

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİFORMASYON MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

3B NESNE MODELLEMEDE METRİK DOĞRULUK ANALİZİ:
HÜNKAR ÇEŞMESİ ÖRNEĞİ

KUBİLAY YAĞCIOĞLU

KOCAELİ 2026

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİFORMASYON MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

3B NESNE MODELLEMEDE METRİK DOĞRULUK ANALİZİ:
HÜNKAR ÇEŞMESİ ÖRNEĞİ

KUBİLAY YAĞCIOĞLU

Prof. Dr. Ozan ARSLAN
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Alp ERTÜRK
İkinci Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Özer AKYÜREK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Orhan KURT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Zaide DURAN
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.01.2026

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Kubilay YAĞCIOĞLU

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Kubilay YAĞCIOĞLU

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 3 boyutlu nesne modellemelerinde metrik doğruluk analizi amacıyla kaleme alınmıştır. Tez sürecim boyunca akademik bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, değerli vaktini ve desteğini benden esirgemeyen sayın danışmanlarım Prof. Dr. Ozan ARSLAN ve Doç. Dr. Alp ERTÜRK hocalarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında görüş ve önerileriyle bana katkı sağlayan meslektaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her aşamasında olduğu gibi, bu zorlu süreçte de sabırları, güvenleri ve sonsuz destekleriyle yanımda olan sevgili aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak – 2026

Kubilay YAĞCIOĞLU

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Görüntü Tabanlı 3B Modelleme.....	4
2.2. 3B Yeniden Yapılandırma Yöntemleri.....	5
2.2.1. Aktif 3B Yeniden Yapılandırma Yöntemleri.....	6
2.2.1.1. Lazer Tarama.....	6
2.2.1.2. Bilgisayarlı Tomografi.....	8
2.2.1.3. Yapılandırılmış Işık.....	8
2.2.1.4. Uçuş Zamanı (Time of Flight – ToF) Sistemler.....	10
2.2.1.5. Fotometrik Stereo.....	10
2.2.1. Pasif 3B Yeniden Yapılandırma Yöntemleri.....	11
2.2.2.1. Fotogrametri.....	12
2.2.2.2. Stereo Görme.....	13
2.2.2.3. Hareket Tabanlı Yapısal Algılama.....	14
2.2.3. Çoklu Sensör Birleştirme.....	14
2.3. Üç Boyutlu Modellerde Metrik Kalite Ölçütleri.....	15
2.4. Tarihi Yapıların 3B Modellenmesine Yönelik Literatür Taraması.....	17
3. ÇALIŞMA ALANI.....	21
3.1. Hünkar Çeşmesi'nin Konumu ve Tarihsel Önemi.....	21
3.2. Hünkar Çeşmesi'nin Mimari ve Fiziksel Özellikleri.....	21
3.3. Çalışma Alanının 3B Modellemeyi Etkileyen Özellikleri.....	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
4.1. Kullanılan Donanım.....	24
4.1.1. Nikon D300 DSLR Kamera.....	24
4.1.2. i89 Visual IMU GNSS.....	25
4.1.3. GNSS Veri Toplama Kontrolörü (HCE600).....	26
4.2. Kullanılan Yazılım (Agisoft Metashape).....	27
4.3. Veri Toplama Süreci.....	27
4.3.1. Görüntü Alımı.....	28
4.3.2. YKN'lerin Ölçülmesi.....	29
4.3.3. Kontrol Mesafe Ölçümleri.....	29
4.4. Fotogrametrik Yöntem ve Veri İşleme.....	31
4.4.1. Fotogrametrik Geriden Kestirme ve Matematik Model.....	31
4.4.1. Doğrusallaştırma ve Katsayılar Matrisi.....	33
4.4.2. Nesne Noktalarının 3B Koordinatlarının Hesaplanması.....	35
4.5. Ticari Yazılım ile Veri İşleme ve 3B Model Oluşturma.....	38
4.5.1. Görüntülerin Hazırlanması ve Ön İşleme.....	38

4.5.2. Görüntü Eşleştirme ve Kamera Yönelme	39
4.5.3. Yoğun Nokta Bulutu Oluşturulması	39
4.5.4. YKN Kullanılarak Modelin Ölçeklendirilmesi	39
4.5.5. 3B Modelin Oluşturulması	40
4.6. Doğruluk Analizi	40
4.6.1. Mutlak Doğruluk Değerlendirmesi	40
4.6.2. Bağıl Doğruluk Değerlendirmesi	41
4.6.3. Karşılaştırmalı Doğruluk Değerlendirmesi	41
5. DENEYSEL BULGULAR	43
5.1. Dış Yönelme Parametrelerinin Geriden Kestirme ile Hesaplanması	43
5.2. Nesne Koordinatlarının Kestirimi ve Karşılaştırılması	45
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	66
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	69
ÖZGEÇMİŞ	70



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	3B modelleme yöntemleri	6
Şekil 2.2.	LiDAR sistemlerinde mesafe ölçümünün temel çalışma şeması	7
Şekil 2.3.	Yapılandırılmış ışık ile 3B ölçüm prensibinin şematik gösterimi	9
Şekil 2.4.	Fotometrik stereo yaklaşımının şematik gösterimi	11
Şekil 2.5.	Fotogrametri yaklaşımının şematik gösterimi	12
Şekil 3.1.	Hünkar Çeşmesi'nin fotoğrafı	22
Şekil 4.1.	Nikon D300	25
Şekil 4.2.	i89 Visual IMU GNSS cihazı	26
Şekil 4.3.	Nikon D300 ile Hünkar Çeşmesi'nin bir fotoğrafı	28
Şekil 4.4.	ÇŞM kullanılarak gerçekleştirilen kontrol mesafe ölçmelerine örnek	30
Şekil 4.5.	3B modelin ön cephesi üzerinden alınan kontrol mesafeleri	30
Şekil 4.6.	Fotogrametrik görüntü-nesne-kamera geometrisi	32
Şekil 4.7.	Nesne noktasının triyangülasyon ile hesaplanması	36
Şekil 4.8.	Bağıl doğruluk – mutlak doğruluk	40
Şekil 5.1.	i89 cihazı ile ölçülen IMG0001 nolu fotoğraf	44
Şekil 5.2.	Hesaplamalarda kullanılan üç adet bindirmeli görüntü	46
Şekil 5.3.	Seçilen nesne konumları	47
Şekil 5.4.	Agisoft ile oluşturulan 3B nesne modeli	52
Şekil 5.5.	Kontrol noktalarının konumları ve hata elipsleri	53
Şekil 5.6.	i89 cihazı ile elde edilmiş görüntülerin şeması	55
Şekil 5.7.	i89 cihazının kamera kalibrasyonu	55
Şekil 5.8.	Kamera yatay konumları ve görüntü bindirmeleri	56
Şekil 5.9.	Kamera yatay konumları ve hata elipsleri	57
Şekil 5.10.	Kontrol noktalarının konumları ve hata elipsleri	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Nikon D300 DSLR kameranın temel teknik özellikleri	24
Tablo 4.2. i89 Visual IMU GNSS cihazının temel teknik özellikleri	26
Tablo 4.3. i89 cihazına ait kameranın görüntü oluşturma özellikleri	26
Tablo 5.1. Bağlama noktalarına ait görüntü ve nesne koordinatları	43
Tablo 5.2. Model ve yazılım parametre hesaplamaları	44
Tablo 5.3. IMG0001 için koordinat düzeltmeleri ve RMS değerleri	45
Tablo 5.4. Şekil 5.2’ de seçilen görüntüler ve nesne noktalarının koordinatları	47
Tablo 5.5. Seçilen fotoğrafların koordinatları ve açısal yöneltilmeleri	48
Tablo 5.6. Hesaplanan 3 noktanın nesne koordinatları	50
Tablo 5.7. Agisoft yazılımının oluşturduğu koordinatlar	50
Tablo 5.8. Hesaplanan üç (3) nesne nokta koordinatlarının standart sapmaları	51
Tablo 5.9. Kontrol noktalarının toplam karesel ortalama hatası	53
Tablo 5.10. Nokta koordinatlarından hesaplanan doğruluk değerleri	53
Tablo 5.11. Kamera konumlarının standart sapmaları	57
Tablo 5.12. Kontrol noktalarının toplam karesel ortalama hatası	58
Tablo 5.13. Kontrol noktalarının konum hataları	58
Tablo 5.14. Denetim noktalarının konum hataları	59
Tablo 5.15. Modeller için hesaplanan toplam karesel ortalama hatalar	60
Tablo 5.16. Kontrol mesafe ölçüleri ile yapılan karşılaştırmalar	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat Derece
cm	: Santimetre
m	: Metre
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
°	: Derece

Kısaltmalar

2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
3D	: Three Dimensional (Üç Boyutlu)
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AVHRR	: Advanced Very High Resolution Radiometer (Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre)
C3S	: Copernicus Climate Change Service (Copernicus İklim Değişikliği Servisi)
CT	: Computed Tomography (Bilgisayarlı Tomografi)
ÇŞM	: Çelik Şerit Metre
DSLR	: Digital Single Lens Reflex (Dijital Tek Lensli Yansıtmalı)
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems (Küresel Konumlama Sistemleri)
IMU	: Inertial Measurement Unit (Atalet ölçüm birimi)
LiDAR	: Light Detection and Ranging (Işık Algılama ve Uzaklık Belirleme)
MVS	: Multi-View Stereo (Çok Görüşlü Stereo)
SfM	: Structure from Motion (Hareket tabanlı yapısal algılama)
ToF	: Time of Flight (Uçuş Zamanı)
YKN	: Yer Kontrol Noktaları

3B NESNE MODELLEMEDE METRİK DOĞRULUK ANALİZİ: HÜNKAR ÇEŞMESİ ÖRNEĞİ

ÖZET

Günümüzde üç boyutlu (3B) nesne modelleme teknikleri, özellikle tarihi ve kültürel yapıların belgelenmesi ve korunması amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Görüntü tabanlı yöntemler; düşük maliyet, taşınabilirlik ve uygulama esnekliği gibi avantajları nedeniyle bu alanda öne çıkmakta, ancak üretilen modellerin metrik doğruluğunun değerlendirilmesi önemli bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, Kocaeli ilinin Gebze ilçesinde yer alan Hünkar Çeşmesi, yersel fotogrametri ve bilgisayarlı görü tabanlı yöntemler kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışma kapsamında, yer kontrol noktaları kullanılarak ve kullanılmadan üretilen modellerin metrik doğrulukları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yüksek çözünürlüklü bir DSLR kamera ve akıllı cihaz kamerası ile elde edilen görüntüler fotogrametrik olarak işlenmiştir. Ticari bir fotogrametrik yazılım kullanılarak üretilen modellerin yanı sıra, görüntü–nesne ilişkisini tanımlayan klasik fotogrametrik matematik modele dayalı hesaplamalar harici ortamlarda uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma sonuçları, teoriye dayalı hesaplamalar ile ticari yazılım çıktıları arasındaki uyumu ortaya koyarak kullanılan yaklaşımın güvenilirliğini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Elde edilen bulguların, görüntü tabanlı 3B modelleme yöntemlerinin tarihi yapıların belgelenmesinde metrik açıdan değerlendirilmesine katkı sağlaması ve benzer mühendislik uygulamaları için yol gösterici nitelikte olması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B Nesne Modelleme, Bilgisayarlı Görü, Hünkar Çeşmesi, Metrik Doğruluk, Yersel Fotogrametri.

METRIC ACCURACY ANALYSIS IN 3D OBJECT MODELING: CASE STUDY OF THE HÜNKAR ÇEŞMESİ

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) object modeling techniques have become widely used, particularly in the documentation and preservation of historical and cultural heritage structures. Image-based methods stand out due to their low cost, portability, and operational flexibility; however, the metric reliability of the generated models remains a critical requirement for engineering and documentation purposes. In this thesis, the Hünkar Fountain, located in the Gebze district of Kocaeli Province, Türkiye, was modeled in three dimensions using terrestrial photogrammetry and computer vision-based approaches. Within the scope of the study, the metric accuracy of the generated models was evaluated by comparing scenarios with and without ground control points. Images acquired using a high-resolution DSLR camera and a smartphone camera were processed photogrammetrically. In addition to commercial photogrammetric software, independent calculations based on classical photogrammetric mathematical models describing the image-object relationship were implemented in external environments. The results obtained from these two approaches were comparatively analysed, allowing an assessment of the consistency between theory-based calculations and commercial software outputs. The results of this study are expected to contribute to the metric evaluation of image-based 3D modeling methods in the documentation of historical structures and to provide guidance for similar engineering and cultural heritage applications.

Keywords: 3D Object Modeling, Computer Vision, Hünkar Fountain, Metric Accuracy, Terrestrial Photogrammetry.

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak üç boyutlu (3B) nesne modelleme teknikleri, başta harita mühendisliği olmak üzere mimarlık, arkeoloji, kültürel miras belgeleme ve inşaat mühendisliği gibi birçok disiplinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle tarihi ve kültürel yapıların dijital ortamda belgelenmesi, korunması ve gelecek nesillere aktarılması süreçlerinde 3B modeller önemli bir araç hâline gelmiştir. Bu modeller yalnızca görsel sunum amacıyla değil; analiz, belgeleme, restorasyon ve karar destek süreçlerinde de etkin biçimde kullanılmaktadır.

Ancak mühendislik ve belgeleme amaçlı uygulamalarda, üretilen 3B modellerin yalnızca görsel temsil sunması yeterli değildir. Model geometrisinin ölçülebilir, tekrarlanabilir ve metrik açıdan güvenilir olması, bu tür uygulamaların temel gereklilikleri arasında yer almaktadır. Bir 3B modelin doğruluk, eksiksizlik ve çözünürlük gibi nitelikleri, kullanılan veri toplama ve değerlendirme yaklaşımlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle, görüntü tabanlı 3B modelleme süreçlerinde elde edilen sonuçların doğruluk ve hassasiyet açısından değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Görüntü tabanlı 3B modelleme yöntemleri, yersel fotogrametri ve bilgisayarlı görüş yaklaşımlarına dayanmaktadır. Bu yöntemlerde, farklı bakış açılarından elde edilen iki boyutlu görüntüler kullanılarak nesnelerin üç boyutlu geometrisi yeniden oluşturulmaktadır. Düşük maliyetli donanım gereksinimleri, taşınabilirlik ve uygulama esnekliği gibi avantajları nedeniyle görüntü tabanlı yöntemler günümüzde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, farklı donanım ve yazılım seçeneklerinin bulunması, kullanıcı beklentilerinin değişkenliği ve uygulama koşullarındaki farklılıklar nedeniyle, hangi yaklaşımın hangi koşullarda daha iyi ölçüm sonuçları ve geometrik hassasiyet sağladığının belirlenmesi her zaman kolay olmamaktadır.

Bir 3B modelin üretim süreci; kullanılan görüntüleme sistemi, çekim geometrisi, aydınlatma koşulları, kamera kalibrasyonu ve veri işleme algoritmaları gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu parametreler, elde edilen modelin geometrik niteliğini ve kullanım amacına uygunluğunu doğrudan etkilemektedir. Özellikle tarihi yapıların görüntü tabanlı yöntemlerle modellenmesinde, karmaşık mimari detayların doğru

biçimde temsil edilmesi ve yöneltme aşamalarındaki belirsizlikler, modelin metrik güvenilirliğini etkileyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır.

Literatürde, tarihi ve kültürel yapıların fotogrametri ve bilgisayarlı görü tabanlı yöntemlerle üç boyutlu modellenmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalarda, farklı kontrol ölçüleri ve değerlendirme yaklaşımları kullanılarak üretilen modellerin metrik doğruluklarının karşılaştırmalı ve uygulamaya dönük biçimde ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, görüntü tabanlı 3B modelleme süreçlerinde doğruluk analizine yönelik daha kapsamlı ve karşılaştırmalı çalışmalara duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, farklı sensör özellikleri ve ölçme yaklaşımları kullanılarak üretilen 3B nesne modellerinin metrik doğruluk potansiyelini araştırmaktır. Bir 3B modelin niteliği; doğruluk, eksiksizlik ve çözünürlük gibi ölçütlere bağlı olup, bu ölçütler kullanılan cihazlar, veri toplama stratejileri ve değerlendirme prosedürleriyle doğrudan ilişkilidir. Literatürde, yüksek çözünürlüklü ticari kameralar ve YKN'lere dayalı fotogrametrik uygulamalarla milimetre mertebesinde doğruluklara ulaşılabildiği; buna karşılık GNSS tabanlı ölçüm cihazları veya görsel ölçüm özellikli taşınabilir sistemlerle üretilen modellerde doğruluk seviyesinin genellikle santimetre mertebesinde olduğu bildirilmektedir. Bu bağlamda, farklı donanım ve referans kombinasyonlarının aynı nesne üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, görüntü tabanlı 3B modelleme süreçlerinin metrik performansının anlaşılması açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, Kocaeli ilinin Gebze ilçesinde yer alan Hünkar Çeşmesi, yersel fotogrametri ve bilgisayarlı görü teknikleri kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışmanın temel amacı; görüntü tabanlı yöntemlerle üretilen bir tarihi yapı modelinin metrik doğruluğunu, farklı referans ve kontrol ölçüleri yardımıyla değerlendirmek ve doğruluğu etkileyen temel parametreleri ortaya koymaktır. Bu kapsamda, hem yer kontrol noktaları kullanılmadan hem de YKN kullanılarak elde edilen modeller karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yer kontrol noktalarının koordinatları, GNSS ve/veya klasik ölçme teknikleri kullanılarak belirlenmiş ve kontrol amaçlı referans veri olarak değerlendirilmiştir. Görüntü alımı aşamasında, yüksek çözünürlüklü bir Nikon D300 DSLR kamera ile elde edilen görüntülerin yanı sıra bir

GNSS tabanlı ölçüm cihazı kamerası kullanılarak elde edilen görüntülerden üretilen modellerin doğruluk performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, modelin bağıl doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla çelik şerit metre ile kontrol mesafe ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler, fotogrametrik olarak işlenerek üç boyutlu model üretimi gerçekleştirilmiş ve bu süreçte Agisoft Metashape yazılımından yararlanılmıştır. Ayrıca, üç boyutlu modelleme sürecinde kullanılan ticari yazılımdan bağımsız olarak, görüntü–nesne ilişkisini tanımlayan klasik fotogrametrik matematik modele dayalı hesaplamalar harici ortamlarda uygulanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen parametreler ve doğruluk ölçütleri, ticari yazılım çıktıları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların, benzer mühendislik uygulamaları ile kültürel mirasın belgelenmesine yönelik çalışmalara yol gösterici nitelikte katkılar sunması amaçlanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, tez çalışmasının dayandığı kuramsal altyapı ve ilgili literatür sistematik bir biçimde ele alınmıştır. Görüntü tabanlı üç boyutlu (3B) modelleme yaklaşımlarının temel kavramları, bu alanda yaygın olarak kullanılan yöntemler ve doğruluk değerlendirmesine ilişkin kuramsal çerçeve açıklanmıştır. Ayrıca, tarihi yapıların 3B modellenmesine yönelik daha önce gerçekleştirilmiş akademik çalışmalar incelenerek, bu tez çalışmasının literatürdeki konumu ortaya konulmuştur. Bu çerçevede sunulan bilgiler, çalışmanın yöntemsel tercihlerini ve doğruluk değerlendirme yaklaşımını destekleyici bir arka plan oluşturmayı amaçlamaktadır.

2.1. Görüntü Tabanlı 3B Modelleme

Görüntü tabanlı 3B modelleme, bir nesneye veya sahneye ait farklı bakış açılarından elde edilen iki boyutlu (2B) görüntüler kullanılarak, bu nesnenin veya sahnenin üç boyutlu geometrisinin sayısal ortamda yeniden oluşturulmasını amaçlayan yöntemler bütünüdür. Bu yaklaşım, fotogrametri ve bilgisayarlı görü disiplinlerinin ortak prensiplerine dayanmaktadır (Szeliski, 2010; Luhmann ve diğ., 2014). Günümüzde görüntü tabanlı 3B modelleme; düşük maliyetli veri toplama imkanı, taşınabilir donanım kullanımı ve yüksek detay üretme potansiyeli sayesinde birçok mühendislik, belgeleme ve kültürel miras uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Görüntü tabanlı yöntemlerde nesnenin geometrik yapısı doğrudan ölçülmemekte, bunun yerine görüntüler üzerinde yer alan ortak detayların farklı görüntülerdeki konumları arasındaki geometrik ilişkilerden yararlanılarak dolaylı bir yeniden yapılandırma gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte görüntüler arasındaki örtüşme oranı, çekim geometrisi, kamera iç parametreleri ve kullanılan veri işleme algoritmaları, elde edilecek 3B modelin niteliğini doğrudan etkileyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Görüntü tabanlı 3B modelleme yaklaşımları genel olarak fotogrametri tabanlı ve bilgisayarlı görü tabanlı yöntemler olarak iki ana grupta değerlendirilmektedir. Fotogrametri, ölçme bilimine dayalı bir disiplin olup, geometrik ilişkilerin matematiksel modeller aracılığıyla tanımlanmasını esas almaktadır. Bu nedenle fotogrametrik

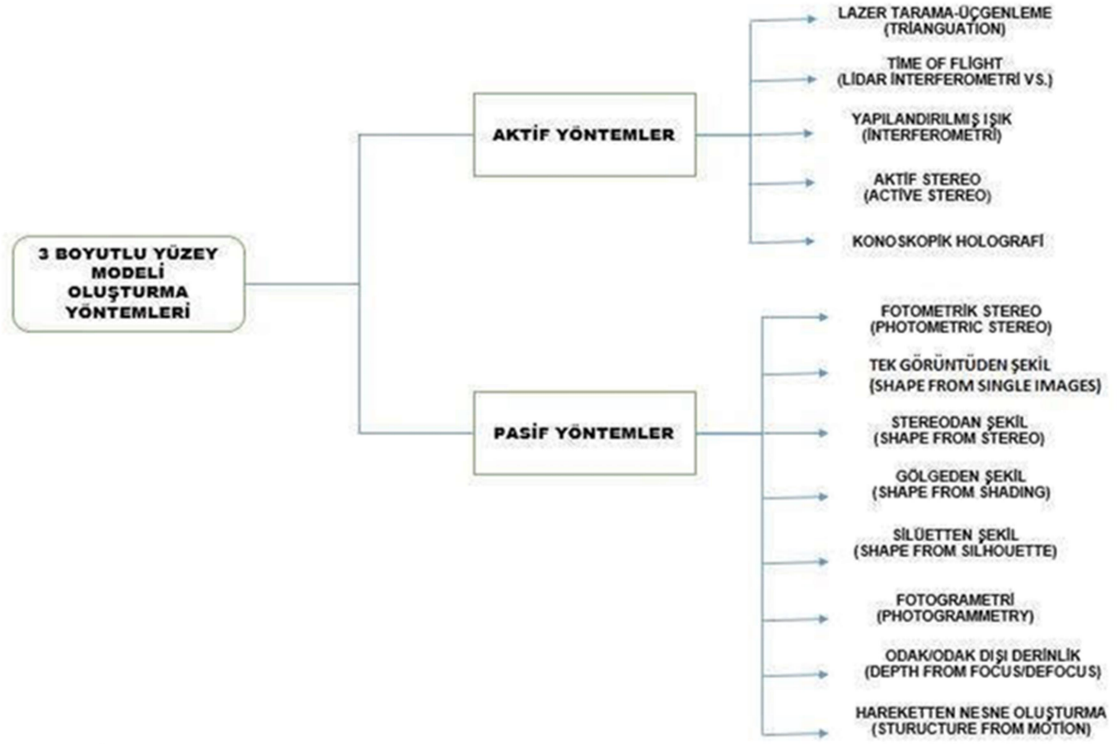
yaklaşımlar, özellikle mühendislik uygulamalarında ölçülebilir ve denetlenebilir sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir. Bilgisayarlı görü tabanlı yöntemler ise ağırlıklı olarak görüntü işleme, örüntü tanıma ve otomatik eşleştirme algoritmalarına dayanmakta; yüksek otomasyon düzeyi ve hızlı veri üretimi gibi avantajlar sunmaktadır. Güncel uygulamalarda bu iki yaklaşım sıklıkla birlikte kullanılmakta ve birbirini tamamlayıcı nitelikte ele alınmaktadır.

Görüntü tabanlı 3B modelleme teknikleri, tarihi ve kültürel yapıların belgelenmesi, mimari analizler, restorasyon öncesi dokümantasyon çalışmaları ve dijital arşivleme gibi alanlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Temas gerektirmeyen veri toplama yapısı sayesinde, fiziksel olarak erişimi kısıtlı ya da korunması gereken yapıların zarar görmeden modellenmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, elde edilen 3B modellerin kullanım amacına uygunluğunun değerlendirilmesi, yalnızca görsel yeterlilikle sınırlı olmayıp, modelin geometrik tutarlılığı ve ölçülebilirliği ile de yakından ilişkilidir.

Bu bağlamda, görüntü tabanlı 3B modelleme çalışmalarında kullanılan yöntemlerin kuramsal temellerinin anlaşılması ve bu yöntemlerin hangi varsayımlar altında güvenilir sonuçlar ürettiğinin ortaya konulması büyük önem taşımaktadır.

2.2. 3B Yeniden Yapılandırma Yöntemleri

3B yeniden yapılandırma, bir nesnenin veya sahnenin geometrik yapısının sayısal ortamda modellenmesini amaçlayan farklı veri toplama ve işleme yaklaşımlarını kapsamaktadır. 3B yeniden yapılandırma yöntemleri, veri toplama prensiplerine bağlı olarak temaslı ve temassız yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.1.). Temassız yöntemler ise kullanılan ölçüm prensibine göre aktif ve pasif yöntemler olarak ele alınmaktadır (Varady ve diğ., 1997; Isgro ve diğ., 2005, Zhou ve diğ., 2024). Aktif yöntemlerde, sensör tarafından sahneye kontrollü bir ışık veya enerji gönderilmekte ve geri saçılan sinyal ölçülerek üç boyutlu bilgi elde edilmektedir. Pasif yöntemlerde ise sensör tarafından sahneye herhangi bir enerji gönderimi yapılmaksızın, sahnenin çevresel koşullar altında mevcut olan ve yansıyan ya da yayılan enerjisinin algılanması yoluyla dolaylı bir yeniden yapılandırma gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.1. 3B modelleme yöntemleri

Her bir yöntemin sağladığı doğruluk seviyesi, veri toplama hızı, donanım gereksinimleri ve uygulama alanları farklılık göstermektedir. Bu nedenle, kullanılacak yeniden yapılandırma yönteminin seçimi; çalışmanın amacı, saha koşulları, maliyet ve erişilebilirlik gibi faktörler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. İzleyen alt bölümlerde aktif ve pasif 3B yeniden yapılandırma yöntemleri temel prensipleri ve uygulama alanları açısından ele alınmıştır.

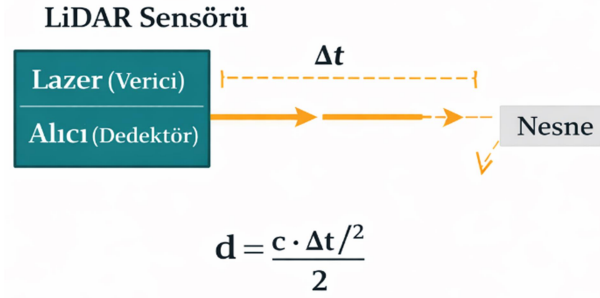
2.2.1. Aktif 3B Yeniden Yapılandırma Yöntemleri

Literatürde yaygın olarak kullanılan bazı aktif 3B yeniden yapılandırma yöntemleri aşağıda genel hatlarıyla ele alınmıştır.

2.2.1.1. Lazer Tarama

Lazer tarama (Light Detection and Ranging – LiDAR) yöntemi, sensör tarafından sahneye gönderilen lazer ışınlarının hedef yüzeylerden yansıtılarak geri dönme süresinin veya faz farkının ölçülmesine dayanan aktif bir üç boyutlu veri toplama tekniğidir. Bu

ölçümler yardımıyla hedef yüzeylere ait üç boyutlu koordinatlar yüksek hassasiyetle belirlenebilmekte ve yoğun nokta bulutları oluşturulabilmektedir (Shan ve Toth, 2018; Vosselman ve Maas, 2010). Lazer sistemlerinin temel ölçüm prensibi Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 2.2. LiDAR sistemlerinde mesafe ölçümünün temel çalışma şeması

LiDAR sistemleriyle elde edilen ölçümler, yoğun ve düzensiz dağılıma sahip üç boyutlu nokta bulutları şeklinde temsil edilmektedir. Bu nokta bulutları, uygun yazılım araçları kullanılarak filtreleme, sınıflandırma ve yüzey oluşturma işlemlerine tabi tutulmakta; sonuç olarak üç boyutlu sayısal modeller üretilebilmektedir. LiDAR sistemleri; yersel, mobil ve insansız hava araçlarına entegre edilebilen platformlar üzerinde kullanılabilmekte olup, özellikle mimari yapılar, arkeolojik alanlar ve tarihi eserlerin belgelenmesinde yüksek doğruluklu geometrik veri üretme potansiyeli sunmaktadır (Doyduk, 2019). Ayrıca LiDAR tabanlı üç boyutlu veriler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile bütünleştirilerek kentsel planlama, altyapı analizi ve farklı mekansal uygulamalarda etkin biçimde kullanılabilir (Üstün, 2022).

Lazer tarama yönteminin en önemli avantajları arasında yüksek geometrik doğruluk, hızlı veri toplama kapasitesi ve aydınlatma koşullarından büyük ölçüde bağımsız çalışma yeteneği yer almaktadır. Bununla birlikte, sistem maliyetlerinin yüksek olması, veri işleme sürecinde büyük veri hacimleriyle çalışılması ve bazı yüzey türlerinde (örneğin yüksek yansıtıcılı veya saydam yüzeyler) ölçüm zorlukları yaşanabilmesi, yöntemin sınırlamaları arasında sayılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, saha koşulları, donanım erişilebilirliği ve çalışmanın amacı doğrultusunda lazer tarama yöntemi kullanılmamış; bunun yerine, daha esnek ve düşük maliyetli bir yaklaşım sunan görüntü tabanlı pasif yöntemler tercih edilmiştir.

2.2.1.2. Bilgisayarlı Tomografi

Bilgisayarlı tomografi (Computed Tomography – CT), bir nesnenin iç yapısının farklı açılardan elde edilen ölçümler yardımıyla kesitsel olarak görüntülenmesine ve bu kesitlerden üç boyutlu bir modelin oluşturulmasına olanak tanıyan aktif bir yeniden yapılandırma yöntemidir (Kak ve Slaney, 2001). Bu yöntemde, genellikle X-ışınları kullanılarak nesneye kontrollü bir enerji gönderilmekte ve nesne içerisinden geçen ışınların zayıflama özellikleri ölçülmektedir. Elde edilen çok sayıda projeksiyon verisi, matematiksel rekonstrüksiyon algoritmaları yardımıyla üç boyutlu hacimsel bir modele dönüştürülmektedir.

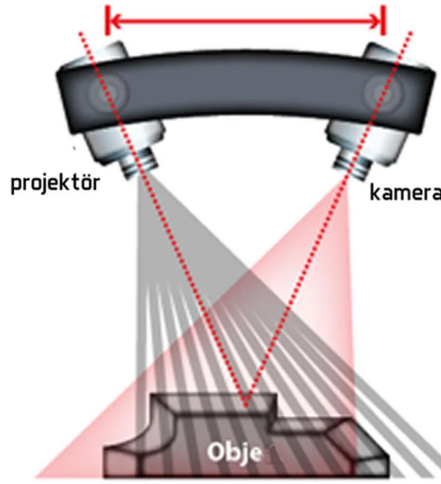
CT yöntemleri, özellikle tıbbi görüntüleme, endüstriyel kalite kontrol ve malzeme analizleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nesnelerin iç geometrisinin ve yapısal kusurlarının yüksek doğrulukla incelenebilmesi, bu yöntemin en önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, kullanılan donanımın yüksek maliyeti, ölçüm sürecinin kontrollü laboratuvar ortamları gerektirmesi ve saha uygulamalarına uygun olmaması, CT yöntemlerinin açık alan ve büyük ölçekli nesnelerin modellenmesinde kullanımını sınırlamaktadır.

Bu tez çalışmasının konusu olan tarihi yapının dış geometrisinin modellenmesi ve saha koşullarında veri toplama gereksinimleri dikkate alındığında, bilgisayarlı tomografi yöntemi uygulama açısından uygun görülmemiştir. Bu nedenle, CT yöntemleri bu çalışmada yalnızca kuramsal bir aktif yeniden yapılandırma yaklaşımı olarak ele alınmıştır.

2.2.1.3. Yapılandırılmış Işık

Yapılandırılmış ışık (structured light) sahneye önceden tanımlanmış bir ışık deseni (örneğin çizgiler, noktalar veya ızgara yapıları) projekte edilmesi ve bu desenin nesne yüzeyinde oluşturduğu geometrik bozulmaların bir kamera sistemi tarafından algılanmasına dayanan aktif bir üç boyutlu yeniden yapılandırma tekniğidir (Geng,

2011). Projeksiyon sistemi ve kamera arasındaki geometrik ilişki kullanılarak, nesne yüzeyine ait üç boyutlu koordinatlar hesaplanabilmektedir (Zhang, 2000). Yapılandırılmış ışık yönteminin temel çalışma prensibi Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yapılandırılmış ışık ile 3B ölçüm prensibinin şematik gösterimi

Bu yöntem, özellikle küçük ve orta ölçekli nesnelerin yüksek çözünürlükte modellenmesi gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. Yapılandırılmış ışık sistemleri, kısa mesafelerde yüksek detay ve doğruluk sunabilmekte; endüstriyel ölçme, tersine mühendislik ve yakın mesafe nesne modelleme çalışmalarında etkin sonuçlar verebilmektedir (Çelik ve Yılmaz, 2017). Ancak, ortam aydınlatma koşullarına duyarlılık, dış mekan uygulamalarında güneş ışığı etkisi ve sistem kurulumunun saha koşullarında zorlayıcı olabilmesi, yöntemin açık alan uygulamalarında kullanımını sınırlayan başlıca faktörler arasında yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında ele alınan tarihi yapının açık alan koşullarında ve geniş yüzeyler üzerinde modellenmesi hedeflendiğinden, yapılandırılmış ışık yöntemleri saha uygulamaları açısından uygun görülmemiştir. Bu nedenle, yapılandırılmış ışık yöntemi bu çalışmada yalnızca aktif 3B yeniden yapılandırma yaklaşımlarının kuramsal bir örneği olarak değerlendirilmiştir.

2.2.1.4. Uçuş Zamanı (Time of Flight – ToF) Sistemler

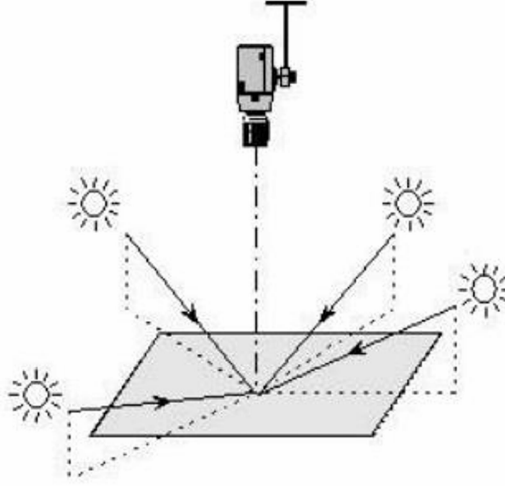
ToF sistemler, sensör tarafından sahneye gönderilen bir ışık veya enerji sinyalinin hedef yüzeyden yansıyarak sensöre geri dönmesi sırasında geçen sürenin ölçülmesine dayanan aktif üç boyutlu ölçüm yöntemleridir (Hansard ve diğ., 2012). Ölçülen bu zaman farkı kullanılarak, sinyalin yayılma hızı bilindiğinden hedef yüzeye olan mesafe doğrudan hesaplanabilmektedir. Bu prensip, aktif üç boyutlu ölçüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılan temel bir mesafe belirleme yaklaşımıdır.

ToF prensibi; lazer, kızılötesi veya modüle edilmiş elektromanyetik sinyaller kullanan farklı donanım türlerinde uygulanabilmektedir. Bu bağlamda, yersel lazer tarama (LiDAR) sistemleri başta olmak üzere, hava ve mobil platformlara entegre edilen tarayıcılar ile derinlik algılayıcı kameralar ToF prensibine dayalı ölçüm gerçekleştiren sistemler arasında yer almaktadır. Ölçümün doğrudan zaman bilgisine dayanması, ToF sistemlerinin geniş ölçüm mesafelerinde ve değişken aydınlatma koşullarında etkin şekilde çalışabilmesine olanak tanımaktadır.

Bu tez çalışmasında ToF prensibi, lazer tarama sistemlerinin temel ölçüm yaklaşımı kapsamında kuramsal olarak ele alınmıştır; tez kapsamında bir ToF sensör uygulaması gerçekleştirilmemiştir.

2.2.1.5. Fotometrik Stereo

Fotometrik yöntemler, bir nesnenin yüzey geometrisinin ve yüzey özelliklerinin, farklı aydınlatma koşulları altında elde edilen 2B görüntülerden yararlanılarak belirlenmesini amaçlayan aktif 3B yeniden yapılandırma yaklaşımlarıdır (Woodham, 1980). Bu yöntemlerde kamera konumu sabit tutulmakta, yüzey farklı yönlerden aydınlatılarak elde edilen görüntüler üzerinden her bir piksel için yüzey normalleri yansıma modellerine bağlı olarak hesaplanmaktadır (Alparslan ve Doğar, 2015). Bu prensibe dayanan fotometrik stereo yaklaşımı, özellikle yüksek çözünürlüklü yüzey detaylarının elde edilmesinde etkin sonuçlar sunmaktadır. Fotometrik stereo yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Fotometrik stereo yaklaşımının şematik gösterimi

Yüzey normallerinin hassas biçimde belirlenebilmesi, ince detayların ve mikro geometrinin modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, yöntemin başarımı büyük ölçüde yüzeyin yansıtma özelliklerine ve kontrollü aydınlatma koşullarına bağlıdır. Yüksek yansıtıcı yüzeyler ve homojen olmayan aydınlatma koşulları, fotometrik stereo yöntemlerinin doğruluğunu sınırlayan başlıca etkenler arasında yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında ele alınan tarihi yapının açık alan koşullarında ve geniş yüzeyler üzerinde modellenmesi hedeflendiğinden, fotometrik stereo yöntemleri uygulama açısından uygun görülmemiştir. Bu nedenle fotometrik stereo, aktif üç boyutlu yeniden yapılandırma yaklaşımlarının kuramsal bir örneği olarak değerlendirilmiştir.

2.2.1. Pasif 3B Yeniden Yapılandırma Yöntemleri

Pasif 3B yeniden yapılandırma yöntemleri, sahneye herhangi bir harici enerji veya kontrollü aydınlatma gönderilmeden, mevcut ışık koşulları altında elde edilen gözlemsel verilerden 3B geometrik bilginin çıkarılmasını amaçlayan yaklaşımlardır. Bu yöntemlerde, nesneye ait derinlik ve şekil bilgisi; görüntüler arasındaki geometrik ilişkiler, perspektif farklılıkları ve görüntü özellikleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Pasif yöntemler, donanım gereksinimlerinin görece düşük olması, saha uygulamalarında esneklik sağlaması ve geniş ölçekli nesnelerin modellenmesine olanak tanınması

nedeniyle özellikle fotogrametri ve bilgisayarlı görü tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan yöntemler de pasif üç boyutlu yeniden yapılandırma yaklaşımları kapsamında değerlendirilmektedir.

2.2.2.1. Fotogrametri

Fotogrametri, nesnelere ait geometrik bilgilerin, farklı açılardan elde edilen iki veya daha fazla görüntü üzerinden yapılan ölçümler yardımıyla belirlenmesini sağlayan pasif bir üç boyutlu modelleme ve ölçme tekniğidir. Görüntüler arasındaki perspektif farkları ve geometrik ilişkiler kullanılarak, nesne noktalarının üç boyutlu koordinatları hesaplanabilmektedir. Bu yönüyle fotogrametri, herhangi bir fiziksel temas gerektirmeden nesnelerin sayısal olarak belgelenmesine olanak tanımaktadır (Wolf ve diğ., 2014; Luhmann ve diğ., 2014). Fotogrametri yaklaşımı Şekil 2.5'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Fotogrametri yaklaşımının şematik gösterimi

Fotogrametrik süreç, nesnenin farklı konumlardan ve yeterli bindirme oranı sağlanacak şekilde görüntülenmesiyle başlamakta; elde edilen görüntüler, fotogrametrik yazılımlar aracılığıyla işlenerek nesnenin üç boyutlu geometrisi dijital ortamda yeniden oluşturulmaktadır. Görüntüler arasındaki kesişen ışınlar ve açısal farklılıklar dikkate alınarak gerçekleştirilen bu hesaplama süreci sayesinde, uygun kamera kalibrasyonu ve görüntü geometrisi sağlandığında metrik açıdan güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

Fotogrametri yöntemi; kültürel mirasın belgelenmesi, tarihi yapıların dijital olarak arşivlenmesi, restorasyon çalışmaları ve sanal ortamda görselleştirme uygulamaları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük ölçekli tarihi eserlerin yüksek çözünürlüklü üç boyutlu modellenmesine olanak sağlaması, yöntemin önemli avantajları arasında yer almaktadır (Döş ve Yiğit, 2023). Ayrıca fotogrametri, erişimi zor veya korunması gereken nesnelerin fiziksel müdahale olmaksızın detaylı biçimde incelenebilmesine imkân tanımaktadır.

Bu tez çalışmasında, Hünkar Çeşmesi'nin üç boyutlu modellenmesi amacıyla pasif yöntemler kapsamında fotogrametrik yaklaşım benimsenmiş; oluşturulan üç boyutlu modelin metrik doğruluğu farklı ölçütler kullanılarak değerlendirilmiştir.

2.2.2.2. Stereo Görme

Stereo görme, aynı sahnenin farklı konumlardan elde edilen iki veya daha fazla görüntüsü arasındaki paralaks farklarından yararlanarak derinlik bilgisinin hesaplanmasına dayanan pasif bir üç boyutlu yeniden yapılandırma yaklaşımıdır. Bu yöntemde, farklı bakış açılarından elde edilen görüntüler arasında karşılık gelen noktalar belirlenmekte ve bu noktaların geometrik ilişkileri kullanılarak sahneye ait üç boyutlu konum bilgisi çıkarılmaktadır.

Binoküler stereo sistemlerde derinlik hesaplaması, görüntüler arasındaki eşlenik noktaların bulunmasına ve kamera geometrisinin bilinmesine bağlıdır. Eşleştirme doğruluğu, baz uzunluğu, kamera kalibrasyonu ve görüntü kalitesi gibi faktörler, elde edilecek üç boyutlu sonuçların doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle stereo görme, fotogrametrinin temel geometrik prensiplerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Stereo görme yaklaşımı, fotogrametrik ölçmelerin kuramsal temelini oluşturmakla birlikte, pratik uygulamalarda genellikle daha gelişmiş ve otomatik iş akışları sunan yöntemlerin bir parçası olarak kullanılmaktadır.

2.2.2.3. Hareket Tabanlı Yapısal Algılama

Hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from Motion - SfM), farklı konumlardan ve yüksek bindirme oranlarıyla elde edilen görüntülerden, sahnenin üç boyutlu geometrisinin ve kamera konumlarının eş zamanlı olarak belirlenmesini amaçlayan pasif bir üç boyutlu yeniden yapılandırma yöntemidir. SfM yaklaşımı, fotogrametrik prensipler ile bilgisayarlı görü algoritmalarının birlikte kullanıldığı otomatik bir iş akışı sunmaktadır.

SfM yönteminde, görüntüler arasındaki ortak özellikler otomatik olarak belirlenmekte ve bu özellikler arasındaki geometrik ilişkiler kullanılarak kamera yönelimleri ile seyrek bir üç boyutlu nokta bulutu hesaplanmaktadır. Ardından, çoklu stereo görüntüleme teknikleri yardımıyla nokta yoğunluğu artırılarak daha ayrıntılı üç boyutlu temsil elde edilebilmektedir. Bu süreçte kamera kalibrasyonu ve demet dengelemesi işlemleri, model geometrisinin tutarlılığı açısından kritik rol oynamaktadır.

SfM tabanlı yaklaşımlar, klasik fotogrametrik yöntemlere kıyasla daha az ön bilgi gerektirmesi ve yüksek düzeyde otomasyon sağlaması nedeniyle son yıllarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle farklı fotogrametrik yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, elde edilen üç boyutlu modellerin doğruluk ve performanslarının karşılaştırılması literatürde önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir (Rahman ve Cahyono, 2023).

Bu tez çalışmasında, yersel fotogrametri kapsamında elde edilen görüntüler, SfM tabanlı bir iş akışı kullanılarak değerlendirilmiş; oluşturulan üç boyutlu modelin metrik doğruluğu yer kontrol noktaları ve bağımsız ölçüler yardımıyla analiz edilmiştir.

2.2.3. Çoklu Sensör Birleştirme

Çoklu sensör birleştirme (Multi-Sensor Fusion) yaklaşımları, farklı ölçüm prensiplerine sahip sensörlerden elde edilen verilerin bir arada değerlendirilmesi yoluyla üç boyutlu modelleme ve konumsal bilgi üretiminin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmayı amaçlayan yöntemlerdir. Bu yaklaşımlarda, her bir sensörün güçlü yönlerinden yararlanılarak tekil sistemlerin sınırlılıklarının azaltılması hedeflenmektedir.

Üç boyutlu yeniden yapılandırma uygulamalarında çoklu sensör birleştirme kapsamında; LiDAR, kamera tabanlı görüntüleme sistemleri, Küresel Konumlama Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems - GNSS) ve Ataletsel Ölçüm Birimleri (Inertial Measurement Unit - IMU) gibi sensörler birlikte kullanılabilir. Örneğin, LiDAR sistemleri yüksek doğruluklu geometrik veri sağlarken, kamera sistemleri yüzey dokusu ve görsel detayların elde edilmesine olanak tanımaktadır. GNSS ve IMU sensörleri ise konumlandırma ve yönelim bilgilerinin belirlenmesinde destekleyici rol üstlenmektedir.

Bu tür entegre sistemler, özellikle mobil haritalama, otonom sistemler ve büyük ölçekli mekânsal veri üretimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çoklu sensörlü sistemlerin kurulumu ve işletilmesi; donanım maliyetleri, kalibrasyon gereksinimleri ve veri bütünleştirme süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle yüksek teknik uzmanlık gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasında, ele alınan nesnenin ölçeği, saha koşulları ve çalışmanın kapsamı dikkate alınarak çoklu sensör birleştirme yaklaşımları uygulama dışı bırakılmış; sadece yeniden yapılandırma yöntemlerinin genel çerçevesini tamamlamak amacıyla kavramsal düzeyde ele alınmıştır.

2.3. Üç Boyutlu Modellerde Metrik Kalite Ölçütleri

3B modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, görsel niteliklere ek olarak, modellerin metrik açıdan ne ölçüde doğru ve güvenilir olduğunun ortaya konulması ile gerçekleştirilmektedir. Özellikle mühendislik, haritacılık ve kültürel miras belgeleme uygulamalarında üretilen 3B modellerin ölçülebilir, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir olması temel bir gerekliliktir. Bu bağlamda, 3B model kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan başlıca ölçütler doğruluk, hassasiyet, eksiksizlik ve çözünürlük kavramları etrafında şekillenmektedir.

Doğruluk (accuracy), bir 3B modelde elde edilen koordinat veya geometrik büyüklüklerin, referans olarak kabul edilen gerçek ya da daha yüksek doğruluklu ölçüm değerlerine ne derece yakın olduğunu ifade etmektedir. Doğruluk, çoğunlukla modelden elde edilen koordinatların YKN veya bağımsız kontrol ölçüleri ile karşılaştırılması

yoluyla değerlendirilir. Bu nedenle doğruluk, kullanılan referans verinin niteliğine ve güvenilirliğine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

Hassasiyet (precision) ise ölçümlerin kendi iç tutarlılığını ve tekrar edilebilirliğini ifade etmektedir. Aynı veya benzer ölçüm koşulları altında gerçekleştirilen bağımsız ölçümlerin birbirine yakın sonuçlar üretmesi, modelin hassasiyetinin yüksek olduğunu göstermektedir. Hassasiyet, tek başına doğruluğu garanti etmemekle birlikte, modelin geometrik kararlılığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Literatürde, görüntü tabanlı üç boyutlu modelleme çalışmalarında elde edilebilen doğruluk ve hassasiyet seviyelerinin, kullanılan donanım özelliklerine, veri toplama stratejilerine ve değerlendirme yöntemlerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği bildirilmektedir. Yüksek çözünürlüklü ticari kameralar ve yer kontrol noktalarının birlikte kullanıldığı yakın mesafe fotogrametri uygulamalarında, $\pm 2-5$ mm mertebesinde geometrik doğruluk seviyelerine ulaşılabilirdiği rapor edilmektedir. Bilgisayarlı görü temelli yaklaşımlarda ise, iyi bir kamera kalibrasyonu ve uygun görüntü örtüşmesi sağlanması koşuluyla ± 5 mm – 2 cm aralığında doğruluk değerlerinden söz edilmektedir. Diğer taraftan, GNSS alıcıları ve RTK ağlarıyla entegre çalışan ölçüm cihazları kullanılarak elde edilen nesne koordinatlarında, yatay doğruluğun yaklaşık 1 cm, düşey doğruluğun ise 1,5 cm civarında olduğu üretici verileri ve uygulama sonuçlarıyla ortaya konmaktadır. Bu doğruluk seviyeleri dikkate alındığında, GNSS tabanlı referans veriler kullanılarak üretilen 3B modellerin geometrik doğruluğunun da genellikle santimetre mertebesinde olması beklenmektedir.

Eksiksizlik (completeness), modellenen nesnenin veya alanın ne ölçüde temsil edilebildiğini ifade eden bir kalite ölçütüdür. Özellikle karmaşık mimari yapılarda, gölgelenme, görüş kısıtları veya yetersiz görüntü örtüşmesi gibi nedenlerle bazı yüzeylerin modellenememesi, eksiksizlik açısından sınırlılıklar doğurabilmektedir. Eksiksizlik, 3B modelin kullanım amacına bağlı olarak değişen bir öneme sahiptir ve belgeleme çalışmalarında kritik bir kriter olarak değerlendirilmektedir.

Çözünürlük (resolution) ise modelin geometrik detayları hangi ölçekte temsil edilebildiğini ifade etmektedir. Nokta bulutu yoğunluğu, yüzey ağ (mesh) yoğunluğu ve doku çözünürlüğü gibi unsurlar, modelin çözünürlük düzeyini belirleyen başlıca faktörlerdir. Yüksek çözünürlük, mimari detayların daha ayrıntılı temsil edilmesine

olanak sağlarken; veri hacmi, işleme sũresi ve hesaplama maliyeti gibi unsurları da beraberinde getirmektedir.

Bu kalite ölçũtleri birbirleriyle doğrudan ilişkili olmakla birlikte, her birinin ȃnemi uygulama amacına gȃre farklılık gȃsterebilmektedir. Ȗrneđin gȃrselleřtirme odaklı çalışmalarda ȃzũnũrlũk ve eksiksizlik ȃn plana çıkarken, mũhendislik ve ȃlme amaçlı uygulamalarda doğruluk ve hassasiyet temel değerlendirme kriterleri olarak ȃne çıkmaktadır. Bu nedenle, gȃrũntũ tabanlı 3B modelleme çalışmalarında model kalitesinin tek bir ȃlũt ȃzerinden değil, birden fazla kriter dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında da, Hũnkar eşmesi'nin gȃrũntũ tabanlı yȃntemlerle ȃretilen 3B modelinin metrik kalitesi, ȃzellikle doğruluk ve hassasiyet kavramları çerçevesinde ele alınmaktadır ve sonuçlar farklı kontrol ve değerlendirme ȃlũtleri yardımıyla incelenmektedir. Bȃylece, 3B modelleme sũrecinde metrik kaliteyi etkileyen faktȃrlerin daha açık biçimde ortaya konulması amaçlanmaktadır.

2.4. Tarihi Yapıların 3B Modellenmesine Yȃnelik Literatũr Taraması

Son yıllarda 3B modelleme teknikleri, son yıllarda ȃzellikle kũltũrel mirasın belgelenmesi, tarihi yapıların korunması ve mimari eserlerin dijital ortama aktarılması amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Tarihi ve mimari yapıların karmaşık geometrik ȃzellikleri, farklı malzeme tũrleri ve korunma gereksinimleri, temassız ȃlũm ve modelleme yȃntemlerinin tercih edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda fotogrametri ve bilgisayarlı gȃrũ tabanlı yaklaşımlar, hem ȃlũlebilir geometrik bilgi ȃretme potansiyeli hem de saha uygulamalarındaki esnekliği nedeniyle literatũrde ȃne çıkan yȃntemler arasında yer almaktadır.

Yakın mesafe fotogrametrisi, mimari ve tarihi yapıların 3B modellenmesinde yaygın olarak kullanılan yȃntemlerden biridir. Bu yȃntem, yapıların fiziksel bũtũnlũđũne zarar vermeden mevcut durumlarının yũksek ȃzũnũrlũkte belgelenmesine olanak sağlamaktadır. Kũltũrel mirasın belgelenmesine yȃnelik uygulamalarda fotogrametri temelli yaklaşımların restorasyon, arşivleme ve dijital sunum sũrelerine katkı sunduğu bildirilmektedir. Dȃř ve Yiğit (2023), kũũk ȃlekli tarihi eserlerin fotogrametri yȃntemiyle ȃ boyutlu modellenmesine yȃnelik çalışmalarında, elde edilen modellerin

metrik değerlendirmeye uygun nitelikte olduğunu ve doğruluk analizinin gerçekleştirilebilirliğini vurgulamıştır.

Fotogrametrik yöntemlerin gelişmesiyle birlikte, otomatik görüntü işleme ve eşleştirme algoritmalarına dayanan SfM tabanlı yaklaşımlar literatrdenmli bir yer edinmiştir. SfM yöntemi, çok sayıda görüntüden kamera konumları ve sahne geometrisinin eş zamanlı olarak belirlenmesine olanak tanıyan yapısıyla,özellikle tarihi yapıların ve mimari cephelerin modellenmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Rahman ve Cahyono (2023), Agisoft Metashape ve MicMac yazılımlarını kullanarak bina modellemesine yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarında,üretilen modellerin doğruluk performanslarını karşılaştırmış ve elde edilen geometrik doğruluk değerlerini çalışma kapsamında raporlamıştır. Agisoft Metashape tarafından hesaplanan geometrik doğruluk, eksende sırasıyla 2,5 cm, 3,7 cm ve 2,1 cm, MicMac için ise 6,6 cm, 12,9 cm ve 11,8 cm olarak raporlanmıştır. Görsel olarak, Agisoft Metashape ile oluşturulan boyutlu model, MicMac GUI'ye göre dahastn görsel sonuçlar ve daha az bağlantı noktası sunmuştur.

Barazzetti ve diğ. (2009), mimari yapıların görüntü tabanlı yöntemlerle 3B modellenmesine yönelik çalışmalarında, işaretleyicisiz yersel diğital görüntü bloklarını işleyebilen bir metodoloji sunarak, fotogrametrik yaklaşımların lazer tarama sistemlerine alternatif olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Geliştirilen metodolojinin doğruluğunu doğrulamak için, manuellmler, toplam istasyon verileri ve 3B lazer tarayıcı ile çeşitli karşılaştırmalar da yapılmıştır. Görüntü yönelmesi ve yzeylm sonuçları, metodolojinin doğruluğunu belirlemek için kontrol edilmiştir.

Düşük maliyetli görüntüleme sistemlerinin kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Odumosu ve diğ. (2021), yakın resim fotogrametrisi yaklaşımı ile, iki farklı telefon kamerası kullanarak bir binazerindeki noktaların 3B koordinatlarını demet dengeleme yaklaşımıyla belirlemiş ve yerlm ile elde edilen 3B koordinatlar ile her iki kameradan elde edilen koordinatlar arasındanmli bir fark olmadığı ifade edilmiştir. Çalışma kapsamındaretilen modeller için santimetre mertebesinde (bir kamera için 11,8 cm, 31,0 cm ve 5,9 cm, diğeri için 14,6 cm, 16,1 cm ve 1,8 cm) doğruluk değerleri raporlanmıştır. Bu alışma, düşük maliyetli görüntüleme

sistemleriyle dahi ölçülebilir geometrik sonuçlar elde edilebileceğini göstermesi açısından dikkat çekmektedir.

Türkiye’de kültürel miras ve tarihi yapıların üç boyutlu modellenmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar da literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Yiğit ve Uysal (2021), Mersin St. Paul Anıt Müzesi’nde bulunan bir tarihi sütunun fotogrametri tekniği ile 3B modelini oluşturmuştur ve modeli elektronik cihazlar üzerinden yüksek gerçeklik teknolojisi ile görselleştirilmiştir. Yakar ve Bilgi (2019), İstanbul ilindeki Ahmet Çeşmesi’nin akıllı telefon kamerası kullanılarak fotogrametri yöntemiyle üç boyutlu modellenmesini ele aldıkları çalışmalarında, akıllı telefonların diğer teknolojik ekipmanlara alternatif olarak kullanılabileceği ve bu sayede daha geniş kitlelerin kültürel mirasa katkıda bulunabileceğini ifade etmiştir ve oluşturulan model için $\pm 1,2$ cm düzeyinde bir geometrik hassasiyet değeri raporlamıştır. Erdoğan, Kabadayı ve Akın (2021) ise Osmanlı Dönemine ait tarihi bir yapı olan Karabıyık Köprüsü’nün fotogrametrik yöntemle üç boyutlu modellenmesine yönelik çalışmalarında, elde edilen model için $\pm 2,56$ cm mertebesinde geometrik doğruluk değerleri rapor etmiştir. Bu çalışmalar, tarihi yapıların fotogrametri tabanlı yaklaşımlarla metrik olarak belgelenebilirliğini ortaya koymaktadır.

Kültürel miras odaklı olmamakla birlikte, görüntü tabanlı üç boyutlu modellemede doğruluk değerlendirme yaklaşımlarını ele alan çalışmalar da tez bağlamı açısından yol gösterici niteliktedir. Seyrek ve diğ. (2022), yüksek eğimli bir toprak şev alanında dijital tek lensli yansıtımlı (Digital Single Lens Reflex - DSLR) kamera ve cep telefonu kamerası kullanarak ürettikleri dört farklı model için hem yer doğruları ile hem de robotik total station ile elde edilen referans veriler üzerinden doğruluk analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, fotoğraf makinesi ile daha yoğun nokta bulutları elde edildiği ifade edilmiştir. Karesel ortalama hata cinsinden en düşük hata, fotoğraf makinesi kullanılarak üretilen model 1’de, üç eksenle sırasıyla $\pm 2,11$ mm, $\pm 1,78$ mm ve $\pm 1,00$ mm olarak raporlanmıştır. Kabadayı (2024) de mobil cihazlar ve DSLR kameralarla çekilen görüntülerden bir heykelin üç boyutlu modelini üretmiş ve farklı veri toplama yaklaşımlarına ait doğruluk değerlerini karşılaştırmalı olarak raporlamıştır.

Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, özellikle tarihi ve dini yapıların modellenmesine yönelik olarak daha yüksek doğruluk değerleri de rapor edilmektedir. Örneğin,

Özbekistan’da bulunan Magoki Attar Camii’nin fotogrametrik yöntemle üç boyutlu modellenmesine yönelik bir çalışmada, elde edilen modelin doğruluğu 6,83 mm/piksel düzeyinde raporlanmıştır (Varol, Yiğit ve Ulvi, 2021). Bu tür çalışmalar, görüntü tabanlı üç boyutlu modelleme yöntemlerinin uygun veri toplama ve değerlendirme stratejileri ile yüksek doğruluk seviyelerine ulaşabildiğini göstermektedir.

Literatürdeki bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, tarihi ve mimari yapıların üç boyutlu modellenmesinde fotogrametri ve SfM tabanlı yöntemlerin yaygın olarak tercih edildiği ve farklı ölçeklerde başarıyla uygulanabildiği görülmektedir. Bununla birlikte, kullanılan sensör türü, veri toplama geometrisi, yer kontrol noktalarının varlığı ve doğruluk değerlendirme yaklaşımı gibi faktörlerin, elde edilen üç boyutlu modellerin metrik doğruluğunu doğrudan etkilediği de açıkça ortaya konmaktadır. Bu nedenle, görüntü tabanlı üç boyutlu modelleme çalışmalarında metrik doğruluğun değerlendirilmesi ve farklı veri toplama yaklaşımlarının karşılaştırılması, literatürde güncelliğini koruyan önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir.

Bu tez çalışması, literatürde rapor edilen bu doğruluk ve hassasiyet değerlerinden hareketle, tarihi bir yapının (Hünkar Çeşmesi) yersel fotogrametri ve bilgisayarlı görü tabanlı bir iş akışıyla üç boyutlu modellenmesini ve elde edilen modelin metrik doğruluğunun farklı ölçütler yardımıyla değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

3. ÇALIŞMA ALANI

Bu tez çalışmasının uygulama alanını, Kocaeli ili Gebze ilçesi sınırları içerisinde yer alan ve kültürel miras niteliği taşıyan Hünkar Çeşmesi oluşturmaktadır. Çalışma alanı olarak Hünkar Çeşmesi'nin seçilmesinde; yapının kültürel miras niteliği, yakın mesafe görüntü tabanlı 3B modelleme için uygun ölçekte ve erişilebilirlikte olması ile birlikte, mimari elemanlarının metrik değerlendirme açısından anlamlı bir test yüzeyi sunması etkili olmuştur. Çalışma alanının konumsal ve tarihsel bağlamı ile yapının mimari/fiziksel özellikleri bu bölümde özetlenmektedir.

3.1. Hünkar Çeşmesi'nin Konumu ve Tarihsel Önemi

Hünkar Çayırı, Osmanlı tarihinin önemli olaylarından birine ev sahipliği yapmış bir alan olup, 27 Nisan 1481 tarihinde Fatih Sultan Mehmet'in son seferi için İstanbul'dan hareket eden ordusuyla birlikte İzmit yönüne ilerlediği sırada konakladığı çayırılık alan olarak bilinmektedir. Bu bölgede, Fatih Sultan Mehmet 3 Mayıs 1481 Perşembe günü ikinci vakti, muhtemelen 51 yaşında iken, otağında vefat etmiştir.

Sultan IV. Mehmet döneminde, 1659 yılında, Sadrazam İbrahim Paşa tarafından Fatih Sultan Mehmet anısına kitabeli bir çeşme inşa ettirilmiştir. Hünkar Çeşmesi, inşa edildiği tarihten günümüze kadar çeşitli onarımlardan geçerek varlığını korumuş ve günümüze ulaşmayı başarmıştır (Yavuzylmaz, 2013).

Hünkar Çayırı, yalnızca tarihsel bir hatırayı temsil etmekle kalmayıp, aynı zamanda kamusal bir alan olarak da işlev görmektedir. 1995 yılında park ve şenlik alanı olarak düzenlenen bölge, günümüzde her yıl İstanbul'un fethinin anısına düzenlenen geleneksel güreş şenliklerine ev sahipliği yapmaktadır. Bu yönüyle Hünkar Çeşmesi ve çevresi, tarihsel işlevinin yanı sıra kültürel sürekliliği temsil eden önemli bir mekan niteliği taşımaktadır.

3.2. Hünkar Çeşmesi'nin Mimari ve Fiziksel Özellikleri

Hünkar Çeşmesi, kesme taş malzeme ile inşa edilmiş, tek cepheli ve sivri kemerli bir çeşmedir. Çeşmenin güneybatı cephesi ana cephedir, genişliği 2,94 metre, yüksekliği 4,02 metre ve derinliği 1,46 metredir. Çeşmenin bir görseli Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Hünkar Çeşmesi'nin fotoğrafı

Mimari özellikleri, (i) yüzey dokusu ve taş örgüsü gibi detayların yoğun nokta bulutu üretimi açısından elverişli olması, (ii) kemer ve silme gibi geometrik elemanların metrik doğruluk analizinde kontrol edilebilir referanslar sağlaması nedeniyle, Hünkar Çeşmesi'ni görüntü tabanlı 3B modelleme ve doğruluk değerlendirme çalışmaları için uygun bir örnek yapı hâline getirmektedir.

3.3. Çalışma Alanının 3B Modellemeyi Etkileyen Özellikleri

Hünkar Çeşmesi'nin mimari ve fiziksel özellikleri, görüntü tabanlı üç boyutlu modelleme ve metrik doğruluk analizi açısından belirleyici bazı avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır. Yapının tek cepheli bir mimari düzene sahip olması, veri toplama sürecinde kamera konumlarının planlanmasını kolaylaştırmakta ve görüntü örtüşmesinin kontrol edilebilir olmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, özellikle yakın mesafe fotogrametri uygulamalarında kamera geometrisinin düzenli biçimde kurgulanabilmesi açısından önemlidir.

Çeşmenin kesme taş malzemeden inşa edilmiş olması, yüzey dokusunun zengin ve homojen olmayan bir yapıda olmasını sağlamaktadır. Taş yüzeylerdeki doğal doku farklılıkları, görüntü tabanlı yöntemlerde kullanılan özellik çıkarımı ve eşleştirme algoritmaları için elverişli koşullar sunmakta; bu da nokta bulutu üretimi ve yüzey rekonstrüksiyonu açısından olumlu bir etki yaratmaktadır. Ayrıca sivri kemerli cephe düzeni, doğrusal ve eğrisel geometrik elemanların birlikte bulunması nedeniyle, üç boyutlu modelin geometrik doğruluğunun değerlendirilmesinde anlamlı referanslar sağlamaktadır.

Yapının yaklaşık 2,94 m genişliğe ve 4,02 m yüksekliğe sahip olması, çalışma alanının yakın mesafe fotogrametri uygulamaları için uygun bir ölçekte olduğunu göstermektedir. Bu ölçek, hem yüksek çözünürlüklü ticari kameralarla hem de görüntü tabanlı ölçüm yeteneklerine sahip taşınabilir sistemlerle veri toplanmasına olanak tanımaktadır. Açık alanda konumlanmış olması, doğal ışık koşullarında görüntü elde edilmesini mümkün kılmakla birlikte, gün içindeki aydınlatma değişimleri ve gölge oluşumları veri kalitesini etkileyebilecek faktörler arasında yer almaktadır.

Bu özellikler dikkate alındığında, Hünkar Çeşmesi; mimari detayları, yüzey dokusu ve erişilebilirliği ile üç boyutlu nesne modelleme ve metrik doğruluk analizlerinin uygulanması açısından uygun bir test alanı oluşturmaktadır. Çalışma alanının bu nitelikleri, farklı veri toplama ve değerlendirme yaklaşımlarının karşılaştırılmasına imkân tanımakta ve tez kapsamında gerçekleştirilen analizler için sağlam bir zemin sunmaktadır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, Hünkar Çeşmesi'nin 3B modellenmesi ve metrik doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla izlenen yöntemsel yaklaşım ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Çalışmada kullanılan donanım ve yazılımlar tanıtılmakta; veri toplama, işleme ve model oluşturma, matematik model ve hesaplama süreçleri aşamalı olarak açıklanmaktadır. Bölüm kapsamında yalnızca uygulanan yöntem ve kullanılan araçlara yer verilmiş olup, elde edilen sonuçlar ve doğruluk analizleri izleyen bölümde değerlendirilmiştir.

4.1. Kullanılan Donanım

Bu çalışma kapsamında, Hünkar Çeşmesi'nin 3B modellenmesi ve metrik doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla farklı türde ölçüm ve görüntüleme donanımları birlikte kullanılmıştır. Görüntü tabanlı veri elde etmek için dijital kamera sisteminden yararlanılmış; modelin ölçeklendirilmesi ve doğruluk değerlendirmesinde referans veri sağlamak amacıyla GNSS tabanlı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ayrıca, kontrol amaçlı uzunluk ölçmeleri için yardımcı ölçüm araçlarından faydalanılmıştır. Çalışmada kullanılan donanımlara ilişkin bilgiler aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

4.1.1. Nikon D300 DSLR Kamera

Bu çalışmada, Hünkar Çeşmesi'nin görüntü tabanlı 3B modellenmesi amacıyla Nikon D300 DSLR kamera kullanılmıştır. DSLR kameralar, değiştirilebilir lens yapıları ve yüksek çözünürlüklü sensörleri sayesinde yersel fotogrametri uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Nikon D300 modeli, mimari ve tarihi yapıların yakın mesafeden görüntülenmesine uygun teknik özellikler sunması nedeniyle tercih edilmiştir.

Tablo 4.1. Nikon D300 DSLR kameranın temel teknik özellikleri

Kamera Modeli	Çözünürlük	Odak Uzaklığı (Lens)	Sensör Boyutu (mm)
Nikon D300	4288 x 2848 (12.3MP)	18 – 50 mm	23,6 x 15,8

Kameranın çalışmada dikkate alınan temel teknik özellikleri ise Tablo 4.1’de sunulmuştur (Nikon Corporation, 2007). Nikon D300 kameraya ait genel görünüm Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Nikon D300

4.1.2. i89 Visual IMU GNSS

Bu tez çalışmasında, üretilen üç boyutlu modelin ölçeklendirilmesi ve metrik doğruluğunun değerlendirilmesinde referans veri sağlamak amacıyla i89 Visual IMU GNSS ölçüm cihazı kullanılmıştır. GNSS tabanlı ölçüm cihazları, yersel fotogrametri uygulamalarında yer kontrol noktalarının koordinatlarının belirlenmesi ve bağımsız kontrol ölçülerinin elde edilmesi amacıyla yaygın biçimde tercih edilmektedir.

i89 Visual IMU GNSS cihazı, çoklu uydu sistemlerinden konum bilgisi elde edebilen ve entegre atalet ölçüm birimi (IMU) ve görüntüleme bileşenleri ile birlikte, saha koşullarında nokta bazlı konum bilgilerinin elde edilmesine olanak sağlayan taşınabilir bir ölçüm platformu sunmaktadır. Bu çalışmada cihaz, nesne üzerinde belirlenen noktaların üç boyutlu koordinatlarının elde edilmesinde referans ölçüm aracı olarak kullanılmıştır.

Cihaza ait genel görünüm Şekil 4.2’de verilmiştir. Çalışma kapsamında dikkate alınan temel teknik özellikler ise Tablo 4.2’de sunulmaktadır (CHCNAV, 2025a). Bu özellikler, cihazın konum belirleme yetenekleri, algılayıcı bileşenleri ve donanımsal yapısını tanımlamaya yöneliktir. Cihazın kamerasının özellikleri Tablo 4.3’de sunulmuştur.

Cihazla koordinat ölçümü yapıldığında konumlandırma doğruluğunun yatayda 0,8 cm ve düşeyde ise 1,5 cm olduğu üretici firma tarafından bildirilmiştir.

Tablo 4.2. i89 Visual IMU GNSS cihazının temel teknik özellikleri

Özellik	Değer
GNSS kanalı	1408
Desteklenen sistemler	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Ölçüm modları	RTK, PPK, statik
Entegre IMU	Var
Kamera sistemi	Çift kamera (2 MP ve 5 MP)
Ağırlık	~750 g
Kablosuz bağlantı	Wi-Fi, Bluetooth, NFC



Şekil 4.2. i89 Visual IMU GNSS cihazı

Tablo 4.3. i89 cihazına ait kameranın görüntü oluşturma özellikleri

Kamera modeli	Çözünürlük	Odak	Piksel boyutu
A11551980007070507	1600 × 1200	4.7054 mm	4.8 × 4.8 µm

4.1.3. GNSS Veri Toplama Kontrolörü (HCE600)

Çalışma kapsamında kullanılan i89 Visual IMU GNSS ölçüm cihazı ile birlikte, saha verilerinin toplanması ve yönetilmesi amacıyla HCE600 taşınabilir GNSS veri toplama

kontrolörü kullanılmıştır. HCE600, GNSS alıcısından elde edilen ölçüm verilerinin izlenmesi, kaydedilmesi ve düzenlenmesi için kullanılan bir el terminali olup, GNSS alıcısına kablosuz bağlantı üzerinden entegre çalışmaktadır. Cihaza ait teknik özellikler üretici tarafından sağlanan teknik dokümanlarda ayrıntılı olarak verilmiştir (CHCNAV, 2025b).

4.2. Kullanılan Yazılım (Agisoft Metashape)

Bu tez çalışmasında, elde edilen dijital görüntülerin fotogrametrik olarak işlenmesi ve üç boyutlu modelin oluşturulması amacıyla Agisoft Metashape yazılımı kullanılmıştır. Agisoft Metashape, görüntü tabanlı üç boyutlu modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan, SfM ve yoğun nokta bulutu üretimi yaklaşımlarını bir arada sunan ticari bir fotogrametri yazılımıdır.

Yazılım, çok sayıda bindirmeli görüntüden kamera yöneltme parametrelerinin belirlenmesine, seyrek ve yoğun nokta bulutu oluşturulmasına, yüzey modeli ve doku kaplama işlemlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada Agisoft Metashape, görüntülerin geometrik ilişkilerinin kurulması ve üç boyutlu nesne modelinin üretilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Üretilen üç boyutlu modellerin ölçeklendirilmesi ve değerlendirilmesi aşamalarında, yazılımın sunduğu koordinat tanımlama ve ölçüm araçlarından yararlanılmıştır. Yazılıma ait işlem adımları ve uygulama süreci, izleyen veri işleme ve model oluşturma bölümlerinde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.3. Veri Toplama Süreci

Bu tez çalışması kapsamında, Hünkar Çeşmesi'nin 3B modellenmesi ve metrik doğruluk analizinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla görüntü tabanlı veriler ile yer kontrol ölçüleri birlikte toplanmıştır. Veri toplama süreci; görüntü alımı, yer kontrol noktalarının tesis edilmesi ve kontrol amaçlı mesafe ölçmelerinin gerçekleştirilmesi olmak üzere üç ana aşamada yürütülmüştür. Bu aşamalara ilişkin ayrıntılar aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmaktadır.

4.3.1. Görüntü Alımı

Görüntü alımı aşamasında, Hünkar Çeşmesi'nin 3B modellenmesinde kullanılmak üzere farklı bakış açılarından ve yeterli bindirme oranı sağlayacak şekilde dijital fotoğraflar elde edilmiştir. Çekimler, çalışmada kullanılan Nikon D300 DSLR kamera ile gerçekleştirilmiştir. Yapının tüm görülebilir yüzeylerinin kapsanmasına ve fotoğraflar arasında geometrik ilişki kurulmasına olanak sağlayacak bir çekim düzeni oluşturulmuştur. Görüntü alımı iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, klasik görüntü tabanlı modelleme yaklaşımı doğrultusunda, nesne üzerine YKN yerleştirilmeden görüntüler elde edilmiştir. Bu aşamada Nikon D300 DSLR kamera kullanılarak toplam 78 adet fotoğraf çekilmiştir. İkinci aşamada ise, nesne üzerine YKN yerleştirilmiştir ve görüntü alımı tekrarlanmıştır. Bu aşamada, Nikon D300 kamerası ile 76 adet fotoğraf çekilmiştir. YKN'lerin görüntülerde açık biçimde ayırt edilebilecek şekilde konumlandırılmasına ve fotoğraflar arasında yeterli bindirme oranının sağlanmasına özen gösterilmiştir. Her iki aşamada elde edilen görüntüler, fotogrametrik veri işleme sürecinde kullanılmak üzere düzenlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Görüntü alımı sırasında, ışık koşulları, görüntü netliği ve çekim geometrisi gibi faktörlerin modelleme sürecini olumsuz etkilememesine dikkat edilmiştir. Nikon D300 kamerası ile elde edilen örnek bir görüntü Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



Şekil 4.3. Nikon D300 ile Hünkar Çeşmesi'nin bir fotoğrafı

4.3.2. YKN'lerin Ölçülmesi

Fotogrametrik modelin ölçeklendirilmesi ve metrik doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla, Hünkar Çeşmesi üzerinde uygun konumlarda YKN tesis edilmiştir. YKN'ler, yapı yüzeyinde homojen dağılım sağlayacak şekilde seçilmiş ve görüntüler üzerinde açık biçimde ayırt edilebilecek hedef işaretler olarak düzenlenmiştir. Bu noktalar, fotogrametrik değerlendirmede eşlenik nokta olarak kullanılmıştır.

YKN'lerin üç boyutlu koordinatları, i89 Visual IMU GNSS ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler, GNSS sinyal koşullarının uygun olduğu zaman dilimlerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen koordinatlar kayıt altına alınmıştır. Bu koordinatlar, fotogrametrik modelin referanslandırılmasında kullanıldığı gibi, bağımsız kontrol ölçüleri olarak da değerlendirilmiştir.

YKN seçiminde; yapının geometrisini temsil edebilme, köşe ve karakteristik detayları içermesi ve fotogrametrik ağın sağlamlığını artıracak bir mekansal dağılım sunması kriterleri dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, YKN kullanılan ve kullanılmayan senaryolar arasında karşılaştırmalı doğruluk analizlerinin yapılabilmesine olanak sağlanmıştır.

4.3.3. Kontrol Mesafe Ölçümleri

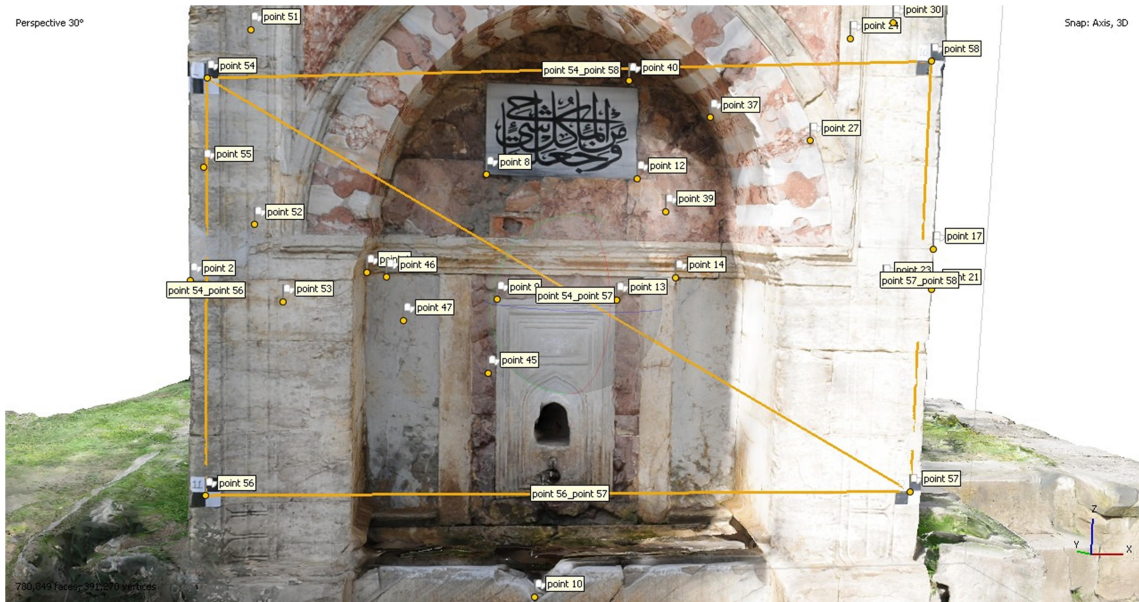
Fotogrametrik modelden elde edilen geometrinin bağıl doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, yapı üzerinde seçilen karakteristik noktalar arasında kontrol mesafe ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçmeler, fotogrametrik modelden bağımsız bir referans veri seti oluşturmak amacıyla yapılmıştır.

Kontrol mesafeleri, çelik şerit metre (ÇŞM) kullanılarak doğrudan arazi üzerinde ölçülmüş ve ölçüm sonuçları kayıt altına alınmıştır. Ölçme noktalarının seçiminde; yapının farklı bölümlerini temsil edebilme, geometrik açıdan anlamlı doğrultular oluşturma ve fotogrametrik model üzerinde karşılığı bulunabilen noktalar olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4.4. ÇŞM kullanılarak gerçekleştirilen kontrol mesafe ölçmelerine örnek

Elde edilen kontrol mesafe ölçmeleri, fotogrametrik modelden hesaplanan mesafeler ile karşılaştırılmak üzere kullanılmıştır. Bu karşılaştırmalar sayesinde, modelin bağlı doğruluğunun değerlendirilmesine yönelik ek bir kontrol mekanizması sağlanmıştır. Yapı üzerinde gerçekleştirilen ÇŞM kontrol mesafe ölçmelerinden bir örnek Şekil 4.4'te ve oluşturulan 3B modelin ön cephesi üzerinden alınan ölçek mesafelerine ait örnekler Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. 3B modelin ön cephesi üzerinden alınan kontrol mesafeleri

4.4. Fotogrametrik Yöntem ve Veri İşleme

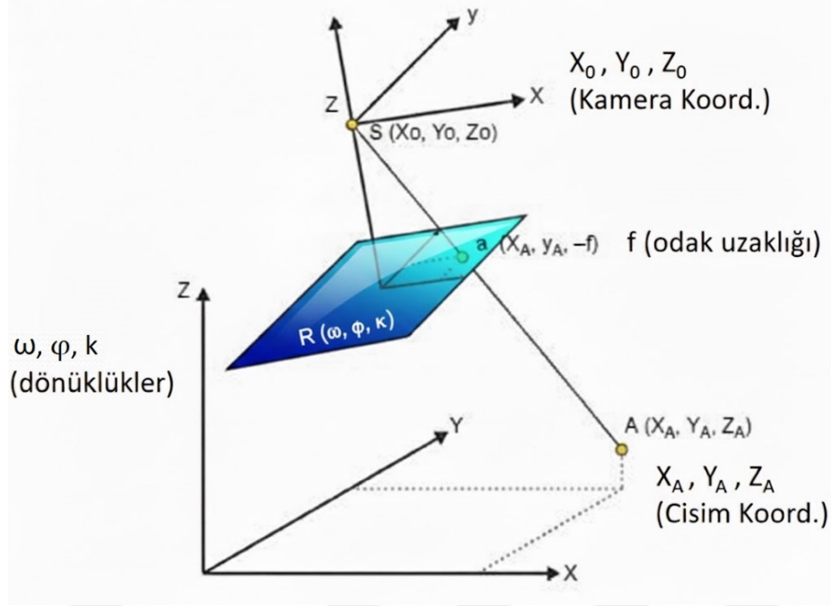
Bu bölümde, çalışma kapsamında 3B modellemenin gerçekleştirilmesinde esas alınan fotogrametrik yöntem teorik çerçevesiyle birlikte ele alınmaktadır. Görüntü – nesne - kamera geometrisini tanımlayan klasik fotogrametrik matematik model temel alınarak, bindirmeli görüntülerden nesne noktalarının 3B koordinatlarının hesaplanmasına yönelik yöntem açıklanmaktadır. Bu kapsamda, eşdoğrusallık koşullarına dayalı matematik model, geriden kestirme ve demet dengelemesi yaklaşımları ile kamera yöneltme parametreleri ve nesne koordinatlarının en küçük kareler yöntemi esas alınarak elde edilme süreci sunulmuştur.

Bu çalışmada söz konusu matematik model ve çözüm yaklaşımları yalnızca teorik olarak ele alınmamış, çalışma kapsamında elde edilen gerçek görüntü verileri kullanılarak fiilen uygulanmıştır. Teoriye dayalı bu hesaplamalar, harici hesaplama ortamlarında gerçekleştirilmiş; kamera yöneltme parametreleri, nesne koordinatları ve hata büyüklükleri bu çerçevede elde edilmiştir.

Buna paralel olarak, aynı görüntü veri seti kullanılarak, fotogrametrik veri işleme süreci ticari bir fotogrametrik yazılım ortamında da yürütülmüştür. Böylece, klasik fotogrametrik matematik modele dayalı hesaplama yaklaşımı ile yazılım tabanlı fotogrametrik çözüm süreci, aynı problem için eş zamanlı olarak uygulanmış ve elde edilen çıktılar birlikte değerlendirilmiştir. Bölümün devamında, bu iki yaklaşımda izlenen adımlar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.4.1. Fotogrametrik Geriden Kestirme ve Matematik Model

Fotogrametrik geriden kestirme probleminde, bindirmeli (örtüşen) iki veya daha fazla görüntü kullanılarak nesne noktalarının üç boyutlu koordinatları, görüntü–nesne–kamera geometrisini tanımlayan eşdoğrusallık koşulları esas alınarak hesaplanır. Bu yaklaşımda, kamera koordinat sistemi ile nesne koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişki; kamera konumu, dönüklük parametreleri (ω, φ, κ) ve odak uzaklığı yardımıyla tanımlanır. Eşdoğrusallık koşuluna dayalı bu geometrik ilişki, Şekil 4.6’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Fotogrametrik görüntü-nesne-kamera geometrisi

Bir nesne noktasının 3B koordinatları (X_A, Y_A, Z_A) ile bu noktaya karşılık gelen görüntü koordinatları (x_A, y_A) arasındaki ilişki; kamera perspektif merkezi (X_0, Y_0, Z_0) , odak uzaklığı f ve kameranın uzaydaki dönüklükleri $(\omega, \varphi, \kappa)$ kullanılarak eşdoğrusallık denklemleri aracılığıyla ifade edilir. Bu denklemler, ölçü fonksiyonları biçiminde Denklem (4.1) ve (4.2)'deki gibi;

$$F_{x_A} = -f \frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{12}(Y_A - Y_0) + m_{13}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} - x_A \quad (4.1)$$

$$F_{y_A} = -f \frac{m_{21}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{23}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} - y_A \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntılarda yer alan m_{ij} terimleri, kameranın uzaydaki dönüklüklerini tanımlayan toplam dönüklük matrisinin elemanlarıdır. Kamera dönüklüklerinden oluşan bu matris, $(\omega, \varphi, \kappa)$ açıları kullanılarak Deklem (4.3)'teki gibi;

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa \\ -\cos\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanır.

Fotogrametrik dış yöneltme parametrelerinin hesaplanması, nesne üzerinde hassas koordinatları bilinen YKN'ler ile görüntü düzlemi arasındaki ilişkinin kurulması esasına dayanan bir geriden kestirme işlemidir. Bir fotogrametrik blokta her bir görüntü için üç konum ve üç dönüklük olmak üzere toplam altı adet bilinmeyen parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin hesaplanabilmesi için, bindirmeli görüntüler üzerinde ölçülen ve birden fazla görüntüde ortak olarak görülebilen noktalardan yararlanılır. Bu noktalar bağlama noktaları (tie points) olarak adlandırılmakta olup, fotogrametrik blok genelinde ölçülmektedir. Eşdoğrusallık denklemleri en küçük kareler yöntemine göre çözülebilir.

4.4.1. Doğrusallaştırma ve Katsayılar Matrisi

Eşdoğrusallık denklemleri doğrusal olmayan yapıda olduğundan, çözüm sürecinde bu denklemler yaklaşık değerler etrafında doğrusallaştırılır. Doğrusallaştırma işlemi, ölçü fonksiyonlarının bilinmeyen parametrelere göre birinci dereceden Taylor açılımı alınarak gerçekleştirilir. Bu kapsamda, bilinmeyenler vektörü Denklem (4.4)'teki gibi;

$$\Delta = [\delta\omega, \delta\varphi, \delta k, \delta X_o, \delta Y_o, \delta Z_o]^T \quad (4.4)$$

şeklinde tanımlanır. Ölçü fonksiyonları ve düzeltmeler vektörü, Denklem (4.5)'teki gibi;

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece doğrusallaştırılmış model Denklem (4.6)'teki gibi;

$$v + B\Delta = F \quad (4.6)$$

şeklinde yazılabilir. B matrisi, ölçü fonksiyonlarının bilinmeyen parametrelere göre alınan kısmi türevlerinden oluşan katsayılar matrisidir ve Denklem (4.7)'deki gibi;

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial(\omega, \varphi, k, X_o, Y_o, Z_o)} \\ \frac{\partial F_y}{\partial(\omega, \varphi, k, X_o, Y_o, Z_o)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial\omega}, \frac{\partial F_x}{\partial\varphi}, \frac{\partial F_x}{\partial k}, \frac{\partial F_x}{\partial X_o}, \frac{\partial F_x}{\partial Y_o}, \frac{\partial F_x}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_y}{\partial\omega}, \frac{\partial F_y}{\partial\varphi}, \frac{\partial F_y}{\partial k}, \frac{\partial F_y}{\partial X_o}, \frac{\partial F_y}{\partial Y_o}, \frac{\partial F_y}{\partial Z_o} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

olarak yazılır. Kısmi türevlerin hesaplanmasında kullanılan yardımcı terimler, Denklem (4.8), (4.9), (4.10) ve (4.11)'deki gibi;

$$\Delta X = (X - X_0), \Delta Y = (Y - Y_0), \Delta Z = (Z - Z_0) \quad (4.8)$$

$$q = m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0) \quad (4.9)$$

$$r = m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \quad (4.10)$$

$$s = m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \quad (4.11)$$

şeklinde yazılır. Bu terimler yardımıyla ölçü fonksiyonlarının dönüklük parametrelerine göre alınan kısmi türevler Denklem (4.12), (4.13), (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)'deki gibi;

$$\frac{\partial Fx}{\partial w} = b_{11} = \frac{x}{q}(-m_{33}\Delta Z + m_{32}\Delta Y) + \frac{f}{q}(-m_{13}\Delta Z + m_{12}\Delta Y) \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Fx}{\partial \varphi} = b_{12} = & \frac{x}{q}(\Delta X \cos \varphi + \Delta Z \sin \omega \sin \varphi - \Delta Y \sin \varphi \cos \omega) \\ & + \frac{f}{q}(-\Delta X \sin \varphi \cos k + \Delta Z \sin \omega \cos \varphi \cos k - \Delta Y \cos \omega \cos \varphi \cos k) \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial k} = b_{13} = \frac{f}{q}(m_{21}\Delta X + m_{22}\Delta Z + m_{23}\Delta Y) \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial w} = b_{21} = \frac{y}{q}(-m_{33}\Delta Y + m_{32}\Delta Z) + \frac{f}{q}(-m_{23}\Delta Y + m_{22}\Delta Z) \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Fy}{\partial \varphi} = b_{22} = & \frac{y}{q}(\Delta X \cos \varphi - \Delta Y \sin \omega \sin \varphi - \Delta Z \sin \varphi \cos \omega) \\ & + \frac{f}{q}(\Delta X \sin \varphi \sin k - \Delta Y \sin \omega \cos \varphi \sin k + \Delta Z \cos \omega \cos \varphi \sin k) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial k} = b_{23} = \frac{f}{q}(-m_{11}\Delta X - m_{12}\Delta Y - m_{13}\Delta Z) \quad (4.17)$$

şeklinde yazılır. Bu kısmi türevlerden oluşturulan B katsayılar matrisi kullanılarak, en küçük kareler yöntemi ile bilinmeyen parametrelere ait düzeltmeler iteratif biçimde hesaplanmaktadır. Elde edilen düzeltmeler, başlangıçta kabul edilen yaklaşık değerlere eklenerek dış yöneltme parametreleri güncellenmekte ve çözüm süreci yakınsama sağlanıncaya kadar sürdürülmektedir. Bu süreç sonucunda, her bir görüntü için kamera

dış yöneltme parametreleri güvenilir biçimde kestirilmiş olur ve izleyen aşamada nesne noktalarının 3B koordinatlarının hesaplanmasına geçilir.

Fotogrametrik blokta birden fazla bağlama noktası ve/veya YKN kullanılması durumunda, her bir noktaya ait ölçü fonksiyonları birlikte ele alınarak doğrusallaştırılmış denklemler blok matris yapısı halinde yazılabilmektedir. Bu durumda, tüm gözlemler için oluşturulan düzeltmeler vektörü, katsayılar matrisi ve ölçü fonksiyonları Denklem (4.18)'deki gibi;

$$\begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ v_{x_3} \\ v_{y_3} \\ \vdots \\ v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial k} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{x_1}}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_{y_1}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial k} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{y_1}}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_{x_2}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{x_2}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{x_2}}{\partial k} & \frac{\partial F_{x_2}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{x_2}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{x_2}}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_{y_2}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{y_2}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{y_2}}{\partial k} & \frac{\partial F_{y_2}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{y_2}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{y_2}}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_{x_3}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{x_3}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{x_3}}{\partial k} & \frac{\partial F_{x_3}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{x_3}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{x_3}}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_{y_3}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{y_3}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{y_3}}{\partial k} & \frac{\partial F_{y_3}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{y_3}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{y_3}}{\partial Z_o} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{x_i}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{x_i}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{x_i}}{\partial k} & \frac{\partial F_{x_i}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{x_i}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{x_i}}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial F_{y_i}}{\partial \omega} & \frac{\partial F_{y_i}}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_{y_i}}{\partial k} & \frac{\partial F_{y_i}}{\partial X_o} & \frac{\partial F_{y_i}}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_{y_i}}{\partial Z_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \omega \\ \delta \varphi \\ \delta k \\ \delta X_o \\ \delta Y_o \\ \delta Z_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x_1}^0 \\ F_{y_1}^0 \\ F_{x_2}^0 \\ F_{y_2}^0 \\ F_{x_3}^0 \\ F_{y_3}^0 \\ \vdots \\ F_{x_i}^0 \\ F_{y_i}^0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

formunda ifade edilir.

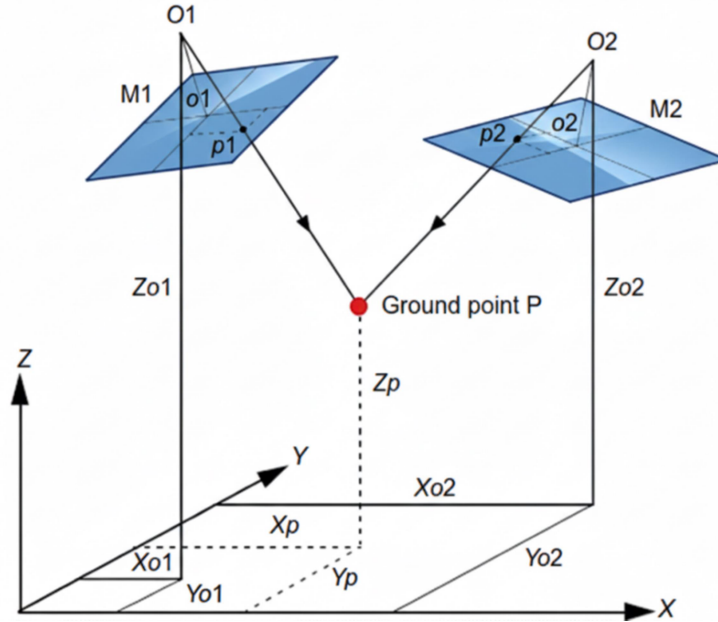
Bu blok matris yapısı, fotogrametrik blokta yer alan tüm bağlama noktaları ve kontrol noktalarına ait gözlemlerin birlikte değerlendirilmesini sağlar. Böylece dış yöneltme parametreleri ve nesne noktalarının koordinatları, tüm gözlemler dikkate alınarak en küçük kareler yöntemiyle en uygun şekilde kestirilmektedir.

4.4.2. Nesne Noktalarının 3B Koordinatlarının Hesaplanması

Fotogrametrik geriden kestirme işlemi sonucunda her bir görüntü için kamera dış yöneltme parametreleri $(X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa)$ belirlendikten sonra, bindirmeli iki veya daha fazla görüntü kullanılarak nesne üzerindeki detay noktalarının 3B koordinatları

hesaplanabilmektedir. Bu işlem fotogrametrik literatürde görüntü kestirme (triangülasyon) olarak adlandırılmaktadır.

Triangülasyon işleminde, aynı nesne noktasına ait birden fazla görüntüde ölçülen görüntü koordinatları ile bilinen kamera yöneltme parametrelerinden yararlanılarak, nesne noktasının uzaydaki konumu belirlenir. Bu amaçla, eşdoğrusallık koşullarına dayanan matematik model kullanılarak nesne noktalarının (X, Y, Z) koordinatları en küçük kareler yöntemine göre kestirilmektedir. Bu geometrik ilişki, bindirmeli iki görüntü kullanılarak bir nesne noktasının uzaydaki konumunun hesaplanmasını şematik olarak göstermektedir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Nesne noktasının triangülasyon ile hesaplanması

Görüntü koordinatları gözlemlerinden yararlanılarak nesne noktalarının 3B koordinatlarının hesaplanmasına ilişkin matematik model Denklem (4.19)'daki gibi;

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemde X_p, Y_p, Z_p nesne noktasının bilinmeyen 3B koordinatlarını, b_{ij} terimleri ise görüntü ve kamera geometrisine bağlı katsayıları temsil

etmektedir. Ölçü fonksiyonları F_x ve F_y , kamera perspektif merkezinin konumu ve görüntü koordinatları kullanılarak tanımlanmaktadır.

Katsayılar matrisi elemanları Denklem (4.20), (4.21), (4.22), (4.23), (4.24) ve (4.25)'teki gibi;

$$b_{11} = fm_{11} + m_{31}x_p \quad (4.20)$$

$$b_{12} = fm_{12} + m_{32}x_p \quad (4.21)$$

$$b_{13} = fm_{13} + m_{33}x_p \quad (4.22)$$

$$b_{21} = fm_{21} + m_{31}y_p \quad (4.23)$$

$$b_{22} = fm_{22} + m_{32}y_p \quad (4.24)$$

$$b_{23} = fm_{23} + m_{33}y_p \quad (4.25)$$

şeklinde yazılır.

Ölçü fonksiyonları ise kamera konum parametreleri kullanılarak Denklem (4.26) ve (4.27)'deki gibi;

$$Fx = X_o(fm_{11} + m_{31}x_p) + Y_o(fm_{12} + m_{32}x_p) + Z_o(fm_{13} + m_{33}x_p) \quad (4.26)$$

$$Fy = X_o(fm_{21} + m_{31}y_p) + Y_o(fm_{22} + m_{32}y_p) + Z_o(fm_{23} + m_{33}y_p) \quad (4.27)$$

şeklinde elde edilir.

Bir nesne noktasının birden fazla görüntüde gözlenmesi durumunda, her bir görüntüden elde edilen gözlemler birlikte değerlendirilerek nesne noktasının uzaydaki konumu en küçük kareler yöntemiyle hesaplanır. Bu yaklaşım, ölçü fazlalığı sayesinde hesaplanan koordinatların güvenilirliğini artırmakta ve rastgele hataların etkisini azaltmaktadır.

Triyagülasyon işlemi sonucunda elde edilen nesne noktaları, yoğun nokta bulutu oluşturma ve yüzey modelleme aşamalarının temelini oluşturmaktadır. Ayrıca, YKN'ler ve bağımsız kontrol noktaları kullanılarak gerçekleştirilen doğruluk analizlerinde, hesaplanan nesne koordinatları referans değerlerle karşılaştırılarak modelin metrik performansı değerlendirilebilmektedir.

Bu bölümde, görüntü tabanlı üç boyutlu modellemede kullanılan fotogrametrik hesaplama süreci ve bu sürecin dayandığı temel matematik model ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Eşdoğrusallık koşulları, dış yöneltme parametrelerinin hesabı, en küçük kareler yöntemi ve triyângölasyon esasları çerçevesinde, nesne noktalarının 3B koordinatlarının teorik olarak nasıl hesaplandığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, bu matematiksel model esas alınarak gerçekleştirilen hesaplamaların, uygulamada kullanılan veri setleri üzerinde değerlendirilmesine olanak sağlayan hesaplama yaklaşımı tanımlanmıştır.

İzleyen bölümde ise, bu çalışmada elde edilen görüntü ve ölçme verilerinin ticari fotogrametrik yazılım ortamında işlenmesine yönelik uygulama adımları ele alınmaktadır. Görüntülerin hazırlanmasından başlayarak kamera yöneltme, yoğun nokta bulutu üretimi, YKN kullanılarak ölçeklendirme ve 3B modelin oluşturulmasına kadar olan süreç, uygulamada izlenen iş akışı ve kullanılan parametreler çerçevesinde sunulmaktadır.

4.5. Ticari Yazılım ile Veri İşleme ve 3B Model Oluşturma

Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen görüntü verileri ve ölçme sonuçlarının ticari yazılım kullanılarak 3B modelin oluşturulmasına yönelik veri işleme süreci ele alınmaktadır. Ticari fotogrametrik veri işleme adımları, kullanılan yazılımın işleyişine ve uygulanan parametrelere bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Veri işleme sürecinin genel akışı ve temel aşamaları aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmaktadır.

4.5.1. Görüntülerin Hazırlanması ve Ön İşleme

Saha çalışmaları sırasında elde edilen dijital görüntüler, fotogrametrik değerlendirme öncesinde ön işleme aşamasından geçirilmiştir. Bu aşamada, görüntülerin uygun formatta düzenlenmesi, bulanık veya düşük kaliteli görüntülerin ayıklanması ve veri kümesinin işleme sürecine hazır hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Görüntülerin ön işleme sürecinde uygulanan detaylı adımlar ve kullanılan parametreler, çalışmayı yürüten araştırmacılar tarafından belirlenmiş olup, bu ayarlara ilişkin bilgiler ilgili yazılım ortamında tanımlanmıştır.

4.5.2. Görüntü Eşleştirme ve Kamera Yönelme

Ön işleme aşamasından geçen görüntüler kullanılarak, fotogrametrik değerlendirme sürecinde görüntü eşleştirme ve kamera yönelme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, görüntüler arasında ortak noktalar belirlenmiş ve kamera konumları ile yönelimleri hesaplanmıştır.

Kamera yönelme işlemleri sırasında, iç yönelme ve dış yönelmeye ilişkin parametreler yazılım tarafından hesaplanmış ve görüntü bloğu oluşturulmuştur. Görüntü eşleştirme ve yönelme sürecine ilişkin kullanılan ayarlar ve yöntemler, yazılımın varsayılan veya kullanıcı tanımlı seçeneklerine göre belirlenmiş olup, bu ayarlara ilişkin bilgileri ilgili yazılım ortamında tanımlanmıştır.

4.5.3. Yoğun Nokta Bulutu Oluşturulması

Kamera yönelme işlemlerinin tamamlanmasının ardından, görüntülerden yoğun nokta bulutu üretilmiştir. Yoğun nokta bulutu, nesnenin üç boyutlu geometrisinin daha ayrıntılı biçimde temsil edilmesini sağlayan temel veri setlerinden biridir.

Yoğun nokta bulutu oluşturma sürecinde kullanılan çözünürlük, filtreleme ve kalite parametreleri, seçilen yazılım ortamında belirlenmiş olup, bu parametrelerin model kalitesi üzerindeki etkileri sonraki aşamalarda değerlendirilmiştir.

4.5.4. YKN Kullanılarak Modelin Ölçeklendirilmesi

YKN içeren veri kümelerinde, yoğun nokta bulutu ve oluşturulan 3B model, YKN koordinatları kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Bu işlem sayesinde, modelin gerçek dünya koordinat sistemine oturtulması ve metrik olarak değerlendirilebilir hale getirilmesi sağlanmıştır.

YKN kullanılmayan veri kümelerinde ise model, yazılımın göreceli koordinat sistemi içerisinde oluşturulmuş ve bu durum, doğruluk değerlendirmelerinde karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

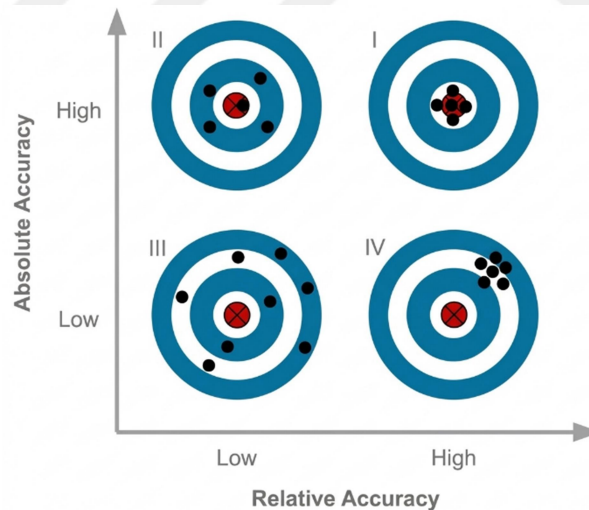
4.5.5. 3B Modelin Oluşturulması

Yoğun nokta bulutu verileri kullanılarak üç boyutlu yüzey modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada, nokta bulutundan yüzey ağı (mesh) üretilmiş ve gerekmesi halinde doku kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan 3B modeller, doğruluk analizi ve karşılaştırmalı değerlendirmeler için kullanılmak üzere kayıt altına alınmıştır. Model üretiminde kullanılan ayarlar ve modelleme tercihleri, izleyen bölümlerde sunulan sonuçlar kapsamında değerlendirilmektedir.

4.6. Doğruluk Analizi

Bu bölümde, çalışma kapsamında Hünkar Çeşmesi için üretilen 3B modellerin metrik doğruluğunun değerlendirilmesine yönelik izlenen yaklaşım ve kullanılan ölçütler açıklanmaktadır. Model doğruluğu mutlak ve bağıl doğruluk kavramları çerçevesinde ele alınmış ve farklı referans veriler kullanılarak karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Mutlak ve bağıl doğruluk Şekil 4.8’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Bağıl doğruluk – Mutlak doğruluk

4.6.1. Mutlak Doğruluk Değerlendirmesi

Mutlak doğruluk, 3B modelde hesaplanan nesne noktalarının koordinatlarının, gerçek dünya koordinat sistemi içerisindeki referans değerlerle ne ölçüde örtüştüğünü ifade

etmektedir. Bu çalışmada mutlak doğruluk değerlendirmesi, yüksek hassasiyetle ölçülmüş YKN koordinatları referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

Mutlak doğruluk analizinde, 3B modelden elde edilen nesne koordinatları ile referans koordinatlar arasındaki farklar hesaplanmış ve bu farklar istatistiksel ölçütler yardımıyla değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, modelin gerçek dünya koordinat sistemine doğru biçimde oturup oturmadığının belirlenmesini sağlamaktadır. YKN kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirmeler, modelin metrik olarak kullanılabilirliğinin temel göstergelerinden biridir.

4.6.2. Bağlı Doğruluk Değerlendirmesi

Bağlı doğruluk, 3B model içerisindeki geometrik ilişkilerin kendi içindeki tutarlılığını ifade etmektedir. Bu kapsamda, modelde yer alan nokta çiftleri arasındaki mesafelerin veya geometrik oranların, gerçek nesne üzerindeki karşılıklarıyla ne derece uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada bağlı doğruluk analizi, model üzerinde hesaplanan mesafe ve geometrik ilişkilerin, bağımsız kontrol ölçmeleri ile karşılaştırılması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bağlı doğruluk değerlendirmesi, modelin görsel ve geometrik bütünlüğünü ortaya koymakta olup, özellikle YKN kullanılmayan veya sınırlı sayıda YKN içeren modellerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

4.6.3. Karşılaştırmalı Doğruluk Değerlendirmesi

Karşılaştırmalı doğruluk değerlendirmesi, farklı veri kaynakları, ölçeklendirme yaklaşımları ve referans stratejileri kullanılarak üretilen üç boyutlu modellerin doğruluk performanslarının birlikte analiz edilmesini amaçlamaktadır. Bu tür bir değerlendirme, yalnızca tek bir modelin doğruluğunu ortaya koymakla kalmayıp, farklı üretim senaryolarının metrik sonuçlar üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına da olanak sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında karşılaştırmalı doğruluk analizi, farklı donanım ve ölçme kombinasyonları kullanılarak oluşturulan dört ayrı modelleme senaryosu üzerinden gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoda, yalnızca Nikon D300 kamerası kullanılarak ve göreceli

nesne koordinatları esas alınarak elde edilen üç boyutlu modelin doğruluğu değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, herhangi bir harici referans veya ölçek bilgisi kullanılmaksızın üretilen modelin içsel geometrik tutarlılığının incelenmesine olanak sağlamaktadır.

İkinci senaryoda, i89 Visual IMU GNSS cihazı ile ölçülen YKN koordinatları referans alınarak oluşturulan üç boyutlu model ele alınmıştır. Bu modelleme yaklaşımı, yüksek hassasiyetli GNSS ölçülerinin sağladığı mutlak referans bilgisi sayesinde modelin gerçek dünya koordinat sistemine (çalışmada TUREF / TM30 (EPSG::524) koordinat referans sistemi) uyumunun değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

Üçüncü senaryoda ise Nikon D300 kamera görüntüleri ile i89 Visual IMU GNSS cihazından elde edilen YKN koordinatlarının birlikte kullanıldığı bir modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu senaryo, görüntü tabanlı fotogrametrik veriler ile GNSS tabanlı kontrol ölçülerinin birlikte kullanımının model doğruluğu üzerindeki etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

Dördüncü senaryoda, nesne üzerinde gerçekleştirilen ÇŞM mesafe ölçülerinden elde edilen ölçek referansları kullanılarak oluşturulan üç boyutlu model değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, sınırlı sayıda kontrol verisinin bulunduğu durumlarda, basit ölçeklendirme yöntemlerinin model doğruluğu üzerindeki etkilerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu farklı senaryoların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi sayesinde, kullanılan donanım türü, referans veri kaynağı ve ölçeklendirme yaklaşımının üç boyutlu modelin metrik doğruluğu üzerindeki etkileri bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, izleyen bölümde deneysel bulgular çerçevesinde sayısal olarak sunulmakta ve yorumlanmaktadır.

5. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde, Hünkar Çeşmesi için çalışma kapsamında gerçekleştirilen görüntü tabanlı 3B modelleme uygulamalarından elde edilen deneysel bulgular sunulmaktadır ve değerlendirilmektedir. Deneysel bulgular, farklı veri toplama ve değerlendirme yaklaşımlarına dayalı olarak üretilen modellerin metrik performanslarının ortaya konulmasını amaçlamaktadır. Bu doğrultuda; fotogrametrik matematik modele dayalı hesaplamalar, ticari fotogrametri yazılımı çıktıları ve sahada gerçekleştirilen kontrol ölçümleri birlikte ele alınarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar hem tekil örnekler üzerinden hem de karşılaştırmalı analizler yardımıyla sunulmuştur. Elde edilen parametreler ve doğruluk göstergeleri tablolar ve şekiller aracılığıyla raporlanmıştır.

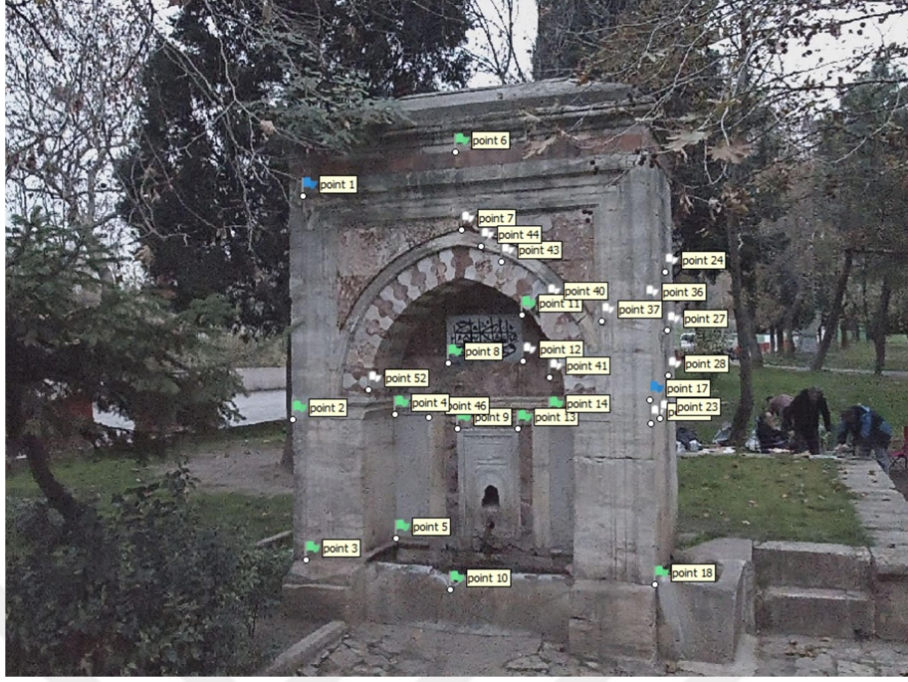
5.1. Dış Yönelme Parametrelerinin Geriden Kestirme ile Hesaplanması

Bu bölümde, fotogrametrik eşdoğrusallık denklemlerine dayalı matematik model kullanılarak dış yönelme parametrelerinin hesaplanmasına yönelik deneysel bir uygulama sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, ticari bir fotogrametrik yazılım (Agisoft Metashape) tarafından hesaplanan parametrelerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, dış yönelme parametrelerinin geriden kestirme yöntemi ile hesaplanmasına örnek teşkil etmesi amacıyla IMG0001 numaralı görüntü seçilmiştir. Seçilen görüntü için, nesne üzerinde yer alan ve i89 Visual IMU GNSS ölçüm cihazı ile koordinatları belirlenmiş altı adet nokta kullanılarak fotogrametrik geriden kestirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu noktalara ait görüntü koordinatları ve karşılık gelen nesne koordinatları Tablo 5.1’de, IMG0001 numaralı görüntü Şekil 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Bağlama noktalarına ait görüntü ve nesne koordinatları

NN	Görüntü koordinatları		Nesne koordinatları (i89 Visual IMU GNSS)		
	x (mm)	y (mm)	X (m)	Y (m)	Z (m)
2	-0.888	-0.447	444588.061	4520154.102	45.437
6	-0.039	0.963	444589.408	4520153.616	47.543
7	-0.003	0.555	444589.445	4520153.669	46.956
8	-0.075	-0.144	444589.334	4520154.339	45.917
9	-0.027	-0.489	444589.417	4520154.345	45.353
10	-0.069	-1.332	444589.375	4520153.744	44.153



Şekil 5.1. i89 cihazı ile ölçülen IMG0001 nolu fotoğraf

Fotogrametrik matematik modele dayalı olarak gerçekleştirilen iterasyonlu çözüm sürecinde, dış yöneltme parametreleri dokuz iterasyon sonunda hesaplanmıştır. İterasyon süreci boyunca birim ağırlıklı ölçünün standart sapması (σ_0) değerinin önemli ölçüde azaldığı, çözümün kararlı bir duruma ulaştığı gözlemlenmiştir. İlk iterasyonda σ_0 değeri 0,89593 olarak hesaplanırken, dokuzuncu iterasyon sonunda 0,00338'e düşmüştür.

Elde edilen dış yöneltme parametreleri ve bu parametrelere ait duyarlılık değerleri, ticari fotogrametri yazılımı olan Agisoft Metashape tarafından hesaplanan sonuçlarla birlikte, Tablo 5.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 5.2. Model ve yazılım parametre hesaplamaları

IMG0001 Hesaplanan Değerler		Agisoft yazılımı sonuçları
Parametreler	Duyarlılıkları	Parametreler
$\omega = 91.3092^0$	$\pm 0.7980^0$	91.2281^0
$\varphi = 0.9543^0$	$\pm 0.3860^0$	0.7317^0
$\kappa = 0.2671^0$	$\pm 0.1027^0$	0.4723^0
$X_0 = 444589.5803$ m	± 0.0487 m	444589.5298 m
$Y_0 = 4520146.7196$ m	± 0.0170 m	4520146.6654 m
$Z_0 = 45.9724$ m	± 0.1033 m	46.0113 m

Tablo incelendiğinde, matematik modele dayalı hesaplamalar ile ticari yazılım sonuçlarının birbirine oldukça yakın değerler verdiği görülmektedir. Özellikle konum parametreleri açısından farkların santimetre mertebesinde kaldığı, yöneltme açıları açısından ise farkların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Geriden kestirme çözümü sonucunda hesaplanan resim noktası koordinat düzeltmeleri Tablo 5.3'te verilmiştir. Nokta bazında elde edilen düzeltmelerin milimetre mertebesinde olduğu, RMS değerlerinin ise düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, seçilen matematik modelin ve uygulanan çözüm yaklaşımının deneysel veri seti için tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Tablo 5.3. IMG0001 için koordinat düzeltmeleri ve RMS değerleri

NN	v_x (mm)	v_y (mm)
2	-0.0029	0.0031
6	0.0049	-0.0040
7	-0.0073	0.0016
8	0.0006	0.0026
9	0.0021	-0.0015
10	0.0026	-0.0014
RMS	0.0040	0.0026

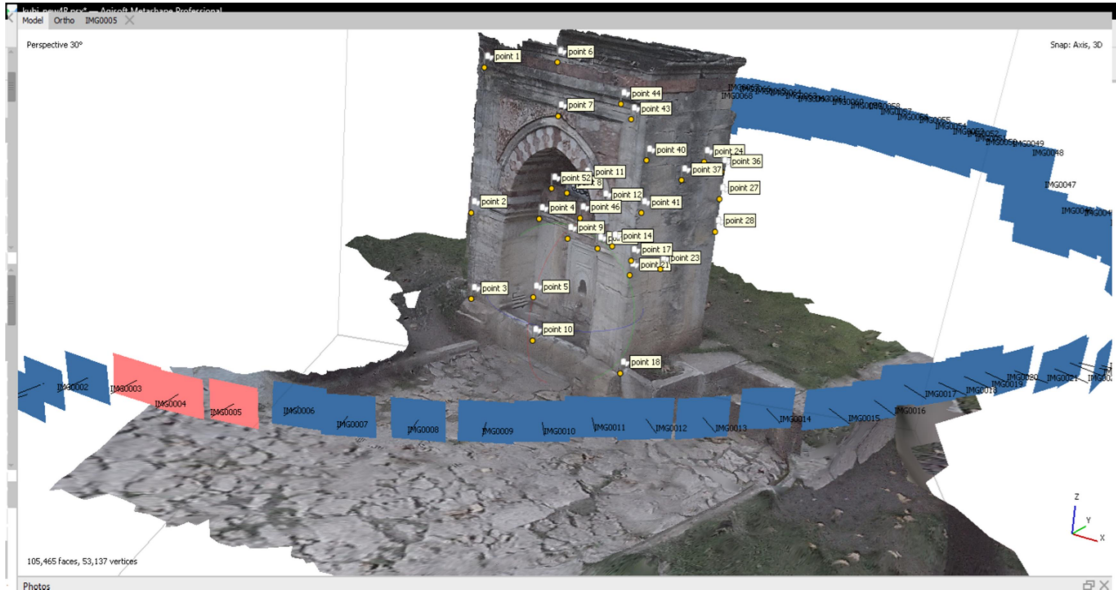
Bu alt bölümde sunulan bulgular, fotogrametrik matematik modele dayalı hesaplamalar ile ticari yazılım çıktıları arasında yüksek bir uyum bulunduğunu ortaya koymaktadır. Hesaplanan dış yöneltme parametreleri ve resim koordinat düzeltmeleri, her iki yaklaşımın da benzer geometrik sonuçlar üretebildiğini göstermekte olup, matematik modele dayalı hesaplamaların deneysel olarak uygulanabilir ve güvenilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

5.2. Nesne Koordinatlarının Kestirimi ve Karşılaştırılması

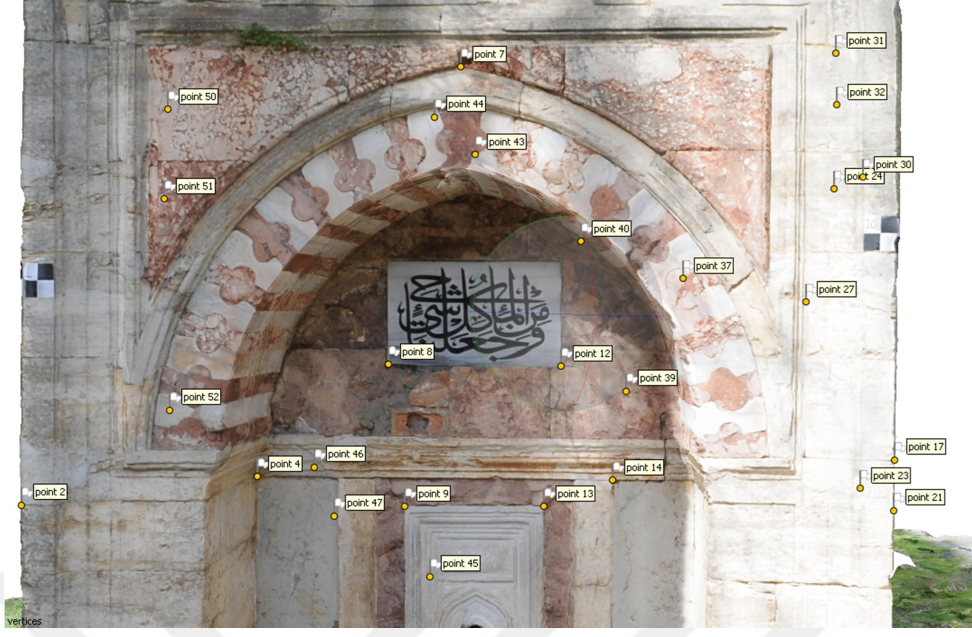
Bu alt bölümde, bindirmeli (örtüşen) görüntülerden yararlanılarak nesne koordinatlarının fotogrametrik matematik model çerçevesinde hesaplanmasına ilişkin deneysel uygulama sonuçları sunulmaktadır. Amaç, matematik modele dayalı olarak

elde edilen nesne koordinatlarının, ticari fotogrametrik yazılım tarafından üretilen sonuçlarla karşılaştırılması ve iki yaklaşım arasındaki uyumun değerlendirilmesidir.

Çeşmenin 3B nesne koordinatları ve duyarlılıkları yazılımla demet (blok) dengelemesi yöntemiyle hesaplanmıştır. Ayrıca nokta koordinatlarının algoritma adımlarının açıkça görülebilmesi ve hesap denetimi için örnek bindirmeli resimler üzerinden nesne koordinatlarının kestirimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla IMG003, IMG004 ve IMG005 numaralı bindirmeli görüntüler örnek olarak seçilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Hesaplamalarda kullanılan üç adet bindirmeli görüntü



Şekil 5.3. Seçilen nesne konumları

Söz konusu görüntüler üzerinde ortak olarak görülebilen üç adet nesne noktası (NN: 7, 8 ve 13) (Şekil 5.3) belirlenmiş ve bu noktalara ait görüntü koordinatları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Seçilen nesne noktalarına ait piksel (u, v) ve metrik görüntü koordinatları (x, y) Tablo 5.4’te sunulmuştur. Bu noktalar için kullanılan bindirmeli fotoğraflara ait konum (X_0 , Y_0 , Z_0) ve açısıl yöneltme (ω , ϕ , κ) parametreleri ise Tablo 5.2’te verilmiştir. Bu parametreler, matematik modele dayalı nesne koordinat kestiriminde giriş verisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 5.4. Şekil 5.2’ de seçilen görüntüler ve nesne noktalarının koordinatları

		Görüntü Koordinatları		Resim Koordinatları	
Resim	NN	u (pix)	v (pix)	x (mm)	y(mm)
IMG003	7	933	361	0.399	0.717
IMG003	8	927	605	0.381	-0.015
IMG003	13	1058	721	0.774	-0.363
IMG004	7	922	409	0.366	0.573
IMG004	8	915	647	0.345	-0.141
IMG004	13	1040	772	0.720	-0.516
IMG005	7	789	322	-0.030	0.830
IMG005	8	777	569	-0.070	0.090
IMG005	13	893	698	0.280	-0.290

Tablo 5.5. Seçilen fotoğrafların koordinatları ve açısal yöneltilmeleri

Görüntü	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	ω ($^\circ$)	Φ ($^\circ$)	κ ($^\circ$)
IMAGE003	444590.006	4520146.993	46.059	89.42751	10.04336653	-1.81502
IMAGE004	444590.376	4520147.009	46.073	90.79834	12.49009	0.17654
IMAGE005	444590.646	4520147.186	46.040	88.12024	9.71285	3.47693

Tablo 5.5'te verilen dış yöneltilme parametrelerine bağlı olarak, her bir görüntü için toplam dönüklük matrisleri hesaplanmıştır. Görüntülere ait dönüklük matrisleri Denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'teki gibi;

$$\mathbf{m}_{\text{IMAGE003}} = \begin{bmatrix} 0.9841820 & 0.1739809 & -0.0334128 \\ 0.0311874 & 0.0155099 & 0.9993932 \\ 0.1743935 & -0.9846269 & 0.0098385 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{m}_{\text{IMAGE004}} = \begin{bmatrix} 0.9763288 & 0.2162058 & 0.0060942 \\ -0.0030083 & -0.0145994 & 0.9998889 \\ 0.2162708 & -0.9762387 & -0.0136034 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{m}_{\text{IMAGE005}} = \begin{bmatrix} 0.9838513 & 0.1702987 & 0.0550901 \\ -0.0597773 & 0.0225156 & 0.9979578 \\ 0.1687105 & -0.9851352 & 0.0323320 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

şeklinde elde edilir.

Bu matrisler, Bölüm 4'te ayrıntılı olarak açıklanan fotogrametrik matematik modele göre, eşdoğrusallık koşullarına dayalı olarak hesaplanmıştır ve nesne koordinatlarının kestiriminde kullanılmıştır. Katsayılar matrisi (B) ve ölçü fonksiyonları vektörü (F), Denklem (5.4) ve Denklemde (5.5)'te sunulduğu gibi;

$$B = \begin{bmatrix} 4.701 & 0.423 & -0.153 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2718 & -0.633 & 4.710 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.695 & 0.444 & -0.154 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.144 & 0.088 & 4.702 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.7660 & 0.0565 & -0.150 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0834 & 0.4304 & 4.700 \\ 4.6732 & 0.6600 & 0.0237 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1098 & -0.6281 & 4.6971 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.669 & 0.680 & 0.024 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.045 & 0.069 & 4.707 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.750 & 0.314 & 0.019 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.126 & 0.435 & 4.712 \\ 4.624 & 0.831 & 0.258 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.141 & -0.712 & 4.723 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.618 & 0.870 & 0.257 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.266 & 0.017 & 4.699 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.677 & 0.526 & 0.268 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.330 & 0.392 & 4.686 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$F = \begin{bmatrix} 4014415.46 \\ -2740189.05 \\ 4093131.69 \\ 460937.85 \\ 2374493.89 \\ 1982785.07 \\ 5061087.99 \\ -2789999.13 \\ 5151736.40 \\ 292046.80 \\ 3533014.79 \\ 1910768.41 \\ 5811644.57 \\ -3279647.35 \\ 5986762.47 \\ -39966.13 \\ 4454480.81 \\ 1623653.95 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

olarak elde edilmiştir. Bu matrisler yardımıyla, en küçük kareler yöntemi kullanılarak nesne noktalarının koordinatları Denklem (5.6) aracılığıyla,

$$(B^T B)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1828 & -1.214 & -0.171 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.214 & 8.7944 & 1.236 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.171 & 1.236 & 0.189 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2309 & -1.515 & 0.023 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.515 & 10.6495 & -0.163 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.023 & -0.163 & 0.0176 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0550 & -0.646 & 0.060 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.646 & 10.4174 & -0.960 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.060 & -0.960 & 0.1036 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Denklem (5.7)'de sunulduğu gibi;

$$(B^T B)^{-1} B^T F = \begin{bmatrix} 444589.434 \\ 4520153.643 \\ 46.982 \\ 444589.314 \\ 4520154.289 \\ 45.946 \\ 444589.902 \\ 4520154.146 \\ 45.404 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

olarak elde edilmiştir. Bu değerlere göre seçilen üç noktaya ait hesaplanan sonuç nesne koordinatları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Hesaplanan 3 noktanın nesne koordinatları

NN	X (m)	Y (m)	Z(m)
7	444589.434	4520153.643	46.982
8	444589.314	4520154.289	45.946
13	444589.902	4520154.146	45.404

Agisoft yazılımında resimlerin hepsinin kullanıldığı tüm proje için hesaplanan demet dengelemesi sonucu bu üç noktaya ait nesne koordinatları karşılaştırmak üzere Tablo 5.7'de verilmiştir:

Tablo 5.7. Agisoft yazılımının oluşturduğu koordinatlar

NN	X (m)	Y (m)	Z(m)
7	444589.445	4520153.669	46.956
8	444589.334	4520154.339	45.917
13	444589.923	4520154.171	45.373

Hesaplanan ve yazılımdan üretilen sonuç nesne koordinatları arasındaki farkların oldukça küçük ve öngörülen sınırlar içinde olduğu görülmektedir. Doğruluk hesabı için nokta koordinatlarının duyarlılıkları (standart sapmaları) kofaktörler matrisi yardımı ile hesaplanmıştır. Birim ölçünün standart varyansı ve ölçülerin standart sapmaları Denklem (5.8) ve (5.9)'daki gibi;

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{[v^T v]}{n - u}} \quad (5.7)$$

$$\sigma_{X_i, Y_i, Z_i} = \sigma_0 (diag(B^T B)^{-1})^{1/2} \quad (5.8)$$

şeklinde oluşturulmuştur.

Düzeltilmeler vektörü, denklem sayısı $n = 18$, bilinmeyen sayısı $u = 9$, ortalama $m_0 = 0.0245518$ olacak şekilde, Denklem (5.9) ve (5.10)'daki gibi;

$$v = B\Delta - F = \begin{bmatrix} 0.00187239143997431 \\ -0.0186571404337883 \\ 0.00299670314416289 \\ 0.0113346359576099 \\ 0.00966046005487442 \\ 0.00966046005487442 \\ -0.00442821346223354 \\ -0.00196176208555698 \\ -0.00942275300621986 \\ -0.0466256781946868 \\ -0.0201089340262115 \\ 0.0143082952126861 \\ 0.00433802511543036 \\ 0.0204025730490685 \\ 0.00769574008882046 \\ 0.0350875712392735 \\ 0.0104083493351936 \\ -0.00921146222390234 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$v^T v = 0.05425101 \quad (5.10)$$

olarak elde edilmiştir. Hesaplanan standart sapmalar Tablo 5.8'de sunulmuştur.

Tablo 5.8. Hesaplanan üç (3) nesne nokta koordinatlarının standart sapmaları

NN	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)	Toplam (m)
7	0.01	0.07	0.01	0.07
8	0.01	0.08	0.00	0.08
13	0.01	0.08	0.01	0.08

Metrik olmayan ticari kameralarla ve standart yersel resim çekim planlaması yapılmaksızın hassas 3B model üretimi yapılabilmektedir. Agisoft yazılımı ile geniş açılı veya standart objektifli tam çerçeve kameralar kullanılarak çekilen bindirmeli görüntülerden tarihi ve kültürel yapıların ve iç mekanlarının cephe, düşey yüzey özellikleri, süsleme vb. detayları, yüksek kalite ve doğrulukta elde edilebilmektedir. SfM ve çoklu görüntü stereo (Multi-View Stereo - MVS) algoritmalarını uygulayan görüntü tabanlı modelleme sistemleri, büyük ölçekli nesne uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 5.4'te tarihi çeşme için Bölüm 4.5 de açıklanan iş akışına uygun biçimde Nikon D300 kamerası ile elde edilen görüntülerden yararlanarak oluşturulan 3B nesne modeli görülmektedir. Ham fotogrametrik modeli gerçek dünya/ nesne koordinatlarına dönüştürmek, coğrafi referanslama yapmak, ölçeklendirmek ve doğruluğu geliştirmek vb. çeşitli amaçlarla nesne üzerinde kontrol noktaları (YKN'ler) ve doğrulama amaçlı olarak da denetim noktaları kullanılmaktadır (Şekil 5.5.).



Şekil 5.4. Agisoft ile oluşturulan 3B nesne modeli



Şekil 5.5. Kontrol noktalarının konumları ve hata elipsleri

Bağıl doğruluğun tespit edilmesi için nesne üzerinde işaretlenen hedef noktalarının lokal koordinat sistemine göre tanımlanmış koordinatlarından hesaplanan 3B model için karesel ortalama değerleri Tablo 5.9’da sunulmaktadır.

Tablo 5.9. Kontrol noktalarının toplam karesel ortalama hatası

Sayı	X hatası (mm)	Y hatası (mm)	Z hatası (mm)	XY hatası (mm)	Toplam (mm)
4	0.242	2.195	3.210	2.208	3.896

Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi ölçülen ve hesaplanan 3B koordinat bileşenlerinin koordinat farklarından elde edilen toplam karesel ortalama hata (σ_0) $\pm 3,9$ mm civarındadır. Noktaların dengeleme sonucunda hesaplanan hata elipsleri ve hataları Tablo 5.10’da görülmektedir.

Tablo 5.10. Nokta koordinatlarından hesaplanan doğruluk değerleri

Nokta	X hatası (mm)	Y hatası (mm)	Z hatası (mm)	S hatası (mm)	Görüntüde (piksel)
-------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------------

Nokta	X hatası (mm)	Y hatası (mm)	Z hatası (mm)	S hatası (mm)	Görüntüde (piksel)
15	0.270	1.979	-3.467	4.001	0.062
16	0.207	-2.310	3.381	4.100	0.076
17	-0.286	2.397	-2.937	3.802	0.080
18	-0.191	-2.066	3.022	3.666	0.097
$\pm \sigma_0$	0.242	2.195	3.210	3.896	0.080

i89 Visual IMU GNSS cihazının video fotogrametri algoritmaları, binaların, cephelerin ve anıtların 3 boyutlu modellemesini belirli doğruluk sınırları içinde mümkün kılmaktadır. Çalışmada i89 cihazı ile ölçülen kontrol nokta koordinatları referans alındığında oluşturulan üç boyutlu modelin gerçek dünya koordinat sistemine ne ölçüde uyum sağladığı ve geometrik (mutlak) doğruluğu araştırılmıştır. Tipik görsel ölçümler için belli ölçüm aralıklarında (örneğin, 2–15 m) kameralar tarafından yakalanan noktalar için koordinat doğruluğunun genel olarak birkaç ‘cm’ civarında olduğu belirtilmişti. CHCNAV i89 cihazı ile elde edilen görüntüleme özelliği ve kontrol ölçümleri ile elde edilen 3B nesne modeli Şekil 5.6’da gösterilmektedir. Cihazın bu noktada belirtilen kamera doğruluk değeri, erişilemeyen veya engellenmiş hedefler için cihaz tarafından yakalanan görüntülerden ölçülen noktalar için geçerlidir. Genel anlamda doğruluk; mesafeye, sahne geometrisine ve görüntü bindirme oranları vb. parametrelere bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 5.6. i89 cihazı ile elde edilmiş görüntülerin şeması

Fotoğrafların yöneltmesi sırasında otomatik olarak hesaplanan veya bilinen kalibrasyon verileri kullanılarak manuel olarak gerçekleştirilen kamera kalibrasyonu işlemi, fotogrametri iş akışındaki en kritik ve önemli adımlardan birisidir ve 3 boyutlu yeniden yapılandırmanın hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Doğru olarak hesaplanmış kalibrasyon parametreleri, fotoğraf yöneltmeleri esnasında detay eşleştirmeyi iyileştirir ve böylece tüm 3B yeniden yapılandırmanın temeli olan kamera konum belirlemenin (geriden kestirme) daha hassas olmasını sağlar.

CHCNAV i89 cihazının kalibrasyon işleminde hesaplanan “görüntü düzeltmeleri” grafiği Şekil 5.7’de gösterilmekte olup eşleşen ilgili hücrelerdeki pikseller için ‘yeniden projeksiyon hatası’nın (reprojection error) ortalama vektörlerini göstermektedir. Yeniden projeksiyon hatası, model kalitesinin bir göstergesi olup; daha yüksek hata modelin daha az iyi modellenmiş kısımlarını göstermektedir. Görüntü düzeltmeleri grafiğinin kalibrasyon işlemlerinde standart olarak kullanılan “distorsiyon grafiği”nden farklı olduğunu vurgulamak gerekir. Cihazın objektifinin bilinen odak uzaklığı ile otomatik kalibrasyondan elde edilen değer aynı olduğundan yapılan işlemin güvenilir ve tutarlı olduğu kanaatine varılmıştır.

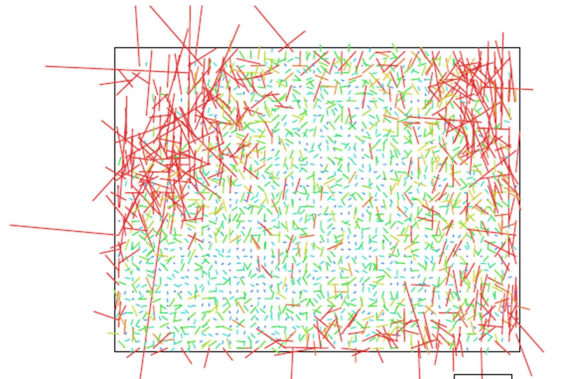


Fig. 2. Image residuals for A11551980007070507 (4.7053mm).

A11551980007070507 (4.7053mm)

69 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	1600 x 1200	4.7054 mm	4.8 x 4.8 μ m

Şekil 5.7. i89 cihazının kamera kalibrasyonu

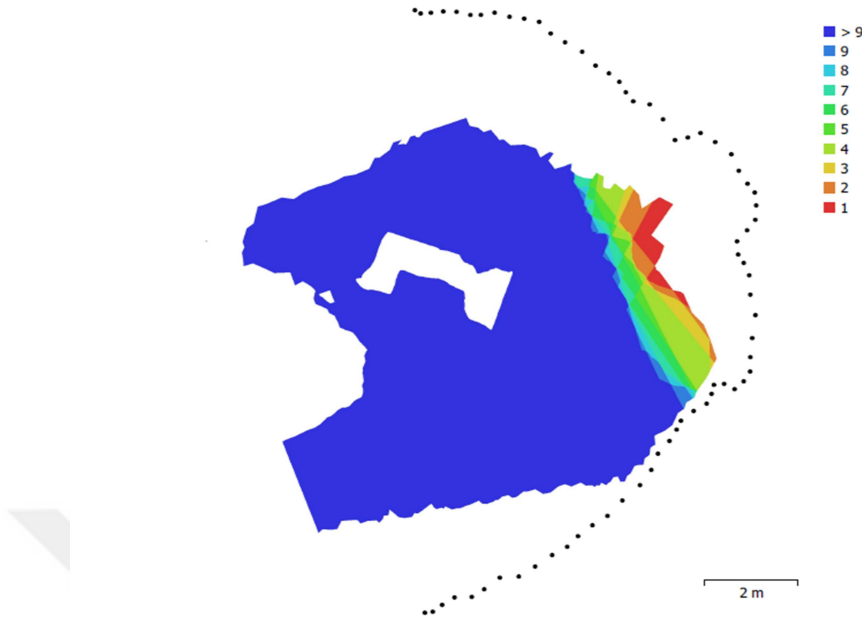


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	69	Camera stations:	69
Flying altitude:	5.46 m	Tie points:	22,426
Ground resolution:	3.47 mm/pix	Projections:	69,345
Coverage area:	58.8 m ²	Reprojection error:	1.15 pix

Şekil 5.8. Kamera yatay konumları ve görüntü bindirmeleri

3B nesne modelin doğruluğunu etkileyen bir diğer parametre, çekilen resimlerde görüntülerin bindirme oranlarıdır. Şekil 5.8’de, yazılım tarafından oluşturulan ve bindirmeli görüntülerin konumlarıyla ilişkili olarak sayılarını gösteren bir grafik gösterilmektedir. Haritanın mavi renkle gösterilen bölgeleri o alanda yeterli görüntü olduğunu gösterirken, kırmızı renkli bölgeler daha az görüntü ve dolayısıyla daha az bindirme olan alanları temsil etmektedir. Şekilde kırmızı renkle gösterilen küçük bölge, ağaçlık nedeniyle görüş açısı azaldığından daha az görüntü elde edilen alanı işaret etmektedir.

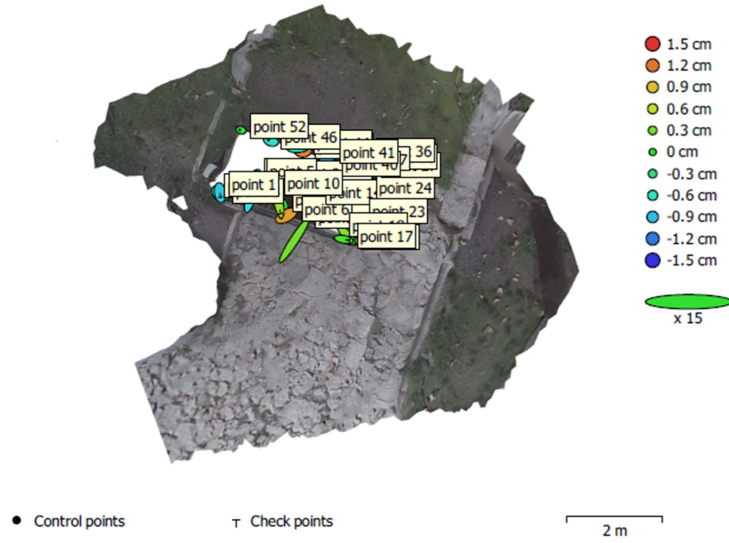


Şekil 5.9. Kamera yatay konumları ve hata elipsleri

Agisoft yazılım ortamında görüntülerin yönlendirilmesinden sonra topluca hesaplanan kamera 3B koordinatları ve standart sapma değerleri Şekil 5.9 da gösterilmiştir. Kamera konumları için ortalama standart sapma değeri 13 cm civarında hesaplanmıştır. Daha önce IMG001 resmi için yapılan örnek uygulamada (Bölüm 5.1) hesaplanan doğruluk değeri 11 cm civarında elde edilmişti. Bu nedenle i89 cihazı ile çekilen resimler için yazılım tarafından hesaplanan kamera konumları ve duyarlık değerleri beklenen sınırlar içinde ve tutarlıdır.

Tablo 5.11. Kamera konumlarının standart sapmaları

X hatası (cm)	Y hatası (cm)	Z hatası (cm)	XY hatası (cm)	$\pm\sigma_0$ (cm)
7.45278	4.230	9.919	8.570	13.108



Şekil 5.10. Kontrol noktalarının konumları ve hata elipsleri

i89 Visual IMU GNSS cihazı ile ölçülen kontrol noktaları referans alınarak üç boyutlu nesne modeli oluşturulacağından; çeşme üzerinde ölçülen hedef noktalarının TUREF/TM30 (EPSG:524) koordinat referans sistemine göre tanımlanmış koordinatları (Tablo 5.13) ve hesaplanan model için toplam karesel ortalama değerleri Tablo 5.12’de sunulmaktadır. Modelin doğruluk testi ve doğrulama için ölçülen kontrol noktaları dışında denetim noktaları seçilerek bu noktalar için koordinat duyarlık değerleri hesaplanmıştır (Tablo 5.13).

Tablo 5.12. Kontrol noktalarının toplam karesel ortalama hatası

Sayı	X hatası (cm)	Y hatası (cm)	Z hatası (cm)	XY hatası (cm)	$\pm\sigma_0$ (cm)
20	1.05543	1.32479	0.60079	1.69381	1.7972

Tablo 5.13. Kontrol noktalarının konum hataları

Etiket	X hatası (cm)	Y hatası (cm)	Z hatası (cm)	S hatası (cm)	Görüntü (piksel)
7	-0.109	-1.789	-0.063	1.793	1.195

Etiket	X hatası (cm)	Y hatası (cm)	Z hatası (cm)	S hatası (cm)	Görüntü (piksel)
8	-0.474	0.119	-0.085	0.496	1.489
9	-0.347	-0.754	-0.344	0.898	1.005
11	3.504	5.361	0.294	6.412	6.776
12	-0.137	0.100	0.262	0.296	0.140
13	-0.078	-0.137	0.034	0.161	0.818
6	-1.414	-0.779	1.022	1.911	1.312
14	0.379	-0.297	-0.271	0.552	0.942
21	-0.551	0.038	-0.299	0.629	0.921
23	-0.454	-0.250	-0.333	0.616	1.119
24	-0.320	-0.076	0.273	0.427	0.740
27	-0.258	-0.173	0.432	0.532	1.255
28	0.124	-1.265	-0.658	1.430	2.185
36	-0.182	-0.047	1.110	1.126	0.384
37	-0.141	0.016	0.050	0.150	0.054
40	-1.591	0.296	1.262	2.053	0.756
43	-0.610	-0.022	1.134	1.288	0.438
44	-1.800	-0.146	-0.632	1.914	0.645
46	-0.662	0.204	-0.630	0.937	0.310
52	-0.375	0.093	-0.099	0.399	0.122
$\pm\sigma_0$	1.055	1.325	0.601	1.797	2.118

Tablo 5.14. Denetim noktalarının konum hataları

Etiket	X hatası (cm)	Y hatası (cm)	Z hatası (cm)	S Hatası (cm)	Görüntü (piksel)
2	0.210	-0.642	-0.435	0.803	0.299
4	0.497	1.738	-0.501	1.875	0.698
5	1.335	4.564	-0.750	4.814	1.019
10	0.716	-3.748	0.454	3.843	0.649
18	1.485	-1.597	0.342	2.207	0.333
3	-0.219	-0.112	-0.360	0.436	0.415
1	0.176	-1.228	-0.851	1.504	0.959
17	1.618	-0.292	0.119	1.649	0.407
41	-1.293	-1.276	-0.934	2.042	0.449
$\pm\sigma_0$	1.009	2.213	0.583	2.502	0.584

Nikon D300 kamera görüntüleri ile i89 Visual IMU GNSS cihazından elde edilen koordinat değerlerinin birlikte kullanıldığı 3B modelleme yaklaşımında i89 cihazının kamerasından daha iyi özelliklere sahip Nikon D300 görüntüleri esas alınmıştır. Böylece i89 cihazı GNSS tabanlı koordinat ölçülerinin birlikte kullanımının model doğruluğu üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Genel olarak, bölüm 4.6.3'te açıklandığı şekliyle, üretilen üç boyutlu modellerin doğruluk performanslarının birlikte analizi ve karşılaştırılması için Tablo 5.15 hazırlanmıştır.

Tablo 5.15. Modeller için hesaplanan toplam karesel ortalama hatalar

Toplam hata	Nikon D300	i89 Visual IMU	Nikon D300+ i89 Visual IMU
$\pm\sigma_0$	0.39 cm	2.73 cm	2.47 cm

Tablodan görüldüğü üzere çalışmada bağıl doğruluğu belirleyen ve yalnızca Nikon D300 kamerası kullanılarak elde edilen üç boyutlu modelin doğruluğu (iç doğruluk) en

yüksek değere (± 3.9 mm) sahiptir. i89 Visual IMU GNSS cihazı ile ölçülen nokta koordinatları referans alınarak oluşturulan üç boyutlu modelin doğruluğu (± 2.73 cm) beklenen sınırlar içindedir. i89 cihazı ile ölçülen koordinatların Nikon D300 görüntüleri ile birlikte kullanıldığı modelleme yaklaşımında doğruluk bir miktar iyileşmişse de (± 2.47 cm) belirgin bir doğruluk artışı gözlenmemiştir.

Tablo 5.16. Kontrol mesafe ölçüleri ile yapılan karşılaştırmalar

Uzunluklar	ÇŞM Ölçülen (m)	Nikon D300 (m)	i89 Visual IMU (m)	Nikon D300+ i89 Visual IMU (m)
Uz. 1	0.545	0.543	0.537	0.539
Uz. 2	0.450	0.452	0.444	0.449
Uz. 3	1.458	1.456	1.460	1.424
Uz. 4	0.970	0.969	0.927	0.944
Uz. 5	1.760	1.770	1.742	1.751
Uz. 6	1.465	1.470	1.480	1.452
		Farklar (m)	Farklar (m)	Farklar (m)
Uz. 1	0.545	-0.002	-0.008	-0.006
Uz. 2	0.450	0.002	-0.006	-0.001
Uz. 3	1.458	-0.002	0.002	-0.034
Uz. 4	0.970	-0.001	-0.043	-0.026
Uz. 5	1.760	0.010	-0.018	-0.009
Uz. 6	1.465	0.005	0.015	-0.013
Std. Sapma $\pm\sigma_0 = ([vv]/n)^{1/2}$ (m)		0.005	0.020	0.013
Ortlama $[v]/n$ (m)		0.002	-0.010	-0.015
Medyan (m)		0.001	-0.007	-0.011

Fotogrametrik modelden elde edilen geometrinin bağıl doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, çeşme seçilen karakteristik noktalar arasında çelik şerit metre ile kontrol mesafe ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Nesne üzerinde yapılan kontrol mesafe ölçmeleri ile üç ayrı kategoride fotogrametrik modelden hesaplanan uzunluklar, karşılaştırma yapmak üzere kullanılmıştır. Nikon D300 kamerası ve yerel nesne koordinatları ile üretilen 3B modelden hesaplanan uzunluklar, i89h Visual IMU ile ölçülen GNSS nesne koordinatları ile üretilen modelden elde edilen uzunluklar ve son olarak Nikon D300

kamera görüntüleri ile İ89 GNNS koordinatları birlikte kullanıldığında elde edilen modelden elde edilen uzunluklar aşağıda Tablo (5.16)'da karşılaştırılmıştır.

Modellerin iç (bağıl) doğruluğunun karşılaştırılabilmesi hedefiyle yapılan bu analiz sonucunda, nesne üzerinde ölçülen referans mesafeleri ve modellerden üretilen uzunluk değerleri ve farkları incelendiğinde; en düşük standart sapmayı ($\pm 4,7$ mm) veren dolayısıyla en hassas modelin Nikon D300 kamerası ile üretilen modelin olduğu görülmüştür. İ89 görsel ölçüm cihazı ile elde edilen modelden hesaplanan uzunluklarla yapılan karşılaştırmada en düşük doğruluğu veren modelin (standart sapma: $\pm 1,9$ cm) bu cihazla elde edildiği görülmüştür. İ89 ölçüm cihazı Nikon D300 ile elde edilen görüntülerle entegre edildiğinde $\pm 1,3$ cm'lik doğruluk değeri elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mühendislik, kültürel mirasın belgelenmesi ve uzun dönemli arşivleme amaçlı uygulamalarda üretilen 3B nesne modellerinin geometrik doğruluğunun ve güvenilirliğinin belirlenmesi, bu tür çalışmaların temel gereksinimleri arasında yer almaktadır. Farklı veri toplama ve değerlendirme yaklaşımları kullanılarak üretilen 3B modellerin metrik nitelikleri; kullanılan sensör türü, veri toplama geometrisi, YKN varlığı, kamera kalibrasyonu, yöneltme işlemleri ve çevresel koşullar gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

Görüntü tabanlı yöntemlerin düşük maliyetli donanım gereksinimleri, taşınabilirlik ve uygulama esnekliği gibi avantajları nedeniyle günümüzde yaygın biçimde kullanılması, bu yöntemlerle üretilen modellerin doğruluk ve hassasiyet açısından değerlendirilmesini daha da önemli hale getirmektedir. Bu tez çalışmasında, görüntü tabanlı 3B nesne modelleme süreçlerinde elde edilen sonuçların metrik doğruluk açısından değerlendirilmesi hedeflenmiş ve “gerçek ölçekli 3B model” üretimine yönelik farklı yaklaşımlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, tarihi bir yapı olarak Hünkar Çeşmesi’nin görüntü tabanlı yöntemlerle 3B modellenmesi sürecinde farklı sensör ve referans kombinasyonlarının model doğruluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında yalnızca Nikon D300 DSLR kamera görüntüleri kullanılarak üretilen model, yalnızca i89 Visual IMU GNSS cihazı ile elde edilen görüntü ve koordinatlara dayalı model ile Nikon D300 kamera görüntüleri ve i89 cihazı ile ölçülen yer kontrol noktalarının birlikte kullanıldığı model karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, farklı veri toplama stratejilerinin hem bağıl hem de mutlak doğruluk üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Yalnızca Nikon D300 kamerası kullanılarak ve yerel nesne koordinat sisteminde üretilen 3B model için gerçekleştirilen doğruluk analizleri sonucunda, nesne noktalarına ait toplam karesel ortalama hata değerinin $\pm 3,89$ mm olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, yüksek çözünürlüklü ticari kamera görüntüleri ile elde edilen modelin bağıl geometrik doğruluğunun yüksek olduğunu ve fotogrametrik açıdan tutarlı bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bu bulgu, literatürde yer alan ve ticari kameralarla milimetre

mertebesinde doğruluklara ulaşılabileceğini bildiren çalışmalarla uyumludur. I89 Visual IMU GNSS cihazı kullanılarak elde edilen görüntüler ve GNSS koordinatlarına dayalı olarak üretilen 3B modelin doğruluğu değerlendirildiğinde ise yaklaşık $\pm 2,73$ cm düzeyinde bir karesel ortalama hata değeri elde edilmiştir. Bu doğruluk seviyesi, cihazın kamera çözünürlüğü, görsel ölçüm algoritmaları ve GNSS tabanlı konumlandırma hassasiyeti dikkate alındığında beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. GNSS tabanlı görsel ölçüm yapabilen bu tür cihazların, özellikle hızlı veri toplama ve saha uygulamaları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu; ancak metrik doğruluk açısından yüksek çözünürlüklü fotogrametrik kameralara kıyasla sınırlı kaldığı görülmüştür. Nikon D300 kamera görüntüleri ile i89 Visual IMU GNSS cihazı kullanılarak ölçülen YKN'lerin birlikte kullanıldığı modelde ise yaklaşık $\pm 2,47$ cm düzeyinde bir doğruluk elde edilmiştir. Bu sonuç, GNSS tabanlı yer kontrol noktalarının modelin mutlak doğruluğunu belirlemede etkili olduğunu; buna karşılık, yüksek çözünürlüklü kamera görüntülerinin geometrik detayların daha iyi temsil edilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Bağıl doğruluğun değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen ÇŞM ile kontrol mesafe ölçmeleri sonucunda da benzer bir eğilim gözlenmiştir. Nikon D300 kamerası ile üretilen modelin en düşük standart sapma değerlerini ($\pm 4,7$ mm) verdiği, i89 Visual IMU GNSS cihazı ile üretilen modelin ise en yüksek sapma değerlerine ($\pm 1,9$ cm) sahip olduğu belirlenmiştir. Kamera görüntüleri ve GNSS koordinatlarının birlikte kullanıldığı modelde elde edilen mesafe farklarının ise bu iki yaklaşım arasında bir doğruluk düzeyi ($\pm 1,3$ cm) sunduğu görülmüştür. Mesafe bazlı geometrik doğruluk başarımlarının, koordinat temelli doğruluk analizleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ayrıca, ticari fotogrametrik yazılımlardan bağımsız olarak klasik fotogrametrik matematik modele dayalı hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar, yazılım çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Matematik modele dayalı hesaplamalar ile ticari yazılım sonuçları arasında elde edilen uyum, kullanılan teorik yaklaşımın ve uygulanan hesaplama sürecinin geçerliliğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; görüntü tabanlı 3B modelleme süreçlerinde kullanılan sensör türü, YKN varlığı ve veri kombinasyonlarının, üretilen modelin metrik

doğruluğu üzerinde belirleyici bir role sahip olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek çözünürlüklü ticari kameralarla elde edilen modellerin bağıl doğruluk açısından üstün olduğu, GNSS tabanlı görsel ölçüm cihazlarının ise mutlak doğruluk bakımından santimetre mertebesinde sonuçlar sunduğu görölmüştür. Bu tür cihazların daha yüksek çözünürlüklü görüntüleme sistemleri ve gelişmiş algoritmalarla desteklenmesi halinde, 3B model doğruluğunun artırılabilieceği değerlendirilmektedir. Elde edilen bulguların, benzer mühendislik uygulamaları ile kültürel mirasın belgelenmesine yönelik çalışmalara katkı sağlayacağı düşünölmektedir.



KAYNAKLAR

- Agisoft LLC. (2025). Agisoft Metashape User Manual.
- Alparslan, G., Doğar, M. (2015). Fotometrik Stereo Yöntemi ile Yüzey Normali Belirleme, *Politeknik Dergisi*, 18(3), 197–203.
- Barazzetti, L., Scaioni, M., Remondino, F. (2009). Combined Use of Photogrammetric and Computer Vision Techniques for Fully Automated and Accurate 3D Modeling of Terrestrial Objects, *Videometrics, Range Imaging, and Applications*, X, 183–194.
- CHCNAV. (2025a). i89 Compact Efficient Pocket-Sized Visual IMU-RTK.
- CHCNAV. (2025b). Portable GNSS Device Data Collector HCE600.
- Çelik, T., Yılmaz, V. (2017). Yapılandırılmış Işık Desenleriyle 3B Görüntüleme Yöntemleri, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 211–218.
- Doyduk, S. (2019). Uçayak Örenyeri'nin Yersel Lazer Tarayıcı Kullanılarak Modellenmesi, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(3), 22–30.
- 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.
- Erdoğan, S., Kabadayı, A., Akın, M. (2021). Kültürel Mirasın Fotogrametrik Yöntemle 3B Modellenmesi: Karabıyık Köprüsü Örneği, *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3(1), 23–27.
- Geng, J. (2011). Structured-Light 3D Surface Imaging: A Tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), 128–160.
- Hansard, M., Lee, S., Choi, O., Horaud, R. (2012). Time-of-Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications. Springer.
- Isgro, F., Odone, F., Verri, A. (2005). An Open System for 3D Data Acquisition from Multiple Sensor, *Proceedings of the Seventh International Workshop on Computer Architecture for Machine Perception (CAMP'05)*.
- Kabadayı, A. (2024). Mobil Cihazların Fotogrametri Tabanlı 3B Modellemedeki Potansiyeli Üzerine Bir Araştırma, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 71–77.
- Kak, A. C., Slaney, M. (2001). Principles of Computerized Tomographic Imaging. SIAM

- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. (2014). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter.
- Nikon Corporation. (2007). Nikon D300 Digital SLR Camera: Technical Specifications.
- Odumosu, J. O., Ajayi, O. G., Nnam, V. C., Ajayi, S. (2021). Achieving Close Range Photogrammetry with Non-Metric Mobile Phone Cameras, *Geodesy & Cartography*, 47(2), 71–79.
- Rahman, A. D. M., Cahyono, A. B. (2023). Analysis of 3-D Building Modeling Using Photogrammetric Software. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Seyrek, E. C., Narin, Ö. G., Eroğlu, M. M. (2022). Nokta Bulutu Üretiminde Cep Telefonu ve DSLR Fotoğraf Makinesi Kullanımının Araştırılması, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 23–29.
- Shan, J., Toth, C. K. (2018). Topographic Laser Ranging and Scanning. CRC Press.
- Szeliski, R. (2010). Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer.
- Üstün, A. (2022). LIDAR Teknolojisinin Kent Modelleme ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Entegrasyonu, *Mersin Üniversitesi LİDAR Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 13–25.
- Varady, T., Martin, R. R., Cox, J. (1997). Reverse Engineering of Geometric Models-An Introduction, *Computer-Aided Design*, 29(4), 255–268.
- Varol, B., Yiğit, A. Y., Ulvi, A. (2021). Kültürel Mirasın Dijital Ortamda 3 Boyutlu Arşivlenmesi: Maghoki-Attar Camii Sanal Model Örneği, *Turizm Akademik Dergisi*, 8(1), 181–191.
- Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., Wilkinson, B. E. (2014). Elements of Photogrammetry with Applications in GIS 4th Edition. McGraw-Hill.
- Woodham, R. J. (1980). Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images. *Optical Engineering*, 19(1).
- Yakar, M., Bilgi, S. (2019). Mobil Telefonlar Kullanılarak Elde Edilen 3 Boyutlu Modellerin Kültürel Mirasın Korunması Kapsamında Kullanılabilirliği: III. Ahmet Çeşmesi Örneği, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 25–29.
- Yavuzylmaz, A. (2013). Gebze Çeşmeleri, *Journal of International Social Research*, 6(25), 577-593.

- Yiğit, A. Y., Uysal, M. (2021). Tarihi Eserlerin 3B Modellenmesi ve Artırılmış Gerçeklik ile Görşelleştirilmesi, *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1032–1043.
- Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Maching Intelligence*, 22(11), 1330–1334.
- Zhou, L., Wu, G., Zuo, Y., Chen, X., Hu, H. (2024). A Comprehensive Review of Vision-Based 3D Reconstruction Methods, *Sensors*, 24, 2314.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Arslan, O., **Yağcıoğlu, K.** (2021). Fotogrametrik Niregiyle Üretilen Ortofoto Haritalar ile Koordinat Altyapısındaki Değişimlerin Analizi: İzmit Körfezi Örneğın, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 37-45.



ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Hızır Reis İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra, lise eğitimini Özel Atafen Lisesi'nde aldı. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü'ne başlayarak, 2011 yılında aynı bölümden mezun oldu. Mezuniyetinin ardından, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi bünyesinde 2013 senesinde başlayıp çalışmasına devam etmektedir. 2022 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Jeoinformasyon Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başlamış olup, programını tamamlama aşamasındadır.

