denetimlerde kullanılması üzerine bu tez çalışmasında çeşitli nesne ve alan üzerinde bir dizi test çalışması gerçekleştirilmiştir. Birden fazla çalışma gerçekleştirilmesinin sebebi seçilen nesnelerin veya alanların özel koşullarının karakteristik özelliklerinin farklı olmasıdır. Ek olarak her çalışma alanına özel verilerin toplanması gerekmektedir ve her nesnenin uygulanmasında farklı işlevler sağlanmaktadır. Bu durum tüm fiziksel nesnenin Dİ'nin ayrı ele alınmasını gerektirmektedir. Bu yüzden tez çalışması kapsamında literatür kısmında tez konusu hakkında detaylı bilgiler ve örnek çalışmalar yer verilmiştir. Literatür kısmının bundan sonraki kısmında sırasıyla; Dİ ve fotogrametrik 3B model, Dİ'lerin yapısal denetimlerde kullanımı, yapısal denetimlerde çatlak tespiti ve fotorealistik Dİ ile SG entegrasyonu aktarılmıştır.

2.1 Dijital İkiz ve Fotogrametrik 3B Model

Dijital ikiz, gerçek dünyadaki karşılığına benzeyen ve aynı şekilde davranan fiziksel bir nesnenin, sürecin, sistemin veya ortamın dinamik bir sanal kopyası; bir ürünün, nesnenin, ortamın, sürecin veya hizmetin sanal bir modelidir (Osadcha vd. 2023). Diğer bir deyişle fiziksel bir nesnenin tam karşılığı yani sanal bir ikiz yaratmak anlamına gelmektedir (Haibt 2024). Sanal kopya, araba, makine, tren veya jet motoru da dahil olmak üzere herhangi bir nesne şeklinde olabilir (Obradović vd. 2020; Wang vd. 2024). Dijital ikiz oluşturma süreci, temsil edilecek nesne hakkında veri toplanmasıyla başlar. Süreç ilerledikçe fiziksel üründe ortaya çıkabilecek potansiyel sorunları tahmin etme ve performans sonuçlarını oluşturulur. Nihayetinde, Dİ bir dizi analitik uygulamada kullanılabilir. Temsil ettikleri gerçek dünya gibi, Dİ'ler de sürekli değişmelidir (Wang vd. 2024). Bu yüzden fiziksel nesnelerin değişen durumunun sanal ortamda simülasyonu

gerçekleştirmek için Dİ'lerin sürekli olarak güncellenmesi gerekmektedir. Dijital ikizlerin gücü, fiziksel nesnelere gerçek dünya verileriyle bağlayarak onları sanal ortamda daha iyi görselleştirmeden gelmektedir (Mohammadi vd. 2021). Dijital ikizler, üreticilerin ve kullanıcıların sanal ortamda temsil edilen nesnelere geçmişini anlamalarına, mevcut koşulları görmelerine ve nesne hakkında gelecekteki sorunları önlemelerine yardımcı olmaktadır (Hoskere vd. 2018). Gerçeği tam anlamıyla temsil eden bir Dİ modelden yapılan analiz tahmin yoluyla karar verme sürecinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Kong ve Hucks 2023). Dijital ikizler, gerçek dünya objelerin dijital verileriyle birlikte görselleştirmek ve analiz etmek için kavramsal modeller içe aktararak veya gerçek dünyadaki fiziksel nesnelere tarayarak oluşturulur (Succar vd. 2012; Tao vd. 2018b).

Dijital ikizler, nesnelere fiziksel dünyada yaşayabileceği hareketlerin ve etkileşimlerin sanal ortamda nesne hakkındaki eylemlerine 3B olarak yanıt veren etkileşimini içermektedir (Rosen vd. 2015; Mohammadi vd. 2021). Bu durumda gerçek dünya koşulları, olasılık senaryoları ve akla gelebilecek her türlü durum etkin bir şekilde sanal ortamda simülasyonu gerçekleştirilir. Bu simülasyon, mobil cihazlar, bilgisayarlar ve artırılmış, karma ve SG dahil olmak üzere herhangi bir platformda anında görselleştirebilir (Qi vd. 2019). Karmaşık nesne ve yapıları Dİ olarak görselleştirme ve simülasyon gücü, insanların nesnelere ile etkileşim kurma biçimini yükselterek gezegendeki her fiziksel alan ve nesnenin yaratılma, inşa edilme ve işletilme şeklini dönüştürmüştür (Qin ve Gruen 2014). Her Dİ model benzersizdir ve modeller genellikle aşamalar halinde gerçekleşir ve her aşamanın karmaşıklığı ve iş etkisi artmaktadır (Yiğit ve Uysal 2023). Dijital ikiz, bir 3B modelin ürün yapılandırıcısından, her bir bileşenin mühendislik, inşaat ve işletim verileriyle dinamik olarak bağlantılı olduğu bir şehir kadar geniş bir ağ veya sistemin kesin bir temsiline kadar değişebilmektedir (Angjeliu vd. 2020; Hou vd. 2021). Dijital ikizler fiziksel nesnenin yaşam döngüsünün her aşamasında karar verme süreçlerini bilgilendirir. Bu sürecin en önemli aşaması ise doğru, hızlı ve eksiksiz veri toplama (Hou vd. 2021; Tanbour ve Tanbour 2023). Kapsamlı veri toplama önemli bir süreç olsa da onu akıllı bir şekilde tüketmek tamamen başka bir olgu oluşturmaktadır.

Hokkeling (2020), Dİ kavramının fiziksel sistemin özelliklerinin, durumunun ve davranışının sanal bir temsili olarak görülebileceğini belirterek yapı yönetiminde daha verimli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilen denetimlere Dİ'lerin katkısını aktarmıştır. Bir Dİ'nin, fiziksel sistem hakkındaki tüm bilgileri içeren büyük bir veri tabanı olarak kabul edilemeyeceğini bunun yerine bir Dİ'nin, bilgileri ve verileri semantik teknolojileri kullanarak bütünleştirdiğini dile getirmiştir. Daha teorik bir bakış açısından, Qi vd. (2019), Dİ ile özellikle şekli, konumu, durumu ve hareketi ile ilgili olarak dijital dünyadaki fiziksel bir nesneyi yansıtmamanın benzersiz bir yolunu önermişlerdir. Duyusal veri toplama, büyük veri analitiği, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile ilgili olarak izleme, teşhis, prognostik ve optimizasyon için bir Dİ'nin kullanılabileceğini çalışmalarında açıklamışlardır. Qin ve Gruen (2014) ise, Dİ'lerin uygulanmasının sadece şehirler bağlamıyla sınırlı olmadığını da belirterek Dİ'nin her alanda kullanılması gerekliliğini aktarmışlardır. Çalışmalarında, Dİ'lerin konumlandırıldığı birçok uygulama alanları genel olarak; şehir, sağlık, uzay, mobil otonom sistemler, tarım, savunma sanayi, akıllın kent, sondaj platformu, gemi, üretim, yapısal denetim vb. alanları olarak aktarmışlardır. Kritzinger vd. (2018) Dİ'lerin çeşitli şekillerde ve farklı disiplinlerde kullanılabilir olduğundan ve dolayısıyla uygulamanın kavramsal temele, hedeflere ve yaklaşımlara göre farklılık göstermesini aktarmışlardır. Rosen vd. (2015) ise Dİ teknolojisinin, genellikle rekabet gücünü, üretkenliği ve verimliliği artırdığını ve birden fazla alanı teşvik ettiğini belirtmişlerdir.

Dijital ikiz teknolojisi son yıllarda farklı amaçlar doğrultusunda önemli bir ivme kazanarak giderek popüler hale gelmiştir (Osadcha vd. 2023). Dijital ikiz uygulamaları bina tasarımından altyapı yönetimine ve doğal kaynakların korunmasına kadar uzanmaktadır (Haibt 2024). Dijital ikiz teknolojisi özünde bina, köprü, tarihi eser veya doğal çevre gibi fiziksel bir nesnenin simülasyon, izleme ve tahmine dayalı bakım gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilecek sanal bir temsilin oluşturulmasını içerir. Dijital ikiz oluşturmanın en önemli zorluklarından biri, fiziksel nesnelere hakkında doğru ve güncel verilerin elde edilmesidir (Mohammadi vd. 2021). Sonuç olarak Dİ için doğruluk ve görsel bir 3B model hayati önem taşımaktadır. Lo Brutto vd. (2021), Dİ süreci ve 3B model kavramları ile alakalı kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında Dİ süreci aşamasından önce tüm geometrik ayrıntıların belirlenmesi gerektiğinin ve bunu

başarmanın en kolay yolunun fotogrametri gibi modern tekniklerle üretilen 3B modellerin kullanılması olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak çalışmalarında fotorealistik 3B modellerin Dİ üretmedeki ilk ve en önemli aşama olduğu ortaya konulmuştur.

Dijital ikizleri mevcut çalışmalarda uygulamak için önce bir 3B veri modeli geliştirmek gerekmektedir (Dubois ve Gadde 2002; Cruz Franco vd. 2023). Gerçek dünyanın tam ve eksiksiz temsili için doğru ve hızlı bir veri toplama süreci sağlanmalıdır. Dijital ortamda fiziksel nesnenin tam ve eksiksiz temsili için fotogrametri ve LiDAR veri toplama yöntemleri kullanılabilir (Kong ve Hucks 2023). Her iki yöntemden de elde edilen 3B model bir çalışma alanının veya nesnenin dijital bir temsilidir ve bu verilerin her biri gerçek ölçeğinde ve gerçek geometrik yapıda temsil eden bir bütün parçadır (Li vd. 2023). Gerçek ölçekte oluşturulan 3B modelden, bir nesnenin derinliği, yüksekliği, geometrisi ve uzaydaki konumu hakkında gözlemler (ve ölçümler) yapılabilir (Mohammadi vd. 2021). 3B modeller, 3B lazer tarayıcılar kullanılarak oluşturulma eğilimindedir ve her nokta tek bir lazer tarama ölçümünü temsil eder ve sonuç olarak 3B model elde edilebilir. Bunun yanı sıra nispeten daha az maliyetli olan fotogrametri yöntemi ile iki boyutlu (2B) fotoğraflardan nokta bulutları oluşturularak fotorealistik 3B modeller Dİ oluşturmada daha fazla tercih edilmektedir (Harrington vd. 2022). Oluşturulan bu Dİ'ler, kullanıcıların web tarayıcısında, tablette veya karma gerçeklik başlığıyla nesnenin tamamını görselleştirmesine ve durumu kontrol etmesine, analiz yapmasına ve tahmin ve optimizasyon için öngörüler oluşturmaya olanak tanıyabilir. Bu noktada yüksek kaliteli kameralar ve sensörlerle donatılmış fotogrametrik görüntü alma araçları, fiziksel nesnelere hakkında büyük miktarda veriyi hızlı ve verimli bir şekilde toplayabilir (Qi vd. 2021). Veriler toplandıktan sonra, Dİ uygulamalarında kullanılmak üzere fotogrametri yöntemi ile ayrıntılı 2B ortofoto görselleştirmeleri, 3B nokta bulutu ve fotorealistik 3B modeller ile çeşitli çözümler üretilebilmektedir (Li vd. 2023; Cruz Franco vd. 2023). Ortaya çıkan model, görselleştirme, ölçüm ve analiz dahil olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanılabilir (Mohammadi vd. 2021). Fotogrametri yönteminin kullanımı, fiziksel nesnelere hakkında kapsamlı verilerin hızlı ve verimli bir şekilde toplanmasına olanak tanıyarak Dİ modellerin daha sık oluşturulmasını ve güncellenmesini kolaylaştırır. Bu yaklaşım, karar verme ve analiz için daha güncel bilgiler sağlar (Kong ve Hucks 2023). Fotogrametri ile Dİ uygulamaları için veri toplama maliyeti önemli ölçüde

azalmaktadır (Obradović vd. 2020). Ayrıca fotogrametrik veri toplama araçları ile (örn. telefon, tablet, el tipi kamera, İnsansız Hava Aracı (İHA) vb.) insanların ulaşması zor veya tehlikeli olan alanlara kolay erişim olanağı sağlanır ve bu durum Dİ için veri toplamada çalışanların güvenliğini artırarak kaza veya yaralanma riskini en aza indirmektedir (Haibt 2024). Bunlara ek olarak fotogrametrik veri toplama araçları, çok sayıda görüş noktasından ve yükseklikten veri elde edilmesini kolaylaştırarak modellenen fiziksel nesnelerin daha kapsamlı bir temsilini sağlar (Kong ve Hucks 2023). Bu sayede, nesnenin zaman içindeki davranışı hakkında daha iyi tahminlere önemli faydalar sunulmaktadır (Uslu ve Uysal 2021). Fotoğraf çekiminde kullanılan yüksek kaliteli kamera ve sensörlerle, fiziksel nesnelere ilişkin son derece detaylı görüntü ve veriler elde edilmekte ve bu veriler daha sonra fiziksel nesnenin aslına sadık temsili olan yüksek doğruluklu 3B modeller oluşturmak için kullanılabilir (Yiğit ve Uysal 2023; Wang vd. 2023). Bu doğruluk seviyesi, fiziksel gerçeklikten en küçük sapmaların bile önemli sonuçlara yol açabileceği mimarlık, inşaat ve mühendislik gibi uygulamalarda özellikle önemlidir.

Fotogrametrinin profesyonel uygulamalarda ve sektörlerde Dİ'lerin oluşturulmasında veya hangi aşamasında nasıl kullanıldığına dair çok sayıda örnek vardır. Örneğin, mimarlık ve inşaat alanlarında fotogrametri, binaların ve inşaat alanlarının üç boyutlu modellerini oluşturmak için kullanılabilir (Kong ve Hucks 2023; Wang vd. 2024). Bu modeller daha sonra tasarım görselleştirme, inşaat planlama ve güvenlik analizi için bir temel olarak kullanılabilir. Fotogrametri ile üretilen 3B Dİ modelleri ormanların, sulak alanların ve diğer ekosistemlerin ve doğal kaynakların korunmasında ve analizinde kullanılabilir. Bu tür modeller, zaman içinde çevredeki değişiklikleri izlemek, biyoçeşitliliğe yönelik potansiyel tehditleri belirlemek ve koruma çabalarını bilgilendirmek için de kullanılabilir (Angjeliu vd. 2020; Pantoja-Rosero 2023a; 2023b).

2.2 Dijital İkizlerin Yapısal Denetimlerde Kullanımı

Yapı ve nesne yönetiminde mevcut bakım stratejileri, esas olarak görsel incelemelere dayanmaktadır (Bukhsh 2019; Al-Thelaya vd. 2023). Bu denetimler uzun aralıklarla yapılır, emek ister ve maliyeti fazla olmaktadır. Bunların yanı sıra tüm hasarlar görsel

incelemeler ile de tam olarak belirlenemez ve hasarın nedenini belirlemek özellikle zordur. Gelecekteki deformasyon ve deplasmanları yorumlamak ve önlemek için yapıların şu anda olduğundan daha verimli bir şekilde denetlenmesi ve bakımının yapılması önemlidir. Aynı zamanda teknolojiye yapısal sağlık yönetiminde de birçok gelişme vardır (Debroy ve Sil 2022). Çalışma yöntemleri giderek daha fazla dijitalleşmekte ve otomatik hale gelmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte bu denetimlerin dijital ortamlarda özellikle Dİ'lerin oluşturulması ile daha pratik ve ulaşılabilir hale getirilebilir (Levine ve Spencer 2022; Pomeroy 2023).

Yapıların incelenmesi, denetlenmesi ve korunması için 3B modelleme teknolojisinin kullanılmasının önemi giderek daha fazla kabul görmektedir (Uray vd. 2015; Soleymani vd. 2023). Barrile vd. (2022) çalışmalarında, 3B modellerin birçok detayı ve ayrıntıları tam olarak tanımlayabildiğini ve bunun da kapsamlı bir alan kavrayışına katkı sunduğunu aktarmışlardır. 3B model teknolojisi, önemli simge yapıların belgelenmesi ve korunması için karakteristik ve yaratıcı bir yaklaşım sunmaktadır (Sánchez-Aparicio vd. 2023). Yapılar için fotorealistik 3B model üretmek alanın veya nesnenin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına katkı sağlamakta olup (Barrile vd. 2022; Darwish ve Hassanien 2022) üretilen 3B model ile bu süreçteki diğer denetim araçlarından elde edilen verilerin entegrasyonu ile Dİ oluşturulması denetimlere farklı bakış açıları sunmaktadır. Özellikle spesifik nesnelerin, alanların ve yapıların hassas ve detaylı 3B Dİ'lerinin oluşturulması bu nesnelerin sanal ortamda daha kapsamlı bir analizini sağlamaktadır (Banfi vd. 2023). Bu sanal denetimler farkındalığı artırabilir ve yapıların denetlenmesi ve önlemlerin alınmasında analizleri güçlendirebilmektedir (Hosamo ve Hosamo 2022).

Kwiatkowski vd. (2020) göre, geleneksel ölçme teknikleri pratik olmayan süresiz ölçümlerden oluşur ve elde edilen veriler gözlemlenen yapılar üzerine yerleştirilen birkaç nokta (veya eleman) ile sınırlıdır. Buna karşılık, lazer tarama ve fotogrametri gibi modern teknikler ile bu yapılar daha hızlı ve sürdürülebilir olarak ölçülebilmektedir. Özellikle yapısal denetimlerde en önemli parametrelerden olan çatlakların çoğu yerinde görsel incelemelerle tam olarak tespit edilememektedir. Bu yüzden fotorealistik 3B model ile başlayan bu süreçte üretilen Dİ modelinin yapısal denetimde çatlak tespitinde kullanılması çok önemlidir (Fawzy vd. 2023; Pantoja-Rosero vd. 2023a). Bu teknik,

geleneksel denetim yaklaşımlarına kıyasla yapıların durumunun daha kapsamlı ve hassas bir şekilde değerlendirilmesini sağladığından yapıların incelenmesi için bir araç olarak önem kazanmaktadır (Hosamo ve Hosamo 2022; Pantoja-Rosero vd. 2023b). Çatlakların 3B modeller aracılığıyla tespit edilmesi, esasen fiziksel yapının doğru dijital temsili olan yapının bir Dİ modelinin oluşturulmasını gerektirmektedir (Fawzy vd. 2023).

Zhang vd. (2024), Dİ, 3B geometrik modeli ve sonlu elemanlar modelini entegre ederek mevcut altyapıları yönetme, simüle etme ve gelecekteki performans tahminini gibi yeteneğinin yapısal denetimlerde büyük avantajlar sunduğunu aktarmışlardır. Bu çalışma, fotogrametri tekniği ile üretilen nokta bulutlarını kullanarak mevcut betonarme elemanların geometrik Dİ modelini otomatik olarak oluşturmayı ve fotoğraftan tespit edilen hasarları sonlu elemanlar modellerine dâhil etmeyi amaçlamaktadır. Zhang vd. (2024), önerilen yöntemi doğrulamak için ilk olarak dört kiriş bir laboratuvarında test etmişlerdir. Mevcut çatlakların yapısal kapasite ve hasar modu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, geliştirilen sonlu elemanlar modelinin deneysel ve tahmin edilen hasar yükleri arasında iyi bir uyum sağladığını ve aynı zamanda daha verimli ve zamandan tasarruf sağlayan bir değerlendirme protokolü sağladığını göstermiştir.

Bu noktada bu tez çalışmasının yeniliği olarak; karmaşık ve öznel çatlak tespit sürecini otomatikleştirmek için modern teknolojilerin uygulanması gösterilebilir. Geleneksel olarak bu sürecin belgelenmesi zahmetli ve öznel olmaktadır. Buna ek olarak, fotogrametri tekniğinin tarihi veya modern yapılar için Dİ modellerine ayrıntılı altlık modeller üretme kapasitesi ve bunun sonucunda çatlak tespit sürecinin otomasyonu araştırmacıların ilgisini çekmekte olup HADİ modelleri kullanılarak çatlak tespiti yapıların incelenmesi ve bakımı için giderek daha değerli hale gelmektedir.

Yapı denetiminde, Dİ kavramı genellikle yapı bilgi modellemesi ile karşılaştırılır (Succar vd. 2012; Tao vd. 2018a). Bir Dİ model bu çalışmada şu şekilde tanımlanır: fiziksel sistemi tam olarak tanımlayan, anlamsal olarak bağlantılı modeller, bilgiler ve veriler topluluğudur. Son yıllarda yapılan birçok çalışma, binaların yapısal sağlığını izlemek için Dİ modelleri kullanarak umut verici sonuçlar vermiştir. Örneğin, Barazzetti vd. (2015),

Hoskere vd. (2018), derin öğrenme modelleri tarafından tespit edilen ve fotogrametrik 3B model kullanılarak kusurlara sahip dokulu bir 3B yapı modeli içeren yapı modelleri sundular. Shabani vd. (2022), farklı yükleme senaryoları altında bina tepkisini değerlendirmek için Dİ kullanımına yönelik farklı zorlukları ve yaklaşımları değerlendirmiştir. Rainieri vd. (2022), yapısal bakımı izlemek ve tanımlamak için Dİ'lerin bina bilgi modellerinde uygulanmasını tanıtmıştır. 2022'deki Zagreb ve Petrinja depremlerinden sonra ise fotogrametri ve lazer tarama gibi yeni teknolojileri ile doğal afetler ve yapısal bakımdan sonraki hasar değerlendirmeleri için Dİ'lerin oldukça önemli olduğu Stepinac vd. (2022) tarafından yapılan çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Çalışmaları, hasar değerlendirmesini iyileştirmek için yeni teknolojilerden toplanan veriler için nesnellik, zaman ve dokümantasyon açısından uygulamanın önemini göstermiştir. Yapısal bakımı izlemek ve tanımlamak için Rainieri vd. (2022), Dİ'lerin kullanımını yapı bilgi modellemesi şeklinde sundu. Fawzy vd. (2023) çatlakların yapılar üzerindeki tehlikeli etkilerini vurgulamış ve bunların yüksek hassasiyetle izlenmesini önermiştir. Araştırmaları, bu tür deformasyonları izlemek için fotogrametri ve yersel lazer tarama gibi modern ölçme teknolojilerinin kullanılmasının geleneksel yöntemlerden daha iyi doğruluk ve güvenilirlik sergilediğini göstermiştir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi yerinde denetimlere alternatif olabilecek olan fotogrametri gibi fotoğraf tabanlı yöntemlerin uygulanması için en önemli aşama yapının fotoğraflarının çekilmesidir. Çekilen fotoğrafların kalitesi ve çözünürlüğü elde edilecek modelin kalitesini artıracak olup sonuç ürünün doğruluğunu etkileyecektir. Yapı hakkında fotoğraf verisi toplamanın birçok avantajı olsa da özellikle erişimin zor olduğu (köprü ve ulaşılması zor olan tarihi yapılar) ve trafik engelleri olan alanlarda manuel fotoğraf edinimi zorluk teşkil etmektedir (Yu ve Nishio 2022). Bu zorlukları aşmak için örneğin yüksek ayaklı veya nehirlerin üzerinden geçen ve yaklaşması zor olan köprüler, fiziksel temasın yapısal hasara sebep olacak kültürel miras yapıları, erişilmesi zor olan kayalık yapıları veya insan hayatını riske atan maden ocaklarında profesyonellerin ayrıntılı denetimler gerçekleştirmek üzere çeşitli platformlu büyük denetim araçları veya merdivenler gibi ekipmanlar kullanması gerekmektedir. Bu tür denetimler teknik açıdan karmaşık ve zor olması profesyoneller için iş risklerini artırmaktadır (Hallermann vd. 2014). Ayrıca oldukça yüksek veya geniş yapılar için denetim araçları yapısal denetimler

için uygun değildir. Geleneksel yapısal inceleme operasyonları sırasında denetçilerin yapı çatlaklarının uzunluğunu ve genişliğini ölçmek için bir cetvel kullanması gerekir. Bu durumda mesafe arttıkça net bir fotoğraf almak zorlaşmaktadır (Liu vd. 2020). Denetçi ile incelenen yüzey arasındaki mesafe bundan daha büyükse denetçiler yapı çatlaklarını ölçemez; sadece çatlakların fotoğraflarını alabilirler. Mesafe 6 m'den fazla ise net bir fotoğraf almak ve bunu insan gözüyle tanımak zordur (Cha vd. 2017; Dan ve Dan 2021). Bu, yapısal denetimlerden elde edilen verilerin tamlığını ve doğruluğunu etkilemektedir (Ellenberg vd. 2016; Kao vd. 2022). Tüm bunlara rağmen yapısal denetimler ile ilgili görevler için görsel denetimler gerekli olmasına rağmen bu denetimlerin birçok dezavantajı vardır (Praticò vd. 2020). Bu nedenle, İHA'lar geliştirilmesini takiben, araştırmacılar ve profesyoneller, yapısal denetimlerde görsel olarak incelenmesiyle ilgili sorunların üstesinden gelmek için İHA'ları dijital fotoğraf işleme teknolojisiyle birleştirmenin fizibilitesini araştırdılar (Eschmann vd. 2013).

İHA'lar yapılardaki yüzey çatlaklarının fotoğraflarını daha yakın mesafeden çekebilmekte ve bu da ilgili personelin çatlakları daha doğru bir şekilde tespit etmesine olanak sağlamaktadır (Kao vd. 2022). İHA'lar aracılığıyla gerçekleşen yapısal denetim, geleneksel yapı inceleme yöntemlerine göre daha ucuz, güvenli ve esnek bir şekilde yapılabilmektedir (Jung 2019). Örneğin, Ayele vd. (2020) tarafından, hasar tespiti ve analizi için derin öğrenme tabanlı veri analitiği ile İHA fotoğraf verilerini işleyerek yapısal hasar performans değerlendirmesi başarılı olarak aktarılmıştır. Önerilen yöntem, yapısal denetim süreçlerini hızlandırarak ve maliyetleri düşürerek yapısal hasarların tespitinde önemli bir katkı sağlamaktadır. Levine vd. (2022) İHA fotoğrafı, bileşen tanımlama ve hasar değerlendirmesi ile deprem sonrası bina değerlendirmesi için bir Dİ çerçevesi önerse de çekilen hava fotoğraflarının sayısının optimum seviyede olması çalışma sonunda aktarılmıştır.

Levine vd. (2022)'nin aktardığı gibi yapısal denetimler sırasında İHA'lar ile elde edilen hava fotoğraflarının sayısı oldukça fazladır. Bu nedenle, fotoğraflardan çatlak bilgisini etkili bir şekilde çıkarmak için bilim adamları çeşitli fotoğraf işleme tekniklerinin kullanılmasını önerdiler (Mohan ve Poobal 2018; Zhang vd. 2020; Ding vd. 2023). Her yöntemin çatlak tespitinde avantajları olmasına rağmen fotoğraftaki çatlakların boyutu,

görüntü alma mesafesi hakkında herhangi bir bilgi verilmeden piksel biriminde verilmektedir. Bu nedenle çatlakların metrik boyutunu hesaplamak imkansızdır (Kim vd. 2023). Sonuç olarak, bazı bilim adamları fotoğraf çekim mesafelerini doğrudan elde etmek için mesafe bulma ekipmanı kullanmaya çalıştılar. Örneğin Zhong vd. (2022) köprü denetiminde kullandıkları İHA'da nesne mesafelerini ve piksel çözünürlüklerini ölçmek için İHA kamerasına takılı bir lazer mesafe bulucu kullanmışlardır. Tian vd. (2019), bir kamera ve bir lazer mesafe bulucuyla donatılmış bir veri toplama sistemi üzerinde çalıştılar ve sistemi, çatlaklı beton kirişler üzerinde laboratuvar testleri yapmak için kullandılar. Çekilen fotoğraflardan ilk olarak çatlaklar tanımlandı daha sonra hesaplaması optik üçgen benzerlik teorisine dayanan ve piksel boyutunun metrik sistem birimlerine dönüştürülmesini içeren nesne mesafesi yöntemi, metrik sistem birimlerindeki çatlak boyutunu hesaplamak için kullanıldı. Sonuçlar, sistemin genişliği 0,1 mm'den büyük olan çatlakları ölçmedeki doğruluğunu doğruladı ve çatlak uzunluğu ölçümünde %92'lik bir doğruluk ortaya çıkardı (Tian vd. 2019). Bu yaklaşımlar olumlu sonuçlar verse de fotoğraf çekim mesafesini elde etmek için yalnızca bir mesafe sensörü kullanılmaktadır. Dolayısıyla kameraların hedeflere dik olduğu varsayıldığında, çatlakların eğik olması durumunda ölçüm hataları meydana gelmekte ve bu da yaklaşımı pratik olmaktan çıkarmaktadır.

Her ne kadar İHA'lardan elde edilen fotoğraflar ile fotogrametrik ürünler kültürel miras, modern ve diğer yapı yapılarında yapısal denetimde avantaj sağlasa da elde edilen sonuçların sürekli güncellenerek denetimlerin çeşitlilik kazanması gerekmektedir (Ding vd. 2023). Bu noktada da denetimlerin çeşitlenmesi amacıyla İHA'dan elde edilen fotoğraflarla üretilen fotogrametrik 3B modeller ile çatlakların tespiti ile bir bütün halde oluşturulan 3B modellerin Dİ'lere altlık olarak kullanılmasında umut verici sonuçlar alınmaktadır (Zhang vd. 2020; Ding vd. 2023). Örnek çalışmalara bakıldığında, fotogrametri yöntemi ile üretilen fotorealistik Dİ'ler ile yapısal analizlerin amacı bir nesnenin hizmet ömrü boyunca izlenmesi için otomatik hasar değerlendirmelerine doğru ilerlemektir. Bu metodolojinin bir denetim sırasında toplanan bilgileri daha verimli bir şekilde belgeleyeceğini, nesnelliği artıracak ve operasyon süresini kısaltacağı bilinmektedir (Pantoja-Rosero vd. 2023a). Fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B model ile otomatik tespit edilen hasarların entegrasyonundan oluşan hasarla artırılmış Dİ'ler,

sayısal yöntemler kullanılarak mekanik analiz gibi daha derinlemesine hasar değerlendirme faaliyetleri için yararlı olabilmektedir (Zhai vd. 2024). Bu amaç doğrultusunda çatlakları olan bir yapı nesnesinin 3B yeniden yapılandırılmış geometrisini ve bunların karakterizasyonunun entegrasyonun getirdiği avantajların yerinde yapı denetimlerine alternatif olması büyük avantajlar sağlamaktadır (Milanoski vd. 2023). Sonuç olarak yapısal denetimler için yapılarda meydana gelen çatlakların otomatik tespiti ile belirlenen vektör veriler ile fotorealistik 3B modellerin bütünleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan HADİ model daha sonra mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında yapı ömrünün denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için denetim uygulamalarda kullanılabilirliktedir.

2.2.1 Kültürel Miras Yapılarında Dijital İkiz ile Yapısal Denetim

Kültürel miras, belirli bir toplumun veya grubun bir nesilden diğerine aktarılan somut ve somut olmayan miraslarından oluşmaktadır (Mortara ve Catalano 2018). Kültürel miras alanları, doğal ve insani faktörlerden kaynaklanan önemli hasar veya yıkım riskleriyle karşı karşıyadır (Bevilacqua vd. 2022). Uzun süreli kullanım ve yağmur, sel, güneş ışığı, nem, deprem ve şiddetli rüzgâr gibi unsurlara maruz kalma, birçok tarihi alanda yapısal bozulmaya neden olabilmektedir (Kong ve Hucks 2023; Haibt 2024). Bu eser ve alanlar güvenliklerini tehdit eden askeri çatışmalar gibi insan faaliyetleri nedeniyle de tehlike altındadır. Bu nedenle, restorasyon projelerini mümkün kılmak ve bu değerleri gelecek nesillere aktarmak için belgelenmesi, korunması ve kaydedilmesi zorunludur. Kültürel mirasın değerlendirilmesi için, fiziksel durumun ve kültürel öneminin objektif olarak değerlendirilmesi ve ardından korunması ve muhafaza edilmesi için uygun önlemlerin belirlenmesi gerekmektedir (Jagielska-Burduk 2022).

Kong ve Hucks (2023) tarihi binaların ve kültürel miras eser ve alanlarının bozulmasını ekonomik ve uygun maliyetli bir şekilde değerlendirmek için acilen esnek metodolojilere ihtiyaç duyulduğunu aktarmıştır. Kültürel miras alanının veya nesnesinin fiziksel durumuna ilişkin bir görsel değerlendirme, inceleme sürecini başlatmaktadır (Peña vd. 2023). Bu değerlendirme, yapısal sağlamlığın değerlendirilmesini, herhangi bir zarar

veya bozulma belirtisinin tespit edilmesini ve analiz edilmesini içerir. Kültürel miras alanının veya nesnesinin tarihsel geçmişi, belirli bir grubun veya toplumun kültürel kimliği üzerindeki etkisi ve küresel tarihteki konumu göz önünde bulundurularak analiz edilmesini gerektirir. Kültürel mirasın incelenmesi ve denetlenmesi, bu tür kültürel hazinelerin gelecek nesiller için korunması ve muhafaza edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Awobamise ve Aderibigbe 2018). Bu alanlara ve nesnelere hak ettikleri saygı ve özen gösterilmeli, kültürel ve tarihi önemleri herkes tarafından tanınmalı ve takdir edilmelidir (Vitiello vd. 2022).

Uzmanlar, miras alanlarını ve eserleri dikkatle değerlendirerek bunları korumanın en etkili yolunu belirleyebilir ve önemli kültürel mirasın kaybolmasını önleyebilir. Kültürel miras toplumsal bir varlıktır ve onu korumak ve muhafaza etmek kolektif bir sorumluluktur (Jagielska-Burduk 2022; Peña vd. 2023). Yalnızca uzmanlar ve profesyoneller değil, tüm taraflar koruma girişimlerini destekleyerek, korunmasını savunarak ve önemini kabul ederek kültürel mirasın korunmasına katkıda bulunabilir. Arkeoloji, mimari, tarih ve antropoloji uzmanları bu görevi rutin olarak yerine getirmektedir (Macdonald ve Gonçalves 2020). Uzun yıllardır bu görev yerinde insan denetimi ile tarihi binaların yapısal güvenliğini değerlendirmek için en yaygın yaklaşım olmuştur (Gattulli vd, 2016). Bu yerinde denetimler sayesinde çatlama, beton dökülmesi ve aşırı deformasyonlar gibi yapısal hasarlar gözlemlenebilmektedir (Ying vd. 2022). Ancak, yapısal özelliklerin karmaşıklığı nedeniyle insan eliyle yerinde inceleme genellikle zaman alıcıdır ve uzmanlık gerektirir (Zhou ve Song 2020). Bu nedenle araştırmacılar uzaktan algılama sensörlerini kullanarak tarihi yapıların durumunu değerlendirmek için gelişmiş teknolojileri benimsemişlerdir (Stepinac vd. 2022). Bu tür algılama teknolojileri ile sayısallaştırılan bilgilerden yapılabilecek ölçümler ve gözlemler tarihi yapıların restorasyon sürecine yardımcı olmaktadır (Yu ve Nishio 2022).

Örneğin, Barazzetti vd. (2015), tarihi bina bilgi modellemesi biçiminde Dİ'ler oluşturmak için fotogrametrik bir prosedür tanımladılar. Hoskere vd. (2018), derin öğrenme modelleri tarafından tespit edilen ve fotogrametrik 3B model kullanılarak kusurlara sahip dokulu bir 3B tarihi bina modeli içeren yapı modelleri sundular. Yöntemleri, hasar değerlendirme belgeleri için yararlı bir başlangıç noktası olsa da yalnızca tek bir binada

test edildi, fakat çalışmada hasar karakterize edilmedi. Jouan vd. (2020) miras yerlerinin önleyici korumasını desteklemek için tarihi bina bilgi modelleri Dİ olarak kullandılar. Angjeliu vd. (2020), yığma binaların yapısal sisteminin bütünlüğünü incelemek ve önleyici bakım ve olası güçlendirme müdahaleleri dâhil olmak üzere sistem tepkisini spesifik olarak analiz etmek için Dİ tercih etmişlerdir. Lo Brutto vd. (2021), kültürel miras alanlarında Dİ sürecinin bir parçası olarak kapsamlı bir 3B araştırma gerçekleştirerek, 3B model süreci aşamasından önce tüm geometrik ayrıntıların belirlenmesi gerektiğini aktarmıştır. Lo Brutto vd. (2021), bunu başarmanın en kolay yolunun fotogrametri gibi modern tekniklerle üretilen 3B Dİ'nin kullanılması olduğunu belirtmiştir. Bu dijital model, koruma, araştırma, restorasyon ve sanal turizm dahil olmak üzere çok sayıda amaç için kullanılabilir (Barrile vd. 2022). Modern ölçme yöntemleri ile belirlenen ve dijital olarak çoğaltılan yapıların 3B modellerini analiz etmenin ve incelemenin birçok avantajı vardır (Hosamo ve Hosamo 2022). Jouan ve Hallot (2020), miras alanlarının önleyici korumasını desteklemek için kültürel miras eserlerinde yapısal denetim için Dİ modeller uygulamıştır ve avantajlarından bahsetmiştir. (Fawzy vd. (2023) ve Pantoja-Rosero vd. (2023a), fotogrametrik modeller kullanılarak tespit edilen çatlakların bütünleştirilmesi ile oluşturulan 3B Dİ'lerin, kültürel miras binaları da dâhil olmak üzere yapısal çatlakların belirlenmesi ve yerlerinin tespit edilmesi için çok önemli olduğunu aktarmışlardır.

2.2.2 Köprü Yapılarında Dijital İkiz ile Yapısal Denetim

Günümüzde modern yapı sistemleri düzenli olarak yapısal yönetmeliğe göre sorumlu mühendisler tarafından görsel olarak yerinde denetlenmektedir (Masciotta vd. 2017). Bir inceleme sırasında mühendisler, yapısal bileşenlerdeki hasarları görsel olarak belirlemeye çalışır ve ardından bu yapının yapısal mevcut durumunu belirlemeye çalışmaktadır (De Stefano vd. 2016). Özellikle çatlaklar, beton veya duvar gibi kırılabilir yapılarda en sık gözlemlenen hasar şeklidir ve bu da çatlakları yapısal denetimde çok önemli hale getirmektedir (Latifi vd. 2023). Bu yüzden çatlakların sürekli olarak denetlenmesi gerekmekte olup bu süreç uzun yıllardır geleneksel yöntemlerle yapılmaktadır. Fakat geleneksel yapı denetimlerinin başlıca sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle nesnellikten yoksun olması, uzun uygulama süresi, önemli maliyetler ve zararları

belgelemenin zorluğu öne çıkan sınırlamalardandır. Geleneksel denetim sistemlerindeki bu sınırlamalar nedeniyle, yapay zekâ teknolojilerine dayalı yapı denetimi ve teşhisi, tahribatsız muayene, hasar tespiti ve teşhisi, çatlak tespiti, köprü dinamiği ve statik yük değerlendirmelerine yönelik uygulamalarla geniş çapta incelenmelidir. Bu tez çalışmasında modern yapı olarak betonarme yapılar baz alınmıştır. Literatür incelendiğinde modern yapılardan köprüler üzerinde son dönemlerde oldukça fazla çalışma olmasından dolayı bu kısım köprü özelinde daha fazla incelenecektir.

Köprü özelinde çalışmasının önemli sebebi, Amerikan İnşaat Mühendisliği Derneği'nde yayınlanan rapor verileri gösterilebilir. Rapora göre, köprülerin kullanım ömrü boyunca bir noktada rehabilitasyona ve servise ihtiyacı olmaktadır. Özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin neredeyse tamamında köprüler ya uzun yıllardır kullanılmakta ya da kullanılmak zorunda kalmaktadır. Örnek olarak Amerikan köprülerinin yaklaşık %40'ının 50 yaşın üzerinde olduğunu ve bunların %13.6'sının işlevsel olduğu raporda gösterilmiştir (Walpole 2021). Aynı zamanda küresel olarak Avustralya, Birleşik Krallık, Norveç ve çoğu Avrupa ülkesinde de köprülerin uzun yıllardır kullanılması köprü denetimleri önemli hale getirmektedir (Antoniou ve Marinelli 2020). Türkiye gibi gelişmekte olan ve maddi olarak altyapı hizmetlerin yapım maliyetinin fazla olması bu yapıların uzun yıllar kullanımını gerektirmektedir. Bu yüzden Türkiye özelinde de yeni yapılan modern köprülerin denetimlerinde alternatif yöntemler gerekmektedir.

Köprüler, karayolu ağ sisteminin en hassas ve kritik bileşenleri arasındadır ve bunların kapsamlı bir şekilde denetlenmesi ve bakımının yapılması gerekir (Ren vd. 2019). Köprü gibi altyapıların hizmet ömrü arttıkça çürüme ve bozulmadan kaynaklanan çeşitli derecelerde güvenlik risklerine maruz kalır. Bu tür bir altyapının güvenliğini belirlemek ve sürdürmek için düzenli denetim yapılması gerekir. Bu hayati yapılar sıklıkla engebeli bir arazide veya ulaşılması zor yerlerde inşa edilir (Parke ve Disney 2005). Sonuç olarak, etkili bir denetim prosedürünün ve düzenli bir bakım/rehabilitasyon stratejisinin uygulamaya konulması hayati önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu aşırı harcamalar, uygun maliyetli denetim ve izleme yöntemleri ve varlık yönetimi ile önemli ölçüde azaltılabilir (Ren vd. 2019). İnşaat sektörü, üretkenlik, araştırma ve geliştirme eksikliği ve teknolojik ilerlemenin zayıf olması nedeniyle dijitalleşmeye ve yeni teknolojiye ihtiyaç

duymaktadır. İnşaat sektörünün en az dijitalleşen ve özellikle dijital teknolojilerde inovasyon konusunda yavaş olan sektör olduğu raporlarda belirtilmektedir (Opoku vd. 2021). Çatlaklar, her türlü yapıda önemli bir sorundur ve yapısal bütünlüğü tehdit etmektedir. Bu nedenle, çatlak tespiti ve izleme, binalar, köprüler, barajlar, tüneller ve diğer altyapı unsurlarının güvenliğini ve bütünlüğünü korumaya yardımcı olabildiği gibi çeşitli yapılarda hayati önem taşımaktadır. Erken aşamada tespit edilen çatlaklar, onarım işlemlerinin daha düşük maliyetle gerçekleştirilmesini sağlayarak hem büyük hasarların önüne geçilmesinde hem de zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlamaktadır.

Mongelli vd. (2017), İtalya'daki "Bridge of the Towers" köprüsünün fotogrametrik 3B modelleme ile yapısal sağlığı değerlendirmek için İHA kullanmıştır. Çalışma da büyük miktarda yüksek çözünürlüklü fotoğraf analiz edilmiştir. Fotogrametrik tarama ve sonlu eleman modelleme teknikleri kullanılarak köprünün çatlak deseni ve yapısal durumu değerlendirilmiştir. Shim vd. (2019), ön gerilmeli beton köprülerin bakım süreçlerini optimize etmek için 3B Dİ model konseptine dayalı bir köprü bakım sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Yazarlar, mevcut köprülerin bakımında eksiklikler olduğunu ve bu nedenle yeni bir yaklaşımın gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma, bir veri yönetim sistemi ve bir fotoğraf işleme sistemi içeren bir paralel çözüm önermektedir. Shim vd. (2019), köprülere ait Dİ'lerin tüm yaşam döngüsü boyunca tasarım, inşaat, işletme ve bakım aşamalarında sürekli veri alışverişi ve güncellemelerle bilgi yönetimi sağladığını aktarmışlardır. Çalışma sonunda ön gerilmeli beton köprülerin bakım süreçlerinde Dİ modelinin kullanımının, stratejileri geliştirmede ve yapısal sürdürülebilirliği sağlamada önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir. Bu yaklaşım, mevcut köprülerin bakım maliyetlerini azaltmak ve uzun vadeli güvenliğini artırmak için etkili bir çözüm sunmaktadır. Ayele vd. (2020), İHA kullanılarak yapısal denetimde otomatik çatlak segmentasyonu yöntemini incelemektedir. Geleneksel yapısal denetim yöntemlerinin zaman alıcı ve maliyetli olması nedeniyle, İHA'ların kullanımı zaman ve maliyet açısından avantajlar sunduğu çalışmada sıklıkla vurgulanmaktadır. Çalışmada, yapıların mevcut durumunu analiz etmek için büyük veri kullanımının gerekliliği olduğu ve bu veriler ile yapı elemanlarının kalıcı geometrik kaydını tutmak için 3B modeller oluşturulması gerekliliği aktarılmıştır.

Liu vd. (2020), çalışmalarında İHA ile çekilen fotoğraflardan 3B sahne yeniden inşası kullanarak köprü ayaklarının fotoğraf tabanlı çatlak değerlendirmesi için yeni bir yöntem sunmaktadır. Yöntem hem perspektif bozulmasını hem de düz olmayan yapısal yüzeylerdeki geometrik bozulmayı düzeltebilir ve çatlak lokalizasyonunu gerçekleştirebilmektedir. Saha testi sonuçları, önerilen yöntemin gerçek bir köprü ayağının çatlak değerlendirmesinde etkili ve doğru olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak yöntem, köprülerin ve diğer altyapıların durum değerlendirmesi için yeni ve potansiyel olarak güçlü bir yöntem olarak belirlenmiştir. Kaewunruen vd. (2021), köprü model kurulumu, bilgi toplama ve paylaşımı, veri işleme, denetim ve bakım planlamasında Dİ'lerin kullanımını vurgulamaktadır. Çalışma sonunda 3B Dİ, köprülerin tüm yaşam döngüsü boyunca daha etkili bilgi platformları sunarak, "Dijital ikizler + köprü risk denetim modeli" entegrasyonu, köprülerin güvenliğini ve sürdürülebilirliğini artırdığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, 3B Dİ'lerin sürdürülebilirlik ve savunmasızlık değerlendirmelerinde yenilikçi uygulamalarını ve köprülerin güvenli ve etkili bir şekilde yönetilmesi için potansiyel faydalarını göstermektedir.

Yoon vd. (2022) çalışmalarında köprülerin yapısal sağlık izlemesi için derin öğrenme tabanlı geometrik bir çerçeve sundular. Çalışmada ilk dikkat çekilen nokta, köprülerin güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak amacıyla 3B modelleme ve Dİ teknolojilerinin nasıl entegre edileceğini önemi olmuştur. Çalışmada, köprülerin yapısal sağlık izlemesi için makine öğrenimi algoritmalarının ve derin öğrenme modellerinin kullanımı incelenmiştir. 3B verilerinin segmentasyonu ve bileşenlerin otomatik olarak tanımlanması için çeşitli yöntemler de aktarılmıştır. Bu çalışma sonuç olarak, Dİ'lerin ve derin öğrenme tekniklerinin entegrasyonu ile köprülerin yapısal sağlık izlemesinde yenilikçi ve etkili bir yaklaşım sunduğuna dikkat çekmektedir. Gelecek çalışmalar için bu yöntemlerin, köprülerin güvenliğini artırmak ve bakım süreçlerini optimize etmek için kullanılabileceği aktarılmıştır. Kaewunruen vd. (2021), Dİ'lerin köprü altyapılarının savunmasızlık değerlendirmesi ve risk tabanlı bakım planlaması üzerindeki uygulamalarını incelemektedir. Zhejiang Eyaleti'ndeki Zhongcheng Village Köprüsü örnek olarak alınmıştır.

2.2.3 Kaya Kütlesi ve Maden Ocağında Dijital İkiz ile Yapısal Denetim

Kaya kütlelerinde meydana gelen çatlakların sel ve diğer doğal afetlere karşı direncini zayıflamasından dolayı incelenmesi gereken diğer yapı unsurlarındandır. Buna ek olarak büyük ekonomik kazançlar elde edilen özellikle açık mermer maden ocaklarında cevher kısmında meydana gelen çatlakların tespiti, düzgün yapılı cevher üretimine katkı sunacağı gibi ocakta meydana gelebilecek potansiyel can ve mal kayıplarının önüne geçilmesine katkı sunmaktadır. Bu ve benzeri yapılarda düzenli çatlak tespiti ve onarımı, can ve mal kaybını önlemede, bakım maliyetlerini azaltmada, kullanım ömrünü uzatmaya yardımcı olmaktadır.

Kaya yapıları ve mermer maden ocaklarında çatlak tespiti, bu yapıların yapısal güvenliği, verimliliği ve çevresel etkileri açısından son derece önemlidir (Özçelik 2023). Çatlaklar, kaya kütlelerinin zayıflamasına ve çökmesine neden olarak can ve mal kaybına yol açabilir (Yue vd. 2022). Bu nedenle, çatlakların erken tespiti ve izlenmesi bu riskleri azaltmak için hayati önem taşımaktadır. Kaya yapılarında çatlaklar, yapının dayanıklılığını ve stabilitesini olumsuz etkilemekte olup bu durum özellikle dağ geçitleri, tüneller ve şevler gibi yapılarda büyük riskler oluşturmaktadır (Yakar vd. 2023). Çatlaklar, kaya kütlelerinin zayıflamasına neden olarak kaya düşmeleri ve kaymalarına yol açabilmektedir (Gischig vd. 2016). Kaya yapılarında çatlak tespiti için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Uzun zamandır en sık kullanılan yöntem, jeoteknik mühendisler tarafından kaya yapılarının görsel olarak incelenmesi ile çatlakların tespiti ve analizi sonucu kaya kütlelerinin genel stabilitesini değerlendirilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Demirbilek 2019). Bu değerlendirmeler, inşaat projelerinde güvenli ve ekonomik tasarımlar yapılmasında önemli bir adım olmaktadır (Yue vd. 2022). Kayalarda zaman içinde meydana gelen sismik aktiviteler yeni çatlakların oluşmasına veya mevcut çatlakların genişlemesine neden olabilir. Bu durumda kaya yapısının altındaki çatlakları tespit etmek için yeraltı radar dalgaları kullanılarak sismik görüntüleme ve analizler ile kaya yapısının titreşimi analiz edilerek çatlakların yeri ve boyutu belirlenebilir. Kaya kütlelerinde çatlak tespitinde kullanılan diğer bir yöntem ise kaya yapısından gelen ses dalgaları analiz edilerek akustik emisyon ile çatlakların oluşumu izlenebilmektedir.

Maden ocaklarında çatlakları erken tespit etmek ve onarmak, mermer maden ocaklarının çökmesini önlemeye ve can ve mal kaybını azaltmaya yardımcı olabilmektedir (Esmailzadeh vd. 2022). Çatlakları erken tespit etmek ve onarmak, mermer bloklarının hasar görmesini önlemeye ve üretim verimliliğini artırmaya yardımcı olabildiği gibi mermer maden ocaklarında çalışan kişilerin güvenliğini artırmaya yardımcı olabilmektedir (Nayak vd. 2022). Özellikle çatlaklı mermer blokları, işleme sırasında kırılabilir veya estetik kusurlar oluşturabilir. Çatlakların tespit edilmesi, düşük kaliteli veya kusurlu mermer bloklarının işlenmesini önler, böylece ekonomik kayıplar minimize edilir (Gazi vd. 2012; Esmailzadeh vd. 2022). Mermer ocaklarında çatlaklar, ocak sahasında çökme risklerine yol açabilir ve çalışan işçilerin güvenliğini tehdit edebilir. Maden ocaklarında çatlakların düzenli olarak izlenmesi ve kontrol edilmesi, çevresel etkilerin minimize edilmesine ve işçi güvenliğinin sağlanmasına yardımcı olur (Kaygusuz 2019). Mermer ocaklarında çatlak tespiti, kaya yapılarına benzer şekilde yapılmaktadır. Ancak, mermerin özel yapısından dolayı bazı ek yöntemler de kullanılabilmesi gerekli olduğu durumlar olmaktadır. Maden ocaklarında ilk ve en temel yöntemlerden biri, görsel muayenedir. Deneyimli teknisyenler veya mühendisler, çatlakları görsel olarak tespit eder ve belgeler (Dentoni ve Massacci 2013). Diğer bir yöntem olan ultrasonik testler, malzemelerin iç yapısını incelemek için yüksek frekanslı ses dalgaları kullanır. Bu yöntem, çatlakların iç derinliğini ve boyutunu belirlemede etkilidir. Mermer ocaklarında, blokların kalitesini değerlendirmek için sıklıkla kullanılsa da pahalı bir yöntemdir. Kaya kütlelerinde olduğu gibi maden ocaklarında sismik dalgalar kullanılarak yapılan testler özellikle geniş alanların taranmasında etkilidir.

2.3 Yapısal Denetimlerde Çatlak Tespiti

Yapısal çatlakların belirlenmesi ve değerlendirilmesi, binaların güvenliği ve sağlamlığı açısından büyük önem taşımaktadır (Mohan ve Poobal 2018). Çatlaklar, yapısal mukavemetin azalmasına ve bir binanın muhtemel çöküşüne neden olabilecek önemli hasar belirtileridir (Savoia vd. 2017). Çatlakların hassas bir şekilde belirlenmesi ve incelenmesi, binaların mevcut durumunun değerlendirilmesi ve gelecekteki potansiyel zararın tahmin edilmesi için çok önemlidir (Rainieri vd. 2022). Çatlakların tespiti, hasarın boyutunu ve ciddiyetini belirlemek için büyük önem taşımakta olup çatlakların doğru

haritalanması ve analizi, onarım ve güçlendirme çalışmalarının etkili bir şekilde planlanması için gereklidir (Yu vd. 2019). Özellikle beton, çelik ve diğer inşaat malzemelerinde çatlakların varlığı, mukavemette azalma ve yorulmanın başladığının göstergesidir (Yu ve Nishio 2022). Yapıların taşıyıcı elemanlarında çatlakların oluşması, binanın taşıma kapasitesini ve genel stabilitesini azaltarak yapısal güvenliği tehlikeye atmaktadır (Yao vd. 2014). Duvarlar, kirişler ve kolonlardaki çatlaklar binanın yük taşıma kapasitesini azaltarak potansiyel olarak çökmesine neden olabilir. Bunlara ek olarak çatlaklar su girişini kolaylaştırarak yapısal bileşenlerin korozyona uğramasına da sebep olmaktadır (Stepinac vd. 2022). Bu süreç, beton ve çelik gibi malzemelerin bozulmasına ve dolayısıyla mukavemetlerinin azalmasına yol açar. Korozyon, çatlakların büyümesine ve hasarın daha da kötüleşmesine neden olarak zararlı bir döngü yaratabilir (Zhang ve Zhao, 2019). Dahası, çatlaklar yapının estetik görünümünü bozabileceğinden görsel olarak da rahatsız edici olabilir (Zollini vd. 2020; Mandirola vd. 2022). Özellikle yapıların dış cephesinde görülen çatlaklar, binanın genel değerinin düşmesine ve ömrünün daha hızlı kılmasına yol açabilir. Çatlaklar; tarihi, sanatsal ve modern öneme sahip binalar üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir (Feilden 2007; Panella vd. 2022). Sadece yapının yapısal bütünlüğünü tehlikeye atmakla kalmaz aynı zamanda estetik ve pratik yönlerini de azaltırlar.

Çatlaklar, yapısal elemanlarda farklı şekillerde ve boyutlarda oluşabilen hasarlardır (Arslan 2022). En yaygın çatlak türleri şunlardır:

- Büzülme Çatlakları: Kuruyan betonun büzülmesi ile duvarlarda, kirişlerde ve kolonlarda meydana gelen çatlaklara denir.
- Gerilme Çatlakları: Aşırı yük veya zayıf tasarım nedeniyle yapısal elemanlarda aşırı gerilme ile oluşan çatlaklara denir.
- Yorulma Çatlakları: Tekrarlayan yüklemeler ile zamanla yapısal elemanlarda meydana gelen yorulmalar sonucu oluşan çatlak türüdür.
- Korozyon Çatlakları: Betonarme yapılarda çelik donatıların korozyonu sebebiyle meydana gelen çatlaklara denir.
- Kimyasal Çatlaklar: Sülfatlar ve klorürler gibi agresif kimyasallara maruz kalma sonucu betonda meydana gelen çatlak türüdür (Erçolak 2021; Al-Dhabyani 2022; Yavuz ve Küçükömeroğlu 2022; Üncü vd. 2023).

Çatlakların zamanında tespit edilmemesi ve onarılmaması gelecekte daha büyük hasarlara ve daha yüksek maliyetlere yol açabilir (Zollini vd. 2020). Bu nedenle, çatlakların erken teşhisi ve onarımı, binanın uzun ömürlü ve güvenli kalmasını sağlamak için önemlidir. Yapısal denetimlerde çatlakların tespiti için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Mandirola vd. 2022). Çatlakların boyutunu, yayılımını ve ciddiyetini belirlemek için en yaygın kullanılan yöntemler şunlardır:

- Görsel denetim, en temel ve yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Çatlaklar, deneyimli bir mühendis tarafından çıplak gözle veya büyüteç kullanılarak tespit edilebilir. Bu yöntemde, yapı elemanları gözle incelenir ve çatlakların varlığı, boyutu ve konumu kaydedilir. Görsel denetim, basit ve düşük maliyetli bir yöntem olmasına rağmen, sadece yüzeydeki çatlakları tespit edebilir ve derin çatlakların tespiti için yeterli olmayabilir.
- Termal görüntüleme, yapı elemanlarının yüzey sıcaklıklarını ölçerek çatlakları tespit eden bir yöntemdir. Çatlaklar, yüzey sıcaklığında anormalliklere neden olabilir ve termal kameralar bu farklılıkları tespit edebilir. Termografi, betonarme yapıların ve diğer malzemelerin iç yapısında meydana gelen çatlakları tespit etmek için kullanılır.
- Ultrasonik test, yüksek frekanslı ses dalgaları kullanarak yapı elemanlarındaki çatlakları tespit eden bir yöntemdir. Ses dalgaları, yapı elemanları boyunca ilerler ve çatlaklar gibi anormallikler karşısında geri yansır. Yansıyan ses dalgaları analiz edilerek çatlakların varlığı, boyutu ve konumu belirlenir. Ultrasonik test, betonarme ve metal yapı elemanlarında yaygın olarak kullanılır.
- Manyetik parçacık testi, ferromanyetik malzemelerdeki yüzey ve yüzeye yakın çatlakları tespit etmek için kullanılır. Bu yöntemde, manyetik alan uygulanarak çatlaklar boyunca manyetik akı sızıntısı oluşturulur. Çatlakların bulunduğu bölgelere manyetik parçacıklar serpilir ve manyetik akı sızıntısı bölgelerinde toplanarak çatlakların görünür hale gelmesini sağlar.
- Radyografik test, X-ışınları veya gama ışınları kullanarak yapı elemanlarının iç yapısını görüntüleyen bir yöntemdir. Çatlaklar, yapı elemanlarının içinden geçen radyasyonun yoğunluğunu değiştirir ve bu değişiklikler dijital dedektörler üzerinde görüntülenir. Radyografik test, özellikle metal ve kalın beton elemanlarda çatlak tespiti için kullanılır.

- Akustik emisyon testi, yapı elemanlarındaki çatlakların oluşumu ve ilerlemesi sırasında yayılan ses dalgalarını tespit eden bir yöntemdir. Bu yöntemde, yapı elemanlarına yerleştirilen sensörler, çatlaklar tarafından üretilen akustik sinyalleri algılar ve analiz eder. Akustik emisyon testi, özellikle dinamik yükleme altında çatlak tespiti için kullanılır.
- Lazer tarama, yapı elemanlarının yüzeyinin hassas bir şekilde haritalanmasını sağlayan bir yöntemdir. Lazer tarayıcılar, yapı yüzeyindeki çatlakları ve diğer anormallikleri yüksek hassasiyetle tespit eder. Bu yöntem, özellikle büyük ve karmaşık yapıların çatlak tespitinde etkilidir.
- Fotogrametri, yapı elemanlarının yüksek çözünürlüklü fotoğraflarını çekerek 3B modeller oluşturma yöntemidir. Bu yöntem, çatlakların detaylı bir şekilde haritalanmasına ve dijital ortamda analiz edilmesine olanak tanır. Fotogrametri, özellikle büyük ve karmaşık yapıların çatlak tespitinde etkilidir.
- Dijital görüntü korelasyonu, yapı elemanlarının yüzeyindeki deformasyonları ve çatlakları tespit eden bir yöntemdir. Bu yöntemde, yapı elemanlarının öncesi ve sonrası fotoğrafları karşılaştırılarak çatlakların ve deformasyonların haritası çıkarılır (Rainieri vd. 2022; Stepinac vd. 2022; Yu ve Nishio 2022).

Yapısal denetimlerde çatlak tespiti için kullanılan yöntemler, yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Munawar vd. 2021). Her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunmakta olup genellikle birden fazla yöntem birlikte kullanılarak daha kapsamlı ve doğru sonuçlar elde edilmektedir (Yu vd. 2019; Savoia vd. 2017). Çatlakların erken teşhisi, analizi ve onarımı, yapıların uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için vazgeçilmez bir süreçtir (Mohan ve Poobal 2018; Rainieri vd. 2022). Bu nedenle, yerinde görsel yapısal denetimlerde çatlak tespiti ve analizine alternatif olarak özellikle büyük ve karmaşık yapıların çatlak tespitinde dijital ortamda alternatif bir çözüm sunan HADİ'ler bu süreci daha da kolaylaştırabilir. Angjeliu vd. (2020) çalışmalarında yapı hasarı ve analizleri değerlendirmek için yapılan yerinde görsel incelemeler külfetli, zaman alıcı, subjektif ve belgelenmesinin zorluğuna da dikkat çekmiştir. Bu yüzden HADİ modelleri yerinde yapısal denetimlere alternatif çözüm önerisi olarak sunulmuştur. Bu metodolojinin bir denetim sırasında toplanan bilgileri daha verimli bir şekilde belgeleyeceğini, nesneliği artıracığını ve operasyon süresini

kısaltacağı bilinmektedir (Hou vd. 2023). Üretilen HADİ modelleri, sayısal yöntemler kullanılarak mekanik analiz gibi daha derinlemesine hasar değerlendirme faaliyetleri için yararlı olmaktadır (Hou vd. 2021). Önerilen HADİ metodolojisinin sonuç ürünleri, çatlakları olan bir yapı varlığının 3B yeniden yapılandırılmış geometrisini ve bunların karakterizasyonunu içermektedir (Wang vd. 2024). Mevcut hasar değerlendirme yöntemleri bu alanlardaki teknikleri kullansa da hasarı tespit etmek veya belirli bir nesne için bir Dİ oluşturmak gibi bazı manuel müdahaleler de gerektirebilecek belirli görevlerle sınırlıdır (Tanbour ve Tanbour 2023). Bunun için, 3B bina modelleri oluşturmak ve çatlakları fotoğraftan anlamsal olarak bölümlere ayırmak ve karakterize etmek için çok sayıda en son metodoloji birleştirilmelidir (Jouan ve Hallot 2019). Burada önerilen metodoloji, girdi olarak SfM için uygun birden fazla görüntülerini gerektirir (Bevilacqua vd. 2022). SfM algoritması ile fotoğraflar işlenir ve detay seviye modeli oluşturmak için kullanılan nokta bulutu üretilir. Daha sonra çatlakları algılamak için eğitilmiş bir derin öğrenme veya makine öğrenmesi ile çatlak kinematikleri en küçük kareler tabanlı bir 2B kayıt algoritması ile hesaplanarak karakterize edilir (Zeybek ve Kaya 2020; Kong ve Hucks 2023). Son olarak, SfM bilgisi kullanılarak, istenen HADİ çıktısını oluşturmak için hasar bilgisi detay seviyesi modeline eşlenir.

Literatür araştırmaların genel sonuçlarına bakıldığında hızlı hasar değerlendirmesine yönelik mevcut uygulamalarda iyileştirmeler geliştirilmektedir (Gattulli vd. 2016; Ying vd. 2022). Bu yöntemle hızlı değerlendirmeden sonra, hasar özelliklerinin daha derin bir analizi gerekebilir. Çatlak tespiti için kullanılan algoritmalar kenar algılama, örüntü tanıma ve makine ve derin öğrenme olarak karşımıza çıkmaktadır. Algoritmalar genel olarak yüzey yapısındaki beklenmedik değişimler veya yer değiştirme ve gerinim modelleri de dâhil olmak üzere 3B model içinde çatlakları gösteren desenleri aramaktadır (Pantoja-Rosero vd. 2023a). Çatlaklar tespit edildikten sonra büyüklük, konfigürasyon, hizalama ve sonuç gibi nitelikleri belirlenebilir. Bu veriler, bir bakım veya onarım planı oluşturmak ve zaman geçtikçe kırıkların ilerlemesini izlemek için kullanılabilir (Barazzetti vd. 2015; Tanbour ve Tanbour 2023). Yapısal çatlama riski nedeniyle, binalarının hassas bir şekilde izlenmesi giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu nedenle, binalarda çatlak izlemeye özel önem vererek ve yapı denetimlerini otomatikleştirerek yapısal denetimleri geliştirmek çok önemlidir.

2.4 Fotorealistik Dijital İkiz ile SG Entegrasyonu

Kültürel miras, köprü, kaya kütlesi ve maden ocaklarında hassas ve özenli Dİ'lerinin oluşturulması nesnelere daha kapsamlı bir analizini sağlar (Barrile vd. 2022; Banfi vd. 2023; Pomeroy 2023). Bu yapılar ilk olarak fotogrametri ile üretilen 3B modeller aracılığıyla araştırılmaktadır (Mohammadi vd. 2021; Cruz Franco vd. 2023). Bu 3B araştırmalar yapısal denetime önemli katkılar sunsa da yapının tam bir fiziksel temsili 3B model ile tam olarak sağlanamamaktadır. Bu nedenle fiziksel bir nesnenin, sürecin, sistemin veya ortamın gerçek dünyadaki muadiline benzeyen ve onunla aynı şekilde davranan dinamik sanal bir kopyası büyük ilgi görmektedir (Obradović vd. 2020; Shabani vd. 2021). Her ne kadar fotogrametri destekli fotorealistik Dİ'ler sanal ortamda yapısal denetimler için büyük avantajlar sağlasa da eksik kalan analiz ve araştırmalar için ek çözümler gerekmektedir. Bu noktada da üretilen Dİ'lerin hem diğer paydaş ve uzmanlara aktarılmasında hem de eksik kalan analizlerin yapılması için SG platformları etkin bir şekilde kullanılmalıdır.

Sanal gerçeklik Dİ'lerin görüntülenme ve erişilme şeklini değiştirme yeteneğine sahiptir. Son dönemlerde fotorealistik modeller ve Dİ'nin birlikte kullanılması ile ortaya çıkan sinerji, öznetelik bilgilerinin sunulması ve giderek yaygınlaşması yapısal denetimlere katkı sağlamıştır (Obradović vd. 2020). Sanal gerçeklik ile sunum ve görselleştirme uygulamaları yalnızca basit imkânlar sağlamakla kalmaz aynı zamanda gerçek dünyadaki nesnelere aktarıldığı sanal modellerin, sürükleyici ve etkileşimli bir deneyimini aktarmaktadır (Bernal vd. 2024). Özüde, Dİ'leri sanal alana yükselterek yapı ve altyapı nesnelere kapsamlı ve bütünleşmiş bir görünümü sağlamaktadır (Angjeliu vd. 2020; Hou vd. 2023). Sanal gerçeklik platformlarında Dİ modeller, tablet veya akıllı telefon gibi mobil cihazlar aracılığıyla örneğin bir masa veya başka bir düz yüzey üzerine yerleştirilerek daha iyi bir görselleştirme düzeyine izin vererek gerçek dünya üzerine bindirilebilir (Hou vd. 2021). Akıllı gözlükler, kullanıcının o anda gördüklerinin üzerine veri bindirilerek de kullanılabilir (Tanbour ve Tanbour 2023). Bu teknolojilerin kullanılması, ağ/hizmet kullanılabilirliğini iyileştirmek, yolcu ve işçi güvenliğini artırmak, mevzuata uygunluğu sağlamak ve çevresel etkiyi azaltmak için daha bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olacaktır (Bevilacqua vd. 2022). Örneğin, İHA, robotlar ve

yapay zekâ tabanlı bilgisayar vizyonu uygulamasıyla yapılar, canlı bir Dİ aracılığıyla bağımsız olarak denetlenebilir, bu da uzmanların uzaktan denetim yapmasına, üretkenliği büyük ölçüde artırmaya ve kıt kaynaklar hakkındaki bilgisinden yararlanmasına olanak tanır. Sanal gerçeklik, Dİ ekosistemini genişleterek altyapı anlayışını daha da geliştirmeye ve derinleştirmeye yardımcı olmaktadır (Yiğit ve Uysal 2023). Dİ'lerin SG ortamında sunulması, uzaktaki uzman görüşlerin alınmasında kolaylık sağlayacak olup uzman görüş sayısının artırılmasına olanak sağlayacaktır. Bu sayede daha fazla uzman yapılan interaktif görüşmeler farklı anlayışlara yol açabilir ve araştırmanın genellenebilirliğini artırabilir (Bevilacqua vd. 2022; (Pantoja-Rosero vd. 2023b). Bu sanal ortamda, gerçek dünya koşullarını, olasılık senaryolarını ve akla gelebilecek her türlü durumu etkin bir şekilde simüle edilebilir ve sonuçlar anlık olarak değerlendirilebilir (Uslu ve Uysal 2021; Akay ve Özcan 2023). Yerinde denetimlere alternatif olan HADİ ile en güncel ve gerçekçi bir model ile etkileşim kurma yeteneği, insanların tasarım, operasyon ve bakım kararlarını alma şeklini değiştirmektedir. Barazzetti vd. (2015), sanal gerçeklik programlarında uygulanmak üzere tarihi yapıların dijital kopyalarının miras bina bilgi modelleri şeklinde üretilmesine yönelik bir sürecin ana hatlarını çizmiştir. Çalışmalarında oluşturulan Dİ modelleri özellikle SG gibi platformlar ile farklı denetçilere ulaştırmanın yapısal sağlık izlemede farklı uzman görüşlerinin hızlı bir şekilde alınmasına katkı sağladığı belirtilmiştir.

Hasar değerlendirmesinde mevcut en son teknoloji olarak yapay zekâ ve fotogrametri (fotoğraf tabanlı yöntem) yöntemleri (Zeybek ve Kaya 2020) dahil olmak üzere bilgisayarla görme teknikleri ile fotoğraf verilerini kullanan SG destekli Dİ teknolojisi karşımıza çıkmaktadır (Bakirman ve Gumusay 2020; Fidan ve Ulvi 2022). Bu teknolojilerin en önemli avantajı geleneksel denetimler sırasında öznelliği, maliyeti ve operasyon süresini azaltması gösterilmekte olup sürecin olabildiğince hızlı ve doğru olmasının başında tam ve eksiksiz bir 3B model üretmek gelmektedir (Blanco vd. 2018). Teknolojinin gelişmesi ile fotogrametri yönteminde kullanılan SfM ve MVS ile, bir nesnenin yüksek kaliteli fotorealistik 3B sahneleri yeniden oluşturmak için dokulu kafesler olarak ayrıntılı modeller hızlı bir şekilde üretebilmektedir (Yamazaki ve Liu 2016). Bu yöntem ile üretilen modellerin sağlayabileceği doğruluğa rağmen, ortaya çıkan verinin boyutu önemlidir ve çok sayıda nesnenin modellenmesini dezavantaj

oluşturabilmektedir (Hamal vd. 2020). Özellikle yapılar için mevcut hasarlar SG destekli HADİ model ile, geometrik bilgilerin yanı sıra hasar koşullarına ve karakterizasyonlarına ilişkin verileri içeren uçtan uca bir çözüm oluşturabilmektedir (Şenol vd. 2021). Bu nedenle, fotorealistik Dİ'leri diğer uzmanlara aktarma ve yapısal analizlerin eksikliklerini gidermek amacıyla modellerin SG entegrasyonu yapısal denetimler için önemlidir. Araştırmanın yeniliği, karmaşık yapısal denetim sürecini SG platformları ile modern teknolojilerin uygulanmasıdır. Buna ek olarak, fotogrametri tekniğinin yapılar için ayrıntılı Dİ üretme potansiyeli ve bunun sonucunda çatlak tespit sürecinin otomasyonu araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Gelişmiş 3B modelleme ve görüntüleme teknolojileri giderek daha erişilebilir hale geldikçe, bu yaklaşımın önümüzdeki yıllarda daha önemli hale gelmesi beklenmektedir. Tez kapsamında özellikle tarihi ve modern yapılara ek olarak incelenen kaya kütlesi ve mermer ocağı yapıları da fotogrametrik yöntemle fotorealistik 3B modeller üretilmeli daha sonra bu modeller tespit edilen çatlak bilgileri ile entegre edilerek HADİ modeli oluşturulmalı ve uzmanlara SG ile sunularak yerinde yapısal denetimlere alternatif çözüm üretilmiştir.

Sonuç olarak Dİ modellerin SG ile sunulması, yerinde incelemelere tam bir alternatif olabilir. Sanal gerçeklik platformları, kullanıcıların görüntüledikleri bir cihaz (genellikle bir gözlük) aracılığıyla gerçek dünyayı dijital içerikle zenginleştirmelerine olanak tanır. Dijital ikizlerin SG ile entegrasyonu genellikle belirli bir platformun yazılım geliştirme araçları ve API'leri kullanılarak gerçekleştirilir. Modelin bu platforma aktarılması, kullanıcıların gerçek dünya ile etkileşime girmesini sağlar. Bu tür bir teknolojinin birçok potansiyel uygulaması vardır. Örneğin, eğitim, sanal turizm, ürün tanıtımı, endüstriyel tasarım, mühendislik analizi ve diğer birçok alanda kullanılabilir. Teknoloji, gerçek dünyadaki nesnelere bilgi eklemek veya dijital nesnelere etkileşimli olarak incelemek için kullanılabilir. Bu teknoloji, fiziksel dünyayı dijital olarak zenginleştirerek kullanıcıların yeni deneyimler yaşamasına olanak sağlamaktadır.

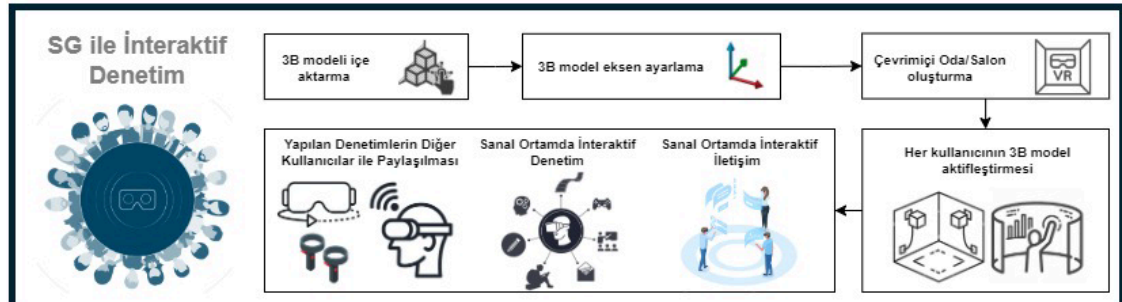
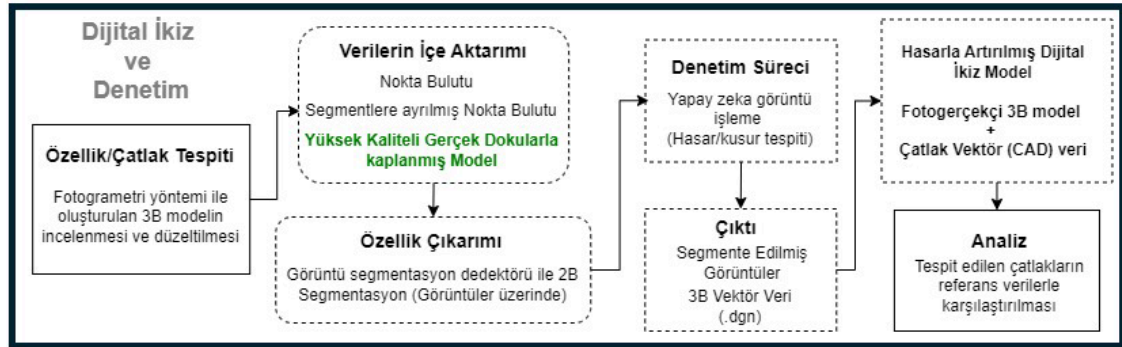
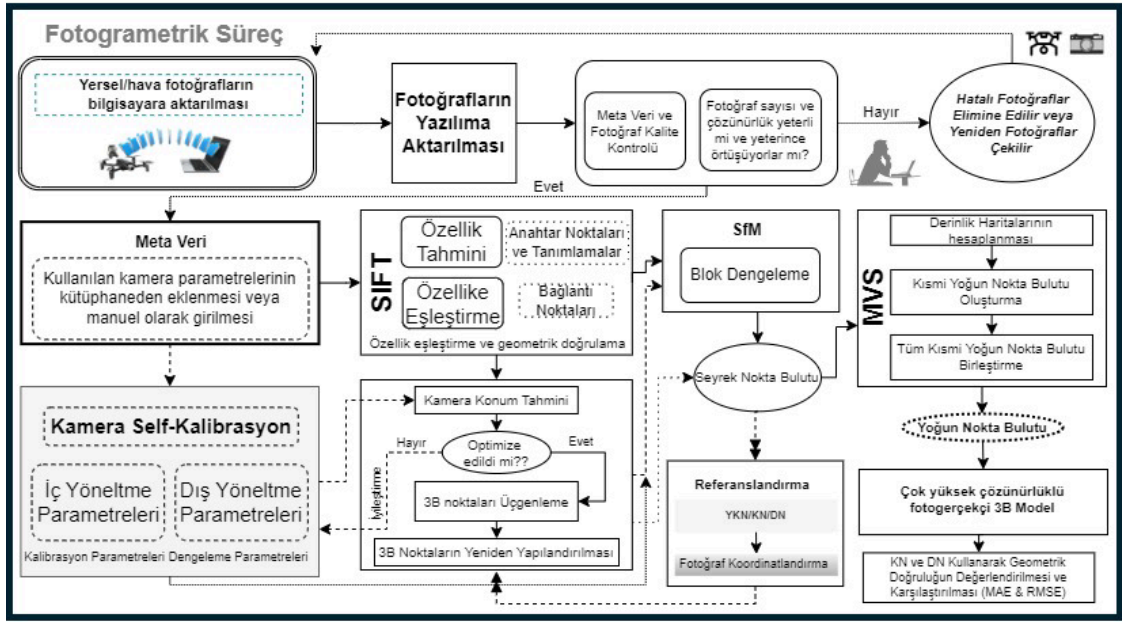
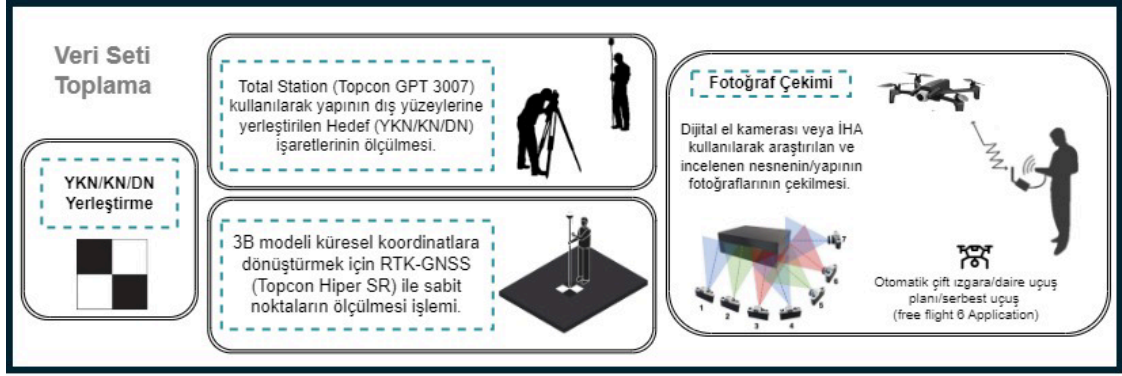
3. MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışmasının uygulama kısmı dört aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama fiziksel bir nesnenin/yapının fotogrametri ile fotorealistik 3B modelini üretmeyi kapsamaktadır. İkinci aşama da ise 3B model kullanılarak yapıdaki çatlaklar otomatik bir şekilde tespit edilmektedir. Otomatik olarak tespit edilen çatlakların vektör bilgileri ile fotorealistik 3B modelin bütünleştirilmesi ile HADİ modeli üretilmesi üçüncü aşamayı oluşturmaktadır. Üretilen bu HADİ model ile SG entegrasyonu aracılığıyla diğer kullanıcılara (uzman kişilere) uzaktan erişim imkânı verilerek interaktif bir şekilde yapısal denetim sağlanmıştır ve son aşama gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, sanal model ve çatlaklar bir araya getirilerek yapısal bozulmanın neden olduğu değişiklikler daha da ayırt edilmekte ve yapıların sağlığını izlemek için bir yöntem oluşturulmuştur.

Bu araştırmadaki tasarım probleminin amacı, en alakalı 3B model üretim yöntem ve materyallerin kullanım durumları için fonksiyonel bir tasarım geliştirerek, yönetim uygulamaları arasında köprü kurmak için Dİ'lerin kullanımı hakkında mevcut bilgileri ilişkilendirmektir. Yapı yönetimindeki Dİ'lerin özelliklerini belirlemek için yapı yönetimindeki Dİ'lerin aşağıdaki dört temel yaklaşım ile karakterize edilmesi gerekmektedir:

- fiziksel dünya ile sanal dünya arasındaki bağlantı,
- ortak veri ortamı ve gerçekçi 3B model üretimi,
- veri ve bilgilerin bütünleştirilerek görselleştirilmesi,
- senaryolarının simülasyonu ve aktarımı.

Tez kapsamında gerçekleştirilen iş akışı Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu tez çalışmasında, Dİ çerçevesini kullanarak yapısal denetim için bir metodoloji önerilmektedir. Fiziksel nesnenin sanal modelini oluşturmak için fotogrametri kullanılmasının önemi irdelenmiş ve literatür kısmında sebepleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Oluşturulan 3B modelden daha sonra yapay zekâ ile desteklenen otomatik bir detay algılama yöntemi kullanarak modeldeki çatlaklar tespit edilmiştir. Son olarak, çatlakları fotogrametrinin yüksek doku kalitesine sahip 3B modeliyle birleştirerek HADİ model üretilmiştir.



Şekil 3.1 Tez çalışması genel iş akışı.

3.1 Fotogrametri Tekniği ile Fotorealistik Dijital İkiiz Üretimi

Son teknolojik gelişmeler ve yazılımlarla birlikte fotogrametri, Dİ oluşturma konusunda yetkin bir araç haline gelmiştir (Grasso 2021). Kapsamlı ve hassas bir dijital model veya Dİ oluşturma nın en önemli yönü, söz konusu nesnenin mevcut durumunu belirlemek olduğundan fotogrametri tekniği ile fotorealistik 3B modeller oluşturmak zaman ve maliyet avantajları sunarken Dİ geliştirme için en verimli teknik olarak hizmet etmektedir (Wang vd. 2015; Ulvi 2022). 3B modeller Dİ üretiminin ilk aşamasıdır ve bu modellerin doğruluğu Dİ'nin doğruluğunu doğrudan etkiler. Gerçek dünyanın 3B modelini oluşturmak için çok sayıda mekanizma vardır; daha önceki başlıklarda da aktarıldığı gibi en popüler yaklaşım lazer tarama ve fotogrametridir (Sharma vd. 2022; Lu vd. 2023). Lazer tarama, fiziksel ortamların son derece hassas 3B modellerini oluşturmak için özel ve genellikle pahalı ekipmanlar kullanır (Moon vd. 2019; Kaya vd. 2021; Polat vd. 2021). Buna karşılık klasik fotogrametride bu süreç zaman alıcıdır (Eltner ve Sofia 2020; Yiğit ve Uysal 2023). Fotoğraf tabanlı yöntemlerden biri olan fotogrametri, lazer taramaya göre kurulum ve işletim maliyeti açısından daha ucuz olduğ u için 3B model oluşturmada daha fazla kullanılmaktadır (Blanco vd. 2018).

ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) ve ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) gibi fotogrametri örgütlerine göre fotogrametrinin tanımı, nesnelere ve yakın çevresine temas etmeksizin, yayılan elektromagnetik enerjinin algılanması, değerlendirilmesi ve yorumlanmasıyla nesne ve çevresi hakkında güvenilir bilgiler elde etme sanatı, bilimi ve teknolojisidir (Erdoğan vd. 2018). Uzun yıllardır kullanılan fotogrametri tekniği temelde fotoğraf çekim konumuna göre hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hava fotogrametrisi genellikle çok büyük alanların topografik haritalarının yapılması için tercih edilirken yersel fotogrametri daha çok objelerin 3B modellenmesi üzerine kullanılmaktadır (Ulvi vd. 2017; Kabadayı ve Erdoğan 2022). Bu yönelme özellikle zaman ve maliyet konusunda avantaj sağlayan İHA'ların fotogrametriye adaptasyon sürecini hızlandırmıştır. Buna bağlı olarak İHA fotogrametrisi literatürde yer almaya başlamıştır (Kaya ve Temel 2022). Bu bağlamda İHA fotogrametrisi ile özellikle yeni gelişen fotoğraf işleme teknikleri birçok disiplin tarafından yaygın olarak

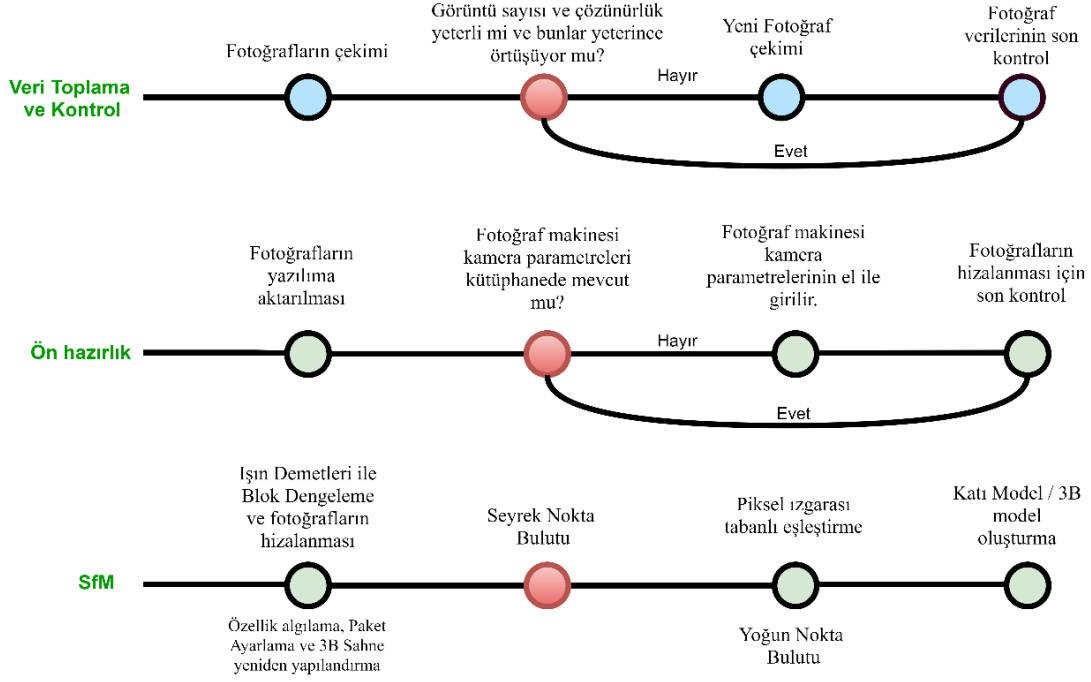
kullanılmaktadır (Şasi ve Yakar 2017; Polat vd. 2022; Dörtbudak vd. 2023). Gelişen veri toplama yöntemlerinin yanından ile SfM algoritması İHA'lerden elde edilen fotoğrafların hızlı pratik ve yüksek hassasiyette sonuçlar alınmasında önemli katkılar sağlamıştır. SfM yaklaşımı, metrik veya metrik olmayan kameralarla toplanan fotoğrafları kullanarak yüksek çözünürlüklü veriler üretmeyi mümkün kılmıştır (Yakar ve Doğan 2017; Yiğit ve Uysal 2023). Geleneksel fotogrametrinin aksine SfM, kamera yönelmeleri veya yer kontrol noktalarının (YKN) kullanımı hakkında önceden bilgi sahibi olmadan süreci oldukça hızlandırmıştır (Fonstad vd. 2013; Ulvi 2022; Polat 2023). Carrivick vd. (2013), SfM sürecinin daha büyük bir otomasyon derecesi ile ayırt edildiğini belirtmiştir. Sonuç olarak, kullanıcılar genellikle bunu geleneksel fotogrametri tekniklerinden daha yüzeysel ve daha az karmaşık olarak algılamaktadır.

Fotogrametri yönteminde, bir nesnenin yüzeyindeki noktaların 3B koordinatları, bindirmeli fotoğrafların dış yönelme parametrelerinden elde edilir. Dış yönelme parametreleri, bir çift fotoğraf için en az üç YKN kullanılarak hesaplanabilir. Klasik fotogrametri için genellikle iç yönelme parametreleri ve kamera kalibrasyon değerleri hakkında önceden bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Fakat, SfM gibi gelişmiş algoritmalar uygulanarak kalibrasyon ihtiyacı ortadan kalkmıştır (Fernández-Hernandez vd. 2015). SfM algoritmasının kullanılması ile geleneksel kameralarla çekilen fotoğraflardan 3B modellerin oluşturulması ve yüzeylerin yeniden yapılandırılması önemli ölçüde basitleşmiştir (Fonstad vd. 2013). SfM algoritması, stereoskopik fotogrametride kullanılanlara benzer fikirlere dayansa da (Javernick vd. 2014) 3B uzaydaki noktaların kesin koordinatlarının hesaplanmasını otomatikleştirerek stereoskopik fotogrametriden ayrılır. Stereoskopik fotogrametrinin aksine, SfM algoritması için mükemmel bir kamera kurulumuna gerek yoktur (Dietrich 2017). SfM algoritması kullanan yazılımlar, çok sayıda fotoğraftan ortak noktaları otomatik olarak çıkararak ve seyrek bir nokta bulutu oluşturan yöntemler üzerine kuruludur (Akar 2017). Radyometrik piksel değerlerini kullanan ölçekten bağımsız özellik dönüşüm (Scale Invariant Feature Transform/SIFT) algoritması, bu işlem için birincil algoritma olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Zeybek 2021). SfM sürecinde ilk olarak üretilen seyrek nokta bulutunda sonra ek bir aşama olarak yoğun nokta bulutu oluşturulur. Bu aşamada yoğun çoklu görüntü stereo (Dense Multi View Stereo/DMVS) tekniği

uygulanmaktadır (Ahmadabadian vd. 2019). Burada, haritalanan pikseller ve bunlara karşılık gelen 3B koordinatlar nokta bulutlarına dönüştürülür. Daha sonra, bu nokta bulutları bir ağ modeli oluşturmak için kullanılır. Perry vd. (2020) göre, fotoğraflar modele özgün bir doku kazandırır. Son olarak fotoğraflardan gerçek dokular kaplanarak 3B model elde edilir.

Teknolojinin gelişmesi ve fotogrametri yönteminde kullanılan SfM, SIFT ve DMVS algoritmaları ile bir nesnenin yüksek kaliteli fotorealistik 3B sahnelerini yeniden oluşturmak için ayrıntılı modeller dokulu ağlar olarak hızlı bir şekilde üretilebilir (Yamazaki ve Liu 2016). Dijital ikizler, temsil ettikleri nesnelerin yapısını, durumunu ve davranışını taklit etmek için düzenli olarak verilerle güncellenen fiziksel sistemlerin sanal temsilleridir (Mihai vd. 2022). Ancak, Dİ'leri sıfırdan oluşturmak ve yönetmek zaman alıcı, karmaşık ve maliyetlidir (Drobnyi vd. 2023). Birden fazla kaynaktan gelen verileri birleştiren bütünleşmiş çözümler oluşturmak için farklı ve özel becerilere sahip geliştiricilerden oluşan bir ekibin birlikte çalışmasını gerektirir. Geliştiriciler, son kullanıcıları verilere daha iyi bağlamak için akış verilerinden canlı içgörüler üretmeli ve bağlamsal görselleştirmeler oluşturmalarıdır. Fotogrametri ile fiziksel ortamların Dİ modellerini kolayca oluşturabilir ve büyük ve karmaşık fiziksel yapıların etkileşimli 3B dijital temsili sağlayan uygulamalar oluşturabilirler (Sommer ve Seiffert 2022). Dijital ikiz içinde var olan gerçekliği mümkün olduğunca yansıtan bir 3B model sağlamanın değeri vardır (Leskovský vd. 2020).

3B modelleme çalışmalarında fotogrametrik değerlendirme yazılımı çok önemlidir. Günümüzde piyasada bulunan birçok yazılım bulunmaktadır. Ancak yapılan araştırmanın içeriğine göre fotogrametri yazılımı seçimi oldukça önemlidir (Polat vd. 2022; Yiğit ve Uysal 2023). Her yazılımın olağanüstü yetenekleri vardır. Genel olarak en önemli nokta; sonuç ürünün kalitesi ve işlemlerin kaç adımda ve ne kadar sürede gerçekleştirildiğidir (Şasi ve Yakar 2018). Bu noktada Context Capture yazılımı, fotogrametrik veri üretmek için SfM algoritmasını kullanan yazılımlar arasında fotorealistik modellerin üretiminde daha etkin sonuçlar verdiği için (Mırdan ve Yakar 2017; Şenol vd. 2021) ve en fazla kullanılan yazılımlardan (Yiğit ve Uysal 2021) olduğu için tercih edilmiştir. SfM algoritması ile 3B model üretimindeki temel iş akışı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Veri toplama ve SfM iş akışı (Yiğit ve Uysal 2021).

Fotogrametrik yazılımda ilk olarak projede kullanılacak tüm fotoğraflar içe aktarılır. Fotoğrafları çekmek için kullanılan kameranın sensör boyutu ve odak uzunluğu otomatik olarak kütüphaneden tanımlanır. Eğer kütüphanede kullanılan öznelikler bulunmuyorsa ise manuel olarak tanımlanması gereklidir. Daha sonra fotoğrafların çekim sırası dikkate alınarak hizalama işlemi yapılır. Burada temel amaç fotoğrafları sıralamaktır ve ön bir model oluşturmaktır. Daha teknik olarak; Context Capture yazılımı (Bentley 2023a) aracılığıyla süreç, kamera konumlarının ilk tahminiyle başlar. Daha sonra, 3B yapıyı oluşturmak için yeni sahne bileşenlerinin araştırılması ile süreç devam etmektedir. Bu aşamada blok dengeleme işlemi uygulanmaktadır. SfM algoritmasında kamera self kalibrasyon yapılarak performans önemli ölçüde arttırılsa da iyi sonuçlar elde etmek için ön kalibrasyonun hala gerekli olduğu zamanlar olabilmektedir (Remondino ve Campana 2014).

Çalışmada Context Capture yazılımı içerisindeki algoritmalar ile kameraların iç yönelme parametreleri otomatik olarak kütüphaneden eklenmiştir. Ardından, kameraların mutlak yönelmelerinin yanı sıra verilen fotoğrafların kamera konumu belirlenmiştir (Bentley 2023b; Ulvi 2022; Fryskowska-Skibniewska vd. 2022). Tahmini kamera pozuna sahip tüm kameralar, bir sürecin 3B noktasını oluşturmak için kullanılır (Yiğit ve Uysal 2021;

Ulvi 2022). Tüm kameralar ve 3B noktalar doğrusal olmayan optimizasyon ve yeniden projeksiyon hatası minimizasyonu için optimize edilmelidir (Fryskowska-Skibniewska vd. 2022). Fotoğraf veri setini inceleyerek işlevsel bir 3B modelin oluşturulduğunu doğruladıktan sonra fotogrametrik yazılım kullanarak fotorealistik bir Dİ modeli oluşturulur (Yiğit ve Uysal 2021). Tam ve doğru bir Dİ modeli üretmek için 'yüksek kalite' seçeneğinin seçilmesi çatlak tespiti algoritmasının başarılı olmasına yardımcı olmaktadır. Fotogrametri ile 3B model üretim aşamaları Şekil 3.1'de verilmiştir. Yazılım ile detay seviyesi 3 (Level of Detail/LOD3) Dİ oluşturulduktan sonra analizler ve incelemeler gerçekleştirilmiştir.

3.2 Sanal Gerçeklik

Fotogrametri yöntemi ile elde edilen 3B modellerden Dİ'lerinin oluşturulması ve bu Dİ'lerin SG platformlarına aktarılması giderek popülaritesi artan bir konudur (Van Krevelen ve Poelman 2010; Araz 2021). Fotogrametri ile elde edilen 3B model, gerçek dünyadaki nesnenin dijital bir kopyasını temsil eder. Bu dijital kopya (ikiz), nesnenin boyutları, şekli ve görünümü hakkında ayrıntılı bilgilere sahiptir (Karaca ve Önem 2023). Sanal gerçeklik platformları kullanıcıların gerçek dünyayı görüntüledikleri bir cihaz (genellikle bir gözlük) üzerinden dijital içerikle zenginleştirmelerine olanak tanımaktadır (Aytekin vd. 2020). Fotogrametri ile elde edilen 3B model SG platformlarına entegre edilebilir. Bu entegrasyon genellikle belirli bir platformun yazılım geliştirme araçları ve API'leri kullanılarak gerçekleştirilir (Prouzeau vd. 2020). Modelin ve Dİ'nin bu platforma aktarılması kullanıcıların gerçek dünya ile etkileşimde bulunmalarını sağlar. Bu tür bir teknoloji birçok farklı kullanım senaryosuna sahiptir (Yiğit ve Uysal 2023; Akay 2023). Örneğin; eğitimde, sanal turizmde, ürün tanıtımında, endüstriyel tasarımda, mühendislik analizinde ve daha birçok alanda kullanılabilir. Kullanıcılar, gerçek dünya nesnelere üzerine bilgi eklemek veya dijital nesnelere etkileşimli bir şekilde incelemek için bu teknolojiyi kullanabilirler (Uluçay ve Küçük 2023). Sonuç olarak fotogrametri ile elde edilen 3B Dİ'lerin SG platformlarına aktarılması hem eğlence hem de iş uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir. Bu teknoloji, kullanıcıların fiziksel dünyayı dijital olarak zenginleştirerek yeni deneyimler yaşamalarına olanak tanır.

Fotogrametri ile oluşturulan 3B modeller ile Dİ'lerin SG entegrasyonu için dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır (Hocaoğlu 2022). İlk olarak fotogrametri ile elde edilen 3B modeller genellikle büyük ve karmaşık olabilir (Südor 2021). Bu nedenle bu modellerin SG platformlarında etkili bir şekilde kullanılabilmesi için model optimizasyonu gerekebilir (Özcan ve Akay 2022). Model boyutunu azaltmak çoklu cihazlarda hızlı yükleme ve görüntüleme sağlamak için önemli olmaktadır (Thwaites 2013). Sanal gerçeklik platformları, genellikle belirli 3B model formatlarını desteklemektedir. Bu nedenle fotogrametri yöntemi sonucu elde edilen 3B modellerin uygun formatlarda dönüştürülmesi gerekli olabilmektedir. Örneğin, OBJ, FBX, STL veya USDZ gibi yaygın 3B dosya formatları sıkça kullanılır (Askar ve Sternberg 2023). Fotogrametri ile oluşturulan Dİ'ler, SG içeriği ile gerçek dünya nesnelere veya sahnelere entegre edilebildiği için kullanıcıların gerçek dünya nesnelere tarayıcıları üzerinden görüntülerken bu nesnelere üzerine eklenen 3B modelleri veya bilgileri görmelerini sağlar ve bu da Dİ için temel teşkil edebilmektedir (Prouzeau vd. 2020). Bu yüzden model üzerine eklenen veriler önem teşkil etmektedir. Sanal gerçeklik platformları, kullanıcıların cihazlarını gerçek dünyada doğru bir şekilde konumlandırabilmek ve takip edebilmek için özel algoritmalar ve teknolojiler kullanır. Bu, fotogrametri ile elde edilen Dİ'nin doğru bir şekilde gerçek dünyaya yerleştirilmesini sağlarken elde edilen modelin gerçek dünyayı temsile etmesi önemli olabilmektedir.

3B Dİ'lerin SG ile paylaşılması için birçok popüler platform bulunmaktadır ve bu platformlar WEB tabanlı, uygulama tabanlı (mobil ve bilgisayar) veya bir gözlük aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu amaçla kullanılan popüler platformlar; başta Sketchfab, Unity3D, Unreal Engine, Mozilla Hubs, Amazon Sumerian, Microsoft Azure Spatial Anchors, PlayCanvas ve A-Frame gibi çerçeveler kullanılmaktadır. Bu platformların, avantajları ve dezavantajları vardır (Gürel 2021). Özellikle bu platformlar, 3B içeriklere kolayca erişim sağlar ve kullanıcıların tarayıcıları üzerinden görüntülemelerine olanak tanır. Bu, içerikleri geniş bir izleyici kitleyle paylaşmayı kolaylaştırırken genellikle kullanıcı dostu arayüzler sunarlar ve içeriklerin yüklenmesi, görüntülenmesi ve paylaşılması basit bir süreç haline gelir. Birçok platform yaygın kullanılan SG cihazları ile uyumludur (Koç 2023). Bu, kullanıcıların 3B içeriklere farklı cihazlar üzerinden erişmelerini ve SG deneyimleri yaşamalarını sağlamaktadır.

Platformlar, kullanıcıların içeriklerini kolayca paylaşmalarına olanak tanır. Sosyal medya, WEB siteleri veya e-posta yoluyla içeriklerin paylaşılması mümkündür (Onyıl ve Yılmaz 2022). Bu ve bunun gibi avantajların yanında bu platformların kendi içinde dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle platformlarda paylaşım ve görselleştirme işlemi ücrete tabi olabilmektedir veya ek depolama veya üst özelliklere erişim için ücretler gerekebilir. Ücretli planlara yatırım yapmak maliyetli olabilir (Boboc vd. 2020). Ücretsiz sürümler, sınırlı depolama alanı sunabilir ve kullanıcıların sınırlamalarla karşılaşmasına neden olabilir (Discher vd. 2019). Ücretsiz platformlar genellikle içerikleri kamuya açık olmakta ve bu da gizlilik sorunlarına yol açabilmektedir. Hassas verileri içeren 3B modellerin bu platformlarda barındırılması sakıncalı olabilmektedir. Ücretsiz platformlar, kullanıcıların 3B içeriklerinin görünürlüğü ve yönetimi üzerinde sınırlı kontrol sağlayabilmektedir. Bazı platformlar, sınırlı teknolojik yeteneklere sahip olabilir veya belirli WEB tarayıcıları veya cihazlarla uyumsuzluk yaşayabilir (Demirezen 2019). Her platformun kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve kullanılacak platformun seçimi projenin gereksinimlerine ve hedeflerine bağlı olacaktır. Kullanıcılar, bu avantajlar ve dezavantajlar göz önünde bulundurularak en uygun platformu seçmelidirler. SG platformlarında en dikkat çeken ve bu tez çalışmasında da kullanılan Sketchfab ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir.

Sketchfab, 3B içeriklerin kolayca yüklenip depolanması ve paylaşılması için popüler bir platformdur. Kullanıcılar, WEB tarayıcıları üzerinden 3B modelleri görüntüleyebilir ve paylaşabilirler. Yazılım, mobil cihazlarla SG deneyimleri yaşamak için de kullanılabilir. Dijital ikizler bu platforma yüklenerek, kolayca erişilebilir ve paylaşılabilir hale getirebilir. Kodlama bilgisi olmadan, 3B modelleri yüklemek ve paylaşmak için kolay bir arayüze sahiptir. Kurulum gerektirmez tarayıcı üzerinden çalışır. Çok sayıda eğitim ve rehber sunar. Hem artırılmış gerçeklik hem de SG deneyimlerini destekler. Bilgisayar, mobil cihazlar ve SG gözlükleri dahil çeşitli cihazlarla uyumludur. Kullanıcıların modellerle etkileşime geçmesine olanak tanır (dönme, yakınlaştırma, bilgi noktaları ekleme). Modellere animasyonlar, sesler ve bağlantılar gibi etkileşimli özellikler eklenebilir. Çok karmaşık veya büyük dosya boyutlarına sahip modellerde performans sorunları yaşanabilir. Tarayıcı tabanlı olmasından dolayı bazı performans ve grafik kısıtlamaları olabilir. Bazı kullanıcılar için özelleştirme seçenekleri yetersiz olabilir.

Özellikle belirli bir iş akışı veya kullanıcı deneyimi gereksinimi varsa, platformun sunduğu seçenekler sınırlı kalabilir. 3B modellerin çevrimiçi paylaşılması, ticari sırlar veya telif hakları açısından güvenlik riskleri oluşturabilir. Ücretsiz plan bazı kısıtlamalar getirir, özellikle model boyutuna, depolama alanına sınırlamalar bulunur. İleri seviye özellikler ve daha fazla depolama için ücretli planlara ihtiyaç duyulabilir.

Sanal gerçeklik platformları, Dİ'leri farklı kullanıcılara ve cihazlara sunmak için çeşitli seçenekler sunmaktadır. Platform seçimi, hedef kitleye ve projenin gereksinimlerine göre yapılması önemlidir (Yiğit ve Uysal, 2021; Döş ve Yiğit 2023; Yiğit ve Uysal 2023). Bu platformlar; 3B içeriklerin oluşturulmasını, depolanmasını ve paylaşılmasını kolaylaştırarak WEB tabanlı SG projelerinin geliştirilmesi için de kullanılabilirler (Boboc vd. 2020). Sanal gerçeklik projeleri için 3B içeriklerin doğru bir şekilde hazırlanması ve bu platformlara entegre edilmesi, kullanıcıların etkileyici SG deneyimleri yaşamalarına olanak tanımaktadır (Demirbağ 2020). Bu çalışmada fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modeller ile yapılan Dİ'ler WEB tabanlı platformunda sunulmuştur. Fakat özellikle ücretsiz olan platformların dezavantajları ve tezin amaçlarını tam olarak karşılamaması alternatif araçlara yöneltmiştir. Özellikle ücretsiz açık erişim olan platformların güvenlik sorunları ve modellerin herkese açık olması büyük bir dezavantaj olmaktadır. Fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B Dİ'lerin büyük doku yüzeylerine sahip olması bu platformlarda tam bir denetim yapılmasına imkân vermemektedir. Bu yüzden bu sorunları aşmak için 3B Dİ'ler ile yapısal denetimlerin yapılabildiği platformlar tez çalışmasında kullanılmıştır. Bu platforma üretilen Dİ eklenerek sanal ortamda interaktif bir şekilde diğer uzman kişilerle yapısal denetimler sağlanmıştır. Yapılan interaktif denetimler ile önerilen yöntem ile tespit edilemeyen çatlaklar ve diğer yapısal bozulmalar da belirlenebilmektedir.

3.3 Çatlak Tespiti

Kısmi otomasyon amacıyla yapılardaki hasar incelemesi görevlerini ayrı ayrı ele almak yerine bir yöntemin belirli bir detay seviyesinde (bu çalışma için LOD3) Dİ biçiminde hasar bilgilerini içeren eksiksiz bir 3B model oluşturduğu bir vizyon önermekteyiz. Çalışmada bu amaçla geometrik bilgileri barındıran bir Dİ ile yapının fiziksel bir

parçasının geometrisi hakkında derinlemesine veri içeren 3B modelleri inceliyoruz. Geometrik bilgileri barındıran fotogrametrik 3B model, fotoğraflardan elde edilen hasar verileriyle birleştirilerek hasarla güçlendirilmiş/artırılmış dijital ikizler (HADİ) üretilmesi amaçlanmaktadır. Amaçlanan HADİ çıktısı, detay seviyesi modeli tarafından sağlanan geometrik bilgileri haritalanmış ve karakterize edilmiş hasarlar ile birleştirilebilir ve analizler edilebilir. Bu sayede yerinde denetimlere alternatif bir yöntem geliştirilmektedir. Çalışmamızda çatlakların otomatik olarak tespit edilmesi Bentley (Bentley 2023a; Bentley 2023b) tarafından yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yapılmaktadır.

İlk olarak, daha önce açıklanan SfM algoritmaları kullanılarak fotoğraflardan bir 3B model, nokta bulutu ve 3B model oluşturulmuştur. Fotogrametrik yazılımda üretilen nokta bulutu ve 3B model aynı yazılım aracılığıyla Insight Detector (ID) araçları kullanılarak çatlak tespit etmek için altlık olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yazılımdaki ID araçları, 3B model üzerinde çatlak tespiti için verilerin örnek kütüphaneler ile uyumluluğuna bağlı olarak çok etkilidir (Bentley 2023a; Yiğit ve Uysal 2024). Bu araçlar, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit etmeye olanak sağlamaktadır. 3B model üzerinde çatlak tespiti için kullanılan yöntem, ilk görünüm görüntüsü üzerinde eğitilmiş modelleri kullanılarak cephenin segmentasyonunu gerektirmektedir. Bu aşamada, tespit edilen açıklıkların köşeleri, doğru köşeleri belirlemek için ilk görünümünden ikinci görünüme taşınır. Bu çalışmada kullanılan ID araçları, 3B modellerdeki çatlakların boyutlarını, kapsamalarını ve konumlarını tanımlama ve değerlendirme yeteneğine sahiptir. ID araçlarının matematiksel çerçevesi, 3B modelin yüzeyindeki tutarsızlıkları analiz eden bir algoritmalar koleksiyonundan oluşur. ID araçları farklı özelliklere sahiptir, bu nedenle ihtiyaçlarınıza uygun bir araç seçilmelidir (Bentley 2023a). ID araçlarının çatlak tespitini gerçekleştirmek ve performansı değerlendirmek için nasıl çalıştığını anlamak, ID araçlarıyla elde edilen sonuçları diğer yaklaşımlardan elde edilenlerle karşılaştırarak çok önemlidir. İkinci olarak bu araçlardan elde edilen sonuçların diğer yaklaşımlardan elde edilenlerle karşılaştırılması esastır. Son olarak ID araçlarının sınırlamalarını derinlemesine analiz etmek çok önemlidir. Bu araçlar her zaman kusursuz sonuçlar vermeyebilir. ID araçlarının çatlakları tespit etmek için nasıl kullanılabileceği ve bu katkının gelecekteki araştırmalara nasıl yardımcı

olabileceği değerlendirilecektir. Aşağıdaki bölümlerde yukarıdaki tüm adımların ayrıntılı bir analizi sunulmaktadır. ID araçlarının çalışma mekanizması aşağıdaki şekilde detaylandırılmıştır:

- 3B model bir dizi nokta bulutu olarak temsil edilir.
- Yüzey farklılıklarını belirlemek için nokta bulutu analiz edilir.
- Yüzey farklılıkları nedeniyle çatlaklar tespit edilir (Bentley 2023a; Bentley 2023b).

Çalışmamızı diğer çalışmalardan ayıran en büyük özelliği, tespit edilen çatlakların 2B fotoğraflardan değil 3B modellerden elde edilmesidir. Bunun için Komşuluk Birleştirme, Eğrilik Tahmini, Çatlak tespiti algoritmaları kullanılmıştır. Temel algoritmaları çalıştırmak için yukarıda da açıklandığı gibi makine öğrenimi ve derin öğrenme araçları kullanıldı. Burada hazır olan kütüphaneler kullanılmış olup çalışma alanına en uygun parametreler tasarlanmıştır. Kullanılan kütüphanedeki veriler ile çalışma alanının uyumu doğruluğu etkileyecektir. Bu araçlar, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit eder. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için ID araçları tarafından kullanılan özellikler ve ayarlar aşağıdaki gibidir:

- Eşik (Threshold): Çatlak olarak değerlendirilecek yüzey farklılıklarının minimum değerini ayarlar.
- Açı (Angle): Çatlakların yönünü belirler.
- Uzunluk (Length): Çatlakların minimum uzunluğunu belirler.
- Genişlik (Width): Çatlakların minimum genişliğini belirler.
- Yumuşatma (Smoothing): Yüzey farklılıklarını yumuşatmak için kullanılan bir ayardır (Zhang vd. 2017; Debroy ve Sil 2022; Park 2023).

ID araçları aslında nesne tespit araçları olarak tanımlanmaktadır. Bu araçlar hem makine öğrenimi hem de derin öğrenmeden faydalanmaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit etmektedir. Genel olarak algoritma üretilen dijital ürünleri baz alarak çalışır. ID araçlarının çalışma mekanizması ilk olarak 3B modeli bir dizi nokta bulutu olarak temsil edilerek başlar. Ardından yüzey farklılıklarını belirlemek için nokta bulutu analiz edilir.

Son olarak yüzeylerdeki farklılıklar nedeniyle çatlaklar tespit edilir. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için kullanılan özellikler sırasıyla; çatlak olarak değerlendirilecek yüzey farklılıklarının minimum değeri, çatlakların yönü ve minimum uzunluğu, çatlakların minimum genişliği ve yüzey farklılıklarını yumuşatma değeri ayarlanmalıdır (Zhang vd. 2017; Debroy ve Sil 2022; Park 2023).

Nesne tespit araçları yapay zekâ algoritmaları üzerine kurulmuştur (Al-Thelaya vd. 2023). Bu araçlar ilk olarak Neighborhood Aggregation (Komşuluk Birleştirme) ve Curvature Estimation (Eğrilik Tahmini) algoritmaları kullanmakta ve bunlar makine öğrenme ve derin öğrenme algoritmalarına dayanmaktadır (Park 2023). Bu mekanizma, eğrilik değeri ile önceden belirlenmiş bir eşik değeri arasındaki karşılaştırmaları yürütür. Bu prosedür, insan beyninin kırıkları nasıl algıladığına benzer (Fu vd. 2022; Al-Thelaya vd. 2023). Komşuluk Birleştirme algoritması, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını temsil etmek için önceden eğitilmiş bir model kullanarak nokta bulutundaki her noktanın komşu noktalarını Denklem 3.1'i kullanarak tanımlar (Zeng vd. 2020; Fu vd. 2022).

$$n(p) = \{q \in P \mid \|p - q\| < r\} \quad (3.1)$$

Bu formülde,

$n(p)$: bir noktanın p çevresinde belirli bir yarıçap r içinde kalan tüm noktaların kümesini temsil eder (p : nokta kümesi).

q : p noktasının komşusu

P : Nokta bulutu

r : Komşuluk mesafesi

Nokta eğriliklerini hesaplamak için Eğrilik Tahmini algoritması kullanılır. Bu algoritma, nokta bulutunun eğriliğine nasıl yaklaşılabileceğini öğrenen önceden var olan bir modeli kullanarak (Zeng vd. 2020; Al-Thelaya vd. 2023) noktaların eğriliğini hesaplamak için Denklem 3.2'yi kullanır.

$$K(p) = \frac{k_1(p) + k_2(p)}{2} \quad (3.2)$$

Bu formülde,

$K(p)$, $k1(p)$: p noktasının eğriliği, p noktasının birincil eğriliği

$k2(p)$: p noktasının ikincil eğriliği

Çatlak tespiti, belirli bir değeri aşan eğimlere sahip noktaları tanımlar (Zeng vd. 2020; Al-Thelaya vd. 2023). Algoritma tespit edilen çatlakların boyutu, derinliği ve konumu hakkında bilgi sağlamaktadır. Eğriliği belirli bir değerden daha yüksek olan noktaları çatlak olarak tespit etmek için Denklem 3.3'ü kullanılır.

$$c(p) = 1 \text{ if } |K(p)| > t \text{ else } 0 \quad (3.3)$$

Bu formülde,

$c(p)$: p noktasının çatlak olup olmadığı

$|K(p)|$: p noktasının eğriliğinin mutlak değeri

t : Eşik değeri

Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları, fotoğraf ve videolardaki nesnelere tespit etmek için Evrişimsel Sinir Ağlarını (convolutional neural networks) kullanır. Bu algoritmalar denetimli öğrenme (supervised learning) algoritmalarına dayanır. Denetimli öğrenme algoritmaları, etiketli verilerle eğitilir. Denetimli öğrenme algoritmaları ile etiketli verilerle eğitildiklerinde yüzey farklılıklarını tespit etme kabiliyeti kazanırlar. ID, bu yapıları uygulayarak 3B modellerdeki kusurları tespit edebilmektedir. ID araçları, bu mimarilerden yararlanarak, 3B modellerde çatlak tespitini oldukça etkili bir şekilde yapabilmektedir. Daha spesifik olarak, ID araçları çeşitli mimarilerden yararlanmaktadır. Komşuluk Birleştirme, PointNet++ algoritmasından yararlanmaktadır. PointNet++ algoritması, 3B nokta bulutlarında nesnelere tespit etmek için kullanılan bir derin öğrenme algoritmasıdır. PointNet++ algoritması, büyük bir nokta bulutunu daha küçük ve yönetilebilir parçalara ayırarak çalışır. Bu, hiyerarşik yapıda gerçekleşir ve her seviye, önceki seviyeden daha ince ayrıntılar çıkarır. Her seviye için, belirli sayıda merkez nokta seçilir. Bu merkez noktalar, nokta bulutunun bir alt kümesidir. Her merkez nokta için, belirli bir yarıçap içinde kalan komşu noktalar bulunur. Bu işlem, verilen Denklem 3.1'e dayanır. Yani, her merkez nokta için, belirli bir yarıçap içinde

kalan tüm noktalar komşu olarak kabul edilir. Eğrilik Tahmini algoritması ise PointNet algoritmasından yararlanmaktadır. PointNet algoritması, 3B nokta bulutlarında nesnelere tespit etmek için kullanılan bir derin öğrenme algoritmasıdır. Son olarak Çatlak Tespiti algoritması, eğrilik değerini belirlenen eşik değerine kıyaslayarak çalışır. ID araçları, sürekli olarak geliştirilmektedir. Araştırmacılar, çatlak tespitinin doğruluğunu ve verimliliğini iyileştirmek için yeni mimariler ve algoritmalar geliştirmektedir. Yukarıda verilen formüller, ID araçlarının matematiksel modelinin temelini oluşturur. Bu formüller, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz etmek ve çatlakları tespit etmek için kullanılır. Sonuç olarak bu algoritmalar ile 2B fotoğraflardan ziyade 3B model üzerinde konumlandırılmış fotoğraflardan bir bütün olarak otomatik çatlak tespiti gerçekleştirilmektedir. Elde edilen 3B model ve tespit edilen çatlaklar birleştirilerek (3B model + çatlak) farklı detay seviyesinde HADİ model üretilebilmektedir. Çalışmamızdaki HADİ model çıktımızın amacı, 3B modelden alınan geometrik verileri tanımlanmış ve ölçülmüş hasar verisi ile entegre etmektir.

3.4 Doğruluk Analizi

Çalışmada iki doğruluk analizi yapılmıştır. İlk analizde oluşturulan 3B modelin geometrik hassasiyeti incelenmiştir. Bu analiz, modelin koordinatlarının KN'ye göre doğruluğunun değerlendirilmesini kapsamaktadır. Referans verileri 3B modelin koordinatlarıyla karşılaştırılır ve hata hesaplanır. Referans ölçümleri olarak total-station ile ölçülen hedef işaretleri kullanılmış olup analizler Denklem 3.4 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her çalışma için farklı sayıda hedef işareti doğruluk analizinde kullanılmıştır. Referans veri ile Dİ modelinden elde edilen veri arasındaki fark, model konumunun referans noktasından ne kadar uzakta olduğunu göstermektedir. Bu hatayı ölçmek için Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) hesaplanmıştır. RMSE değerini hesaplamak için Denklem 3.6 kullanılmıştır. Bu değer ile hesaplanan 3B modelin doğruluğu hata değerinin azalmasıyla orantılıdır.

İkinci analiz olarak yüzeyde otomatik tespit yoluyla bulunan çatlakların güvenilirliğini değerlendirmek için doğruluk incelemesi yapılmıştır. Yüzeyden yapılan manuel ölçümler ile otomatik tespit yöntemiyle elde edilen çatlakların uzunlukları karşılaştırılmıştır

(Denklem 3.5). Yapı üzerindeki çatlaklara ilişkin referans veri toplama işlemi ölçüm araçları kullanılarak bir uzman tarafından manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Uzman operatörün ulaşamadığı çatlakların uzunluk değerleri model üzerinden analiz edilmiştir. Doğruluk analizi için Denklem 3.7 kullanılmış ve bir RMSE değeri hesaplanmıştır.

$$V_{x,y,z,i} = X, Y, Z_{TS_i} - X, Y, Z_{3Bmodel_i} \quad (3.4)$$

$$D_{\text{çatlak}_{man,oto}} = D_{\text{çatlak}_{man_i}} - D_{\text{çatlak}_{oto_i}} \quad (3.5)$$

$$RMSE_{V_{x,y,z}} = \sqrt{\frac{[VV]}{n-1}} \quad (3.6)$$

$$RMSE_D = \sqrt{\frac{[DD]}{n-1}} \quad (3.7)$$

Burada

x,y,z : kontrol noktalarının koordinatları

ts : Total-station ile ölçülen referans koordinatlar

$3Bmodel$: 3B model üzerinden alınan koordinatlar

i : tekrar eden ölçü

D : referans çatlak uzunluğu ile otomatik tespit edilen çatlak uzunluk farkı

man : Çatlakların manuel ölçüm değerleri

oto : Çatlakların otomatik olarak tespiti sonucu ölçülen uzunluk değeri

n : Kontrol noktası-hedef sayısı/Çatlak sayısını temsil etmektedir.

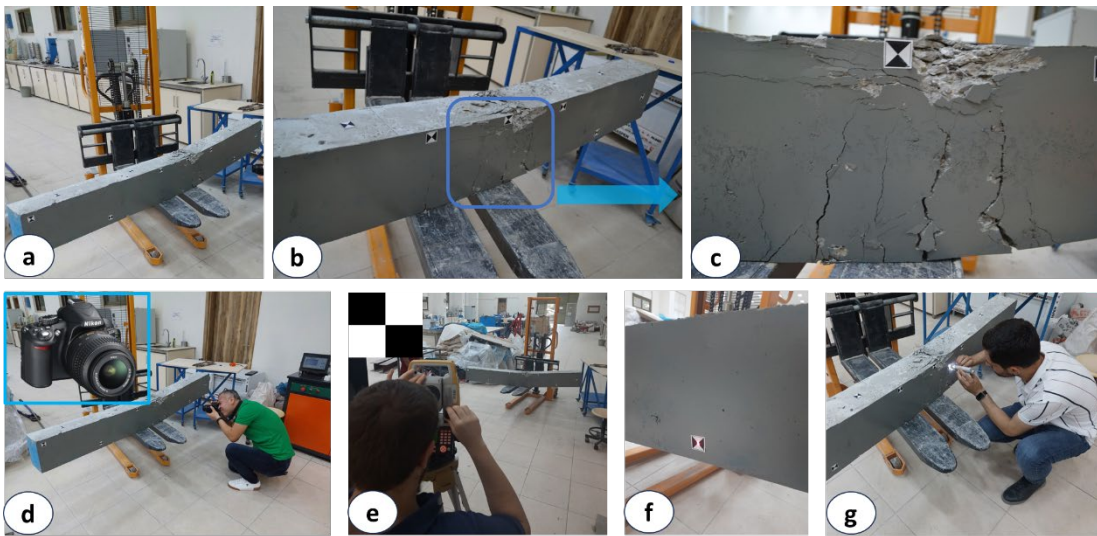
3.5 Çalışma Nesneleri ve Alanları

Bu kısımda ilk olarak çalışma nesneleri ve alanları tanıtılarak kullanılan donanımlar verilmiştir. Her çalışma nesnesi veya alanı için parametreler farklı olduğu için ayrı ayrı ele alınmıştır.

3.5.1 Kiriş Örneği

Çalışmamızın ilk uygulaması yakın mesafe fotogrametri tabanlı laboratuvar uygulamasıdır. Laboratuvarda modern bir kiriş yapısı uzmanlar gözetiminde yüksek basınca maruz bırakılmış ve oluşan çatlaklar önerilen yöntemle otomatik olarak tespit edilmiştir. Bu test sonucunda kirişin fotogrametrik 3B modeli üretilmiş ve çatlaklar otomatik olarak tespit edilerek HADİ model üretilmiştir. Seçilen kiriş 16x25x200 cm boyutlarındadır (Şekil 3.3/a). Bu obje basit geometrik formu (Şekil 3.3/b) ve modern yapı elemanını temsil etmesi nedeniyle seçilmiştir. Test nesnesindeki çatlaklar (Şekil 3.3/c) onu amaçlanan test yöntemi için ideal hale getirmektedir.

Testte, 14,2 Megapiksel DX-format sensöre (piksel boyutu 5,26 μm) sahip ve odak uzaklığı 35 mm Nikkor lense sahip Nikon D3100 marka dijital fotoğraf makinası kullanarak 27 fotoğraf çekilmiştir (Şekil 3.3/d). Fotoğraf çekim mesafesi yaklaşık 300 mm'dir. Bu da yaklaşık olarak 1:13'lük bir fotoğraf ölçeğine karşılık gelmektedir. Bu değer yaklaşık 0,06 mm/piksel yer örnekleme aralığı (YÖA) ile fotoğraf verisi elde etmemize imkân vermiştir. Önerilen yaklaşımda tespit edilen çatlakların hassasiyeti, kullanılan fotoğraf verilerinin kalitesiyle doğrudan bağlantılıdır. Uygulanan yöntem piksel başına 1 cm görüntü çözünürlüğü için maksimum YÖA değeri önerdiğinden testimizde fotoğraf verisi alımında bundan daha iyi YÖA değerleri sağlanmıştır.

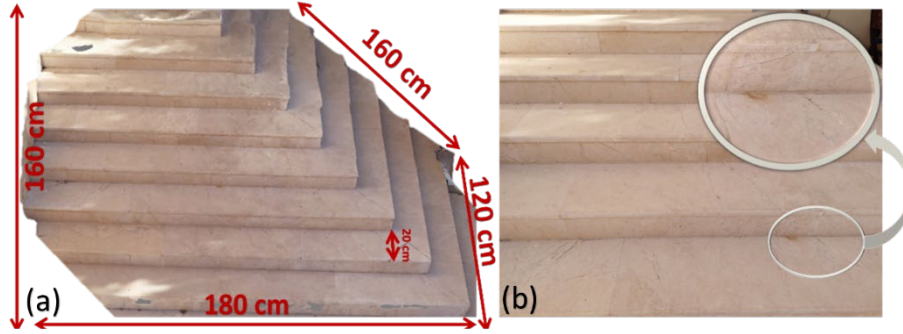


Şekil 3.3 Modern kiriş elemanı için veri toplama.

Fotogrametrik dengeleme sürecinde modeli referanslandırmak için YKN'lere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla giriş nesnesi için 6 YKN kullanılmıştır. Üretilen 3B modelin konumsal doğruluk ve geometrik hassasiyeti için 4 KN kullanılmıştır. Bu analiz, modelin koordinatlarının KN'ye göre doğruluğunun değerlendirilmesini kapsamaktadır. KN verileri 3B modelin koordinatlarıyla karşılaştırılır ve hata miktarı hesaplanır.

3.5.2 Merdiven Örneği

Çalışmamızın bu uygulama kısmında da yakın mesafe fotogrametri tabanlı test uygulaması gerçekleştirilmiştir. Testimizde modern bir binanın giriş kısmındaki merdiven elemanında meydana gelen çatlaklar önerilen yöntemle otomatik olarak tespit edilmektedir. Bu test sonucunda merdivenin elemanının fotogrametrik 3B modeli üretilmiş ve çatlaklar otomatik olarak tespit edilerek HADİ model üretilmiştir. Seçilen merdiven elemanı 180x160x120 cm boyutlarındadır (Şekil 3.4a). Test nesnesinin basit formu ve modern yapı elemanı olması çalışmamız için seçilmesinde etken olmuştur. Test nesnesindeki çatlaklar (Şekil 3.4 sağ) onu amaçlanan test yöntemi için ideal hale getirmektedir.



Şekil 3.4 Merdiven elemanının genel görünümü ve ayrıntılı bir kısım.

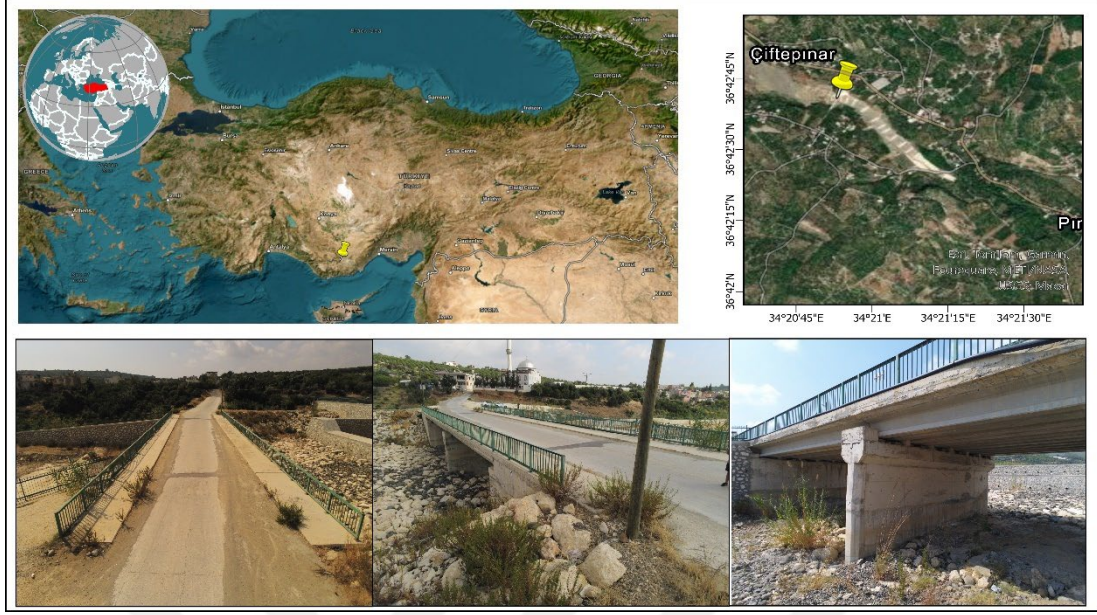
Testte, Nikon D3100 dijital kamera ile 35 fotoğraf verisi elde edilmiştir. Test nesnesi olarak seçilen merdiven elemanı, binanın dış bağlantısını oluşturduğu için gölge boyu az olması amacıyla güneş tam tepedeyken fotoğraflar çekildi. Fakat seçilen test alanının etrafındaki nesnelere dolayı tam olarak gölgelerden kaçınılamamıştır. Fotoğraf çekim mesafesi yaklaşık 50 cm olarak ayarlanmış olup yaklaşık 1:15'lik bir fotoğraf ölçeği ve 0,07 mm/piksel YÖA değeri elde edilmiştir.

Başlık 3.5.1’de gerçekleştirilen çalışmadaki gibi modeli referanslandırma ve doğruluk analizi için YKN ve KN’lere ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu çalışmada seçilen test nesnesi için çalışma ortamının dar olması alana hedef işaretlerini yerleştirememesine sebep olmuştur. Bu yüzden alanda doğal hedef işaretlerinden yararlanılmış ve köşe birleşim noktalarından 21 tane doğal hedef belirlenmiştir. Bunlardan on üç tanesi fotogrametrik hizalama için YKN olarak kalan diğer sekiz tanesi ise model doğruluğu için KN olarak kullanılmıştır. Çalışmada hedef ölçümü için Topcon ES-60 total-station kullanılmıştır. Fotogrametrik veriler elde edildikten sonra uzman mühendis gözetiminde test alanında manuel (Çatlak genişlik ölçer ve uzunluk ölçüm cihazı) bir şekilde seçilen bazı çatlaklarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler doğruluk analizi için klasik yöntemden elde edilen çatlak ile önerilen yöntemden tespit edilen ölçümlerin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

3.5.3 Elvanlı Köprüsü Örneği

İlk iki çalışma geometrik yapısı düzgün olan nesnelere seçilmiştir. Bu çalışmada ise geometrik yapısı karmaşık ve modellenmesi zor olan bir modern köprü seçilmiştir. Seçilen köprü, Mersin/Erdemli (Türkiye) merkezine 10 km mesafede bulunmaktadır (Şekil 3.5). Köprü, gelişmiş bir sahil kenti olan Erdemli ilçesini yaylalara bağlayan yol üzerinde güney-kuzey yönünde akan bir dere üzerine 2018 yılında inşa edilmiştir. Köprü, yaklaşık $36^{\circ}42'40.82''$ K ve $34^{\circ}20'53.06''$ D konumlarında yer almaktadır. Köprü yapısı, toplam uzunluğu 30 m ve genişliği 10 m olan, kirişlerle desteklenen iki açıklıktan oluşan ve nominal ömrü yaklaşık 50 yıl olan modern bir yapıdır. Seçilen köprü yapısındaki kolon ve kirişler, dikdörtgen kesitli betonarme elamanlardır.

Yapının topografyası genel olarak düz olmakla birlikte, yüksekliği bazı kısımlarda değişkenlik göstermektedir. Köprünün taban kolonları, ıslah edilmiş bir dere yatağında sağlam bir zemin üzerinde yer almaktadır. Tüm yapıyı yerinde görsel olarak inceleme imkânı olması, bozulma formlarının gözle görülen bir şekilde oluşması ve yapının nispeten yeni olması bu yapının seçilmesine neden olmuştur. Bu yapının seçilmesindeki en önemli faktör, tespit edilmesi zor olan az sayıda çatlak göstermesidir.



Şekil 3.5 Elvanlı köprü yapısının konumu.

Bu çalışmada ilk iki çalışmanın aksine İHA fotogrametrisi kullanılmıştır. Çünkü seçilen yapının fotoğraf çekimi yer merkezli olarak kısıtlı olarak elde edilebilmektedir. İHA ile havadan fotoğraf çekimi sayesinde bu kısıtlama ortadan kalkmaktadır. Bu yaklaşım, fotoğraf verilerinin avantajlı bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. İHA verileri, alçak irtifalarda uçabilmesi ve gelişmiş teknolojik görüntüleme sistemleri kullanabilmesi sayesinde uydu görüntülerinden ve insanlı hava araçlarından belirgin şekilde daha iyi çözünürlük ve daha ayrıntılı bilgi sunmaktadır (Hamal vd. 2020; Sarı vd. 2020). İHA'lar havadan fotoğraf çekimi için uzun süredir kullanılmaktadır. Mevcut İHA platformları genel olarak bir kamera, küresel navigasyon uydu sistemi içeren kapsamlı bir sistemdir. Bu özellik, fotogrametrik süreç söz konusu olduğunda kesin bir avantaj sağlar (Şenol ve Çöltekin 2022; Li vd. 2023). İHA fotogrametrisi büyük avantajlara sahip olmakla birlikte, İHA'nın yatırım maliyeti hariç tutulduğunda oldukça uygun maliyetli olmaktadır. Bu yöntemin avantajlarının yanında uçuş süresi ve uçuş izni gerekmesi dezavantaj oluşturmaktadır. Araştırma bölgesinin 3B modelini oluşturmak amacıyla havadan fotoğraf çekimi için Anafi Parrot İHA kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de Anafi Parrot'un teknik özellikleri verilmiştir.

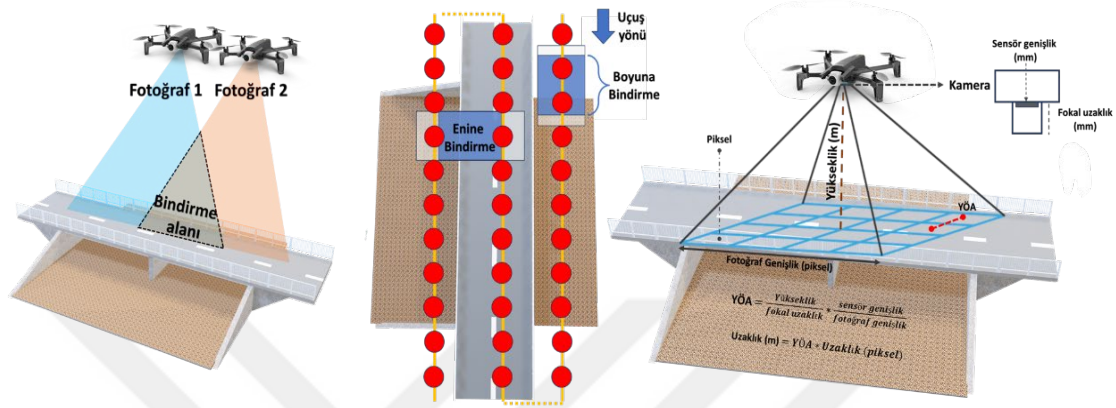
Çizelge 3.1 Çalışma da kullanılan İHA'nın temel teknik özellikler (Anafi, 2021).

| Özellik | Değer |
|-------------------------------|---|
| Boyutlar ve Ağırlık | 17,5 × 23,8 × 6,3 cm / 320 g |
| Maksimum yatay-dikey hız | 15.2 m/s - 4 m/s |
| Maksimum rüzgâr direnci | 50 km/h |
| Maksimum mesafe | 4000 m |
| RTK ile GPS | Hayır |
| Uydu Konumlandırma Sistemleri | GPS & GLONASS |
| Kamera modeli | Dahili fabrika kamera |
| Sensör | Sony 1/2.4" 21MP (5344 × 4016) CMOS |
| Piksel boyutu / Odak uzaklığı | 1.3 µm (0.00134424 mm) / 4 mm |
| Rotasyon | 180°, yani -90°den (nadir) +90°ye (zenit) |

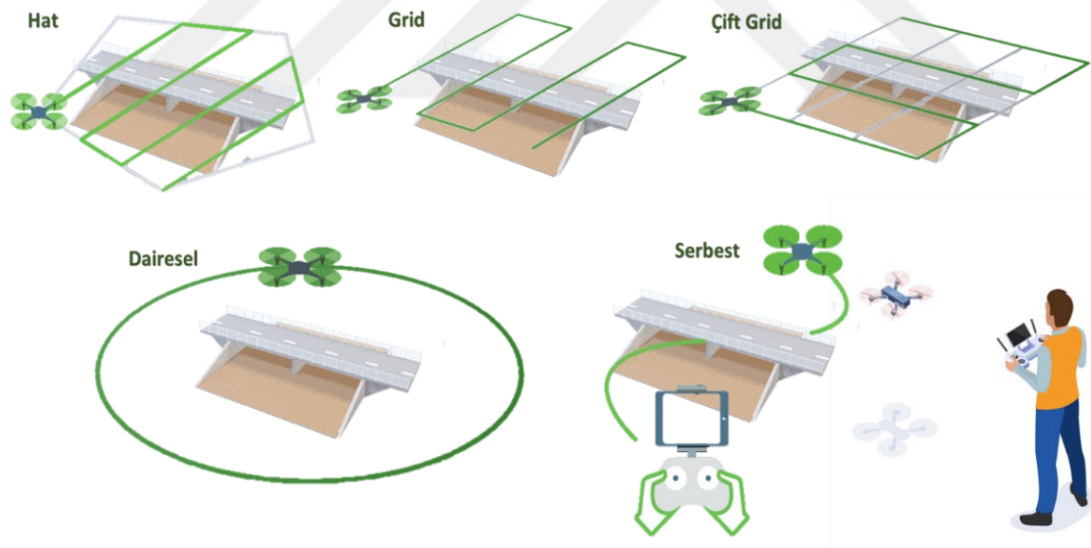
Önerilen İHA fotogrametrisi, çevresel koşullardan olumsuz etkilenebilir. Bu koşullar arasında, hedef nesnenin yakınında bulunan ağaçlar ve bitki örtüsü ile diğer yerleşim alanlarının oluşturduğu fiziksel engeller yer almaktadır. Özellikle, yakındaki diğer yapılar hedef yapının üzerine gölge düşmesine neden olarak fotogrametrik süreçte doğruluk kaybına ve veri bütünlüğünde bozulmalara yol açabilir. Bu durum, elde edilen görüntülerin kalitesini düşürmekte ve dolayısıyla modellenen nesnenin doğru ve ayrıntılı bir şekilde temsil edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum fotoğraflarda detayların görünürlüğünü olumsuz etkiler ve otomatik tespit çalışmalarında doğruluğu azaltır. Buna ek olarak, araştırma sahasında YKN için uygun bir alanın olmaması fotogrametrik dengeleme sürecinde YKN'lerin kullanılmamasına sebep olur ve geometrik doğruluk olumsuz etkilenebilir.

İHA ile fotogrametrik verilerin elde edilme süreci, üç ana faaliyetten oluşur. İlk olarak, uçuş planlaması yapılır. İkinci olarak, YKN'lerin tespiti, işaretlenmesi ve ölçümleri yapılır. Son olarak, planlanan şekilde uçuş gerçekleştirilir ve yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları çekilir. Bu süreçler, fotogrametrik verilerin doğru ve güvenilir bir şekilde elde edilmesi için kritik öneme sahiptir. Dijital fotogrametri ve SfM algoritması bağlamında YÖA değerine karşılık gelen uygun uçuş yükseklikleri önemli parametredir. Bu yüzden YÖA kavramı açıklanmalıdır. Şekil 3.6'da gösterildiği üzere YÖA, ardışık iki pikselin merkezleri arasındaki mesafenin arazideki karşılığıdır. Görüntü YÖA değeri ne kadar büyük olursa, görüntünün konumsal çözünürlüğü o kadar düşük olur ve ayrıntılar o kadar

az görünür (Hamal vd. 2020). Bu nedenle, en az iki fotoğraf farklı açılardan ve konumlardan çekilmeli ve bu fotoğraflar arasında yeterli bindirme alanı bulunmalıdır (Şekil 3.6). İHA ile fotoğraf çekiminde farklı amaçlar için alternatif uçuş planları tercih edilmektedir (Şekil 3.7).



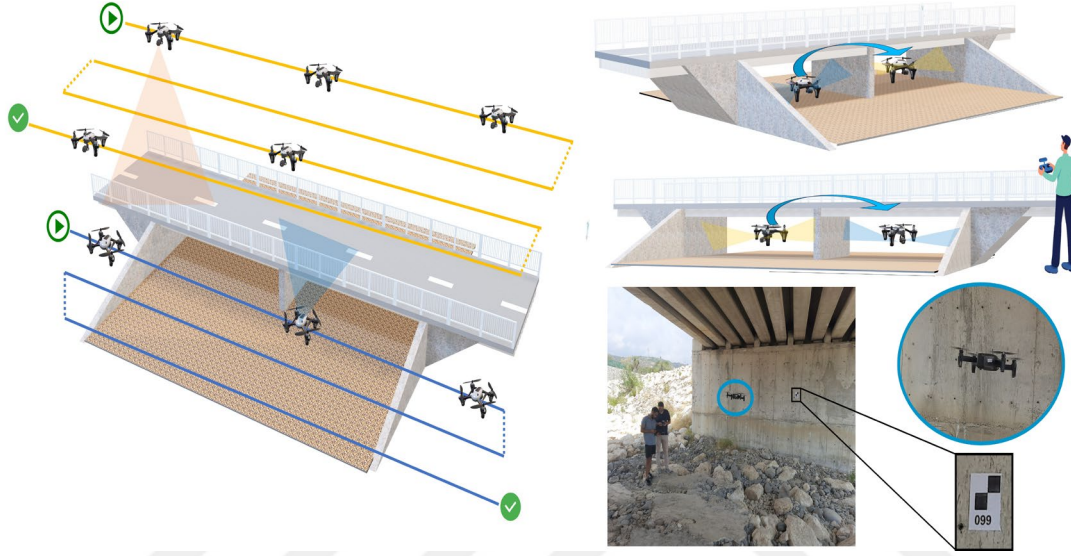
Şekil 3.6 Bindirme oranları ve YÖA.



Şekil 3.7 Uçuş planlamaları.

İHA'lar için temel otomatik uçuş planları grid ve çift grid olarak belirlenmiştir. Bu uçuş planlamalarında, belirli parametrelerin hassas bir şekilde ayarlanması gereklidir. Uçuş yüksekliği, uçuş hızı, kamera açıları ve pozisyonları, fotoğraflar arasındaki bindirme oranı, güneş yükseklik açısı ve aydınlatma koşulları, pusula kalibrasyonu ile uçuş rota ve deseni gibi belirli parametrelerin hassas bir şekilde ayarlanması gereklidir. Bu

parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, fotogrametrik verilerin doğruluğunu ve etkinliğini direkt etkiler. Bu çalışmada havadan fotoğraf çekimi için iki farklı uçuş stratejisi geliştirilmiştir. İlk strateji, yan ve üst cephelerde fotoğraf çekimi için kullanılan tam otomatik bir çift grid yaklaşımıdır. İkinci strateji ise köprünün alt kısımlarından veri elde etmek için kullanılan serbest uçuş planlama metodolojisidir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Köprü çalışmasında kullanılan uçuş planlaması.

Çalışmanın gerçekleştirildiği köprü yaklaşık 26 metre uzunluğunda bir otoyolda yer almaktadır ve ~12 metre yüksekliğe sahiptir. Otomatik uçuşlar %85 ileri (boyuna) ve %70 yan (enine) bindirme ile planlandı. Uçuş sırasında rüzgârın neden olduğu dönüşlerin etkisini en aza indirmek için rüzgâr hızının en düşük olduğu günde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ek olarak gölge alanlardan kaçınmak amacıyla güneş açısının dik olduğu öğle saatinde (yaklaşık 13:00) uçuşlar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yan ve üst cephe verileri için bir plan geliştirilmiş ve planlaması nispeten kolay olan üst cephe verileri için ilk uçuş tasarımı oluşturulmuştur ve çift grid uçuş planlaması seçilmiştir.

İlk uçuş planlamasında yerde 20 metre yükseklikten nadir'denyaklaşık 0.71 cm/piksel YÖA ile 8 dakikada toplam 72 hava fotoğrafı çekilmiştir. Yan cepheler için 45 derecelik bir açıyla fotoğraflar çekilmiştir. Bu fotoğraflar köprüden yaklaşık 5 metre uzaklıkta (yaklaşık 0,21 cm/piksel YÖA) bir çift grid boyunca çekilmiştir. Köprüye ait tüm detayları elde etmek için, geleneksel standart uçuş planlamasına ek olarak kademeli bir

şekilde irtifanı artırıldığı uçuş planlaması formüle edilmiştir. Tam olarak yer zemininden sırasıyla 5, 10, 15 metre olmak üzere üç farklı yükseklikten yüz dört eğik hava fotoğrafı elde edilmiştir. Bu fotoğraflar aynı açılarda ve aynı blok yönünde çekilmiştir. Üst ve yan cepheler için tamamen otonom bir uçuş planı kullanılmış olup toplam 176 hava fotoğrafı elde edilmiştir.

SfM algoritmasını kullanan dijital fotogrametri yazılımları herhangi bir referanslama girdisi olmadan model üretebilmektedir. Fakat bu şekilde üretilen dijital çıktılar rastgele bir koordinat sisteminde olduğundan gerçek ölçeğinde değildir. Gerçek ölçekte olmayan dijital ürünlerin denetimler için çok az değeri vardır. Bu yüzden tam ve doğru bir ölçekte model oluşturmak için çalışma alanına YKN'larının tesisi, işaretlenmesi ve ölçümü yapılmalıdır melidir (Şekil 3.9). Köprü üzerine üç metre aralıklarla 10 adet, köprü'nün tüm cephelerinde ise 26 adet YKN yerleştirilmiştir. Bu noktalardan uygun olanlar fotogrametrik dengelemede diğerleri ise 3B modelin konum doğruluğunu analiz etmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.9 Köprü yapısı için arazi çalışması sırasında YKN ve KN ölçülmesi.

3.5.4 Mezgit Kale Örneği

Bu çalışmada ise geometrik formu düzgün olmayan ve kompleks yapıdaki tarihi bir yapı seçilmiştir. Çalışma alanı, Türkiye'nin Mersin ilinin Silifke ilçesine bağlı Öztürkmenli köyünde yer alan Mezgit Kalesi'dir. Kale veya anıt olarak anılan bu yapı, Paslı

mahallesinin 2 kilometre güneydoğusunda ve ilçe merkezine 6 kilometre uzaklıkta bir tepe üzerinde yer almaktadır. Anıt, ilçe merkezine yaklaşık 30 km uzaklıktadır ve $36^{\circ}28'01.3''$ "K enlemi $34^{\circ}01'37.3''$ "D boylamı coğrafi koordinatlarına sahiptir (Şekil 3.10). Kale, daha önce Doğu Dağlık Kilikya olarak bilinen bölgede yer almaktadır. Bölgede çok sayıda Roma evi, sarnıç, mezar kalıntıları ve bir nekropol bulunmaktadır. Mezgit Kalesi yerel olarak "Korkusuz Kralın Mozolesi" olarak bilinmektedir. Milattan sonra 2. veya 3. yüzyıla ait olduğu düşünülen bu Roma mozolesi son derece iyi korunmuş durumdadır. Yapının ismi bir krala ait bir kale olabileceğini düşündürse de Romalı bir toprak sahibi tarafından aile üyeleri için inşa edilmiş bir anıt mezar olduğuna inanılmaktadır. Romalı bir toprak sahibi tarafından 2. ya da 3. yüzyılda aile üyeleri için yaptırılmış bir anıt mezar olduğu da düşünülmektedir (Kerem 2007; RTMCT 2023).



Şekil 3.10 Mezgit Kalesi'nin konumu ve topografik yapısına genel bir bakış.

Araştırma bölgesinin hava fotoğrafları için Anafi Parrot İHA kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de Anafi Parrot'un teknik özellikleri verilmiştir. Daha önce açıklandığı gibi İHA fotogrametrisi veri toplaması üç aşamadan oluşmaktadır. Bu amaçla ilk önce bu çalışma alanı için uçuş planı geliştirilmiştir (Şekil 4.28). Araştırma alanı başlangıçta ölçülmüş ve yaklaşık 11 metre yükseklik tespit edilmiştir. Gerekli hava fotoğrafları nadir perspektiften (yaklaşık 90°) değil eğik olarak çekilmiştir. Amaçlanan sonuca ulaşmak için eğik fotoğraflar yaklaşık 45° bir açıyla çekilmiştir. Bu fotoğraflar, tarihi yapıya yaklaşık 10 metre mesafe bırakılarak bir çift grid boyunca çekilmiştir. İstenen çıktıyı elde etmek için

geleneksel standart hava uçuş planından farklı olarak kademeli bir şekilde artan irtifayı seçen uçuş stratejisi oluşturulmuştur. Açıklığa kavuşturmak için, fotoğraflar amaçlanan yöne ve engele göre 5 metrelik dikey bir mesafeden çekilmiştir. Tam olarak 10, 15 ve 20 metre olmak üzere üç farklı yükseklikten 155 eğik hava fotoğrafı elde edilmiştir. Bu fotoğraflar aynı açılarda ve aynı blok yönünde çekilmiştir. Fotogrametri tekniğinin ışığa bağımlı olmasından dolayı gölge etkisinden kaçınmak için fotoğraf çekimi gün içinde 11:00 ile 13:00 arasında gerçekleştirilmiştir. Uçuş sırasında rüzgârın neden olduğu dönüşlerin etkisini en aza indirmek için bölgedeki ortalama rüzgâr hızının en düşük olduğu güne planlanmıştır.



Şekil 3.11 GNSS alıcısı ve Total-station ile hedeflerin ölçülmesi ve saha çalışması.

Kapsamlı ve doğru bir modelin geliştirilmesini sağlamak için, belirlenen çalışma alanı içindeki YKN ve KN, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi Total-station ve GNSS alıcıları gibi doğru ölçüm donanımları kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen 3B modeli yer merkezi ile hizalamak için toplam sekiz hedef stratejik olarak zemine yerleştirilmiş ve her hedef arasında yaklaşık beş metrelik bir mesafe sağlanmıştır. Buna ek olarak dış duvar boyunca on altı YKN titizlikle yerleştirilmiş ve yatay yönde en az iki YKN olmasına dikkat edilmiştir. Bu çalışma da geometrik doğruluk analizinin yanında her bir yüzeyde otomatik olarak tespit edilen çatlakların doğruluğunu incelemek için ikinci bir doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Yüzeylerden alınan manuel ölçümler, otomatik tespit yoluyla elde edilen vektör verileriyle karşılaştırılmıştır.

3.5.5 Kebir Kayası Örneği

Bu uygulama, tarihi ve modern yapıların aksine bir yapıyı değil, kentsel bütünlük ve bazı durumlarda insan hayatı için risk oluşturan kaya kütesini içermektedir. Kentsel alanlarda bütünlüğü bozan kaya kütlelerindeki çatlaklar sel ve diğer doğal afetlere karşı direnci zayıflatmaktadır. Dolayısıyla incelenmesi gereken diğer yapısal unsurlardan biri olduğu için bu uygulamanın yapılması gerekli görülmüştür. Kaya kütlelerindeki çatlaklar, kaya kütlelerinin zayıflamasına ve çökmesine neden olabilir, bu da potansiyel olarak can ve mal kaybına yol açabilir. Sonuç olarak yukarıda bahsedilen riskleri azaltmak için çatlakların erken tespiti ve izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Çalışma alanı olarak belirlenen kaya kütesi, Mersin iline bağlı Silifke ilçe merkezinin kuzey kesiminde yer almaktadır (Şekil 3.12). Kaya kütesi şehir merkezinde $36^{\circ}22'35.46''K$ enlemi ve $33^{\circ}55'17.54''D$ boylamında yer almakta olup çevresi Akdeniz İklimi ile karakterize edilmiştir. Çalışma alanında bulunan Ecemiş fay zonu ve sinistral fay bölgenin jeomorfolojisini oluşturmaktadır. Seçilen kaya kütesi ağır çatlaklıdır ve kayanın alt kısmında bulunan kentleşme ve yollar için önemli bir tehdit oluşturmaktadır ve bu yüzden bu çalışma kapsamında Kebir Kaya olarak anılan kayaç kütesi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışma da İHA fotogrametrisi uygulanmış olup diğer çalışmalarda kullanılan İHA hava fotoğraf verileri için kullanılmıştır. Eğimli bir zeminde bulunan ve yaklaşık 4 metre yükseklikte düzensiz bir yapıda olan kaya kütesi yaklaşık 40 metrekarelik bir alan kaplamaktadır.



Şekil 3.12 Kebir Kaya'nın konumu ve alanın genel görünümü.

4. BULGULAR

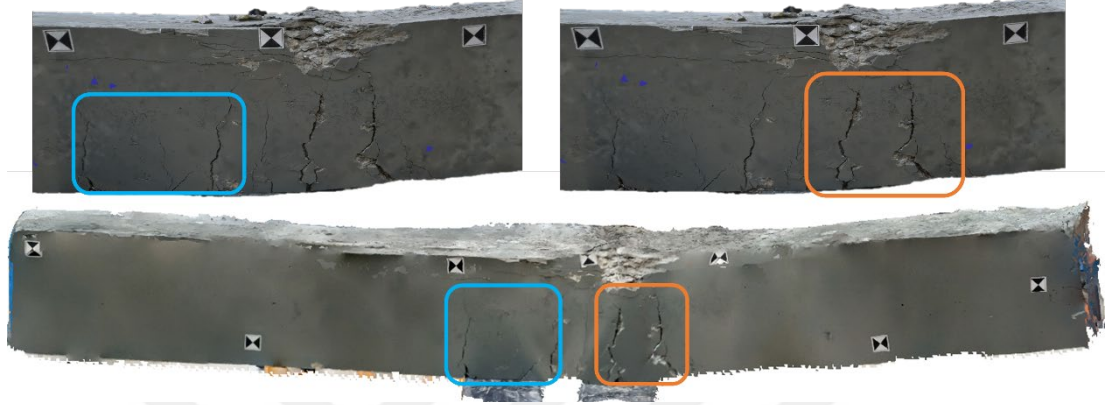
Bu araştırma, fotogrametri ile üretilen 3B modeller ile yapıdaki çatlakların otomatik olarak tespiti sonrası bu verilerin entegrasyonu ile HADİ model üreterek yapısal denetimlere yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Önerilen teknik ilk olarak laboratuvarında incelenmiş ve daha sonra farklı yapılar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada hem yakın mesafe fotogrametri hem de İHA fotogrametrisi kullanılmıştır. Her çalışmaya ait bulgular ayrı başlık altında verilmiştir. Çalışmalara ait bulgular sırasıyla 3B model üretme, otomatik çatlak tespiti, HADİ model üretme, doğruluk analizi ve SG entegrasyonu olarak verilmiştir.

4.1 Giriş Örneği

Bu çalışma için yakın mesafe fotogrametri tekniği kullanılmıştır. Giriş nesnesine ait fotoğraflar çekilirken başlangıç noktası belirlenip saat yönünde ilerleme kaydedilmiştir. Ortamın ışık yoğunluğuna dikkat edilerek veriler toplanmıştır. Fotoğraf çekiminde her bir ardışık fotoğrafın boyuna ve enine bindirmeleri manuel olarak ayarlanmıştır. Testte, dijital fotoğraf makinası kullanarak 27 fotoğraf çekilmiştir (Şekil 3.3/d). Fotoğraf alma mesafesi yaklaşık 300 mm'dir, bu da kabaca 1:13'lük bir fotoğraf ölçeği ve yaklaşık 0,06 mm'lik bir YÖA ile veri toplamamıza imkân vermiştir. Önerilen yaklaşımda tespit edilen çatlakların hassasiyeti, kullanılan fotoğraf verilerinin kalitesiyle doğrudan bağlantılıdır. Uygulanan yöntem piksel başına 1 cm fotoğraf çözünürlüğü için maksimum YÖA değeri önerdiğinden, testimizde fotoğraf verisi alımında bundan daha iyi YÖA değerleri için veri toplanmıştır.

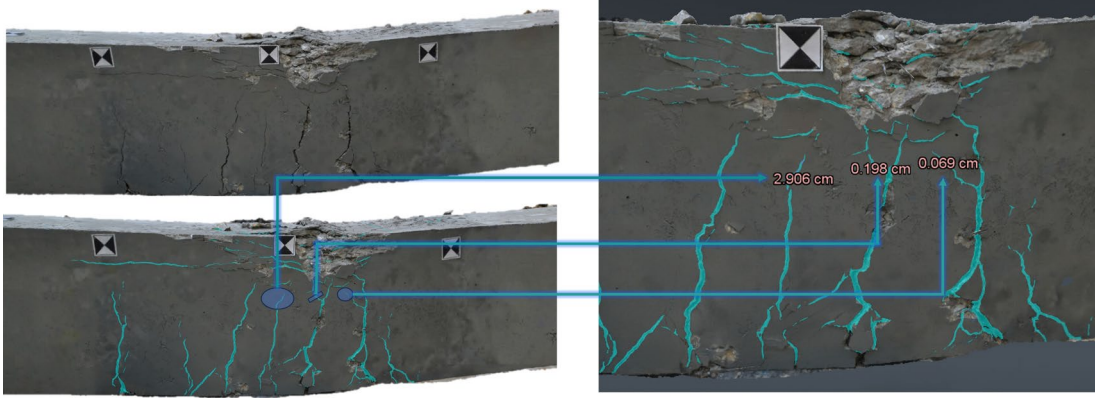
Bu araştırma ve diğer tüm araştırmalarda, fotogrametri tekniği ve SfM algoritması ile 3B model üretmek için Context Capture yazılımı kullanılmıştır. Sürecin tamamlanması giriş nesnesi için yaklaşık 4 saat sürmüştür. Fotoğraflar, çekim sırası dikkate alınarak yazılıma aktarılmış ve süreç başlatılarak fotoğraflar hizalanarak ön model oluşturulmuştur. Fotoğrafları hizalama sürecinde nesne yüzeyinde tanımlanan 6 YKN hizalama işleminde ölçeklendirme ve referanslandırma amacıyla kullanılmıştır. Bununla birlikte, model doğruluğu için belirlenen KN noktaları hizalama için kullanılmamıştır. Bu işlemden sonra

yoğun nokta bulutu ve 3B model üretilmiştir. Fotogrametrik hizalamadan sonra modelin iç doğruluğu 0.491 cm bulunmuştur. Oluşturulan 3B modelin YÖA değeri 0.071 mm/piksel'dir. Şekil 4.1'de üretilen yüksek çözünürlüklü 3B doku modelleri verilmektedir.



Şekil 4.1 Kiriş nesnesinin 3B doku modelinin detaylı görüntüsü.

Şekil 4.1'de gösterilen yüksek kaliteli 3B model üretildikten sonra otomatik çatlak tespiti işlemine geçilmiştir. SfM algoritması ile oluşturulan 3B modelin çatlaklarını elde etmek için kullanılan yöntem, ilk görünümün görüntüsü üzerinde eğitilmiş makine ve derin öğrenme modellerini kullanarak cephe segmentasyonu (açıklık köşelerinin belirlenmesi) gerçekleştirmeyi içerir. Belirlenen açıklıkların köşeleri daha sonra ilk görünümünden ikinci görünüme aktarılarak ilgili köşeler tespit edilir. Bu çalışmada kullanılan ID araçları, çatlakların boyutunu, derinliğini ve konumunu değerlendirmede kullanılmıştır. ID araçlarının matematiksel modeli (detaylı bilgi için başlık 3.3'e bakınız), 3B modeldeki yüzey eşitsizliklerini analiz eden bir dizi algoritma içermektedir. Bu algoritmalar çatlakları tespit etmede son derece yetkindir. Bu araçlar çatlakların boyutlarını, derinliğini ve yerleşimini ölçmeye yardımcı olabilir. Hasarla artırılmış Dİ çıktısı, 3B modelden alınan geometrik bilgileri haritalanmış ve karakterize edilmiş hasarla birleştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen yaklaşım sayesinde 3B modeldeki çatlaklar otomatik olarak tespit edilmiştir. Bu yöntemin başarısı Bentley'in ürettiği ve çalışmamızda eğitim için kullanılan kütüphane aynı özelliklere sahip fotoğraflar ile bizim verimize ait bilgilerin ilişkisine bağlıdır. Şekil 4.2'de kiriş nesnesine ait çatlakların görüntüsü ve uzunluklarının ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Kiriş nesnesinin çatlakları ve çatlak uzunluğu ölçümleri.

Tespit edilen çatlaklar daha sonra otomatik olarak vektörleştirildi. Modelimiz tamamen ölçeğe ve koordinatlara referanslandırılmıştır ve vektörleştirilen çatlakların CAD ortamında 3B koordinat sistemine sahip olmasını sağlamıştır. Kiriş nesnesinin 3B modelinin geometrik doğruluğu bölüm 3.4’te detaylı olarak anlatılan yöntem ve denklemlere göre analiz edilmiştir. Referans veriler ile karşılaştırma sonucu 3B modelin doğruluk analizi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

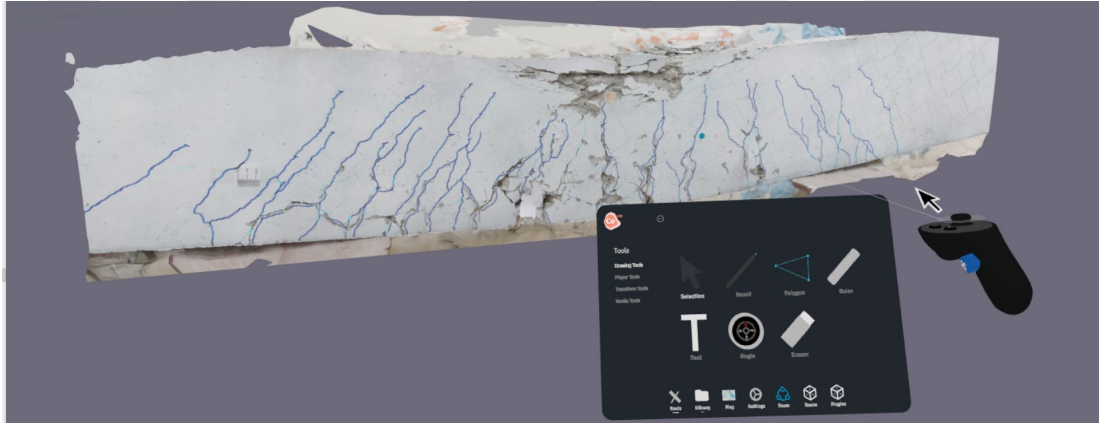
Çizelge 4.1 Kiriş nesnesi için 3B modelin doğruluk analizi.

| No | Vx (cm) | Vy (cm) | Vz (cm) | RMSE _{x,y,z} (cm) |
|-----|---------|---------|---------|----------------------------|
| KN1 | -0.014 | 0.028 | 0.084 | 0.052 0.082 0.140 |
| KN2 | 0.048 | -0.128 | -0.258 | |
| KN3 | -0.026 | 0.048 | 0.017 | |
| KN4 | 0.087 | 0.087 | -0.069 | |

İkinci metrik analizde ise otomatik tespit edilen çatlakların uzunluğu ile manuel olarak ölçülen çatlakların uzunluğunu karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmada kiriş nesnesinin Şekil 3.3/g’de gösterilen çatlak uzunlukları manuel olarak ölçülmüş ve bu veriler referans veri olarak kullanılmıştır. Uzman gözetiminde kiriş nesnesi için toplam 10 adet çatlak uzunluğu karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. HADİ model için gerçekleştirilen iki doğruluk analizinden sonra üretilen HADİ model SG platformuna aktarılmıştır. Bu kısım üçüncü çalışma olan köprü yapısında daha detaylı anlatılacaktır. Bu yüzden bu kısımda sadece SG platformuna aktarılan modelin görüntüsü verilmiştir (Şekil 4.3).

Çizelge 4.2 Kiriş nesnesinde otomatik tespit edilen çatlaklar için doğruluk analizi.

| Çatlak No | Geleneksel Ölçüm (cm) | Otomatik Tespit (cm) | $ D_i $ (cm) | RMSE _D (cm) |
|-----------|-----------------------|----------------------|--------------|------------------------|
| 1 | 0.62 | 0.70 | -0.08 | |
| 2 | 0.84 | 0.68 | 0.16 | |
| 3 | 3.47 | 3.55 | -0.08 | |
| 4 | 12.84 | 12.8 | 0.04 | |
| 5 | 6.23 | 6.48 | -0.25 | |
| 6 | 4.58 | 4.35 | 0.23 | 0.123 |
| 7 | 1.68 | 1.86 | -0.18 | |
| 8 | 0.86 | 1.02 | -0.16 | |
| 9 | 6.45 | 6.40 | 0.05 | |
| 10 | 0.24 | 0.40 | -0.16 | |

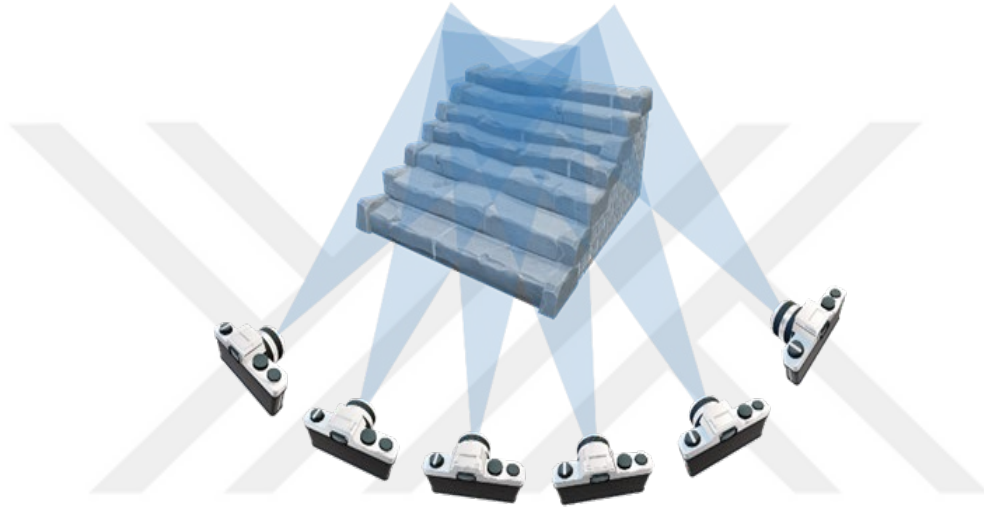


Şekil 4.3 Kiriş nesnesinin 3B Dİ modelinin SG platformunda sunulması.

Test çalışmasında Çizelge 4.2 incelendiğinde elde edilen sonuçlar, metodolojimizin tüm bileşenlerinin etkili bir şekilde işlediğini doğrulamaktadır. Metodolojinin etkinliği büyük ölçüde fotoğraf verilerinin kalitesine bağlıdır. Fotoğraf boyutları, çözünürlük, bulanıklık ve bozulma gibi faktörlerin etkisi dikkate alınmalıdır. Çalışmamızın sonuçlarının kesinliği, segmentasyon tekniklerinde kullanılan SfM ve derin öğrenme algoritmalarının etkinliğine de bağlıdır. Modellerimizi eğitmek için kullanılan verilerin ve ek açıklamaların kalitesi ve miktarı derin öğrenme sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Sonuç olarak, çatlak segmentasyonunda yanlışlıklar ve belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu durum, önceden eğitilmiş modellerin kullanılmasına bağlanmaktadır. Sonuçlar, geliştirilmiş derin öğrenme modellerinden ve manuel müdahale veya otomatik eleme yoluyla çatlak olarak belirlenen hatalı verilerin hariç tutulmasından kazanç sağlamaktadır. Amaç, hızlı hasar tespiti için mevcut uygulamayı iyileştirmektir.

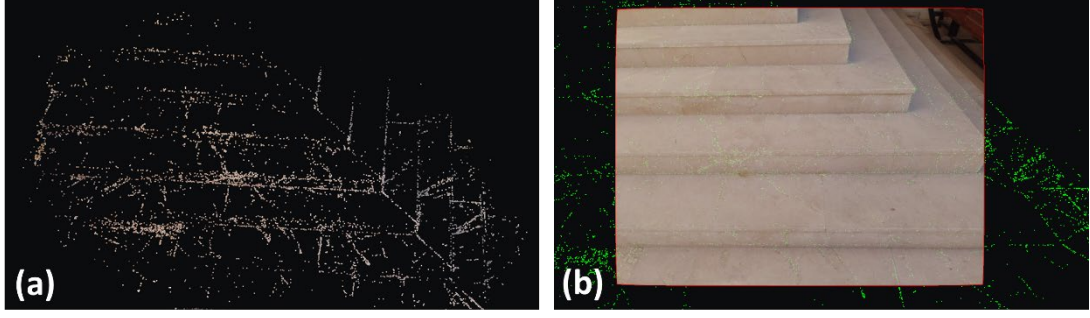
4.2 Merdiven Örneği

Tez çalışmasında önerilen teknik modern bir yapının giriş kısmında bulunan merdiven basamakları üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada, 3B model üretiminde yakın mesafe fotogrametrisi kullanılmıştır. Test alanının fotoğrafları manuel bir şekilde ortalama %80 boyuna ve enine bindirme olacak şekilde çekilmiş olup Şekil 4.4'te gösterildiği gibi çekim planı gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf çekim süresi yaklaşık 10 dakika sürmüştür.



Şekil 4.4 Yakın mesafe fotogrametrisine uygun fotoğraf çekim senaryosu.

Test nesnesinin fotogrametrik olarak işlenmesi yaklaşık iki saat sürmüştür. Fotogrametrik dengelem sürecinde nesne yüzeyinde tanımlanan 13 YKN kullanılmıştır. Hedef işaretleri test nesnesi boyunca doğal köşe birleşim noktalarından eşit olacak şekilde seçilmiştir. Hizalama işleminde gerekli olan kamera parametreleri yazılımın kütüphanesinden otomatik olarak içe aktarılmıştır. Fotoğraf hizalamasının ardından algoritma bir ön model (seyrek nokta bulutu) oluşturmuştur (Şekil 4.5). Test nesnesi için 3B modelin hata değeri KN aracılığıyla belirlenmiştir. Gerçek fotoğraflardan üretilen 3B modellerin kalitesi test nesnesi için ortalama 0,088 mm/piksel YÖA ile oluşturulmuştur. YÖA değeri ne kadar kaliteli olursa, algoritma o kadar doğru çalışmaktadır. Oluşturulan ön modelden sonra yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur ve ardından yüksek çözünürlüklü fotorealistik 3B modeli üretilmiştir (Şekil 4.6). Fotogrametrik hizalama sonrasında modelin iç doğruluğu 0.712 cm bulunmuştur. Yüksek kaliteli 3B model üretildikten sonra çatlaklar otomatik olarak tespit edilmiştir ve Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Seyrek nokta bulutu (a) ve fotoğraf üzerinde ortak eşleşen noktalar (b).



Şekil 4.6 Merdiven yapısının 3B model genel görünümü ve yakın gösterimi.



Şekil 4.7 Merdiven için otomatik tespit edilen çatlakların (mavi çizgiler) gösterimi.

Modelin geometrik analizi, materyal ve metot bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Analizde doğal hedefler kullanılmış olup KN olarak tanımlanan sekiz hedef doğruluk analizinde kullanılmıştır. Doğruluk analizi Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Çizelge 4.3, test nesnesi için üretilen 3B modelin doğruluk değerlerini göstermektedir. Test nesnesi, Çizelge 4.3'e göre oldukça yüksek doğrulukta üretilmiştir. Bu doğrulukta 3B model üretmenin başlıca nedeni test nesnesinin boyutunun küçük olması, karmaşıklığının oldukça az olması ve fotoğrafların oldukça yüksek çözünürlükte olması gösterilebilir.

Çizelge 4.3 Merdiven yapısı için üretilen 3B modelin geometrik doğruluk analizi.

| No | Vx (cm) | Vy (cm) | Vz (cm) | RMSE _{x,y,z} (cm) | | |
|-----|---------|---------|---------|-------------------------------|-------|-------|
| KN1 | -0.100 | 0.180 | 0.380 | 0.859 | 1.353 | 0.825 |
| KN2 | 0.370 | -2.800 | -1.280 | | | |
| KN3 | -0.120 | 0.210 | 0.120 | | | |
| KN4 | 0.240 | 0.480 | -0.320 | | | |
| KN5 | -2.300 | 1.800 | 0.840 | | | |
| KN6 | 0.160 | -0.780 | -1.320 | | | |
| KN7 | -0.270 | 1.620 | 1.020 | | | |
| KN8 | 0.540 | 0.120 | -0.240 | | | |

HADİ modeldeki çatlakların ilk olarak görsel incelemesi yapılmıştır. Çatlakların neredeyse tamamı tespit edilse de özellikle gölgenin düştüğü alanlarda eksik tespitler mevcuttur. Metrik analizde ise manuel olarak ölçülen belirli çatlakların uzunluğu ile HADİ modelden ölçülen uzunluklar karşılaştırılmıştır. Test nesnesi için toplam on çatlak uzunluğu uzman rehberliğinde karşılaştırma için değerlendirilmiştir ve sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Merdiven yapısı için tespit edilen çatlakların doğruluk analizi.

| Çatlak No | Klasik ölçüm (cm) | Otomatik tespit (cm) | D _i (cm) | RMSE _D (cm) |
|-----------|-------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0.620 | 0.700 | -0.080 | 0.097 |
| 2 | 4.850 | 4.768 | 0.082 | |
| 3 | 10.640 | 10.556 | 0.084 | |
| 4 | 4.910 | 4.868 | 0.042 | |
| 5 | 4.680 | 4.486 | 0.194 | |
| 6 | 8.070 | 8.156 | -0.086 | |
| 7 | 5.260 | 5.364 | -0.104 | |
| 8 | 7.090 | 7.020 | 0.070 | |
| 9 | 6.450 | 6.400 | 0.050 | |
| 10 | 15.370 | 15.468 | -0.098 | |

HADİ model son olarak WEB tabanlı SG platformuna aktarılmıştır. Bu sayede uzmanlar yerinde incelemelere alternatif olacak denetimler gerçekleştirebilmiştir. WEB tabanlı SG, platformları indirme ve kurulum gerektiren lokal SG uygulamalarının aksine kolay erişilebilirlik sunmaktadır. WEB tabanlı SG'ye bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir ve bu da kullanıcıların SG deneyimlemesini kolaylaştırır. Ek olarak WEB tabanlı SG, gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik dağıtımını açısından daha fazla esneklik sunar. Yüksek performanslı cihazlara duyulan ihtiyaç ve yüksek internet hızları gibi ele alınması gereken zorluklar olsa da fotogrametri yöntemiyle üretilen HADİ modellerin WEB tabanlı SG temsilinin geleceği umut verici görünmektedir. Çalışmada üretilen yüksek kalitede fotorealistik HADİ model, WEB tabanlı SG platformu Sketchfab'a (yöntem kısmında belirtilen sebepler dikkate alınarak) yüklenmiştir (Şekil 4.8). Şekil 4.8'de verilen sanal platformdaki Dİ'ler hem karekod (<https://skfb.ly/oh7rx>) okutularak WEB tabanlı görselleştirilebilir hem de SG'de kullanılabilir.



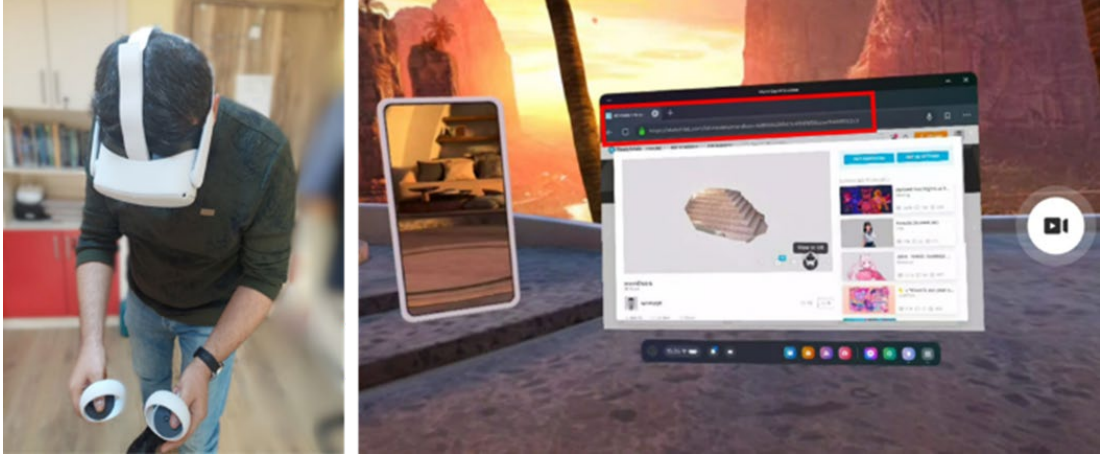
WEB tabanlı Görselleştirme Linki

<https://skfb.ly/oh7rx>



Şekil 4.8 Merdiven için HADİ modelinin WEB tabanlı SG bağlantısı.

WEB tabanlı platforma yüklenen HADİ model SG başlığında bir tarayıcında adres çubuğuna Şekil 4.9'da gösterildiği gibi girilerek platforma giriş yapılabilir. Platforma giriş yapıldıktan sonra SG giriş sekmesine (View in VR) tıklanarak Şekil 4.10'da gösterilen arayüze erişim sağlanabilmektedir. Bu sayede WEB tabanlı SG platformunda HADİ model ile yapısal denetim uzmanlar tarafından yapılabilmektedir.



Şekil 4.9 Merdiven yapısının SG başlığı ve WEB tabanlı SG arayüzü.



Şekil 4.10 WEB tabanlı SG’de merdiven için HADİ ile yapısal denetim.

4.3 Elvanlı Köprüsü Örneği

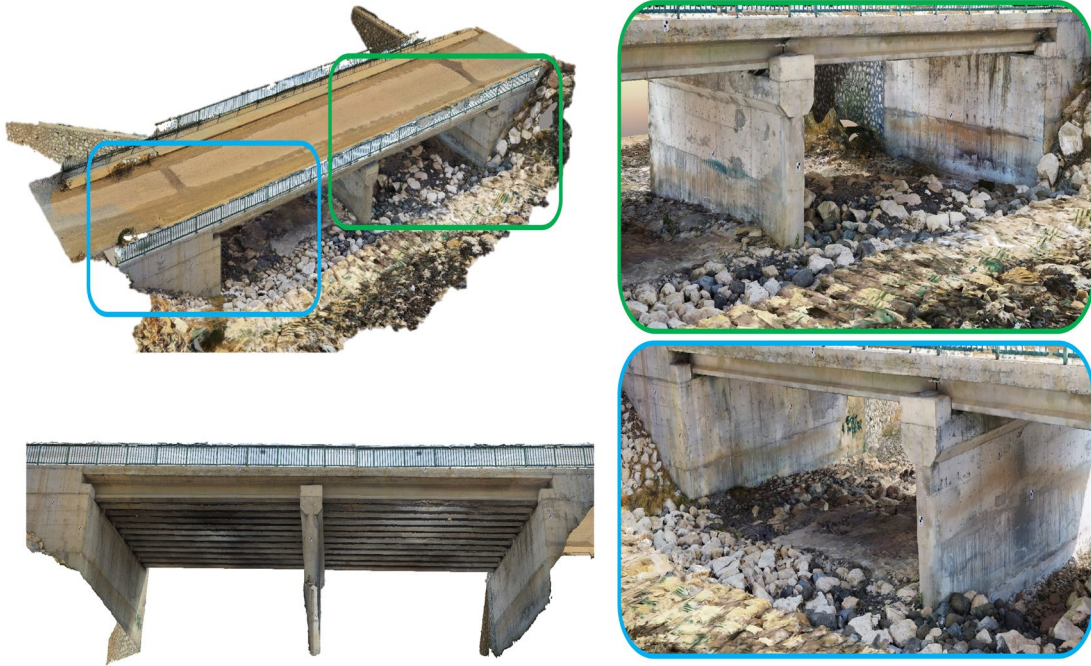
Bu çalışma ise oldukça karmaşık formda ve veri toplaması zor olan köprü yapısında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada İHA fotogrametrisi kullanılmıştır. Önerilen yöntem için kullandığımız kütüphane ve ID aracının optimum seviyede çalışabilmesi için fotoğraf çözünürlüğünün yaklaşık 1 cm/piksel olması gerekmektedir. Bu yüzden fotoğraf çekilirken planlanan uçuş stratejisi buna uygun olarak tasarlanmıştır. Sonuç olarak iki aşamada gerçekleştirilen ve Şekil 3.7’de gösterilen uçuş planlamasına (çift grid ve serbest uçuş planı) göre istenilen çözünürlükte fotoğraflar elde edilmiştir. Fotoğraf verilerine ait

bilgiler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Fotoğraf kalitesi önemli olduğu aşıkardır ve bu yüzden kaliteli fotoğraf elde edebilmek için gerekli donanıma sahip olmak gerekmektedir. Çalışmada kullanılan İHA'ya seçme sebebi daha önce açıklansa da bu İHA'yı kullanmamızın temel nedeni geniş kamera dönüş açısına sahip olması ve bizim için gerekli olan çözünürlükte sensöre sahip olmasıdır. Kullanılan İHA'nın geniş açılı kameraya sahip olması özellikle köprünün alt kısımlarında büyük avantajlar sağlamıştır.

Veri toplamadan sonra ilk aşama fotogrametrik yazılımda 3B nokta bulutu ve fotorealistik 3B model elde edilmiştir (Şekil 4.11-4.12). Fotogrametrik hizalama sonucunda 3B modelin iç doğruluğu 1.024 cm bulunmuştur.

Çizelge 4.5 İHA ile hava fotoğrafları toplamak için uçuş parametreleri.

| Uçuş planı | Uçuş yüksekliği/Mesafesi | Uçuş Süresi (dakika) | Toplam Resim | Bindirme oranları (İleri/Yan) | YÖA (cm/piksel) |
|--------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------------------------|-----------------|
| Çift Grid | 20 m | ~8 | 72 | %80 / %70 | 0.75 |
| Serbest Uçuş | 5 -10- 15 m | ~19 | 104 | %80 / %70 | 0.21 |



Şekil 4.11 Köprüye ait 3B model (Kuzey Cephesi).



Şekil 4.12 Köprüye ait 3B model (Güney Cephesi).

Elde edilen 3B modelin geometrik ve konumsal hatası için doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Doğruluk analizinde 14 KN kullanılmıştır. Koordinat verilerinin karşılaştırılması sonucunda X, Y ve Z yönde RMSE hataları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Bölüm 3.3'te ayrıntılı olarak açıklanan Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini ID araçlarının matematiksel Modeli, bir 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz etmek için bir dizi algoritmadan oluşur. Bu algoritmalar ile çalışma nesnesi olarak seçilen köprünün tespit edilen çatlaklarının bazı kısımları Şekil 4.13-4.14-4.15'te sunulmuştur.

Çizelge 4.6 Köprü için 3B model doğruluk değerlendirmesi.

| No | Vx (cm) | Vy (cm) | Vz (cm) |
|----------------|---------|---------|---------|
| KN1 | -0.155 | 0.397 | 1.913 |
| KN2 | 0.426 | -0.308 | -0.097 |
| KN3 | -0.649 | 0.279 | 1.823 |
| KN4 | 0.015 | 0.024 | -1.454 |
| KN5 | 0.035 | 0.010 | 1.124 |
| KN6 | -0.417 | 0.255 | 1.389 |
| KN7 | 0.500 | -0.208 | -0.540 |
| KN8 | 0.331 | 0.286 | 0.923 |
| KN9 | 0.172 | 0.350 | 0.227 |
| KN10 | 0.419 | 0.351 | -1.255 |
| KN11 | 0.213 | 0.112 | 4.085 |
| KN12 | 0.125 | 0.028 | -1.588 |
| KN13 | 0.319 | -0.334 | 2.715 |
| KN14 | -0.026 | 0.400 | 2.668 |
| $RMSE_{x,y,z}$ | 0.331 | 0.274 | 1.866 |



Şekil 4.13 Kolonlarda ve üst destekte otomatik tespit edilen çatlaklar.



Şekil 4.14 Yan cephede ve üst destekte otomatik tespit edilen çatlaklar.



Şekil 4.15 Yan destek ve orta kolondaki otomatik tespit edilen çatlaklar.

İkinci doğruluk analizinde otomatik olarak tespit edilen çatlakların güvenilirlik incelemesi yapılmıştır. Yüzeiden yapılan manuel ölçümler, otomatik tespitten elde edilen vektör verilerin uzunlukları ile karşılaştırılmıştır. Köprü üzerindeki çatlaklara ilişkin referans veri toplama işlemi ölçüm araçları kullanılarak bir uzman tarafından manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Uzman operatörün ulaşamadığı noktalar İHA fotoğrafları üzerinden analiz edilmiştir. Arazide görsel inceleme sonucunda 38 adet çatlak tanımlanmıştır. Bu çatlaklardan 20 tanesi operatör tarafından arazide ölçümü alınmıştır. Ölçülemeyen 18 nokta 3B model üzerinden ölçülmüştür. Arazide ölçülen 20 çatlak uzunluğu 3B model üzerinden de ölçülmüş ve aralarındaki fark hesaplanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Doğruluk analizi bir RMSE değeri hesaplanmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 Köprü için otomatik tespit edilen çatlakların doğruluk analizi.

| Çatlak No | Geleneksel Ölçüm (cm) | Otomatik Tespit (cm) | $ D_i $ (cm) | RMSE _D (cm) |
|-----------|-----------------------|----------------------|--------------|------------------------|
| 1 | 8.48 | 7.37 | -1.10 | |
| 2 | 12.36 | 11.97 | -0.39 | |
| 3 | 6.59 | 7.77 | 1.18 | |
| 4 | 10.56 | 8.84 | -1.71 | |
| 5 | 48.12 | 47.32 | -0.80 | |
| 6 | 24.58 | 23.67 | -0.91 | |
| 7 | 14.85 | 15.99 | 1.14 | |
| 8 | 15.69 | 16.84 | 1.15 | |
| 9 | 13.21 | 11.38 | -1.83 | |
| 10 | 4.87 | 6.37 | 1.50 | 0.391 |
| 11 | 15.37 | 16.45 | 1.08 | |
| 12 | 27.84 | 26.86 | -0.98 | |
| 13 | 7.60 | 9.58 | 1.98 | |
| 14 | 4.85 | 7.30 | 2.45 | |
| 15 | 4.88 | 6.76 | 1.88 | |
| 16 | 16.23 | 15.32 | -0.91 | |
| 17 | 32.85 | 33.00 | 0.15 | |
| 18 | 24.78 | 24.94 | 0.16 | |
| 19 | 12.84 | 11.59 | -1.25 | |
| 20 | 88.47 | 88.59 | 0.12 | |

Hadi modelde bulunan çatlaklar görsel olarak incelenmiştir. Gölgenin düştüğü alanlardaki bazı çatlakların tespit edilemediği görülmüştür. Çizelge 4.7’de yerinde görsel olarak tespit edilen ve ölçümü gerçekleştirilen test nesnesinin 20 farklı çatlak uzunluğu analiz edilmiştir. Çizelge 4.7’de ki metrik bilgiler, tekniğin doğru çatlak tespitler için tüm bileşenlerinin verimli bir şekilde çalıştığını doğrulamaktadır. Ancak, kullanıcı daha

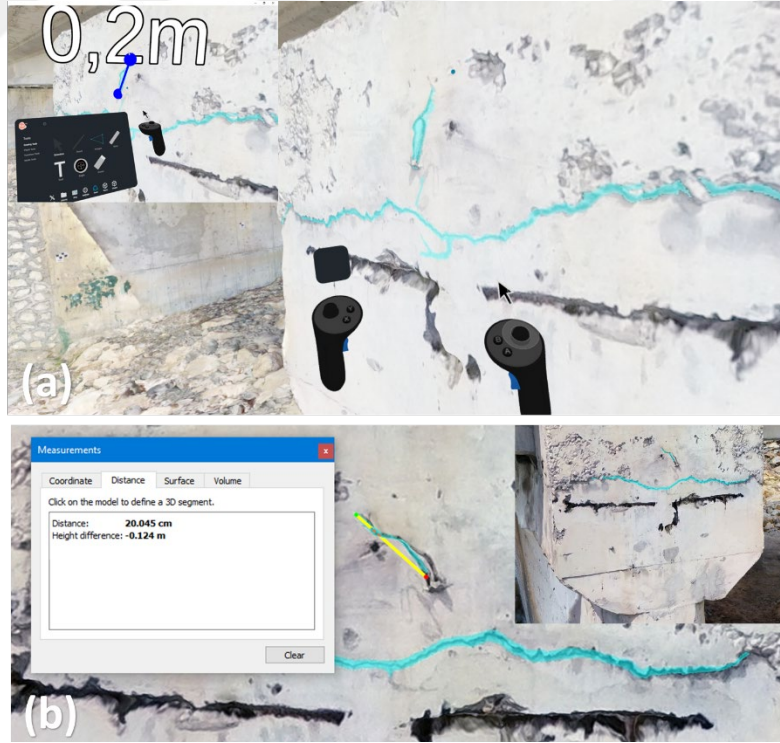
gelişmiş veya karmaşık yapı modellerine sahipse sonuçların doğruluğu azalabilir. Çatlak segmentasyon yöntemleri için eğitim kütüphanelerinin her bir çalışma alanına göre uyarlandığı düşünüldüğünde bu durum özellikle spesifik yapılar için dezavantajlıdır.

HADİ model yerinde incelemeye bir alternatif teşkil etse de SG platformları bunları diğer uzmanlara ulaştırmanın en güncel yoludur. Fotogrametri ile oluşturulan 3B modelleri ve Dİ'leri SG platformlarına entegre ederken dikkat edilmesi gereken birkaç husus vardır. İlk olarak, 3B modeller genellikle büyük ve karmaşık olabilir ve SG platformlarında etkili kullanım için optimizasyon gerektirir. Model boyutunun azaltılması, hızlı yükleme ve birden fazla cihazda görüntüleme için önemlidir. Sanal gerçeklik platformları genellikle belirli 3B model formatlarını destekler ve modellerin uygun formatlara dönüştürülmesi gerekebilir. Örneğin OBJ, FBX, STL veya USDZ gibi yaygın 3B dosya formatları yaygın olarak kullanılmaktadır. Sanal gerçeklik platformları, kullanıcıların cihazlarını gerçek dünyada doğru bir şekilde konumlandırmak ve izlemek için özel algoritmalar ve teknolojiler kullanır. Bu, fotogrametri ile elde edilen Dİ'nin gerçek dünyada doğru bir şekilde konumlandırılmasını sağlar. Ortaya çıkan modelin gerçek dünyayı temsil etmesi de önemlidir.

Çalışmada üretilen HADİ modelin SG platformları ile uzmanlara aktarılması ve yapısal incelemelerin gerçekleştirilmesi amaçlandığından WEB tabanlı bir SG yerine yapısal incelemeye olanak sağlayan bir lokal SG platformu kullanılmıştır (Şekil 4.16). Bu amaçlar doğrultusunda yeni bir platform olan Stratbox aracı kullanılmıştır. Bu araç, bağımsız bilgisayarlara ve meta veri tabanlarına sorunsuz bir yetenek uzantısı sunarak kullanıcılara kapsamlı veri araştırması için çok yönlü seçenekler sunar. Sanal gerçeklik başlığı takıldığında, uzmanlardan oluşan ekipler sanal dünyada uzaktan buluşabilir ve 3B modellerden analizler gerçekleştirebilir. Bu da uzaktan iş birliğinin daha etkili hale gelmesini sağlıyor. Aracın en önemli özelliği, karmaşık ve büyük veri depolayan fotogrametrik modelleri platform üzerinde açabilmesidir. Bu nedenle, çalışma için SG platformu olarak bu araç seçilmiştir. Şekil 4.17 ve 4.18, SG platformu ve 3B Model üzerinde alınan ölçümleri göstermektedir.

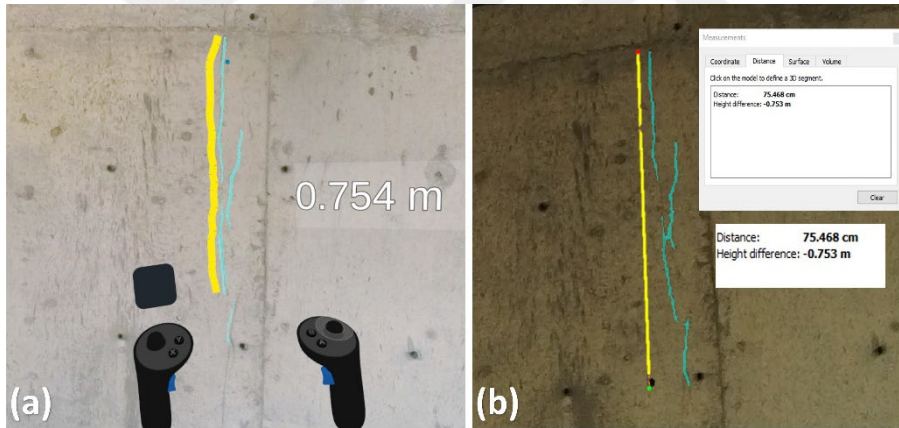


Şekil 4.16 Köprüye ait HADİ modelin SG platformda görüntülenmesi.

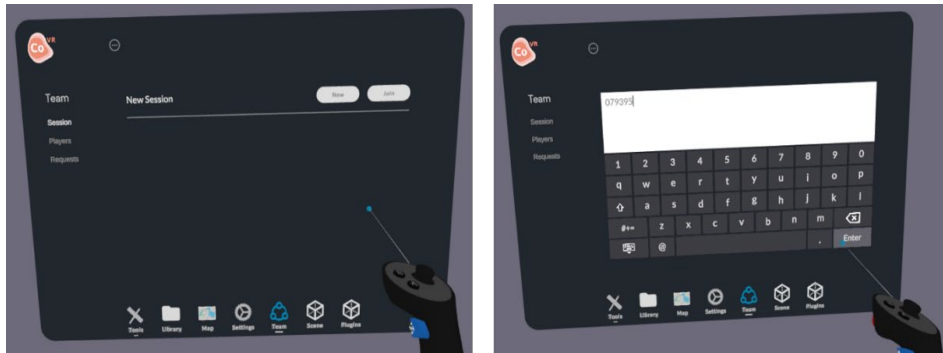


Şekil 4.17 SG'de köprünün Dİ modelinden (a) ve 3B modelden (b) ölçüm.

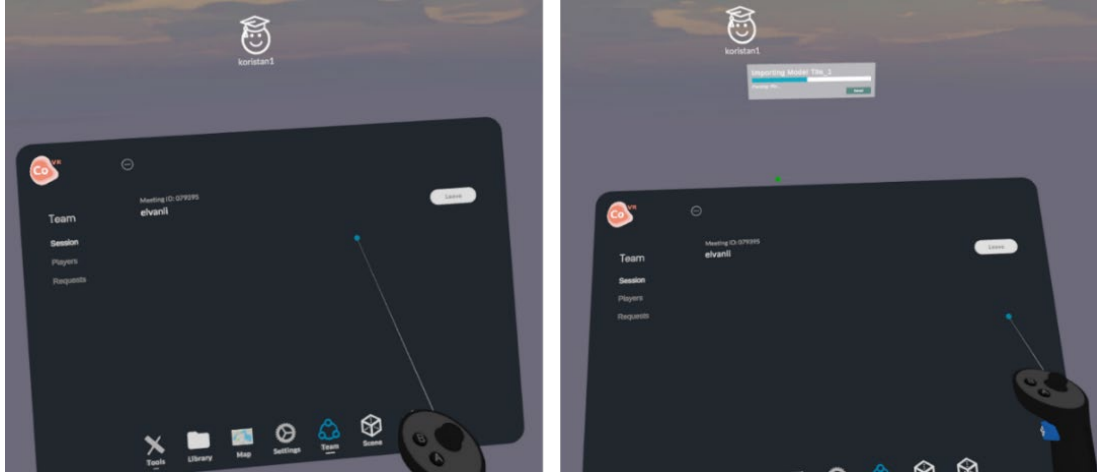
Şekil 4.17 incelendiğinde, 3B Model üzerinde 20,045 cm olarak ölçülen çatlak uzunluğunun SG platformunda 20 cm olarak kaydedildiği görülebilir. İki ölçüm arasındaki tutarsızlık minimum düzeydedir. Şekil 4.18 incelendiğinde, Model üzerinde 75,46 cm olan ölçümün SG platformunda 75,4 cm olduğu görülmektedir. Her iki ölçüm arasındaki farklar minimum düzeydedir ve bu sonuçlar SG aracının yapısal denetim aşamasında kullanılabileceğini göstermektedir. Sanal gerçeklik platformlarında aynı zamanda interaktif olarak çoklu kullanıcılar ile denetimler yapılabilmektedir. Bunun için ilk olarak çevrimiçi toplantı odaları oluşturulmaktadır (Şekil 4.19). Şekil 4.19’da görüldüğü üzere oda kurulumu sağlanmıştır. Şekil 4.20’de görüldüğü üzere odaya diğer kullanıcı katılım sağlamakta ve üretilen Dİ modelinin çevrimiçi odaya aktarımı sağlanmaktadır. Şekil 4.21’de ise 1. kullanıcı yapısal denetim gerçekleştirirken 2. kullanıcı interaktif bir şekilde denetimi izlemektedir. Bu aşamada üretilen HADİ modelde eksik olan veriler SG ortamında tamamlanabilmektedir.



Şekil 4.18 SG’de köprü Dİ modelden (a) ve 3B modelden (b) ölçüm.



Şekil 4.19 Köprü yapısı için SG platformunda çevrim içi oda kurulumu.



Şekil 4.20 Köprü yapısı için SG platformda çevrim içi odaya katılım.



Şekil 4.21 Köprü yapısı için interaktif denetim (a-A kullanıcı, b-B kullanıcı).

Şekil 4.22’de ise çevrimiçi oda da detaylı interaktif denetim yapılmaktadır. Hem 1. kullanıcı hem de 2. kullanıcı aynı anda denetim yapmakta ve birbirleri ile sohbet ederek yapılan her işlemi anlık olarak görebilmektedirler. Şekil 4.23’te de görüldüğü üzere sadece çatlak denetimi değil aynı zamanda diğer yapısal bozulmalar ve yıpranmalar çeşitli vektörel hat ve alanlar ile belirlenip dışa aktarılabilmektedir.



Şekil 4.22 Köprü için detaylı interaktif denetim (a: 1. kullanıcı, b: 2. kullanıcı).



Şekil 4.23 Köprü yapısı için çevrimiçi alternatif denetim araçları.

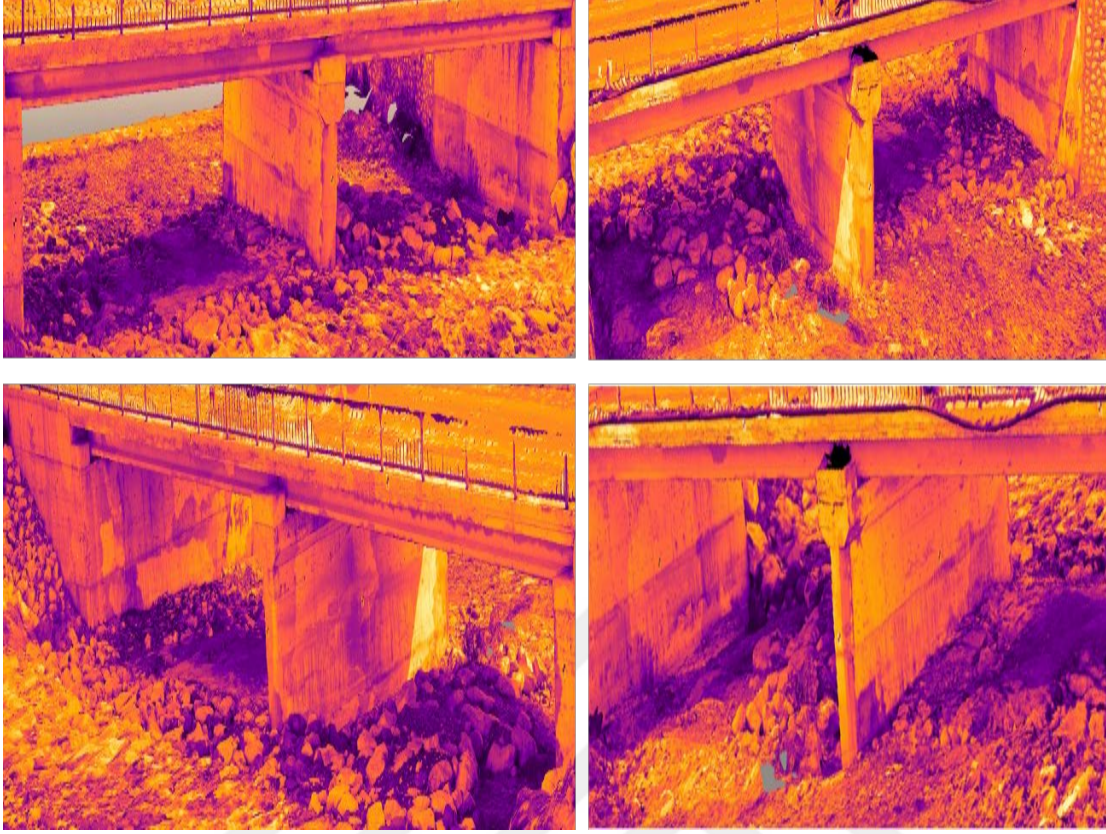
Çalışmamız kapsamında üretilen Dİ'lerin yapısal denetimlerde etkinliğini artırmak ve farklı bakış açıları sunmak için köprü yapısının termal hava fotoğrafları da çekilmiştir. Termal inceleme, yapısal denetimlerde ve çatlak tespitinde oldukça faydalı bir yöntem olabilir. Bu bağlamda, termal teknolojisi, yapıların daha detaylı ve etkin bir şekilde incelenmesini sağlayan yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Yang vd. 2019). Termal fotoğraflama, yüzeydeki ve yapı içerisindeki sıcaklık farklılıklarını tespit ederek, yapıların durumu hakkında ayrıntılı veriler sunar (Juarez ve Gregory 2021; Le vd. 2023). Termal inceleme, çıplak gözle veya geleneksel yöntemlerle tespit edilemeyen gizli çatlakların ve boşlukların belirlenmesine olanak tanır. Yapı içindeki sıcaklık farklılıkları, bu tür gizli sorunların ortaya çıkarılmasını sağlar. Özellikle beton ve metal yapılar gibi homojen olmayan malzemelerde, termal fotoğraflama çatlakların tespitinde önemli bir rol oynar (Tomita ve Chew 2022; Arora vd. 2023).

Yapılarda nem ve su sızıntıları, uzun vadede ciddi yapısal hasarlara yol açabilir. Termal kameralar, nemli bölgeleri ve su sızıntılarını belirleyerek yapıların içindeki bu tür problemleri erken aşamalarda tespit edebilir. Bu hem çatlakların oluşumunu önlemeye

hem de mevcut çatlakların genişlemesini engellemeye yardımcı olur (Barreira ve Almeida 2019). Yapılardaki yalıtım eksiklikleri veya hasarları, termal fotoğraflama ile kolayca tespit edilebilir. Yalıtım sorunları, enerji kayıplarına ve iç mekân konforunun azalmasına neden olabilir. Termal fotoğraflama, bu tür sorunların belirlenmesi ve giderilmesi için hızlı ve etkili bir yöntem sunar (Tabet Aoul vd. 2021). Farklı yapı malzemeleri, farklı ısı özelliklere sahip olduğundan, termal fotoğraflama ile yapıda kullanılan malzemelerin durumu ve homojenliği kontrol edilebilir. Bu, malzeme farklılıklarının ve potansiyel zayıf noktaların tespit edilmesine yardımcı olur (Hernández-Pérez vd. 2014; François vd. 2021). Ayrıca metal yapı elemanlarındaki korozyon ve malzeme bozulmaları, termal fotoğraflama ile tespit edilebilir. Isı farkları, bu tür sorunların erken aşamalarda belirlenmesine olanak tanır. Bu da yapının genel sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir (Taib vd. 2012; Le vd. 2023).

Termal fotoğraflama, çatlakların zaman içindeki genişleme hızını izlemek için de kullanılabilir. Bu, yapısal sağlığın sürekli olarak izlenmesine ve gerekli önlemlerin zamanında alınmasına yardımcı olur. Dinamik yüklerin etkisi altındaki yapılar için bu tür izleme, çatlakların nasıl oluştuğunu ve geliştiğini anlamak açısından da değerlidir (Arora vd. 2023). Termal fotoğraflama, trafik, rüzgâr ve titreşim gibi dinamik yükler altında yapının nasıl davrandığını gözlemlemek için de kullanılabilir. Bu durum, çatlakların oluşum ve ilerlemesi mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlar (Niezrecki vd. 2018). Termal teknolojisinin yapısal denetimlerde ve çatlak tespitinde kullanımı, daha detaylı, güvenilir ve hızlı sonuçlar elde etmeyi sağlar. Bu yöntem, geleneksel denetim teknikleriyle birleştirildiğinde, yapıların sağlığı ve güvenliği açısından daha bütüncül bir yaklaşım sunar. Termal görüntüleme, yapısal denetim süreçlerini iyileştirerek, yapıların uzun ömürlü ve güvenli olmasına katkıda bulunur.

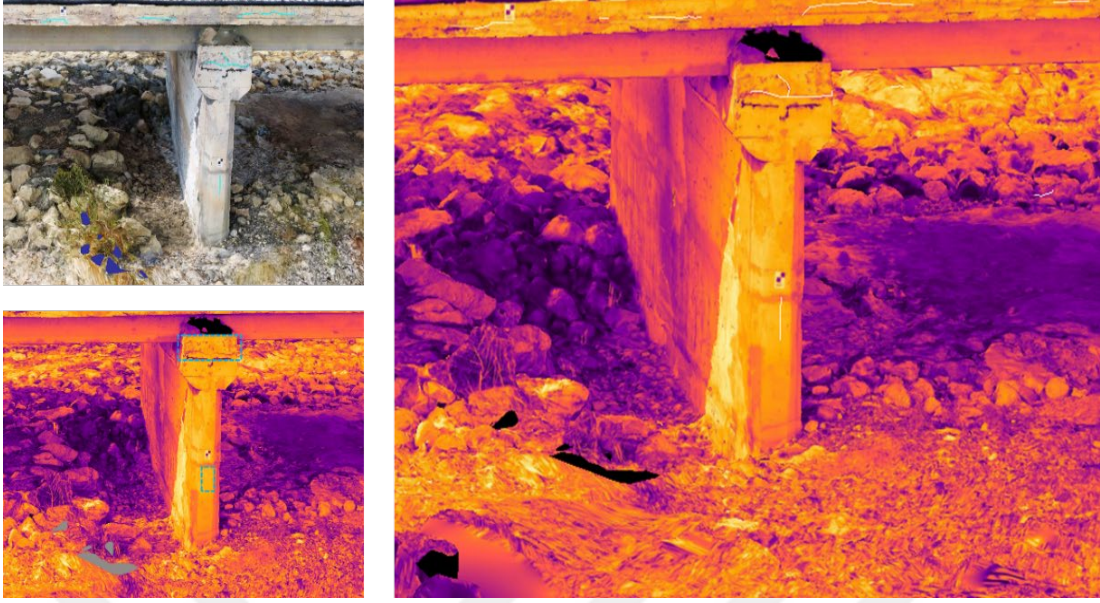
Köprü yapısına ait termal görüntüler ile 3B modelin dokuları kaplanmıştır. Elde edilen termal dokulu 3B model Şekil 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da otomatik tespit edilen çatlakların vektör verileri ile termal fotoğraf dokulu 3B modelin birleştirilmesi ile oluşturulan Dİ verilmiştir. Dijital ikizde çatlakların vektör verileri beyaz renk ile belirtilmiştir. Şekil 4.27'de ise korozyona uğrayan bir bölgeye ait detaylı görseller verilmiştir.



Şekil 4.24 Köprü yapısının termal 3B model görüntüsü.



Şekil 4.25 Köprü yapısının kuzey tarafına ait termal dokulu D1 model.



Şekil 4.26 Köprü yapısının güney tarafına ait termal dokulu Dİ model.

Şekil 4.25 ve 4.26'daki termal verilerde, köprü'nün çeşitli kısımlarında sıcaklık dağılımları gözlemlenmektedir. Bu tür fotoğraflar ve 3B modeller, yapısal denetimlerde ve çatlak tespitinde oldukça değerlidir. Verideki sıcaklık farklılıklarını analiz ederek yapısal sorunları ve anormal durumlar tespit edilebilir. Termal verilerdeki renkler, köprü'nün yüzeyinde farklı sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Genellikle mavi ve mor renkler daha soğuk bölgeleri, sarı ve kırmızı renkler ise daha sıcak bölgeleri temsil eder. Köprü'nün alt kısımlarında ve destek elemanlarında belirgin sıcaklık farkları gözlemlenmektedir. Bu farklar, yapısal bütünlükteki sorunları veya malzeme farklılıklarını işaret edebilir.

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da bazı bölgelerde sıcaklık farkları keskin geçişlerle belirginleşmiştir. Bu durum, çatlakların veya iç boşluklara işaret edebilir. Özellikle köprü'nün destek ayakları ve bağlantı noktalarında bu tür farklar dikkat çekicidir. Bu alanlar, yapının en fazla stres altında olduğu ve çatlakların oluşma olasılığının yüksek olduğu bölgelerdir. Termal fotoğraflardaki soğuk noktalar, nemli bölgeler veya su sızıntılarının varlığını gösterebilir. Köprü'nün bazı alt kısımlarında belirgin soğuk kısımlara ait bölgelerde nem veya su kaçağı olabileceği düşünülebilir. Metal yapı elemanlarındaki korozyon, termal fotoğraflarda anormal sıcaklık dağılımları olarak görülebilir. Köprü yapısındaki özellikle metal bağlantı noktaları ve destek elemanlarındaki sıcaklık farklarına dikkat edilmelidir.

Şekil 4.27’de köprü yapısındaki çatlak haricinde bir korozyon olan bölge incelenmiştir. Şekil 4.27 detaylı incelendiğinde, yapının yüzeyinde belirgin fiziksel bozulmalar ve lekeler görülmektedir. Bu bozulmalar, yüzeyin zaman içinde aşınması, su sızıntıları ve genel yapısal yıpranma nedeniyle oluşmuş olabilir. Yüzeyde görülen bazı yamalar veya kaplamalar, daha önce yapılmış onarımları veya su yalıtımı için yapılan işlemleri işaret edebilir. Bu tür yamalar, yapının zayıf noktalarının kapatılması veya güçlendirilmesi amacıyla yapılmış olabilir. Yüzeydeki bazı alanların koyu renklerle kaplandığı görülüyor. Bu koyu renkli alanlar, yapının nem aldığı veya su sızıntısının olduğu bölgeler olabilir. Yüzeydeki bazı bölgelerin düzensizliği, yapısal bütünlükteki sorunları da işaret edebilir. Yapının alt kısmında görülen taş ve beton birleşim bölgeleri, yapısal zayıflıkların ve malzeme bozulmalarının olduğu alanlar olabilir. Bu bölgeler, termal fotoğraflama ile daha detaylı incelenmelidir. Termal veride, köprünün yüzeyinde belirgin sıcaklık farklılıkları görülmektedir. Bu farklılıklar, yapının farklı bölgelerindeki malzeme çeşitliliği, yalıtım eksikliklerini veya iç boşlukları işaret edebilir. Bazı bölgelerde görülen soğuk alanlar, yapının nem aldığı veya su sızıntısının olduğu bölgeler olabilir. Bu bölgeler, suyun buharlaşması nedeniyle çevresinden daha düşük sıcaklıklara sahip olabilir. Görseldeki sıcaklık dağılımlarına bakarak yapının bozulma eğiliminde olan bölgelerini tespit edebiliriz. Sıcak ve soğuk alanlar arasındaki keskin geçişler, yapının iç yapısındaki sorunları veya çatlakları gösterebilir. Bu termal verileri yorumlarken, köprünün çeşitli bölümlerindeki bozulmaları ve çatlakları değerlendirebiliriz. Çatlakların ve bozulmaların termal fotoğraflama ile izlenmesi, yapının uzun vadeli sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir. Bu tür analizler, yapısal denetimlerin etkinliğini artırır ve potansiyel risklerin önceden belirlenmesine yardımcı olur. Bu verilerin detaylı analizi, yapının durumunu daha iyi anlamak ve gerekli müdahaleleri planlamak için önemlidir. Yapının genel sağlığını korumak ve güvenliğini sağlamak amacıyla, bu tür termal analizlerin düzenli olarak yapılması gereklidir ve yapının genel durumu hakkında daha kesin değerlendirmeler yapmak için, bu termal görüntülerle birlikte yapının fiziksel incelemesi ve diğer tahribatsız muayene (nondestructive testing) yöntemleri de kullanılmalıdır. Bu şekilde, köprünün bakım ve onarım ihtiyaçları daha etkili bir şekilde belirlenebilir. Bu bilgiler ışığında, termal fotoğrafları inceleyen bir kişi, yapısal denetimlerde ve çatlak tespitinde sıcaklık farklarını ve anormal ısı dağılımlarını belirleyerek yapıdaki potansiyel sorunları tespit edebilir.



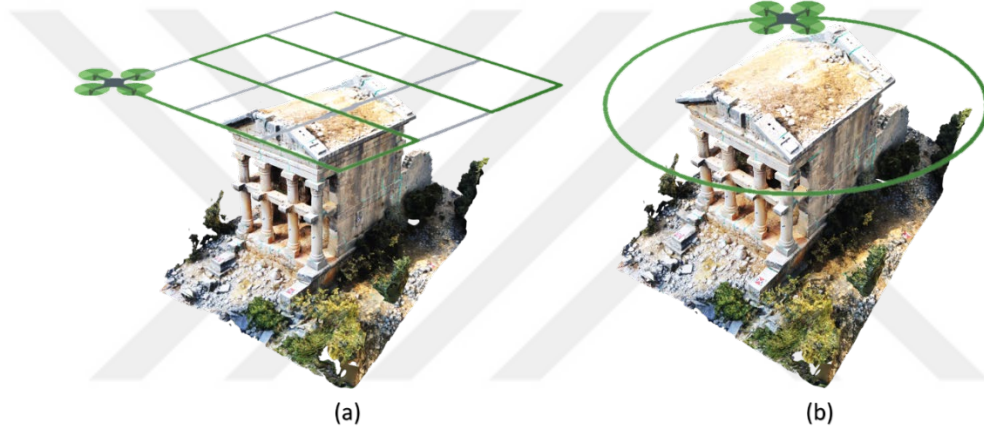
Şekil 4.27 Köprü yapısının korozyona uğramış bölgede termal dokulu Dİ model.

4.4 Mezgit Kalesi Örneği

Bu çalışmanın amacı modern yapılarda oldukça başarılı olan yöntemi uzun zamandır kullanılmakta olan tarihi yapılardaki performansını araştırmaktır. Diğer bir araştırma konusu ise fazla yıpranmış olan tarihi yapılarda meydana gelen yapısal yıpranmaların önerilen metodolojiyi ne kadar olumsuz etkileyeceğın belirlenmek istenmesidir. Bu çalışmada İHA fotogrametrisi tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan İHA ve tercih edilme sebepleri başlık 4.3 köprü çalışmasında detaylı anlatılmıştır. Hava fotoğraflarını çekmek için otonom uçuşlarla nadir ve eğik fotoğraflar çekilirken kalenin fotoğraflarını çekmek için çift grid (Şekil 4.28-a) ve daire (Şekil 4.28-b) uçuş planları kullanılmıştır.

Uçuşlar Pix4D Capture ve Free Flight 6 yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir, uçuş yüksekliğı nadirde 30 metre ve eğik açı için sırasıyla 10, 15 ve 20 metre olmuştur. İlk planlama 4 dakika 30 saniye sürerken, sonraki uçuşlar dairesel planlama başına sadece 4 dakika sürmüştür. Fotoğraflar ilk uçuş sırasında nadir pozisyonlardan, ikinci uçuş sırasında ise 45°'lik bir açıyla alınmıştır. İHA fotogrametrisi alanında doğru sonuçlar elde etmek için, her bir ardışık fotoğrafın %85 ileri ve %80 enine bindirme oranı sağlanmıştır.

Sonuç olarak, gerekli alanı kapsayacak şekilde 155 fotoğraf çekilmiştir. Mümkün olan en kesin ve hassas 3B modeli oluşturmak ve referanslandırmak için bu çalışmada referans amaçlı hassas ölçüm cihazları kullanılarak araziye ve yapıya yerleştirilen hedef işaretleri ölçülmüştür. Fotogrametrik sürecin tamamlanması yaklaşık 30 saat sürmüştür. Fotoğraf hizalama sürecinde nesne yüzeyinde 18 ve zeminde 8 adet olmak üzere toplam 26 YKN kullanılmıştır. Modelin hata değeri ise 8 KN kullanılarak hesaplanmıştır, bu nedenle hizalama aşamasında kullanılmamıştır. Sonuç olarak yoğun nokta bulutu ve 3B model üretilmiştir. Şekil 4.29’da üretilen fotorealistik yüksek çözünürlüklü 3B modeller verilmiştir. 3B modelin iç doğruluğu 1.432 cm bulunmuştur.



Şekil 4.28 Kale için çift grid uçuş planı (a) ve dairesel uçuş planı (b).



Şekil 4.29 Kale yapısının yüksek çözünürlüklü 3B fotorealistik modelleri.

Şekil 4.30'da ise 3B modelin yakınlaştırılmış detayları gösterilmiştir. Şekil 4.30'da arka cephe ve üst cephe yer almaktadır. Binanın ön cephesi, birden fazla bakış noktasından çekilmiş olarak sunulmuştur. Nesnenin gerçek fotoğraflarından oluşturulan 3B modellerin kalitesi, alınan fotoğrafların kalitesiyle doğrudan ilişkilidir.



Şekil 4.30 Kale yapısının 3B doku modellerinin detaylı tasviri.

3B model, HADİ'nin geometrisini, özellikle de binanın düzlemsel temellerinin kapsamını basitleştiren LOD3 modelini temsil etmektedir. Bu düzlemin kabulünde Pantoja-Rosero vd. (2022; 2023) çalışması referans olarak alınmıştır. SfM algoritması ile oluşturulan LOD3 seviyesindeki 3B modelin ayrıntılarını/çatlaklarını elde etmek için kullanılan yöntem, ilk görünümün görüntüsü üzerinde eğitilmiş makine ve derin öğrenme modellerini kullanarak cephe segmentasyonu (açıklık köşelerinin belirlenmesi) gerçekleştirmeyi içerir.

Context Capture yazılımının ID araçları çatlak tespiti için kullanılmıştır. Şekil 4.31, makine ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak tespit edilen yüksek kaliteli dokulu bir 3B model üzerindeki çeşitli cephe çatlaklarını göstermektedir. Şekil 4.32'de belirli bir cephe bölgesinin büyütülmüş görüntüsü üzerinden çatlak uzunluklarının ölçümü verilmiştir. Tespit edilen çatlaklar daha sonra otomatik olarak vektörleştirilmiştir. 3B model ile

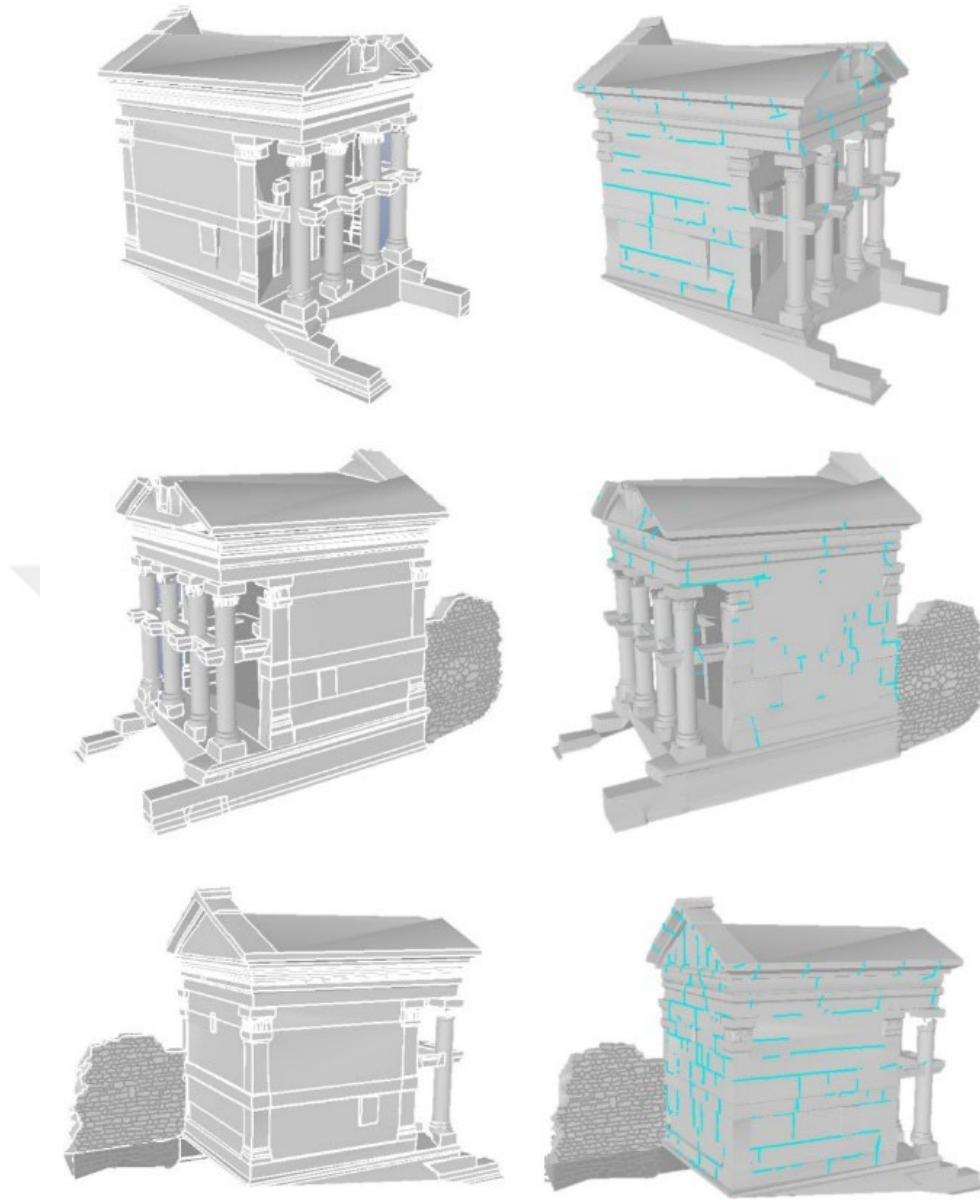
otomatik vektör verileri birleştirilerek kalenin LOD3 seviyesindeki modeli oluşturulmuştur. Bu prosedür iskeletteki herhangi bir çatlak noktası için geçerlidir. Elde edilen veriler LOD3 model ile entegre edilerek Dİ'nin hasarla güçlendirilmiş nihai çıktısı oluşturulmuştur. Bu çıktı Şekil 4.33'te gösterilmektedir.



Şekil 4.31 Kale için HADİ modelinin farklı cephelerdeki çatlaklar.



Şekil 4.32 Kale yapısında bir cephe üzerindeki çatlak uzunluğu ölçümü.



Şekil 4.33 Kalenin çatlak+LOD3 (HADİ) modeli.

Fotogrametrik olarak üretilen yüksek kaliteli Dİ bir doğruluk analizine tabi tutulmuştur. İlk olarak doku kalitesi incelenmiş ve YÖA nadir fotoğraflar için 0,98 cm/piksel ve eğik fotoğraflar için 0,95 cm/piksel olarak bulunmuştur. Bu YÖA değeri, çatlak tespiti için kullanmayı planladığımız kütüphanenin doğru çalışması için maksimum 1 cm/piksel YÖA değerine ihtiyaç duyması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. YÖA değeri ne kadar küçük olursa, algoritma o kadar doğru olur. Geometrik analiz, materyal metot kısmında başlık 3.4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Doğruluk analizi için her cepheden eşit olacak şekilde 8 KN seçilmiş ve bulgular Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8 Kale için 3B Dİ model doğruluk analizi.

| No | Vx (cm) | Vy (cm) | Vz (cm) |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| KN1 | -0.155 | 0.261 | 1.013 |
| KN2 | 0.426 | -0.308 | -0.197 |
| KN3 | -0.349 | 0.279 | 0.623 |
| KN4 | 0.015 | 0.024 | -0.454 |
| KN5 | 0.035 | -0.462 | 1.004 |
| KN6 | -0.417 | 0.255 | 0.489 |
| KN7 | 0.257 | -0.208 | -0.540 |
| KN8 | 0.331 | 0.286 | -0.215 |
| RMSE _{x,y,z} | 0.311 | 0.303 | 0.681 |

Şekil 4.31 ve 4.32'nin analizi sonucunda algoritma, eklemler ve taşlar arasındaki bozulmaları da çatlak olarak segmentlere ayırmıştır. Bunlar genel çatlak kategorisine dahil edilmemiştir. Söz konusu derzlerin çatlak olmadığı açıktır. Bu, tarihi binalar bağlamında algoritmanın önemli bir eksikliğidir. Bu derzler veya ara yüzeyler arasında bazı bozulmaların meydana gelmiş olması dikkat çekicidir. Bu bozulmalar algoritma tarafından tespit edilmiş fakat çalışmanın amaçları doğrultusunda daha önce tespit edilmiş olan çatlak için uygun bir tespit oluşturmamıştır. Amaç potansiyel yapısal zayıflık alanlarını belirlemek olduğundan, bu özel sonuç beklenmedik ancak oldukça umut vericiydi. Sonuç olarak, beklentilerimiz başlangıçtaki varsayımlarımızdan farklı bir şekilde karşılanmıştır. Araştırmamızı temel çatlak tipleriyle sınırlandırmış olsaydık, algoritma bu noktada başarısız olurdu. Ancak, talebimiz doğrultusunda elde edilen çıktıya göre, durum bir başarı olarak nitelendirilebilir. Bu çatlakların, birimler arasındaki bağlantı ve arayüzlerin aksine, kasıtlı bir tasarımın sonucu olmadığı unutulmamalıdır. Algoritma, kolon ve lentolardakiler (yapılarda kapı ve pencere gibi dikey boşlukların üzerine yatay olarak konulan ve duvarın devam etmesini sağlayan mimari blok) de dahil olmak üzere bu yapısal çatlakların bazılarını belirleyebilmektedir. Bu noktada, düşey çatlakları açık derzler olarak tanımlamak daha doğrudur. Bu çalışma bağlamında, gözlemlenen çatlaklar ve derzler tipik olarak hasar olarak nitelendirilmektedir. Ancak, özellikle yatay yatak derzleri söz konusu olduğunda bu her zaman doğru olmayabilir. Algoritma taşlardaki erozyonu da tanımlamıştır. Bu, hasardan ziyade çürümenin bir işareti olsa da önemli bir yapısal endişeye işaret etmemektedir. Bununla birlikte, binanın yapısal sağlığı hakkında bilgi sağlamaktadır. Çok sayıda çatlak kapalı veya küçük ölçekli (kılcal) olabilir, bu da algoritmanın çözünürlük sınırlaması nedeniyle bunları tanımlayamamasına neden olmaktadır.

Otomatik olarak tespit edilen çatlakların uzunluğu ile manuel olarak ölçülen çatlakların uzunluğu arasında metrik bir karşılaştırma yapılmıştır. Analizde referans veri olarak iki tür veri kullanılmıştır. İlk olarak, yapının yerinde incelemesi yapılmış ve erişilebilir konumlardaki çatlaklar uzman tarafından hassas çatlak ölçer veya geleneksel bir ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Buna ek olarak, ulaşılması zor çatlaklar oluşturulan ve referans veri olarak kabul edilen 3B model üzerinde manuel olarak ölçülmüştür. Manuel olarak tespit edilen ve ölçülen toplam çatlak sayısının üçte biri, dört cepheden belirli sayıda homojen olarak seçilmiş ve referans verilerle metrik olarak karşılaştırılmıştır.

Çalışmamızda ilk olarak sahada yerinde yapılan görsel inceleme sonucunda yapı bütünlüğünü tehlikeye atan 78 adet çatlak tespit edilmiştir. Aynı zamanda sahada görsel inceleme ile tespit edilemeyen 40 adet çatlak da İHA fotoğraflarının analizi sonucunda bulunmuştur. Bu incelemeler sonucunda çalışmamız için toplam 118 çatlak analiz edilmiştir. Ancak doğruluk analizinde referans olarak kullanılan çatlak uzunlukları total-station ile ölçüldüğünden, İHA fotoğraflarından tespit edilen ve sahada doğru olarak ölçülemeyen çatlaklar doğruluk analizinde kullanılmamıştır. Başka bir deyişle, sahada görsel olarak bulunamayan ve İHA fotoğraflarından tespit edilen çatlaklar doğruluk analizinde kullanılmamıştır.

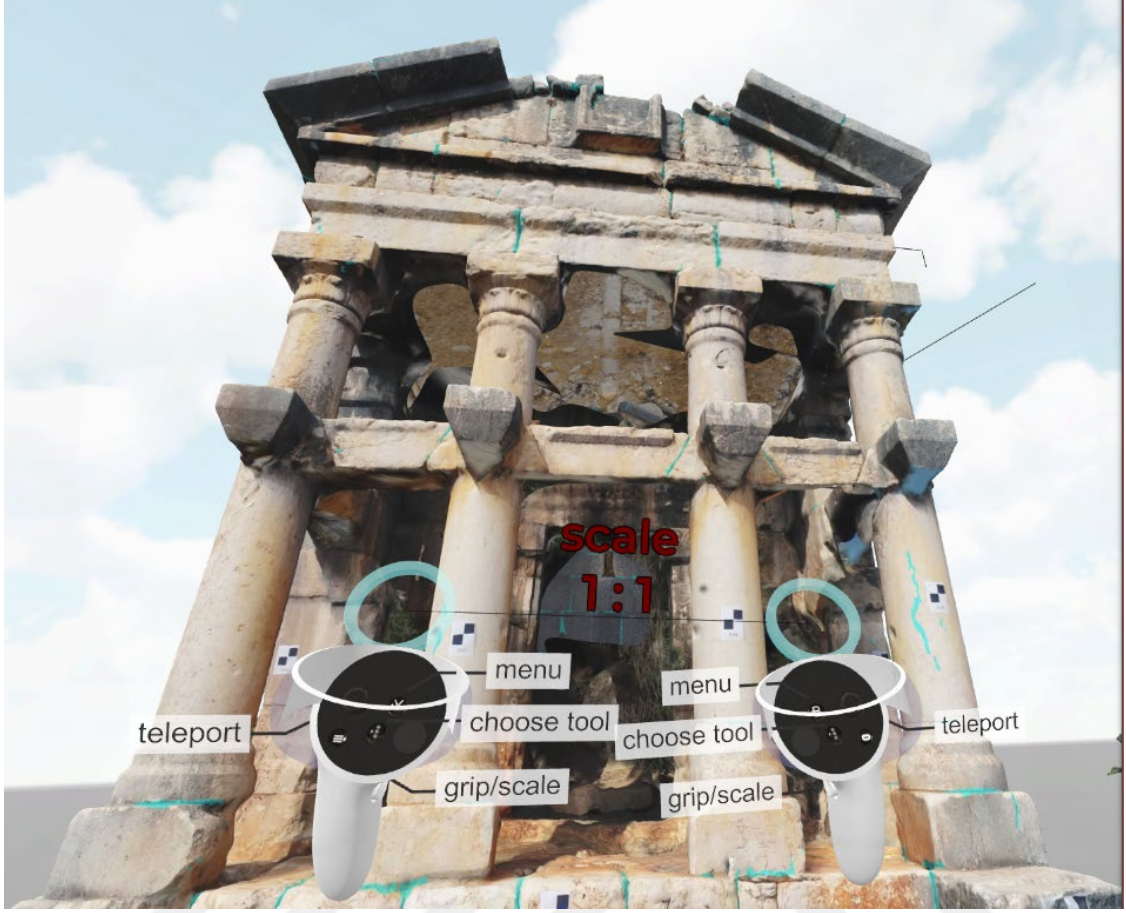
Sahada tespit edilen 78 çatlağın tamamı ölçülememiştir. Bunun nedeni, ölçümü engelleyen yapısal ve çevresel faktörlerin yoğunluğudur. Bu nedenle, sahada tespit edilen 78 çatlak uzunluğundan total-station ile ölçülebilen 62 tanesi referans veri olarak kullanılmıştır. Her cephede eşit değerlendirme yapılmasını sağlamak amacıyla, doğruluk analizi için bu ölçümlerden 21 (62/3) çatlak seçilmiştir. Bu arada, önerilen yöntemimiz toplam 121 çatlak tespit etmiş, bunlardan 23'ü çatlak olmayan derz konumlarına ait olup daha sonra doğruluk analizinde değerlendirmeden çıkarılmıştır. Bu çatlaklar hariç tutulduğunda, yöntemimizin genel doğruluğu yaklaşık %83 olarak hesaplanmıştır. Bu, toplam 118 çatlaktan tespit edilen 98 çatlağın yüzdesidir. Hatalı tespit edilen çatlaklar çıkarıldıktan sonra incelenen yirmi bir çatlağın metrik analizini gerçekleştirmek için RMSE hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.9'da özetlenmiştir. Burada gözlemlenen çatlaklar genişlikten ziyade uzunluğa ilişkin bilgi sağlamaktadır.

Çizelge 4.9 Kale yapısının 3B Dİ modeli için doğruluk analizi.

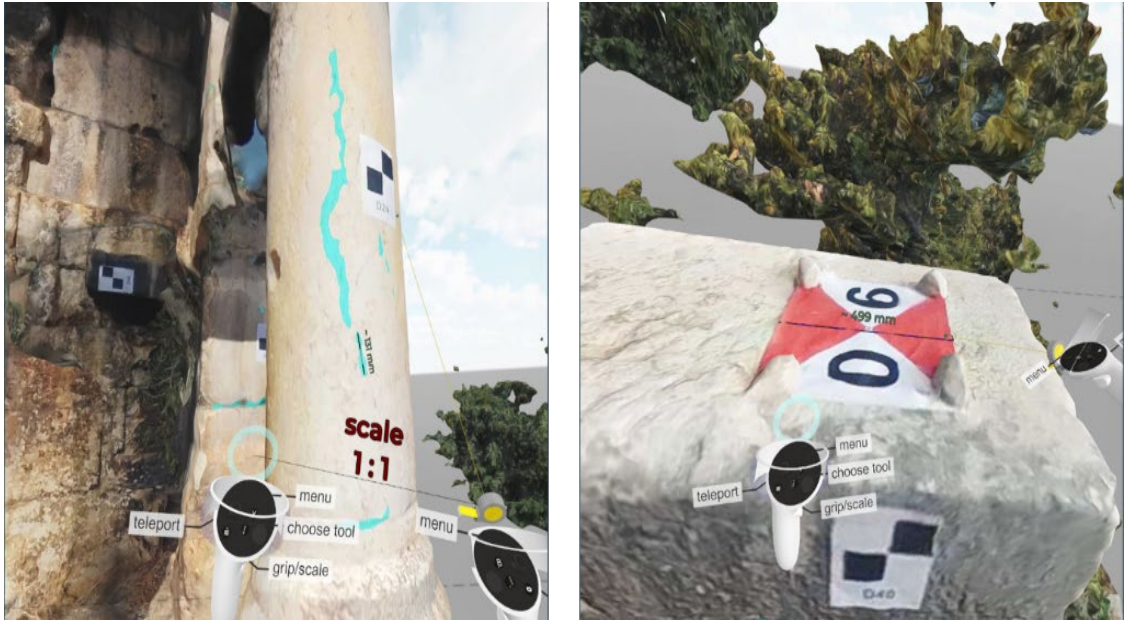
| Çatlak No | Manual ölçüm (cm) | Otomatik tespit (cm) | $ D_i $ (cm) | Çatlak No | Manual ölçüm (cm) | Otomatik tespit (cm) | $ D_i $ (cm) |
|-----------|-------------------|----------------------|--------------|------------------------------|-------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 1.80 | 2.76 | 0.96 | 12 | 24.12 | 25.32 | 1.20 |
| 2 | 4.25 | 5.36 | 1.11 | 13 | 7.84 | 6.83 | 1.01 |
| 3 | 18.46 | 19.06 | 0.60 | 14 | 13.78 | 14.76 | 0.98 |
| 4 | 9.55 | 8.74 | 0.81 | 15 | 9.36 | 8.74 | 0.62 |
| 5 | 32.40 | 33.03 | 0.63 | 16 | 16.85 | 17.55 | 0.70 |
| 6 | 9.86 | 10.31 | 0.45 | 17 | 45.45 | 45.28 | 0.17 |
| 7 | 4.34 | 4.32 | 0.02 | 18 | 34.86 | 35.28 | 0.42 |
| 8 | 2.86 | 3.73 | 0.87 | 19 | 7.32 | 6.78 | 0.54 |
| 9 | 14.96 | 15.79 | 0.83 | 20 | 11.48 | 11.51 | 0.03 |
| 10 | 12.82 | 12.32 | 0.50 | 21 | 26.85 | 28.12 | 1.27 |
| 11 | 2.13 | 1.12 | 1.00 | RMSE_D (cm) | | 0.802 | |

Nicel bulgular, metodolojinin çeşitli bileşenlerinin performansını vurgulamaktadır. Kabul edilebilir bir sonuç olarak çatlak tespiti açısından çoğu çatlağın tespit edildiğini gösterir. Bu analize göre, çatlakların %83'ü tespit edilmiştir. Bu oran, çatlak segmentasyonu üzerine yapılan diğer çalışmalardan elde edilen bulgularla karşılaştırıldığında uygun görünmektedir. Örneğin Pantoja-Rosero vd. (2023) çalışmalarında Gehri vd. (2020) sunduğu eğitilmiş modeli kullanmış ve %63 başarı elde etmiştir. Çalışmada kullanılan veriler eğitim modeli için ne kadar uygun olursa doğruluk da o kadar iyi olacaktır. Amacımız çatlak tespit doğruluğunu artırmak değil, mevcut hızlı hasar değerlendirme uygulamasını geliştiren bir hasar belgeleme aracı sunmaktır. Bununla birlikte, metodolojimiz çatlak segmentasyonu için kullanılan yaklaşımdan ayrılabilir, bu da kullanıcının daha iyi eğitilmiş modellere sahip olması durumunda değiştirilmesini kolaylaştırır. Önemli olarak, metodolojimiz hasar değerlendirmesi için ideal olan hafif modeller üretmektedir.

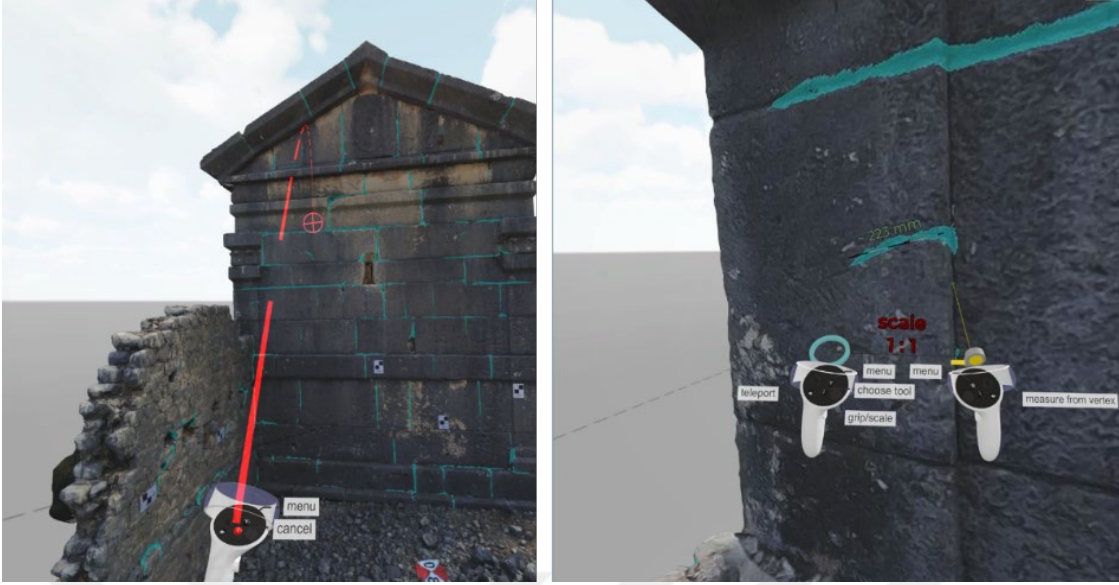
Şekil 4.34'te görüldüğü üzere model SG platformuna aktarılmış ve ölçek ayarlaması yapılmaktadır. Bu platformlarda çeşitli ölçümler ve analizler gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada ise SG platformu olarak VRskech tercih edilmiştir. Bu platformu seçmemizin amacı mimari çizim programı ile entegreli çalışan bir platformu test etmek istememizdir. Şekil 4.35'te model üzerinden alınan ölçüm örnekleri verilmiştir. Şekil 4.36'da da farklı bir cephede hareket potansiyeli ve ölçüm gösterilmiştir.



Şekil 4.34 Kale yapısı için HADİ modelin SG platformuna aktarılması.



Şekil 4.35 Kale yapısının HADİ modeli ile SG platformunda denetim.



Şekil 4.36 Kale yapısının SG ortamında hareket özellikleri ve denetim.

4.5 Kebir Kayası Örneği

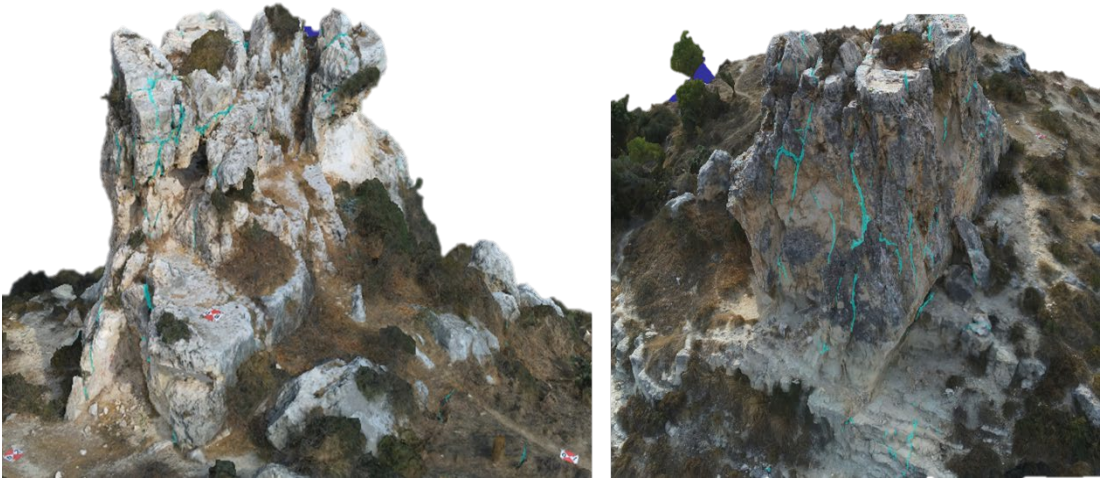
Bu araştırmada diğer çalışmalardan farklı olarak bir kentsel alanı tehdit eden ve görsel olarak dezavantaj içeren kaya kütlesi incelenmiştir. Bu araştırmadan önce önerilen yöntemin modern yapılarda oldukça başarılı tarihi yapılarda ise daha az başarı elde edildiği görülmüştür. Bu çalışmanın amacı iki yönlüdür. Birincisi, yerinde fizibilitesi yapılması gereken kayalar için hem uygulanabilir hem de uygun maliyetli alternatif bir çözüm önermek. İkincisi ise, bu tür sahalara doğrudan erişimi olmayan uzmanlar tarafından kaya kütlelerinin incelenmesini kolaylaştıracak bir SG ortamında denetim sağlamak.

Bu çalışmada da İHA fotogrametrisi tercih edilmiş ve daha önceki çalışmalarda kullanılan İHA ile hava fotoğrafları çekilmiştir. Eğimli bir zemine bulunan ve 4 metre yükseklikte olan kaya kütlesi yaklaşık 40 metrekarelik bir alan kaplamaktadır. Çalışma alanının etrafının açık olmasından dolayı tam otomatik çift grid uçuş planlaması gerçekleştirilmiştir. 10 metre yükseklikten (yaklaşık 0.36 cm/piksel YÖA) hem nadir hem de açılı hava fotoğrafları çekilmiştir. Diğer çalışmalarda dikkat edilen parametrelere bu çalışma içinde dikkat edilmiş olup toplamda 86 hava fotoğrafı çekilmiştir. Aynı zamanda kaya kütlesi etrafına ve üstüne 18 hedef işareti (YKN ve KN) yerleştirilmiştir. Bunlardan

sekiz tanesi 3B modelin fotogrametrik hizalamasında on tanesi ise KN olarak 3B modelin geometrik doğruluk analizinde kullanılmıştır. Şekil 4.37’de üretilen 3B model Şekil 4.38’de ise tespit edilen çatlakları içeren HADİ model verilmiştir. Fotogrametrik hizalama için modelin iç doğruluğu 1.953 cm bulunmuştur. Bu çalışma için de 3B modelin doğruluk analizi yapılmıştır ve Çizelge 4.10’da verilmiştir. Çalışmada tespit edilen çatlakların doğruluk analizi için araziden hassas ölçüm cihazları ile ölçümler gerçekleştirilmemiş ve bu yüzden referans verisi toplanamamıştır. Fakat üretilen 3B model yüksek doğrulukta üretildiği için aynı 3B model üzerinden belirlenen on adet çatlak ölçülmüş ve referans kabul edilerek otomatik tespit edilen çatlaklarla uzunluk karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.37 Kaya yapısının 3B modeli.



Şekil 4.38 Kaya yapısının 3B HADİ modeli.

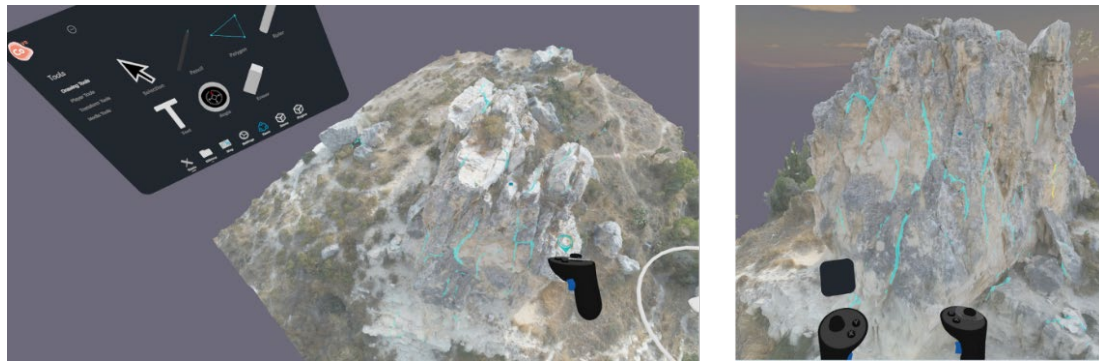
Çizelge 4.10 Kaya kütlelerini 3B Dİ model için doğruluk analizi.

| No | Vx (cm) | Vy (cm) | Vz (cm) |
|------|-------------|-------------|-------------|
| KN1 | -0.105 | 0.092 | 1.213 |
| KN2 | 0.166 | -0.104 | -0.897 |
| KN3 | -0.219 | 0.129 | 1.123 |
| KN4 | 0.101 | 0.214 | -1.104 |
| KN5 | 0.024 | 0.184 | 1.022 |
| KN6 | -0.224 | 0.254 | 0.909 |
| KN7 | 0.300 | -0.148 | -0.734 |
| KN8 | 0.065 | 0.116 | 0.832 |
| KN9 | 0.164 | 0.150 | 0.617 |
| KN10 | 0.219 | 0.347 | -0.455 |
| RMSE | 0.19 | 0.20 | 0.97 |

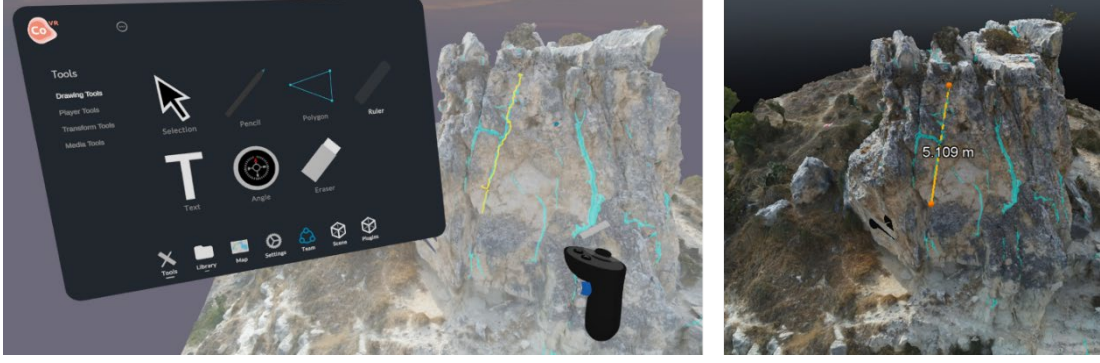
Çizelge 4.11 Kaya yapısına ait çatlak uzunlukları doğruluk analizi.

| Çatlak No | 3B model Uzunluk (cm) | Otomatik Uzunluk (cm) | Hata (cm) | RMSE (cm) |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| 1 | 24.756 | 23.712 | 1.044 | 1.920 |
| 2 | 11.871 | 13.840 | -1.969 | |
| 3 | 15.145 | 17.848 | -2.703 | |
| 4 | 71.145 | 68.902 | 2.243 | |
| 5 | 10.475 | 9.751 | 0.724 | |
| 6 | 9.804 | 11.090 | -1.285 | |
| 7 | 18.402 | 20.407 | -2.005 | |
| 8 | 87.845 | 84.953 | 2.892 | |
| 9 | 10.640 | 11.159 | -0.519 | |
| 10 | 45.515 | 44.489 | 1.025 | |

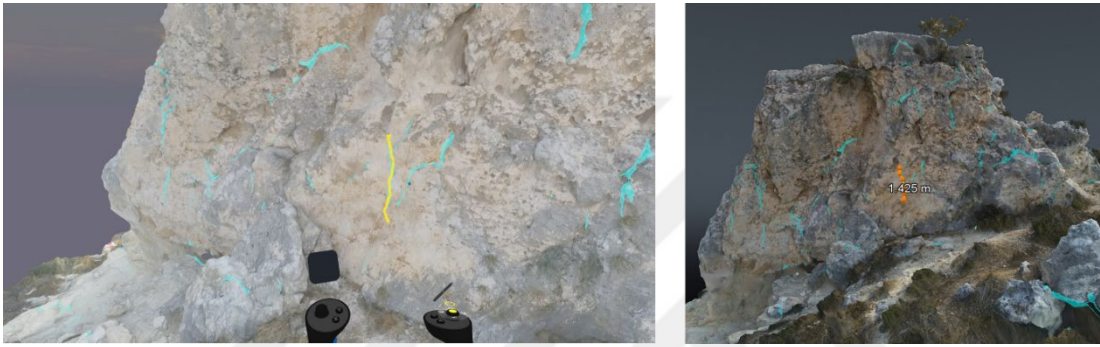
Doğruluk analizinden sonra HADİ model SG platformuna aktarılmıştır (Şekil 4.39). Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de SG ortamında yapılan denetimler verilmiştir.



Şekil 4.39 Kaya yapısının 3B HADİ modeli.



Şekil 4.40 Kaya yapısının 3B HADİ modeli.



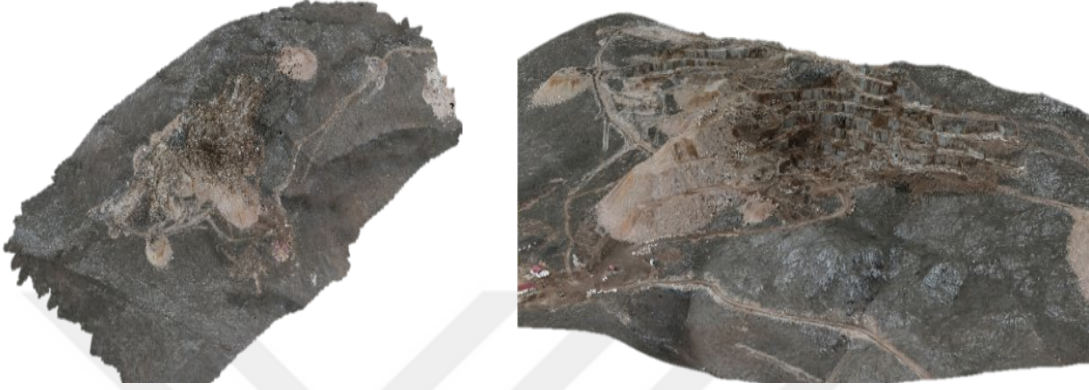
Şekil 4.41 Kaya yapısının 3B HADİ modeli.

4.6 Maden Ocağı Örneği

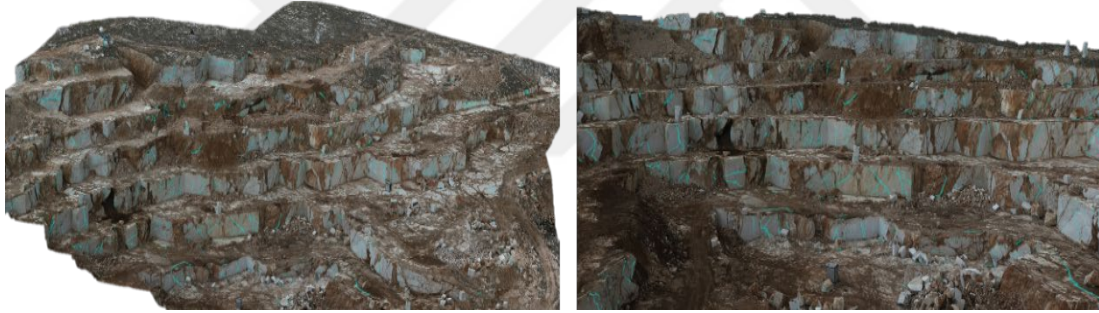
Bu tez kapsamında son uygulamamız ise bir mermer ocağında gerçekleştirilmiştir. Mermer maden ocaklarında cevher kısmında meydana gelen çatlakların tespiti, düzgün yapıli cevher üretimine katkı sunacağı gibi ocakta meydana gelebilecek potansiyel can ve mal kayıplarının önüne geçilmesine katkı sunmaktadır. Bu ve benzeri yapılarda düzenli çatlak tespiti ve onarımı, can ve mal kaybını önlemede, bakım maliyetlerini azaltmada, kullanım ömrünü uzatmaya yardımcı olmaktadır. Bu yüzden bu uygulama da mermer ocağı incelenmiştir.

Bu çalışmada da İHA fotogrametrisi uygulanmıştır. Çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak seçilen çalışma alanının spesifik özelliklerine göre bazı değişiklikler yapılmıştır. Örneğin çalışma alanının büyüklüğünden dolayı sadece cevher kısmında uçuşlar gerçekleştirilmiştir. Toplam alan büyük olsa da cevher alanının 300 m² olmasından dolayı sınırlı sayıda YKN yerleştirilmiştir. Alana 4 YKN ve 8 KN yerleştirilmiştir. KN olarak

doğruluk analizinde kullanılmıştır. Bu durum modelin doğruluğunu olumsuz etkilemiştir. Çalışma da üretilen 3B model Şekil 4.42’de, çatlakların tespit edildiği ve HADİ modelin görüntüsü ise Şekil 4.43’te verilmiştir. Üretilen fotogrametrik modelin iç doğruluğu 2.451 cm bulunmuştur.



Şekil 4.42 Mermer ocağı yapısının 3B HADİ modeli.



Şekil 4.43 Mermer ocağı yapısının 3B HADİ modeli.

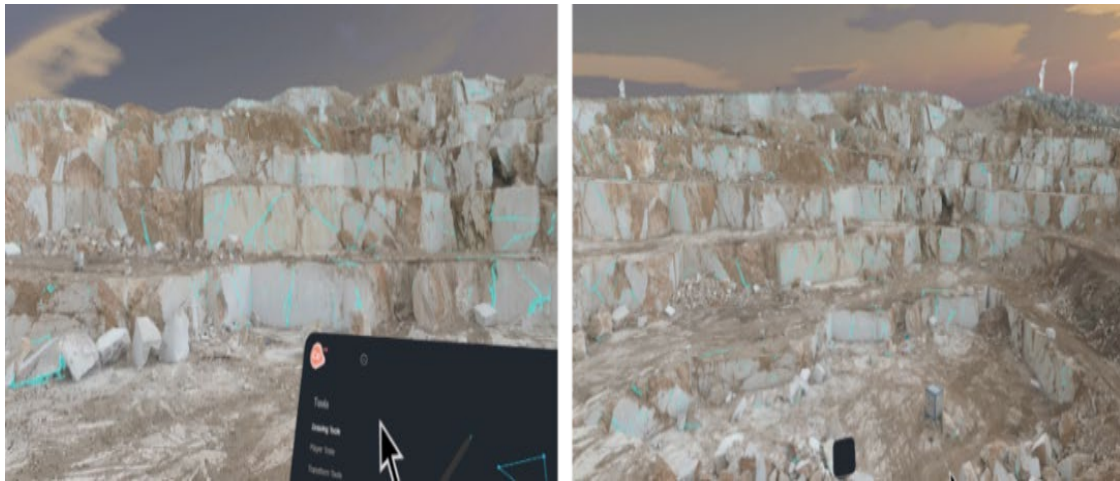
3B modelin doğruluk analizinin verildiği Çizelge 4.12 incelendiğinde diğer çalışmalara göre düşük hassasiyette 3B model üretildiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak hedef işaretlerinin GNSS alıcısı ile ölçülmesi ve nispeten daha düşük doğrulukta değerler elde edilmesidir. Diğer sebep ise YKN sayısının yetersiz olması ve arazinin düzensiz yapısı gösterilebilir. Şekil 4.43’te gösterilen çatlakların doğruluk analizinde ise kaya kütlelerinde yapılan doğruluk analizi yöntemi tercih edilmiştir. 3B model üzerinden alınan ölçüler referans kabul edilmiş ve otomatik tespit edilen çatlakların vektör uzunlukları ile karşılaştırılmış. Sonuçlar Çizelge 4.13’te verilmiştir. HADİ model SG platformuna aktarılmıştır. Sanal gerçeklik platformuna aktarılan HADİ model (Şekil 4.44) ile SG platformunda sanal denetim (Şekil 4.45) yapılmıştır.

Çizelge 4.12 Mermer ocağının 3B modelinin doğruluk analizi.

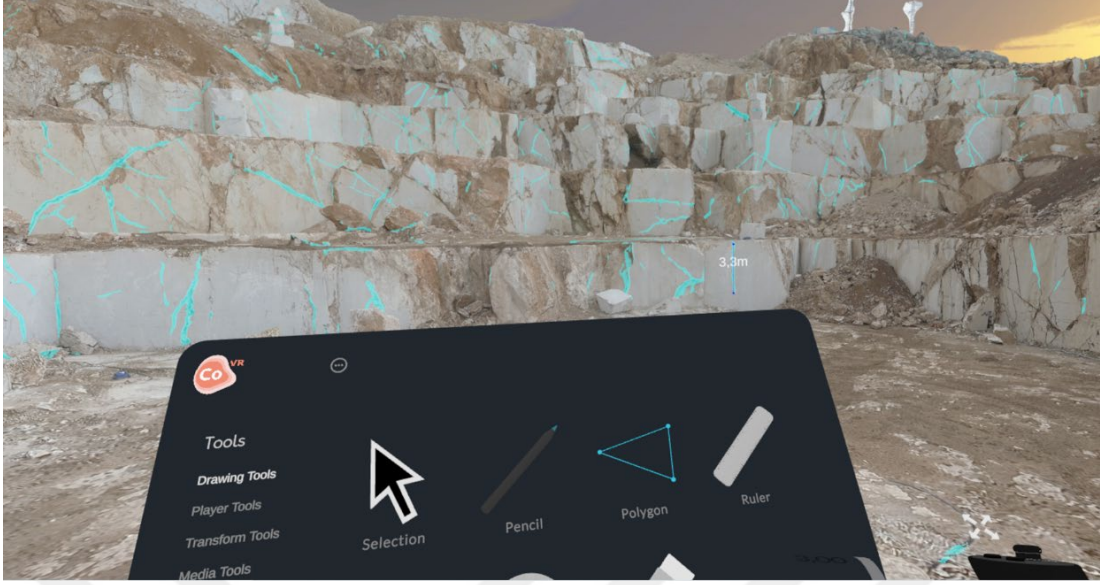
| No | Vx (cm) | Vy (cm) | Vz (cm) |
|-----------|---------|---------|---------|
| KN1 | -1.712 | 0.892 | 2.213 |
| KN2 | 0.866 | -0.724 | -1.145 |
| KN3 | -2.141 | 1.955 | 2.723 |
| KN4 | 0.611 | 0.814 | -1.104 |
| KN5 | 1.024 | 0.147 | 1.845 |
| KN6 | -1.224 | 1.254 | 1.909 |
| KN7 | 0.248 | -0.878 | -1.734 |
| KN8 | 0.946 | 0.685 | 1.014 |
| RMSE (cm) | 1.317 | 1.111 | 1.924 |

Çizelge 4.13 Mermer ocağında tespit edilen çatlakların doğruluk analizi.

| Çatlak | 3B model Uzunluk | Otomatik Uzunluk | Hata | RMSE |
|--------|------------------|------------------|--------|-------|
| 1 | 180.443 | 185.665 | -5.222 | 4.331 |
| 2 | 68.844 | 67.311 | 1.533 | |
| 3 | 91.283 | 93.297 | -2.014 | |
| 4 | 53.003 | 51.332 | 1.671 | |
| 5 | 70.804 | 79.264 | -8.461 | |
| 6 | 107.304 | 108.262 | -0.958 | |
| 7 | 130.710 | 125.203 | 5.507 | |
| 8 | 15.445 | 13.290 | 2.155 | |
| 9 | 107.927 | 110.314 | -2.387 | |
| 10 | 33.909 | 33.145 | 0.764 | |
| 11 | 47.214 | 46.326 | 0.887 | |
| 12 | 48.756 | 47.151 | 1.605 | |
| 13 | 341.262 | 339.693 | 1.569 | |
| 14 | 62.589 | 69.682 | -7.093 | |
| 15 | 82.406 | 89.906 | -7.500 | |



Şekil 4.44 Mermer ocağına ait HADİ modelinin SG platformunda gösterimi.



Şekil 4.45 Mermer ocağına ait HADİ model ile SG platformunda yapısal denetim.

4.7 Genel Bulgular

Tez çalışması kapsamında gerçekleşen uygulamalardan elde edilen metrik sonuçlar, metodolojinin tüm bileşenlerinin etkili bir şekilde işlediğini doğrulamaktadır. Her çalışma nesnesi ve alanları için otomatik tespit edilen çatlakların sayısı ile yerinde belirlenen çatlakların sayısının karşılaştırılması Çizelge 4.14'te verilmiştir. Doğruluk analizlerinde yerinde belirlenen ve ölçülen çatlaklar referans veri olarak kullanılmıştır. Fakat maden ocağının tehlikeli olmasından dolayı yerinde denetim yapılamamıştır. Bu yüzden 3B model üzerinden alınan değerler referans kabul edilmiştir. Kiriş nesnesi hariç

diğer tüm çalışmalarda tüm çatlaklar görsel olarak yerinde belirlenememiştir. Kiriş nesnesinde ise hem çatlakların az sayıda olması hem de nesnenin boyutu tüm çatlakların yerinde belirlenmesine ve ölçülmesine imkân vermiştir. Diğer çalışmalarda ise eksik kalan belirlenemeyen çatlaklar 3B model üzerinden tespit edilmiştir. Bu durum yapısal denetimlerde yerinde denetimlerin yetersiz kaldığını ve sanal denetimlerin avantajını göstermektedir. Ek olarak kiriş nesnesi hariç tüm çalışmalarda saha kısmında belirlenen çatlaklar geleneksel yöntemle ölçülemediğiştir. Bunun en büyük sebebi ise çatlakların erişilmesinin zor olması veya çevresel engellerin getirdiği olumsuzluklardır. Özellikle kaya kütlesi ve maden ocağı gibi çalışma alanının tehlikeli olduğu alanlarda bu durum olumsuzluklara sebep olmaktadır. Sahada ölçümü yapılan nesne ve alanlar için bu veriler referans kabul edilmiş olup saha verisi toplanamayan veya yetersiz olan çalışmalarda (kaya kütlesi ve maden ocağı) referans veri olarak 3B model üzerinden alınan ölçümler kullanılmıştır.

Çizelge 4.14 incelendiğinde yöntem RMSE ve doğruluk yüzdesi değerlerine göre başarılı doğruluk sağlamıştır. Çizelge 4.14'te verilen RMSE değerleri çatlak uzunluklarının incelenmesini, doğruluk yüzdesi değerleri ise çatlak sayılarının doğruluk değerlendirmesini içermektedir. Doğruluk yüzdesi hesaplanırken otomatik tespit edilen ve doğru olarak nitelendirilen çatlaklar dikkate alınmıştır. Çizelge 4.4'e göre metodoloji bu çalışma sonuçlarına göre başarılı gözükse de özellikle çatlak segmentasyonu için kullanılan yaklaşımlarda eğitim kütüphaneleri her çalışma alanına özgü olduğu için, kullanıcının daha iyi eğitilmiş modellere sahip olması durumunda sonuçların doğruluğu değiştirilebilir. Örneğin tarihi yapı olan Mezgit kaleye ait değerler incelendiğinde RMSE değeri metrik anlamda olumlu sonuçlansa da genel doğruluk yüzdesi düşük kalmıştır. Buradaki en önemli neden yöntemin tarihi eserlerde özellikle derz aralarını yanlış segmente etmesi ve çatlak olarak tanımlamasından kaynaklanmaktadır. Merdiven ve köprü yapılarında gölge alanlardan kaynaklı eksik ve yanlış tespitler oluşmuştur. Aynı şekilde kaya kütlelerinin karmaşık yapısı ve çatlakların düzensizliğine ek olarak yüzey üzerindeki bitki örtüsü çatlakların eksik tespit edilmesine sebep olmuştur. Maden ocağında ise mermer yapısının parlak yüzeyi ve çatlakların kılcal olması eksik tespitlerin oluşmasına neden olurken gölge alanlar yanlış tespitler oluşturmuştur. Bu durum ve kısıtlamalar RMSE ve genel doğruluk yüzdesini etkilemektedir. Bunun aksine geometrik

formu nispeten daha düzgün olan ve temiz bir yüzey yapısına sahip nesnelere otomatik tespitler olumlu sonuçlanmıştır. Metodolojinin etkinliği büyük ölçüde fotoğraf verilerinin kalitesine bağlıdır. Fotoğraf boyutları, çözünürlük, bulanıklık ve bozulma gibi faktörlerin etkisi dikkate alınmalıdır. Çalışmamızın sonuçlarının kesinliği, segmentasyon tekniklerinde kullanılan SfM ve derin öğrenme algoritmalarının etkinliğine bağlıdır. Modellerimizi eğitmek için kullanılan verilerin ve ek açıklamaların kalitesi ve miktarı derin öğrenme sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Çizelge 4.14 Çalışma nesneleri/alanları için genel doğruluk analizi.

| Çalışma Nesnesi/Alanı | Yerinde Tespit Edilen Çatlak Sayısı | Modelden Tespit Edilen Çatlak Sayısı | Geleneksel Olarak Ölçülen Çatlak Sayısı | Otomatik Tespit Edilen Çatlak Sayısı | | RMSE (cm) | Doğruluk Yüzdesi |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---------------|-----------|------------------|
| | | | | Doğru tespit | Yanlış Tespit | | |
| | | | | | | | |
| Kiriş | 17 | - | 17 | 17 | 2 | 0.123 | 1.00 |
| Merdiven | 71 | 17 | 55 | 78 | 18 | 0.097 | 0.89 |
| Köprü | 38 | 4 | 20 | 37 | 5 | 0.391 | 0.88 |
| Mezgit | 78 | 40 | 62 | 98 | 23 | 0.802 | 0.83 |
| Kaya Kütlesi | 34 | 7 | 4 | 31 | 7 | 1.920 | 0.76 |
| Maden Ocağı | - | 147 | - | 108 | 24 | 4.331 | 0.73 |

ID, tespit edilen çatlakların boyutu, derinliği ve konumu hakkında bilgi sağlamaktadır. ID araçlarının daha önce açıklanan matematiksel modelinin bazı sınırlamaları vardır. Modelin kalitesi, çatlak tespitinin doğruluğunu etkilemektedir. Modelde, gürültü veya diğer hatalar varsa, çatlaklar yanlış tespite yol açmaktadır. Çatlakların özellikleri: Çatlakların boyutu, derinliği ve şekli, çatlak tespitinin doğruluğunu etkilerken küçük çatlaklar veya karmaşık şekilli çatlaklar, yanlış tespit edilebilmektedir. Çevresel koşullar, çatlak tespitinin doğruluğunda etkili olurken örneğin, gölgeler veya yansılardan dolayı çatlaklar yanlış tespit edilebilir. Çatlak tespiti, önceden eğitilmiş modellerin neden olduğu yanlışlıklar ve belirsizliklerden etkilenirken gelişmiş derin öğrenme modellerinin kullanılması ve çatlak olarak tespit edilen hatalı verilerin kişisel müdahale veya otomatik eleme yoluyla kaldırılması, daha kesin sonuçlara yol açmaktadır. Sonuç olarak, çatlak segmentasyonunda yanlışlıklar ve belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu durum, önceden eğitilmiş modellerin kullanılmasına bağlanmaktadır. Sonuçlar, geliştirilmiş derin öğrenme modellerinden ve manuel müdahale veya otomatik eleme yoluyla çatlak olarak

belirlenen hatalı verilerin hariç tutulmasından kazanç sağlamaktadır. Amaç, hızlı hasar tespiti için mevcut uygulamayı iyileştirmektir. Bu, çatlakların derinliğinin tespit edilmesi de dâhil olmak üzere hasar özelliklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirebilir. Araştırmaların genel sonuçlarına bakıldığında hızlı hasar değerlendirmesine yönelik mevcut uygulamayı iyileştirmeler geliştirilmektedir. Bu yöntemle hızlı değerlendirmeden sonra, hasar özelliklerinin daha derin bir analizi gerekebilir (örneğin, çatlakların derinliklerinin tahmin edilmesi).

Bu tez çalışmasının temel amacı, fotogrametri ile üretilen fotorealistik Dİ ve SG entegrasyonu ile işlevsel bir tasarım geliştirerek yapı yönetimindeki mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarına nasıl katkıda bulunabileceğini araştırmak hızlı hasar tespiti için çözüm üretmektir. Daha sonra, çatlak derinliğinin belirlenmesi gibi hasar özelliklerinin ayrıntılı bir analizinin yapılması zorunlu olabilir. Bu amaçla, zemine nüfuz eden radar veya sonik darbe gibi alternatif yöntemler ve araçlar kullanılabilir (Conde vd. 2017; Valluzzi vd. 2018). Ancak, yığma yapılarda, özellikle de bu çalışmayla ilgili binalarda, yükü yalnızca dış duvarlar taşımaktadır (Pantoja-Rosero vd. 2023a). Bu bina tipolojisi, fotoğrafların yalnızca dış cepheden alındığı fotoğraf tabanlı değerlendirmeler için çok uygundur. Binanın iç kısmına ilişkin kapsamlı veriler elde etmek için daha fazla araştırma yapılması gerektirmektedir. Çalışmamız tekli yapılara odaklanmış olsa da bulgularının diğer çoklu yapılara da uygulanabileceğine inanıyoruz. Önerilen yöntem modern yapılarda daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Çünkü tarihi yapılardaki derzler ve boşluklar yöntemin olumsuz çalışmasına neden olmaktadır. Modern yapılarda bu sorun olmadığı için daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çatlaklar hakkında 3B olarak vektör şeklinde çıktı alınabilmekte, bu da çatlak derinliği hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Ancak algoritma çatlak genişliği hakkında bilgi vermese de 3B model kalitesi oldukça yüksek olduğundan ve yüksek doğrulukta bir geometrik model üretildiğinden operatör aracılığıyla 3B model üzerinden yarı otomatik genişlik bilgisi elde edilebilmektedir. Çalışmanın konusu olmadığı için çatlak genişliği ve derinliği analiz edilmemiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Zamanla meydana gelen yapısal hasarlara karşı yapıların sağlığını izlemek için uygun maliyetli ve verimli bir metodoloji geliştirmek zordur. Yapıların belgelenmesi ve denetlenmesi için geleneksel yöntemler yerine fotogrametri tabanlı 3B modeller kullanılmalıdır. Ancak 3B model tek başına yetersizdir. Fotorealistik 3B model ile diğer yapısal verilerin entegre edilmesiyle oluşturulan Dİ'ler, yapıların kapsamlı bir şekilde denetlenmesine ve gelecek nesiller için korunmasına önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu tez çalışmasında, fotogrametri yöntemiyle üretilmiş fotorealistik Dİ ve SG ile entegrasyonu yerinde yapısal denetimlere alternatif olarak sunulmaktadır. Bu çalışma, öznel değerlendirmeler içeren zorlu, maliyetli ve zahmetli bir süreç olan yapıların değerlendirilmesini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Daha etkili ve objektif bir değerlendirme elde etmek için, basitleştirilmiş 3B modeller ve çatlaklar da dahil olmak üzere yapıların Dİ'lerini üreten yöntemin kullanılmasını öneriyoruz. Fotogrametri ile üretilen fotorealistik modeli ile otomatik olarak tespit edilen ve vektör formattaki çatlakların bütünleştirilmesi ile HADİ model oluşturulur. Yapısal sağlık izleme amacıyla binaların HADİ'lerine dayanan mevcut yöntemlerin aksine, önerilen teknik kullanıcı müdahalesi gereksinimlerini azaltmaktadır. Gerekli durumlarda üretilen LOD3 modelde eksik kalan yapısal hasarlar manuel müdahale ile eklenebilir. Üretilen HADİ modelin etkinliği fotoğraf verilerinin kalitesine bağlıdır. Fotoğraf boyutu, çözünürlük, bulanıklık ve gürültü gibi farklı faktörlerin etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Görüntülerde düşük pürüzlülüğe veya yetersiz fazlalığa sahip bina dokularının başarısız olma olasılığı daha yüksektir. Bu da yanlışlıklara ve belirsiz çatlak segmentasyonuna neden olabilir.

Önerilen yöntem iki aşamalıdır, ilk aşama veri toplama, ikinci aşama ise 3B Dİ üretildiği, çatlakların tespit edildiği ve analiz edildiği ofis kısmıdır. Bu teknik, güçlendirilmiş yapılardaki sapmalar ve çatlaklar gibi bozulmalar da dâhil olmak üzere ilgilenilen küçük nesnelere tanınmasına, tespit edilmesine ve bunlar hakkında bilgi alınmasına olanak tanır. Yapısal denetimde olası tüm yüzeyleri inceleme ihtiyacı gerektiğinden yakın mesafe fotogrametrisi bir zorluk teşkil etmekte ve büyük yapılara sahip kapsamlı projeler için uygun değildir. Bu kısıtlamalar İHA fotogrametrisi ile aşılabılır. İHA fotogrametrisi, yapıları belgeleyen önceki araştırmalarda kanıtlandığı gibi, büyük nesnelere için yeterli

ayrıntıya sahip geometrik veriler sağlayabilir. Genel olarak, önerilen yöntemin 3B model üretiminde kalite açısından büyük başarı elde ettiği gözlemlenmiştir. Bu başarı, makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri aracılığıyla otomatik bir şekilde çatlak tespitinin hassasiyetini önemli ölçüde artırmıştır. Kullanılan eğitim modelinin, açıkça işaretlenmiş öznel değerlendirmelerle deneysel verilere uygun olması gerektiğini vurgulamak önemlidir. Böylece, hasar tespiti için yerinde denetimler yerine bu yaklaşım kullanılarak düşük maliyetli denetimler daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu çerçevenin en önemli avantajının gerçek verileri kullanıma olanak sağlaması olması ve SG uygulamalarının denetim sürecini hızlandırabilmesidir. Sonuçların daha fazla kullanıcıya ulaşması günümüz internet teknolojisiyle daha mümkün hale gelmiştir.

Mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetiminde yapı durumunun denetlenmesi, analizlerinin yapılması, daha verimli ve etkili bir görsel sunum için HADİ'lerin SG entegreli kullanımının uygulanması önemli bir aşama olacaktır. Çalışma sonunda yapısal 3B modellerin denetim ve analizleri yapılarak SG görselleştirme araçları ile aktarılıp farklı kullanıcılara sunulmuştur. Elde edilen bulgular, gelecekteki Dİ çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine ve 3B modellerin SG ile entegrasyonu üzerinden denetim ve analizlerin yapılmasına katkı sağlayacaktır. Sanal gerçeklik platformları üzerinden uzmanların çatlak analizleri yapma deneyimleri ve kullanıcı geri bildirimleri yapılması diğer çalışmalara öncü bilgiler sunabilir. Bu yöntemin uygulanması için gerekli ekipman, yazılım ve uzmanlık seviyesi gibi faktörlerin detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu platformların kullanıcı dostu olup olmadığı, pratikte karşılaşılan zorluklar ve potansiyel iyileştirmelerin neler olduğu konusunda araştırmalar gelecek çalışmalarda yapılacaktır. Son olarak önerilen yöntemler yapısal denetimler için olumlu gözükse de Dİ'ler ve SG platformlarının kullanımıyla ilişkili potansiyel gizlilik ve güvenlik sorunları dikkate alınmalıdır. Bu teknolojilerin kullanımı sırasında veri koruma ve gizlilik standartlarının nasıl sağlanacağına dair yönergeler iyi irdelenmelidir. Ayrıca, bu çerçevenin tüneller, yollar ve köprüler de dahil olmak üzere diğer altyapılara uygulanabilmesi için geometriyi belirleme, hasarı bölümlere ayırma ve hasarı altyapı türüne göre sınıflandırma teknikleri üzerinde çalışılmalıdır. Gelecek araştırmalarda, LOD3 modelinden LOD4 modeline geçiş için bina içinden alınan görüntüler entegre edilmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Adreani L, Colombo C, Fanfani M, Nesi P, Pantaleo G, Pisanu R, 2022, June, A photorealistic 3D city modeling framework for smart city digital twin, In 2022 IEEE International Conference on Smart Computing, (SMARTCOMP), 299-304.
- Ahmadabadian A H, Karami A, Yazdan R, 2019, An Automatic 3D Reconstruction System for Texture-less Objects, Robotics and Autonomous Systems, 117, 29-39.
- Akar A, 2017, Evaluation of Accuracy of Dems Obtained from Uav-point Clouds for Different Topographical Areas, International Journal of Engineering and Geosciences, 2(3), 110-117.
- Akay S S, 2023, İHA Tabanlı 3 Boyutlu Verilere Farklı Perspektiflerde Bakış: İTÜ Ayazağa Kampüsü, Turkish Journal of Remote Sensing and GIS, 4(1), 47-63.
- Akay S S, Özcan O, 2023, UAV and Smartphone-based 3D Modeling Integration with Augmented Reality (AR) Animation, Advanced UAV, 3(2), 91-99.
- Al-Dhabyani A N A D, 2022, Yüksek Binaların Yapım Aşamalarına Göre Büzülme Etkilerinin İrdelenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 104s, Bursa.
- Al-Thelaya K, Gilal N U, Alzubaidi M, Majeed F, Agus M, Schneider J, Househ M, 2023, Applications of Discriminative and Deep Learning Feature Extraction Methods for Whole Slide Image Analysis: A Survey, Journal of Pathology Informatics, 14, Article number 100335.
- Anafi, 2021, ANAFI White Paper v1.4. Available at <https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-02/anafi-product-sheet-white-paper-en.pdf>, Online document, Erişim tarihi: 15.05.2024
- Angjeliu G, Coronelli D, Cardani G, 2020, Development of the Simulation Model for Digital Twin Applications in Historical Masonry Buildings: The Integration Between Numerical and Experimental Reality, Computers & Structures, 238, Article number 106282.

- Antoniou F, Marinelli M, 2020, Proposal for the Promotion of Standardization of Precast Beams in Highway Concrete Bridges, *Frontiers in Built Environment*, 6, 119.
- Araz G, 2021, Doğa Görünümlerinin Sanal Uzaya Yansımalarının Dijital Sanat Bağlamında İncelenmesi, Anadolu Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, Eskişehir.
- Arora V, Mulaveesala R, Dua G, 2023, Depth resolved thermal wave imaging approach for non-destructive testing and evaluation of steel sample, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(3), 64.
- Arslan M A, 2022, İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Sensör ve Sensör Tabanlı Teknolojilerin Kullanımı ve Katkılarının İncelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 104s, Konya.
- Askar C, Sternberg H, 2023, Use of Smartphone Lidar Technology for Low-cost 3D Building Documentation with Iphone 13 Pro: A Comparative Analysis of Mobile Scanning Applications, *Geomatics*, 3(4), 563-579.
- Atanasyan A, Rossmann J, 2020, December, An Architecture for Ar-based Human-machine Interaction with Application to an Autonomous Mobile Robot Platform, In *ISR 2020; 52th International Symposium On Robotics*, 09–10 December 2020, Berlin, Germany, CD-ROM.
- Awobamise A O, Aderibigbe A A, 2018, UNESCOâ€™ S Recommendations on Communication and Cultural Heritage Matters ((1967-1984) and Implementation in Nigeria, *Covenant Journal of Communication*, 5(2), 87-107.
- Ayele Y Z, Aliyari M, Griffiths D, Droguett E L, 2020, Automatic Crack Segmentation for UAV-assisted Bridge Inspection, *Energies*, 13(23), 6250.
- Aytekin P, Yakın V, Çelik B H, 2020, Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Pazarlamadaki Yeri, *AJIT-E: Academic Journal of Information Technology*, 10(39), 87-117.
- Bakirman T, Gumusay M U, 2020, Integration of Custom Street View and Low-cost Motion Sensors, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 66-72.

- Banfi F, Dellù E, Stanga C, Mandelli A, Roncoroni F, Sivilli S, Cacudi G, 2023, Representing Intangible Cultural Heritage of Humanity: from the Deep Abyss of the Past to Digital Twin and XR of the Neanderthal Man and Lamalunga Cave (altamura, Apulia), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 171-181.
- Barazzetti L, Banfi F, Brumana R, Oreni D, Previtali M, Roncoroni F, 2015, HBIM and Augmented Information: Towards a Wider User Community of Image and Range-based Reconstructions, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 35-42.
- Barreira E, Almeida R M, 2019, *Infrared Thermography for Building Moisture Inspection*, Springer International Publishing.
- Barrile V, Bernardo E, Fotia A, Bilotta G, 2022, Integration of Laser Scanner, Ground-penetrating Radar, 3D Models and Mixed Reality for Artistic, Archaeological and Cultural Heritage Dissemination, *Heritage*, 5(3), 1529-1550.
- Bentley (2023a). Bentley Context Capture, 2023. Available at <https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>. Accessed 08 October 2023. Online document
- Bentley (2023b) Context Capture User Guide, 2023. [Online]. Available: <https://docs.bentley.com/LiveContent/index.html>
- Bernal E, Wu Q, Spiryagin M, Cole C, 2024, Augmented Digital Twin for Railway Systems, *Vehicle System Dynamics*, 62(1), 67-83.
- Bevilacqua M G, Russo M, Giordano A, Spallone R, 2022, 3D Reconstruction, Digital Twinning, and Virtual Reality: Architectural Heritage Applications. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 12-16 March 2022, Orlando, FL, USA.
- Blanco H, Boffill Y, Lombillo I, Villegas L, 2018, An Integrated Structural Health Monitoring System for Determining Local/Global Responses of Historic Masonry Buildings, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(8), E2196.

- Boboc R G, Gîrbacia F, Butilă E V, 2020, The Application of Augmented Reality in the Automotive Industry: A Systematic Literature Review, *Applied Sciences*, 10(12), 4259.
- Boschert S, Heinrich C, Rosen R, 2018, Next Generation Digital Twin, In Proc. Tmce, 7-11 May, 2018, Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
- Bukhsh Z A, 2019, Providing Decision Support for Transport Infrastructure Maintenance Planning: Through Application of Multi-criteria and Machine Learning Methods, University of Twente, Ph.D. Thesis, 274p, Twente.
- Carrivick J L, Geilhausen M, Warburton J, Dickson N E, Carver S J, Evans A J, Brown L E, 2013, Contemporary Geomorphological Activity Throughout the Proglacial Area of an Alpine Catchment, *Geomorphology*, 188, 83-95.
- Cha Y J, Choi W, Büyüköztürk O, 2017, Deep Learning-based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks, *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), 361-378.
- Chan B, Guan H, Jo J, Blumenstein M, 2015, Towards UAV-based Bridge Inspection Systems: A Review and an Application Perspective, *Structural Monitoring and Maintenance*, 2(3), 283-300.
- Conde B, Ramos L F, Oliveira D V, Riveiro B, Solla M, 2017, Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge, *Engineering Structures*, 148, 621-638.
- Cruz Franco P A, Rueda Márquez De La Plata A, Pérez Sendín M, 2023, Investigating a Workflow for Obtaining Physical Models from Digital Twins Obtained Through Photogrammetry and TLS: New Ways for a Sustainable Dissemination of Heritage, *Applied Sciences*, 13(2), 1057.
- Dan D, Dan Q, 2021, Automatic Recognition of Surface Cracks in Bridges Based on 2D-APES and Mobile Machine Vision, *Measurement*, 168, Article number 108429.
- Darwish A, Hassanien A E, 2022, IoHCT: Internet of Cultural Heritage Things Digital Twins for Conservation and Health Monitoring of Cultural in the Age of Digital

- Transformation, In Digital Twins for Digital Transformation: Innovation in Industry, Studies in Systems, Decision and Control, 423, 1-21.
- De Stefano A, Matta E, Clemente P, 2016, Structural Health Monitoring of Historical Heritage in Italy: Some Relevant Experiences, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6, 83-106.
- Debroy S, Sil A, 2022, An Apposite Transfer-learned DCNN Model for Prediction of Structural Surface Cracks Under Optimal Threshold for Class-imbalanced Data, Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 7(1), 83.
- Demirbağ İ, 2020, Üç Boyutlu Sanal Dünyalar, Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi, 6(4), 97-112.
- Demirbilek H. 2019, Zayıf-çok zayıf dayanımlı kaya kütlelerinde açılan tünel portal bölgelerinin jeolojik-jeoteknik açıdan incelenmesi: Kırık tüneli örneği (Erzurum, Türkiye), Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 183s, Mersin.
- Demirezen B, 2019, Artırılmış Gerçeklik ve Sanal Gerçeklik Teknolojisinin Turizm Sektöründe Kullanılabilirliği Üzerine Bir Literatür Taraması, Uluslararası Global Turizm Araştırmaları Dergisi, 3(1), 1-26.
- Dentoni V, Massacci G, 2013, Assessment of visual impact induced by surface mining with reference to a case study located in Sardinia (Italy), Environmental earth sciences, 68, 1485-1493.
- Dietrich J T, 2017, Bathymetric Structure-from-Motion: Extracting Shallow Stream Bathymetry from Multi-View Stereo Photogrammetry, Earth Surface Processes and Landforms, 42(2), 355-364.
- Ding W, Yang H, Yu K, Shu J, 2023, Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer, Automation in Construction, 152, Article number 104929.
- Discher S, Richter R, Döllner J, 2019, Concepts and Techniques for Web-based Visualization and Processing of Massive 3D Point Clouds With Semantics, Graphical Models, 104, Article number 101036.

- Dorafshan S, Maguire M, 2018, Bridge Inspection: Human Performance, Unmanned Aerial Systems and Automation, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 443-476.
- Dörtbudak E B, Akça Ş, Polat N, 2023, Exploring structural deterioration at historical buildings with UAV photogrammetry, *Cultural Heritage and Science*, 4(2), 62-68.
- Döş M E, Yiğit A Y, 2023, Küçük Ölçekli Tarihi Eserlerin Fotogrametri Yöntemi ile 3B Modellenmesi ve WEB Tabanlı Görselleştirilmesi, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 20- 28.
- Drobnyi V, Hu Z, Fathy Y, Brilakis I, 2023, Construction and Maintenance of Building Geometric Digital Twins: State of the Art Review, *Sensors*, 23(9), 4382.
- Dubois A, Gadde L E, 2002, The Construction Industry as a Loosely Coupled System: Implications for Productivity and Innovation, *Construction Management & Economics*, 20(7), 621-631.
- Ellenberg A, Kontsos A, Moon F, Bartoli I, 2016, Bridge Related Damage Quantification Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery, *Structural Control and Health Monitoring*, 23(9), 1168-1179.
- Eltner A, Sofia G, 2020, Structure from Motion Photogrammetric Technique, In *Developments in Earth Surface Processes*, 23, 1-24,
- Erçolak A, 2021, Yığma Yapıların Duvarlarının Kesme Gerilme Dayanımının Deneysel Olarak Araştırılması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Konya.
- Erdoğan S, Yaşayan A, Uysal, M, Varlık A, Avdan U, 2018. Fotogrametri, Anadolu Üniversitesi yayınları, 190s, Eskişehir.
- Ernst F, Akdağ S, Polat N, Akaslan D, Önal M, Ekinçi A, 2024, Development of a Virtual Reality Application for the Old Harran School. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(1), 77-85.
- Eschmann C, Kuo C M, Kuo C H, Boller C, 2013, High-resolution Multisensor Infrastructure Inspection with Unmanned Aircraft Systems, *The International*

- Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, 125-129.
- Esmailzadeh A, Shaffiee Haghshenas S, Mikaeil R, Guido G, Shirani Faradonbeh R, Abbasi Azghan R, Taghizadeh S, 2022, Risk Assessment in Quarries using Failure Modes and Effects Analysis Method (Case study: West-Azerbaijan Mines), Journal of Mining and Environment, 13(3), 715-725.
- Fawzy H E D, Kandeel R, Farhan M, 2023, Detection of Deformations in Reinforced Concrete Structures Using Modern Surveying Techniques, Alexandria Engineering Journal, 70, 191-218.
- Feilden B, 2007, Conservation of Historic Buildings, Routledge TSE III. Baskı, United Kingdom.
- Fernández-Hernandez J, González-Aguilera D, Rodríguez-Gonzálvez P, Mancera-Taboada J, 2015, Image-based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-cost Tool for Archaeological Applications, Archaeometry, 57(1), 128-145.
- Fidan Ş, Ulvi A, 2022, Tarsus Aziz Pavlus Kilisesinin Yersel Lazer Tarama Teknikleri ile Üç Boyutlu Modelinin Oluşturularak Sanal Gerçekliğe Hazırlamanın Değerlendirilmesi, Türkiye Lidar Dergisi, 4(2), 60-70.
- Fonstad M A, Dietrich J T, Courville B C, Jensen J L, Carbonneau P E, 2013, Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement, Earth Surface Processes and Landforms, 38(4), 421-430.
- François A, Ibos L, Feuillet V, Meulemans J, 2021, In situ measurement method for the quantification of the thermal transmittance of a non-homogeneous wall or a thermal bridge using an inverse technique and active infrared thermography, Energy and Buildings, 233, 110633.
- Fryskowska-Skibniewska A, Delis P, Kedzierski M, Matusiak D, 2022, The Conception of Test Fields for Fast Geometric Calibration of the FLIR VUE PRO Thermal Camera For Low-cost UAV Applications, Sensors, 22(7), 2468.

- Fu Y, Downey A R, Yuan L, Zhang T, Pratt A, Balogun Y, 2022, Machine Learning Algorithms for Defect Detection in Metal Laser-based Additive Manufacturing: A Review, *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 693-710.
- Gattulli V, Lepidi M, Potenza F, 2016, Dynamic Testing and Health Monitoring of Historic and Modern Civil Structures in Italy, *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(1), 71.
- Gazi A, Skevis G, Founti M A, 2012, Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant, *Journal of cleaner production*, 32, 10-21.
- Gehri N, Mata-Falcón J, Kaufmann W, 2020, Automated crack detection and measurement based on digital image correlation, *Construction and Building Materials*, 256, 119383.
- Gischig V, Preisig G, Eberhardt E, 2016, Numerical investigation of seismically induced rock mass fatigue as a mechanism contributing to the progressive failure of deep-seated landslides, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 2457-2478.
- Grasso R F, Andresciani F, Altomare C, Pacella G, Castiello G, Carassiti M, Quattrocchi C C, Faiella E, Zobel B B, 2021, Lung Thermal Ablation: Comparison Between an Augmented Reality Computed Tomography (CT) 3D Navigation System (SIRIO) and Standard CT-Guided Technique, *Biology*, 10(7), 646.
- Gürel U, 2021, Artırılmış Gerçeklik Yardımı ile Öğrenme Deneyimi, *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 2(1), 42-45.
- Haibt M, 2024, End-to-end Digital Twin Creation of the Archaeological Landscape in Uruk-warka (Iraq), *International Journal of Digital Earth*, 17(1), Article number 2324964.
- Hallermann N, Morgenthal G, 2014, Visual Inspection Strategies for Large Bridges Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV), In Proc. of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 7-11 July 2014, Shanghai, China.

- Hamal S N G, Sarı B, Ulvi A, 2020, Using of Hybrid Data Acquisition Techniques for Cultural Heritage a Case Study of Pompeiopolis, Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi, 2(2), 55-60.
- Harrington M C, Jones C, Peters C, 2022 August, Course on virtual nature as a digital twin: botanically correct 3D AR and VR optimized low-polygon and photogrammetry high-polygon plant models, In ACM SIGGRAPH 2022 Courses, 1-69.
- Hernández-Pérez I, Álvarez G, Xamán J, Zavala-Guillén I, Arce J, Simá E, 2014, Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components—A review, Energy and Buildings, 80, 81-105.
- Hocaoğlu M M, 2022, Yapı Bilgi Modelleme'den Dijital İkiz'e Doğru: Akıllı Tesis Yönetimini Etkinleştirme, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, İstanbul.
- Hokkeling J, 2020, Towards Construction 4.0: An Assessment on the Potential of Digital Twins in the Infrastructure Sector, University of Twente, M.Sc. Thesis, 120p, Twente.
- Hosamo H H, Hosamo M H, 2022, Digital Twin Technology for Bridge Maintenance Using 3D Laser Scanning: A Review, Advances in Civil Engineering, 2022(1), Article number 2194949.
- Hoskere V, Narazaki Y, Hoang T A, Spencer Jr B F, 2018, Towards Automated Post-earthquake Inspections with Deep Learning-based Condition-aware Models, The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring, 7WCSCM, 22-25 July, 2018, Qingdao, China
- Hou H C, Lai J H, Wu H, Wang T, 2023, Digital Twin Application in Heritage Facilities Management: Systematic Literature Review and Future Development Directions, Engineering, Construction and Architectural Management, Basımda.
- Hou H, Wu H, Remøy H, 2021, Digital Twins to Enable Smart Heritage Facilities Management: A Systematic Literature Review, In Proceedings of the 27th Pacific Rim Real Estate Society Annual Conference, Pacific Rim Real Estate Society, 2-5 June 2021, Kaiserslautern, Germany.

- Jagielska–Burduk A, 2022, Cultural Heritage Protection in Private Law: In Search of New Solutions, In *Cultural Heritage as a Legal Hybrid: Between Public and Private Law*, Cham: Springer International Publishing, 303-332.
- Javernick L, Brasington J, Caruso B, 2014, Modeling the Topography of Shallow Braided Rivers Using Structure-from-motion Photogrammetry, *Geomorphology*, 213, 166-182.
- Jiang F, Ma L, Broyd T, Chen K, 2021, Digital Twin and Its Implementations in the Civil Engineering Sector, *Automation in Construction*, 130, Article number 103838.
- Jouan P, Hallot P, 2019, Digital Twin: A HBIM-based Methodology to Support Preventive Conservation of Historic Assets Through Heritage Significance Awareness, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 609-615.
- Jouan P, Hallot P, 2020, Digital Twin: Research Framework to Support Preventive Conservation Policies, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 228.
- Juarez P D, Gregory E D, 2021, In situ thermal inspection of automated fiber placement for manufacturing induced defects, *Composites Part B: Engineering*, 220, 109002.
- Jung H J, 2019, Bridge Inspection and Condition Assessment Using Unmanned Aerial Vehicles (Uavs): Major Challenges and Solutions from a Practical Perspective, *Smart Structures and Systems, An International Journal*, 24(5), 669-681.
- Kabadayı A, Erdoğan A, 2022 Application of Terrestrial Photogrammetry Method in Cultural Heritage Studies: A Case Study of Seyfeddin Karasungur, *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 62-67.
- Kaewunruen S, Sresakoolchai J, Ma W, Phil-Ebosie O, 2021, Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions, *Sustainability*, 13(4), 2051.

- Kao S P, Wang F L, Lin J S, Tsai J, Chu Y D, Hung P S, 2022, Bridge Crack Inspection Efficiency of an Unmanned Aerial Vehicle System with a Laser Ranging Module, *Sensors*, 22(12), 4469.
- Karaca Ş, Önem E Ö, 2023, Dijital İkiz Teknolojisinin Turizm Sektöründe Kullanım Alanları ve Etkileri, *Kayseri Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(2), 158-168.
- Kaya Y, Şenol H İ, Polat N, 2021, Three-dimensional Modeling and Drawings of Stone Column Motifs in Harran Ruins, *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 48-52.
- Kaya Y, Temel D, 2022, Cep Telefonu Kameralarından Elde Edilen Görüntüler ile Kültürel Miras Eserlerinin Modellenmesi, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 17-22.
- Kaygusuz B, 2019, Çavuşçugöl linyit açık ocağı doğu şevlerinde oluşan deformasyonların jeodezik yöntemle izlenmesi ve matematiksel modellenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Konya.
- Kim J Y, Park M W, Huynh N T, Shim C, Park J W, 2023, Detection and Length Measurement of Cracks Captured in Low Definitions Using Convolutional Neural Networks, *Sensors*, 23(8), 3990.
- Koç F N, 2023, Dijital Pazarlamanın Metaverse Fenomenine Sunduğu Fırsatlar ve Sınırlılıklar: Tekstil Sektörü İncelemesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 127s, İstanbul.
- Kong X, Hucks R G, 2023. Preserving Our Heritage: A Photogrammetry-based Digital Twin Framework for Monitoring Deteriorations of Historic Structures, *Automation In Construction*, 152, Article number 104928.
- Konstantakis M, Trichopoulos G, Aliprantis J, Michalakis K, Caridakis G, Thanou A, Koskeridou E, 2023, An enhanced methodology for creating digital twins within a paleontological museum using photogrammetry and Laser Scanning Techniques, *Heritage*, 6(9), 5967-5980.
- Kritzinger W, Karner M, Traar G, Henjes J, Sihn W, 2018, Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification, *Ifac-Papersonline*, 51(11), 1016-1022.

- Kwiatkowski J, Anigacz W, Beben D, 2020, A Case Study on the Noncontact Inventory of the Oldest European Cast-iron Bridge Using Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetric Techniques, *Remote Sensing*, 12(17), 2745.
- Latifi R, Hadzima-Nyarko M, Radu D, Rouhi R, 2023, A Brief Overview on Crack Patterns, Repair and Strengthening of Historical Masonry Structures, *Materials*, 16(5), 1882.
- Le M, Le D, Vu H H T, 2023, Thermal inspection of photovoltaic modules with deep convolutional neural networks on edge devices in AUV, *Measurement*, 218, 113135.
- Leskovský R, Kučera E, Haffner O, Rosinová D, 2020, Proposal of Digital Twin Platform Based on 3D Rendering and IIoT Principles Using Virtual/Augmented Reality, in 2020 *Cybernetics & Informati*, 29 January - 01 February 2020, Velke Karlovice, Czech Republic.
- Levine N M, Spencer Jr B F, 2022, Post-Earthquake Building Evaluation Using UAVs: A BIM-based Digital Twin Framework, *Sensors*, 22(3), 873.
- Li J, Bosché F, Lu C X, Wilson L, 2023, Occlusion-free Orthophoto Generation for Building Roofs Using UAV Photogrammetric Reconstruction and Digital Twin Data, 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 5-7 July, 2023, Chennai, India, 371-378.
- Liu Y F, Nie X, Fan J S, Liu X G, 2020, Image-based Crack Assessment of Bridge Piers Using Unmanned Aerial Vehicles and Three-Dimensional Scene Reconstruction, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(5), 511-529.
- Lo Brutto M, Iuculano E, Lo Giudice P, 2021, Integrating Topographic, Photogrammetric and Laser Scanning Techniques for a Scan-To-Bim Process, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 883-890.
- Lu T, Si H, Gao Y, 2023, A research of 3D Models for Cloud-based Technology Combined with Laser Scanning Close-range Photogrammetry Method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-10.

- Macdonald S, Gonçalves A P A, 2020, Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance, Los Angeles: Getty Conservation Institute. 30p, Los Angeles
- Mandirola M, Casarotti C, Peloso S, Lanese I, Brunesi E, Senaldi I, 2022, Use of UAS for Damage Inspection and Assessment of Bridge Infrastructures, International Journal of Disaster Risk Reduction, 72, Article number 102824.
- Masciotta M G, Ramos L F, Lourenço P B, 2017, The Importance of Structural Monitoring As A Diagnosis and Control Tool in The Restoration Process Of Heritage Structures: A Case Study in Portugal, Journal of Cultural Heritage, 27, 36-47.
- Mırdan O, Yakar M, 2017, Tarihi Eserlerin İnsansız Hava Aracı İle Modellenmesinde Karşılaşılan Sorunlar, Geomatik, 2(3), 118-125.
- Mihai S, Yaqoob M, Hung D V, Davis W, Towakel P, Raza M, Nguyen H X, 2022, Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 24(4), 2255-2291.
- Milanoski D, Galanopoulos G, Zarouchas D, Loutas T, 2023, Multi-Level Damage Diagnosis on Stiffened Composite Panels Based on A Damage-Uninformative Digital Twin, Structural Health Monitoring, 22(2), 1437-1459.
- Mohammadi M, Rashidi M, Mousavi V, Karami A, Yu Y, Samali B, 2021, Case Study on Accuracy Comparison of Digital Twins Developed For A Heritage Bridge Via UAV Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning, In 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 30 June - 2 July 2021, Porto, Portugal, 1713-1720.
- Mohan A, Poobal S, 2018, Crack Detection Using Image Processing: A Critical Review and Analysis, Alexandria Engineering Journal, 57(2), 787-798.
- Mongelli M, De Canio G, Roselli I, Malena M, Nacuzi A, de Felice G, 2017, 3D Photogrammetric Reconstruction By Drone Scanning for FE Analysis and Crack Pattern Mapping of the “Bridge of the Towers”, Spoleto, Key Engineering Materials, 747, 423-430.

- Moon D, Chung S, Kwon S, Seo J, Shin J, 2019, Comparison and Utilization of Point Cloud Generated From Photogrammetry and Laser Scanning: 3D World Model for Smart Heavy Equipment Planning, *Automation in Construction*, 98, 322-331.
- Mortara M, Catalano C, 2018, 3D Virtual Environments As Effective Learning Contexts for Cultural Heritage, *Italian Journal of Educational Technology*, 26(2), 5-21.
- Munawar H S, Hammad A W, Haddad A, Soares C A P, Waller S T, 2021, Image-based Crack Detection Methods: A Review, *Infrastructures*, 6(8), 115.
- Nayak S K, Satapathy A, Mantry S, 2022, Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review, *Journal of Building Engineering*, 46, 103742.
- Niezrecki C, Baqersad J, Sabato A, 2018, Digital image correlation techniques for non-destructive evaluation and structural health monitoring, *Handbook of advanced non-destructive evaluation*, 46.
- Obradović M, Vasiljević I, Đurić I, Kićanović J, Stojaković V, Obradović R, 2020, Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys-A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia), *Applied Sciences*, 10(8), 2743.
- Onyıl H İ, Yılmaz M, 2022, Web tabanlı mekânsal analizlerin açık kaynak kodlu yazılımlar ile gerçekleştirilmesi, *Geomatik*, 7(1), 52-57.
- Opoku D G J, Perera S, Osei-Kyei R, Rashidi M, 2021. Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, Article number 102726.
- Osadcha I, Jurelionis A, Fokaidis P, 2023, Geometric Parameter Updating in Digital Twin Of Built Assets: A Systematic Literature Review, *Journal of Building Engineering*, Article number 106704.
- Özcan O, Akay S S, 2022, Paşabağ Bölgesi Peri Bacalarına Ait İHA Tabanlı 3B Verilerin Metaverse Kavramı Kapsamında Değerlendirilmesi. VIII. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu, 17-19 Kasım 2022, Ankara

- Özçelik M, 2023, Environmental effects of marble quarry operations in Burdur Lake Basin (Burdur-Turkey), *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 10(3), 4517–4525.
- Panella F, Lipani A, Boehm J, 2022, Semantic Segmentation of Cracks: Data Challenges and Architecture, *Automation in Construction*, 135, Article number 104110.
- Pantoja-Rosero B G, Achanta R, Beyer K, 2023a, Damage-augmented Digital Twins Towards the Automated Inspection of Buildings, *Automation in Construction*, 150, Article number 104842.
- Pantoja-Rosero B G, Achanta R, Beyer K, 2023b, Digital Twins of Stone Masonry Buildings for Damage Assessment, In *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, 04 September 2023, Kyoto, Japan, 1437-1445.
- Pantoja-Rosero B G, Achanta R, Kozinski M, Fua P, Perez-Cruz F, Beyer K, 2022, Generating LOD3 building models from structure-from-motion and semantic segmentation, *Automation in Construction*, 141, Article number 104430.
- Park D, 2023, Stability Evaluation of Rock Slopes with Cracks Using Limit Analysis, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(7), 4779-4797.
- Parke G, Disney P, 2005, *Bridge Management: v. 5: Inspection, Maintenance, Assessment and Repair*, Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Management, Organised by the University of Surrey, 11-13 April 2005, London, United Kingdom.
- Peña K I C, Jaramillo Y A M, Peña A M C, 2023, Instruments for the Legal Protection of Digitized Cultural Heritage in Colombia, *International Journal for the Semiotics of Law-Revue internationale de Sémiotique juridique*, 36(5), 1925-1944.
- Perry B J, Guo Y, Atadero R, van de Lindt J W, 2020, Streamlined Bridge Inspection System Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Machine Learning. *Measurement*, 164, Article number 108048.
- Polat N, 2023, An Investigation of Ancient Water Collection and Storage Systems Near the Karahantepe Neolithic Site Using UAV and GIS, *Environmental Archaeology*, 28(6), 475-487.

- Polat N, Çokoğullu S, Memduhoğlu A, Ulukavak M, Şenol H I, Oral M, Marangoz Ö, 2021, İHA Fotogrametrisinin Arkeolojik Yüzey Araştırmalarına Katkılarının İncelenmesi, TÜBA-AR Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi, (28), 175-186.
- Polat N, Memduhoğlu A, Akça Ş, 2022, Determining the change in burnt forest areas with UAV: The example of Osmanbey campus, *Advanced UAV*, 2(1), 11-16.
- Pomeroy J, 2023, *Hardware, Software, Heartware: Digital Twinning for More Sustainable Built Environments*, by Routledge, 250p, Taylor & Francis.
- Praticò F G, Fedele R, Naumov V, Sauer T, 2020, Detection and Monitoring of Bottom-Up Cracks in Road Pavement Using A Machine-Learning Approach, *Algorithms*, 13(4), 81.
- Prouzeau A, Wang Y, Ens B, Willett W, Dwyer T, 2020, Corsican Twin: Authoring in Situ Augmented Reality Visualisations in Virtual Reality, In *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces*, 28 September – 2 October 2020, Island of Ischia, Italy.
- Qi Q, Tao F, Hu T, Anwer N, Liu A, Wei Y, Wang L, Nee A Y, 2021, Enabling Technologies and Tools for Digital Twin, *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- Qin R, Gruen A, 2014, 3D Change Detection at Street Level Using Mobile Laser Scanning Point Clouds and Terrestrial Images, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 90, 23-35.
- Rainieri C, Rosati I, Cieri L, Fabbrocino G, 2022, Development of the Digital Twin of A Historical Structure for SHM Purposes, In *European Workshop on Structural Health Monitoring*, 16 June 2022, Cham: Springer International Publishing, 639-646.
- Remondino F, Campana S, 2014, 3D Recording And Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, *BAR International Series*, 2598, 111-127.
- Ren G, Ding R, Li H, 2019, Building an Ontological Knowledgebase for Bridge Maintenance, *Advances in Engineering Software*, 130, 24-40.

- Rosen R, Von Wichert G, Lo G, Bettenhausen K D, 2015, About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing, *Ifac-papersonline*, 48(3), 567-572.
- RTMCT, Republic of Türkiye Ministry of Culture and Tourism, (2023), <https://mersin.ktb.gov.tr/TR-73147/silifke.html>, (Erişim tarihi: 04.04.2024).
- Sánchez-Aparicio L J, del Blanco-García F L, Mencías-Carrizosa D, Villanueva-Llauradó P, Aira-Zunzunegui J R, Sanz-Arauz D, Pierdicca R, Pinilla-Melo, Garcia-Gago J, 2023, Detection of Damage in Heritage Constructions Based on 3D Point Clouds, A Systematic Review, *Journal of Building Engineering*, Article number 107440.
- Sarı B, Hamal SNG, Ulvi A, 2020. Documentation of complex structure using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry method and terrestrial laser scanner (TLS), *Türkiye Lidar Dergisi*, 2(2), 48-54.
- Savoia M, Buratti N, Vincenzi L, 2017, Damage and Collapses in Industrial Precast Buildings After the 2012 Emilia Earthquake, *Engineering Structures*, 137, 162-180.
- Shabani A, Kioumarsı M, Zucconi M, 2021, State of the Art of Simplified Analytical Methods for Seismic Vulnerability Assessment of Unreinforced Masonry Buildings, *Engineering Structures*, 239, Article number 112280.
- Shabani A, Skamantzari M, Tapinaki S, Georgopoulos A, Plevris V, Kioumarsı M, 2022, 3D Simulation Models for Developing Digital Twins of Heritage Structures: Challenges and Strategies, *Procedia Structural Integrity*, 37, 314-320.
- Sharma A, Kosasih E, Zhang J, Brintrup A, Calinescu A, 2022, Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions, *Journal of Industrial Information Integration*, 30, Article number 100383.
- Shim C S, Dang N S, Lon S, Jeon C H, 2019, Development of A Bridge Maintenance System for Prestressed Concrete Bridges Using 3D Digital Twin Model, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(10), 1319-1332.

- Soleymani A, Jahangir H, Nehdi M L, 2023, Damage Detection and Monitoring in Heritage Masonry Structures: Systematic Review, *Construction and Building Materials*, 397, Article number 132402.
- Sommer M, Seiffert K, 2022, Scan Methods and Tools for Reconstruction of Built Environments As Basis for Digital Twins. *Digitwin: an Approach for Production Process Optimization in A Built Environment*, 51-77.
- Stepinac M, Lulić L, Ožić K, 2022, The Role of UAV and Laser Scanners in the Post-Earthquake Assessment of Heritage Buildings After the 2020 Earthquakes in Croatia, *Advanced Nondestructive and Structural Techniques for Diagnosis, Redesign and Health Monitoring for the Preservation of Cultural Heritage*, Presents the work of TMM-CH 2021, Cham: Springer International Publishing, 167-177.
- Succar B, Sher W, Williams A, 2012, Measuring BIM performance: Five metrics. *Architectural Engineering and Design Management*, 8(2), 120-142.
- Südor S, 2021, Dijital Sanatlarda 3D Model Oluşturma Tekniklerinin Kullanımı, *İdil Sanat ve Dil Dergisi*, 10(88), 1757-1779.
- Şasi A, Yakar M, 2017. Photogrammetric Modelling of Sakahane Masjid Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Turkish Journal of Engineering*, 1(2), 82-87.
- Şasi A, Yakar M, 2018, Photogrammetric modelling of Hasbey Dar'ülhuffaz (Masjid) using an unmanned aerial vehicle, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(1), 6-11.
- Şenol H İ, Çöltekin A, 2022, Building Footprint Extraction from High Resolution UAV Images Using Deep Learning Algorithms in the Context of Unplanned Urbanisation, 5, 144.
- Şenol H İ, Polat N, Kaya Y, Memduhoğlu A, Ulukavak M, 2021, Digital Documentation of Ancient Stone Carving in Suayip City. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(1), 10-14.
- Tabet Aoul K A, Hagi R, Abdelghani R, Syam M, Akhozheya B, 2021, Building envelope thermal defects in existing and under-construction housing in the UAE; infrared

- thermography diagnosis and qualitative impacts analysis, *Sustainability*, 13(4), 2230.
- Tadeja S K, Rydlewicz W, Lu Y, Bubas T, Rydlewicz M, Kristensson P O, 2021, Measurement and inspection of photo-realistic 3-D VR models, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 41(6), 143-151.
- Taib S, Jadin M S, Kabir S, 2012, Thermal imaging for enhancing inspection reliability: detection and characterization, *Infrared Thermography*, (3), 209.
- Tanbour H, Tanbour E, 2023, A Four-Wall Virtual Reality Visualization of Patient-Specific Anatomy: Creating Full User Immersive Experience From Computed Tomography Scans, *Turkish Journal of Engineering*, 7(2), 134-140.
- Tao F, Cheng J, Qi Q, Zhang M, Zhang H, Sui F, 2018a, Digital Twin-driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563-3576.
- Tao F, Zhang H, Liu A, Nee A Y, 2018b, Digital Twin in Industry: State-Of-The-Art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415.
- Thwaites H, 2013, Digital Heritage: What Happens when We Digitize Everything?, *Visual Heritage in The Digital Age*, 327-348.
- Tian F, Zhao Y, Che X, Zhao Y, Xin D, 2019, Concrete Crack Identification and Image Mosaic Based on Image Processing, *Applied Sciences*, 9(22), 4826.
- Tomita K, Chew M Y L, 2022, A review of infrared thermography for delamination detection on infrastructures and buildings, *Sensors*, 22(2), 423.
- Ubertini F, Comanducci G, Cavalagli N, 2016, Vibration-based Structural Health Monitoring of A Historic Bell-tower Using Output-only Measurements and Multivariate Statistical Analysis, *Structural Health Monitoring*, 15(4), 438-457.
- Uluçay A, Küçük U F, 2023, Tarih Öğretiminde Sanal Gerçeklik ve Artırılmış Gerçeklik: Geçmişi Canlandırmak için Yeni Yollar, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 113-129.

- Ulvi A, 2022, Using UAV Photogrammetric Technique for Monitoring, Change Detection, and Analysis of Archeological Excavation Sites, *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 15(3), 1-19.
- Ulvi A, Yakar M, Alyilmaz C, Alyilmaz S, 2017, Using the close range photogrammetry technique in 3-dimensional work: History of obrukhan sample, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 347-355.
- Uray F, Metin A, Varlik A, 2015, 3D Architectural Surveying of Diyarbakir Wall's Ulu Beden Tower with Terrestrial Laser Scanner, *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 73-78.
- Uslu A, Uysal M, 2021, Kitle Kaynaklı Fotoğraflar Kullanılarak Kültürel Mirasın Üç Boyutlu Modellenmesi ve Web Tabanlı Görselleştirilmesi: Afrodisias-Tetrapylon Örneği, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 632-639.
- Üncü I S, Kayakuş M, Yavru C A, İbadov N, 2023, Binalarda Çatlak Kontrolünde CNN Tabanlı Görüntü İşleme Ölçüm Sisteminin Kullanılması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4-İcaıame 2023), 257-267.
- Valluzzi M R, Cescatti E, Cardani G, Cantini L, Zanzi L, Colla C, Casarin F, 2018, Calibration of sonic pulse velocity tests for detection of variable conditions in masonry walls, *Construction and Building Materials*, 192, 272-286.
- Van Krevelen D W F, Poelman R, 2010, A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations, *International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1-20.
- Vicente L, Lomelino P, Carreira F, Campos F M, Mendes M J, Calado J M F, 2022, September, A Photorealistic Digital Twin for a Tank Truck Washing Robotic System, In *Working Conference on Virtual Enterprises*, 57-66, Cham: Springer International Publishing.
- Vitiello V, Castelluccio R, Trampetti S, 2022, The Recognition of Cultural Value As an Element for the Preservation of The 20th-Century Heritage: Application of the ICOMOS Multidisciplinary Approach To the Ex SMOM of Pozzuoli, *Heritage*, 6(1), 284-299.

- Vuoto A, Funari M F, Lourenço P B, 2023, on the Use of the Digital Twin Concept for the Structural Integrity Protection of Architectural Heritage, *Infrastructures*, 8(5), 86.
- Walpole B, 2021, Report Card for America's Infrastructure Grades Reveal Widening Investment Gap, American Society of Civil Engineers. Erişim adresi: <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/article/2021/03/03/2021-report-card-for-americas-infrastructure-grades-reveal-widening-investment-gap>.
- Wang C, Cho Y K, Kim C, 2015, Automatic BIM Component Extraction from Point Clouds of Existing Buildings for Sustainability Applications, *Automation in Construction*, 56, 1-13.
- Wang L, Wang Z, Kendall P, Gumma K, Turner A, Ratchev S, 2024, Digital-Twin Deep Dynamic Camera Position Optimisation for the V-STARS Photogrammetry System Based on 3D Reconstruction, *International Journal of Production Research*, 62(11), 3932-3951.
- Xu H, Shao Y, Chen J, Wang C, Berres A, 2024. Semi-automatic geographic information system framework for creating photo-realistic digital twin cities to support autonomous driving research, *Transportation research record*, Article number 03611981231205884.
- Yakar M, Doğan Y, 2017, Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı Fotogrametrik Rölöve Alımı ve Üç Boyutlu Modelleme Çalışması, *Geomatik*, 2(1), 11-17.
- Yakar M, Ulvi A, Yiğit A Y, Alptekin A, 2023, Discontinuity set extraction from 3D point clouds obtained by UAV Photogrammetry in a rockfall site, *Survey Review*, 55(392), 416–428.
- Yamazaki F, Liu W, 2016, Remote Sensing Technologies for Post-Earthquake Damage Assessment: A Case Study on The 2016 Kumamoto Earthquake, 6 th ASIA Conference on Earthquake Engineering (6ACEE) 22-24 September 2016, Cebu City, Philippines, 1-13.
- Yang J, Wang W, Lin G, Li Q, Sun Y, Sun Y, 2019, Infrared thermal imaging-based crack detection using deep learning, *Ieee Access*, 7, 182060-182077.

- Yao Y, Tung S T E, Glisic B, 2014, Crack Detection and Characterization Techniques—An Overview, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(12), 1387-1413.
- Yavuz S, Küçükömeroğlu T, 2022, Anodik Oksidasyon İşlem Parametrelerinin 7075-T6 Alaşımın Korozyon Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, *Omü Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 2(2), 119-136.
- Yiğit A Y, Uysal M, 2021, Tarihi Eserlerin 3B Modellenmesi ve Artırılmış Gerçeklik ile Görselleştirilmesi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1032-1043.
- Yiğit A Y, Uysal M, 2023, Dijital İkizlerin Geliştirilmesinde Fotogrametrinin Kullanımı ve Artırılmış Gerçeklik ile Görselleştirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1-1.
- Yiğit A Y, Uysal M, 2024, Automatic Crack Detection and Structural Inspection of Cultural Heritage Buildings Using UAV Photogrammetry and Digital Twin Technology, *Journal of Building Engineering*, Article number 109952.
- Ying Y, Koeva M, Kuffer M, Zevenbergen J, 2022, Toward 3D Property Valuation—A Review of Urban 3D Modelling Methods for Digital Twin Creation, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(1), 2.
- Yoon S, Lee S, Kye S, Kim I H, Jung H J, Spencer Jr B F, 2022, Seismic Fragility Analysis of Deteriorated Bridge Structures Employing a UAV Inspection-Based Updated Digital Twin, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(12), 346.
- Yu W, Nishio M, 2022, Multilevel Structural Components Detection and Segmentation Toward Computer Vision-Based Bridge Inspection, *Sensors*, 22(9), 3502.
- Yu Y, Wang C, Gu X, Li J, 2019, A Novel Deep Learning-Based Method for Damage Identification of Smart Building Structures, *Structural Health Monitoring*, 18(1), 143-163.
- Yue R, Li K, Qin Q, Li M, Li M, 2022. Study on the weakening law and classification of rock mass damage under blasting conditions, *Energies*, 15(5), 1809.

- Zeng S, Chen J, Cho Y K, 2020, User Exemplar-Based Building Element Retrieval From Raw Point Clouds Using Deep Point-Level Features. *Automation in Construction*, 114, Article number 103159.
- Zeybek M, 2021, Classification of UAV Point Clouds By Random Forest Machine Learning Algorithm, *Turkish Journal of Engineering*, 5(2), 48-57.
- Zeybek M, Kaya A, 2020, Tarihi Yığma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği, *Geomatik*, 5(1), 47-57.
- Zhai G, Xu Y, Spencer B F, 2024, Bidirectional Graphics-Based Digital Twin Framework for Quantifying Seismic Damage of Structures Using Deep Learning Networks, *Structural Health Monitoring*, 2024, 1-25.
- Zhang A, Wang K C, Li B, Yang E, Dai X, Peng Y, Fei Y, Liu Y, Li Q J, Chen C, 2017, Automated Pixel-Level Pavement Crack Detection on 3D Asphalt Surfaces Using a Deep-Learning Network, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(10), 805-819.
- Zhang C, Shu J, Zhang H, Ning Y, Yu Y, 2024, Estimation of Load-Carrying Capacity of Cracked RC Beams Using 3D Digital Twin Model Integrated with Point Clouds and Images, *Engineering Structures*, 310, Article number 118126.
- Zhang F, Hu Z, Fu Y, Yang K, Wu Q, Feng Z, 2020, A new identification method for surface cracks from UAV images based on machine learning in coal mining areas, *Remote Sensing*, 12(10), 1571.
- Zhang H, Zhao Y, 2019, Cracking of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams Subjected to Loads and Steel Corrosion, *Construction and Building Materials*, 210, 364-379.
- Zhong J, Xu W, Dang X, Wei K, 2022, Effect of Near-Fault Vertical Ground Motions on Failure Mode of Long-Span Sea-Crossing Cable-Stayed Bridges, *Ocean Engineering*, 266, Article number 113005.
- Zhou S, Song W, 2020, Deep Learning-Based Roadway Crack Classification Using Laser-Scanned Range Images: A Comparative Study on Hyperparameter Selection, *Automation in Construction*, 114, Article number 103171.

Zollini S, Alicandro M, Dominici D, Quaresima R, Giallonardo M, 2020, UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA), Remote Sensing, 12(19), 3180.



Yiğit A Y, Uysal M, 2021, Tarihi Eserlerin 3B Modellenmesi ve Artırılmış Gerçeklik ile Görselleştirilmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 1032-1043.

