

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İHA VE YERSEL LAZER TARAMA VERİLERİNİN
3B FÜZYONU İLE SANAL GERÇEKLİK
PERFORMANS ARTIRIMI

MUHAMMED MADAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN: PROF. DR. Umut GÜNEŞ SEFERCİK

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İHA VE YERSEL LAZER TARAMA VERİLERİNİN
3B FÜZYONU İLE SANAL GERÇEKLIK
PERFORMANS ARTIRIMI

MUHAMMED MADAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
PROGRAMI

DANIŞMAN: PROF. DR. Umut GÜNEŞ SEFERCİK

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

VIRTUAL REALITY PERFORMANCE
ENHANCEMENT WITH 3D FUSION OF UAV AND
TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA

MUHAMMED MADAK

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
GEODESY AND GEOGRAPHICAL INFORMATION
TECHNOLOGIES PROGRAM

ADVISOR: PROF. DR. Umut GÜNEŞ SEFERCİK

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 22/07/2024 tarih ve 2024/39 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Muhammed MADAK'ın tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalında Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK

ÜYE

: Prof. Dr. Eray CAN

ÜYE

: Doç. Dr. İsmail ÇÖLKESEN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

*Eşim Gözde ve
Tüm Ailem'e*

ÖZET

Dünya üzerindeki objelerin dijital ikizlerinin oluşturulması günümüzde popüler bir konu haline gelmiştir. Optik insansız hava aracı (İHA) gibi modern sistemler kullanılarak elde edilen hava fotoğrafları yardımıyla üretilen yüksek kalitedeki ve hassas 3B doku giydirilmiş katı modeller fiziksel gerçekliğin dijital ortamda gösterilmesini sağlamaktadır. Optik İHA sistemleri, 3B hassas model üretiminde sıklıkla kullanılsa da üretim sürecinde çeşitli problemler ile karşılaşılabilir. Pasif uzaktan algılama prensibi ile çalışmalarından dolayı optik İHA'ların yoğun orman alanlarında, ağaç altı bölgelerde ve köprü, viyadük, alt geçit gibi derinlikli ve alt bölümleri hava fotoğraflarında yeterince tasvir edilemeyen objelerin bulunduğu sorunlu alanlarda 3B modelleme performansları düşülebilmektedir. Bu tez kapsamında, optik İHA'nın 3B hassas model üretimindeki problemlerinin minimize edilmesi için farklı tekniklerin füzyonuna dayalı bir çözüm geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, yukarıda bahsi geçen sorunlu alanlarda elde edilen optik İHA verileri ile sahadan toplanan yersel lazer tarama verilerinin yüksek geometrik doğruluk sağlanarak birleştirilmesi ve hem geometrik hem de spektral anlamda gerçeğe en yakın 3B dijital ikiz üretimi için bir metodoloji geliştirilmiştir. Uygulanan metodoloji ile optik İHA verileri ile dijital ikizinin elde edilmesi mümkün olmayan objelerin dijital ikizleri yüksek doğrulukla üretilebilmiştir. Son olarak, çalışma alanında elde edilen yüksek doğruluklu dijital ikiz sanal gerçeklik ortamına entegre edilmiştir. Bu entegrasyon neticesinde yüksek kalitede bütünlük ve kesintisiz bir sanal tur oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İHA, Yersel Lazer Tarama, Veri Füzyonu, Dijital İkiz, Sanal Gerçeklik

ABSTRACT

Creating digital twins of objects on Earth has become a popular topic today. High quality and precise 3D textured solid models produced with the help of aerial photos obtained using modern systems such as optical unmanned aerial vehicles (UAVs) enable the representation of physical reality in a digital environment. Although optical UAV systems are frequently used in the production of 3D precise models, various problems can be encountered during the production process. Due to their passive remote sensing principle, the 3D modeling performance of optical UAVs may decrease in dense forest areas, under-tree areas and problematic areas where objects with depth and sub-sections such as bridges, viaducts, and underpasses cannot be adequately depicted in aerial photos. Within the scope of this thesis, it is aimed to develop a solution based on the fusion of different techniques in order to minimize the problems of optical UAV in the production of 3D precise models. In this context, a methodology has been developed for the combination of optical UAV data obtained in the above-mentioned problematic areas with terrestrial laser scanning data collected from the field by providing high geometric accuracy and for the production of 3D digital twins that are closest to reality in both geometric and spectral terms. With the applied methodology, digital twins of objects that could not be obtained with optical UAV data could be produced with high accuracy. Finally, the high-accuracy digital twin obtained in the study area was integrated into the virtual reality environment. As a result of this integration, a high-quality integrated and uninterrupted virtual tour was created.

Keywords: UAV, Terrestrial Laser Scanning, Data Fusion, Digital Twin, Virtual Reality

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan tez danışmanım Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK hocam'a,

Tez sürecinde gerçekleőtirdiđim arazi ve ofis çalıőmalarıma katkı sağlayan Arő. Gör. Mertcan NAZAR'a,

Tez çalıőmamda kullanmıő olduğum yersel lazer tarama cihazını ve bilgisayar ekipmanlarını sağlayan GİZİL ENERJİ A. Ő.'ye,

Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan anneme,

Teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon	1
1.2. Çalışmanın Yapısı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. ÇALIŞMA ALANI ve KULLANILAN MATERYALLER	7
4. METODOLOJİ	11
4.1. İHA ile 3B Dijital İkiz Üretimi	11
4.1.1. İHA ile Hava Fotoğrafı Alımı	11
4.1.2. Geometrik Düzeltme	14
4.1.3. Nokta bulutu ve 3B Dijital İkiz Üretimleri	17
4.2. TLS ile 3B Dijital İkiz Üretimi	19
4.2.1. Veri Toplama	20
4.2.2. Veri İşleme	22
4.3. İHA ve TLS Verilerinin Füzyonu ile Hassas DT Üretimi	28
4.4. Sanal Tur Oluşturulması	30
5. UYGULAMA VE BULGULAR	32
6. SONUÇLAR	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	41
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	42

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

3B	: Üç boyutlu
ALS	: Hava Kaynaklı Lazer Tarama
BIM	: Yapı Bilgi Modellemesi
CityGML	: City Geography Markup Language
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
DAM	: Dijital Arazi Modeli
DT	: Dijital ikiz
DYM	: Dijital Yüzey Modeli
f	: Odak Uzaklığı
FOV	: Görüş alanı
GNSS	: Global Navigasyon Uydu Sistemleri
GSD	: Yer Örnekleme Aralığı
H	: Uçuş Yüksekliği
HDR	: Yüksek dinamik aralık
IMU	: Atalet ölçüm birimi
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LoD	: Ayrıntı Düzeyi
Metaverse	: Sanal Evren
Pix	: CMOS sensör piksel büyüklüğü
TLS	: Yersel Lazer Tarama
VIS	: Görsel Eylemsizlik Sistemi
VR	: Sanal Gerçeklik
YKN	: Yer Kontrol Noktası

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1: Çalışma alanı	7
Şekil 3.2: DJI Phantom IV Pro İHA bileşenleri	8
Şekil 3.2: DJI Phantom IV Pro İHA uzaktan kumanda bileşenleri	8
Şekil 4.1: Geliştirilen metodoloji	11
Şekil 4.2: Kullanılan Pix4D Capture uçuş modları örneği	12
Şekil 4.3: GTÜ Yerleşkesinde uygulanan İHA uçuş modları ve rotaları: (a) kuzey kısmı, (b) güney kısmı	13
Şekil 4.4: İHA hava fotoğrafı alım geometrisi (FOV: görüş alanı)	14
Şekil 4.5: SfM algoritması dairesel eşleştirme örneği	15
Şekil 4.6: Maskeleme işlemi örneği: (a) maskeleme öncesi, (b) maskeleme sonrası	16
Şekil 4.7: Tesis edilmiş bir YKN'nin hava fotoğraflarında görünümü	17
Şekil 4.8: Filtreleme etkisi: (üst) filtreleme öncesi, (alt) filtreleme sonrası	18
Şekil 4.9: Örnek bir bina üzerinde (a) doku giydirme öncesi ve (b) doku giydirme sonrası 3B DT görselleri	19
Şekil 4.10: Marmaray alt geçidi örnek tarama verisi	21
Şekil 4.11: Komşu istasyonlardan TLS nokta bulutu çiftlerinin seçimi	22
Şekil 4.12: TLS nokta bulutu çiftlerinin ön-birleştirilmiş (üst) ve düzeltilmiş (alt) halleri	23
Şekil 4.13: Marmaray alt geçidi örneği üzerinde iteratif birleştirme işlemi aşamaları ve sonucu.	24
Şekil 4.14: Tarama alanında tespit edilen hatalı hizalamaya bağlı örnek bir geometrik problem ve problemin giderilmiş hali	25
Şekil 4.15: Tarama alanında tespit edilen bir nesnenin manuel filtrelenmesi	26
Şekil 4.16: Geometrik kalite kontrolleri ve filtreleme işlemleri tamamlanmış TLS nihai nokta bulutlarından örnekler	27
Şekil 4.17: Bağlama noktalarının konumları	29
Şekil 4.18: Sanal tura 3B nesne entegrasyonu ile gerçeklik artırımı	31
Şekil 5.1: GTÜ kampüs alanında İHA verilerinden elde edilmiş (a) 3B seyrek nokta bulutu, (b) yoğun nokta bulutu, (c) doku giydirilmiş DT	32
Şekil 5.2: Geometrik yöneltme ve filtreleme işlemleri tamamlanmış nihai İHA (üst) ve TLS (alt) nokta bulutları: Marmaray alt geçidi örneği	34
Şekil 5.3: İHA DT (üst) ve İHA ve TLS füzyonu sonucu DT (alt): Marmaray alt geçidi örneği	35
Şekil 5.4: GTÜ kampüs alanında Unity oyun motoru ile oluşturulmuş sanal turdan bazı kesitler	36

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: DJI Phantom IV İHA ve yardımcı ekipman teknik özellikleri	9
Tablo 3.2: Leica RTC360 yersel lazer tarayıcı teknik özellikleri	10
Tablo 4.1: Bağlama noktalarının bağımsız ve toplam RMSE değerleri	29

1. GİRİŞ

1712 yılında buhar makinesinin icadına dayanan I. endüstri devrimi ardından dünyada gerçekleşmeye başlayan önemli teknolojik gelişmeler günümüze dek hız kesmemiş, montaj bandının icadı sayesinde gerçekleşen iş bölümüne dayalı seri üretim 1840 yılında II. endüstri devrimini, dijital teknoloji ve internet kavramlarının ortaya çıkışı ve gelişmeye başlaması 1950'li yıllarda III. endüstri devrimini ve eş zamanlı olarak birbiriyle entegre çalışan akıllı sistemler sayesinde kendi kendini organize edebilen ortamlar ise 2011 yılında endüstri 4.0 devrimini beraberinde getirmiştir [BMBF, 2015a, b; Derya, 2018].

İlk kez Almanya'da ortaya atılan ve adı baştan devrim olarak konulan endüstri 4.0 çağında dünyamız tam bir dijitalleşmeye evrilmiş ve akıllı nesnelere, akıllı kentler, sanal ve artırılmış gerçeklik ve nesnelere interneti gibi pek çok kavram hayatımıza dahil olmuştur. Sanal ve artırılmış gerçeklik cihazları desteğiyle üç boyutlu (3B) sanal ortamlar oluşturulması ile fiziksel dünyanın ötesine geçerek yaratılan sanal evren anlamına gelen Metaverse kavramı da endüstri 4.0 devriminin hayatımıza kattığı yaygın olarak kullanılan bir terimdir [Ball, 2022]. Metaverse oluşturulmasında en önde gelen konu, sanal evrende objelerin geometrik ve spektral tasvirlerini sunan dijital ikizlerinin (DT) oluşturulmasıdır.

1.1. Motivasyon

Günümüzde DT, her geçen gün önemini artıran bir kavram olarak karşımıza çıkmakta ve başta haritacılık olmak üzere tarımdan arkeolojiye, ormancılıktan milli savunmaya kadar pek alanda farklı tür uygulamalar için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yoğun talep, farklı DT üretim tekniklerinin de ortaya çıkmasını tetiklemektedir. Fiziki dünyanın ötesinde dijital ortamda gerçekleştirilen sanal gezintilerin gerçeğe en yakın his uyandırabilmesi ya da objeler üzerinde en doğru metrik ölçümlerin yapılabilmesi ancak yüksek kalitede DT'lerin üretimi ve sanal ortama entegrasyonu ile mümkündür.

DT üretimleri, yer, hava ve uzay kaynaklı olmak üzere farklı haritacılık teknolojilerinden faydalanmak suretiyle gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, her

teknik kendine göre avantajları yanında kalite sınırlayıcı dezavantajları da bulunmaktadır. Bir teknik belli bir konuda yüksek performans koyarken diğeri bu teknik sınırlı kaldığı konularda yüksek performans koyabilmektedir. Bu tez çalışmasının ana motivasyonu, insansız hava aracı (İHA) ve yersel lazer tarama (TLS) teknolojilerinin avantajlarını bir araya getiren bir füzyon (birleştirme) yaklaşımı temelinde bir metodoloji geliştirerek yüksek doğrulukta obje tasvir potansiyeline sahip DT'lerin üretimini sağlamak ve üretilen bu DT'lerden faydalanarak yüksek kalitede sanal tur oluşturulmasıdır. Füzyon, son yıllarda tekil teknolojilerin sınırlamalarını ortadan kaldırma amacıyla sıkça tercih edilen bilimsel gerçekliği ispatlanmış önemli bir yaklaşımdır [Joshi vd., 2016; Sefercik vd., 2018; Gupta ve Fernando, 2022; Roggero ve Diara, 2024].

1.2. Çalışmanın Yapısı

Tez çalışması; giriş bölümü ardından literatür araştırması, çalışma alanı ve kullanılan materyaller, metodoloji, uygulama ve bulgular ve sonuçlar olmak üzere altı ana başlıktan oluşmaktadır. Literatür araştırması bölümünde, DT üretimi ve sanal gerçeklik entegrasyonunda kullanılan teknolojiler ve bugüne kadar gerçekleştirilmiş bilimsel çalışmalar ele alınmış, bu tez çalışmasının literatüre vereceği katkılar açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, çalışmanın gerçekleştirildiği Gebze Teknik Üniversitesi Kampüsü ve kullanılan İHA, yersel lazer tarayıcı ve yardımcı teknik ekipmanlara ilişkin bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, en yüksek kalitede DT ve sanal tur oluşturulması için geliştirilen metodoloji gösterilmiştir. Beşinci bölümde, gerçekleştirilen uygulamaya yer verilmiş ve elde edilen bulgular sunulmuştur. Son olarak altıncı bölümde, tez çalışmasının sonuçları ve gelecek hedefleri ele alınmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yaşanan teknolojik gelişmeler ve modern teknolojik sistemlerin kullanılması ile beraber DT çalışmalarında bir artış yaşanmıştır. Fiziksel gerçekliğin dijital ortamda sanal bir modelinin oluşturulması amacıyla çeşitli DT çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bilimsel amaçlı gerçekleştirilen DT çalışmaları dışında eğitim ve ticari amaçlı çalışmalar da gerçekleştirilmektedir. Özellikle yapı bilgi modellemesi (BIM) kullanılarak DT çalışmaları gerçekleştirilmekte ve üretilen 3B modeller üzerinden çeşitli amaçlar doğrultusunda bilgiler elde edilebilmektedir. Yüksek çözünürlüklü hava fotoğraflarının kısa zamanda ve düşük maliyetle elde edilmesine olanak tanıyan İHA teknolojisi DT konulu araştırmalarda sıklıkla kullanılan araçlardan biri olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun dışında yüksek hassasiyete sahip 3B nokta bulutlarının oluşturulmasına olanak veren TLS teknolojisi özellikle yüksek çözünürlüğe sahip doku giydirilmiş 3B modellerin üretilmesinde kullanılmaktadır. İHA ve TLS teknikleri özellikle 3B modelleme performansı açısından çeşitli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. İHA sistemleri pasif uzaktan algılama prensibine bağlı olarak çalıştıklarından bu sistemler kullanılarak üstü kapalı objeler ve orman örtüsünün alt kısmında bulunan objelerden bilgi elde edilememektedir. Öte yandan TLS sistemleri aktif uzaktan algılama sistemine bağlı olarak çalıştığı için ilgili alanlardan bilgi alımına imkan tanımaktadır. Fakat yersel bir sistem olması nedeni ile TLS ile yüksek düşey objelerin üst kısımlarından bilgi elde edilmesi mümkün olmamaktadır.

Bilimsel literatürde DT tabanlı çalışmalar incelendiğinde İHA ve TLS tekniklerinin farklı amaçlarla kullanıldığı birçok çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları kültürel mirasın belgelenmesi [**Shabani vd., 2022**], arkeolojik araştırmalar [**Tan vd., 2022**], köprü vb. mühendislik yapılarının incelenmesi [**Mohammadi vd., 2021**], City Geography Markup Language (CityGML) [Open Geospatial Consortium, 2021] gibi standartlarda dünya üzerinde bulunan objelerin 3B olarak modellenmesi [**Van vd., 2023**], ağaç topluluklarının modellenmesi [**Chen vd., 2024**], sanal gerçeklik entegrasyonu [**Sefercik vd., 2022**] ve afet sonrası yapıların değerlendirilmesi [**Levine vd., 2022**] olarak sıralanabilir. **Mohammadi vd. [2021]** İHA ve TLS nokta bulutlarının DT üretiminde kalite ve geometrik doğruluk açısından değerlendirilmesi

amacıyla bir köprüye ait kapsamlı bir vaka çalışması gerçekleştirmiş ve bir metodoloji sunmuşlardır. Üretilen nokta bulutları nokta dağılımı, gürültü seviyesi, verinin bütünlüğü, yüzey sapması ve geometrik doğruluk açısından değerlendirilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak İHA nokta bulutu ile karşılaştırıldığında TLS nokta bulutu daha yüksek nokta yoğunluğu, referans yersel ölçümlerle daha kabul edilebilir bir uyum ve normal düzeyde gürültü göstermiştir. Fakat TLS tekniğinin yüksek uygulama süresi, yüksek donanım maliyeti ve kısıtlı erişim gibi dezavantajları olduğu belirtilerek bunların İHA tekniği ile giderilebileceği vurgulanmıştır.

Levine ve Spencer Jr [2022] deprem sonrası bina durumunun değerlendirilmesi amacıyla İHA verisini, binaya ait bileşenlerin tanımlanmasını ve bina hasar değerlendirmesini BIM tabanlı bir yaklaşım ile entegre eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu doğrultuda herhangi bir hasar tespit edildiğinde tüm görüntü pikselleri GrabCut-tabanlı bir segmentasyon yöntemi ile belirli bir BIM bileşenine aktarılacak ve yapı dışındaki hasarın belirli BIM bileşenleri ile ilişkilendirilmesi için 3B nokta bulutu tabanlı bir değişim analizi gerçekleştirilecektir. Sonuç olarak incelenen hasar BIM bileşenlerine bağlanarak hasarın her bileşenin bilinen tasarımı ve beklenen deprem performansı bağlamında değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. **Sefercik vd. [2022]** Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) kampüsüne ait bir sanal gerçeklik (VR) tur uygulaması oluşturmak amaçlamışlardır. Bu bağlamda ≤ 2.2 cm yer örnekleme aralığında (GSD) elde edilen İHA hava fotoğrafları kullanılarak ± 2 cm (~ 0.9 piksel) geometrik doğruluğunda üretilen nokta bulutları ile kampüs içerisindeki binaların 3B modelleri üretilmiş ve bu modeller Unity oyun motoruna aktarılmıştır. Unity oyun motorunda oklüzyon ayıklama ve alan alt bölüm oluşturma optimizasyon algoritmaları uygulanarak uygulama performansı artırılmış, görsel olarak detaylandırmak amacıyla ağaç, aydınlatma direği, bank ve çardak gibi hazır 3B obje modeller eklenmiş, binalara ait çeşitli bilgiler içeren interaktif bilgi panelleri yerleştirilmiş ve gerçekçi bir VR deneyimi sağlamak amacıyla birinci şahıs bir oyuncu bileşeni eklenmiştir.

TLS dışında mobil lazer tarama ve İHA tabanlı lazer tarama teknikleri ile elde edilen nokta bulutları kullanılarak DT üretimi çalışmaları gerçekleştirilmektedir. **Chen vd. [2024]** büyük ölçekli kentsel ağaç topluluklarının 3B modellenmesi için mobil lazer tarama ve İHA tabanlı lazer tarama kullanılarak elde edilen nokta bulutlarını

kullanmışlardır. Elde edilen nokta bulutlarından derin öğrenme yöntemi ile ağaçlara ait noktalar çıkarılarak ağaç yapısına ait parametrelerin kestirimi gerçekleştirilmiş ve 3B dijital ağaç modelleri üretilmiştir. Sonuç olarak uygulanan metodoloji ile büyük ölçekli ağaç modelleme ve hafif model temsili bakımından 96% başarımla elde edilmiştir.

İHA ve TLS teknikleri kullanılarak elde edilen nokta bulutlarının füzyonu gerçekleştirilerek iki tekniğinde sunduğu avantajlardan yararlanılıp hassas 3B modeller üretilmektedir. **Shabani vd. [2022]** kültürel mirasın belgelenmesi ve korunması amacıyla yersel fotogrametri ve İHA fotogrametrisi kullanılarak elde edilen nokta bulutlarının TLS tekniği kullanılarak elde edilen nokta bulutları ile füzyon edilerek 3B model üretimini amaçlamışlardır. Füzyon işlemi öncesinde nokta bulutlarının georeferanslama işlemi gerçekleştirilmiş ve sonrasında üretilen modelde ortaya çıkabilecek boşlukların giderilmesi amacıyla nokta bulutları füzyon edilmiştir. **Tan vd. [2022]** Çin'in Sichuna bölgesinde bulunan Xuanluo Hall kültürel mirasının arkeolojik açıdan araştırılması amacıyla İHA ve TLS nokta bulutlarının füzyonunu ile bir BIM tabanlı DT üretimini amaçlamışlardır. İHA ve TLS nokta bulutları dışında yersel olarak elde edilen fotoğraflar ve panoramik görüntülerden yararlanarak bir BIM tabanlı DT üretilmiş ve kompleks arkeolojik türlerin sınıflandırılması ve incelenmesi amacıyla BIM tabanlı DT'ye ait semantik bilgilerin açıklaması gerçekleştirilmiştir. **Van vd. [2023]** madencilik endüstriyel yapılarının CityGML standartlarında 3B olarak modellenmesi için İHA ve TLS tekniklerinden elde edilen nokta bulutlarından yararlanmışlardır. İHA verisi cm doğruluğunda elde edildiğinden mutlak konumsal doğruluk gereksinimi açısından İHA verisi kullanılarak CityGML standartlarına göre tüm ayrıntı düzeylerinin (LoD) oluşturulması sağlanabilmektedir. LoD 2 modellerinin oluşturulması için İHA nokta bulutu kullanılmış ve TLS nokta bulutu ile karşılaştırıldığında özellikle bina cepheleri ve çatılarında bu iki nokta bulutunun yüksek uyuma sahip olduğu görülmüştür. LoD 3 modellerin oluşturulmasında ise İHA ve TLS nokta bulutları füzyon edilerek kullanılmış ve daha yüksek düzeyde detay ve doğruluk elde edilmiştir.

TLS, İHA ve yersel fotogrametri verileri kullanılarak bir tarihi mimari envanterin oluşturulması amacıyla **Sobura vd. [2023]** Polonya'da bulunan tarihi bir kiliseye ait bir 3B model oluşturmayı amaçlamışlardır. Takimetri tekniği ile ölçülen yer kontrol noktaları (YKN) kullanılarak üretilen 3B modele ait karesel ortalama hata 1.7 cm

olarak elde edilirken TLS tekniği ile ölçülen YKN'ler kullanılarak üretilen 3B modele ait karesel ortalama hata 2.5 cm olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak TLS tekniği, İHA ve TLS verilerinin füzyonu ve dini yapıların 3B kartometrik modellerinin oluşturulması bakımından olumlu olarak değerlendirilmiştir.

İncelenen çalışmaların bir kısmında İHA ve TLS tekniklerinin ayrı ayrı kullanıldığı bir kısmında ise birlikte kullanıldığı gözlemlenmiştir. İHA tekniğinin kısa zamanda ve daha az maliyet ile nokta bulutu verisi sağladığı görülürken TLS tekniğinin daha yüksek doğrulukta ve daha hassas nokta bulutu verisi sunduğu görülmüştür. İki tekniğin birlikte kullanılması ile beraber daha yüksek çözünürlükte ve daha yüksek doğrulukta nokta bulutları üretilmesi mümkün olmakla beraber daha az boşluğa sahip, yüksek detay barındıran ve hassas DT'lerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

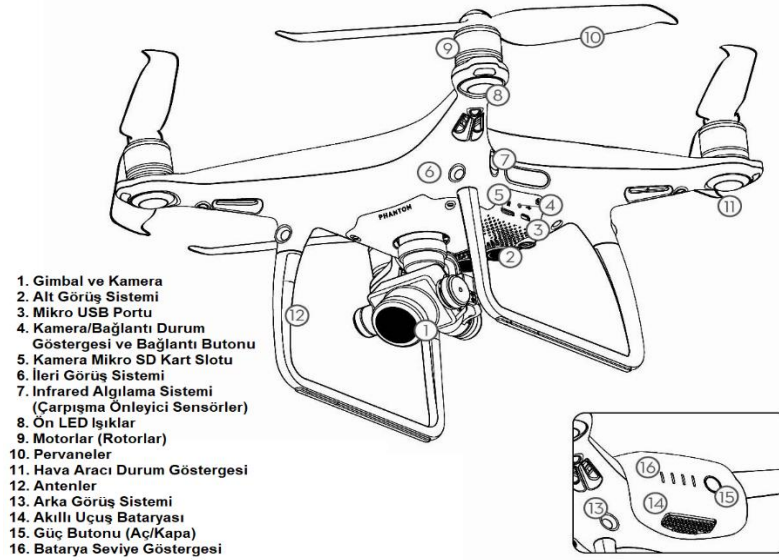
3. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN MATERYALLER

Tez çalışması, Kocaeli ve İstanbul illerinin sınır kesişim bölgesinde yer alan Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) merkez yerleşkesidir. Yerleşke, yaklaşık düz bir topoğrafyaya sahip olup Marmara Denizi'ne komşu ve ortalama 10 m ortometrik yüksekliğe sahiptir. Çalışmada, orta bölümünden Marmaray demiryolu hattı geçen ve birçok farklı türde arazi sınıfına sahip yaklaşık 2.5 km²'lik kampüs alanının tamamında alınan İHA verileri ile alt kısımlarının İHA verileri ile modellenmesinin mümkün olmadığı yoğun ağaç, ağaç altı bisiklet yolu ve demiryolu alt geçiti gibi alanlarda TLS verilerinin alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın yapıldığı GTÜ kampüs alanı Şekil 3.1'de sunulmuştur.

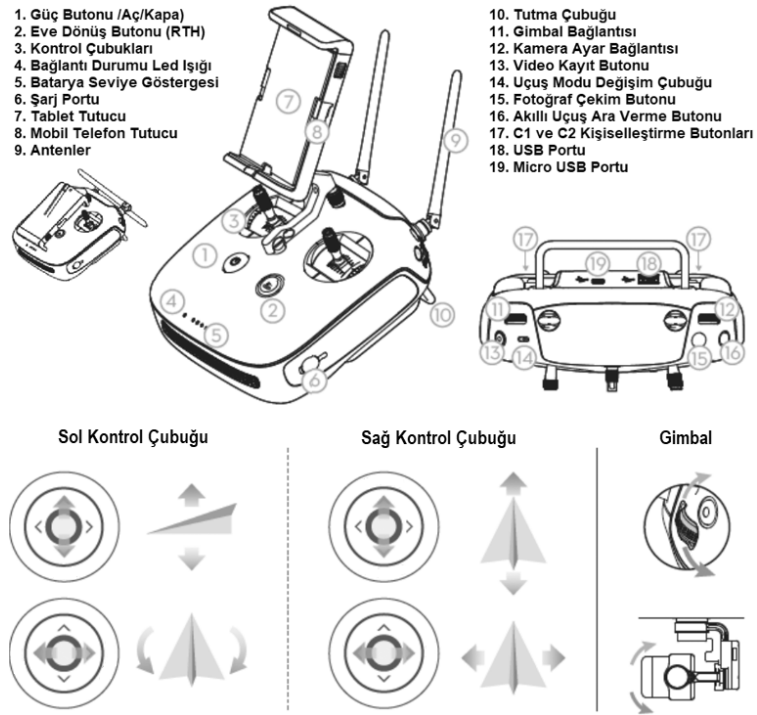


Şekil 3.1: Çalışma alanı.

Çalışmada, İHA uçşları DJI Phantom IV Pro kırmızı-yeşil-mavi (RGB) tek kamera konili cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2 ve 3.3 DJI Phantom IV Pro ve uzaktan kumandasının yapısını ve bileşenlerine ait işlevleri göstermektedir.





Şekil 3.2: DJI Phantom IV Pro İHA bileşenleri.



Şekil 3.3: DJI Phantom IV Pro İHA uzaktan kumanda bileşenleri.


YKN ölçümleri CHC-i80 GNSS (Global Navigasyon Uydu Sistemleri) alıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.1 kullanılan İHA ve yardımcı ekipmanların teknik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3.1: DJI Phantom IV İHA ve yardımcı ekipman teknik özellikleri.

 DJI Phantom IV Pro V2 + Sony Exmor Kamera		 CHC-i80 GNSS alıcısı + Mobil YKN	
Özellik	Değer	Özellik	Değer
Kamera	4K, HD, 1080p, 1" effective pixels 20 MP	GNSS teknolojisi	GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, SBAS, NavIC
Gimbal	3-axis (pitch, roll, yaw)	İşletim sistemi	Linux
Uçuş süresi	Max. 30 minutes	Çalışma modları	Static, VRS RTK, UHF RTK, all surveying modes
Ağırlık	1,375 g	RTK konum doğruluğu	± 0.8 cm H, ± 1.5 cm V with initialization reliability >99.9%
Hız	Max 20 m/s in S-mode	Modem - Bluetooth	4G, 3G, GSM – V4
Rüzgar hızı dayanımı	Maksimum 10 m/s	Pil	Dual; Statik 10 saate kadar, hücresel alım 9 saate kadar, UHF alma/gönderme 6 saate kadar
Operasyonel ısı	0° to 40°C	Network-RTK	Mevcut
Konumlama modülü	GPS/GLONASS dual	Dahili bellek	32 GB
Doğruluk	± 0.1 m V, ± 0.5 m H (Görüş) ± 0.3 m V, ± 1.5 m H (GNSS)	YKN	0.25 m \times 1 m, polikarbon

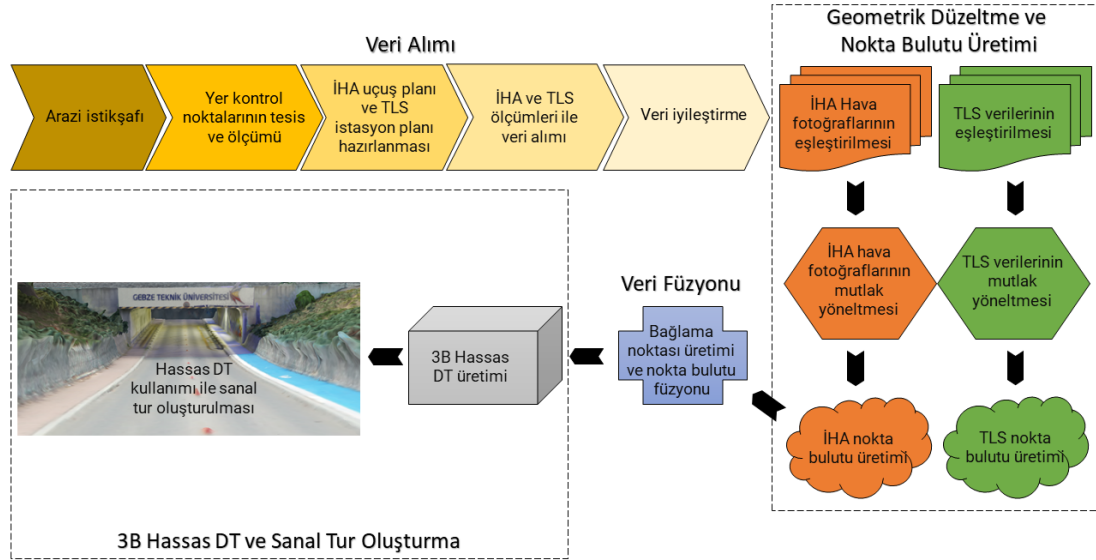
Çalışmada, TLS ham nokta bulutlarının ölçümlerinde ise Leica RTC360 yersel lazer tarayıcı kullanılmıştır. Taramalarda, tarama çözünürlüğü hassas DT üretiminde kullanılacak olması nedeniyle maksimum 12 mm olarak belirlenmiştir. Tablo 3.2 kullanılan tarayıcının önemli teknik özelliklerini yansıtmaktadır.

Tablo 3.2: Leica RTC360 yersel lazer tarayıcı teknik özellikleri.

Özellik	Değer
	
Genel	3D lazer tarayıcı Yüksek hızlı 3D lazer tarayıcı entegre HDR küresel görüntüleme sistemi ve gerçek anlamda Görsel Atalet Sistemi (VIS) zaman kaydı
Verim	Tam kubbe taraması için veri toplama <2 dakika ve 6 mm / 10 m'de küresel HDR Gerçek zamanlı kayıt Otomatik nokta bulutu hizalaması tarayıcının gerçek zamanlı takibine dayalı kurulumlar arasındaki hareket Videoyla geliştirilmiş atalet ölçüm ünitesiyle VIS Çift tarama ve hareketli nesnelerin otomatik kaldırılması
Tarama	Mesafe ölçümü Yüksek hızlı, yüksek dinamik uçuş süresi Dalga Formu Sayısallaştırma ile geliştirildi (WFD teknolojisi) Lazer sınıfı 1 (uygun olarak IEC 60825-1:2014), 1550 nm Görüş alanı 360° (yatay) / 300° (dikey) Menzil Min. 0,5 - 130 m'ye kadar 2.000.000 pts/sn'ye kadar hız Çözünürlük Kullanıcı tarafından seçilebilen 3 ayar (3/6/12 mm/ 10m) Doğruluk: Açısal doğruluk 18" Aralık doğruluğu 1,0 mm + 10 ppm 3 boyutlu nokta doğruluğu 1,9 mm / 10 m 2,9 mm / 20 m 5,3 mm / 40 m Menzil gürültüsü: 10 m'de 0,4 mm, 20 m'de 0,5 mm
Görüntüleme	Kamera 36 MP 3 kameralı sistem çekimleri Kalibre edilmiş 360° x için 432 MPx ham veri 300° küresel görüntü Tam küresel HDR görüntüsü için 1 dakikalık hız HDR Otomatik, 5 braket
Navigasyon sensörleri	Videoyla geliştirilmiş Görsel Atalet Sistemi Atalet ölçümü hareketlerini takip eden sistem Gerçek zamanlı kurulum Eğim IMU tabanlı, Doğruluk: Her eğim için 3' Ek sensörler: Altimetre, Pusula, GNSS
Operasyon	Tarayıcıda Parmak dokunuşuyla dokunmatik ekran kontrolü Tam renkli WVGA grafik ekran 480 x 800 piksel Mobil cihazlar iPad veya iPad için Leica Cyclone FIELD 360 uygulaması Kablosuz Tümlşik kablosuz LAN (802.11 b/g/n) Veri depolama: 256 GB değiştirilebilir USB 3.0 flash sürücü
Tasarım & fiziksel	Muhafaza Alüminyum çerçeve ve yan kapaklar Boyutlar 120 mm x 240 mm x 230 mm / 4,7" x 9,4" x 9,1" Ağırlık 5,35 kg / 11,7 lbs, nominal (olmadan piller) Montaj mekanizması 5/8" saplamaya hızlı montaj Hafif tripod / tribrah Adaptör / anket tribrah adaptörü
Güç	2 adet dahili Li-İyon pil Süre: Genellikle 4 saate kadar Ağırlık: Pil başına 340 g Harici Leica GEV282 AC adaptörü
Çevresel	Çalışma sıcaklığı -5° ila +40°C Depolama sıcaklığı -40° ila +70°C Toz/Nem, Katı parçacık/sıvı girişine karşı koruma

4. METODOLOJİ

Tez kapsamında geliştirilen metodoloji Şekil 4.1’de yer almaktadır. Metodolojinin ana adımları i) İHA ve TLS verilerinin alımı, ii) verilerin geometrik düzeltmeleri ve nokta bulutu üretimleri, iii) veri füzyonu ve iv) 3B Hassas DT ve sanal tur oluşturulmasıdır.



Şekil 4.1: Geliştirilen metodoloji.

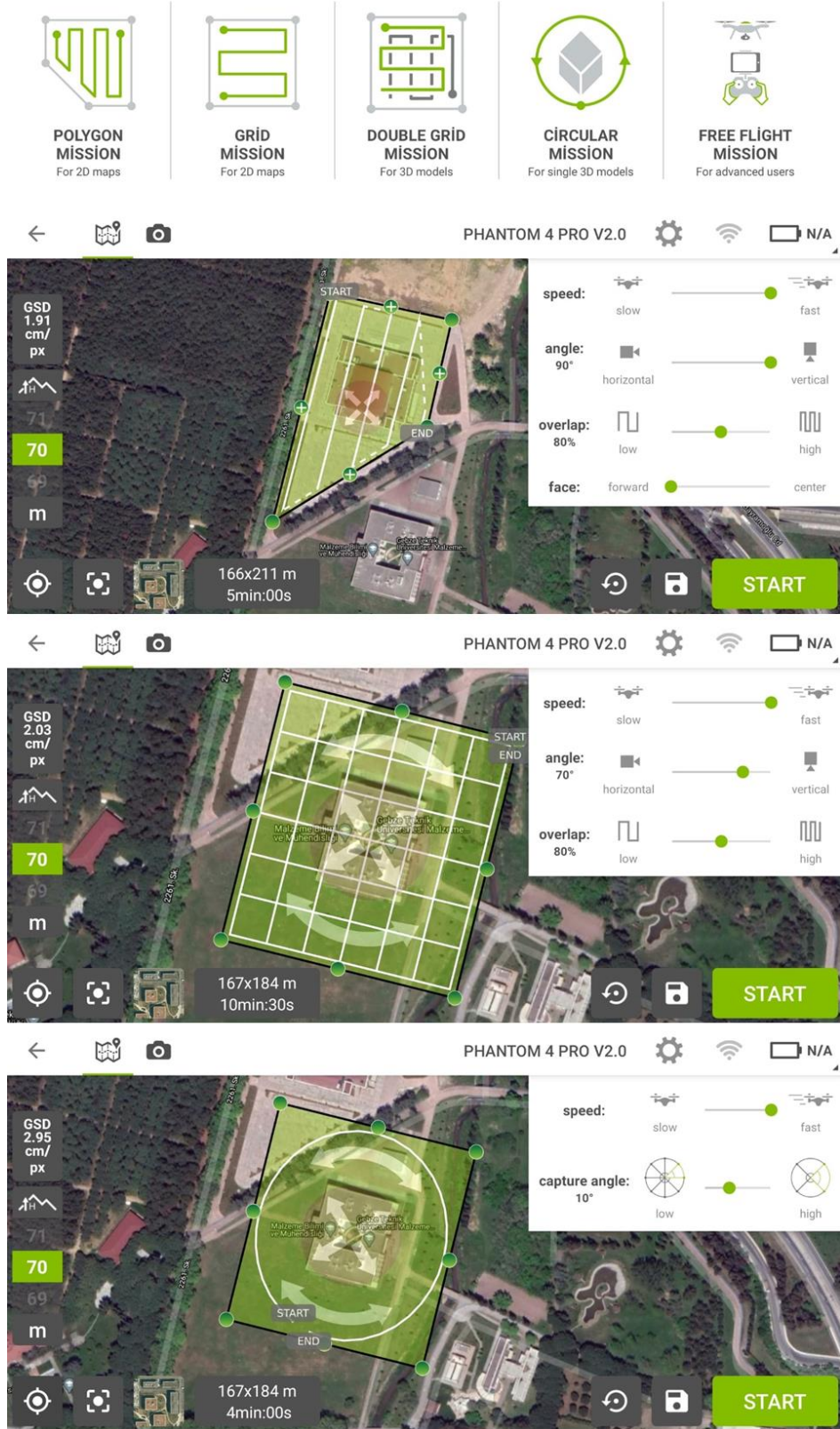
4.1. İHA ile 3B Dijital İkiz Üretimi

İHA ile DT üretimi için izlenen metodoloji dört ana işlem adımından oluşmaktadır. Bunlar, i) İHA ile hava fotoğrafı alımı, ii) Geometrik düzeltme, iii) nokta bulutu üretimleri ve iv) 3B DT üretimidir. İlgili iş kalemleri takip eden alt bölümlerde sırasıyla ele alınmıştır.

4.1.1. İHA ile Hava Fotoğrafı Alımı

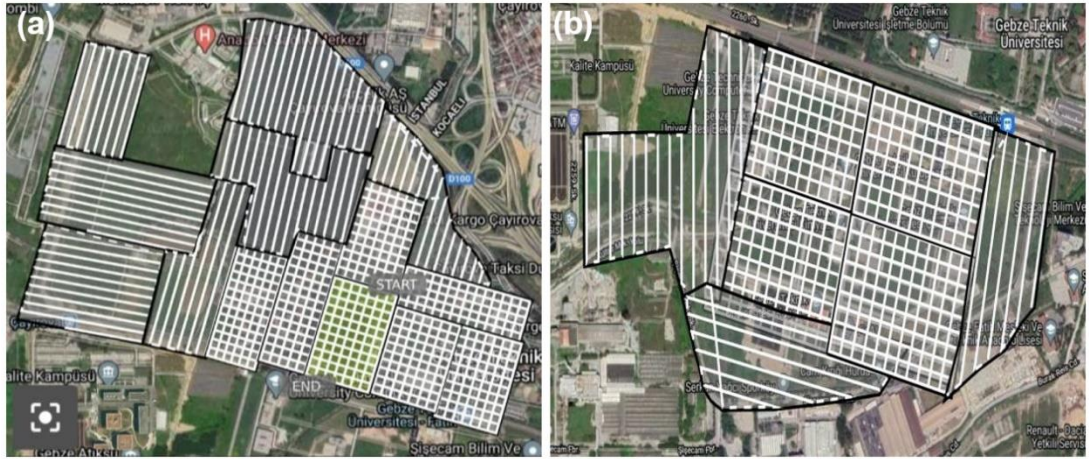
İHA ile hava fotoğraflarının alımları Pix4D capture yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, poligonal, double-grid ve dairesel (circular) olmak üzere üç farklı uçuş modu tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen arazi istikşafı neticesinde, çalışma alanında hangi uçuş modlarının hangi bölgelerde kullanılacağı planlanmıştır. Poligonal uçuşlar, bitki yoğun alanlarda uygulanırken 3B modellemede yüksek performans gerektiren bina-yoğun alanlarda double-grid ve dairesel uçuş modları

uygulanmıştır. Şekil 4.2, Pix4D capture uçuş modu arayüzünü ve kullanılan uçuş modları ve parametre seçeneklerini çalışma alanındaki örnek bir bölgede ortaya koymaktadır.



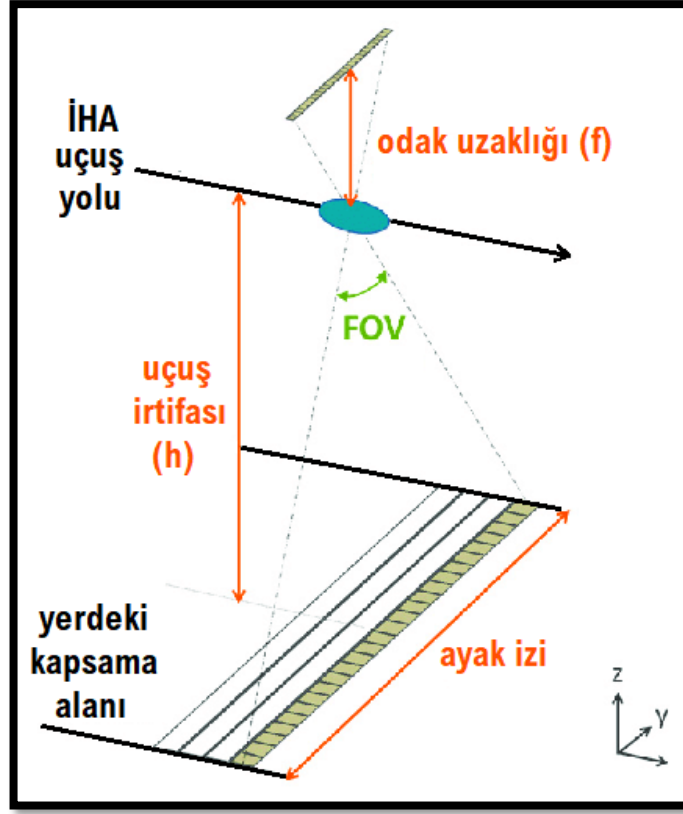
Şekil 4.2: Kullanılan Pix4D Capture uçuş modları örneği.

Şekil 4.3, GTÜ Yerleşkenin çalışma alanının Marmaray hattı üzerinde kalan kuzey ve aşağısında kalan güney kısımlarında uygulanan uçuş modlarını ve rotalarını göstermektedir. Uçuşlar, 27 dakika olan toplam İHA batarya süresi göz önünde bulundurularak güvenlik önlemleri çerçevesinde 2/3 batarya süresi yani maksimum 18 dakika olarak planlanmıştır. Poligonal uçuşlarda 90° (nadir) bakış açısı kullanılırken, bina yoğun alanlarda 3B modellemede performansını artırmak amacıyla bundle-grid ve dairesel uçuşlarda 70° bakış açısı tercih edilmiştir. Dairesel uçuşlarda her bir bina 10°’de bir fotoğraf çekim parametresi sayesinde 36 adet fotoğrafla modellenmiştir. Uçuşlarda, sürüklenme hatalarını minimize etmek amacıyla uçuş hızı en hızlı yerine bir alt kademede (5 m/s) tutulmuştur. Çalışma alanında toplam 32 uçuş gerçekleştirilmiş ve 8333 hava fotoğrafı elde edilmiştir.



Şekil 4.3: GTÜ Yerleşkesinde uygulanan İHA uçuş modları ve rotaları: (a) kuzey kısmı, (b) güney kısmı.

Uçuşlarda, yüksek 3B modelleme kalitesi elde etmek amacıyla boyuna ve enine bindirme oranları sırasıyla %80 ve %60 olarak tatbik edilmiştir. Uçuş irtifası (H) tüm uçuşlarda 80 m olarak sabit tutulmuş ve kameranın 8.6 mm’lik odak uzaklığı ve 2.345 µm’lik CMOS (complementary metal oxide semiconductor) sensörü piksel büyüklüğüne (Pix) bağlı olarak hava fotoğraflarının GSD yaklaşık 2.2 cm olarak elde edilmiştir. Bu yüksek çözünürlük, DT üretimlerinde özellikle binaların gerçeğe çok yakın şekilde modellenmesine olanak vermiştir. **Şekil 4.4**, GSD hesaplanması için kullanılan ölçek hesabının yapıldığı İHA hava fotoğrafı alım geometrisini yansıtmaktadır.



Şekil 4.4: İHA hava fotoğrafı alım geometrisi (FOV: görüş alanı).

Eşitlik 4.1, tez çalışmasında f , H ve Pix 'e bağlı olarak yapılan temel GSD hesabını göstermektedir.

$$\frac{f}{H} = \frac{Pix}{GSD} \quad (4.1)$$

4.1.2. Geometrik Düzeltme

Hava fotoğraflarının geometrik düzeltmeleri Agisoft Metashape Professional yazılımında gerçekleştirilmiştir [Agisoft, 2024]. Geometrik düzeltmede öncelikle karşılıklı yöneltme ve sonrasında mutlak yöneltme işlemleri uygulanmıştır. Karşılıklı yöneltme Agisoft Metashape yazılımının temelinin oluşturduğu Structure from Motion (SfM) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. SfM yaklaşımı, iki boyutlu (2B) bindirmeli hava fotoğrafından 3B geometriyi yüksek çözünürlükte yeniden yapılandırma becerisine sahip düşük maliyetli bir fotogrametrik yöntemdir [Westoby vd., 2012; Sefercik vd.,

2023a, 2023b]. Şekil 4.5, SfM algoritmasını kullanarak bir 3B nokta bulutu oluşturmak için dairesel sıralamalı fotoğraf alımının bir örneğini göstermektedir.



Şekil 4.5: SfM algoritması dairesel eşleştirme örneği

Bundle-grid ve dairesel uçuşlarda eğik görüntüleme geometrisi ile çekilen hava fotoğraflarında, karşılıklı yönlendeki gürültü etkisini ortadan kaldırmak için arka plan pikselleri maskelenerek filtrelenmiştir. Bu sayede, korelasyonu düşük olan noktaların etkisi ortadan kaldırılarak yönlendme doğruluğu artırılmıştır. Şekil 4.6, çalışma alanındaki bir bina üzerinde maskeleme işleminin bir örneğini göstermektedir. Maskelenmiş hava fotoğrafları üzerinde gerçekleştirilen karşılıklı yönlendme işlemi neticesinde 73 milyon noktalık bir seyrek nokta bulutu elde edilmiştir. Seyrek nokta bulutu, yoğun nokta bulutuna dayalı uygulanabilir asli bir model oluşturmanın ön aşaması olan ve karşılıklı yönlendme sonrası ilk olarak üretilen üründür.



Şekil 4.6: Maskeleme işlemi örneği: (a) maskeleme öncesi, (b) maskeleme sonrası.

Hava fotoğraflarının mutlak yönlendirme işleminde kullanılmak üzere arazide radyal dağılımlı ve yüksek topoğrafik temsil yeteneğine sahip 86 adet YKN tesis edilmiştir. YKN'ler kolay tesis edilip sökülebilecek polikarbon mobil noktalar olarak uygulanmıştır. **Şekil 4.7**, tesis edilmiş bir YKN'nin hava fotoğraflarında nasıl görüldüğünü yansıtmaktadır. Noktaların kanat kısımları fotoğrafta kolay bulunmalarını sağlarken orta kısımlarındaki siyah yuvarlak bölüm işaretlenmelerinde merkezlemeyi sağlayarak yönlendirme kalitesini artırmaktadır.



Şekil 4.7: Tesis edilmiş bir YKN'nin hava fotoğraflarında görünümü.

Kullanılan 86 YKN ile gerçekleştirilen mutlak yönlme neticesinde eşitlik 4.2'ye göre ± 2 cm (~ 0.9 piksel) geometrik doğruluk elde edilmiştir. Eşitlikte, \hat{X}_i , \hat{Y}_i , \hat{Z}_i hesaplanan değerler, X_i , Y_i , Z_i gerçek değerlerdir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2}{n}} \quad (4.2)$$

4.1.3. Nokta Bulutu ve 3B Dijital İkiz Üretimleri

Çalışma alanının 3B yoğun nokta bulutu, Agisoft Metashape yazılımında hava fotoğraflarından derinlik bilgilerinin istenilen örtüşmeyle çıkarılmasıyla oluşturulan derinlik haritaları kullanılarak üretilmiştir. Bulutta yaklaşık 1,5 milyar nokta yer almakta olup gürültülü noktalar Microstation yazılımı Terrasolid modülü kullanılarak manuel ve otomatik filtreleme işlemleri ile elemine edilmiştir. **Şekil 4.8**, çalışma alanında örnek bir bölgede filtreleme etkisini yansıtmaktadır.



Şekil 4.8: Filtreleme etkisi: (üst) filtreleme öncesi, (alt) filtreleme sonrası.

Vektör veri formatında boşluklu bir yapıya sahip filtrelenmiş gürültüsüz yoğun nokta bulutlarının raster formdaki DT'lere dönüştürülmesi sürükleyici bir VR turu oluşturabilmek için çok önemlidir. İHA yoğun nokta bulutlarından 3B DT üretimleri yine Agisoft Metashape yazılımı kullanılarak enterpolasyon tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında, tahmin edilen üçgen ağ yüzlerinin sayısı ve çokgen verilerin büyük boyutu nedeniyle, ağ ayrıştırması gerçekleştirilerek üçgen ağ yüzlerinin sayısı 430 milyona indirgenmiştir. Oluşturulan 3B ağlardaki kaba geometri ve yalıtılmış çokgenlere sahip alanlar manuel bir ağ filtreleme prosedürü uygulanarak elemine edilmiştir. Agisoft Metashape yazılımında, 3B DT'ler, nesnelere renkli ancak doku grafiğine kıyasla düşük çözünürlükte gösteren gölgeli moda görselleştirilmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak ve en gerçekçi 3B DT'leri elde etmek için son olarak DT'lere İHA hava fotoğraflarından yüksek çözünürlüklü doku giydirme işlemi uygulanmıştır. **Şekil 4.9**, çalışma alanında örnek bir bina üzerinde doku giydirme öncesi ve sonrası 3B DT görsellerini yansıtmaktadır.



Şekil 4.9: Örnek bir bina üzerinde (a) doku giydirme öncesi ve (b) doku giydirme sonrası 3B DT görselleri.

4.2. TLS ile 3B Dijital İkiz Üretimi

TLS günümüzde pek çok uygulamada referans niteliğinde kullanılan ve DT üretimlerinde de oldukça sık başvurulan bir yöntem haline gelmiştir [Sefercik ve Ateşoğlu, 2017]. Özellikle, yersel taramalar ile elde edilen yoğun nokta bulutlarının çok yüksek çözünürlüğü ve objelerin orijinal spektral yapılarını gerçeğe çok yakın şekilde sunabilmeleri tekniğin DT alanında en büyük avantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. TLS cihazlarının mobil çalışma yeteneği, yakın mesafe taramalara olanak vererek birkaç cm'lik küçük objelerin dahi DT'lerinin kaliteli şekilde üretimini sağlamaktadır. Tez çalışmasında uygulanan TLS teknolojisi veri füzyonu ile üretilen hassas DT'ye büyük katkı sağlamıştır. Aşağıdaki bölümlerde, uygulanan TLS yöntemi ile ilgili veri toplama, geometrik düzeltme ve yoğun nokta bulutu ve 3B DT üretim aşamalarında kullanılan metodolojiler ele alınmıştır.

4.2.1. Veri Toplama

Veri toplama aşamasında, GTÜ kampüsünün yaklaşık 5.000 m²'lik alanında bulunan ve optik İHA teknolojisi ile tespiti mümkün olmayan orman altı araç, bisiklet ve yaya yollarının ve kampüsün ortasından geçen Marmaray hattının altında yer alan alt geçitin TLS tekniği ile taranarak yoğun nokta bulutlarının elde edilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma alanında elde edilecek TLS verilerinin İHA tekniği ile üretilen yoğun nokta bulutları ile füzyon edilecek olması nedeniyle, renkli nokta bulutu üretilmesi amaçlanmıştır. Füzyon sonucunda veri bütünlüğünün sağlanabilmesi ve nokta bulutu-mesh dönüşümünde çözünürlüğe bağlı farklılıklar oluşmaması için tarama çözünürlüğü en düşük 12 mm olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kurulacak istasyonların adedi ve konumlarının tespit edilebilmesi için bölgede istikşaf çalışması yapılmıştır. İstasyon konumları; aletin görüş açısı, diğer istasyonlar ile olan bindirme oranı ve proje alanında kör nokta kalmayacak şekilde dağılım oluşturması parametreleri göz önünde bulundurularak optimum şekilde belirlenmiştir.

Çalışma alanının karakteristik yapısı gereği, bölgede bulunan sabit yapılar ve yüzeyler cloud-to-cloud birleştirme metodunun uygulanması için elverişli bulunmuştur. Cloud-to-cloud birleştirme, hedefli (küre vb.) birleştirme metoduna göre çalışma süresini kısaltarak maliyetleri düşüren ve projede ulaşılmak istenen doğruluk değerlerini karşılayan bir metottur.

TLS verisinin toplanmasında, çalışma gereksinimleri, çalışma alanı ve saha çalışmaları için öngörülen süreler dikkate alınarak, “Çalışma alanı ve kullanılan materyaller” bölümünde teknik özellikleri detaylı şekilde sunulmuş olan Leica RTC360 yersel lazer tarayıcı tercih edilmiştir. Bu cihaz, en yüksek çözünürlük ayarında saniyede 2 milyon nokta atım kapasitesine sahip olup, üç adet HDR (yüksek dinamik aralık) özellikli kamerası ve gömülü IMU entegrasyonlu görüntüleme sistemleri ile cloud-to-cloud tekniğinde hızlı ve hassas sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmalar esnasında 12 mm çözünürlük, renkli mod ve VIS özelliği aktif şekilde kullanılmıştır.

Tarama işlemleri, arazi istikşafı aşamasında gerçekleştirilen ön çalışma ile tespit edilen istasyon konumlarından gerçekleştirilmiştir. Tarayıcının en iyi görüş açısına sahip olacağı ve veri bütünlüğünün sağlanabileceği konumlardan yapılan ölçümler tamamlandıkça, her bir istasyon yerinde incelenerek eksik ya da hatalı veri toplanmadığından emin olunmuştur. Her bir istasyondan gerçekleştirilen taramalar

esnasında cihazın önüne herhangi bir hareketli objenin geçmemesi için alan sürekli kontrol altında tutulmuştur. Tarama sırasında cihazda titreşime yol açan ya da hareket etmesine neden olan durumlarla karşılaşıldığında tarama tekrarlanarak gürültüsüz ve hassas bir veri elde edilmesi amaçlanmıştır. Her bir istasyondaki tarama süresi, 12 mm mekansal çözünürlük ve renkli tarama ayarlarına bağlı olarak yaklaşık 1 dakika 20 saniye sürmüştür. Şekil 4.10, GTÜ kampüsünde Marmaray hattı altından geçen alt geçite ait örnek tarama verisini göstermektedir.



Şekil 4.10: Marmaray alt geçidi örnek tarama verisi.

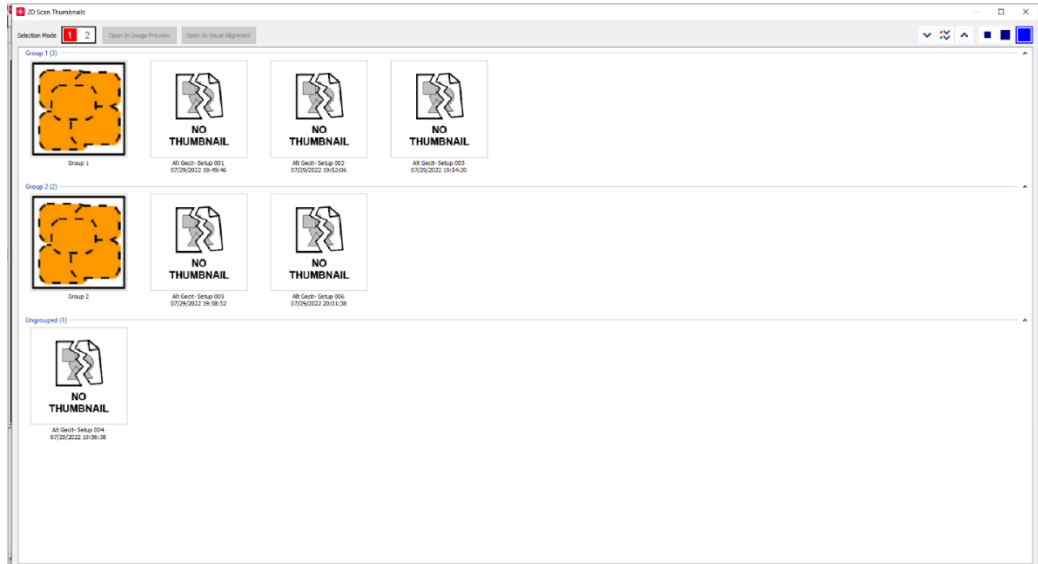
Çalışma sonucunda elde edilen TLS ham verileri cihaz içerisinde bulunan 256 GB taşınabilir bellek içerisine kaydedilmiştir. İstasyonların birbirlerine göre olan konum ve dönüklük değerlerinin de kaydedildiği proje dosyası ön-birleştirmesi tamamlanmış şekilde veri işleme yazılımına aktarılmıştır.

4.2.2. Veri İşleme

Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen veriler, nokta bulutu değerlendirme çalışmaları için cihaz ile uyumluluğu ve veri işleme kapasitesi yüksek Leica Cyclone yazılımında işlenmiştir. Tüm nokta bulutu birleştirme, filtreleme ve dönüşüm işlemleri aynı yazılımda sonuçlandırılmış ve verinin dışa aktarımı sağlanmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi saha çalışmaları ile elde edilen lazer tarama ham verileri ön-birleştirilmiş şekilde Cyclone içerisinde oluşturulan veritabanına aktarılmıştır. Ön-

birleştirme işlemi, TLS ölçümleri sırasında, nokta bulutlarının Görsel Eylemsizlik Sistemi'ne (VIS) dayalı olarak istasyon kurulumları arasında tarayıcı hareketinin gerçek zamanlı takibini kullanan, videoya geliştirilmiş eylemsizlik birimi tarafından otomatik olarak önceden hizalanmasıdır. Cloud-to-cloud birleştirme metoduna göre oluşturulan veritabanı içerisindeki tüm komşu istasyonlar çiftler halinde Visual Alignment aracı ile gözlemlenmiş ve gerekli öteleme ve dönüklük güncellemeleri manual olarak gerçekleştirilmiştir. Düzeltilen her bir tarama çifti otomatik hizalama aracı ile iterasyonlu şekilde yeniden cloud-to-cloud birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sonucunda her bir komşu istasyon çifti hassas şekilde birleştirilmiştir. **Şekil 4.11**, yazılımda TLS istasyon seçimlerini gösterirken **Şekil 4.12**, nokta bulutu çiftlerinin ön-birleştirilmiş ve düzeltilmiş hallerini yansıtmaktadır.

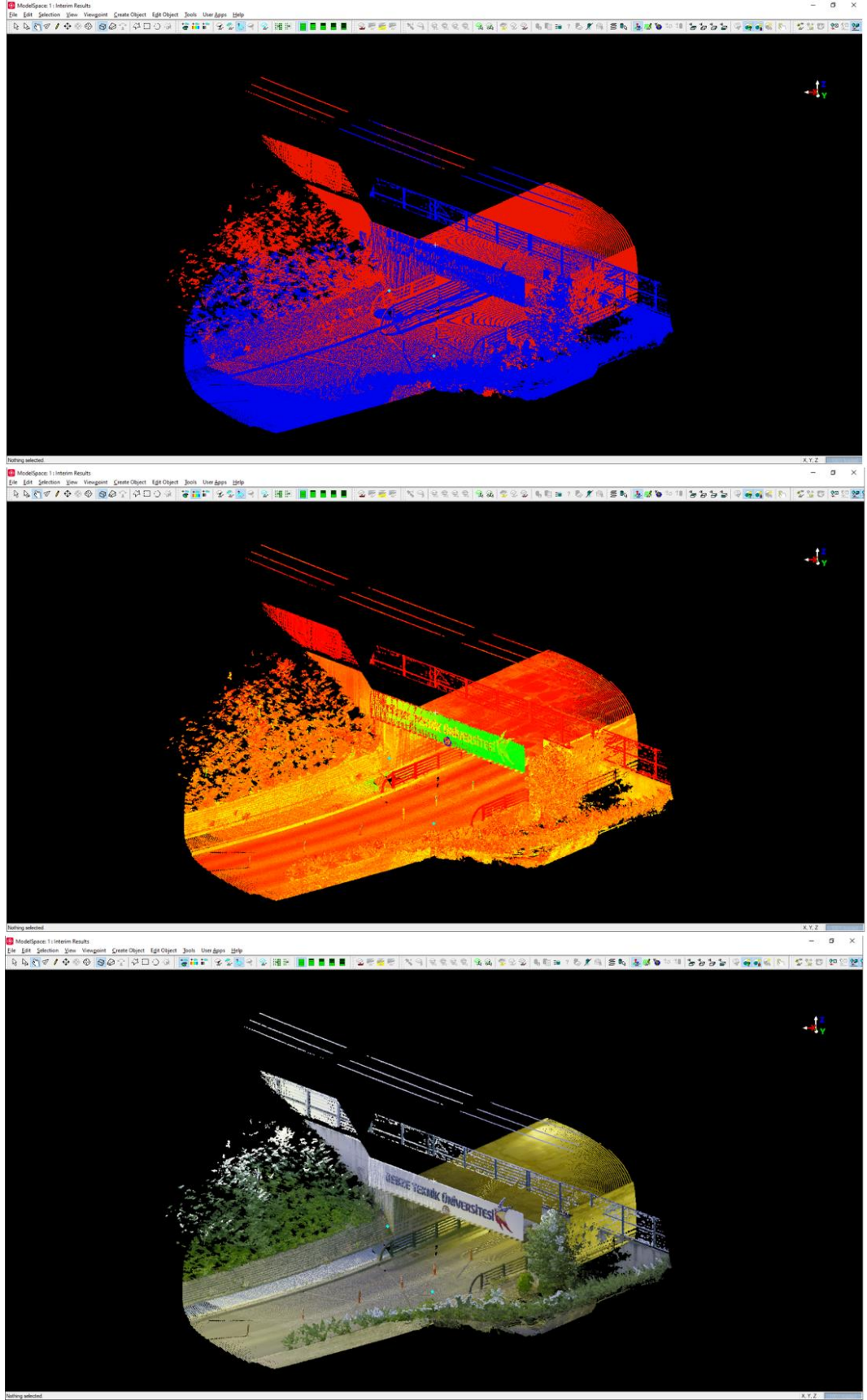


Şekil 4.11: Komşu istasyonlardan TLS nokta bulutu çiftlerinin seçimi.



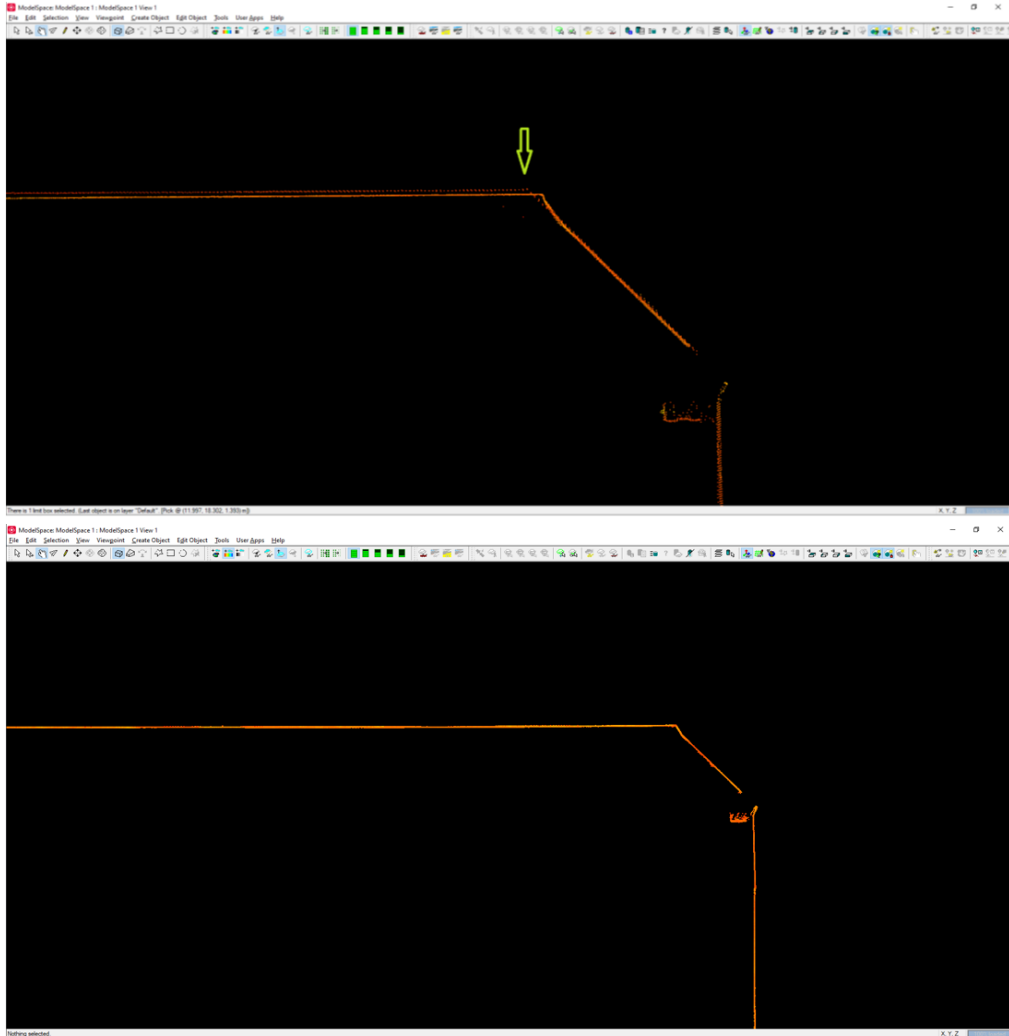
Şekil 4.12: TLS nokta bulutu çiftlerinin ön-birleştirilmiş (üst) ve düzeltilmiş (alt) halleri.

Tüm komşu istasyon çiftleri birbirleri ile birleştikten sonra, projenin tamamı seçilerek yeni bir iteratif birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece manuel hizalamaya tabi tutulmamış, komşu olmayan istasyonlar arasında da eşleştirme yapılarak hassasiyet değerlerinin artırılması amaçlanmıştır. **Şekil 4.13**, alt geçit örneği üzerinde iteratif birleştirme işlemi aşamalarını ve sonucunu göstermektedir.



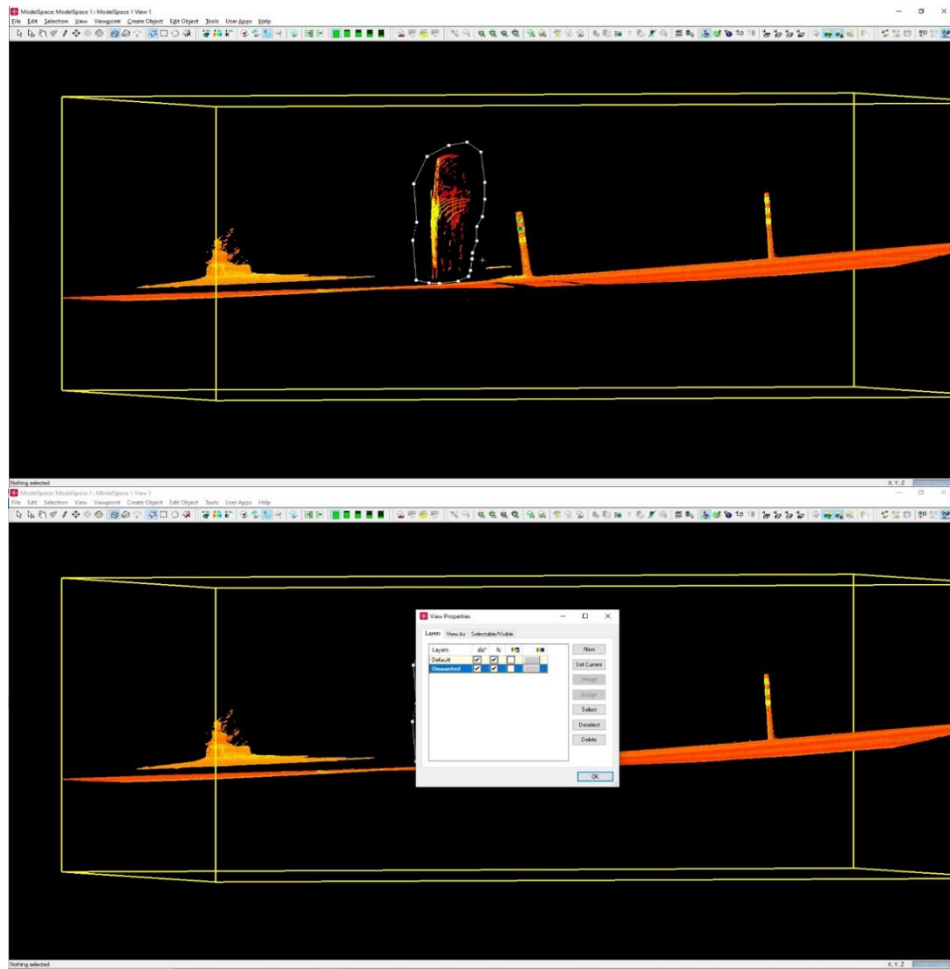
Şekil 4.13: Marmaray alt geçiti örneği üzerinde iteratif birleştirme işlemi aşamaları ve sonucu.

Cloud-to-cloud birleştirme metodu sonucunda istasyonlar arasında oluşabilecek kopmalar ve katlanmalar birleştirme raporları üzerinden anlaşılabilir. Metot tek başına kullanıldığında kontrolsüz bir birleştirme metodu olduğundan tüm verinin görsel olarak geometrik açıdan kontrol edilmesi gerekmektedir. Geometrik kalite kontrollerinin doğru şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla veri üzerinden farklı eksenlerde kesitler alınarak hatalı hizalama noktalarının tespiti sağlanmıştır. Tespit edilen hatalı hizalamalar tekrar manuel birleştirme ve iterasyonlu otomatik hizalama teknikleri uygulanarak giderilmiştir. Sonuç olarak, TLS istasyonlarından elde edilen nokta bulutları cloud-to-cloud yöntemi ile 6 mm ortalama RMSE ile yönettir. **Şekil 4.14**, tarama alanında tespit edilen hatalı hizalamaya bağlı örnek bir geometrik problemi ve problemin giderilmiş halini sergilemektedir.



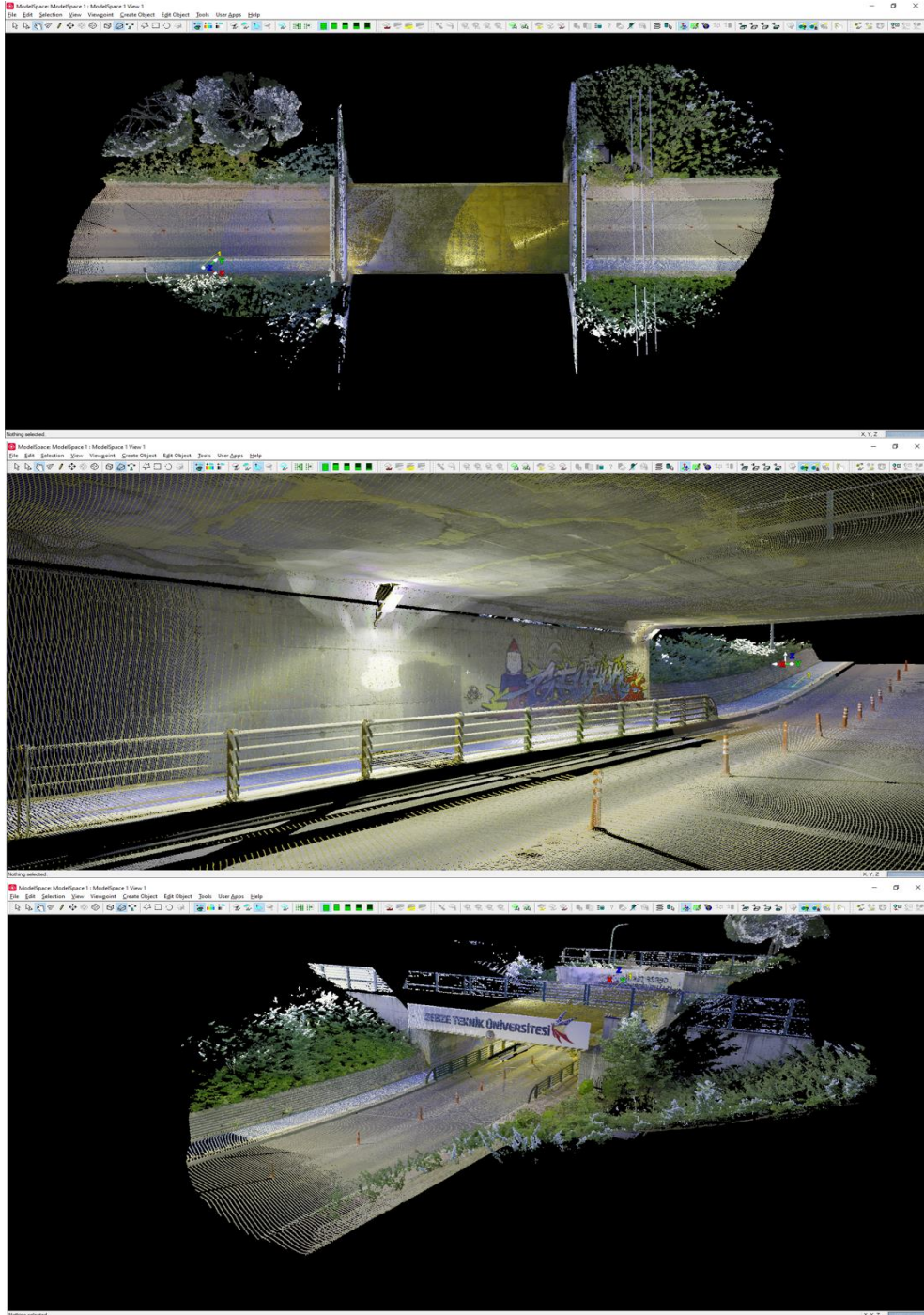
Şekil 4.14: Tarama alanında tespit edilen hatalı hizalamaya bağlı örnek bir geometrik problem ve problemin giderilmiş hali.

Taramalar esnasında alana giren hareketli araçlar ve canlılar gibi istenmeyen objeler tarama esnasında cihaz tarafından kaydedilmekte ve sonuç nokta bulutu üzerinde gürültü yaratmaktadır. Tüm bu istenmeyen veriler otomatik ve manuel filtreleme yöntemleri kullanılarak nokta bulutu üzerinden temizlenmiştir. Kullanılan Leica Cyclone yazılımında, otomatik yöntemlerle bu objelerin tespit edilebilmesi bazı durumlarda mümkün olabilmektedir. Ancak otomatik filtreleme metotları tek başına yeterli olmadığından manuel yöntemler ile desteklenerek istenmeyen verilerin filtrelenmesi sağlanmıştır. Cyclone yazılımı içerisinde oluşturulan yeni bir katmana aktarılan tüm gürültüler daha sonra tekrar incelenerek doğrulanmış ve proje içerisinden silinmiştir. **Şekil 4.15**, tarama alanında tespit edilen bir nesnenin manuel olarak pencere içine alınması ve elemine edilmesi için uygulanan parametre seçim penceresini göstermektedir.



Şekil 4.15: Tarama alanında tespit edilen bir nesnenin manuel filtrelenmesi.

Şekil 4.16, geometrik kalite kontrolleri ve filtreleme işlemleri tamamlanmış TLS nihai nokta bulutlarından örnekler sunmaktadır. Uygulanan veri işleme adımlarının ardından TLS yoğun nokta bulutları, optik İHA teknolojisinden elde edilen yoğun nokta bulutları ile füzyon edilmek üzere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.16: Geometrik kalite kontrolleri ve filtreleme işlemleri tamamlanmış TLS nihai nokta bulutlarından örnekler

Veri işleme süreci tamamlanan nihai TLS yoğun nokta bulutlarının dönüşümü ve dışa aktarımı için E57 dosya formatı kullanılmıştır. Structured nokta bulutu yapısını destekleyen bu format ile nokta bulutu ve panoramik görüntüler gömülü şekilde üretilerek dışa aktarılabilir. Üretilen nokta bulutu verisinin E57 formatında dışarıya aktarılması, veri paylaşımı ve entegrasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. E57 formatı, 3B nokta bulutu verilerini ve ilişkili meta verileri saklamak için yaygın olarak kullanılan bir standarttır. Bu format, verilerin farklı yazılımlar ve platformlar arasında uyumlu bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Nokta bulutu verisinin dışa aktarılması sürecinde, E57 formatına dönüşüm Leica Cyclone yazılımı kullanılarak, işlenmiş ve optimize edilmiş veriler seçilerek gerçekleştirilmiştir. Dışa aktarılan E57 dosyası, yüksek doğrulukta ve detaylı verileri içermekte olup, diğer mühendislik, mimarlık veya analiz yazılımları tarafından sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Bu adım, projelerin veri bütünlüğünü koruyarak, iş akışının sürekliliğini ve verimliliğini sağlamaktadır.

4.3. İHA ve TLS Verilerinin Füzyonu ile Hassas DT Üretimi

Optik İHA hava fotoğraflarından ve yersel lazer taramalardan elde edilen ve geometrik düzeltmeleri ve filtreleme işlemleri tamamlanmış renkli yoğun nokta bulutları koordinat sistemi ve datum kontrollerinin gerçekleştirilmesinin ardından füzyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlem, afin transformasyonu temelinde gerçekleştirilmiş olup işlemde 4 adet bağlama noktası (tie point) kullanılmıştır. Bağlama noktalarının RMSE değeri ± 3.8 cm olarak belirlenmiştir. Füzyon işlemi sonucunda ortaya çıkan yeni nokta bulutu görsel olarak son kez kontrol edilmiş ve gürültüler elemine edilmiştir. Bulut, İHA ve TLS teknolojilerinden elde edilen bağımsız bulutlara nazaran çok daha fazla yoğunluklu ve tasvir yeteneği çok daha yüksek yapıdadır. **Şekil 4.17**, bağlama noktalarının konumlarını tasvir etmekte olup takip eden **Tablo 4.1** ise bağlama noktalarının bağımsız ve toplam karesel ortalama hatalarını yansıtmaktadır.



Şekil 4.17: Bağlama noktalarının konumları

Tablo 4.1: Bağlama noktalarının bağımsız ve toplam RMSE değerleri

Bağlama Noktası No	X RMSE (m)	Y RMSE (m)	Z RMSE (m)	Toplam RMSE (m)
1	0.016	-0.010	0.006	0.019
2	-0.014	-0.016	-0.010	0.023
3	0.001	-0.041	0.012	0.043
4	-0.003	0.067	-0.008	0.068

Elde edilen yöneltilmiş füzyon bulutu kaynak olarak kullanılarak Agisoft Metashape yazılımında doku giydirilmiş mesh modeller oluşturulmuş ve DT'ler elde edilmiştir.

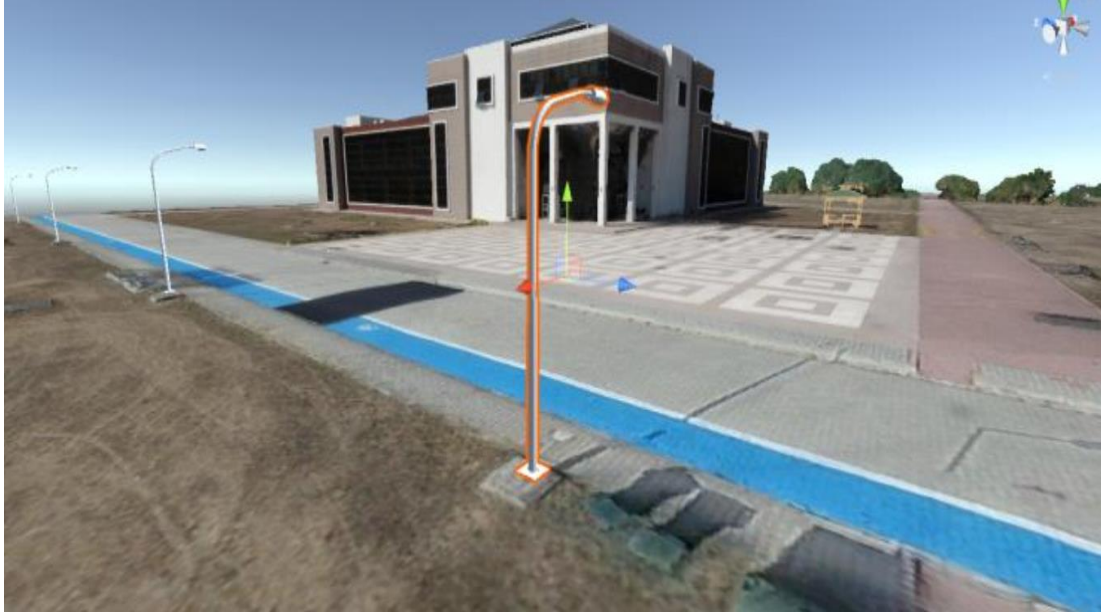
4.4. Sanal Tur Oluşturulması

Optik İHA ve TLS yoğun nokta bulutlarının füzyonu temelinde elde edilen DT çalışma alanında 3B sanal tur oluşturulmasında kullanılmıştır. Pasif prensiple çalışan ve elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde (RGB) elde edilmiş İHA hava fotoğraflarından üretilen nokta bulutu ve DT'nin orman altı, alt geçit vb. sınırlılıkları

füzyonu gerçekleştiren TLS yoğun nokta bulutlarıyla aşılmış ve bu sayede, VR ortamında geliştirilen turda devamlılık sağlanmıştır. Sanal tur, Unity oyun motoru kullanılarak oluşturulmuştur. Sanal tur oluşturulmasında sırasıyla, DT'nin Unity ortamına aktarımı, ortam ayarlamaları, görüntü oluşturma optimizasyon algoritmalarının uygulanması, ilk oyuncu oynatıcı uygulaması ve çalıştırılabilir (executable = .exe) oyun dosyasının yapılandırılması aşamaları yer almaktadır.

Üretilen hassas DT, Agisoft Metashape yazılımından Unity oyun motoru tarafından tanınan Wavefront OBJ veri formatına dönüştürülerek dışa aktarılmıştır. Bu format, hem noktaların koordinatlarını hem de çokgen verileri birlikte barındırabilmesi nedeniyle 3B modellerin dışa aktarımında genel olarak tercih edilir. Bu özellikleri sayesinde birçok 3B CAD yazılımı tarafından da desteklenmektedir [**Kato ve Ohno, 2009**].

Unity oyun motorunda, 3B DT modelleriyle birlikte içe aktarılan dokuların görüntülenmesi için gölgelendirici nesnesinin aydınlatma dokusuna ve özelliklerine sahip bir malzemenin oluşturulması önemlidir. Bu bağlamda, oluşturulan materyallerin denetçi penceresi özellikleri kullanılarak düzenlemeleri yapılmıştır. DT'nin gerçekçi ve daha yüksek çözünürlüklü görünümü için gölgelendirici tipi ışıksız/doku olarak seçilmiş, dokuların maksimum boyutu ise 16384 x 16384 olarak uygulanmıştır. Sanal turun gerçekçiliğini artırmak için aydınlatma direkleri, ağaçlar, banklar, çardaklar ve masalar gibi 3B hazır nesnelere entegre edilmiştir. **Şekil 4.18**, Unity ortamında sanal tura entegre edilmiş bir aydınlatma direğini göstermektedir.



Şekil 4.18: Sanal tura 3B nesne entegrasyonu ile gerçeklik artırımı.

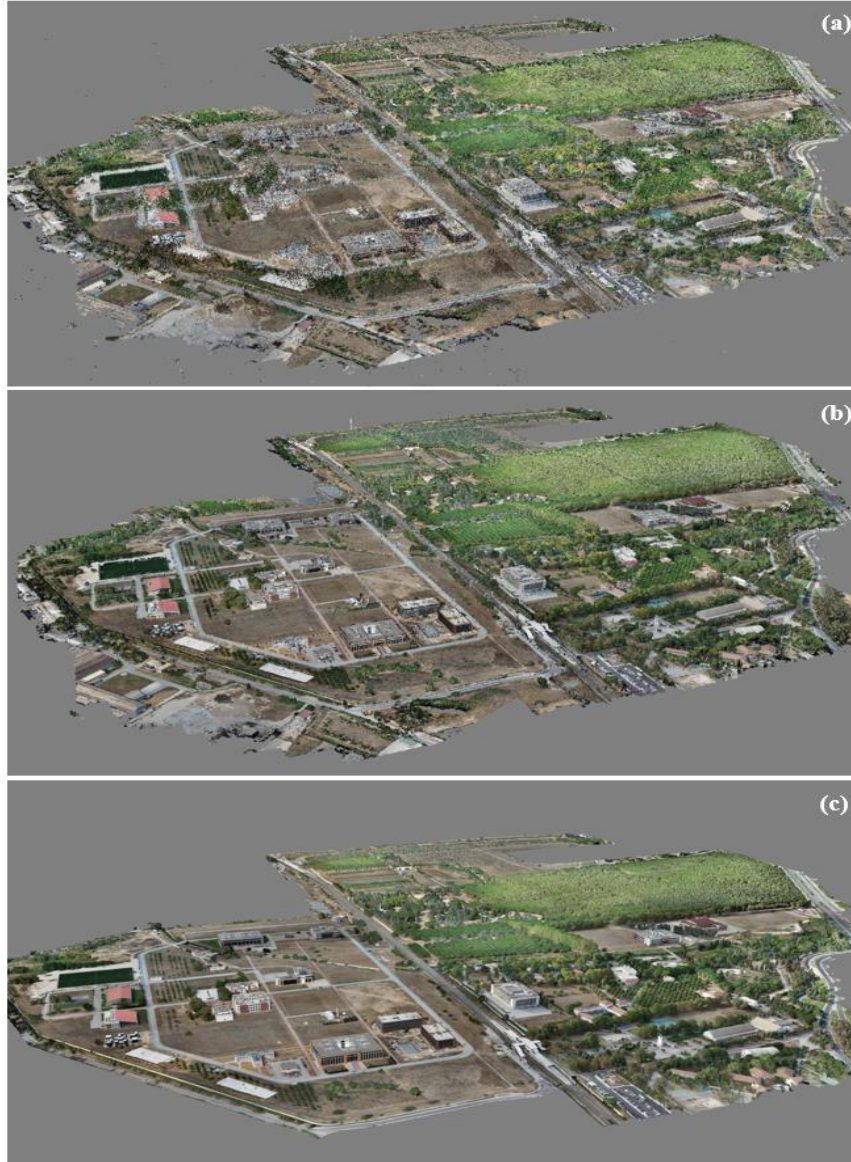
Kullanılan hassas çok yüksek çözünürlüklü DT'nin büyük veri boyutu nedeniyle, Unity oyun motorunda, oklüzyon ayıklama ve alan alt bölümü içeren işleme (render) optimizasyon algoritmaları uygulanmıştır. Bu işlem sayesinde, sanal tur sırasında yalnızca görünür alanlar tanınır hale getirilmiş ve görünmeyen alanların bilgisayarı yormasının ve tur sırasında donma ve yavaşlamaların önüne geçilmiştir [**Coorg ve Teller, 1997**].

Son olarak Unity'de oluşturulan 3B sanal tur uygulaması için Windows uyumlu çalıştırılabilir bir .exe dosyası oluşturulmuştur [**Sefercik vd., 2022**]. Yürütülebilir grafik seçenekleri oluşturulurken, oluşturulan uygulamanın görselleştirilmesinin iyileştirilmesi için mümkün olan en yüksek kalite olarak seçildi.

5. UYGULAMA VE BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilmiş nihai 3B İHA ve TLS ürünleri ve bu ürünlerin füzyonu ile elde edilmiş daha yüksek kalitede DT ürününün yakın plan görselleri sunulmuştur.

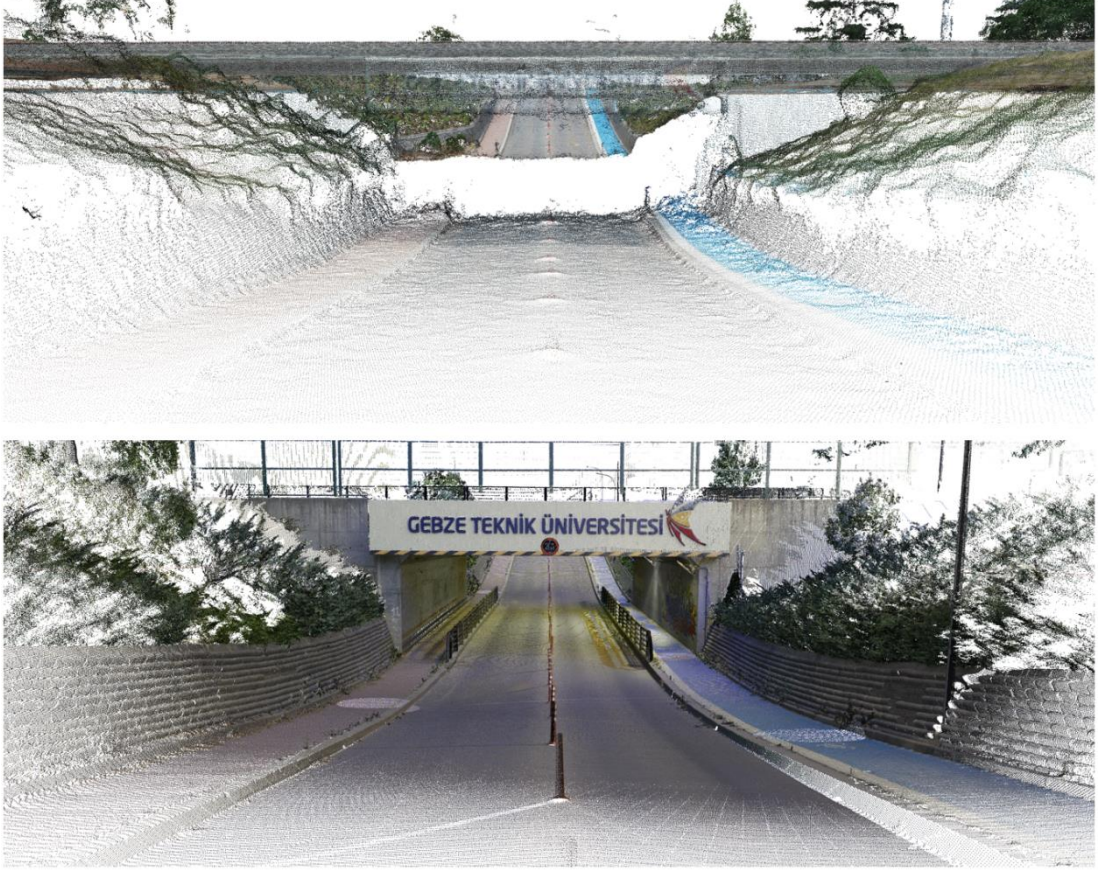
Şekil 5.1, kampüs alanında İHA verilerinden elde edilmiş 3B seyrek nokta bulutunu, yoğun nokta bulutunu ve doku giydirilmiş DT'yi sergilemektedir.



Şekil 5.1: GTÜ kampüs alanında İHA verilerinden elde edilmiş (a) 3B seyrek nokta bulutu, (b) yoğun nokta bulutu, (c) doku giydirilmiş DT.

GTÜ kampüs alanında Şekil 5.1’de yer alan İHA yoğun nokta bulutu ve DT’ye bakıldığında bu ürünler çok yüksek kalitede görünmektedir. Evet, 80 m uçuş irtifasından ortalama ~2.2 cm mekansal çözünürlükte alınmış hava fotoğraflarından üretilmiş bu ürünler objelerin taç yüzeylerini ve eğik bakışla alım sayesinde yan yüzeylerini oldukça başarılı şekilde tasvir edebilme yeteneğine sahiptir. Ancak, durum aktif radar ya da LiDAR gibi bitki penetrasyon yeteneği gerektiren bölgelere geldiğinde yani yoğun orman dokusu altında veya uçuşta havadan görünmesi mümkün olmayan alt geçit benzeri nesnelere değişmekte ve optik İHA teknolojisinin sınırları açıkça ortaya çıkmaktadır. İşte tam bu noktada, mobil uygulanabilen TLS tekniğinin avantajı net olarak ortaya çıkmış ve optik İHA teknolojisinin sınırlı kaldığı alanlarda veri füzyonu ile çok önemli sorunlar aşılabilmektedir. Diğer yandan, optik İHA teknolojisi de TLS’nin sınırlı kaldığı ve ancak üstten bakışla elde edilebilecek ağaç taçları ve bina çatıları gibi DT’lerde vazgeçilmez olan yüzeylere ait verileri yüksek çözünürlükte sağlayabilmesinin avantajını sunmuştur. Sonuç olarak, gerçekleştirilen füzyon uygulamasında, her iki tekniğin avantajları birbirlerinin sınırlamalarını ortadan kaldırmış sonuç olarak ortaya yüksek kalitede ve gerçekçi bir DT çıkmıştır.

Şekil 5.2, geometrik yöneltme ve filtreleme işlemleri tamamlanmış İHA ve TLS nihai nokta bulutlarını çalışma alanındaki Marmaray alt geçidi örneği üzerinde ortaya koymaktadır. Örnekte, optik İHA teknolojisinin alt geçit boyunca hiçbir tasvir yapamadığı, TLS’nin ise DT üretimi için çok değerli, detaylı bir tasvir yapabildiği açık şekilde görülmektedir.



Şekil 5.2: Geometrik yöneltme ve filtreleme işlemleri tamamlanmış nihai İHA (üst) ve TLS (alt) nokta bulutları: Marmaray alt geçidi örneği.

Şekil 5.3, yine Marmaray alt geçidi örneği üzerinde İHA yoğun nokta bulutları kullanılarak üretilmiş 3B DT'yi ve İHA ve TLS yoğun nokta bulutları kullanılarak üretilmiş hassas DT'yi yansıtmaktadır. Şekilde yine optik İHA teknolojisinden üretilen DT'nin alt geçit boyunca tek başına yeterli tasvir yapamadığı ve alt geçit içindeki hiçbir objeyi sergileyemediği görülmektedir. TLS ile füzyon işleminden üretilmiş DT ise alt geçitin sanal gerçeklikte kullanılmak için oldukça uygun, detaylı bir tasvirini sunmaktadır.



Şekil 5.3: İHA DT (üst) ve İHA ve TLS füzyonu sonucu DT (alt): Marmaray alt geçidi örneği.

Şekil 5.4, GTÜ kampüs alanında Unity oyun motoru ile oluşturulmuş sanal turdan bazı kesitler sunmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi sanal turun çok yüksek mekansal çözünürlük ve orijinale çok yakın spektral (renk) özelliklere sahip verilerden oluşturulmuş olması oldukça gerçekçi bir VR ortamının elde edilebilmesini sağlamıştır. Geliştirilen sanal turu, GTÜ kampüsü hakkında fikir sahibi olmak isteyen aday öğrenciler kullanabilecektir. Buna ek olarak, üretilen yüksek kaliteli DT, inşaat faaliyetlerinde yüksek doğruluklu metrik hesaplamalar yapılabilmesi için idealdir. Ayrıca, bilgi sistemleri kurulması, akıllı kampüs uygulamaları, GNSS gözlemlerinde sinyal yollarının 3B gözlemlenmesi vb. temelinde bilimsel araştırmalar için de çok önemli faydalar sağlama potansiyeli bulunmaktadır.



Şekil 5.4: GTÜ kampüs alanında Unity oyun motoru ile oluşturulmuş sanal turdan bazı kesitler.

6. SONUÇLAR

Birbirleri ile entegre çalışan akıllı sistemler sayesinde kendi kendini organize edebilen ortamlar fikri ile 2011 yılında ortaya çıkan Endüstri 4.0 devrimi dünyada DT kavramını ilgi odağı haline getirmiştir. DT'ler sayesinde objeler görsel ve geometrik bütünlük içinde dijital ortama birebir aktarılabilmekte ve bu sayede bilgisayar ortamında metrik çalışmalar yapılabilmesine ek olarak sanal gerçeklik ortamları yaratılabilmektedir.

Haritacılık disiplininde DT'ler yer, hava ve uzay kaynaklı tekniklerin sağladığı verilerden elde edilebilmektedir. Ancak her tekniğin avantajları yanında görüntüleme geometrisi, irtifa, sensör karakteristikleri vb. etkenlere bağlı sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar, üretilen DT'lerin tasvir yeteneklerini sınırlamakta ve eksik veya hatalı tasvirler neden olmaktadır. Örneğin, pasif prensipte çalışan hava ve uzay kaynaklı optik yani kameralı sistemler orman altı topoğrafik özelliklerin tasvirini yapamamaktadır. Orman altındaki objeler ve değişken topoğrafik eğim gibi özellikler tasvir edilemediğinden yalnızca DT değil çıplak yeryüzü topoğrafyasının 3B katı modellenmesine olanak veren ve harita üretimlerinde altlık olarak kullanılan dijital arazi modeli (DTM) ve dijital yükseklik modelleri de (DYM) bu alanlarda gereken doğrulukta üretilmemektedir. Yersel yöntemlerle DT üretiminde en büyük problemler ise objelerin taç yüzeylerinin tasvir edilememesidir. Taç yüzeyler ancak, kendilerinden daha yüksek noktalardan ölçüm yapılabilmesi durumunda gözlemlenebilmekte olup bu durum çoğu zaman hem topoğrafik açıdan olanaksız hem de proje maliyetlerinde yarattığı finansal yük ve zaman kaybı nedeniyle anlamsızdır.

Yer, hava ve uzay kaynaklı yöntemlerin sınırlamalarının ortadan kaldırılması için son yıllarda dünya genelinde füzyon adı verilen birleştirme teknikleri kullanılmakta ve hedef alanlarda çoklu teknik kullanımı ile objeler çok daha yüksek tasvir potansiyelinde ve doğrulukta modellenmektedir. Füzyon edilen teknikler genelde irtifa ve bakış açısına bağlı olarak yer-hava ya da yer-uzay eşleştirmesi şeklinde, bitki penetrasyonun ön planda olduğu araştırmalarda ise aktif-pasif algılama eşleştirmesi şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, GTÜ kampüs alanında optik İHA yöntemi ile oluşturulan yoğun nokta bulutu ve DT'lerde özellikle orman dokusu altındaki objelerin ve Marmaray alt geçitinin tasvirinde karşılaşılan problemlerin çözümüne yönelik olarak optik İHA ve TLS teknolojilerinden elde edilen verilerin füzyonu önerilmiştir. Füzyon işleminde ana hedef geometrik ve spektral kalibrasyonları yapılmış İHA ve TLS yoğun nokta bulutlarını üretmek ve bu bulutları birleştirerek çalışma alanının yüksek doğruluk hassas bir DT'sini elde etmek olarak belirlenmiş ve bu hedef doğrultusunda tüm uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, orman altında kalan araç, yaya ve bisiklet yollarının modellenmesi mümkün hale gelirken Marmaray alt geçitine ait tüm detaylarda elde edilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci ana hedefi ise üretilecek nihai hassas DT'nin sanal gerçeklik ortamına entegrasyonu ile yüksek kalitede ve gerçekçi bir sanal tur oluşturulması olarak belirlenmiş ve bu hedef doğrultusunda tüm uygulamalar planlandığı şekilde eksiksiz şekilde tatbik edilmiştir. GTÜ kampüs alanında Unity oyun motoru ile oluşturulmuş sanal turun çok yüksek mekansal çözünürlük ve orijinale çok yakın spektral özelliklere sahip verilerden oluşturulmuş olması oldukça gerçekçi bir VR ortamının elde edilebilmesini sağlamıştır. Geliştirilen sanal turu, GTÜ kampüsü hakkında fikir sahibi olmak isteyen aday öğrenciler kullanabilecektir. Ek olarak, üretilen yüksek kaliteli DT, inşaat faaliyetlerinde yüksek doğruluklu metrik hesaplamalar yapılabilmesi için idealdir. Ayrıca, bilgi sistemleri kurulması, akıllı kampüs uygulamaları, GNSS gözlemlerinde sinyal yollarının 3B gözlemlenmesi vb. temelinde bilimsel araştırmalar için de çok önemli faydalar sağlama potansiyeli bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

Agisoft, (2024), https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf. Erişim Tarihi: 01.08.2024.

Ball M., (2022), “The Metaverse: And How It Will Revolutionize Everything”, Liveright Publishing.

BMBF, (2015a), <https://www.bmbf.de/de/industrie-4-0-kommt-auf-den-hallenboden1016.html>. Erişim Tarihi: 01.08.2024.

BMBF, (2015b), <http://www.bmbf.de/de/9072.php>. Erişim Tarihi: 01.08.2024.

Chen C., Wang H., Wang D., Wang D., (2024), “Towards the digital twin of urban forest: 3D modeling and parameterization of large-scale urban trees from close-range laser scanning”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 127, 103695.

Coorg S., Teller S., 1997, “Real-time occlusion culling for models with large occluders”, In *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics*, 83-90, Providence RI, USA, 27-30 April.

Derya H., (2018), “Endüstri devrimleri ve endüstri 4.0”, *GÜ İslahiye İİBF Uluslararası E-Dergi*, 2 (2), 1-20.

Gupta A., Fernando X., (2022), “Simultaneous localization and mapping (slam) and data fusion in unmanned aerial vehicles: Recent advances and challenges”, *Drones*, 6 (4), 85.

Joshi N., Baumann M., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Hostert P., Jepsen M. R., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T., Reiche J., (2016), “A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring”, *Remote Sensing*, 8 (1), 70.

Kato A., Ohno N., (2009), “Construction of three-dimensional tooth model by microcomputed tomography and application for data sharing”, *Clinical Oral Investigations*, 13 (1), 43-46.

Levine N. M., Spencer Jr B. F., (2022), “Post-earthquake building evaluation using UAVs: A BIM-based digital twin framework”, *Sensors*, 22 (3), 873.

Mohammadi M., Rashidi M., Mousavi V., Karami A., Yu Y., Samali B., (2021), “Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study”, *Remote Sensing*, 13 (17), 3499.

Open Geospatial Consortium, (2021), “OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard”, 429.

Roggero M., Diara F., (2024), "Multi-sensor 3D survey: Aerial and terrestrial data fusion and 3D modeling applied to a complex historic architecture at risk", *Drones*, 8 (4), 162.

Sefercik U. G., Atesoglu A., (2017), "Three-dimensional forest stand height map production utilizing airborne laser scanning dense point clouds and precise quality evaluation", *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 10 (2), 491.

Sefercik U. G., Karakis S., Atalay C., Yigit I., Gokmen U., (2018), "Novel fusion approach on automatic object extraction from spatial data: Case study Worldview-2 and TOPO5000", *Geocarto International*, 33 (10), 1139-1154.

Sefercik U. G., Kavzoglu T., Nazar M., Atalay C., Madak, M., (2022), "Creation of a virtual tour. exe utilizing very high-resolution RGB UAV data", *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9 (4), 151-160.

Sefercik U. G., Nazar M., (2023a), "Consistency analysis of RTK and non-RTK UAV DSMs in vegetated areas", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 5759-5768.

Sefercik U. G., Kavzoglu T., Colkesen I., Nazar M., Öztürk M. Y., Adali S., Dinc S., (2023b), "3D positioning accuracy and land cover classification performance of multispectral RTK UAVs", *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8 (2), 119-128.

Shabani A., Skamantzari M., Tapinaki S., Georgopoulos A., Plevris V., Kioumarsis M., (2022), "3D simulation models for developing digital twins of heritage structures: challenges and strategies", *Procedia structural integrity*, 37, 314-320.

Sobura S., Bacharz K., Granek G., (2023), "Analysis of two-option integration of unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning data for historical architecture inventory", *Geodesy and Cartography*, 49 (2), 76-87.

Tan J., Leng J., Zeng X., Feng D., Yu P., (2022), "Digital twin for Xiegong's architectural archaeological research: A case study of Xuanluo Hall, Sichuan, China", *Buildings*, 12 (7), 1053.

Van C. L., Cao C. X., Nguyen A. N., Pham C. V., Nguyen L. Q., (2023), "Building 3D CityGML models of mining industrial structures using integrated UAV and TLS point clouds", *International Journal of Coal Science & Technology*, 10 (1), 69.

Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M., (2012), "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications", *Geomorphology*, 179, 300-314.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Madak, 2016 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geomatik Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2022 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Muhammed, 2016-2018 yılları arasında CartoSpace şirketinde AR-GE mühendisi olarak görev yapmıştır. 2018 yılından bu yana Gizil şirketinde çalışmakta olup, şu anda Dijitalleşme ve Bilgi Teknolojileri yöneticisi pozisyonunda görev yapmaktadır.

TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Sefercik U. G., Madak M., Nazar M., (2024), “Precise digital twin production by UAV and TLS data fusion”, 9th Advanced Engineering Days (AED), Tabriz, Iran, 9-10 July.