



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**3 BOYUTLU İÇ MEKAN HARİTALAMA VE
DİJİTAL İKİZ OLUŞTURMA; SARAYÖNÜ
YERALTI ŞEHİRİ ÖRNEĞİ**

Ali BODU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

**Nisan-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali BODU tarafından hazırlanan “3 Boyutlu İç Mekan Haritalama ve Dijital İkiz Oluşturma; Sarayönü Yeraltı Şehri Örneği” adlı tez çalışması 16/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat UYSAL

.....

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Abdullah VARLIK

.....

Üye

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ali BODU

Tarih: 09/05/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

3 BOYUTLU İÇ MEKAN HARİTALAMA VE DİJİTAL İKİZ OLUŞTURMA; SARAYÖNÜ YERALTI ŞEHİRİ ÖRNEĞİ

Ali BODU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Abdullah VARLIK

2025, 53 Sayfa

Jüri

Dr. Öğretim Üyesi Abdullah VARLIK
Prof. Dr. Murat UYSAL
Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

Son zamanlarda, Lazer Tarama ve İnsansız Hava Araçları (İHA) teknolojisinin gelişmesi ile beraber, üç boyutlu bina modelleme, üç boyutlu arazi modelleme, üç boyutlu arazi modellerinden ölçü alma gibi işlemler mühendislik kuruluşlarında daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Üç boyutlu verilerin üretimi, bilginin, görsel verilerle beraber desteklenerek daha iyi anlaşılabilir hale getirilmesi açısından popüler hale gelmiştir. Günümüzde, özellikle Belediyeler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Kültür ve Turizm Bakanlığı ve diğer mühendislik kuruluşları, dijital ikiz kavramı üzerinde daha çok durmaya başlamış ve yapılara ait 3 boyutlu modelleri hava fotogrametrisi veya Lazer Tarama teknolojilerinden faydalanarak üretmeye ve kent bilgi sistemlerinde yapıların üç boyutlu modelleri ile beraber binalara ilişkin sözel bilgileri de birlikte sunmaya başlamıştır. Bu çalışmada, Konya İli, Sarayönü İlçesi, Yukarı Mahalle sınırları içinde keşfedilen Sarayönü Yeraltı Şehrinin Lazer Tarama teknolojisi ile dijital ikiz modelinin oluşturulması ve İHA fotogrametrisi ile oluşturulan yeryüzü modeli ile karşılaştırılarak elde edilen dijital ikiz verilerinin değerlendirilmesi yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3B Binalar, Ayrıntı Düzeyi (LOD), Dijital İkiz, İHA Fotogrametrisi, Lazer Tarama, Yeraltı Şehri.

ABSTRACT

MS

3D INTERİOR MAPPING AND DİGİTAL TWİN CREATION; THE CASE OF SARAYÖNÜ UNDERGROUND CİTY

Ali BODU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE**

Advisor: Asst.Prof.Dr. Abdullah VARLIK

2025, 53 Pages

Jury
Asst.Prof.Dr. Abdullah VARLIK
Prof.Dr. Murat UYSAL
Prof.Dr. İbrahim KALAYCI

Recently, with the advancement of Laser Scan and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology, processes such as three-dimensional building modeling, terrain modeling, and obtaining measurements from three-dimensional terrain models have begun to be more widely used in engineering organizations. The production of three-dimensional data has become popular in terms of making information more understandable by being supported with visual data. Nowadays, especially municipalities, the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change, the Ministry of Culture and Tourism, and other engineering organizations have started to focus more on the concept of the digital twin and have begun to produce three-dimensional models of structures using photogrammetry or Laser Scan technology and to present verbal information related to buildings alongside the three-dimensional models in urban information systems.

Keywords: 3D Buildings, Level of Detail (LOD), Digital Twin, İHA Photogrammetry, Laser Scan, Underground City.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmam süresince bana rehberlik eden ve bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Abdullah VARLIK'a çok teşekkür ediyorum. Ayrıca, desteklerini esirgemeyen, Sarayönü Belediyesi ve personelleri, Konya Büyükşehir Belediyesi İmar ve Şehircilik Dairesi Başkanlığı ve Konya Büyükşehir Belediyesi personellerinden Harita Yüksek Mühendisi Azim METİN beye, Harita Yüksek Mühendisi Kasım ERDAL beye ve Necmettin Erbakan Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine de teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, her zaman yanımda olan ve manevi desteğini hiç esirgemeyen eşim Asiye BODU ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ali BODU
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1. İHA Fotogrametrisi.....	12
3.2. Yersel Lazer Tarama Teknolojisi	15
3.3. Dijital İkiz	17
3.4. İç Mekan Haritalama	18
3.5. Üç Boyutlu Sayısal Yapı Modellerinin Web Ortamında Sunulması.....	19
3.5.1. Sketchfab	19
3.5.2. CesiumJS.....	20
3.5.3. Potree.....	20
3.5.4. ArcGIS Online + Scene Viewer	20
3.5.5. Blender + Three.js veya Verge3D	21
4. UYGULAMA.....	22
4.1. Çalışma Alanı	22
4.2. İHA ile Görüntü Alımı.....	23
4.3. Yersel Lazer Tarama ile Ölçüm	27
4.4. Verilerin Analiz Edilmesi	29
4.5. Dijital İkiz Oluşturma	34
4.6. Verilerin Üç Boyutlu Web Tabanlı Sunumu.....	37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	42
6. KAYNAKLAR.....	43

KISALTMALAR

Kısaltmalar

HGK: Harita Genel Komutanlığı
İHA: İnsansız Hava Aracı
LOD: Level Of Detail (Ayrıntı Düzeyi)
CBS: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CityGML: City Geography Markup Language
BIM: Building Information Modelling
YKN: Yer Kontrol Noktası
GNSS: Global Navigation Satellite System
GPS: Global Positioning System
RTK: Real Time Kinematik
SAM: Sayısal Arazi Modeli
SYM: Sayısal Yüzey Modeli
nSYM: Normalize Edilmiş Sayısal Yüzey Modeli
RANSAC: Random Sample Consensus
SMRF: Simple Morphological Filtering
NDVI: Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi
SLAM: Simultaneous Localization and Mapping
DTED2 : Digital Terrain Elevation Data
PCL: Point Cloud Library
BIPV: Binaya Entegre Fotovoltaikler
SLOD3: Sub-Level Of Detail 3
IFC: Industry Foundation Classes
EPSG: European Petroleum Survey Group
SD Memory Card: Secure Digital Memory Card
WebGL: Web Graphics Library
SfM: Structure from Motion

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar insanlı hava araçları kullanılarak fotogrametrik yöntemlerle sayısal haritalar üretilmiş ve çeşitli amaçlarla kullanıcılara sunulmuştur. Özellikle büyük arazi alanlarının haritalanmasında insanlı uçaklardan elde edilen hava fotoğrafları temel veri kaynağı olmuştur. Ancak, teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte, bu geleneksel yöntemler yerini daha esnek, ekonomik ve güvenli çözümler sunan insansız hava araçlarına bırakmaya başlamıştır. İnsansız hava araçları sayesinde daha düşük maliyetle, daha kısa sürede ve insan hayatını riske atmadan veri toplamak mümkün hale gelmiştir. İHA tabanlı fotogrametri uygulamaları, özellikle üç boyutlu modellerin üretilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamış, bu sayede haritacılık, mimarlık, arkeoloji ve inşaat mühendisliği gibi birçok alanda etkin bir kullanım imkânı doğmuştur.

İHA'ların sağladığı bu önemli kazanımlara rağmen, kapalı mekânların, mağaraların veya yeraltı yapılarının üç boyutlu modellenmesi açısından bazı sınırlamalar söz konusudur. GPS sinyalinin zayıf olduğu veya tamamen kaybolduğu kapalı alanlarda İHA kullanımı mümkün olmamakta, bu da, yeraltı şehirleri gibi yapılar için farklı teknolojilere ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır. Bu noktada Lazer Tarama teknolojisi devreye girmekte ve kapalı mekânların hassas bir şekilde üç boyutlu modellerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Lazer Tarama teknolojisinin temel mantığı, bir ortamda yüksek hassasiyetle gerçekleştirilen taramalar sonucu oluşan nokta bulutlarının bilgisayar ortamında işlenmesi ve dengeleme işlemleri yapılarak üç boyutlu bir modelin elde edilmesidir. Tarama işlemi sırasında cihazdan çıkan lazer ışınları çevre yüzeylerine çarparak geri döner. Lazerin gönderilmesi ile dönüşü arasındaki süre farkı ölçülerek mesafe hesaplanır ve bu işlem milyonlarca nokta için yapılır. Böylece, taranan alanın üç boyutlu, gerçek mekânsal koordinatlara sahip bir dijital temsilini oluşturan nokta bulutları meydana gelir. Elde edilen bu veriler özel yazılımlar aracılığıyla işlenerek, detaylı ve doğru üç boyutlu modeller elde edilir. Özellikle kapalı alanlarda gerçekleştirilen taramalarda, her bir tarama pozisyonu ayrı ayrı nokta bulutu üretir ve bunların birleştirilmesi işlemi büyük önem taşır. Bu işlem sırasında farklı tarama konumlarından elde edilen nokta bulutları arasındaki ortak noktalar veya hedefler kullanılarak veriler hizalanır ve bütüncül bir üç boyutlu model ortaya çıkarılır. Bu sayede yalnızca

görselleştirme değil, aynı zamanda hassas ölçüm ve analiz yapılabilecek dijital ortamlar oluşturulabilir.

Bu çalışmanın temel amacı, Lazer Tarama teknolojisi kullanılarak Sarayönü Yeraltı Şehri'nin dijital ikizinin oluşturulması ve İHA teknolojisiyle elde edilen yeryüzü modelinin bu verilerle entegre edilmesidir. Çalışmada iki aşamalı bir yöntem izlenecektir. Öncelikle Sarayönü Yeraltı Şehri'nin mevcut durumda temizlik ve restorasyon çalışmaları tamamlanan bölümleri, yersel tabanlı lazer tarayıcılar kullanılarak üç boyutlu olarak taranacaktır. Elde edilen nokta bulutları, özel yazılımlar yardımıyla birleştirilecek ve yeraltı şehrinin detaylı bir dijital modeli oluşturulacaktır. Ardından, aynı bölgenin yeryüzü kısmı İHA'lar yardımıyla fotogrametrik teknikler kullanılarak üç boyutlu olarak modellenip yüzey modeli üretilecektir. Son aşamada ise iki veri seti birbiriyle karşılaştırılarak analizler yapılacaktır. Böylece, yeraltı şehrinin yeryüzü üzerindeki izdüşümleri belirlenebilecek, odalar ve koridorların hangi yüzey noktalarına denk geldiği tespit edilebilecektir. Ayrıca, iç mekân hava sirkülasyonu için uygun havalandırma deliklerinin nerelere açılabileceği bilimsel yöntemlerle değerlendirilecektir. Bu çalışma ile elde edilecek üç boyutlu model, web tabanlı platformlarda yayımlanarak kamuoyunun erişimine sunulacak ve bilimsel çalışmalar için de bir temel veri kaynağı oluşturacaktır.

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel bir nesnenin veya sistemin sanal bir kopyasının oluşturulması sürecini tanımlar. Bu teknoloji, gerçek dünya varlıklarının sürekli olarak güncellenen ve sensör verileriyle desteklenen dijital temsilini içerir. Endüstri 4.0 kapsamında üretim sistemlerinden akıllı şehirlere kadar geniş bir uygulama alanına sahip olan dijital ikizler, son yıllarda kültürel miras alanında da önemli bir araç haline gelmiştir. Sarayönü Yeraltı Şehri gibi kültürel miras alanlarının dijital ikizlerinin oluşturulması, bu değerlerin korunması, belgelenmesi ve gelecek nesillere aktarılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, fiziksel erişimin zor veya riskli olduğu yapıların dijital ikizleri üzerinden sanal ziyaretler yapılabilmekte, restorasyon ve onarım çalışmalarına yönelik planlamalar daha etkin şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu proje kapsamında oluşturulacak dijital ikiz, sadece mevcut durumun belgelenmesi ile sınırlı kalmayacak, aynı zamanda yeraltı şehrinin zaman içerisindeki değişimlerinin izlenebilmesine ve risklerin önceden tespit edilerek müdahale stratejilerinin geliştirilmesine de olanak tanıyacaktır. Böylelikle kültürel miras yönetiminde dijital ikiz teknolojisinin sağlayacağı katkılar somut bir örnekle ortaya konmuş olacaktır.

İç mekân haritalama, özellikle GPS sinyalinin yetersiz olduğu kapalı alanlarda konumlandırma, navigasyon ve alan yönetimi için kritik bir teknolojidir. Geleneksel yöntemlerle iç mekânların ölçülmesi uzun zaman alırken ve yüksek hata payı içerirken, lazer tarama ve görsel odometri gibi modern yöntemler bu süreci daha hızlı, daha doğru ve daha verimli hale getirmiştir. Lazer tarama ile desteklenen iç mekân haritalama çalışmaları, büyük mağaralar, yeraltı şehirleri, tarihi yapılar ve sanayi tesisleri gibi karmaşık ortamların detaylı olarak belgelenmesine olanak tanımaktadır. Üstelik, mobil lazer tarayıcılar veya SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) teknolojisine sahip cihazlar kullanılarak, kullanıcıların alanı doğal bir şekilde dolaşarak harita çıkarması mümkün hale gelmiştir. Sarayönü Yeraltı Şehri çalışması, iç mekân haritalamanın kültürel miras alanındaki uygulamalarına somut bir örnek teşkil edecek, böylece yalnızca yerüstü modellemeye değil, aynı zamanda yeraltı mekânlarının da dijitalleştirilmesine katkı sağlayarak sektörel anlamda yeni bir yaklaşım geliştirilmesine imkân sunacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

1950'li yıllardan önce binalara ait tüm çizimler el yordamıyla yapılmaktaydı. Ancak, el yordamıyla yapılan bütün çizimler hem zaman alıyordu hem de hata yapma riski çok yüksekti. Bu nedenle 1950' yıllarda, Patrick J. Hanratty tarafından 2 boyutlu dijital çizim modeli ortaya çıkarıldı. Bu gelişme ile beraber bir çok bina çizimi dijital olarak çizilmeye başlandı. Ancak, binalar ile ilgili daha net bilgi elde edilebilmesi ve daha doğru kararlar alınabilmesi için 2 boyutlu çizimler yeterli değildi. Bu nedenle, 1974 yılında Charles Eastmen tarafından 3 boyutlu yapı bilgi modellemesi kavramı ortaya atılmıştır (Bolpagni, 2022, s. 30).

Teknolojinin gelişmesi ile beraber üç boyutlu bina çizimleri ile ilgili bir çok program yazılmıştır ve birçok teçhizat üretilmiştir. Günümüzde de halen daha profesyonel ürünler üretilmekte ve üretilmeye devam etmektedir.

Metin (2016) yılında yapmış olduğu çalışmada, üç boyutlu kent modelleri ve LOD seviyeleri hakkında bilgiler verip LOD seviyeleri arasındaki farkları ortaya koymuştur. Yersel fotogrametri ile hava fotogrametrisi hakkındaki tanımlamaları yapıp aralarındaki farkları anlatmıştır. Lazer Tarama ile ilgili ayrıntılı bilgilere yer verilmiş olup, Lazer Tarama ile ilgili teorik bilgiler anlatılmıştır. Uygulamada Konya İnce Minareli Medreseyi konu almışlardır. Öncelikle İnce Minareli medresenin tarihsel değişimi anlatılmış ve medresenin Faro Focus3D X 330 yersel Lazer Tarama tarayıcı ile içten ve dıştan olmak üzere hem yatay hem de düşey olarak taramaları yapılmıştır. Lazer Tarama tarayıcı toplamda 37 farklı konuma tesis edilerek taramalar tamamlanmıştır. Tarama sonucu oluşan gereksiz noktalardan kurtulmak için Pointools yazılımı kullanılmıştır. Ardından Autocad programı ile cephe çizimleri yapılmıştır. Cephe çizimleri yapıldıktan sonra binaya ait iç mekan modellemesi 3D Max programı ile dış cephe modellemesi ise 3D Reshaper programı ile yapılmıştır. Modellemeler bittikten sonra medreseye ait çizimler tüm LOD seviyelerinde gösterilmiştir. Sonuç olarak Lazer Tarama ile yapılan taramaların avantajları ve dezavantajları anlatılmış olup, görsel açıdan, üç boyutlu kent modellemesi ve veri doğruluğu yönünden çok avantajlı olduğu belirtilen çalışmanın, çok fazla nokta bulutunun olması, çok büyük veri boyutlarının olması ve bu verilerin depolanması ve işlenebilmesi için yüksek performanslı bilgisayarlar gerektiğinin belirtilmesi dezavantaj olarak değerlendirilmiştir.

Erdönmez (2018) yılında yapmış olduğu çalışmada, İHA'lar ile eğik resim çekimleri hakkında teknik bilgiler vermiştir. Eğik resim çekiminin kullanım alanlarından

bahsetmiştir. Üç boyutlu kent modellerine değinerek dünyadaki üç boyutlu kent modellerinden örnekler vermiştir. Üç boyutlu kent modellerinin oluşturulmasında ayrıntı düzeyi (LOD) kavramlarından bahsetmiş, ayrıntı düzeyleri (LOD0, LOD1, LOD2, LOD3, LOD4) arasındaki farkları göstermiştir. Eğik resim fotogrametrisi için Konya İli, Meram İlçesinde 234 m x 332 m ebatlarında arazi eğiminin ve binaların fazla olduğu bir bölge seçmiştir. Çalışmada hava fotoğrafları çekimi için DJI Phantom Pro 3 marka/model İHA, yer kontrol noktalarının ölçümü için Stonex marka GNSS alıcısı ve bir de çekilen fotoğrafların dengelenmesi amacıyla bir bilgisayar tercih etmiştir. Uygulama esnasında düşey ve eğik çekimler yapmıştır ve 46 adet YKN tesis etmiştir. Uygulama sonrasında tüm görüntüler Agisoft Photoscan yardımıyla hizalama işlemleri yapılmış, 46 adet YKN noktası programda ilgili alanlara girildikten sonra fotoğraf hizalama işlemi yapılmıştır ve nokta bulutu üretmiştir. Nokta bulutu ile ortofoto harita ve halihazır harita üretimleri yapılmıştır. Uygulama sahası içerisindeki tüm binalara ait silüetlerin çıkarılması ve röleve işlemleri Autocad ReCap programı ile yapılmıştır. Ayrıca sokak haritası ve ağaç ve kutur ölçümleri de yapılmıştır. Eğik ve düşey hava fotoğrafları arasındaki farklar incelenmiş, sonuç olarak eğik ve düşey hava fotoğrafları ile oluşturulan üç boyutlu modellerde çok büyük farkların olduğu sonucuna varmıştır.

Koçyiğit (2020) yılında yapmış olduğu çalışmada, coğrafi bilgi sistemleri ve arkeoloji hakkında önemli bilgiler vermiştir. Coğrafi bilgi sistemlerinin Türkiye' deki kullanım alanlarına yer vermiştir. Bir sit alanının nasıl tespit ve tescil edildiğine dair işlem aşamaları anlatılmıştır. Yersel ve fotogrametrik ölçüm sistemlerinden bahsetmiştir. Türkiye ve dünyadaki arkeolojik alanlara yönelik yapılan CBS örneklerinden bahsetmiştir. İHA fotogrametrisini ayrı bir başlık altında ayrıntılı olarak incelemiştir. Uygulama sahası olarak Mersin İlçesi, Anamur İlçesi, Ören Beldesi sınırları içerisinde yer alan Anemurium kentini seçmiştir. Ölçüm işleri için DJI Phantom 3 İHA ve SATLAB SL500 GNSS kullanmıştır. İHA ile elde edilen görüntülerin dengelenmesi için Agisoft Photoscan programı kullanmıştır. Yapılan uçuş ve yersel olarak elde edilen koordinatları Agisoft Photoscan programına entegre edilmiş ve görüntü dengeleme ve hizalama işlemleri yapmıştır. Elde edilen üç boyutlu harita, Arcgis programına aktarılmış ve burada da görüntü üzerindeki tarihsel yapılara ilişkin bilgiler içeren veritabanları oluşturmuştur. Oluşturulan harita ve veritabanı birbiri ile ilişkilendirmiştir. Yapılan çalışmanın süreklilik ve sürdürülebilirlik açısından turizm ve coğrafi bilgi sistemlerine çok büyük katkılar sağlayabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Dursun (2022) yılında yapmış olduğu çalışmada, yersel ve hava fotogrametrisi ile elde edilen verilerin farklı ayrıntı düzeylerinde elde edilmesi ve bunun yapı bilgi modellemesi ile entegrasyonu hakkında çalışma yapmıştır. Çalışma alanı olarak Necmettin Erbakan Üniversitesi Köyceğiz Kampüsü Sosyal ve Beşerî İlimler Fakültesi seçmiştir. Çalışma için seçtikleri binada iç mekanların taramasını GeoSLAM Zeb-Revo El tipi Lazer tarayıcı ile yapmış ve çatı katları ve peyzaj ile ilgili bilgileri de DJI Phantom 4 RTK kullanılarak çekilen hava fotoğraflarından elde etmiştir. Elde edilen verilerin işlenmesi ve değerlendirilmesi için ise Pix4d, Autodesk ReCap ve 3DReshaper programlarını kullanmıştır. Elde edilen LOD4 seviyesindeki ürünü VirtualcityMap programı yardımıyla web üzerinden sunmuştur. Ayrıca çalışma konusu binaya ait fiber, doğalgaz, atıksu gibi altyapı bilgileri de binaya ait projelerden elde ederek YBM' ye entegre etmiştir. Sonuç olarak, elde edilen LOD 4 seviyesindeki CityGML verisinin afet riski altındaki ülkemiz göz önüne alındığında çok büyük bir öneme sahip olduğu, herhangi bir afet durumunda bu 3 boyutlu verilerden yararlanabileceği ve çözüm üretilebileceği düşünülmüş ve CBS-YBM yönteminin yaygınlaştırılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Sağlam (2022) yılında yapmış olduğu çalışmada, nadir ve oblik fotogrametri ile elde edilen fotoğraflardan 3 boyutlu şehir modellemesi yapmış ve 3 boyutlu veri üretiminde kullanılan programların karşılaştırılması ve sonuçların 3 boyutlu şehir modellemesine olan etkilerini araştırmıştır. Bunun için çalışma alanı olarak Kütahya şehir merkezi seçilmiş ve TKGM' nin envanterinde bulunan Beechcraft King Air 350i uçağı üzerinde bulunan UltraCam Osprey Mark 3 Premium kamerası ile elde edilmiş 2019 yılına ait fotoğraflar kullanmıştır. Kullanılan fotoğraflar ile çatı detayları, nokta bulutu, sayısal yüksekli modeli, mesh model, katı model kaplama ve true ortofoto verileri elde edilmiş, elde edilen bu modeller Agisoft metashape, Pix4d, ContextCapture, İnpho yazılımları ile dengeleme işlemlerini yapmış ve Citygrid yazılımı ile katı modelleri üretmiştir. Üretilen verilerde her programın farklı noktalarda birbirlerine karşı üstün olduğu yerler var olduğu tespit edilmiş ve oblik fotogrametri ile elde edilen 3 boyutlu modellerin nadir fotoğraflardan elde edilen 3 boyutlu modellere göre daha doğru ve daha hassas sonuç verdiği sonucuna ulaşmıştır.

Nasery (2021) yılında yapmış olduğu çalışmada, hava fotoğrafları ile oblik ve nadir olarak çekilen fotoğraflar ile elde edilen 3 boyutlu arazi modellerinde YKN' li ve YKN' siz olarak elde edilen modellerin karşılaştırılmasını ve doğruluk analizlerini yapmıştır. Bu kapsamda, çalışma alanı olarak Sivas İli, Gürün İlçesi, şuşul vadisini

seçmiştir. YKN tesisi için CHC X95 marka/model GNSS ve hava fotoğrafları çekimi için DJI Phantom 4 Pro marka/model İHA kullanmıştır. YKN' li ve YKN' siz elde edilen verilerden farklı arazi tiplerinde aynı yerlere ait uzunluk, alan ve hacim ölçmeleri gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak farklı arazi tiplerinde YKN' li ve YKN' siz olarak elde edilen uzunluk, alan ve hacim hesaplarında birbirlerine çok yakın sonuçlar elde edilmiş ve mühendislik ölçmelerinde YKN' siz olarak da doğru ve hassas olarak veri elde edilebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Erol (2022) yılında yapmış olduğu çalışmada, tarihi yapıların 3 boyutlu olarak modellenerek bunun turistik ve ekonomik açıdan ne tür katkılar sağlayabileceği ve restorasyon çalışmalarına ne tür faydalar sağlayabileceği konusunu araştırmıştır. Bu kapsamda, Adıyaman İli, Besni İlçesi sınırları içerisinde bulunan Kızılın köprüsü, Adıyaman İli, Kahta İlçesi sınırları içerisinde bulunan Karakuş Tümülsü ve Karakuş Tümülsü içerisindeki Aslan Başı heykelinin 3 boyutlu modellemesini yapmıştır. Çalışmada hava fotoğrafları çekimi için DJI Mavic 2 pro İHA ve YKN tesisleri için Stonex S900A marka/model GNSS aletini kullanmıştır. Kızılın köprüsünün 3 boyutlu modelinin çıkarılabilmesi için DJI Mavic 2 pro İHA kullanmışlar ve fotoğrafların dengelenmesi ve 3 boyutlu modelinin çıkarılması için Agisoft Photoscan programını kullanmıştır. Köprünün ortofoto üzerinden halihazır haritalarının oluşturulabilmesi için Netcad 5.2 programını kullanmıştır. Ayrıca 3 boyutlu görsellerin web üzerinden diğer kullanıcılara da sunulabilmesi adına Sketchfab programını kullanmıştır. Aynı şekilde, Karakuş Tümülsünün üç boyutlu modellenmesi, halihazır haritasının üretilmesi ve web ortamında sunulabilmesi için DJI Mavic 2 pro İHA ile hava fotoğraflarını elde etmiş ve Agisoft Photoscan, Netcad 5.2 ve Sketchfab programları kullanmıştır. Karakuş Tümülsü içerisindeki Aslan Başı heykelinin 3 boyutlu modellemesinin yapılabilmesi için ise yersel fotogrametriden yararlanmıştır. Dengeleme ve 3 boyutlu model üretimi Agisoft Photoscan programı aracılığı ile yapmış ve web ortamında sunulabilmesi için Sketchfab programını kullanmıştır. Sonuç olarak, tarihi yapıların İHA ve yersel fotogrametri ile elde edilmesi hem bu yerlere gelemeyen insanların tarihi kıymetlerimizin web üzerinden tanımalarına olanak sağlayacağı, hem de geçmişten günümüze kadar gelebilen bu yapılardaki deformasyonların belirlenmesi ve restorasyon çalışmalarına büyük ölçüde ışık tutabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Beg (2018) yılında yapmış olduğu çalışmada, Konya İli, Meram İlçesi, Hatunsaray Mahallesi sınırları içerisinde yer alan Kilistra Antik Kentinde yer alan Başpınar Sarnıcı, Seramik Atölyesi ve Haç Kilisesinin İHA ve Yersel fotogrametri

kullanılarak iç ve dış mekanlarının 3 boyutlu modellemesini yapmıştır. Araştırmacı bu çalışma ile tarihi yapıların korunması ve belgelenmesini amaçlamıştır. Ayrıca, 3 boyutlu veri üretimi için kullanılan programların doğruluk, hız, ekonomik yönden araştırmasını ve farklı programların birbirleri ile entegrasyonunu araştırmıştır. İç mekan ölçmeleri FaroFocus 3D X 330 Lazer Tarama tarafından, dış mekan için DJI Phantom 3 İHA kullanmıştır. Lazer Tarama verilerinden iç mekanlara ait 3 boyutlu model elde edilebilmesi için Faro Scene yazılımı ve JRC 3D Reconstructor yazılımlarını kullanmıştır. Dış mekan modellemeleri için Pix4d ve Agisoft Photoscan programlarını kullanmıştır. Ayrıca ölçümler sonucu elde edilen vektör verilerin Autodesk Civil 3D ve Arcmap programlarına aktarımları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, İç mekan ile dış mekan ölçümlerinin birbiri ile birleştirilmesi açısından JRC 3D Reconstructor programının Faro Scene programına nazaran daha iyi sonuç verdiği, İHA ile elde edilen verilerin daha kaliteli sonuçlar verebilmesi için daha üstün özelliklere sahip İHA' lar kullanılabilceği, İHA ve Lazer Tarama verilerinin entegrasyonunun daha iyi sağlanabilmesi için ise daha profesyonel yazılımların kullanılabilceği, YKN' li ve YKN' siz olarak elde edilen hava fotoğraflarında YKN' li olarak elde edilen üç boyutlu dış mekan ölçmelerinin daha doğru olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Zeybek (2019) yılında yapmış olduğu çalışmada, el tipi Lazer Tarama tarama aletlerinin doğruluğu ve kullanılabilirliği açısından araştırma yapmıştır. Bu kapsamda, Zeb-Revo GeoSLAM el tipi Lazer Tarama tarama aleti ile Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesinde çalışmıştır. El tipi Lazer Tarama tarama aleti ile ölçümler yapılmış ve Lazer Tarama nokta bulutu üzerine görüntü giydirme işlemi için İHA ile hava fotoğraflarından faydalanmıştır. Elde edilen üç boyutlu modelde doğruluk analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz ile el tipi Lazer Tarama tarama işlemlerinin yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmüştür. Bu yöntem ile topografik harita yapımı ve iki boyutlu haritalandırma işlemleri konusunda istenilen doğrulukta ürünler elde edilebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Karataş, Alptekin, Kanun ve Yakar (2022) yılında yapmış oldukları çalışmada, arkeolojik tescilli yapıların hava fotogrametrisi ile 3 boyutlu modellerinin çıkarılarak yapılara ait bozulmaların tespit edilmesini ve belgelenmesini amaçlanmıştır. Bu kapsamda, araştırma için Mersin İli, Erdemli İlçesi sınırları içerisinde yer alan Kanlıdivane Ören yerindeki Olba Krallığına ait bir anıtmezar seçmişlerdir. İHA yardımıyla anıt mezara ait yakından hava fotoğrafları çekilmiştir. Çekilen fotoğraflar yardımıyla elde edilen 3 boyutlu model incelendiğinde, tarihi yapılarda oluşan

deformasyonların büyük çoğunluğunun insan kaynaklı hava kirliliğinden olduğu, güneş kararması, parça kopması, çiçeklenme gibi deformasyonlar ise diğer bozulma çeşitleri olarak sıralanmış, tarihi yapıların temizlenmesinde yapıların malzeme türüne göre temizlik seçenekleri uygulanması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Akın ve Erdoğan (2022) yılında yapmış oldukları çalışmada, tarihi yapıların İHA ile belgelenmesini ve yersel Lazer Tarama tekniklerine göre avantajlarını araştırmışlardır. Bu kapsamda, çalışma için Yozgat İli, Sakarya İlçesi sınırları içerisinde yer alan Sarıkaya Roma Hamamı seçilmiştir. Çalışma için Hi-Target V90 marka/model GNSS, DJI Mavic Pro 2 marka/model İHA, Faro Focus marka lazer tarayıcı ve program olarak Pix4d yazılımını kullanmışlardır. Sonuç olarak 3 boyutlu yapı modellemesinde İHA sistemlerinin zaman, ekonomi, veri boyutu, CBS sistemlerine entegre edilebilirlik ve daha az uzman ekibe ihtiyaç duyulmasından dolayı Lazer Tarama sistemlerine göre daha avantajlı bir seçenek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Hamal ve Ulvi (2022) yılında yapmış oldukları çalışmada, İHA' lar ile elde edilen fotoğraflardan yer yüzeyi ve binalara ait 3 boyutlu modeller elde edilmesi ve sınıflandırma yöntemleri ile bina ayak izleri tespiti yapılmasını amaçlamışlardır. Bu kapsamda, çalışma alanı olarak Mersin İli, Yenişehir İlçesi içerisinde yer alan Mersin Üniversitesi kampüsünün bir bölümünü seçmişlerdir. Çalışmada bir İHA, YKN tesisi için bir GNSS aleti, Agisoft Metashape programı ve sınıflandırma işlemi için ArcGISPro programını kullanmışlardır. Elde edilen fotoğraflardan LOD1 seviyesinde 3 boyutlu model elde etmişlerdir. Daha sonra elde edilen sonuç ürün üzerinde sınıflandırma işlemi yapılarak SYM oluşturulmuştur. ArcGISPro yardımıyla da bina harici olan diğer unsurlar temizlenmiştir. Sonuç olarak, otomatik sınıflandırma işlemi yapılarak elde edilen 3 boyutlu kent modellerinin daha gerçekçi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Ulvi ve ark. (2020) yılında yapmış oldukları çalışmada, Kültürel mirasların belgelenmesi amacıyla İHA ve yersel fotogrametri yöntemlerinin kullanılarak 3 boyutlu bina modellemesinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Aksaray İli, Güzelyurt İlçesi, Sivrihisar Köyü sınırları içerisinde bulunan Kızıl Kilisenin İHA ve yersel teknikler kullanılarak 3 boyutlu modellemesini yapmışlardır. Yersel ölçmeler için Topcon 7003i-İmaging-Total-Station ve hava fotoğrafları için DJI Phantom 3 Pro marka/model İHA kullanmışlardır. Elde edilen veriler Agisoft Photoscan programında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Sonuç olarak, elde edilen 3 boyutlu modellerden yüksek doğruluklu ölçüler alınabildiği, İHA ile elde edilen verilerin maliyet, zaman, doğruluk, hassasiyet ve görsel açıdan daha avantajlı olduğu ve tarihi eserlerin İHA yöntemiyle belgelenmesi,

kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılması açısından büyük öneme sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ulvi (2022) yılında yapmış olduğu çalışmada, İHA sistemleri ile 3 boyutlu bina modellemesinde, İHA ile çekilen bir binaya ait videodan, 3 boyutlu bina modellemesi elde edebilmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda, araştırma konusu için, Konya İli, Selçuklu İlçesi sınırları içerisinde yer alan Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi' ni seçmiştir. Video çekimi için döner kanatlı bir İHA kullanmış ve bina etrafında 3 dakika 28 saniyelik bir video verisi elde etmiştir. Elde ettiği bu video verilerinden 77 adet fotoğraf üretmiştir. Elde edilen bu fotoğraflardan farklı algoritmalar ile 3 boyutlu bina modellemesi yapmıştır. Sonuç olarak İHA' lardan video çekilerek elde edilen 3 boyutlu modeller, fotoğraf çekilerek elde edilen 3 boyutlu modellere göre daha az sürede veri elde edilebildiği sonucuna ulaşmıştır.

Ayyıldız, Soylu, Tuna, Özmüş ve Bakıcı (2017) yılında yapmış oldukları bildiride, oblik fotogrametri hakkında detaylı bilgilere yer vermiş ve kullanım alanları hakkında bilgiler vermişlerdir. Söz konusu bildiri ile oblik fotogrametri sayesinde elde edilebilecek verilerden Birdview, Mesh model, point cloud gibi verilerin ne olduğu ve nasıl oluşturulduğu hakkında bilgiler vermişlerdir. Üç boyutlu model üretiminin gelişmesi ile beraber CityGML standardının ortaya çıktığı ve bu standart ile beraber 3 boyutlu modellerin yalnızca görsel amaçlı kullanılmadığı aynı zamanda analiz yapma ve model üzerinden ölçü yapabilme yeteneğinin de geliştiği aktarılmıştır. CityGML formatında yer alan farklı ayrıntı düzeyleri olan LOD0, LOD1, LOD2, LOD3 ve LOD4 hakkında bilgiler vermişlerdir. Ayrıca ilgili bildiride, 3 boyutlu şehir modeli üretim aşamalarını YKN tesisi, Düşey ve eğik görüntü alımı, çatı detaylarının oluşturulması gibi konular hakkında bilgilendirme yapmışlardır.

Schuetz (2015) yılında yapmış olduğu çalışmada, büyük boyutlu nokta bulutlarını web ortamında sunabilmek için geliştirdiği Potree programını tanıtmıştır. Potree sayesinde Lazer Tarama' dan elde edilen veya Fotogrametrik olarak üretilen verilerin web ortamında gerçek zamanlı olarak görüntüleyebildiğini aktarmıştır. Potree ile özel bir programa gerek kalmadan 597 milyar noktaya kadar büyük nokta bulutlarını kamu ve özel sektör olmak üzere tüm kullanıcılarla web ortamında paylaşılabilmesi ve ayrıca detaylı bir uğraşıya gerek kalmadan nokta bulutu verilerinin web sunucularına yüklenebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Güvercin, Erdal, Makineci ve Guarnieri (2024) yılında yapmış oldukları çalışmada, Potree web tabanlı 3 boyutlu sayısal yapı modeli aracını kullanarak kültürel

miras eserlerinin dijital belgelenmesi ve paylaşılması sürecini incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma ile Ponte Molino Kapısı'nın 3D nokta bulutu verisi üzerinden Potree uygulamasının teknik özelliklerini ve işleyiş prensiplerini detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Potree'nin büyük veri setlerini etkin bir şekilde işleyebildiğini ve hızlı bir şekilde görselleştirilebildiğini tespit etmişlerdir. Programın herhangi bir üçüncü taraf uygulama yüklemeye gerek kalmadan verilerin paylaşılmasını kolaylaştırdığını bulmuşlardır. Dijital belgelenmenin hem erişilebilirliğini hem de verimliliğini artıran Potree uygulamasının potansiyelini ortaya koymuşlardır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İHA Fotogrametrisi

Türk Hava Kurumu İHA (İnsansız Hava Aracı) tanımını içinde herhangi bir insan olmayan, üzerinde sadece amaca uygun makine ekipmanı bulunduran, kumandalı veya kumandasız olarak kontrol edilebilen, ticari, askeri veya bilimsel olarak kullanılabilen bir araç olarak tanımlamıştır(Türk Hava Kurumu, t.y.).

Fotogrametrik anlamda sabit kanatlı ilk İHA uygulama denemesi Przybilla ve Wester Ebbinghaus tarafından 1979 yılında manuel kontrollü olarak 150 metre yükseklikten yapılmıştır (Şekil 3.1) (Nasery ve Maraş, 2021).



Şekil 3.1. Hege Firması Tarafından Üretilen Model Uçak (Przybilla ve Wester-Ebbinghaus, 1979)

Fotogrametrik olarak döner kanatlı ilk İHA uygulama denemesi Wester Ebbinghaus tarafından Schlüter Bell 222 marka/model helikopter ile yapılmıştır (Şekil 3.2) (Erdoğan ve Mutluoğlu, 2016).



Şekil 3.2. Schlüter Bell 222 marka/model helikopter (Wester-Ebbinghaus, 1980)

İHA Fotogrametrisi ile elde edilen 3 boyutlu modeller ele alındığında İHA' ların kullanım alanları aşağıdaki iş dallarına göre ayrılabilir:

- 1) Askeri Alanlar
- 2) Afet ve Riskli Bölge Yönetimi
- 3) Belediyecilik Uygulamaları (Halihazır Harita Üretimi, Kaçak Yapı Tespiti vb.)
- 4) Tarihi Eserlerin Belgelenmesi
- 5) 3 Boyutlu Kent Bilgi Sistemleri Üretilmesi
- 6) Altyapı Tesisleri
- 7) Karayolları Uygulamaları
- 8) Kadastro Uygulamaları
- 9) DSİ Uygulamaları
- 10) Gayrimenkul Değerleme ve Emlakçılık

İHA fotogrametrisi ile elde edilen fotoğraflardan 3 boyutlu model üretiminin tamamlanmasına kadar geçen süredeki iş adımlarına dikkat edilmelidir.

Yeni gelişen teknoloji ile tablet, telefon, Pc gibi cihazlar kullanılarak fotoğrafları çekilecek bölgenin sınırları rahatlıkla belirlenebilmektedir. Uçuş Planlaması, ilgili cihaz için üretilen ücretli veya ücretsiz uygulamalar sayesinde bu uygulamalar içerisinde bulunan uydu haritaları üzerinden işaretleme yoluyla yapılabilmektedir.

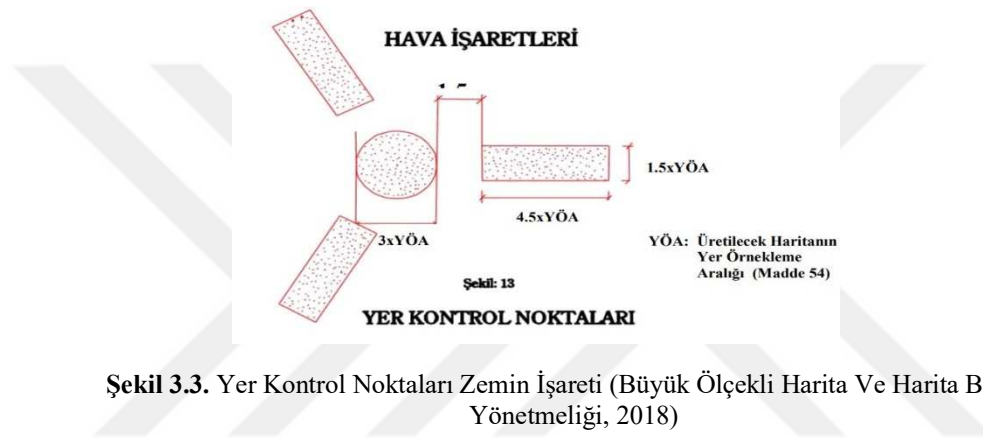
Uçuş Planlamasından sonra, 26.06.2018 tarih ve 30460 sayılı Resmi Gazetede Mükerrer olarak yayımlanan Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' nin 51. Maddesine göre oluşturulacak olan YKN' ler en az C3 derece ağ özelliğinde tesis edilmelidir. Yine aynı yönetmeliğin 52. Maddesine göre YKN' ler blok büyüklüğüne göre bloğun kenarlarında içerisinde idarenin belirleyeceği sayı kadar tesis edilmeli (bu açıklamaya göre 4 kenar ve 1 blok ortası olmak üzere en az 5 adet YKN tesis edilmesi gerekir) ve denetleme noktaları her halükârda 4 taneden az olmamalıdır (Büyük Ölçekli Harita Ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, 2018).

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' nin 53. Maddesine göre zemine tesis edilecek olan YKN' ler havadan fotoğraf çekildiği takdirde net bir şekilde görünebilecek halde tesis edilmelidir. İşaretler en az 60 derecelik bir görüş açısına sahip olmalıdır ve zemin boyanarak veya geçici plakalar takılarak oluşturulmalıdır. Bu işaretler; fotoğraf üzerinde çapı veya bir kenarı 3xYÖA olan kare veya daire biçiminde tesis edilir(Büyük Ölçekli Harita Ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, 2018).

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' nin 54. Maddesine göre YÖA harita ölçeğine göre değişmekte olup,

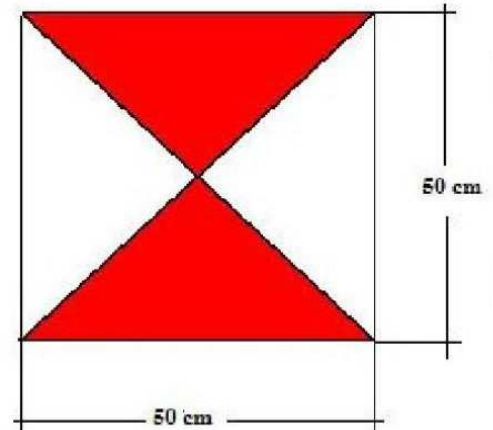
- 1/5000 olması durumunda 30 cm' den
- 1/2000 olması durumunda 20 cm' den
- 1/1000 olması durumunda 10 cm' den
- 1/500 olması durumunda 5 cm' den fazla olamaz.

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' ne göre YKN' nin şekli ve boyutu aşağıdaki gösterilmiştir (Şekil 3.3) (Büyük Ölçekli Harita Ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, 2018).



Şekil 3.3. Yer Kontrol Noktaları Zemin İşareti (Büyük Ölçekli Harita Ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, 2018)

Yer Kontrol Noktalarının işaretleri Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' ne göre yapılabildiği gibi işin niteliğine göre aşağıdaki şekillere göre de yapılabilir.



Şekil 3.4. Yer Kontrol Noktaları Zemin İşaretleri

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' nin 55. maddesine göre kuzey-güney veya doğu-batı yönlü olarak planlama yapılabilirdiği, boyuna bindirme oranının en az %70 olarak planlanması gerektiği ve enine bindirme oranının en az %30 olarak planlanması gerektiği belirtilmiş, topografik yapıya göre bu bindirme oranlarının değişebileceği aktarılmıştır (Büyük Ölçekli Harita Ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, 2018).

İHA' lar ile yapılan uçuşlarda çekilen fotoğraflar uçuş planlamasında yapılan bindirme oranları ve uçuş yüksekliğine göre otomatik olarak çekilip kaydedilmektedir.

Günümüzde fotogrametrik çalışmalar için elde edilen fotoğrafların işlenmesi, dengelenmesi ve sınıflandırılması gibi işlemler gelişen teknoloji ile beraber otomatik olarak yapılabilmektedir. Bu kapsamda, uçuşlardan elde edilen fotoğraflar üstün özelliklere sahip bir bilgisayara aktarılır. Aktarılan fotoğraflar Agisoft Metashape, Pix4d, ContextCapture gibi otomatik yöneltme yapabilen programlar sayesinde aşama aşama 3 boyutlu modeller elde edilebilir. Elde edilen bu modellerin CityGML formatlarında web tabanlı serverlarda sunulabilmesi için ise Potree, Sketchfab, CesiumJS gibi programlar kullanılabilir.

3.2. Yersel Lazer Tarama Teknolojisi

Lazer Tarama teknolojisi, 1960 yılından bu yana bir zaman dilimini kapsamaktadır. Ancak, yersel Lazer Tarama teknolojisinin etkili bir ölçüm aracı olarak gerçek anlamda bir araştırma alanı haline gelmesi yalnızca son on yıl içinde gerçekleşmiştir. Lazer radyasyonunun belirli özellikleri, örneğin tek renklilik, iyi kolimasyon, yüksek güç ve lazer ışığının ayarlanabilirliği gibi nitelikler, bu teknolojinin ölçüm için sağladığı avantajları daha önce tanımlanmaktan daha yeni keşfedilmiştir. Lazer Tarama teknolojileri sayesinde, hızlı ve düşük maliyetle acil durumlarda tüm objeler hakkında eksiksiz 3 boyutlu geometrik ve görsel bilgilere ulaşmak mümkündür (Gümüş ve Erkaya, 2007).

Yersel Lazer Tarama, yüzey özelliklerini ve topografyayı tespit etmek için yeryüzünden gerçekleştirilen ölçümlerle yüksek yoğunlukta lazer ışınları kullanır. Alıcı ile obje arasındaki mesafe, bir elektromanyetik enerji olan lazer ışığının yolculuk süresiyle belirlenmektedir. Lazer Tarama sistemi optik-mekanik olarak çalışan bir uzaktan algılama sistemidir. Lazer Tarama sistemi ile bir objeye veya alana ait konumsal bilgiler çok kısa bir zamanda elde edilir (Karasaka ve Beg, 2021).

Yersel Lazer Tarama Teknolojisinin avantajları aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Hızlı ölçüm,
- Temas olmadan veri elde etme,
- Yüksek doğruluk,
- Obje üzerinde nokta yoğunluğunun fazla olması,
- Objenin rengine göre nokta bulutu oluşturulması,
- Güvenli ölçüm

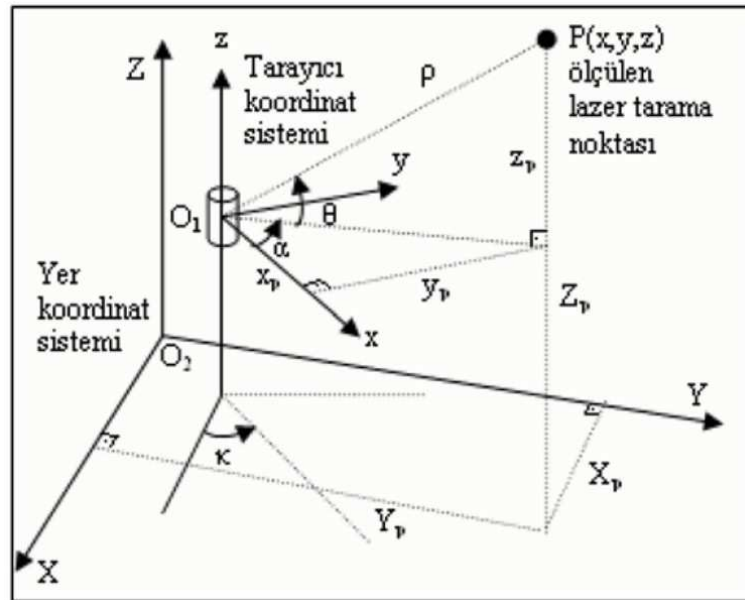
olarak sıralanabilir(Mrics, Clegg ve Jones, 2005).

Yersel Lazer Tarama teknolojisinin kullanım alanları aşağıda kısaca belirtilmiştir.

- Haritalama ve Topografya: Yersel Lazer Tarama, ayrıntılı topografik haritalar oluşturmak için kullanılır. Bu, arazi modelleri ve yüksek çözünürlüklü yüzey modelleri oluşturmada faydalıdır.
- İnşaat ve Altyapı: İnşaat projelerinde, yerel arazinin detaylı bir ölçümünü sağlamak için kullanılır. Ayrıca alt yapı projelerinde (yollar, köprüler, vb.) durumu değerlendirmek için de kullanılır.
- Orman Yönetimi: Orman yapısının analizi, biyokütle hesaplamaları ve ekosistem değerlendirmelerinde kullanılır.
- Arkeoloji: Arkeolojik alanların haritalanması ve incelenmesi için yersel Lazer Tarama teknolojisi, yer altındaki yapıların ortaya çıkarılmasında yardımcı olabilir.
- Şehir Planlaması ve Yönetimi: Şehirlerin yüksek çözünürlüklü 3D modellerini oluşturmak için kullanılır, bu da planlama ve analiz süreçlerini destekler.
- Doğal Afet Yönetimi: Sel, heyelan gibi doğal afetlerin risk değerlendirmesi ve zararın tespiti için kullanılabilir.
- Tarım: Tarım alanlarında bitki örtüsü analizi ve su yönetimi konularında kullanılmakta, verim artırma çalışmalarında yardımcı olmaktadır.
- Jeoloji ve Jeoteknik: Zemin ve kaya yapısı ile ilgili detaylı bilgiler sağlamak amacıyla kullanılır.

Bu alanlar, Yersel Lazer Tarama teknolojisinin sağladığı yüksek çözünürlük ve doğruluk sayesinde önemli gelişmeler ve iyileştirmeler sağladığı bazı örneklerdir.

Lazer Tarama teknolojisinin kullanmış olduğu koordinat sistemi kutupsal koordinat sistemi mantığıyla çalışmaktadır. Yersel lazer tarayıcılarla ölçülen değerler ve tarayıcı koordinat sistemi, Şekil 3.6' da gösterilmektedir. Şekil 3.6' da gösterilen x, y, z : Lazer Tarama alet orijinli nokta bulutu koordinatlarını, p : Lazer Tarama ile ölçülen obje noktası arasındaki eğik mesafeyi, α : Işın doğrultusunun x eksenine yatay düzlemde yaptığı açığı, θ : Işın doğrultusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısını, O_1 : Lazer Tarama tarayıcı yerel koordinat sistemi merkezini, O_2 : Yer koordinat sistemi merkezini ifade etmektedir (Altuntaş ve Yıldız, 2008).



Şekil 3.5. Lazer Tarama tarayıcı ölçüleri, tarayıcı koordinat sistemi ve yer koordinat sistemi (Altuntaş & Yıldız, 2008).

3.3. Dijital İkiz

Dijital İkiz, personel, ürünler, varlıklar ve süreç tanımları gibi unsurların sanal olarak temsil edilmesi, sanal olarak modellenmesi anlamına gelmektedir. Bu sanal model, sürekli olarak güncellenerek fiziksel nesnenin durumunun, geometrisinin ve diğer birçok özelliğinin senkronize olarak yansıtıldığı, fiziksel dünyadaki karşılığında meydana gelen değişimleri gösteren canlı bir modeldir. Dijital temsil hem fiziksel nesnenin öğelerini hem de bu öğelerin yaşam döngüsü boyunca nasıl çalıştığını ve var olduğunu gösteren bir simülasyondur (Lu, Liu, Wang, Huang ve Xu, 2020).

Dijital ikiz, fiziksel bir nesnenin veya sistemin dijital ortamda gerçek zamanlı verilerle beslenen ve sürekli güncellenen üç boyutlu temsili olarak tanımlanır. Tasarım, simülasyon, bakım ve eğitim gibi birçok alanda kullanılan dijital ikizler, özellikle fotorealistik 3B modellemeyle daha etkili hale gelir. Bu bağlamda fotogrametri ve SfM (Structure from Motion) gibi teknikler, yüksek doğruluk ve düşük maliyetle dijital ikizlerin oluşturulmasını mümkün kılarak endüstriyel uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır (Yiğit ve Uysal, 2023).

Dijital ikiz teknolojisi, tarihi yapıların uzun vadeli korunması ve bozulmalarının izlenmesi için güçlü bir araç sunmaktadır. Bu kapsamda fotogrametri destekli dijital ikizler, yapının yüksek doğrulukta üç boyutlu temsilini sağlayarak, zamanla oluşabilecek fiziksel değişimleri hassas biçimde gözlemlemeye imkân tanır. Böylece dijital ikizler, kültürel mirasın belgelenmesi, izlenmesi ve sürdürülebilir yönetimi için yenilikçi bir yaklaşım sunar (Kong ve Hucks, 2023).

Dijital İkizin kullanım alanları aşağıda maddeler halinde kısaca belirtilmiştir.

- Üretim ve Endüstri 4.0
- Havacılık ve Uzay
- Akıllı Şehirler ve Altyapı Yönetimi
- Enerji Sistemleri
- Sağlık ve Biyomedikal Uygulamalar
- İnşaat ve Yapı Bilgi Modellemesi

3.4. İç Mekan Haritalama

İç mekan haritalama, hastaneler, alışveriş merkezleri, kampüsler, havaalanları, kültürel miraslarımız gibi büyük yapıların ve binaların iç yapısının dijital olarak haritalandırılması anlamına gelmektedir. Bu dijital temsil sayesinde iç mekânlarda gezinmek ve iç mekânlarda aranan bir konumun bulunması gibi amaçlar kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. İç mekân haritalama, dijital ikiz teknolojileriyle birleştirilerek, fiziksel alanların dijital temsillerinin oluşturulmasına ve bu temsillerin analiz edilmesine olanak tanır. İç mekan haritalama, dış mekan haritalama kadar kullanımı yaygın olmasa da gün geçtikçe önemini ortaya koymaktadır (Bragg, 2023).

İç mekân haritalama, özellikle bina içi navigasyon, acil durum yönetimi, robotik yönlendirme ve artırılmış gerçeklik uygulamaları gibi alanlarda giderek daha fazla önem

kazanmaktadır. Geleneksel GPS tabanlı sistemlerin kapalı alanlarda etkin çalışmaması nedeniyle, iç mekân haritalama çalışmaları genellikle fotogrametri, lazer tarayıcılar, yapıdan harekete (SfM), SLAM ve sensör füzyonu gibi yöntemlere dayanmaktadır. Özellikle SfM ve lazer tarama gibi teknikler, kullanıcıların bina içindeki yapısal unsurları milimetrik hassasiyetle modellemesine olanak tanırken, bu veriler dijital ikiz modellerin oluşturulmasına da temel teşkil etmektedir. Ayrıca, mobil cihazlardan elde edilen görsel ve atalet verilerinin birleştirilmesiyle, kullanıcı odaklı ve gerçek zamanlı iç mekân haritaları üretilebilmektedir (Zhou ve diğerleri, 2021). Bu yöntemler, yalnızca mimari ve inşaat mühendisliği uygulamalarında değil, aynı zamanda kültürel mirasın belgelenmesi ve sağlık hizmetlerinde hasta takibi gibi alanlarda da etkili çözümler sunmaktadır (Mautz ve Tilch, 2011). Sonuç olarak, iç mekân haritalama teknolojileri, konum tabanlı hizmetlerin kapalı alanlara taşınmasını mümkün kılarak dijital dönüşüm süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

İç Mekan Haritalamanın kullanım alanları aşağıda maddeler halinde kısaca belirtilmiştir.

- Kültürel Miras ve 3B Modelleme
- Navigasyon ve Yön Bulma
- Acil Durum Yönetimi ve Tahliye Planlaması
- Akıllı Bina Yönetimi
- Alan Kullanımı ve Ofis Yönetimi
- Müze ve Sergi Alanları Rehberliği

3.5. Üç Boyutlu Sayısal Yapı Modellerinin Web Ortamında Sunulması

Bilgisayar ortamında oluşturulan 3 boyutlu sayısal yapı modelleri ister mesh model olsun veya isterse nokta bulutu şeklinde olsun web ortamında sunulabilmesi için geliştirilen birçok program mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanları ve kullanımı en kolay olan beş tanesi aşağıda kısa açıklamalarla belirtilmiştir. Kullanılan bu programlar hem kolay olması hem de geniş paylaşım olanakları sunmalarıyla öne çıkmıştır.

3.5.1. Sketchfab

Sketchfab, 3D modellerin web ortamında paylaşımı için kullanılan en popüler platformlardan biridir. Kolay kullanımlı arayüzü sayesinde kullanıcılar, fotogrametrik modelleri kolayca yükleyip paylaşabilmektedir. .OBJ, .FBX, .PLY, ve .GLTF gibi birçok

formatı destekler ve gerçek zamanlı bir görüntüleme deneyimi sunar. Kullanıcılar fotogrametrik olarak 3 boyutlu üretilen modelleri döndürebilir, yakınlaştırabilir ve detayları incelenebilir. Sketchfab, ayrıca, yüklenen modellerin web sitelerine kolayca entegre edilmesine olanak tanır. Hem bireysel kullanıcılar hem de profesyonel ekipler için çok kullanışlı bir programdır.

3.5.2. CesiumJS

CesiumJS, büyük boyutlu fotogrametrik modellerin web üzerinde sunulabilmesi için ideal bir platformdur. WebGL tabanlı olan bu araç, özellikle 3D Tiles formatıyla çalışarak veri optimizasyonunu en üst düzeye çıkarır ve akıcı bir kullanıcı deneyimi sağlar. Özelleştirilebilir yapısı ve açık kaynaklı olması, geliştiricilere esnek projeler oluşturma imkanı tanır. CesiumJS, hem nokta bulutları hem de fotogrametrik modelleri haritalarla birleştirmek için güçlü bir altyapı sunar. Özellikle şehir modelleme, coğrafi analiz ve büyük ölçekli 3D görselleştirme projelerinde tercih edilir. Programı faydalı bir şekilde kullanabilmek için temel seviyede bile olsa kodlama bilgisine sahip olmak gerekir.

3.5.3. Potree

Potree, fotogrametrik modellerin ve nokta bulutlarının web ortamında sunulması için kullanılan açık kaynaklı bir araçtır. WebGL tabanlı olan bu sistem, büyük veri setlerini optimize ederek tarayıcı üzerinden kolayca erişilebilir hale getirir. Potree, tamamen özelleştirilebilir olması sayesinde geliştiricilere özgün çözümler geliştirme imkanı sunar. Fotogrametrik verilerin görselleştirilmesi, kullanıcılarla paylaşılması ve analiz edilmesi için güçlü bir araçtır. Potree'nin hem bulut tabanlı hem de yerel sunucu ortamında çalışabilmesi, özellikle büyük projelerde önemli bir avantaj sağlar.

3.5.4. ArcGIS Online + Scene Viewer

ArcGIS Online, fotogrametrik modelleri haritalarla entegre bir şekilde sunmak isteyen kullanıcılar için iyi bir programdır. Esri'nin sunduğu Scene Viewer, 3D modelleri interaktif olarak görüntülemeyi ve paylaşmayı mümkün kılar. Harita tabanlı projelerle çalışıldığı takdirde, ArcGIS Online sayesinde fotogrametrik olarak hazırlanan 3 boyutlu modelleri coğrafi analizlerle birleştirebilir ve kullanıcılara güzel bir deneyim sunulabilir. Özellikle şehir planlama, peyzaj tasarımı ve çevresel analizlerde etkili bir programdır.

3.5.5. Blender + Three.js veya Verge3D

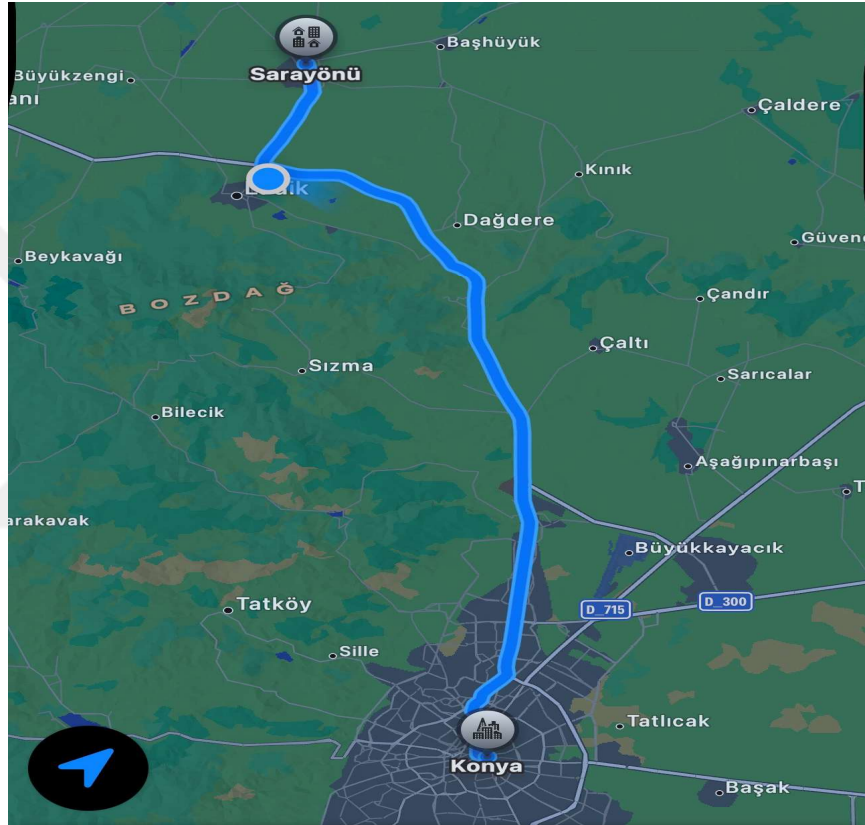
Blender, fotogrametrik olarak üretilen 3 boyutlu modellerin düzenlenip optimize etmek için kullanılan açık kaynaklı bir programdır. Hazırlanan modelleri web ortamında sunmak için **Three.js** veya **Verge3D** gibi JavaScript tabanlı programlar kullanılmaktadır. Three.js, 3 boyutlu modellerin özelleştirerek etkileşimli bir web deneyimi oluşturulmasına olanak sağlar. Verge3D ise Blender ile tam entegre çalışarak daha hızlı bir çözüm sunar. Söz konusu programların kullanılabilmesi için kodlama bilgisine sahip olmak gerekir.

RealityCapture, Twinmotion Cloud, Matterport, Unreal Engine + Pixel Streaming programları da fotogrametrik olarak üretilen 3 boyutlu modellerin web ortamında servis edilebilmesi için kullanılan programlardır. Bu çalışmada, kolay kullanımı, stabil çalışması ve açık kaynak kodlu olması sebebiyle Potree programı tercih edilmiştir.

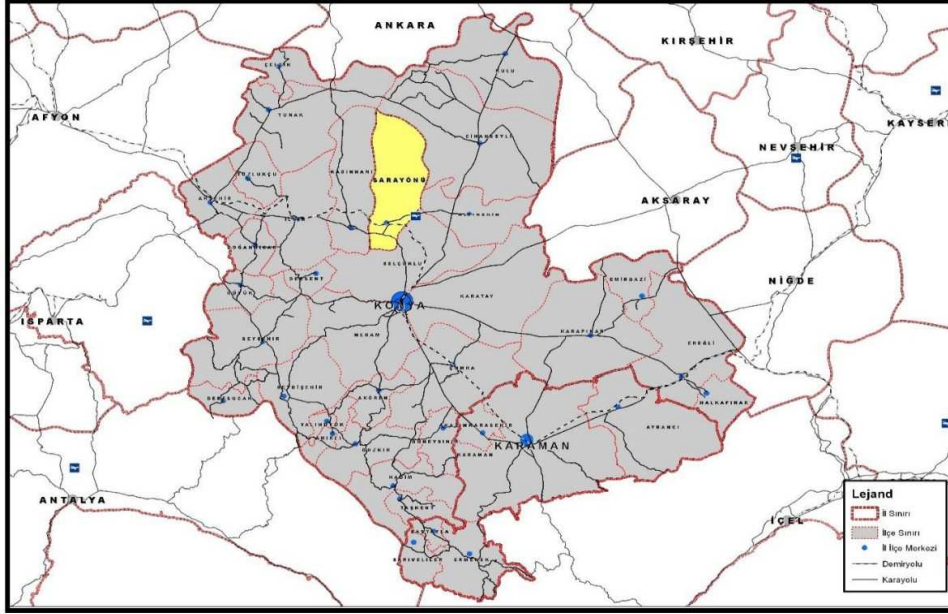
4. UYGULAMA

4.1. Çalışma Alanı

Konya İlinin kuzeybatısında bulunan Sarayönü İlçesi, Konya İl merkezine yaklaşık 52 km uzaklıktadır. Sarayönü Yeraltı Şehri İlçe merkezinde Yukarı Mahalle sınırları içerisinde yer almaktadır.



Şekil 4.1. Sarayönü İlçesinin konumu.



Şekil 4.2. Sarayönü İlçesinin konumu. (Sarayönü İlçesi Raporu, 2019)

Yeraltı Şehrinde, oda biçiminde düzenlenmiş yaşam alanları, su kuyuları, ocaklar, bacalar, aydınlatma amacıyla kandil nişleri, kilerler ve havalandırma delikleri gibi unsurlar tespit edilmiştir. Bu yerleşim alanının geçmişi, elde edilen ilk arkeolojik buluntulara dayanılarak 8. yüzyıla ait olduğunu göstermektedir. (Anadolu Ajansı, 2022)

4.2. İHA ile Görüntü Alımı

Sarayönü Yeraltı Şehri Dijital İkiz oluşturulması yeraltı ölçmeleri ve yerüstü ölçmeleri olarak 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. Yerüstü ölçmeleri için öncelikle drone ile uçuş yapılabilmesi amacıyla uçuş planlaması yapılmıştır. Uçuş planlamasına göre, ilk olarak uçuş yapılacak sınır belirlenmiştir. Uçuş sınırının belirlenmesinde DroneDeploy Flight programı kullanılmıştır. Yaklaşık olarak 10 hektarlık bir alan uçuş alanı olarak belirlenmiştir.

Belirlenen arazi üzerinde 10 adet YKN yerleştirilmiş ve bu YKN'lerden 4 tanesi blok köşelerine ve kalanlar ise alan içerisine yerleştirilmiştir. YKN'lerin 6 tanesi yer kontrol noktası 4 tanesi kontrol noktası olarak belirlenmiştir. YKN'lerin arazi üzerinde eşit bir şekilde dağılım göstermesine dikkat edilmiştir. İlgili YKN'lerin zemine tesis edilebilmesi için E-Survey E600 marka/model GNSS aleti kullanılmıştır. Kullanılan GNSS aletine ilişkin teknik özellikler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Tablo 4.1. E-Survey E600 GNSS Özellikleri (UniStrong Technology Limited, t.y.):

Model	E600-H
Kanal Sayısı	800
Uydu İzleme	GPS:L1CA, L1P, L1C, L2P, L2C, L5
GLONASS:	BeiDou:B1, B2, B3,GALILEO: E1BC, E5a, E5b, SBAS: L1 CA, L5, QZSS: L1CA, L2C, L5, L1C, L-BAND: ATLAS H10, H30, H50, G1/G2, P1/P2
Veri Güncelleme Hızı	5 Hz, (20 Hz'e kadar çıkarılabilir)
Sinyal Yenileme Hızı	< 1 saniye
Ölçüye Başlama	< 10 saniye
Fikslenme Güvenilirliği	> % 99.9
Statik	Yatay : 2.5 mm + 0.1 ppm Düşey : 3.5 mm + 0.4 ppm
RTK	Yatay : 8 mm + 1 ppm Düşey : 15 mm + 1 ppm
DGPS	Yatay : 0.25 m
SBAS	Düşey : 0.3 m
Batarya	Çıkarılabilir ve şarj edilebilir çift batarya Lithium-Ion, 7.2 V - 6800 mAh
Harici Güç Girişi	9~28 V DC, yüksek akım korumalı
Şarj Süresi	4 saat
Frekans Aralığı	410 - 470 MHz
Kanal Aralığı	12.5 KHz / 25 KHz
Çıkış Gücü	0.5 W / 1 W
Çalışma Menzili	3 - 5 km
Hafıza	Dahili8 GB, 32 GB'a kadar artırılabilir
Seri Haberleşme 5-pin	Harici güç ve donanım girişi
Seri Haberleşme 7-pin	NMEA veri çıkışı ve veri aktarımı
SIM Kart	Mikro SIM kart yuvası
GSM Modem	Dahili 4G GSM/GPRS/EDGE/LTE/UMTS/WCDMA
Bluetooth	V2.1+EDR / V4.1, Class 2
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Web Ara Yüzü	Yazılım güncelleme, ayar yönetimi veri aktarma ve RINEX dosya çevrimi
Ses Asistanı	Var, Türkçe
Eğim Ölçer	Var, 60°'ye kadar eğik ölçü
NMEA Veri Türleri	GGA, ZDA, GSA, GSV, GST, VTG,RMC, GLL
Ebatlar	Φ156 mm x 76 mm
Ağırlık	1.3 Kg (bataryalar dahil)
Çalışma Sıcaklığı	-30°C ~ +65°C
Saklama Sıcaklığı	-40°C ~ +80°C
Nem Geçirmezlik	% 100 koruma
Gösterge	Uydu, Veri, Batarya ve Haberleşme LED'i
Sertifikalar	CE, FCC, IP67

İlgili YKN'lerden, GNSS aleti ile 1' er saat arayla, 2 defa, 30 epokta (saniye) ölçümler yapılmış ve bu ölçümlerin ortalamaları bulunarak, YKN' lere ait kesin x, y, z koordinatları elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Yer Kontrol Noktası.

Uçuş yapılabilmesi için hava şartlarına dikkat edilmiş ve havanın açık ve rüzgarsız olduğu 28.09.2023 tarihinde uçuş yapılmıştır. Uçuş yüksekliği 60 metre olarak belirlenmiş, enine ve boyuna bindirme oranları Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği' nin 55. Maddesindeki hususlara dikkat edilerek boyuna bindirme oranı %80 ve enine bindirme oranı %60 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.4. DroneDeploy Flight Uçuş Planlama Ekranı

Uçuş planlamasından sonra uçuş işlemi gerçekleştirilmiştir. Uçuş işlemi için DJİ firması tarafından üretilen Phantom 4 Pro RTK' sız model kullanılmıştır. DJİ Phantom 4 Pro İHA aletine ilişkin teknik özellikler aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 4.2. DJI Phantom 4 Pro Teknik Özellikleri

Görüş sistemi	Aşağı, İleri, Geri, Sol, Sağ
Hız aralığı	6,6 / 2 m'de 46 ft / s / 14 m / s
Maksimum Rakım	32 / 10 m
Çalışma aralığı	0,0 ila 32,8 / 0,0 ila 10,0 m
Engel duyuş aralığı	0,7 ila 23,0 / 0,2 ila 7,0 m
İleri Görüş Alanı	60 ° (Yatay)
	± 27 ° (Dikey)
Aşağı Görüş Alanı	70 ° (Ön ve arka)
	50 ° (Yan Yana)
Geriye Bakış Alanı	60 ° (Yatay)
	± 27 ° (Dikey)
Çalışma ortamı	> 15 lux'de Açık Desenli Yüzey
Algılayıcı	1 "CMOS
Etkin pikseller	20 MP
Odak uzaklığı	8.8mm / 24mm (35mm Eşdeğer)
Lens Görüş Alanı	84 °
Açıklık	f / 2.8 - 11
Minimum Odak Mesafesi	3,3 / 1,0 m
Fotoğraf ISO Aralığı	100 - 6400 (Manuel)
	100 - 3200 (Otomatik)
Video ISO Aralığı	100 - 6400 (Manuel)
	100 - 3200 (Otomatik)
Elektronik Enstantane Hızı	8 - 1/8000 Saniye
Fotoğraf çözünürlüğü	3: 2: 5472 x 3648
	16: 9: 5472 x 3078
	4: 3: 4864 x 3648
Fotoğraf formatı	JPEG, DNG
Video formatı	40/25/30 fps'de 4096 x 2160p (100 Mb / sn, H.265 üzerinden)
	3840 x 2160p, 24/25/30 fps'de (100 Mb / s, H.265 üzerinden MOV)
	2720 x 1530p, 24/25 / 30 fps (100 Mb / sn, H.265 üzerinden)
	1920 x 1080p, 24/25/30/48/50/60/120 fps'de (100 Mb / s, H.265 üzerinden MOV)
	1280 x 720p, 24/25 / 30/48/50/60/120 fps (H.264 üzerinden 100 Mb / s MOV)
Fotoğraf Modları	Otomatik Pozlama Basamaklama (AEB), Patlama Çekimi, Aralık, Tek Çekim
Akü Kimyası	Lityum İyon Polimer (LiPo)
Kapasite	5870 mAh / 89.2 Wh
Pil yapılandırma	4 S / 17,4 V
Maksimum Şarj Gücü	160 W
Ağırlık	48.50 oz / 1375 g (Pervaneler, Batarya, Gimbal, Kamera dahil)
RTK	Yok

İlgili İHA RTK' sız olduğu için hassas ve doğru koordinatlar elde edilebilmesi için yer kontrol noktası daha sık tesis edilmiştir. Uçuşlarda çekilen fotoğraflar hem dik (nadir) hem de oblik (açılı) olarak yapılmıştır. Oblik olarak yapılmasının sebebi fotoğraflar üzerinde iç ve dış yöneltme işlemleri yapılırken bina cephelerinin daha görünür çıkmasını sağlamaktır. Uçuş işlemi yaklaşık olarak 30 dakika sürmüştür ve 2 adet batarya ile tüm uçuş işlemi tamamlanmıştır.

4.3. Yersel Lazer Tarama ile Ölçüm

Yeraltı ölçmeleri Lazer Tarama çalışmaları için Konya Büyükşehir Belediyesi ile bir program yapılmış ve 22.12.2023 tarihinde Faro Focus3D X 330 Lazer Tarama aleti ile Konya Büyükşehir Belediyesi personelleri tarafından Yersel Lazer Tarama yapılmıştır.



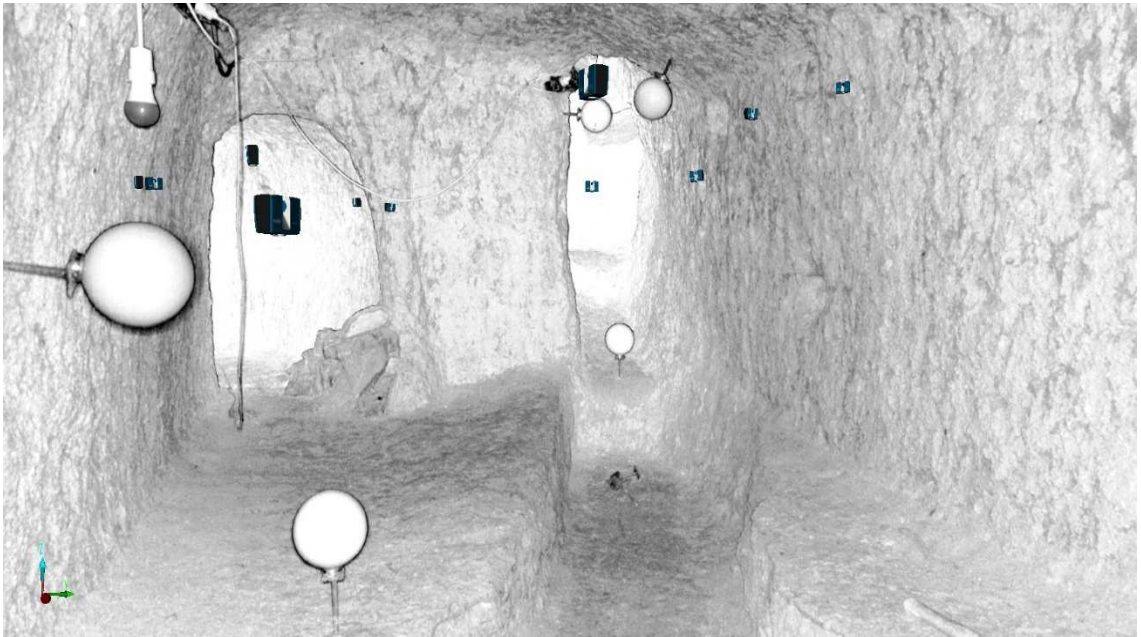
Şekil 4.5. Faro Focus3D X 330 Lazer Tarama Tarayıcı (Faro Tech.)

Faro Focus3D X 330 Lazer Tarama aletine ilişkin teknik özellikler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Tablo 4.3. Faro Focus 3D X330 Teknik Özellikleri (Faro Tech)

Özellik	Değer
Menzil	0,6 m – 330 m
Ölçüm Hızı	Saniyede 976.000 nokta
Mesafe Hatası	±2 mm
Renkli Kamera	Entegre, 70 megapiksel çözünürlük
Lazer Sınıfı	Sınıf 1
Ağırlık	5,2 kg
Boyutlar (G x Y x D)	240 x 200 x 100 mm
Tarama Görüş Açısı	300° Dikey / 360° Yatay
Renkli Tarama	HDR fotoğraf bindirme özelliği
Entegre GPS	Var
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-20°C ila +50°C
Depolama	SD kart
Bağlantı	USB, Wi-Fi

Lazer Tarama çalışmalarına öncelikle yerüstünden başlanmıştır. Yerüstünden başlanmasının sebebi, yeraltında telefon dahi çekmediği için cihaz üzerinde bulunan Ağ RTK sayesinde koordinat bilgisi alınıp Şekil 4.5' deki fotoğraflardan da görüldüğü üzere SECO küreler sayesinde koordinatlar yeraltına taşınabilmiştir. Tarama aleti, 12 adet yerüstü, 73 adet yeraltı olmak üzere toplam 85 adet farklı konuma kurulmuş ve tarama işlemi yapılmıştır.

**Şekil 4.6.** Yeraltı Taramasına ait Fotoğraf

Yeraltında Lazer Tarama taraması yapılırken yeterli ışık olmadığı için siyah-beyaz olarak tarama yapılmıştır. Yeraltı şehrine ait rölevení daha sağlıklı alınabilmesi için duvarlara işaret plakaları yapıştırılmıştır. Tarama işlemi yaklaşık 6 saat sürmüştür. Lazer Tarama işleminin bitmesi ile arazi çalışmaları tamamlanmış ve ofis işlemlerine geçilmiştir.



Şekil 4.7. İşaret Plakaları

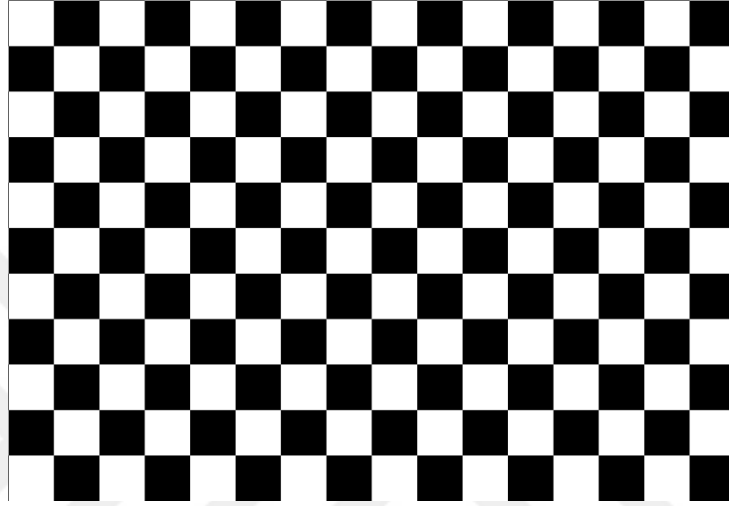
4.4. Verilerin Analiz Edilmesi

Verilerin analiz edilmesi için üstün özellikli bir masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Kullanılan masaüstü bilgisayara ait teknik özellikler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Tablo 4.4. Masaüstü Bilgisayara Ait Teknik Özellikler:

İşlemci Modeli	Intel Core i9 12900K Soket 1200 12. Nesil 3.20GHz-5.2 GHz 1700 Pin
Anakart	ASUS TUF GAMING Z690- PLUS WIFI D4 1700PIN DDR4
Sistem Belleği (GB)	Corsair Vengeamce 64 GB (4x16GB) Black Soğutuculu DDR4 3200MHz PC Ram
Ekran Kartı Modeli ve Belleği	ASUS 12 GB ROG- STRIX-RTX3060- O12G-V2-GAMING GDDR6 192BİT 2xHDMI+3xDP
Soğutma Sistemi	Gamebooster Nitro 240 Argb Fanlı 240 mm (İntel/Am4) Serisi uyumlu Sıvı Soğutma Sistemi
İşletim Sistemi	Windows 11 Pro 64- Bit

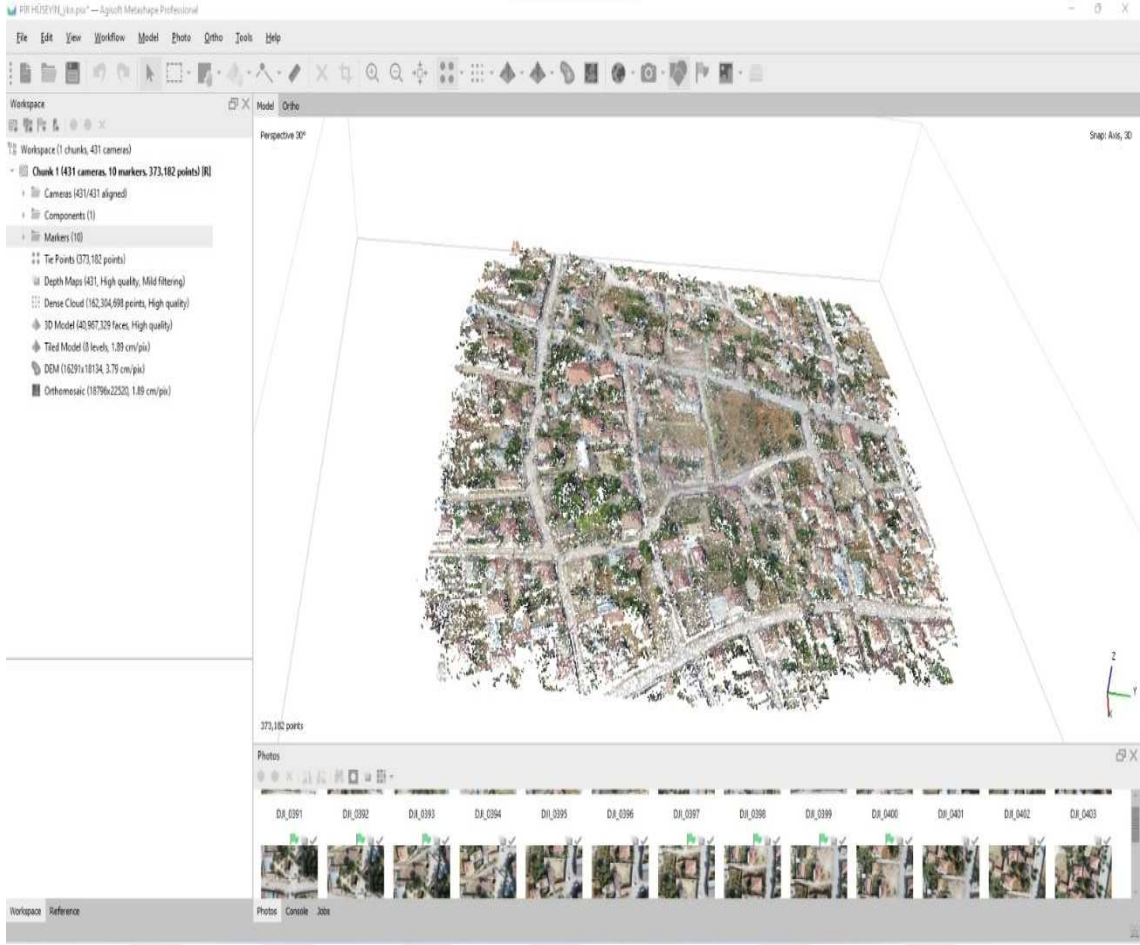
Arazi işlemlerinden sonra öncelikle İHA tarafından çekilen fotoğraflar bilgisayara aktarılmıştır. Aktarılan fotoğraflar Agisoft Metashape programına eklenmeden önce İHA üzerinde bulunan fotoğraf makinesine ait kamera kalibrasyon bilgilerinin Agisoft Metashape programına tanımlanması gerekmektedir. Tanımlama işlemi için öncelikle “Tolls>Lens>Showchessboard” butonu seçilmiş ve karşımıza çıkan dama görselinin kullandığımız İHA ile farklı açılardan fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 4.8. Satranç Tahtası Görseli

Ardından “Workflow>Add Photos” butonu seçilerek çektiğimiz dama görselleri fotoğrafları programa eklenmiştir. İlgili dama görselleri programa eklendikten sonra “Tolls>Lens>Calibrate Lens” butonu seçilerek kamera kalibrasyonu tamamlanmıştır.

Kamera kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, İHA tarafından çekilen 431 adet fotoğraf programa eklenmiştir. Eklenen fotoğraflarda öncelikle koordinat sistemi tanımlaması yapılmıştır. Fotoğraflar programa ilk olarak eklendiği zaman fotoğraflara ait koordinatlar coğrafi olarak (enlem ve boylam) gelmektedir. Bu koordinatlar bizim çalışmamızda belirlemiş olduğumuz ITRF-96 (EPSG:8995) koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle program içerisinde dönüşüm işlemi yapılarak söz konusu fotoğraflar istediğimiz koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Fotoğraflara ait koordinatlar dönüştürüldükten sonra, “Workflow>Align Photos” işlemi ile seyrek nokta bulutu üretimi High seviyede yapılmıştır.



Şekil 4.9. Seyrek Nokta Bulutu

Seyrek nokta bulutu üretimi yapıлып elde edilen görüntüden gereksiz ve bozuk olan kısımlar temizlendikten sonra daha önce zemine tesis edilen ve GNSS aleti tarafından ölçümleri yapılan 10 adet YKN' ye ait koordinat ve yükseklik bilgisini içeren .txt dosyası Agisoft Metashape programına eklenmiştir. Oluşan nokta bulutunun daha hassas ve doğru olması amacıyla eklenen YKN' lerin isabet ettiği fotoğraflar tek tek filtrelenerek, noktaların fotoğraflar üzerindeki konumları doğru ve hassas bir şekilde işaretlenmiştir. İşaretleme yapılırken fotoğraflar üzerinde görünen YKN' lerin tamamının fotoğraf içine isabet ettiğine dikkat edilmiştir. Bir kısmı görünüp bir kısmı görünmeyen YKN' ler işaretleme dışında bırakılmıştır. Aksi takdirde, yapılan proses işlemi hatalı çıkacaktır.



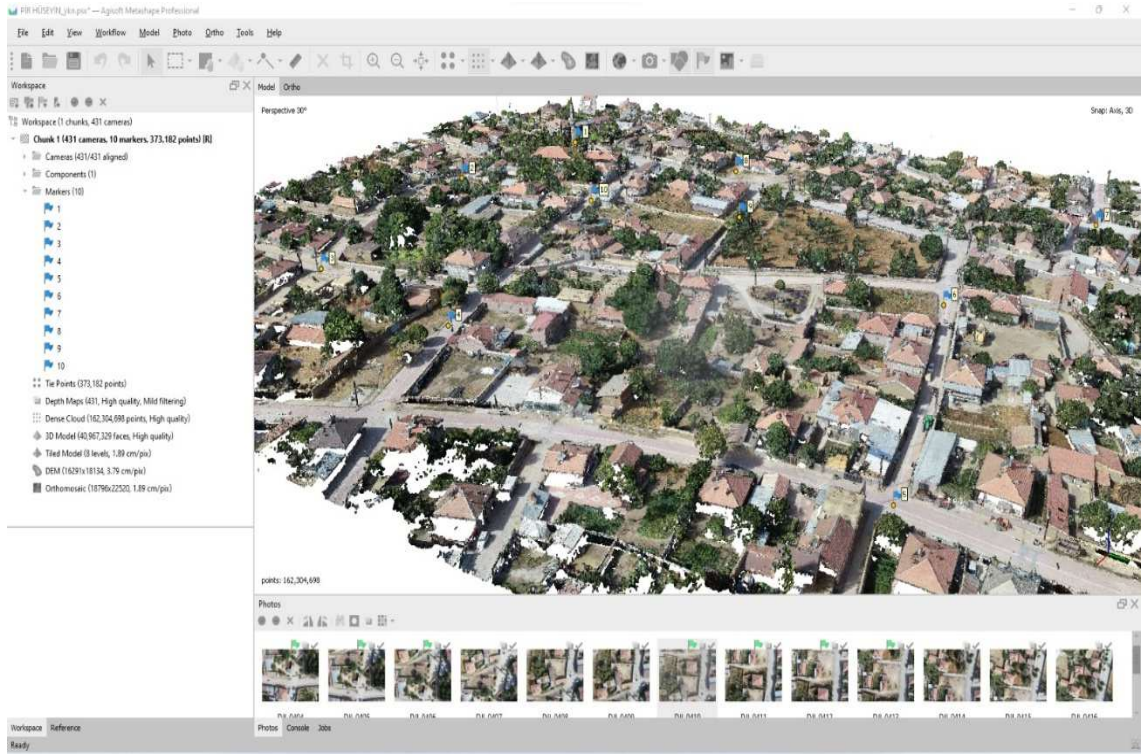
Şekil 4.10. YKN' lerin Gösterildiği Seyrek Nokta Bulutu

Tüm YKN' ler fotoğraflar üzerinde işaretlendikten sonra “Workflow> Build Dense Cloud” işlemi ile yoğun nokta bulutu oluşturma işlemi High seviyede yapılmıştır. Yoğun nokta bulutu işlemi sonucu 51.503.037 nokta oluşmuştur. Zemine tesis edilen YKN' lerin koordinatları ile yoğun nokta bulutu oluşturma işleminden sonra oluşan model üzerindeki YKN' lerin koordinatları aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.5. Koordinat Karşılaştırmaları

NOKTA NO	ORJİNAL			FOTOGRAMETRİK İŞLEMLER SONUCU ELDE EDİLEN DEĞERLER			FARKLAR		
	SAĞA DEĞER (Y) m	YUKARI DEĞER (X) m	YÜKSEKLİK (Z) m	SAĞA DEĞER (Y) m	YUKARI DEĞER (X) m	YÜKSEKLİK (Z) m	Dy cm (+/-)	Dx cm (+/-)	Dz cm (+/-)
YKN1	448206.70	4237423.57	1090.463	448206.70	4237423.60	1090.463	0	3	0.02
YKN2	448282.42	4237411.18	1091.254	448282.42	4237411.19	1091.263	0	1	0.91
YKN3	448380.42	4237436.31	1090.796	448380.47	4237436.28	1090.739	5	3	5.68
YKN4	448384.38	4237511.72	1090.166	448384.39	4237511.69	1090.080	1	3	8.61
YKN5	448387.92	4237670.96	1089.143	448387.81	4237670.91	1089.237	11	5	9.39
YKN6	448286.80	4237656.65	1090.062	448286.79	4237656.67	1090.094	1	2	3.15
YKN7	448177.45	4237695.61	1087.355	448177.45	4237695.66	1087.252	0	5	10.27
YKN8	448204.95	4237528.31	1090.491	448204.89	4237528.28	1090.596	6	3	10.57
YKN9	448256.93	4237558.27	1091.419	448257.05	4237558.32	1091.328	12	5	9.05
YKN10	448276.16	4237489.90	1092.233	448276.14	4237489.88	1092.339	2	2	10.56

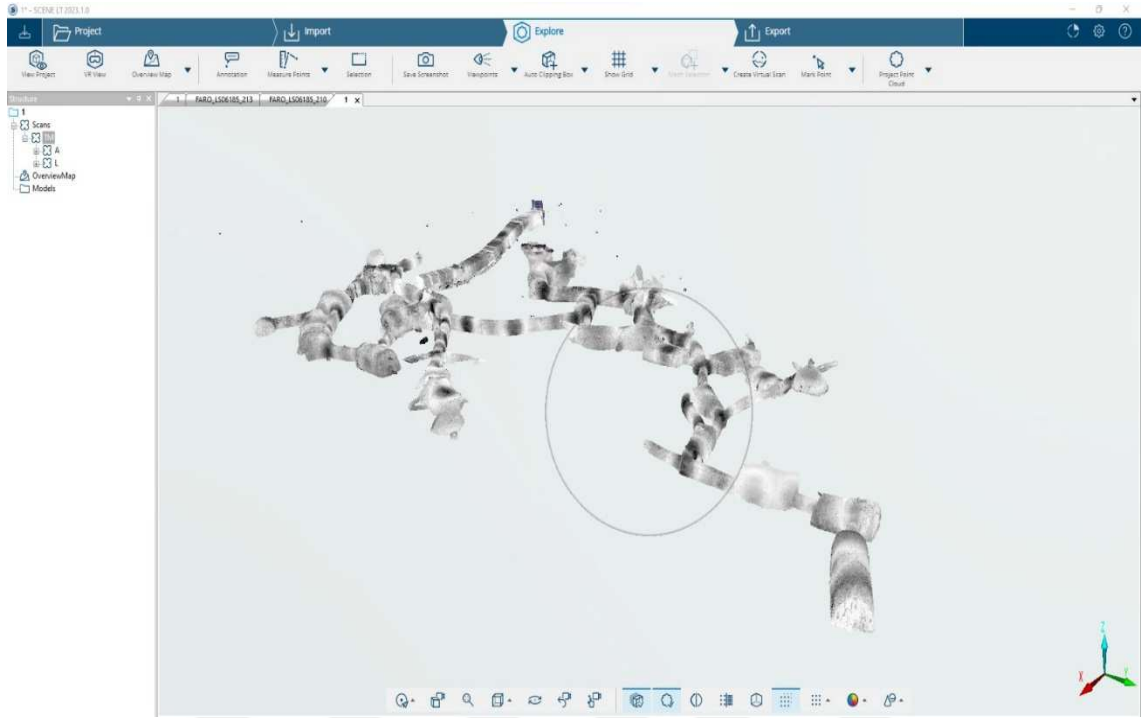
Böylelikle Agisoft Metashape ile ilgili işlemler tamamlanmış ve nokta bulutu dosyası .las uzantılı veri olarak dışarıya aktarılmıştır.



Şekil 4.11. Yoğun Nokta Bulutu

Agisoft Metashape ile ilgili işlemler tamamlandıktan sonra Lazer Tarama verilerinde proses işlemi yapılması için Faro Technology tarafından geliştirilen Scene programı kullanılmıştır. İlk olarak arazi çalışmaları esnasında yapılan taramalar Faro Focus3D X 330 Lazer Tarama Tarayıcı içerisinde bulunan bir SD karta kaydedilmiştir. SD kart bilgisayara bağlanmış ve taramalar Scene programına aktarılmıştır. Faro Focus3D X 330 Lazer Tarama Tarayıcı tarafından yapılan taramalar ancak Scene programı tarafından çalıştırılabilmektedir. Başka bir program ile proses işlemi yapılamamaktadır. Program içerisine transfer işlemi yapıldıktan sonra proje açılmış ve Project>Process Scan butonu seçilmiş ve ardından Processing>Configure Processing>Start Processing butonu seçilerek 3 boyutlu model oluşturma işlemi başlatılmıştır. Proses işlemi bittikten sonra “Explore” menüsünden modele ait gereksiz ve bozuk yerlerin temizlenmesi işlemi yapılmıştır. Temizleme işlemi bittikten sonra “Explore>Project Point Cloud>Create” butonu seçilerek yeraltı şehrine ait modelin yoğun nokta bulutuna dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Dönüşüm ile 1.984.976.325 nokta oluşmuştur.

Böylelikle Scene programı ile ilgili işlemler tamamlanmış ve nokta bulutu dosyası .las uzantılı veri olarak dışarıya aktarılmıştır.



Şekil 4.12. Scene Programı ile Üretilen Yoğun Nokta Bulutu

Scene programı ile yapılan işlemler tamamlandıktan sonra Agisoft Metashape ve Scene programlarından dışarıya aktarılan .las uzantılı nokta bulutu dosyalarının birleştirilebilmesi için 3DSurvey programına kullanılmıştır. Nokta bulutlarının birleştirilmesinde 3DSurvey programının seçilmesinin sebebi hem kullanımı çok kolay olması hem stabil çalışması hem de nokta sayısının azaltılmasında çok büyük kolaylıklar sağlıyor olmasıdır.

4.5. Dijital İkiz Oluşturma

Nokta bulutlarının 3DSurvey programında açılması için Nokta Bulutu>Yükle seçeneğinden iki nokta bulutu dosyası da seçilerek programa eklenmiştir. Eklenen nokta bulutlarının görüntülenebilmesi için ise program içerisinde bulunan sağ üst köşede yer alan nokta bulutu seçeneği tıklanmıştır. Ardından iki nokta bulutu dosyasının da eklendiğinden emin olunduktan sonra ekranın sağ altında yer alan “Birleştir” butonuna tıklanmıştır. Kullanılan masaüstü bilgisayar çok üstün performanslı bir bilgisayar olmasına rağmen nokta bulutu dosyası çok büyük boyutlarda olması sebebiyle birleştirme

işlemi çok güçlükle yapılabilmiş ve uzun bir süre bekledikten sonra işlemler tamamlanabilmiştir. Nokta birleştirme işleminden sonra 2.036.479.362 nokta oluşmuştur.



Şekil 4.13. Nokta Bulutları Birleştirildikten Sonra Oluşan Yoğun Nokta Bulutu (2.036.479.362 Nokta)

Nokta bulutu bu haliyle dışarıya aktarılmıştır ve aktarma işlemi sonucu 52 GB gibi bir boyutta nokta bulutu dosyası oluşmuştur. Yaptığımız her türlü işlerde üretilen veri kadar verinin kullanılabilirliği de çok önemlidir. Bu nedenle birleştirilmiş nokta bulutu dosyası mevcut haliyle kullanılabilir olmadığı ve ayrıca dosya boyutu itibariyle web ortamına yüklenilebilir olmadığı için nokta sayısı azaltma işlemi yapılmıştır. Nokta bulutu sayısı azaltma işlemi için yine kullanımı kolay olması sebebiyle 3DSurvey programı seçilmiştir. Birleştirilen nokta bulutu dosyası 3DSurvey programına aktarılmıştır. Nokta bulutu dosyası programa aktarıldıktan sonra yeraltı şehrine ait 1.984.976.325 nokta, program ekranında sağ altta bulunan “Nokta Bulutunu Azalt” butonu seçilmiş ve ardından nokta sayısı 384.976.321 noktaya düşürülmüştür. Böylelikle projemizde bulunan nokta sayısı yerüstü nokta sayısı ile toplamda 455.866.585’ e kadar azaltılmıştır.

3Dsurvey programı nokta bulutu azaltma işlemi için Voxel Grid Filtering yöntemi kullanılmaktadır. Voxel Grid Filtering yönteminin mantığı, nokta bulutunun belirli boyutta

küp hücelere bölünerek her hücredeki noktaların yerine tek bir temsilci nokta atanması şeklindedir. Voxel Küp hücreleri boyutunun (Voxel Boyutu) hesaplanması için aşağıdaki matematiksel işlem kullanılır.

$$\text{Voxel Küp Boyutu} = \sqrt[3]{\frac{\text{Model Hacmi}}{\text{Hedeflenen Nokta Bulutu Sayısı}}} \quad (1)$$

$$\text{Voxel Küp Boyutu} = \sqrt[3]{\frac{\Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z}{N}} \quad (2)$$

$$\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$$

$$\Delta Y = Y_{\max} - Y_{\min}$$

$$\Delta Z = Z_{\max} - Z_{\min}$$

$$N = \text{Hedeflenen Nokta Bulutu Sayısı}$$

Nokta bulutunun uzaydaki hacmini belirlemek için, her ekseninde minimum ve maksimum koordinat değerleri arasındaki fark alınarak uzamsal kapsama alanı (spatial extent) hesaplanır ($\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$, $\Delta y = y_{\max} - y_{\min}$, $\Delta z = z_{\max} - z_{\min}$). Bu temel yöntem, voxel grid filtreleme ve uzamsal veri çözünürlüğü ayarlamalarında başlangıç parametresi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Voxel küp boyutu, model hacminin nokta bulutu azaltma sonucu hedeflenen nokta bulutu sayısına bölünmesi sonucu elde edilen değer, küp kökünün alınması sonucu bulunur. (Elseberg, Borrmann ve Nüchter, 2013; Poux ve Billen, 2019; Rusu ve Cousins, 2011).

Projemizde yeraltı nokta bulutuna ait model hacmi ve hedeflenen nokta bulutu sayısı;

$$\Delta X = 66.69 \text{ m}$$

$$\Delta Y = 76.50 \text{ m}$$

$$\Delta Z = 8.39 \text{ m}$$

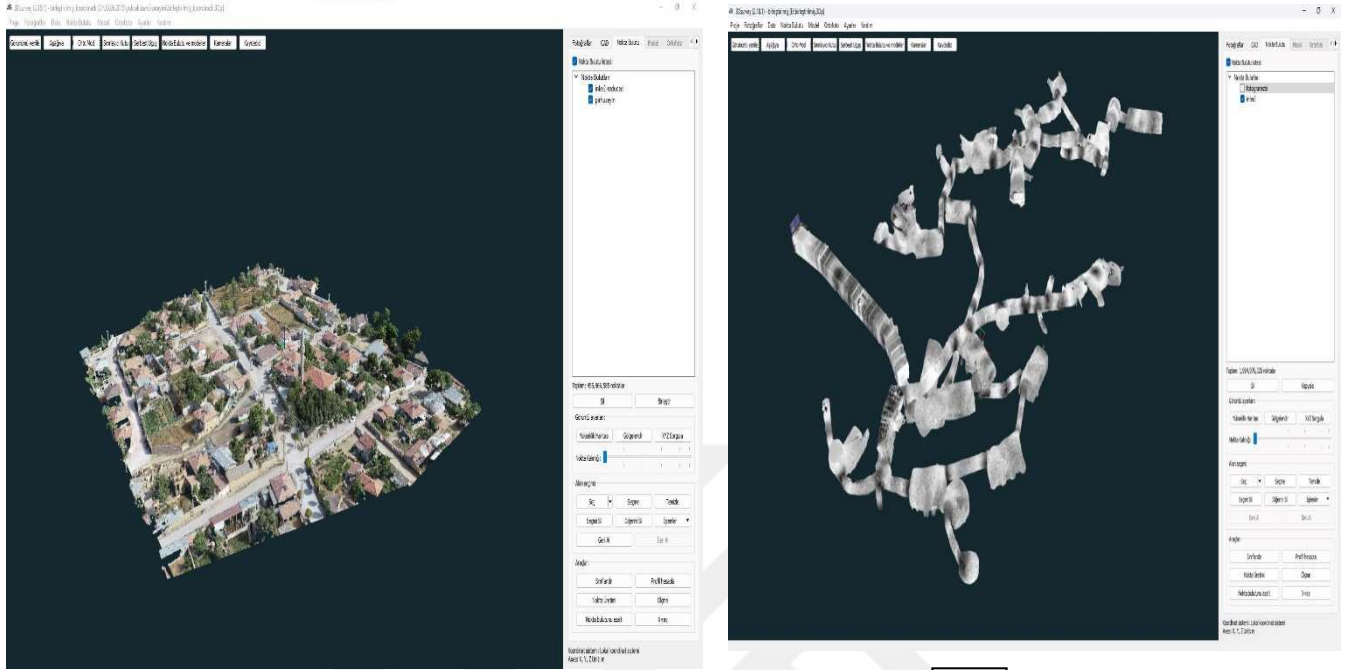
$$N = 384976321$$

Buna göre Voxel Küp Boyutu;

$$\text{Voxel Küp Boyutu} = \sqrt[3]{\frac{(66.69) \cdot (76.50) \cdot (8.39)}{384976321}} = 0.048 \text{ m} = 4.8 \text{ cm} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Yapılan bu hesaba göre, 1.984.976.325 noktaya sahip nokta bulutu, bütün kenarları 4.8 cm olacak şekilde küplere ayrılarak, küplerin içerisine isabet eden noktalar

onları temsil edecek tek bir nokta olarak dışarıya çıkmış ve böylelikle projedeki detaylar ortadan kaldırılmadan nokta sayımız 384.976.321 noktaya düşürülmüştür.



a)

b)

Şekil 4.14. Nokta Bulutları Azaltma İşleminde Sonra Oluşan Yoğun Nokta Bulutu 455.866.585 Nokta (a) Yerüstü Nokta Bulutu, b) Yeraltı Nokta Bulutu

4.6. Verilerin Üç Boyutlu Web Tabanlı Sunumu

Nokta bulutu azaltma işleminden sonra nokta bulutu .las uzantılı dosya olarak dışarıya aktarılmış ve aktarma sonucu yaklaşık 7.5 GB gibi bir veri boyutu oluşmuştur. Nokta bulutu birleştirme ve nokta sayısı azaltma işlemleri tamamlandıktan sonra 3 boyutlu nokta bulutu dosyamızın internet ortamında sunulabilmesi amacıyla çalışmalara başlanmıştır. Büyük nokta bulutlarının internet ortamında sunulabilmesi ve tüm kullanıcılar tarafından rahatlıkla kullanılabilmesi amacıyla Viyana Teknik Üniversitesi bünyesinde çalışan Markus Schutz tarafından geliştirilen büyük veri kümeleri için WebGL nokta bulutu görüntüleyicisi olan Potree programından yararlanılmıştır.

Potree programı Markus Schütz tarafından geliştirilen ve ücretsiz olarak tüm kullanıcılara sunulan kullanması basit bir programdır. Türkiye’de yaygın bir kullanım alanı yoktur. Programdaki ana mantık nokta bulutu dosyasını ekstra bir programa ihtiyaç duymadan internet ortamında sunulabilir formata dönüştürmektir. Dönüşüm işlemi için <https://potree.github.io/download.html> adresinde bulunan PotreeConverter programı

indirilmiştir. Potree programında diğer standart programlarda olduğu gibi bilgisayara kurma işlemi gibi bir şey söz konusu değildir. Bu nedenle indirilen dosya bilgisayarımız içerisinde bulunan program files (X86) dosyası içerisine atılmıştır. Ardından bilgisayarımızda “cmd” ekranı açılmış ve program files (X86) içerisine atılan PotreeConverter klasörünün olduğu dizin yolu gösterilmiştir. Dizin yolu gösterildikten sonra daha önce oluşturduğumuz nokta bulutu dosyasının internet ortamında sunulabilmesi için “PotreeConverter.exe D:\30.06.2015\yukseklisans\sarayini\potree.las -o D:\30.06.2015\yukseklisans\sarayini\output -generate-page alipotree “ komutu ile nokta bulutu dosyamız kopyala/yapıştır komutu ile doğrudan web sunucuları içine yüklenip internet ortamında sunulabilir formata dönüştürülmüştür.

```

Microsoft Windows [Versiön 10.0.22000.2530]
(c) Microsoft Corporation. Tüm hakları saklıdır.

C:\Users\windows>cd..
C:\Users>cd..
C:\Users>cd C:\Program Files (x86)\potree211
C:\Program Files (x86)\potree211>PotreeConverter.exe D:\30.06.2015\yukseklisans\sarayini\potree.las -o D:\30.06.2015\yukseklisans\sarayini\output -generate-page alipotree
threads: 24
paths: 1
WARNING: scale/offset/bounding box were adjusted. new scale: 2.1166354713386681e-07, 2.5121867963662226e-07, 3.6484568761640215e-08, new offset: 448113.44900228592, 4237359.5669968929, 1079.07100099552

output attributes:
name          offset  size
-----
position      0       32
intensity    12       2
return number 14       1
number of returns 15       1
classification 16       1
scan angle min 17       1
user data     18       1
point source id 19       2
zfp           21       6
-----
27

SHC#ABD: [
  "id": [448113.449002, 4237359.566997, 1079.071000],
  "min": [22833.19380e, 4237229.31100e, 1348.81540e3],
  "max": [267440e, 4267400e, 269.7400e]
]

points: 255'000'000
total file size: 6.2 GB
target directory: D:\30.06.2015\yukseklisans\sarayini\output\pointcloud\alipotree\

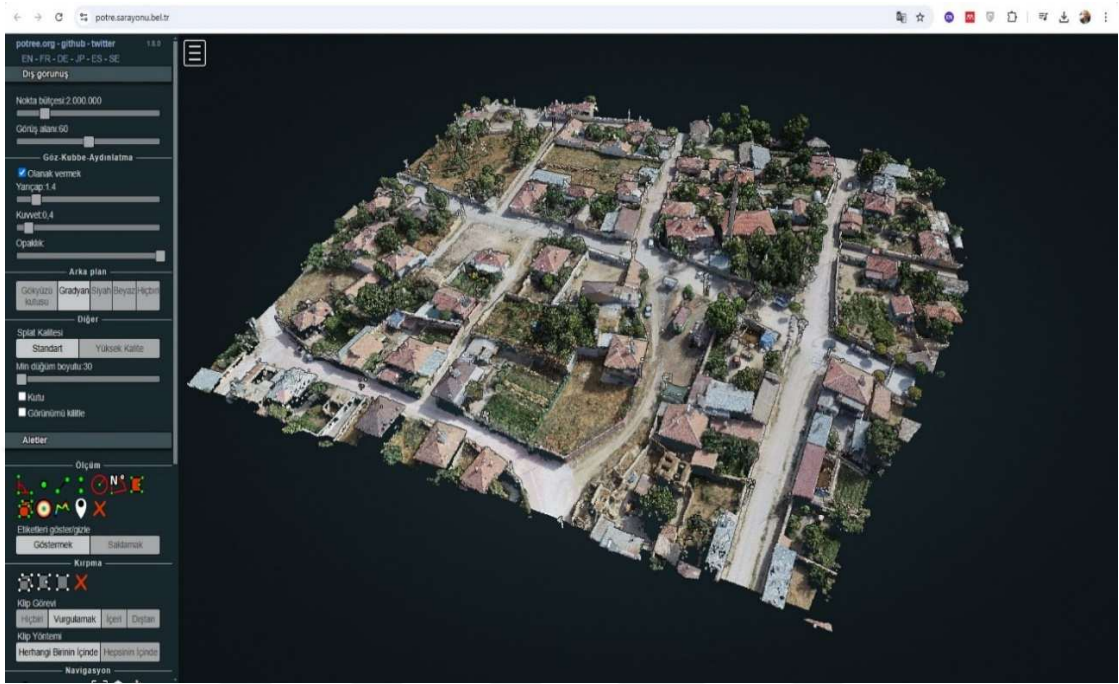
-----
COUNTING
-----
StartTaskAssembly: 0.000268s
00, 20, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 21, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 40, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 41, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 60, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 61, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 70, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 71, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 80, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 81, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 100, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 110, [ 0%, duration: 0s, throughput: -nan[nd]MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 120, [COUNTING: 1s, duration: 11s, throughput: 0MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 130, [COUNTING: 1s, duration: 11s, throughput: 0MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 140, [COUNTING: 1s, duration: 12s, throughput: 0MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 1%]
00, 150, [COUNTING: 2s, duration: 13s, throughput: 0MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]
00, 160, [COUNTING: 2s, duration: 13s, throughput: 0MPS][RAM: 0.768 (highest 0.768), CPU: 0%]

```

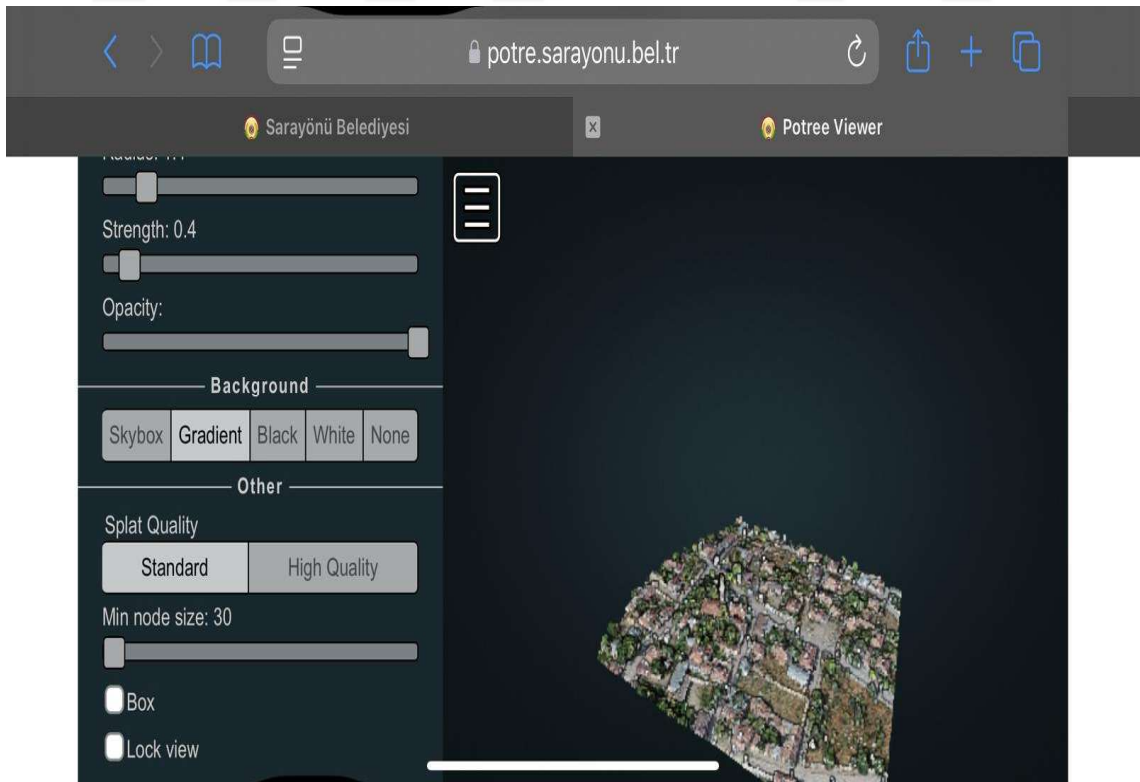
Şekil 4.15. Potree Nokta Bulutu Web Ortamına Dönüşüm Ekranı

Dönüşüm sonrası oluşan dosyaların tamamı kopyalanmış ve dosyalarda hiçbir değişiklik yapmadan Sarayönü Belediyesi’ nin resmi web sitesi olan <https://www.sarayonu.bel.tr/> adresinin web sunucusu içerisine kopyalanmıştır. İlgili dosyalar sunucu içerisine kopyalandıktan sonra web sayfası görünümünde düzenleme yapılarak <https://www.sarayonu.bel.tr/> adresinde Hizmetler seçeneği altında bulunan Potre Viewer seçeneği altında görüntülenebilir hale getirilmiştir. Yapılan çalışmamıza doğrudan ulaşmak isteyenler <https://potre.sarayonu.bel.tr/> bağlantısına tıklayarak ulaşabilirler. Söz konusu Sarayönü Yeraltı Şehri için yapılan dijital ikiz projemiz hem bilgisayardan hem de akıllı telefonlardan görüntülenebilmektedir. Ancak akıllı

telefonlarda kullanım henüz tam anlamıyla geliştirilmemiştir. Bu nedenle, akıllı telefonlar ile şimdilik sadece görüntüleme yapılabilmektedir.

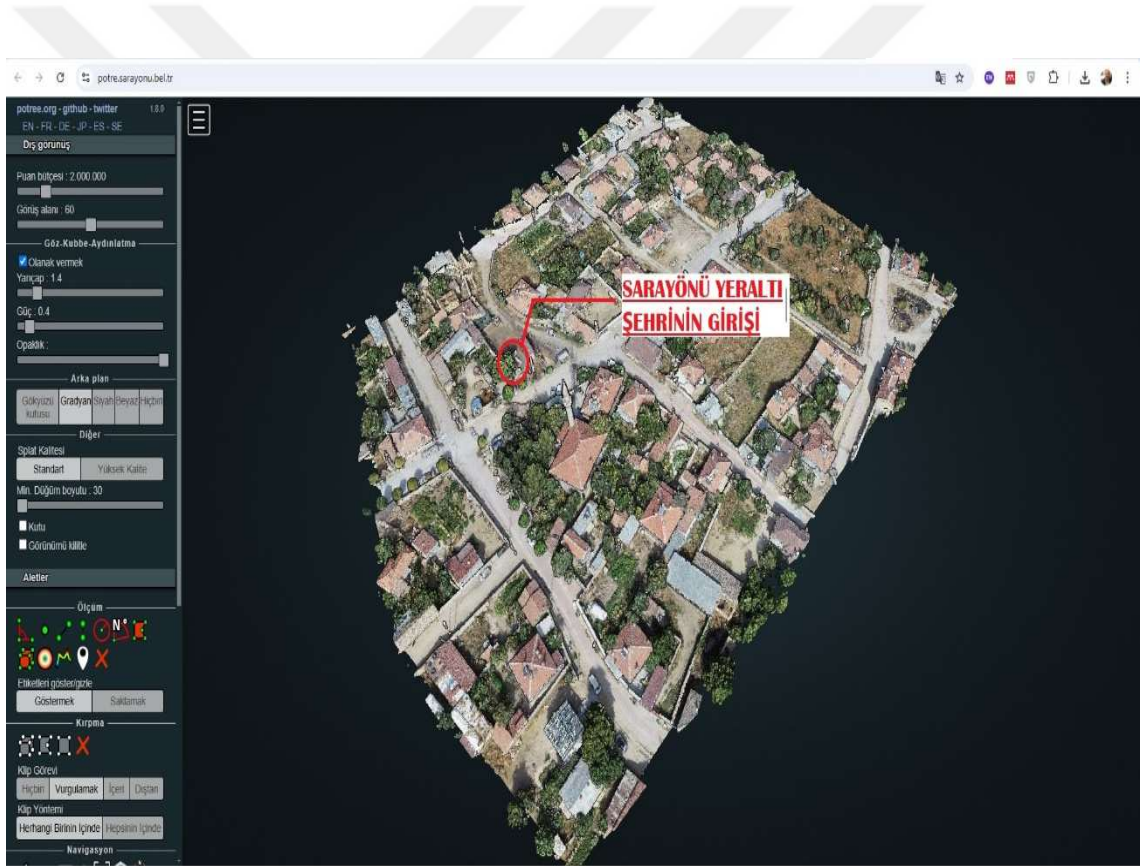


Şekil 4.16. Dijital İkiz Dosyamızın İnternet Ortamında Sunulmuş Hali (Bilgisayar Ortamında)

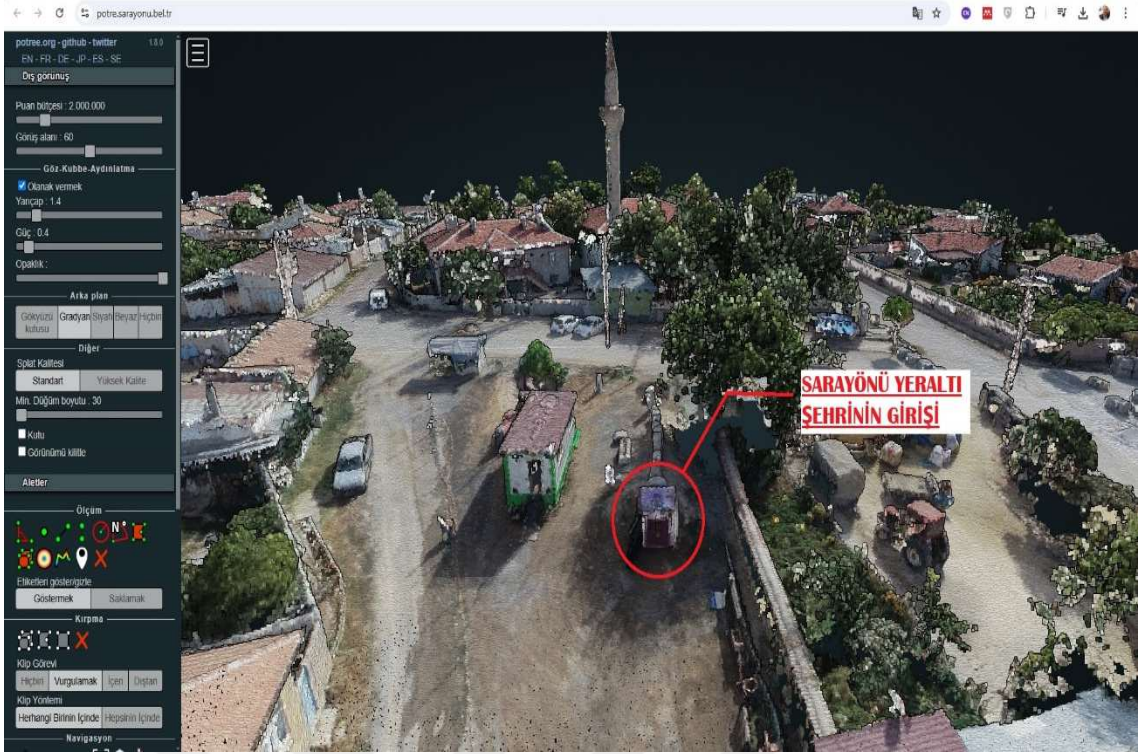


Şekil 4.17. Dijital İkiz Dosyamızın İnternet Ortamında Sunulmuş Hali (Telefon Ortamında)

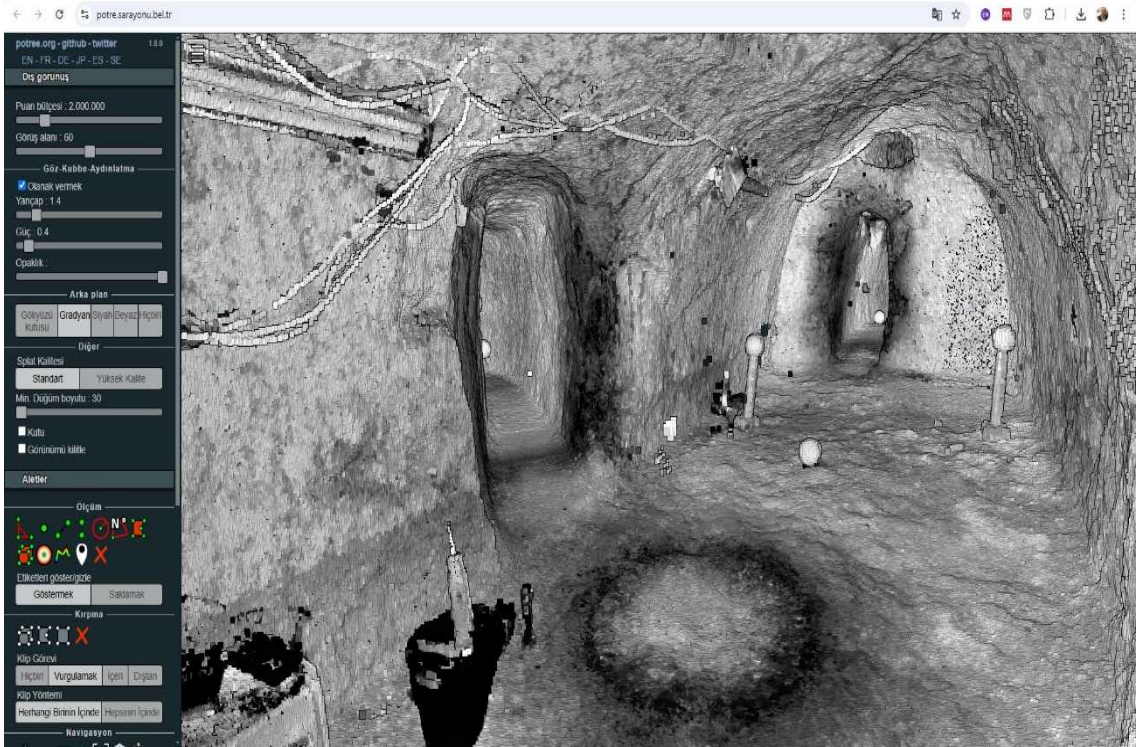
Böylelikle, kültürel mirasımızın dijital olarak ikizinin oluşturulmasına ve korunmasına büyük bir katkı sağlayacak olan tez çalışmamız burada tamamlanmıştır. Bağlantı linklerine tıkladığında, görüntünün geç yüklenmesi veri boyutundan kaynaklanmaktadır. Az bir süre beklendiği zaman görüntünün tamamı sanki “mesh” işlemi yapılmış gibi görüntülenebilecektir. Ayrıca ekranın sol tarafında bulunan butonlar sayesinde program içerisinde gezinti, video efekti çalışmaları, nokta rengine göre filtreleme, uzunluk ölçüsü alma, alan çevirme gibi işlemler de yapılabilmektedir. Modellemesi yapılan alan içerisinde gezinti yapılmak istenirse, gitmek istenilen yere farenin sol tuşu ile iki kere tıklamak yeterlidir. Ayrıca çalışmamızın ana konusu olan Sarayönü Yeraltı Şehrinin girişi Şekil 4.18 ve şekil 4.19 da gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Sarayönü Yeraltı Şehrinin Konumu



Şekil 4.19. Sarayönü Yeraltı Şhrinin Girişi



Şekil 4.20. Sarayönü Yeraltı Şhrinin İçerisinden Dijital İkizinden Bir Görüntü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, Lazer Tarama ve İHA fotogrametri teknolojilerinin entegrasyonu ile üç boyutlu dijital ikiz modelleme süreçlerine önemli katkılar sağlamış, yeraltı ve yüzey modellerinin birleştirilerek bütüncül bir analiz yapılabileceği görülmüştür. Çalışma kapsamında, Sarayönü Yeraltı Şehri'nin dijital ikiz modeli oluşturulmuş ve bu model ile yeraltı şehrinin odaları ve bağlantı yollarının yüzey üzerindeki izdüşümleri tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, yalnızca mekânsal düzenlemeler için değil, aynı zamanda havalandırma ve altyapı geliştirme gibi kritik mühendislik çözümleri için de güçlü bir temel sunmaktadır. Bu çalışma, kültürel mirasın korunması, belgelenmesi ve yenilikçi teknolojilerle geleceğe aktarılmasına yönelik kapsamlı bir uygulama örneği sunmuş ve benzer çalışmalara referans teşkil edecek önemli bir model ortaya koymuştur.

Dijital ikiz modelleme süreçlerinin daha ileri düzeyde geliştirilmesi adına, Lazer Tarama ve İHA teknolojilerinin yeni nesil sistemlerle desteklenmesi ve veri işleme süreçlerinde yapay zeka tabanlı algoritmaların uygulanması önerilmektedir. İç ve Dış Yönelme işlemleri için kullanılan bilgisayarın özelliklerinin çok iyi olması gerekmektedir. Ancak, nokta sayısının çok olması nedeniyle dosya boyutunun yüksek olması yapılan işin iyi olduğunu gösterse de kullanılabilirlik açısından uygun değildir. Bu nedenle, web ortamında paylaşım yapılırken nokta sayısının azaltılmasına dikkat edilmeli veya nokta bulutu dosyasının daha küçük boyutlarda dışa aktarabileceğimiz yazılımların geliştirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılmasına yönelik çalışmaların yanı sıra, şehir planlama, afet yönetimi ve arkeolojik araştırmalar gibi farklı alanlarda bu teknolojilerin kullanımının genişletilmesi önemli fırsatlar sunabileceği tespit edilmiştir. Böyle bir yaklaşımın, teknolojik inovasyonu desteklemenin yanı sıra, dijital ikiz modellerinin çok disiplinli uygulamalarını zenginleştirebileceği ve uluslararası düzeyde sürdürülebilir projelere katkı sağlayabileceği görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- Akın, E. S. ve Erdoğan, A., 2022, İnsansız Hava Araçları (İHA) ile Arkeolojik Alanlarda Belgeleme: Sarıkaya Roma Hamamı (Therma Basilica) Örneği, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 335-343.
- Altuntaş, C. ve Yıldız, F. 2008, Yersel Lazer Tarayıcı Ölçme Prensipleri ve Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi, *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 98, 20-27.
- Anadolu Ajansı, 2022, *Sarayönü Yeraltı Şehri*. <https://www.ntv.com.tr/galeri/n-life/gezi/konya-sarayonunde-tesadufen-antik-yer-alti-sehri-kesfedildi,-w5fnZTiuE6uw3TusvnxHQ/cjnC4xT65EiJ8Nk4byax1Q>, [Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2025].
- Ayyıldız, E., Soylu, M., Tuna, H., Özmüş, L. ve Bakıcı, S., 2017, 3 Boyutlu Kent Modellerinin Üretimi Ve Arazi Yönetiminde Kullanımı, Ankara.
- Beg, A. A. R., 2018, 3 Boyutlu Modellemede Yersel Lazer Tarama Ve İnsansız Hava Araçları Verilerinin Entegrasyonu Ve Kilistra Antik Kenti Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Bolpagni, M., 2022, Building Information Modelling and Information Management. İçinde M. Bolpagni, R. Gavina, & D. Ribeiro (Ed.), *Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies and Skills*, 29-54.
- Bragg, L., 2023, *What are indoor maps? Indoor mapping software & technology*, <https://www.mappedin.com/resources/blog/what-are-indoor-maps-indoor-mapping-software-and-technology/#:~:text=Indoor%20mapping%20is%20the%20innovative,your%20way%20can%20be%20challenging>, [Ziyaret Tarihi: 09 Nisan 2025].
- Büyük Ölçekli Harita Ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, 2018, 19-24.
- Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. Ltd. (t.y.), 2022, *DJI Phantom Pro 4 Teknik Özellikler*, <https://www.djistoreturkiye.com/dji-phantom-4-pro-v2.0-6958265164927>, [Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2022].
- Dursun, İ., 2022, Akıllı Şehirler İçin 3 Boyutlu Veri Modellerinin Oluşturulması Ve Yapı Bilgi Modellerine Entegrasyonu: Köyceğiz Kampüs Örneği, Doktora Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Elseberg, J., Borrmann, D. ve Nüchter, A., 2013, One billion points in the cloud—an octree for efficient processing of 3D laser scans, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 76-88.
- Erdoğan, A., 2016, Şeritvari Haritaların İnsansız Hava Araçları İle Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Erdönmez, M., 2018, Yapılaşmış Alanlarda İnsansız Hava Aracı Yardımıyla Eğik Resim Fotogrametrisi Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

- Erol, C., 2022, Kültürel Mirasın Fotogrametrik Olarak Modellenmesi Ve Sayısal Ortamda Sunulması, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa.
- Faro Tech., *Faro Focus 3D Teknik Özellikler*, https://gislab.utk.edu/wp-content/uploads/2018/01/E1086_FARO_LASER_SCANNER_FOCUS3DX330_MANUAL_EN.pdf?, [Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2023].
- Gümüş, K. ve Erkaya, H., 2007, Mühendislik Uygulamalarında Kullanılan Yersel Lazer Tarayıcı Sistemler, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Güvercin, B., Erdal, K., Makineci, H. B. ve Guarnieri, A., 2024, Production of WebGL Based Digital Documentation of Ponte Molino Gate From Point Cloud, *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 6(2), 112-121.
- Hamal, S. N. G. ve Ulvi, A., 2022, 3B Kent Modelleri Oluşturma Sürecinde İHA Fotogrametrisi Ve CBS Entegrasyonu: Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü Örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 4(2), 97-105.
- Karasaka, L. ve Beg, A. A. R., 2021, Yersel Lazer Tarama Yöntemi ile Farklı Geometrik Yapıdaki Özelliklerin Modellenmesi, *Geomatik Dergisi*, 6(1), 54-60.
- Karataş, L., Alptekin, A., Kanun, E. ve Yakar, M., 2022, Tarihi Kârgir Yapılarda Taş Malzeme Bozulmalarının İHA Fotogrametrisi Kullanarak Tespiti Ve Belgelenmesi: Mersin Kanlıdivane Ören Yeri Vaka Çalışması, *İçel Dergisi*, 2(2), 41-49.
- Koçyiğit, F. U., 2020, Arkeolojik Alanlarda İnsansız Hava Aracı (İHA) Kullanarak Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) İçin Veri Tabanı Oluşturma: Anemurium Antik Kent Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Kong, X. ve Hucks, R. G., 2023, Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures, *Automation in Construction*, 152, 104928.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H. ve Xu, X., 2020, Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
- Mautz, R. ve Tilch, S., 2011, Survey of optical indoor positioning systems, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN*, Portekiz.
- Metin, A., 2016, Üç Boyutlu Kent Modellerinde Ayrıntı Düzeyi Kavramı İnce Minareli Medrese (KONYA) Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Mrics, S. W., Clegg, P. ve Jones, R., 2005, Combining terrestrial laser scanning, RTK GPS and 3D Visualisation: Application of optical 3D measurement in geological exploration, *7th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, Vienna, 3-5.

- Nasery, M. N., 2021, Üç Boyutlu Arazi Modellemesinde Yer Kontrol Noktalı Ve Noktasız Üretimlerin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Samsun.
- Poux, F. ve Billen, R., 2019, Voxel-based 3D point cloud semantic segmentation: Unsupervised geometric and relationship featurig vs deep learning methods, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(5), 213.
- Przybilla, H. J. ve Wester-Ebbinghaus, W., 1979, Bildflug mit fer- Ngelenktem Kleinflugzeug Bildmessung und Luftbildwesen. Zeitschrift fuer Photogrammetrie und Fernerkundung. ed: *HERBERT WICHMAN VERLAG, KARLSRUHE, GERMANY*.
- Rusu, R. B. ve Cousins, S., 2011, 3d is here: Point cloud library (pcl), *IEEE international conference on robotics and automation*, 1-4.
- Sağlam, İ. E., 2022, Şehir Modelleri Üretiminde Eğik Hava Fotoğraflarının Kullanımı Ve Kütahya İl Merkezi Örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Schütz, M., 2015, Potree: rendering large point clouds in web browsers, *Vienna University of Technology*, Viyana.
- Türk Hava Kurumu, (t.y.), *İHA Tanımı*, <https://www.thk.org.tr/iha>, [Ziyaret Tarihi: 02 Mayıs 2023].
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A. ve Kaya, Y., 2020, İHA ve Yersel Fotogrametrik Teknikler Kullanarak Aksaray Kızıl Kilise'nin 3 Boyutlu Nokta Bulutu ve Modelinin Üretilmesi, *Geomatik*, 5, 19-26.
- Ulvi, C., 2022, İHA Video Verileri ile 3B Modelleme. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 24-28.
- UniStrong Technology Limited, (t.y.), *E-Survey E600 GNSS Teknik Özellikler*, https://pinteknik.com.tr/wp-content/uploads/2020/02/E600_Brosur_TUR.pdf, [Ziyaret Tarihi: 02 Nisan 2025].
- Wester-Ebbinghaus, W., 1980, Aerial Photography By Radio Controlled Model Helicopter, *The Photogrammetric Record*, 10(55), 85-92.
- Yiğit, A. Y. ve Uysal, M., 2023, Dijital İkizlerin Geliştirilmesinde Fotogrametrinin Kullanımı Ve Artırılmış Gerçeklik İle Görselleştirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (4), 1372-1384.
- Zeybek, M., 2019, El-Tipi LİDAR Ölçme Sistemleri Ve 3B Veri İşleme, *Türkiye LİDAR Dergisi*, 1 (1), 10-15.
- Zhou, B., Ma, W., Li, Q., El-Sheimy, N., Mao, Q., Li, Y., Gu, F., Huang, L. ve Zhu, J., 2021, Crowdsourcing-based indoor mapping using smartphones: A survey, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 177, 131-146.