

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AÇIK MADEN İŞLETMELERİNDE YER KONTROL
NOKTALARININ İNSANSIZ HAVA ARACI
FOTOGRAMETRİSİ İLE ÜRETİLEN ÜRÜNLERE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

Mehmet Fatih GÖKÇEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Uzaktan Algılama ve CBS Programı

Danışman

Doç. Dr. Anime Melis UZAR

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK MADEN İŞLETMELERİNDE YER KONTROL
NOKTALARININ İNSANSIZ HAVA ARACI FOTOGRAMETRİSİ
İLE ÜRETİLEN ÜRÜNLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Fatih GÖKÇEN tarafından hazırlanan tez çalışması 09.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Uzaktan Algılama ve CBS Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Anime Melis UZAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Anime Melis UZAR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nursu TUNALIOĞLU ÖCALAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Saygın ABDİKAN, Üye
Hacettepe Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Anime Melis UZAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Açık Maden İşletmelerinde Yer Kontrol Noktalarının İnsansız Hava Aracı Fotogrametrisi ile Üretilen Ürünlere Etkisinin Araştırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mehmet Fatih GÖKÇEN



*Aileme
ve
biricik nişanlıma*

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi danışmanlığı üstlenerek, çalışmalarım boyunca değerli görüş ve önerileriyle tüm desteği sağlayan, danışman hocam Sayın Doç Dr. Anime Melis UZAR’a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmasında kullanılan Çalışma Alanı 2 veri setinin teminini sağlayan Doç Dr. Taylan ÖCALAN’a,

Hayatımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle bugünlere gelmemde en büyük katkısı olan sevgili annem, babam ve kardeşime teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Fatih GÖKÇEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	4
1.2 Tezin Amacı	14
1.3 Hipotez	14
2 İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI	15
2.1 İHA Tanımı	15
2.2 İHA Sınıflandırılması	19
2.3 İHA Yapısı	21
2.4 İHA Sistemi ve Bileşenleri	25
2.5 İHA'ların Karşılaştırılması	26
3 İHA FOTOGRAMETRİSİ	28
3.1 İHA Fotogrametrisi İş Akışı	30
3.2 İHA Fotogrametrisinde Konum Doğruluğunu Etkileyen Faktörler	37
3.3 Açık Maden İşletmelerinde İHA Fotogrametrisi	39
4 UYGULAMA	43
4.1 Çalışma Alanı 1	44
4.2 Çalışma Alanı 2	48
4.3 Fotogrametrik İşlem Süresince Kullanılan Donanım ve Yazılım	54
4.4 İHA Fotogrametrisi İşlem Öncesi Oluşturulan Senaryolar	54
4.5 Hava Fotoğraflarının İşlenmesi	55
5 DOĞRULUK ANALİZİ	66
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKÇA	74
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	81

SİMGE LİSTESİ

A	Kolonlar arası uzaklık
B	İzdüşüm merkezleri arası baz uzaklığı
d, d'	Harita, arazideki uzunluk
f	Kamera odak uzaklığı
F_M	Modelin kapladığı alan
H_g	Uçuş yüksekliği
im_w	Görüntü genişliği (piksel)
k_1, k_2, k_3, p_1, p_2	Polinom katsayıları
L_a	Çalışma sahası düşey uzunluğu
L_b	Çalışma sahası yatay mesafesi
m_r	Fotoğraf ölçeği
Mr	Görüntüye ait ölçek
N_k	Kolon sayısı
N_r	Toplam hava fotoğrafı sayısı
n_r	Bir kolondaki fotoğraf sayısı
n	Ölçü sayısı
p	Boyuna bindirme oranı
q	Enine bindirme oranı
s'	Sensör/görüntü boyutları
S	Görüntünün yeryüzünde kapladığı mesafe
S_w	Sensör genişliği (mm)
X_0, Y_0, Z_0	İzdüşüm merkezinin koordinatları
X_h, Y_h, Z_h	İç yöneltme elemanları olan asal noktanın konumu ve odak uzak.
X, Y, Z	Resim orta noktasının coğrafi konumu
X_i, Y_i, Z_i	Yersel ölçüm sonucu elde edilmiş koordinatlar
X_{ii}, Y_{ii}, Z_{ii}	Üretilen ortofoto ve sayısal yüzey modelinden alınan koordinatlar
ω, ψ, κ	IMU sisteminden elde edilen dönüklükler
ω, ϕ, κ	İzdüşüm merkezinin dönüklük açıları

KISALTMA LİSTESİ

AKK	Açık Kaynak Kodlu
İHA	İnsansız Hava Aracı
3B	Üç Boyutlu
RTK	Real Time Kinematic
YKN	Yer Kontrol Noktaları
KOH	Karesel Ortalama Hata
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
GCP	Ground Control Points
RMSE	Root Mean Square Error
SYM	Sayısal Yüzey Modeli
SFM	Structure From Motion
HNO	Hareket ile Nesne Oluşturma
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
YÖA	Yer Örnekleme Aralığı
NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy
KN	Kontrol Noktası
RTK	Real Time Kinematic
PPK	Post Process Kinematic
RF	Radyo Frekansı
NATO	Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
TDK	Türk Dil Kurumu
DOD	Department of Defense
CAA	Civil Aviation Organization
ICAO	International Civil Aviation Organization
RPAS	Uzaktan Kumandalı Hava Sistemi
TUSAŞ	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Balon ve radyo kontrollü hasselbald 400 FL kamerası	16
Şekil 2.2 Hegi firması tarafından tasarlanan sabit kanatlı İHA	17
Şekil 2.3 Schlüter şirketi tarafından geliştirilen model helikopter	17
Şekil 2.4 Üç boyutlu fotogrametrik belgeleme için kullanılan zeplin	18
Şekil 2.5 İHA'ların sınıflandırılması.....	19
Şekil 2.6 Model helikopter örneği	22
Şekil 2.7 Sabit kanatlı İHA örneği.....	24
Şekil 2.8 Döner kanatlı İHA örneği.....	25
Şekil 2.9 İHA sistemi bileşenleri.....	25
Şekil 3.1 İHA ile hava fotoğrafı alımı örnek gösterim	29
Şekil 3.2 Uçuş planında temel kavramlar	31
Şekil 3.3 YÖA hesaplama aracı.....	33
Şekil 3.4 SFM algoritması ile 3B model çıkarma yöntemi	35
Şekil 3.5 SIFT algoritması.....	36
Şekil 3.6 Fotogrametrik triangülasyon (ışın demetleri).....	37
Şekil 3.7 Yeraltı (kapalı) ve yerüstü (açık) maden işletmeleri	41
Şekil 3.8 Açık maden işletmelerinde İHA kullanımı	41
Şekil 4.1 Çalışmaya ait iş akışı.....	43
Şekil 4.2 Çalışma alanı 1 sınırları.....	44
Şekil 4.3 SenseFly eBee classic hava aracı	45
Şekil 4.4 SenseFly SODA kamera.....	46
Şekil 4.5 Çalışma alanı 1 hava fotoğrafı alım noktaları	46
Şekil 4.6 Uçuş öncesi YKN'lerin araziye tesisi ve hava fotoğrafından görünüşleri....	47
Şekil 4.7 Çalışma alanı 1 YKN dağılımı	48
Şekil 4.8 Çalışma alanı 2 sınırları.....	49
Şekil 4.9 DJI Phantom 4 RTK hava aracı.....	49
Şekil 4.10 RTK'lı İHA çalışma prensibi	51
Şekil 4.11 Çalışma alanı 2 hava fotoğrafları alım noktaları	52
Şekil 4.12 Uçuş öncesi YKN'lerin araziye tesisi ve hava fotoğrafından görünüşleri...	52
Şekil 4.13 Çalışma alanı 1 YKN ve KN dağılımı.....	53
Şekil 4.14 YKN'lerin hava fotoğrafları üzerinde işaretlenmesi	58
Şekil 4.15 Çalışma alanı 1 (taş ocağı maden işletmesi) için seyrek nokta bulutu verisi	59

Şekil 4.16 Çalışma alanı 2 (mermer madeni işletmesi) için seyrek nokta bulutu verisi.	60
Şekil 4.17 Çalışma alanı 1 için üretilen yoğun nokta bulutu verisi	61
Şekil 4.18 Çalışma alanı 2 için üretilen yoğun nokta bulutu verisi	62
Şekil 4.19 Çalışma alanı 1 ve çalışma alanı 2 için üretilen katı (mesh) model	62
Şekil 4.20 Çalışma alanı 1 için sayısal yüzey modeli (SYM)	64
Şekil 4.21 Çalışma alanı 2 için sayısal yüzey modeli (SYM)	64
Şekil 4.22 Çalışma Alanı 1'e ait sonuç ürün ortofoto	65
Şekil 4.23 Çalışma Alanı 2'e ait sonuç ürün ortofoto	65
Şekil 5.1 Çalışma alanı 1 (koşul 1) analiz sonuçları grafik gösterimi	68
Şekil 5.2 Çalışma alanı 1 (koşul 2) analiz sonuçları grafik gösterimi	69
Şekil 5.3 Çalışma alanı 2 (koşul 1) analiz sonuçları grafik gösterimi	70



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 RTK/PPK'sız İHA'lar kullanılarak YKN önemini vurgulayan çalışmalar ..	11
Tablo 1.2 RTK/PPK donanımlı İHA'lar kullanılarak YKN önemini vurgulayan çalışmalar	13
Tablo 2.1 İHA sınıflandırma tablosu.....	20
Tablo 2.2 İHA sistemleri talimatı mevzuatında İHA'ların sınıflandırması	21
Tablo 2.3 İHA'ların karşılaştırılması	26
Tablo 2.4 Geleneksel ve günümüz İHA'larının karşılaştırılması.....	27
Tablo 3.1 İHA fotogrametrisi iş akışı.....	30
Tablo 4.1 Ebee classic hava aracı teknik özellikleri.....	45
Tablo 4.2 Sense Fly SODA teknik Özellikleri.....	46
Tablo 4.3 Çalışma alanı 1 uçuş planlaması parametreleri.....	47
Tablo 4.4 Çalışma alanı 1 YKN koordinatları	48
Tablo 4.5 DJI Phantom 4 RTK teknik özellikleri	50
Tablo 4.6 DJI FC6310R kamera teknik özellikleri	50
Tablo 4.7 Çalışma alanı 2 uçuş planlaması parametreleri.....	51
Tablo 4.8 Çalışma alanı 2 YKN ve KN koordinatları.....	53
Tablo 4.9 Kullanılan donanımın teknik özellikleri	54
Tablo 4.10 Çalışma alanı 1 için belirlenen koşul ve senaryolar	55
Tablo 4.11 Çalışma alanı 2 için belirlenen koşul ve senaryolar	55
Tablo 4.12 Hava fotoğraflarına ait konum-dönüklük bilgileri (Örnek Gösterim)	56
Tablo 4.13 Çalışma alanı 1 için kullanılan YKN'ler	57
Tablo 4.14 Çalışma alanı 2 için kullanılan YKN'ler	57
Tablo 4.15 Ön işlem adımında belirlenen parametreler	59
Tablo 4.16 Ön işlem sonucu elde edilen sayısal veriler.....	59
Tablo 4.17 Yoğun nokta bulutu üretim aşamasında parametreler	61
Tablo 4.18 Çalışma alanı 1 ve 2 için yoğun nokta bulutu parametreleri	61
Tablo 4.19 Çalışma alanı 1 ve 2 için ortofoto ve sayısal yüzey modeli parametreleri ..	63
Tablo 5.1 Çalışma alanı 1 (koşul 1) analiz sonuçları.....	67
Tablo 5.2 Çalışma alanı 1 (koşul 2) analiz sonuçları	68
Tablo 5.3 Çalışma alanı 2 (koşul 1) analiz sonuçları	69

Açık Maden İşletmelerinde Yer Kontrol Noktalarının İnsansız Hava Aracı Fotogrametrisi ile Üretilen Ürünlere Etkisinin Araştırılması

Mehmet Fatih GÖKÇEN

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Anime Melis UZAR

Günümüzde İnsansız Hava Aracı (İHA) teknolojisinin gelişimi ile ülkemizde ve dünyada askeri, sivil ve bilimsel çalışmalarda İHA'ların kullanımı birçok disiplinde farklı amaç ve uygulamalar için hızla artmaktadır. Harita Mühendisliği çalışmalarında ise zaman, maliyet ve işgücü açısından optimal çözüm sağlamaktadır. Ayrıca, İHA sistemleri ile elde edilen fotogrametrik ürünlerin yüksek çözünürlük ve doğruluğa sahip olma avantajı maden işletmelerinde yürütülen faaliyetlerde de kullanılmaya başlanmasına sebep olmaktadır. Böylece, açık maden işletmelerinde halihazır harita üretimi, jeolojik haritalama, dik ve erişilemeyen bölgelerdeki yüzeylere ait konumsal bilgilerin elde edilmesi, üç boyutlu (3B) modelleme, kazı planlaması, üretim ve dekapaj miktarının belirlenmesi, stok ve döküm sahası kübaj hesapları gibi faaliyetlerin hızlı ve yüksek doğrulukta yürütülmesi sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, çalışma alanı 1 için İsviçre, Vaud Kanton'u Eclepence bölgesine ait 90 hektar alana sahip bir taş ocağı ve çalışma alanı 2 için ise Bursa, Gürsu bölgesine ait 15 hektar alana sahip mermer madeni işletmesinin sırayla RTK (Real Time Kinematic)'sız ve RTK modülüne sahip İHA'lar kullanılmıştır. Bu platformlar kullanılarak elde edilen hava fotoğraflarının fotogrametrik kıymetlendirme ile işlenmesi sonucunda ortofoto ve

sayısal yüzey modeli (SYM) sonuç ürünleri elde edilmiştir. Bu kapsamda yersel ölçüm teknikleriyle elde edilen Yer Kontrol Noktaları (YKN) kullanılarak fotogrametrik işlem sürecinde sayısına ve dağılımına göre her iki çalışma sahasında koşul ve senaryolar belirlenmiştir. Çalışma alanı 1 için iki koşul altında toplam 14 senaryo, çalışma alanı 2 için ise bir koşul altında 8 farklı senaryoya göre sonuç ürünler elde edilmiştir. Oluşturulan stratejide fotogrametrik ürünlerin doğruluk analizleri karesel ortalama hata (KOH) değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, uygulanan koşul ve senaryolara bağlı olarak bu tip çalışma alanlarında en elverişli ve elverişsiz durumlarda elde edilen konum doğruluğu sonuçlarının karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, açık maden işletmeleri gibi arazi koşullarının homojen YKN dağılımına elverişli olmadığı alanlarda, İHA-Fotogrametrisi tekniği ile elde edilen ürünlerin yüksek doğruluk sağladığı ve bu bağlamda etkin kullanımının mevcut olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İHA, açık maden işletmesi, yer kontrol noktası (YKN), ortofoto, karesel ortalama hata (KOH).

Investigating the Effect of Ground Control Points on the Products Produced by Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry in Open Cast Mines

Mehmet Fatih GÖKÇEN

Department of Geomatic Engineering

MSc Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Anime Melis UZAR

With the development of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology today, the use of UAVs for different purposes and applications in many disciplines in the military, civilian and scientific fields in Turkey and around the world is increasing rapidly. In Geomatics Engineering studies, UAVs provide optimal solutions in terms of time, cost and labor. Additionally, the advantage of photogrammetric products obtained with UAV systems brought by their high resolution and accuracy has also allowed them to be utilized in operations carried out in mining facilities. This way, in open-cast mining areas, it becomes possible to achieve operations, such as current map production, geological mapping, obtaining positional data for surfaces in steep and inaccessible locations, three-dimensional modeling, excavation planning, determining the quantity of production and stripping and making cubage calculations for inventory and dump sites, with high speed and accuracy.

In this study, for a 90-hectare stone quarry in the Éclépens municipality in the Vaud Canton of Switzerland as Study Area 1 and a 15-hectare marble quarry in the Gürsu district of the Province of Bursa in Turkey as Study Area 2, UAVs, respectively with and without an RTK (Real Time Kinematic) module, were used. As a result of processing the aerial photographs obtained by using these platforms via photogrammetric evaluation,

orthophoto and digital surface model end products were obtained. In this process, using Ground Control Points (GCP) obtained by terrestrial measurement techniques, conditions and scenarios were determined for both study areas based on their numbers and distributions in the photogrammetric process. End products were obtained based on 14 scenarios under two conditions for Study Area 1 and 8 scenarios under one condition for Study Area 2. In the strategy that was formed the accuracy analyses of the photogrammetric products were carried out by testing root-mean-square error (RMSE) values. As a result of the process, comparative analyses of the position accuracy results obtained with the most favorable and most unfavorable conditions in such study areas based on the implemented conditions and scenarios were carried out. Consequently, it was concluded that in cases where the terrain conditions are not suitable for a homogeneous GCP distribution like open-cast mining areas, products obtained with the UAV-Photogrammetry technique provide high accuracy, and they have an effective use in this context.

Keywords: UAV, open-cast mining areas, ground control points (GCP), orthophoto, root-mean-square error.

Son yıllarda teknolojik gelişmelerin büyük hız kazanması ile veri toplama/veri işleme konusunda otomasyon, zaman ve maliyet faktörleri tüm sektörlerde daha da önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle uzaktan algılama ve fotogrametri kapsamında görüntü işleme alanında gerçekleşen bilimsel gelişmeler ile mevcut problemlerin çözümünde farklı arayışlara yönelmeler olmuştur. Fotogrametri, yeryüzünden veya belirli bir yükseklikten alınan görüntüler yardımıyla kayıt, ölçme ve yorumlama işlemleri sonucu cisimler ve yakın çevresi hakkında mekânsal ölçümlerin ve geometrik olarak güvenilir ürünlerin elde edildiği bilim ve teknolojidir [1, 2]. Fotogrametride değerlendirme, fotoğraflardan harita üretmek, ya da daha önce yapılmış haritaları güncelleştirmek anlamına gelmektedir. Bu bilimin değerlendirme yöntemlerine göre tarihsel süreci plançete (grafik) fotogrametrisi ile başlamış, devamında analog fotogrametri, analitik fotogrametri ve günümüzde teknoloji ışığında gelişimini sürdüren sayısal (dijital) fotogrametri ile devam etmektedir. 1990'lı yıllardan sonra analog görüntülerin yerine dijital kameralar ile çekilmiş sayısal görüntülerin kullanıldığı ve tüm çalışmaların bilgisayar ortamında gerçekleştirildiği teknik olan sayısal fotogrametri, mühendislik çalışmaları için ayrı bir öneme sahip olmuştur [2]. Fotogrametrik ölçümle yapılan çalışmalar fotoğraf çekim yüksekliklerine göre sınıflandırıldığında yersel ve hava fotogrametrisi olarak ayrılmaktadır. Yersel fotogrametri, yeryüzünden ya da yeryüzüne yakın bir yükseklikten, bir cismin ya da yakın çevresinin fotoğrafları kullanılarak oluşan bir fotogrametri tekniğidir. Hava fotogrametrisi ise yeryüzünden belirli bir yükseklikteki uçak ve helikopter gibi hava araçları kullanılarak elde edilen hava fotoğraflarını kullanan tekniktir. Fotogrametri çalışmalarında ilk uygulamalar yersel fotogrametri ile başlamıştır. Ancak hava fotogrametrisi tekniği haritacılıkta standart bir harita yapım yöntemi olarak kabul edilmesinin yanında fotogrametrik çalışmalar ile harita yapımında geniş olanaklar sağlaması sebebiyle hava fotogrametrisi zamanla tercih sebebi olmuştur. Çünkü bu teknik geniş arazilerin haritalarının yapım aşamasında daha geniş alan tarama ve hız faktörü sağlamaktadır. Yersel fotogrametri tekniği ise harita yapımında ancak belirli koşullar altında kullanılabilir ve gerekli koşullar sağlansa bile geniş arazilerde fotoğraf çekmenin, gerekli ölçümleri yapmanın zorluğu hava fotogrametrisini tercih sebebi kılmaktadır.

Yersel fotogrametri tekniği ile harita yapımı ancak hava fotogrametrisinin uygun olmadığı ya da ekonomik olmadığı senaryolarda kullanılabilir [3].

Son yıllarda oluşumunu tamamlayan sayısal fotogrametri, hava fotogrametrisiyle entegre olmuştur. Ancak, hava fotogrametrisinde taşıyıcı platform olarak kullanılan uçak ve helikopterlerin oldukça maliyetli olması ve tekrarlı ölçümlerin zor olması gibi sebeplerden kaynaklı dezavantajlar beraberinde gelmiştir [4]. Farklı platformlarda ve tekniklerde fotogrametrik ürün üretilen teknolojiye ve gelişmeye oldukça açık olan Fotogrametri bilimi, yeni bir taşıyıcı platform olan İnsansız Hava Araçlarını (İHA) sıkça kullanmaya başlamıştır. Bu hava araçları uzaktan bir kumanda ile yarı otomatik kontrol edilebilen ya da belirlenen bir uçuş planı içerisinde tam otomatik hareket edebilen ve çeşitli tiplerde yük taşıyabilen platformlardır [5].

Dünya tarihinde 1849 yılında askeri alanda kullanılmaya başlayan İHA'lar [6], 1970 yılından sonra geliştirilen çeşitli hava araçları ile fotogrametriye entegre olmuştur. Böylece literatürde "İHA fotogrametrisi" adı verilen bu teknik günümüzde gelişen teknolojiyle beraber birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA'lar kullanılarak elde edilen hava fotoğraflarının fotogrametrik kıymetlendirme ile işlenmesi sonucu ortofoto, sayısal yüzey modeli (SYM), yoğun nokta bulutu ve 3 boyutlu model gibi ürünler elde edilmektedir [5]. İHA ile yapılan fotogrametri çalışmaları sayesinde zaman tasarrufu, düşük maliyet, yüksek çözünürlük gibi avantajlarının yanında dik ve erişilemeyen zor arazi şartlarında büyük kolaylık sağlaması, uçak ve helikopterlere göre daha alçak irtifadan uçuş yapabildiği için bulutlu havalarda kullanılabilmesi ve tekrarlı ölçüm yapılabilmesi özelliğiyle yüksek zamansal çözünürlük sağlaması gibi avantajları da vardır.

İHA'lar düşük maliyetli olanaklarla sağladığı avantajlar ile hemen hemen her sektörde kullanılmaktadır. Ayrıca, teknolojiyle birlikte gelişen İHA yapıları ve görüntü işleme yazılımlarının her geçen gün geliştirilmesi ile kaliteli veri üretimi yolunda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. İHA fotogrametrisi tekniği ile haritacılık çalışmalarında üretilen haritalar ve 3B modeller kullanılarak tarım ve hayvancılık uygulamaları, arkeolojik uygulamalar, maden bölgeleri, kıyı alanları ölçümü, jeolojik uygulamalar, inşaat alanları (inşaat projeleri imalat durum) ölçümü, kentsel dönüşüm planlamaları, afet bölge planlamaları ve sanayi gölge tesisleri gibi birçok alanda yer bulmuştur [7]. Özellikle açık maden işletmeleri gibi eğim farkı oldukça yüksek zor arazilerde; kazı planlanması, üretim ve dekapaj miktarının belirlenmesi, stok ve döküm sahası kübaj

hesapları, dik ve erişilemeyen bölgelerdeki yüzeylere ait konumsal bilgilerin elde edilmesi, jeolojik haritalama, kayaç tespiti ve halihazır harita üretim faaliyetlerinde kabul edilebilir doğruluklarla çalışılmaktadır. İHA kullanılarak elde edilen verilerin uygun yazılımlarla fotogrametrik ürün elde edilmesiyle madencilik operasyonlarında kazı planlamaları geleneksel yöntemlere göre sadece birkaç yüz nokta ile değil milyonlarca noktalık yoğun nokta bulutuyla gerçekleştirilebilmektedir [8]. Ayrıca hızlı şekilde periyodik harita üretimi ile maden sahasının değişimleri gözlenmektedir. İHA kullanılarak yapılan bu çalışmalar klasik yöntemlere göre zaman tasarrufu sağlamasının yanında maden işletmeleri gibi tehlikeli alanlarda yaşanan iş kazalarının da önüne geçilmektedir [9].

Günümüzde özellikle İHA kullanımının fotogrametri alanında yaygınlaşmasıyla birlikte birçok ticari ve açık kaynak kodlu (AKK) yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımların temelinde en büyük ortak özellikleri Structure From Motion (SFM) yöntemini kullanmalarıdır. İHA fotogrametrisi alanında ticari ve akademik çalışmalarda en sık kullanılan Agisoft PhotoScan, Pix4d, Context Capture, VisualSFM gibi yeni nesil yazılımlar da bu yöntemi kullanmaktadır [10 - 12]. SFM, 2 boyutlu görüntü dizinlerini kullanarak yeryüzünün veya nesnenin 3 boyutlu modelini oluşturma tekniğidir. Ayrıca, stereo fotogrametride modelleme için kullanılan lazer tarama ekipmanlarına göre kıyaslandığına kullanıcı dostu ve oldukça düşük bütçeli olduğu görülmektedir [13, 14].

İHA'lar kullanılarak elde edilen hava fotoğrafları ile üretilen fotogrametrik ürünlerin haritacılık faaliyetleri için konum doğruluğu büyük önem arz etmektedir. Yapılacak projelerde kullanılan İHA, ölçüm yöntemleri, yazılımlar ve belirlenen parametrelerdeki farklılıklar üretilen ürünlerin konum doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. İHA fotogrametrisi çalışmalarında konum doğruluğu analizi için sıklıkla kullanılan yöntem karesel ortalama hata (KOH) kriteridir [15 - 18]. Konum doğruluğunu etkileyen faktörler incelendiğinde; uçuş yüksekliği, kullanılan kameraların özellikleri, hava fotoğrafı sayısı, YKN kullanımı, uçuş planı içerisinde belirlenen enine ve boyuna bindirme oranları ve meteorolojik koşullar gibi birçok örnek verilebilir [5, 19]. Bunlar içerisinde en çok önem arz eden etkenlerden birisi ise YKN'lerin çalışma sahası içindeki dağılımlarıdır. YKN'ler fotogrametride görüntülerin düzeltilmesi aşamasında yer koordinat sistemi ile fotoğraf koordinat sistemi arasındaki bağlantıyı kurmaktadır. Ayrıca sonuç ürünlerin konum doğruluğuna pozitif yönde etki etmektedir. Global Positioning System (GPS) ve Inertial Measurement Unit (IMU) teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte rektifikasyonda

kullanılan dış yöneltme elemanları doğrudan hesaplanabilmektedir. Buna karşın datum dönüşümünün yapılabilmesi ve sistematik GNSS hatalarının giderilmesi için YKN'lere ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Konum doğruluğunun önem arz ettiği fotogrametrik çalışmalarda uçuş yapılmadan önce araziye tesis edilmiş en az 3 adet YKN kullanılmalıdır [21]. Ayrıca fotogrametrik işlem sırasında araziye tesis edilmiş noktaların seçilebilmesi için bu hedefler, bindirmeli hava fotoğraflarında iyi derecede görünür ve ayırt edilebilir olmalıdır [22].

1.1 Literatür Özeti

Literatür araştırması kapsamında İHA fotogrametrisi tekniği kullanılarak elde edilen ürünlerin doğruluğuna önemli derecede etki eden YKN ve diğer faktörler göz önünde bulundurularak, bu kapsamda yapılan farklı çalışmalar incelenmiştir.

Strecha C. (2011), İHA fotogrametrisi tekniği ile üretilen ürünlerin konum doğruluğuna en çok etki eden faktörlerin YKN ve uçuş yüksekliği olduğunu belirtmiştir. Birbirinden farklı uçuş yükseklikleri, YKN ve hava fotoğrafı sayılarına sahip üç çalışma alanı belirlemiştir. Pix4d yazılımını kullanarak tüm çalışma alanlarında YKN'li ve YKN'siz olarak ortofoto ve sayısal yükseklik modeli üretmiştir. Sonuçta YKN'lerin dahil edildiği ürünlerde KOH değeri 0.05-0.2 m aralığında iken YKN olmadan üretilen ürünlerde 2-8 m aralığında olduğu görülmüştür [23].

Turner D. ve diğ. (2012), iklim değişikliğinin bitki örtüsü üzerinde etkisi olan Antartika bölgesinde iki çalışma alanı belirlemiştir. Birinci çalışma alanı 1.1 ha alana sahipken ikinci çalışma alanı 0.5 ha'dır. 50 m uçuş yüksekliğinden İHA ile elde edilmiş ultra yüksek çözünürlüklü, birinci çalışma alanında 200 diğ. 69 adet hava fotoğrafı kullanarak ortofoto üretimi yapmıştır. Yersel ölçüm tekniğiyle birinci çalışma alanı için 25, ikincisi için 20 adet YKN ölçümü yapmıştır. KOH kriterine göre YKN'siz üretilen ürünlerin KOH_{xy} değerleri 65-120 cm arasında değişirken YKN kullanılarak üretilen ürünlerin hata payı 10-15 cm arasında değiştiği tespit edilmiştir [24].

Uysal M. ve diğ. (2015), Afyon il sınırları içinde yer alan Şahitler Tepesi bölgesinde 5 ha alanı çalışma bölgesi olarak belirlemiştir. İHA fotogrametrisi performansını değerlendirmek için 60 m uçuş yüksekliğinden 200 adet hava fotoğrafı elde etmiştir. Ayrıca yersel ölçümle GNSS alıcısı ile RTK modunda 27 adet YKN ölçümü yapılmıştır. Bu verilerle Agisoft PhotoScan yazılımı kullanılarak sayısal yükseklik modeli üretmiştir.

Sonuçta üretilen verinin doğruluk analizi için 30 adet kontrol noktası kullanılmış ve KOHz 6.6 cm değeri elde edilmiştir [25].

Gonçalves J.A. ve diğ. (2015), kıyı çizgisi değişimini incelemek ve plajları haritalamak için İHA fotogrametrisi tekniği kullanmıştır. Belirlenen iki çalışma bölgesinde önce GNSS alıcısı ile YKN ölçümü yapılmış sonrasında İHA ile hava fotoğrafları temin edilmiştir. Bu verilerle Agisoft PhotoScan yazılımı kullanılarak fotogrametrik işlem sonucu ortofoto ve SYM üretmiştir. Yer örnekleme aralıkları (YÖA) 3.2 ila 5 cm arasında değişen sonuç ürünlerin doğruluk analizleri düşeyde 3.5 ila 5 cm aralığında KOHz değeriyle karşılaştırılmıştır. YKN'lerin ölçümü esnasında GNSS ile yüksek doğruluğa sahip referans istasyonu ağına bağlanarak koordinatların elde edilmesi, fotogrametrik ürünlerin hassasiyetini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir [26].

Ajayi G.O. ve diğ. (2018), düşük maliyetli (<1500\$) olduğu belirtilen DJI Phantom 2 hava aracını kullanarak baraj inşaatı uygun yer seçimi hem de İHA performansını değerlendirmek için sayısal yükseklik modeli ve ortofoto üretmeyi hedeflemiştir. Bu amaçla, 81 ha alana sahip çalışma bölgesinde 120 m uçuş yüksekliğinden hava fotoğrafları ve GPS ile RTK bazlı 20 adet YKN elde edilmiştir. Elde edilen fotogrametrik ürünlerin KOH kriterine göre yatayda ve düşeyde sırasıyla KOHx 5,2 cm KOHy 4,4 cm ve KOHz 4,6 cm değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar NSSDA'ya göre kabul edilebilir sınırlar içinde yer aldığı belirtilmektedir [27].

Elkhrachy I. (2021), düşük maliyetli (<2000\$) DJI Mavic Pro İHA ile 250*200 m alana sahip bir çalışma sahasında 70 m uçuş yüksekliğinden hava fotoğrafları alımı yapmış ve yersel tekniklerle 21 adet YKN ölçümü yapmıştır. Elde edilen verileri kullanarak Pix4d yazılımında ortofoto ve SYM verileri üretmiştir. Sonuç ürünlerin konum doğruluğu analizi sonucunda yatayda KOHxy 4.6 cm iken KOHz 5.6 cm sonuçlar elde edilmiştir [28].

Watanebe Y. ve diğ. (2016), Japonya'nın Hiroşima bölgesinde yer alan Jyoge Nehri'nde sel öncesi ve sonrasında arazi yapısındaki değişimleri izlemek için 100 m uçuş yüksekliğinden Sony Alpha 7R kamerasına sahip İHA ile hava fotoğrafları elde etmiştir. Çalışma bölgesinde 10 adet YKN ölçümü için GNSS-RTK ve Total Station kullanılmıştır. Hava fotoğraflarının işlenip fotogrametrik ürünlerin elde edilmesi için Pix4d Mapper programında çalışılmıştır. Elde edilen ürünlerin doğruluk analizleri sonucunda yatayda maksimum KOH 4 cm hata payı ile karşılaştırılmıştır. Böylece alınan sonuçlar çok yüksek

hassasiyet olarak değerlendirilmiş ve arazi yapısındaki değişimleri analiz etmek için İHA'ların uygun platform olduğu kanısına varılmıştır [29].

Wierzbicki D. ve diğ. (2015), çalışmasında belirli hava koşullarında ve gökyüzünün aydınlanma değişimlerinde İHA performansını değerlendirmek istemiştir. Bunun için düz bir tarım arazisini çalışma alanı olarak belirlemiştir. Analiz sonucu olumsuz hava koşullarının üretilen ürünlerin kalitesini ve doğruluğunu %25 oranında azalttığını belirtmekte ve bu gibi durumlarda daha iyi sonuçlar için uçuş yüksekliğinin azaltılması gerektiğini belirtmektedir [30].

Amrullah C. ve diğ. (2016), İHA'ya sabitlenmiş metrik olmayan bir kamera yardımıyla oblik ve düşey açılarda çekilen hava fotoğraflarından elde ettiği ürünleri karşılaştırmıştır [31]. Hastaoğlu ve diğ. (2021) çalışmasında kamera odak uzaklığı değerinin değiştirilmesiyle oluşan YÖA değişimlerinin konum doğruluğuna etkisini araştırmıştır. Bu amaçla belirlenen bir çalışma sahasında sabit uçuş yüksekliği ve aynı hava koşullarında odak uzaklığı değiştirilmiş kameralar (16,20,24 ve 35 mm) ile farklı uçuşlar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda 35 mm yerine 16, 20 ve 24 mm odak uzaklığına sahip lens kullanıldığında sırasıyla YÖA %106, %66 ve %43 oranında artmasına karşın konum doğruluğunda 20 ve 24 mm için yaklaşık %10 ve 16 mm için %122' lik bir değişim gözlenmiştir [32].

Harwin ve diğ. (2012), çalışmasında SFM tekniği kullanan AKK fotogrametrik yazılım ile bindirme oranlarının fotogrametrik ürünler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda yüksek bindirme oranlarının (enine %70- boyuna %95) konum doğruluğunu pozitif yönde etkilediğini belirtmektedir [33].

Mesas ve diğ. (2016), İspanya'nın Cordoba eyaletinde arkeolojik bölgede 1.13 ha çalışma alanında uçuş parametrelerinin ve YKN'lerin ortofotolar üzerindeki hassasiyetini araştırmıştır. Bunun için belirlenen uçuş yüksekliklerinden (30, 40, 50, 60, 70 ve 80 m), enine-boyuna bindirme oranlarından (%50-%80 ve %40-%70) ve YKN'lerin dahil edilip edilmediği durumlarda toplam 24 (6 uçuş yüksekliği*2 bindirme oranları*YKN=24) adet ortofoto üretimi yapmıştır. KOH kriterine göre yapılan sonuç ürün analizlerinde en düşük hata payı (KOH_{xy} 3.8 cm); 30 m uçuş yüksekliği, 50-80 enine-boyuna bindirme oranı ve YKN'nin dahil edildiği durumda ve en yüksek hata payı ise (KOH_{xy} 934 cm); 80 m uçuş yüksekliği, 40-70 enine-boyuna bindirme oranı ile YKN'nin dahil edilmediği şartlarda elde edilmiştir [34].

Remondino F. ve diğ. (2011), çalışmasında arkeoloji ve tarım alanı çalışma sahalarında İHA'lar yardımıyla elde edilen hava fotoğraflarının işlenmesi aşamasında PMVS ve Micmac AKK yazılımları kullanarak yoğun nokta bulutu verisi üretmeyi hedeflemiştir. Sonuçta Micmac yazılımı kullanarak üretilen fotogrametrik ürünlerin konum doğruluğunun yatayda ve düşeyde sırasıyla 4 ve 7 cm hassasiyetinde sonuçlarla karşılaştığını belirtmiştir [35].

Jaud M. ve diğ. (2016), bir çalışma bölgesinde birebir aynı uçuş parametreleri ve YKN ile ticari yazılım olan Agisoft PhotoScan ve AKK MicMac yazılımı kullanarak sayısal yüzey modeli üretmiştir. Her iki durumda elde edilen ürünlerin analizi sonucu konum hassasiyetinin 3-4 cm ile başarılı sonuçlar verdiğini belirtmiştir [7].

Murtıyoso A. (2017) ise aynı girdi parametreleriyle 4 fotogrametri yazılımı (PhotoModeler, Pix4d, Agisoft PhotoScan ve Micmac) kullanarak elde ettiği ürünleri karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda ürünler hassasiyet açısından değerlendirdiğinde PhotoModeler'in diğer yazılımlara kıyasla başarısız olduğunu; AKK MicMac yazılımının ise Agisoft ve Pix4d ticari yazılımları kadar başarılı olduğunu belirtmiştir [36].

Agüera-Vega ve diğ. (2016); uçuş yüksekliğinin, arazi morfolojisinin ve YKN sayısının SYM ve ortofoto doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bunun için 5 farklı arazi yapısına sahip çalışma bölgesinde farklı uçuş yüksekliği (50, 80, 100, 120 m) ve YKN sayısı (3, 5, 10) kullanarak Agisoft PhotoScan ile 60 fotogrametrik proje gerçekleştirilmiştir. YÖA 1.9 ila 3 cm arasında olan fotogrametrik ürünlerin doğruluk analizleri KOH kriterine göre yapılmıştır. Çalışma sonucunda; Uçuş yüksekliğinin ve arazi morfolojisinin yatay doğruluğu etkilemediği görülmüş ancak fotogrametrik işlem esnasında kullanılan YKN sayısının yatay doğruluğu olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Arazi morfolojisinin düşey doğruluğu etkilemediği ancak uçuş yüksekliği ve YKN sayısının önemli etkileri olduğu belirtilmiştir. Alçak seviye uçuş yüksekliği ve kullanılan YKN sayısının artması düşey doğruluğa olumlu yönde etki yaptığı belirtilmektedir [37].

Agüera Vega ve diğ. (2017), bir başka çalışmasında kullanılan YKN sayısının ortofoto ve SYM ürünlerinde doğruluğa etkisini araştırmıştır. 17 ha'lık bir alanda İHA ile 120 m uçuş yüksekliğinden 160 hava fotoğrafı alınmıştır. Fotogrametrik işlem esnasında farklı YKN sayısı kombinasyonlarına (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 YKN) göre ürünler elde edilmiştir. Değerlendirmeler sonucu kullanılan YKN sayısı arttıkça doğruluğun hem

yatay hemde düşeyde arttığı görülmüştür [38]. Tahar (2013) ve Tonkin vd. (2016) çalışmalarında fotogrametrik ürünlerin elde edilmesi aşamasında kullanılan YKN sayısının sonuç ürünlerin konum doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir [39], [40].

Carvajal-Ramírez ve diğ. (2016), oldukça eğimli zor arazi olarak nitelendirilen heyelan bölgesinde GNSS alıcısı kullanarak yersel ölçüm tekniğiyle yer kontrol noktalarının ölçümünün zor olmasından kaynaklı en minimal şartlarda 3 adet YKN ölçümü yapılmış ve bu noktaların çalışma sahasında dağılımının kombinasyonunu yaparak ortofoto ve sayısal yükseklik modeli verilerinin doğruluğuna etkisini araştırmıştır. Hava fotoğraflarının elde edilmesinde mini İHA'ya sabitlenmiş metrik olmayan Pentax Optio A40 dijital kamera kullanılmıştır. YKN'lerin ölçümü içinde RTK modunda Trimble R6 GNSS alıcısı kullanılmıştır. Fotogrametrik ürünlerin elde edilmesi aşamasında Photomodeler Scanner yazılımı kullanılmış ve sonuç ürünler KOH kriterine göre analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda YKN'lerin birbirinden uzak olacak şekilde çalışma alanına konumlandırılması sonucu elde edilen fotogrametrik ürünlerin konum doğruluğunu arttırdığı görülmüştür. Ayrıca eğimli arazilerde yapılan çalışmalar için YKN'lerden birinin eğimin en fazla olduğu yere konumlandırılması da doğruluğu arttıran bir başka faktör olduğu belirtilmiştir [41].

Martínez-Carricondo ve diğ. (2018), YKN sayısının ve dağılımının, İHA fotogrametrisi tekniği kullanılarak, oluşturulan ürünlerin konum doğruluğuna etkisini araştırmıştır. Bunun için 17.6 ha alana sahip bir çalışma bölgesinde İHA ile 120 m uçuş yüksekliğinden hava fotoğrafları çekilmiş ve yersel ölçüm tekniğiyle 72 adet 3 boyutlu YKN ölçümü yapılmıştır. YKN'ler çalışma alanına kenar, merkez (orta), köşe, tabaka (homojen) ve rastgele dağılım şeklinde 5 kombinasyon ve YKN sayısı için de (4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 16, 20, 24, 36 YKN) 12 farklı kombinasyon belirlenmiştir. Toplamda 5 (dağılım türü) x 12 (YKN sayısı) x 5 (tekrar) ile 300 fotogrametrik proje yapılmıştır. Çalışma sonucunda üretilen ortofoto ve SYM verilerinin KOH kriterine göre konum doğruluğu analizleri yapılmıştır. Ürünlerin elde edilmesi aşamasında kullanılan YKN sayısının artması konum doğruluğuyla doğru orantılı olduğu görülmüştür. Yatay konum doğruluğunun yüksek olduğu ürünler kenar dağılımlı YKN ile elde edilmiştir. Düşey konumda ise tabakalı yani homojen dağılım sonucu yüksek konum doğruluğuyla karşılaşılmıştır. Sonuç olarak çalışma alanının kenar hatlarını kapsayacak şekilde homojen dağılmış ve YKN dağılımı kullanılması tavsiye edilmektedir [42].

Bir başka çalışmada Galvan Rangel ve diğ. (2018), bir açık maden işletmesinde İHA kullanılarak üretilen fotogrametrik ürünlerin konum doğruluğuna YKN'lerin etkisini araştırmıştır. 270 ha alana sahip olan bu maden işletmesinde İHA ile uçuş planı çerçevesinde 230 m uçuş yüksekliğinden hava fotoğrafları çekilmiş ve yersel ölçüm teknikleriyle 54 YKN noktasının 3 boyutlu koordinatları ölçülmüştür. YKN sayısı ve dağılımına göre belirlenen senaryolarda ortofoto ve SYM ürünleri elde edilmiştir. YKN'ler çalışma alanının kenar hattı boyunca ve merkezsiz olacak şekilde iki farklı dağılım türü belirlenmiştir. KOH kriterine göre konum doğruluk analizi yapılan ürünler incelendiğinde YKN'lerin çalışma alanının merkezine dağıtılması yatay doğruluğa önemli bir katkı sağlamadığı gözlemlenmiştir. Düşey doğrulukta ise en iyi ürünler merkezsiz ve kenar hattı boyunca dağılmış YKN'lerle üretilen ürünlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışma alanına dağılan YKN'ler arası mesafenin artması yatayda hatanın daha aza indirilebileceği belirtilmiştir [43].

Son yıllarda İHA teknolojisinde RTK ve PPK donanımlı hava araçlarının geliştirilmesiyle YKN kullanmadan yüksek hassasiyetli sonuçlar alınan çalışmalar ile yersel ölçümle elde edilen YKN'ler kullanılarak yapılan çalışmaların karşılaştırılmasına yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Ren ve diğ. (2021), Çin'in Moduo bölgesinde 2021 mayıs ayında gerçekleşen deprem sonrasında RTK modülüne sahip İHA ile yüzey kırılmalarını ve değişimleri incelemek için İHA fotogrametrisi tekniğini kullanmışlardır [44]. Varbla ve diğ. (2021), bir şantiye sahasında deformasyon hareketlerini hassas bir şekilde elde etmek için RTK donanımına sahip İHA sistemi sistemi kullanmış ve hassas sonuçlar almak için fotogrametrik işlem aşamasında YKN'lerin kullanılması gerekliliğini belirtmiştir [45].

Forlani ve diğ. (2018), bazı çalışma alanlarında yaşanan erişebilirlik ve güvenlik gibi sorunlardan kaynaklı YKN'leri zemine yerleştirmenin ve ölçümünün zor olduğunu belirtmektedir. Bu gibi durumlarda RTK donanımına sahip İHA ile yersel ölçüm yapmadan YKN'siz elde edilen fotogrametrik ürünlerin hassasiyetini araştırmıştır. Aynı uçuş planına göre 3 farklı yöntem belirlemiş ve sonunda elde edilen SYM'lerin konum doğruluğunu analiz etmiştir. Bu yöntemlerde; yalnızca YKN, yalnızca RTK verileri ve RTK verileri ile beraber YKN kullanmıştır. RTK modu kapalı şekilde yapılan uçuşlarda bir ve üçüncü yöntemlerin uygulama sonucunda daha yüksek doğruluklu SYM elde edildiği görülmüştür. Yalnızca RTK verileri kullanıldığında hata oranı diğer iki yöntemle kıyaslandığında neredeyse iki kat arttığı görülmüştür [46].

Ekaso ve diğ. (2020), yerleşik bir RTK modülüne sahip DJI Matrice 600 Pro İHA sistemi ile 70*70 m'lik alana sahip çalışma sahasında 40 m uçuş yüksekliğinden hava fotoğrafları alımı yapmıştır (YÖA 1.3 cm). Fotogrametrik işlem sürecinde YKN kullanmadan doğrudan coğrafi referanslandırma yöntemiyle ve aynı şartlarda bu parametrelere ek olarak YKN kullanarak ürünler elde etmiştir. Sonuçta YKN kullanmadan yatayda ve düşeyde hata değerlerinin desimetre hassasiyetinde olduğu görülmüştür. YKN'lerin dahil edildiği süreçte ise bu değerler santimetre hassasiyetine düştüğü sonucuna varmıştır [47].

Rabah ve diğ. (2018), aynı uçuş planına bağlı kalacak şekilde eBee RTK hava aracı ile YKN kullanmadan doğrudan coğrafi referanslandırma (DG) yöntemi ile aynı çalışma sahasında bu parametrelere ek olarak YKN kullanarak üretilen sonuç ürünlerin konum doğruluklarını karşılaştırmıştır. 85 m uçuş yüksekliğinden elde edilen 182 adet hava fotoğrafı ile Agisoft PhotoScan yazılımı kullanılarak fotogrametrik ürünler elde etmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hava fotoğraflarının işlenmesi esnasında klasik ölçümle elde edilen YKN'ler dahil edilerek elde edilen ürünlerin yatayda KOHxy 0.014 m, düşeyde KOHz 0.013 m olduğu görülmüştür. Öte yandan RTK-DG tekniğiyle yatayda KOHxy 0.034 m; düşeyde ise KOHz 0.029 m sonuçlarının alındığı belirtilmiştir [48].

Stöcker ve diğ. (2017), çalışmasında yüksek hassasiyetli (<5 cm) ortofoto üretimi için RTK donanımlı İHA kullanılarak elde edilen hava fotoğraflarının kıymetlendirilmesi esnasında 4 adet YKN'nın kullanılması gerektiğini belirtmiştir [49].

[44], [45], [46], [47], [48] ve [49] çalışmalarında, RTK/PPK donanımına sahip İHA sistemlerinin kullanılmasıyla önceki nesil (RTK/PPK modülü olmayan) hava araçlarına kıyasla YKN kullanmadan fotogrametrik işlem sonucu üretilen ürünlerin hassasiyetinde büyük iyileşme görülmüştür. Ancak bu durum çalışma sahalarında yersel ölçüm tekniğiyle YKN ya da KN ölçümlerini ortadan kaldırmamıştır. Daha hassas sonuçların alınabilmesi için YKN'lere halen ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca RTK/PPK modülüne sahip İHA'lar önceki nesil İHA'lara göre daha pahalı hava araçlarıdır. Bunun da etkisiyle RTK/PPK modülüne sahip olmayan İHA'lar halen üretilmeye devam etmekte ve kullanıcılar tarafından tercih edilmektedir.

Literatür araştırması kapsamında incelenen çalışmalar çalışma başlığı, yıl, yazar, kullanılan yazılım ve içerik olarak Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.1 RTK/PPK'sız İHA'lar kullanılarak YKN önemini vurgulayan çalışmalar

No	Çalışma Başlığı	Yıl	Yazar	Kullanılan Yazılım	İçerik	Ref. No
1	The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery	2011	Christoph Strecha	Pix4d Mapper	Uçuş yüksekliği ve YKN kullanımının konum doğruluğuna etkisi	[23]
2	An Evaluation On Different Number Of Ground Control Points In UAV Photogrammetric Block	2013	K.N. Tahar	----	Çalışmada kullanılan YKN sayısının konum doğruluğuna etkisi	[39]
3	DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill	2015	M. Uysal ve dğ.	Agisoft PhotoScan, Photo Modeler	Sayısal Yükseklik Modeli üretimi ve doğruluk analizi	[25]
4	An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of UAV Orthomosaicks	2016	Francisco-Javier Mesas-Carrascosa ve dğ.	INPHO UAS Master	Uçuş yüksekliği, bindirme oranları ve YKN'lerin kullanımının ortofotolar üzerindeki etkisi	[34]
5	Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from UAV Photogrammetry	2016	Francisco Agüera-Vega ve dğ.	Agisoft PhotoScan	YKN sayısı, uçuş yüksekliği ve arazi morfolojisinin konum doğruluğuna etkisi	[37]
6	GCP for Image Based Surface Reconstruction: An Investigation of Optimum Survey Designs Using UAV Derived Imagery and Sfm	2016	Toby N. Tonkin	Agisoft PhotoScan	Çalışmada kullanılan YKN sayısının konum doğruluğuna etkisi	[40]

Tablo 1.1 RTK/PPK'sız İHA'lar kullanılarak YKN önemini vurgulayan önemli çalışmalar (Devamı)

7	Effects of image orientation and GCP distribution on UAV photogrammetry projects on a road cut slope	2016	Fernando Carvajal-Ramirez ve dğ.	Pix4d	En minimal şartlarda 3 adet YKN kullanımının konum doğruluğuna etkisi	[41]
8	Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation GCP number using UAV	2017	Francisco Agüera-Vega	Agisoft PhotoScan	Çalışmada kullanılan YKN sayısının konum doğruluğuna etkisi	[38]
9	Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of GCP	2018	Patricio Martínez-Carricondo ve dğ	Agisoft PhotoScan	YKN sayısı ve dağılımının konum doğruluğu üzerindeki etkisi	[42]
10	The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs	2018	Jose Manuel Galvan Rangel ve dğ.	Agisoft PhotoScan	YKN sayısı ve dağılımının konum doğruluğu üzerindeki etkisi	[43]
11	Accuracy Assessment of Low-Cost UAV Photogrammetry	2021	Ismail Elkhachy	Pix4d, Agisoft PhotoScan	Düşük maliyetli İHA sistemi ile konum doğruluğu incelenmesi	[28]

Tablo 1.2 RTK/PPK donanımlı İHA'lar kullanılarak YKN önemini vurgulayan çalışmalar

1	Quality Assessment Of Combined Imu/Gnss Data For Direct Georeferencing In The Context Of Uav-Based Mapping	2017	C. Stöcker ve dğ.	Pix4d	RTK modülüne sahip İHA kullanarak konum doğruluğu analizi	[49]
2	Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning	2018	G. Forlani ve dğ.	Agisoft PhotoScan	YKN'lerin fotogrametrik işlemlerde kullanılması ve kullanılmaması durumlarında sonuç ürünlerdeki doğruluk analizi	[46]
3	Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery	2018	M. Rabah ve dğ.	Agisoft PhotoScan	YKN'lerin fotogrametrik işlemlerde kullanılması ve kullanılmaması durumlarında sonuç ürünlerdeki doğruluk analizi	[48]
4	PPK Donanımlı İHA'lardan Elde Edilen Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluğunun İncelenmesi	2019	T. Türk ve T. Öcalan	Pix4d	PPK değerlendirme yöntemi ile YKN'lerin kullanılması ve kullanılmaması durumlarında sonuç ürünlerin doğruluk analizi	[103]
5	Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on UAV for direct geo-referencing	2020	D. Ekaso ve dğ.	Pix4d	Alçak uçuş seviyesinde (YÖA 1.3 cm) YKN'lerin kullanılması ve kullanılmaması durumlarında sonuç ürünlerdeki doğruluk analizi	[47]

Tablo 1.2 RTK/PPK donanımlı İHA'lar kullanılarak YKN önemini vurgulayan çalışmalar (Devamı)

6	Typical Riedel shear structures of the coseismic surface rupture zone produced earthquake and the implications for seismic hazards in the block interior	2021	Junjie Ren ve dğ.	-----	RTK/PPK donanımına sahip İHA kullanarak deprem sonrası yüzey hareketlerinin incelenmesi	[44]
7	Centimetre-range deformations of built environment revealed by drone-based photogrammetry	2021	Sander Varbla ve dğ.	Agisoft PhotoScan	RTK donanımına sahip İHA kullanarak şantiye sahalarında deformasyon hareketlerinin incelenmesi	[45]

1.2 Tezin Amacı

Son yıllarda İHA teknolojisinde yaşanan gelişmeler bu platformların birçok disiplinde farklı amaç ve uygulamalarda kullanılmasını sağlamıştır. Harita Mühendisliği uygulamalarında ise farklı çalışma alanları için harita üretiminde zaman, maliyet ve işgücü açısından sağladığı optimal çözümler sayesinde fotogrametri ve uzaktan algılama alanında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple; tez çalışmasında engebeli ve erişebilirlik gibi nedenlerle zorlu arazi koşullarında yer alan açık maden işletmelerinde İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak YKN'lerin sayısı ve dağılımına göre belirlenen koşul ve senaryolar ile bu kapsamda üretilen ortofoto ve SYM sonuç ürünlerinin konum doğruluğu analizleri KOH değeri kriter alınarak karşılaştırılması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Çalışma, İHA fotogrametrisi tekniği ile elde edilen fotogrametrik ürünlerin açık maden işletmelerinde YKN'lerin sayısı ve dağılımına göre oluşturulan elverişli/elverişsiz koşullarda kullanımının ve uygunluğunun araştırılması hipotezine dayanmaktadır.

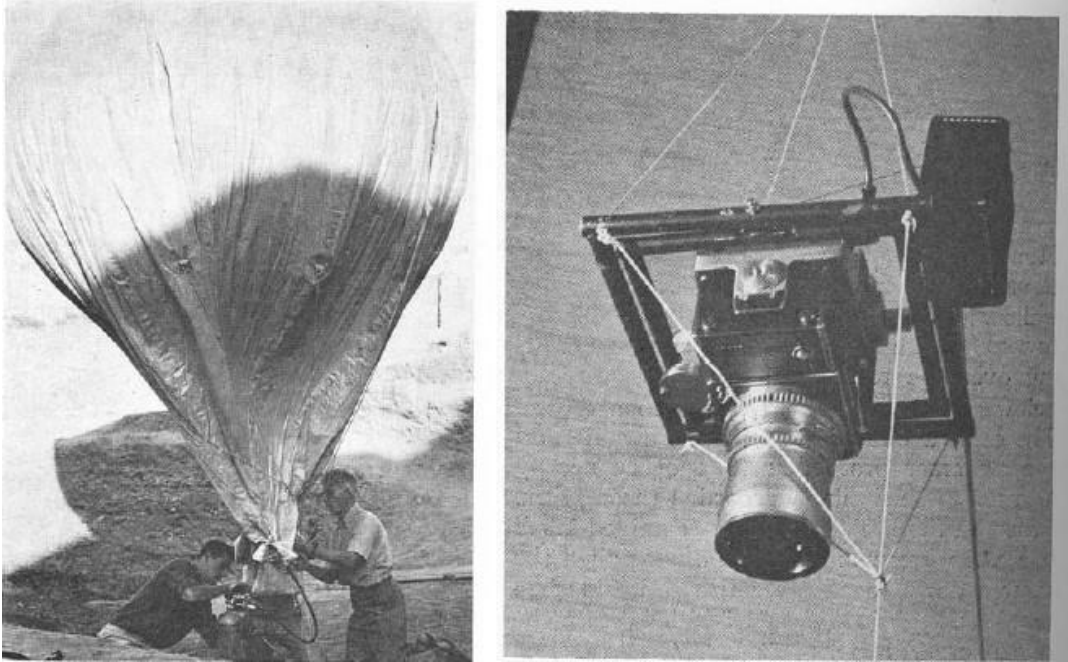
2.1 İHA Tanımı

İHA'lar uzaktan radyo frekanslı (RF) bir kumanda ile yarı otomatik kontrol edilebilen ya da belirlenen bir uçuş planı içerisinde tam otomatik hareket edebilen ve çeşitli tiplerde yük taşıyabilen platformlardır [50]. Askeri kuruluş olan Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) İHA'ları; *“içerisinde herhangi bir canlı bulunmayan, uzaktan kumanda veya otonom şekilde uçuş yapabilen ve belirli ekipmanları gövdesine yükleyerek çıkarılabilen, görevi tamamladıktan sonra, geri dönerek iniş yapabilen hava araçları”* olarak tanımlamaktadır [51]. Günümüzde özellikle sivil alanda ve hobi amaçlı kullanımlarda “drone” ismiyle de ifade edilen bu araçlar Türkçede Türk Dil Kurumu (TDK) tarafından “uçangöz” olarak tanımlamıştır. Yapılan bir araştırmada 2013 yılında Google üzerinden “İnsansız Hava Aracı (İHA)” adıyla arama yapma sayıları 2005 yılına göre yarı yarıya düşmüştür. Bu düşüşün sebebi popüler bir terim olan “drone” kelimesinin daha sık kullanılmasıyla açıklanmıştır. Ancak askeri alanda ve bilimsel çalışmalarda “İHA” adıyla kullanılmaktadır [52].

İHA'ların uçuşu için önem arz eden yer kontrol istasyonu ve veri terminali, kalkış ve iniş sistemi gibi uçuşun sağlanması için gerekli elemanlar ve İHA'lara sabitlenmiş donanımların oluşturduğu birbirinden ayrı sistem elemanlarının bütününe İHA Sistemi adı verilmektedir. İHA sistemi terimi ülkemizde ve dünyada benimsenmiş ve kabul edilmiştir. Ülkemizde Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün İHA Sistemleri talimatında bu terim kullanılmaktadır [53]. Diğer dünya ülkelerinde, ABD Savunma Bakanlığı-Department of Defense (DOD) ve İngiltere Sivil Havacılık Otoritesi-Civil Aviation Organization (CAA) tarafından İHA sistemleri terimi olarak tanımlanmıştır. Uluslararası bir kuruluş olan Sivil Havacılık Örgütü-International Civil Aviation Organization (ICAO) 2011 yılında yayınladığı 328 nolu genelgesinde “Uzaktan Kumandalı Hava Sistemi (RPAS)” kavramını tanıtmıştır. Bu terim temelde yalnızca RPAS'ın uluslararası sivil havacılık sistemine entegre olabileceği düşüncesiyle tanıtılmıştır [52]. İHA'ların ana gövdesi iskelet, kanat, pervane, motor ve bataryadan; kontrol birimi elektronik algılayıcılar, haberleşme elektroniği ve GNSS'ten oluşur. Ayrıca kullanım amacına yönelik kamera, lazer tarayıcı ve sensör gibi donanımlar taşıyabilmektedir [54].

20. yüzyılın devamında Dünya Savaşları esnasında gözetleme, keşif, saldırı gibi amaçlarla kullanılan İHA'lar bu süreç içerisinde gelişimlerini sürdürmüşlerdir. Özellikle 2. Dünya Savaşı esnasında hava fotoğrafçılığı ile keşif ve yorumlama yapmak önem kazanmıştır. Dünya Savaşlarından sonra 1950'li yıllara gelindiğinde savaş esnasında yetişmiş askeri fotoğrafçıların ve fotoğraf tercümanlarının ellerinde kalan ekipmanları kullanarak çalışmalarını sivil alana yansıtmaya başlamışlardır [55].

Whittlesey 1970 yılında arkeoloji alanında yaptığı çalışma için ipe bağlı 2.7 kg ağırlık taşıma kapasitesine sahip bir balon kullanmıştır. Balonun 9 m altına ipe sabitlenmiş Lindhof ve Graflex XL kameraları ve Schneider Kreustnach lensi kullanılarak 50 m uçuş yüksekliğinden 6x9 cm genişliğinde hava fotoğrafları elde edilmiştir. Daha sonra Zeiss Distagon 50 mm lensli Hasselbald 400 FL kamerası kullanmıştır (Şekil 2.1). Bu kamera aynı zamanda radyo kontrolüne de izin vermektedir [5].



Şekil 2.1 Balon ve radyo kontrollü hasselbald 400 FL kamerası [5]

1979 yılında fotogrametri çalışmalarında sabit kanatlı İHA'larla yapılan ilk çalışmalar Przybilla ve Wester-Ebbinghaus tarafından yapılmıştır. Test çalışmalarında Hegi şirketinin manuel olarak kontrol edilebilen 3 m uzunluğunda, 2.6 m kanat genişliğine sahip ve 3 kg'ye kadar yük taşıyabilen hava aracı (Şekil 2.2) kullanılmıştır. Arkeolojik bir alanın rekonstrüksiyonu için 150 m uçuş yüksekliğinden 11 m/s hızla hareket eden bu hava aracı ile belirlenen test bölgesinde hava fotoğrafları alınmıştır. Ancak uçak motorunun fazla titreşimli olması ve uçak hızındaki olumsuzluklardan dolayı sonuçların

yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple yazarlar titreşime duyarlı model helikopterler kullanmayı önermişler [5].



Şekil 2.2 Hegi firması tarafından tasarlanan sabit kanatlı İHA [56]

1980’de Wester-Ebbinghaus’un fotogrametri çalışmalarında kullanılmak üzere bir başka çalışmasında dönen kanat yapılı İHA’yı kullanıştır. Bu hava aracı 1979 yılında sabit kanatlı İHA ile aynı altyapıdan oluşmaktadır. Schlüter firması tarafından tasarlanan 3 kg’ye kadar yük taşıma kapasitesine sahip modele sabitlenen Rolleiflex SLX kamerası (Şekil 2.3) ile hava fotoğrafları alımı esnasında titreşimleri azaltmak için strafor malzeme kullanılmıştır [5].



Şekil 2.3 Schlüter şirketi tarafından geliştirilen model helikopter [57]

1984 yılında Wanske, Pakistan’da yer alan 5000 yıllık bir kasabanın Fotogrametri ile 3 boyutlu modelini belgelemek amacıyla zeplin fikrini önermiştir. Gefa-Flug tarafından tasarlanan K.L. Busemeyer tarafından üretilen zeplin (Şekil 2.4) hava fotoğrafları alımı için kullanılmıştır [58].



Şekil 2.4 Üç boyutlu fotogrametrik belgeleme için kullanılan zeplin [58]

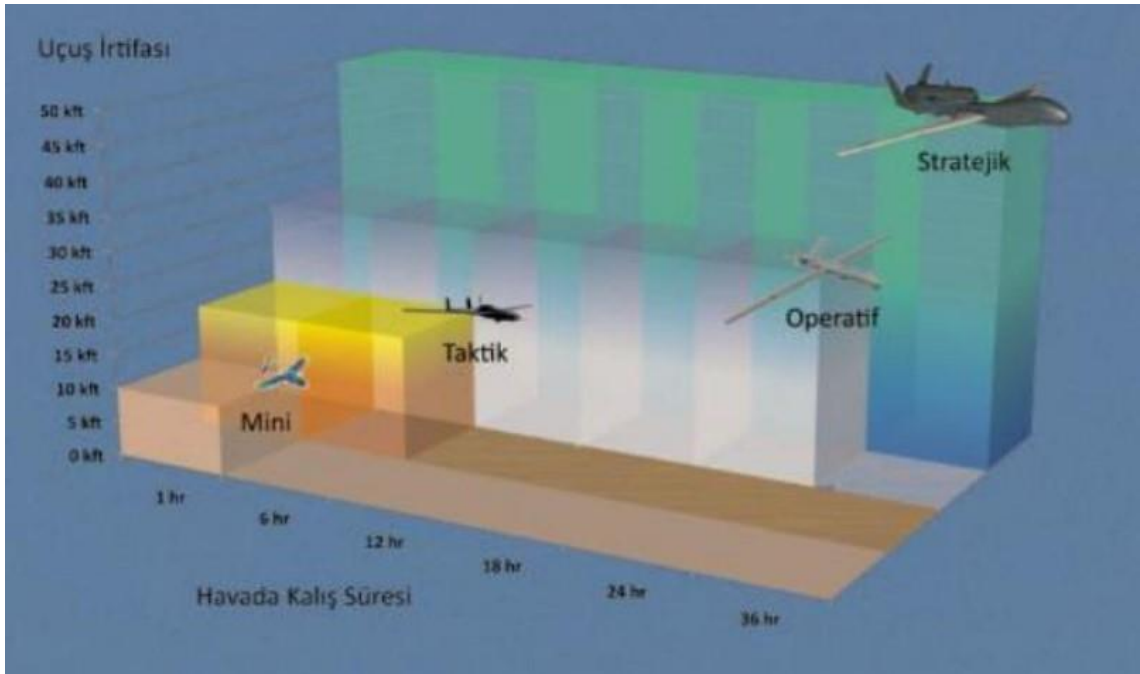
2000’li yıllarda İHA’ların silahlandırılması dünya genelinde askeri alanda yaygın bir şekilde kullanılmasına sebep olmuştur. Silahlı modellerin kullanılmasının yanı sıra askeri birliklerde gözetleme ve hedef tespiti gibi istihbarat amaçlı da kullanılmaktadır [4]. Ülkemizde askeri alanda İHA tasarımını, geliştirilmesini, üretimini 1973 yılından beri Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ) bünyesinde yapılmaktadır. TUSAŞ tarafından üretilen özellik ve görevleri birbirinden farklı olan Anka, Keklik, Şimşek ve Turna gibi hava araçları Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) bünyesinde keşif yapmak, gözetleme, savunma, taarruz, şaşırtma ve istihbarat toplama gibi görevlerini yerine getirmektedirler [59].

İHA’ların askeri alanda büyük başarı sağlaması, sivil havacılıkta da kullanılabilirliğine dair çalışmaları başlamıştır. Günümüze kadar gelen süreçte başta teknolojinin etkisiyle gelişim kaydeden ve kullanımı yaygınlaşan insansız hava araçları çalışma amacına uygun boyut ve donanımlarda sivil havacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde düşük maliyeti, kolay ulaşılabilirliği ve insansız uçuş yapma özelliğiyle gibi sağladığı avantajlar sayesinde tarım, hayvancılık, arkeoloji sahaları, maden sahaları, trafik denetleme, yangın tespiti, kıyı izleme gibi birçok alanda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

2.2 İHA Sınıflandırılması

Son yıllarda İHA teknolojisinin gelişmesi ve çeşitli ebat ve ağırlıklarda platformların üretilmesi ve sivil alanda kullanılmaya başlanması İHA'ların yeniden sınıflandırılmasına neden olmuştur. Ancak dünya genelinde belirgin bir İHA sınıflandırması bulunmamaktadır. Ülkeler kendi standartlarını belirlerken çoğunlukla ağırlık, irtifa, havada kalma süreleri, taşıdığı yüklere göre İHA'ları sınıflandırmaktadır [60].

Blyenburgh [50], çalışmasında İHA'ları havada kalış süresi, uçuş yüksekliği ve büyüklüklerine göre (Şekil 2.5) sınıflandırmıştır. Uluslararası Uzaktan Algılama ve Fotogrametri Birliği (ISPRS) bu İHA sınıflandırmasını kabul etmiştir [5].



Şekil 2.5 İHA'ların sınıflandırılması [61]

İHA'ların en kapsamlı sınıflandırması ABD tarafından yapılmıştır. NATO bundan esinlenerek yeni bir yaklaşımda bulunmuş ve ülkelerce giderek kabul gören bir çerçeveye ulaşmaya aday durumdadır. İrtifa ve havada kalma süresi kriterlerine göre oluşturulan bu sınıflandırma zaman içerisinde taşıdığı faydalı yüklerle de belirginleşmiştir [60].

İngiltere Savunma Bakanlığı tarafından İHA'ların sınıflandırılması üzerine hazırlanan “Müşterek Doktrin 2/11” dokümanında askeri sınıflandırmanın yanı sıra sivil kullanımı da dahil etmiştir. 2012 yılında Karaağaç, bu doküman ve NATO sınıflandırmasını dikkate alarak İHA sınıflandırması (Tablo 2.1) yapmıştır [62]. İHA'lar boyut ve ağırlıklarına göre

3 temel sınıfa ayrılmışlardır. Bu 3 temel sınıfta kendi içerisinde 7 ayrı kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler mikro, mini, midi, taktik İHA, orta irtifa uzun havada kalış (MALE), yüksek irtifa uzun havada kalış (HALE) ve saldırı/muharebe olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.1 İHA sınıflandırma tablosu [62]

Sınıf	Kategori	Uçuş Yüksekliği	Menzil Yarıçapı	Sivil Kategori	Örnek Platform
Sınıf 1 (1500 kg'den hafif)	Mikro (<2 kg)	<200 ft (AGL)	5 km	Grup 1 Küçük İHA (<20 kg)	Black Window
	Mini (2 ila 20 kg arası)	<3000 ft (AGL)	25 km		Bayraktar, Scan Eagle
	Midi (>20 kg)	<5000 ft (AGL)	50 km	Grup 2 Hafif İHA (20 ila 150 kg arası)	Hermes 90
Sınıf 2 (150-600 kg)	Taktik İHA	<10000 ft (AGL)	200 km	Grup 3 İHA (>150 kg)	Çaldıran, Karayel, Aerostar
Sınıf 3 (600 kg'den fazla)	Orta İrtifa Uzun Süre Havada Kalış	<45000 ft (MSL)	Limitsiz		ANKA, Heron, Predator, Reaper
	Yüksek İrtifa Uzun Süre Havada Kalış	<55000 ft	Limitsiz		Global Hawk
	Saldırı/Muharebe	<65000 ft	Limitsiz		Phantom RAY

Ülkemizde, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından Sivil Havacılık Kanunu'na dayanılarak Türk hava sahasında işletilecek veya kullanılacak sivil İHA sistemlerinin ithali, satışı ve tescili, uçuşa uygunluğunun sağlanması, sistemleri kullanacak kişilerin sağlanması gereken koşullar, hava trafik kontrolleri ve İHA operasyonlarına ilişkin esas ve usulleri belirlemek amacıyla İHA sistemleri talimatı mevzuatı yayınlanmaktadır. Bu talimatta İHA'lar kalkış ağırlıklarına göre İHA0, İHA1, İHA2 ve İHA3 olarak dört ayrı sınıfa (Tablo 2.2) ayrılmışlardır [53].

Tablo 2.2 İHA sistemleri talimatı mevzuatında İHA'ların sınıflandırması

Sınıfı	Kalkış Ağırlığı
İHA0	500 gr (dahil) 4 kg arası ağırlık
İHA1	4 kg (dahil) 25 kg arası ağırlık
İHA2	25 kg (dahi) 150 kg arası ağırlık
İHA3	150 kg (dahil) ve daha fazla

İnsansız hava araçlarının sivil kullanım alanlarında haritalama çalışmaları başta olmak üzere arkeolojik alanlar, afet bölgeleri, maden sahaları ve inşaat alanları gibi bölgelerde İHA Sistemleri Talimatı mevzuatına göre çoğunlukla İHA0 ve İHA1 grubu sistemler kullanılmaktadır.

2.3 İHA Yapısı

Kanat yapısı, motor sayısı ve uçuş sistemleri gibi farklı özelliklere sahip olan İHA'lar sivil kullanımda yapılarına göre model helikopter, model uçak, sabit kanatlı ve Döner Kanatlı İHA olarak dört gruba ayrılmaktadır.

Yapısal olarak birbirlerine göre avantaj ve dezavantajı olan bu sistemlerin tercih sebebi maksimum uçuş süreleri, uçuş yükseklikleri ve yük taşıma kapasiteleri, yön kabiliyetleri, kalkış-iniş sistemleri ve gereksinimleri, haritalanacak alanın büyüklüğü ve topografyası gibi farklı kriterlere göre değişmektedir [63]. Ayrıca komuta biçimine göre; otomatik pilotlu ve uzaktan kumandalı, motorların yapısına göre; içten yanmalı, elektrikli ve güneş enerjili sistemli olarak ayrılmaktadırlar.

2.3.1 Model Helikopterler

Helikopterlerin belirli oranlarda küçültülerek belirli bir amaç için üretilmiş uçuş yeteneğine sahip araçlara model helikopter denmektedir. Bu sistemin havalandırılması için gövde kısmında bir adet motor ve yön vermek için kuyruk kısmında bir motor yer almaktadır (Şekil 2.6). Tam otomatik uçuş sağlayamadıkları için uzaktan kumanda (RC) ile yöneterek uçuş yapabilmektedir. Bu sebeple sistemin öğrenilmesi ve profesyonel uçuş yapılabilmesi için daha fazla zamana ihtiyaç vardır [59].



Şekil 2.6 Model helikopter örneği

Uzaktan kumandadan gelen komutları yüksek manevra kabiliyeti ile anında harekete dönüştürmesi fotogrametrik harita yapımında boyuna kolon bindirmeleri için fazla dönüş alanına ihtiyaç duymazlar. Ancak fotogrametrik amaçlı kullanılan İHA'lar belirlenen uçuş planı çerçevesinde çoğunlukla oto pilot özelliğine sahip olduğu için bu durum model helikopterler için dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca altyapısı gereği diğer hava araçlarına kıyasla optik kamera, termal kamera, lazer tarayıcı gibi ekstra donanımları yerleştirmek daha kolaydır [63].

2.3.2 Model Uçak

Kanat, gövde ve kuyruk bölümlerinden oluşan uçaklara göre belirli oranda küçültülmüş ve uçuş yeteneğine sahip sistemlere model uçak denir (Şekil 2.7). Kanatlı yapısı sayesinde havada süzülme özelliğini kullanarak bir uçuşta daha fazla alanı tarayabilmektedirler. Havadan veri toplayan model uçakların kalkış ve iniş esnasında özel bir piste ihtiyacı vardır. Ayrıca model helikopterler gibi oto pilot özellikleri bulunmamaktadır. Bu gibi sebeplerden dolayı İHA Fotogrametrisi çalışmalarda fazla tercih edilmemektedir.

2.3.3 Sabit Kanatlı İHA

Sabit kanat İHA sistemleri (Şekil 2.7), ince kanatları sayesinde hava sürtünmesini etkisiz kılan kuyruk kısmındaki elektrikli ya da içten yanmalı motordan gücünü alarak havada hızlanabilmesini sağlamaktadır. Kanatlarının içerisinde bulunan kontrol yüzeyleri sayesinde havada alçalıp yükselmesi ve yön kontrolü sağlanır. Diğer bir deyişle kontrol yüzeyleri sayesinde yanal eksen, boyuna eksen ve düşey eksen kontrollerinin yapılması sağlanır. Bu kanat yapısıyla havada süzülme özelliğine sahip olan bu araçlar uzun süre havada kalma avantajına sahiptirler. Ancak dikine iniş ve kalkış yeteneklerinin olmaması da beraberinde dezavantaj sağlamaktadır [5].

Otonom uçuş haricinde manuel kullanım ile kontrol etmek istenildiğinde deneyimli becerisi gerektiren bu sistemlerde kalkış ve iniş anlarında yaşanan zorluklarından dolayı inişlerde paraşüt açarak, kalkışlarda ise fırlatma rampası ya da elle fırlatma yöntemi kullanılır [63].

Sabit kanatlı İHA sistemlerinin avantajları;

- Diğer sistemlere göre daha uzun süre uçuş yapabilmektedirler.
- Yüksek hızları sayesinde kısa sürelerde çalışılan alan taranmaktadır.
- Çıkabileceği maksimum yükseklik döner kanatlı İHA'lara göre daha yüksektir.
- Diğer sistemlere göre daha ağır yük taşıma kapasitesine sahiptirler.

Sabit kanat İHA sistemlerinin dezavantajları;

- Döner kanatlı sistemlere göre daha pahalıdırlar.
- Havada hareket halinde oldukları için sabit bir noktada gözlemlene yetenekleri yoktur.
- Yapısı gereği tek bir noktaya iniş yapamadığı için iniş noktası yerine özel iniş alanına ihtiyaç duymaktadır.
- Bu tarz sistemler aynı doğrultuda uçuş yapabildikleri için kullanıcı ani refleks yönlendirmelerinde belirli bir süreye ihtiyaç duymaktadırlar.



Şekil 2.7 Sabit kanatlı İHA örneği

2.3.4 Döner Kanatlı İHA

Helikopterlerin yapısından esinlenerek ortaya çıkan döner kanatlı İHA sistemleri düşük maliyeti ve basit kullanımı sayesinde ön plana çıkmaktadır. Fırçasız motor yapısına sahip bu hava araçları genel olarak 3, 4, 6, 8 pervaneli ve az miktarda 12 ve 16 pervaneli olarak kullanılır. İtme kuvveti ve pervanelerin oluşturduğu tork ile kontrolü sağlanır. Bu sistemlerde motorlar eş zamanlı olarak saat yönüne veya tersine dönerek havalanır ve manevra kabiliyeti edinir. Önde ve arkada yer alan pervanelerin dengeli itme gücü sayesinde havada sabit bir şekilde durabilmesi sağlanmaktadır [5].

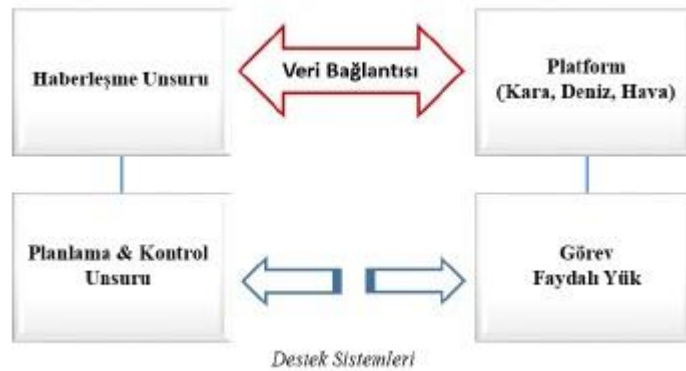
Döner kanatlı İHA'ların (Şekil 2.8) en büyük avantajı kalkış ve iniş esnasında düşey olarak sabit bir noktaya manuel veya otomatik olarak inebilmeleridir. Bu sayede sabit kanatlı İHA'larda gerekli olan iniş ve kalkış platformlarına bu sistemde gerek duyulmamaktadır. Bu özelliğiyle profesyonel bir eğitime ihtiyaç duymadan kullanıcıların kolaylıkla kullanmasını sağlamaktadır. Ek olarak yüksek manevra kabiliyeti, etrafında dönebilme ve sabit bir noktada asılı kalma özelliği birçok avantaj sağlamaktadır. Döner kanatlı İHA'ların avantajlarının yanına dezavantajları da bulunmaktadır. Elektronik ve mekanik olarak karmaşık bir yapıya sahip oldukları için bakım ve onarımları zahmetlidir. Havada yavaş hareket etmeleri ve uçuş sürelerinin düşük olması nedeniyle çalışma alanını taramak için birden fazla iniş-kalkış yapılması gerekmektedir. Bu da operasyonel zaman ve bütçeyi arttırmaktadır [64].



Şekil 2.8 Döner kanatlı İHA örneği

2.4 İHA Sistemi ve Bileşenleri

İHA Sistemi, karışık bir yapıya sahip olup birden fazla bileşenin eşzamanlı ve uyumlu olarak çalışmasını gerektiren sistemlerdir. Diğer bir deyişle insanlı sistemlerin uçurulmasından farklı olarak çeşitli unsurların bir araya gelerek eş zamanlı bir şekilde çalışmasıyla sonuç veren sistemdir. En basit hali ile bu sistemler bütünü Hava Aracı, Yer Kontrol İstasyonu ve Veri Terminalinden (Şekil 2.9) oluşmaktadır [60].



Şekil 2.9 İHA sistemi bileşenleri [4]

İHA sistemi temel bileşenleri [4], [54]'e göre;

- Ana gövdenin meydana geldiği iskelet, motor, pervane, kanat ve güç kaynağı,
- Kontrol ünitesini oluşturan elektronik algılayıcılar-sensörler, haberleşme elektroniği, GNSS
- Kullanım amacına göre dönük sensör, kamera ve diğer algılayıcılar ile İHA planlama, uçuş ve yönetimi amaçlı haberleşme, yazılım ve donanım,

- Yer sistemleri, araç ve teçhizatlardan oluşan destek birimleri,

Sistemin işletilmesinde görev alan İHA pilotu ve bakım personeline kadar olan insan faktörüdür.

2.5 İHA’ların Karşılaştırılması

Farklı yapılara sahip olan insansız hava araçlarının maksimum uçuş süreleri ve uçuş yükseklikleri, olumsuz hava koşullarına dayanıklılıkları, yön değiştirme yetenekleri, yük taşıma kapasiteleri ve iniş-kalkışlarda sistem gereksinimleri gibi birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. İHA ile yapılacak bir çalışmanın amacına göre kullanılması gereken hava aracının seçimini yapmak için bu avantaj ve dezavantajlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Eisenbeiß, çalışmasında İHA sistemlerini menzil, dayanıklılık, manevra kabiliyeti, olumsuz hava koşulları ve rüzgâr direnci özelliklerine göre (Tablo 2.3) karşılaştırmıştır [5].

Tablo 2.3 İHA’ların karşılaştırılması (“-” ifadesi yeteneğinin zayıf olduğunu; “+” ifadesi ise daha güçlü yeteneğe sahip olduğunu belirtir.) [5]

İHA Türü	Menzil	Dayanıklılık	Olumsuz Hava Koşullarına Direnci	Yön Değiştirme Yetenekleri
Balon	-	++	-	-
Zeplin	++	++	-	+
Paraşüt/Uçurtma	+	-	-	-
Sabit Kanatlı Paraşüt	++	+	+	+
Pervaneli ve Jet Motorlu	++	++	+	+
Pervaneli	++	+	-	+
Tek Pervaneli (Helikopter)	+	+	+	++
Ortak Eksenli	+	++	+	++
Dört Pervaneli	-	-	-	++
Çok Pervaneli	+	+	+	++

Nex ve Remondino (2013) çalışmasında, günümüz teknolojisinde haritalama çalışmalarında sıklıkla kullanılan sabit ve döner kanatlı İHA sistemleri ile geleneksel kullanım olarak adlandırılan balon/uçurtma platformlarını karşılaştırmışlardır [65]. Yük,

rüzgâr direnci, minimum hız, otonom uçuş, taşınabilirlik ve iniş mesafesi kategorilerine göre değerlendirmeleri Tablo 2.4’ te gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Geleneksel ve günümüz İHA’larının karşılaştırılması (“-“ yeteneği olmadığı anlamına; “1” zayıf ve “5” güçlü yeteneklerini belirtmektedir. [65], [66]

Karşılaştırma Kategorisi	Uçurtma/Balon	Sabit Kanatlı İHA		Döner Kanatlı İHA	
		Elektrikli	ICE Motorlu	Elektrikli	ICE Motorlu
Yük Taşıma	3	3	4	2	4
Rüzgâr Dayanıklılığı	4	2	4	2	4
Minimum Hız	4	2	2	4	4
Otonom Uçuş	-	3	5	2	4
Taşınabilirlik	3	2	2	3	3
Alçalma Mesafesi	4	3	2	4	4

3

İHA FOTOGRAMETRİSİ

Fotogrametri biliminin gelişim sürecinde ilk çalışmalar yersel fotogrametri alanında başlamıştır. Uçak, helikopter gibi hava araçlarının bu bilime entegre olmasıyla birlikte belirli bir yükseklikten kameralar yardımı ile alınan hava fotoğrafları ile yapılan fotogrametrik çalışmalar hava fotogrametrisi adıyla adlandırılmıştır. Yersel fotogrametriye kıyasla daha az zamanda geniş alanların haritalanması avantajıyla fotogrametri alanında önemli bir yere sahip olmuştur. Hava fotogrametrisinin kısa zamanda geniş alanlarda haritalama yapma avantajının yanı sıra taşıyıcı platformların oldukça maliyetli oluşu beraberinde dezavantaj olmuştur [2, 3].

Gelişen teknoloji ile zorunlu hale gelen ve fotogrametri çalışmalarında en önemli iki kriter olan zaman ve maliyet faktörüne büyük kolaylık sağlayan İHA'lar, harita üretimi çalışmalarına dahil olmuştur. Sunduğu ekipmanlarla birlikte boyut, düşük maliyet ve kullanım kolaylığı gibi sebeplerden son yıllarda kullanım sahası gelişmiş, sivil ve askeri alanlarda kullanım amacı doğrultusunda tercih edilen bir hava aracı haline gelmiştir [67]. Bu hava araçları ile alakalı detaylı bilgiler Bölüm 2'de İnsansız Hava Aracı bölümünde açıklanmıştır.

İHA yardımıyla elde edilen hava fotoğraflarını kullanarak fotogrametrik veri üretim yapma yöntemine İHA fotogrametrisi denilmektedir. Belirli bir yükseklikten ve belirli bindirme oranıyla sayısal kamera ya da mevcutsa lazer sistemleri ile alınan hava fotoğraflarının, fotogrametrik kıymetlendirme ile işlenmesi sonucu ortofoto, SYM, yoğun nokta bulutu ve 3B model gibi ürünler elde edilmektedir (Şekil 3.1) [68].



Şekil 3.1 İHA ile hava fotoğrafı alımı örnek gösterim [68]

İHA fotogrametrisi'nde, klasik fotogrametri çalışmalarında olduğu gibi 3 temel adımda veri üretimi sağlanmaktadır. Bu adımlar [69] göre;

- Verilerin elde edilmesi
- Veri işleme
- Görselleştirme ve yorumlamadır.

Verilerin işlenmesi ve görselleştirme aşamalarının matematiksel modeli klasik fotogrametride olduğu gibi merkezsiz izdüşüm temel yöntemine dayanmaktadır. Bu durumda arazideki bir nokta, izdüşüm merkezi ve noktanın fotoğraftaki karşılığı aynı doğru üzerindedir. Bu koşulla arazi ve fotoğraf noktaları arasında merkezsiz izdüşüm denklemleri ile iç (odak uzaklığı, fotoğraf orta nokta koordinatları) ve dış yöneltme (izdüşüm merkezinin üç koordinatı X_0 , Y_0 , Z_0 ve üç dönüklük açısı ω , ϕ , κ) elemanları hesaplanmaktadır. İç yöneltme işlemi ile piksel koordinat sisteminden fotoğraf koordinat sistemine, dış yöneltme ile fotoğraf koordinat sisteminden arazi koordinat sistemine geçiş sağlanır. Dış yöneltme karşılıklı ve mutlak yöneltme ile 2 aşamadan oluşmaktadır. Karşılıklı yöneltme ile görüntü çiftlerinin birbiriyle eşleşmesi gerçekleşmekte, mutlak yöneltmede ise eşleşmesi gerçekleşen görüntü çiftlerinin 3 boyutlu arazi koordinat sistemine geçişi sağlanmaktadır [3, 66].

3.1 İHA Fotogrametrisi İş Akışı

İHA Fotogrametrisi tekniği ile fotogrametrik ürünler üretmek için yapılacak bir çalışmanın genel kapsamda iş akışı Tablo 3.1’de belirtilmektedir.

Tablo 3.1 İHA fotogrametrisi iş akışı

Çalışma Alanı ve Sınırlarının Belirlenmesi
Kamera Kalibrasyonu
Yer Kontrol Noktalarının Tesisi ve Ölçümü
Uçuş Planlaması
Hava Fotoğraflarının İHA Yardımıyla Alımı
Hava Fotoğraflarının Kontrolü
Verilerin İşlenmesi
Sonuç Ürünlerin Üretilmesi

Çalışma öncesi ilk aşama, çalışma sahasında proje sınırlarının belirlenmesidir. Aynı zamanda belirlenen alan içerisinde arazi yapısını incelemek ve keşfetmek uçuş planlaması ve YKN tesis ölçümü için fayda sağlamaktadır. Uçuş planlaması aşamasından önce İHA’ya sabitlenmiş kameranin kalibrasyonu yapılmaktadır. Kamera kalibrasyonu, doğrudan elde edilecek model hassasiyetini etkileyeceği için yüksek doğrulukla yapılmalıdır. Kamera kalibrasyonu sayesinde iç yöneltme elemanları belirlenmekte, kamera distorsiyonları giderilmektedir. Kalibrasyon raporunda genel olarak bulunması gereken parametreler iç yöneltme elemanları olan asal noktanın konumu, odak uzaklığı (X_h , Y_h , c) ve mercek distorsiyonunu ifade eden fonksiyonun polinom katsayıları (k_1 , k_2 , k_3 ve p_1 , p_2) bilgileridir. Günümüzde sık kullanılan Pix4d, Agisoft PhotoScan, Context Capture gibi fotogrametri yazılımları hem dahili hem de harici kamera yöneltme parametrelerini tahmin eder ve kalibrasyonu otomatik olarak gerçekleştirmektedir [70, 71].

Yapılacak çalışmalar kapsamında uçuş öncesi yapılacak uçuş planlamasının araziye ve gerekli koşullara uygun olması doğrudan hava fotoğraflarının kalitesini etkilemektedir. Bu da fotogrametrik işlem sonrası üretilen verilerin hassasiyetini ve doğruluğunu

Fotoğraf Ölçeği; Denklem 3.1'deki gibi uçuş yüksekliği'nin kamera odak uzaklığına oranlanmasıyla elde edilir.

31

Ayrıca görüntüye ait ölçek Denklem 3.2'deki gibi haritadaki uzunluğun arazideki uzunluğa oranı ile de elde edilmektedir.

$$Mr = \frac{1}{mr} = \frac{d'}{d} \quad (3.2)$$

Görüntünün yeryüzünde kapladığı mesafe formülü Denklem 3.3'te belirtilmektedir. Burada s' dijital kameralar için sensör boyutu, analog görüntü içinse görüntü boyutlarıdır.

$$S = s' \times \frac{H_g}{f} \quad (3.3)$$

Kolon ifadesi, uçağın uçuş yönü boyunca art arda çekilen hava fotoğrafları topluluğuna denir. Yanyana olan birden fazla kolonun oluşturduğu bütüne ise blok adı verilmektedir. B izdüşüm merkezleri arası baz uzaklığı, A ise kolonlar arası uzaklıktır. q enine bindirme oranını, p ise boyuna bindirme oranını ifade edecek şekilde baz uzaklığı ve kolonlar arası uzaklıklar Denklem 3.4 ve 3.5'deki gibi bulunur:

$$B = S \times \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad (3.4)$$

$$A = S \times \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad (3.5)$$

Kolon sayısı Denklem 3.6'da, çalışma sahası düşey uzunluğunun, kolonlar arası mesafeye bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$N_k = \frac{L_a}{A} \quad (3.6)$$

Bir kolondaki fotoğraf sayısı Denklem 3.7'de çalışma alanı yatay mesafesinin baz uzunluğuna bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

$$n_r = \frac{L_b}{B} + 1 \quad (3.7)$$

Çalışma alanında toplanan hava fotoğrafı sayısı Denklem 3.8'de, kolon sayısı ve kolondaki fotoğraf sayısının çarpımı ile elde edilmektedir.

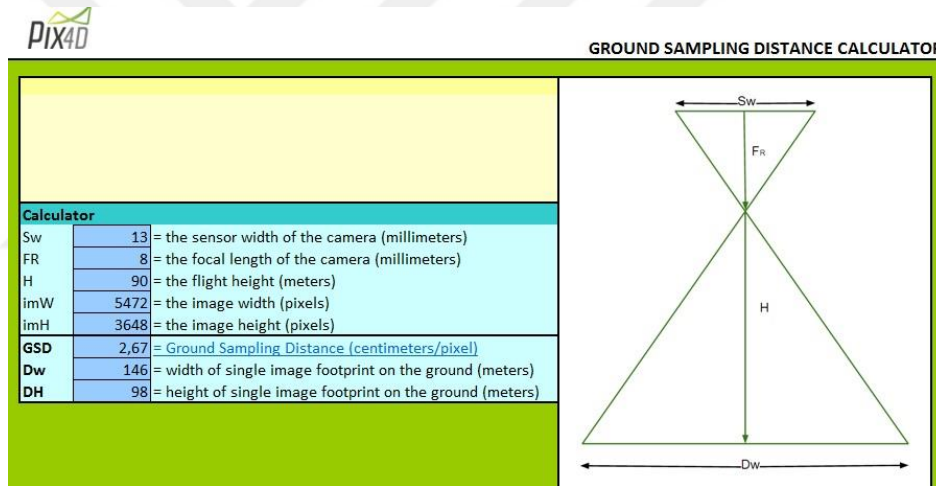
$$N_r = n_r \times n_k \quad (3.8)$$

Modelin kapladığı alan ise F_m bağıntısı Denklem 3.9’da yer almaktadır.

$$F_M = S^2 - S \times B \quad (3.9)$$

YÖA, hava fotoğrafında ardışık iki pikselin merkezleri arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. Aynı zamanda bir pikselin arazideki uzunluğu olarak da ifade edilmektedir. Dolayısıyla YÖA ile konumsal çözünürlük arasında ters orantı vardır. Yüksek YÖA değeri düşük konumsal çözünürlüğe, düşük YÖA değeri ise yüksek konumsal çözünürlüğe karşılık gelmektedir. S_w sensör genişliği (mm), im_w görüntü genişliği (piksel) olmak üzere YÖA hesabı Denklem 3.10’da belirtilmektedir [63, 74, 75].

$$YÖA(GSD) = \left(\frac{S_w(mm) \times H_g}{100} \right) \div (f \times im_w(piksel)) \quad (3.10)$$



Şekil 3.3 YÖA hesaplama aracı [76]

Harita üretim ve kontrol aşamalarında, 30 Nisan 2018 tarihli bakanlar kurulu kararı ve 26 Haziran 2018 tarihli resmî gazetede yayınlanan BÖHKBÜY referans alınmaktadır. Bu yönetmelikte fotogrametrik amaçlı üretilecek harita ve ortofotolar için yer örnekleme aralığının 1/500 ve daha büyük ölçekli haritalarda 5 cm’den, 1/1000 ve daha büyük ölçekli harita üretimlerinde 10 cm’den daha fazla olmaması gerekmektedir. (uçuş koşullarındaki olumsuz durumlarda $\pm\%10$ değişimler hariç) [72].

İHA’lar kullanılarak fotogrametrik işlemler sonucu elde edilecek ürünlerin yeryüzündeki gerçek konumlarında olması ve ortaya çıkan hataların giderilmesi için YKN’lerin tesisi ve ölçümü yapılmalıdır. Burada belirtilmesi gereken bir husus YKN’ler projede üretilen

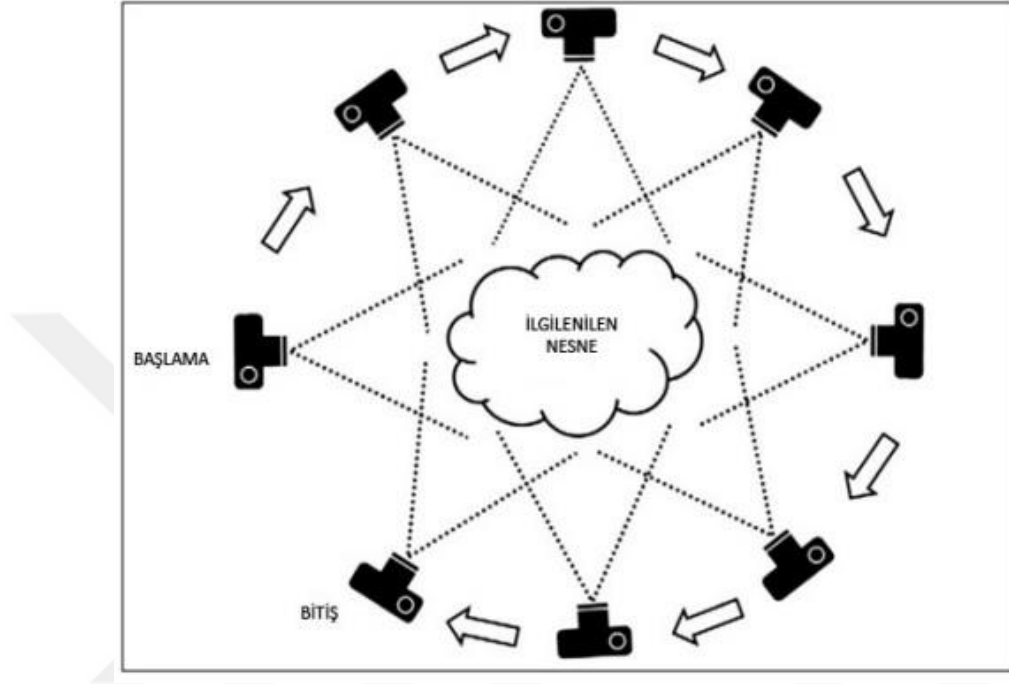
ürünlerin konum doğruluğunu iyileştirmek için kullanılırken, KN ise konum doğruluğu analizini yapmak ve işaretlemelerdeki olası hataları elde etmek için kullanılmaktadır [19]. Bazı çalışmalarda YKN'ler aynı zamanda KN görevinde de kullanılabilir. YKN'ler, uçuş planlamasında belirlenen YÖA, uçuş yüksekliği ve harita ölçeği parametreleri dikkate alınarak araziye tesis edilmelidir. Bu sayede elde edilen hava fotoğraflarında yerlerinin ayırt edilebilir olması sağlanır.

Belli bir plan doğrultusunda İHA kullanılarak elde edilen bindirmeli hava fotoğrafları verisi yoğun görüntü eşleme algoritmaları ile karşılıklı olarak eşlenmesiyle elde edilen bilgilerden fotogrametrik ürünler elde edilmektedir. Hava fotoğraflarının çeşitli görüntü işleme yazılımları ile belirli operasyonel işlemlerden geçirilmesi sonucu yoğun nokta bulutu, SYM, ortofoto haritalar, doku modelleri, 3B model gibi ürünler elde edilmektedir [38]. Günümüzde bu ürünlerin elde edilmesi için yapılan çalışmalarda sık kullanılan ticari yazılımlar Pix4d, Agisoft PhotoScan, Context Capture, Autodesk ReCap, 3D Survey, Drone Deploy iken AKK yazılımlar ise MicMac, Visual SFM, Open Drone Map şeklinde sıralanmaktadır. [10, 77]. Bu yazılım paketleri, hedef alanlarda yüksek çözünürlüklü modellerin üretimi için İHA stereo veri işlemeyi destekler. Veri işleme ve üretimi esnasında kullanılan bu yazılımların temel algoritması SFM teknolojisine dayanmaktadır [36]. Bu yazılımların SFM tekniğine dayanan farklı algoritmaları olsa da hepsinin temelde çalışma prensipleri benzerdir [78]. Türkçemizde tam bir karşılığı olmamasıyla beraber “Hareketten Yapı”, “Hareket ile Nesne Oluşturma” ya da “Hareket Tabanlı Yapısal Algılama” adlarıyla kullanılmaktadır.

SFM, Türkçe ifadesiyle Hareket ile Nesne Oluşturma yönteminde hareketli bir sensör veya kamera yardımıyla (Örneğin İHA) yüksek bindirme oranları ile elde edilmiş 2 boyutlu görüntü dizinlerini kullanarak yeryüzünün veya nesnenin 3 boyutlu modelini oluşturma tekniğidir. Ayrıca biyolojik olarak bakıldığında retina tabasında oluşan 2 boyutlu hareketli görüntülerin algılanarak 3 boyutlu ortama karşılık gelmesiyle insan gözüne benzetilmektedir [13, 14].

SFM aslında fotogrametrinin temel yaklaşım ve geometrisini kullanan bir yöntemdir. Başka bir ifade ile derinlik bilgisi için bindirmeli görüntülere ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel fotogrametrik tekniklerde geometrik modelleme için kamera dönüklük ve kontrol noktalarının konum bilgileri hassas bir şekilde elde edilmelidir. SFM tekniği, model geometrisi, kamera kamera konum ve dönüklük bilgisi bindirmeli şekilde elde edilen fotoğraflardan alınarak yazılım içerisinde yer alan parametreler sayesinde 3

boyutlu model otomatik olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca stereo fotogrametride modelleme çalışmaları için kullanılan lazer tarama ekipmanlarına göre kıyaslandığında da kullanıcı dostu ve oldukça düşük bütçeli olduğu görülmektedir [17, 79, 80]. Şekil 3.4'te bir kamera yardımıyla bindirmeli ve ardışık olarak 2 boyutlu fotoğraflardan 3 boyutlu nesne elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 3.4 SfM algoritması ile 3B model çıkarma yöntemi [81]

SfM tekniği, tıpkı klasik fotogrametride olduğu gibi ardışık ve bindirmeli fotoğrafları kullanır. Ancak dahili kamera geometrisi, kamera pozisyonunu ve yönünü otomatik olarak bilinen 3B noktalar belirlemesiyle klasik fotogrametriden ayrılmaktadır [17].

SfM tekniğinin iş akışında; bir alanın veya nesnenin modellenmesi için farklı açı mesafe veya konumdan alınan fotoğraflar kullanılarak sırasıyla; seyrek nokta bulutu, yoğun nokta bulutu, katı (mesh) model, gölgeli (shaded) yüzey modeli, renkli yüzey modeli ve doku bindirilmiş yüzey modeli ürünleri üretilmektedir [18].

Seyrek nokta bulutu verisinin oluşması için öncelikle Exchangeable Image File Format (EXIF) meta verisinden alınan bilgilerle kalibre edilmiş her bir fotoğrafın kamera konum ve yön bilgisi ile hizalanması (Aligning photos) gerekmektedir. Fotoğraf çiftlerindeki eşlenik noktaların tespit edilmesi sonucu oluşan noktalar ile bağlantı noktaları (tie point) meydana gelmektedir. Fotoğraflar arasında benzer ilişkilerin kurulup bağlantı noktalarının oluşması için görüntü işleme yazılımlarında sıklıkla Scale Invariant Feature

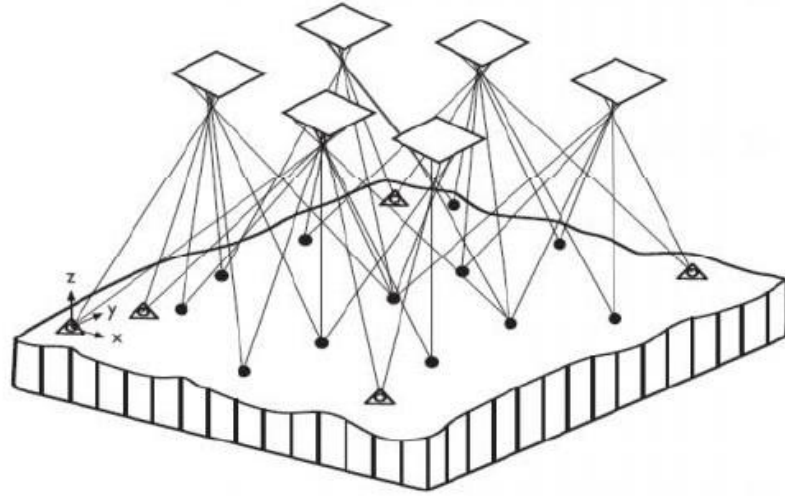
Transform (SIFT) algoritmasına benzer uygulamalar kullanılmaktadır [82, 83]. Bindirmeli fotoğraflar üzerinde ayırıcı değişmez öznitelikleri çıkarabilen SIFT (Şekil 3.5), farklı açı ve mesafeden alınan fotoğrafları kullanarak güvenilir eşleşme yapabilen bir yöntemdir [78].



Şekil 3.5 SIFT algoritması [83]

Otomatik havai üçgenleme ve ışın demetleriyle dengeleme işlemleri sonucu dış yöneltme parametreleri hesaplanmaktadır. Havai üçgenleme işlemi ile kameranın 3B konumu ve yönelimleri hesaplanmaktadır (Şekil 3.6). Aynı zamanda bu aşamada bağlantı noktalarının 3 boyutlu koordinatları da hesaplanmaktadır. Havai üçgenleme sonucu oluşan veri, ışın demetleriyle dengeleme işleminde kullanılmaktadır. Dış yöneltme parametreleri, bu aşamada ışın demetleri ile dengeleme sonucunda hesaplanmaktadır. İHA sistemlerinde kullanılan kameralar sıcaklık ve hava şartlarından oluşan titreşimlere karşı son derece hassastırlar. Bu etkenler kamera kalibrasyonlarını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple ışın demetleri ile dengeleme işlemi aşamasında kalibrasyon parametreleri ve distorsiyonlar yeniden optimize edilmektedir. Böylece kamera kalibrasyonu sonucu hesaplanan iç yöneltme parametreleri de yeniden optimize edilmiş olmaktadır. Bu sürece kadar gelen yöneltme parametrelerinin optimizasyonu ve ışın

demetleriyle dengeleme sonucu bağlantı noktalarından (tie point) oluşan seyrek nokta bulutu meydana gelmektedir [10, 24, 84].



Şekil 3.6 Fotogrametrik triangülasyon (ışın demetleri) [85]

Yoğun nokta bulutu verisinin elde edilmesi için bir önceki adımda oluşturulan seyrek nokta bulutu verisi referans alınarak yoğun görüntü eşleme algoritmaları kullanarak Çok-bakılı Stereo (Multi-View Stereo-MVS) tekniğiyle yoğunlaştırma/sıklaştırma işlemi yapılmaktadır. Yoğun nokta bulutu verisinin üretimi, ortofoto ve sayısal yükseklik modelinin hassasiyeti için önemlidir. Yoğun nokta bulutu verisinin elde edilmesinden sonra bu modelden ağ ve dokulu ağ (mesh and texture mesh) meydana gelmektedir. Hava fotoğrafları gerçek renklerinin oluşan bu modellere giydirilmesi sonucu doku bindirilmiş yüzey modeli elde edilmektedir. Son olarak fotogrametrik üretimin nihai ürünleri olan yüksek çözünürlüklü SYM ve ortofotolar, oluşturulan yüzey modelinin türetilmiş şekli olarak meydana gelmektedir [17, 18, 86].

3.2 İHA Fotogrametrisinde Konum Doğruluğunu Etkileyen Faktörler

Harita Mühendisliği çalışmalarında çeşitli tekniklerle üretilen haritaların ya da ölçümler sonucu elde edilen verilerin konum doğruluğu büyük önem arz etmektedir. İHA fotogrametrisi çalışmalarında da elde edilen harita, altlık harita veya modellerin konum doğruluğunu etkileyen; kullanılan kamera özellikleri ve ayarları [31, 32], meteorolojik koşullar [30, 87], arazi morfolojisi [37], uçuş yüksekliği [23, 34] enine ve boyuna bindirme oranları [33, 34], İHA yapısı ve uçuş hızı [88], kullanılan fotogrametrik yazılım

[7, 35, 36] ve yer kontrol noktaları ve tasarımı [24, 38, 39, 40, 47] gibi faktörler bulunmaktadır.

İHA fotogrametrisi çalışmalarında konum doğruluğunu en çok etkileyen etkenlerden birisi ise YKN'lerin çalışma sahası içindeki kullanımlarıdır. YKN'ler fotogrametride görüntülerin düzeltilmesi aşamasında yer koordinat sistemi ile fotoğraf koordinat sistemi arasındaki bağlantıyı kurmaktadır.

YKN'lerin güncel BÖHHBÜY'ne göre tanımı şu şekildedir; *“Yer kontrol noktası (YKN): Yeryüzünde tesis edilen, koordinatları ve/veya yüksekliği jeodezik yöntemlerle belirlenen noktaların genel adıdır.”* Bu hususta yönetmelikte YKN'lerin araziye tesisi ile alakalı gerekli detaylar açıklanmış ve ölçüm yöntemleri için klasik RTK GPS veya Tusaga-Aktif CORS ağ yöntemiyle ölçülerek kesin koordinatlarına dengelemeleri gerektiği belirtilmektedir [72].

YKN'ler, uzaktan algılanan görüntülerin geometrik düzeltilmesinde ve sistematik hataların giderilmesinde temel ve önemli bir adımdır. Fotogrametrik çalışmalarda elde edilecek ürünlerin yeryüzündeki gerçek konumlarında olması ve ortaya çıkan hataların giderilmesi için YKN'lerin tesisi ve ölçümü uçuş planlamasından önce yapılmalıdır. YKN'ler, uçuş planlamasında belirlenen YÖA değeri, uçuş yüksekliği ve harita ölçeği parametreleri dikkate alınarak araziye tesis edilmelidir. Bu sayede elde edilen hava fotoğraflarında yerlerinin ayırt edilebilir olması sağlanır.

Fotogrametri çalışmalarında GPS/IMU ölçme sistemlerindeki gelişmeler, iki sistemin birbiriyle ve hava kameralarıyla entegrasyonuna imkân vermiştir. GPS ve IMU sistemlerinin birlikte kullanımı ile oluşan GPS/IMU sisteminin temeli navigasyon sistemlerine dayanmaktadır. GPS/IMU sistemine sahip kameralar ile rektifikasyonda kullanılan dış yöneltme parametreleri, YKN'lere ihtiyaç duymadan hızlı ve ekonomik bir şekilde uçuş sırasında doğrudan elde edilmektedir. Bu sistemlerde, GPS ile dış yöneltme parametrelerinden resim orta noktasının coğrafi konumu belirlenebilirken (X, Y, Z), IMU sistemiyle de dönüklükler (ω, ψ, κ) belirlenebilmektedir. Bu sayede fotogrametri çalışmalarında dış yöneltme ile görüntü/resim koordinat sisteminden arazi koordinat sistemine geçiş yapılmaktadır. YKN kullanmadan GPS/IMU değerlerini kullanarak yapılan yöneltme işlemi doğrudan coğrafi konumlandırma olarak adlandırılmaktadır. Doğrudan coğrafi konumlandırmanın doğruluğu tamamen GPS ve IMU sensörlerinin veri kalitesine bağlıdır. Sistemik GPS hatalarının giderilmesi ve datum dönüşümü için

YKN'larına gereksinim duyulmaktadır. Yüksek doğruluklu fotogrametrik ürünlere gereksinim duyulan çalışmalarda dış yöneltme parametreleri, GPS/IMU ve yeterli sayıda YKN'nin birlikte kullanımı ile elde edilmektedir [89 - 91].

İHA Fotogrametrisi çalışmalarında YKN'lerin sonuç ürünlerin konum doğruluğuna etkisini araştıran akademik ve bilimsel çalışmalarda, YKN kullanmadan dış yöneltme parametreleri GPS/IMU ile doğrudan coğrafi konumlandırma ile üretilen ürünlerin konumsal doğruluğu metre (m) bazında iken GPS/IMU verisiyle birlikte YKN kullanılarak elde edilen ürünlerin santimetre (cm) hassasiyetinde olduğu görülmektedir [23, 24, 92].

GPS/GNSS teknolojisi, tektonik hareketlerin incelenmesi, deformasyon hareketleri gibi birçok alanda hassas konum verisi sağlamaktadır [93]. Son yıllarda İHA Fotogrametrisi teknolojisinde yaygınlaşan RTK donanımına sahip İHA'lar ile yapılan çalışmalarda YKN kullanmadan fotogrametrik işlem sonucu üretilen ürünlerin hassasiyetinde büyük iyileşme görülmüştür. Ancak bu durum çalışma sahalarında yersel ölçüm tekniğiyle YKN ya da KN ölçümlerini ortadan kaldırmamıştır. Daha hassas sonuçların alınabilmesi için YKN'lere halen ihtiyaç duyulmaktadır. Buna sebeple az sayıda da olsa YKN'lerin kullanımı RTK donanımlı İHA'lar kullanılarak elde edilen hava fotoğraflarının işlenmesi sonucu oluşan ürünlerin konum doğruluğunu artırıcı yönde etkilemektedir. Bunun yanında RTK donanımlı İHA'lar RTK'sız İHA'lara göre daha maliyetlidir. Bu sebeple maliyeti daha uygun olan RTK'sız İHA sistemleri halen kullanılmaya devam etmektedir [46 - 49].

Konum doğruluğunun önem arz ettiği fotogrametrik çalışmalarda uçuş yapılmadan önce araziye tesis edilmiş en az 3 adet YKN kullanılmalıdır [21]. Ayrıca fotogrametrik işlem sırasında araziye tesis edilmiş noktaların seçilebilmesi için bu hedefler, bindirmeli hava fotoğraflarında görünür ve ayırt edilebilir olmalıdır [22].

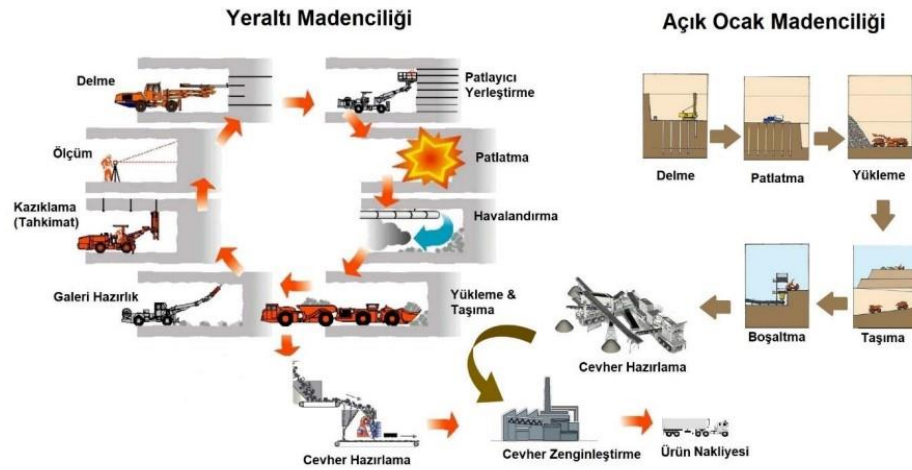
3.3 Açık Maden İşletmelerinde İHA Fotogrametrisi

Maden Kanunu'nun 2. maddesinde maden; Yer kabuğunda ve su kaynaklarında tabii olarak bulunan, ekonomik ve ticarî değeri olan petrol, doğal gaz, jeotermal ve su kaynakları dışında kalan her türlü madde olarak tanımlanmaktadır [94].

Madencilik; Yer kabuğunda bulunan cevher, endüstriyel hammadde, mineral, kömür ve taş gibi her türlü madenlerin yeraltı veya yerüstü işletme şekli ile çıkarılıp ekonomik bir değer kazandırılması işlemidir. Madencilik faaliyetleri işlemi ile elde edilen mineraller,

temel bileşenleri ve kullanım alanlarına göre metalik cevherler, metalik olmayan cevherler ve enerji hammaddeleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Madenin türü ve kullanım alanlarına göre farklı üretim işlemlerini içermekle birlikte çoğu üretim aşaması bütün faaliyetlerde yer almaktadır. Madencilik genel olarak arama faaliyetleri ile başlayan, cevher üretimi ve zenginleştirme işlemleri ile devam eden, cevherin bittiği alanların kapatılması ve çalışma alanının doğaya yeniden kazandırılması ile projenin sonlandırıldığı bir süreçler bütünüdür. Ülkemiz maden kaynakları açısından çok çeşitli ve zengin bir mirasa ev sahipliği yapmaktadır. Krom, kil, kömür, altın, gümüş ve bazı endüstriyel hammaddelerin üretimi konusunda 50 civarında maden çeşidi bulunmaktadır. Bu madenlerin bir kısmı kamuya ait kuruluşlar (TKİ, TTK, Etibank, vb.), bir kısmı da özel sektör tarafından işletilmektedir. Ülkemizde en yaygın madencilik türü doğal taş madenciliği (mermer, granit, bazalt vd.) olup bunların tamamına yakın kısmı özel sektör tarafından işletilmektedir [95, 96].

Maden işletmeleri açık (yer üstü) saha ve kapalı (yer altı) saha maden işletmeleri olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kapalı maden işletmelerinde, yer altında bulunan maden cevherine kuyu, ocak ve tüneller gibi yöntemlerle cevherin bulunduğu yerden yer üstüne çıkartılmaktadır. Açık maden işletmeleri ise, yer kabuğunda bulunan maden cevherinin, üzerindeki örtü tabakasının kaldırılması yoluyla bu tabakasının altında bulunan madenin çıkarılması işlemidir (Şekil 3.7). Dünya madencilik faaliyetlerinin yaklaşık olarak %70'i Açık Maden İşletmesi olarak gerçekleştirilmektedir. Açık ocak madenciliği ya da diğer bir deyişle yerüstü madenciliği, basamak şeklinde açılan ve işletilen, genellikle derinlere doğru ters koni şeklinde görünen üretim yerleridir. Çalışmaların ilk yıllarında yüksek sermaye yatırımı gerektirmesi, çevre problemleri, döküm alanı bulunması, iklim şartlarından etkilenmesine karşın yüksek verimlilik, düşük maliyetler ve iş sağlığı açısından emniyetli koşulları nedeniyle yeraltı madenciliğine göre avantajlıdır [97].



Şekil 3.7 Yeraltı (kapalı) ve yerüstü (açık) maden işletmeleri [95]

Madencilik endüstrisinde hava fotoğrafları kullanılarak yapılan fotogrametrik çalışmalar sonucu oluşan 3 boyutlu model ve haritalar ile jeodezik ölçümler sonucu elde edilen haritaların kullanılması maden arama ve üretim çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Günümüzde madencilik endüstrisinin teknolojik dönüşümünün bir sonucu olarak madencilik şirketleri, maden arama ve üretim faaliyetlerinin hızını, verimliliğini ve güvenliğini artırmak için İHA teknolojilerini kullanmaktadır. Maden işletmelerinde üretimi yönlendirmek ve ekonomik dengeyi sağlayabilmek için sürekli kontrol gerekmektedir. Hazırlık, tasarım, üretim aşamaları ve stok hacimleri denetlemesi önemli işlemlerdendir. Bütün maden sahasının ve stok hacimlerinin denetimi geleneksel yöntemlere göre daha zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu sebeple İHA'ların geleneksel yöntemlere göre avantaj sağlaması diğer sektörlerde olduğu gibi maden endüstrisinde de tercih sebebi olmaktadır (Şekil 3.8) [98].

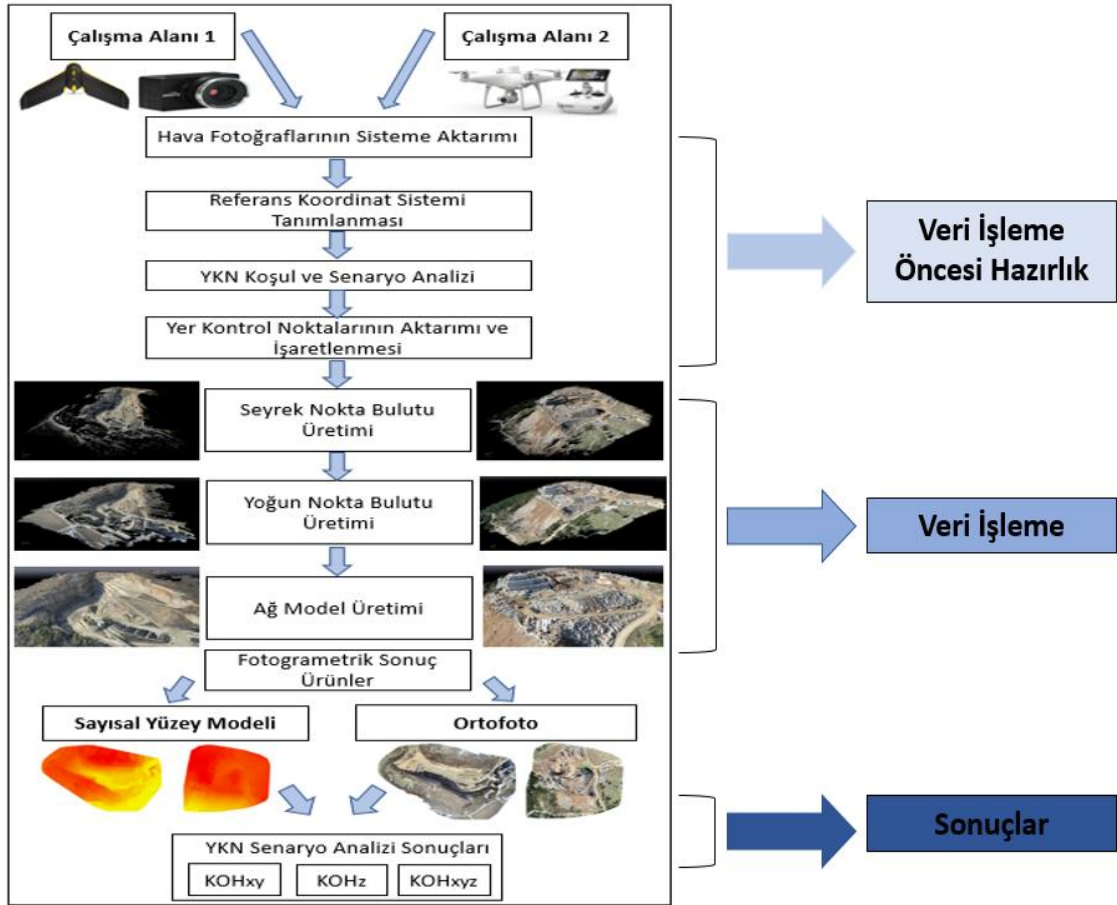


Şekil 3.8 Açık maden işletmelerinde İHA kullanımı [99]

İHA'lar kullanılarak yapılan uçuş ile elde edilen hava fotoğraflarının fotogrametrik süreçler doğrultusunda elde edilen 3B model ve haritalar, maden arama ve üretim faaliyetlerinin hemen hemen her aşamasında kullanılmaktadır. İHA fotogrametrisi tekniği ile açık maden işletmelerinde kazı planlaması, üretim ve dekapaj miktarının belirlenmesi, stok ve döküm sahası kübaj hesapları, dik ve erişilemeyen bölgelerdeki yüzeylere ait konumsal bilgilerin elde edilmesi, jeolojik haritalama, kayaç tespiti ve halihazır harita üretim faaliyetlerinde kabul edilebilir doğruluklarla çalışılmaktadır. İHA kullanılarak elde edilen verilerin uygun yazılımlarla fotogrametrik ürün elde edilmesiyle madencilik operasyonlarında kazı planlamaları geleneksel yöntemlere göre sadece birkaç yüz nokta ile değil milyonlarca noktalık yoğun nokta bulutuyla gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca hızlı şekilde periyodik harita üretimi yaparak maden sahasının değişim izlenimleri gözlenmektedir. İHA kullanılarak yapılan bu çalışmalar klasik yöntemlere göre zaman tasarrufu sağlamasının yanında maden işletmeleri gibi tehlikeli alanlarda yaşanan iş kazalarının da önüne geçilmektedir [8, 9].

4 UYGULAMA

Bu çalışmada; eğim farkı oldukça fazla olan, engebe ve erişebilirlik gibi nedenlerle zorlu arazi koşullarında yer alan açık maden işletmelerinde İHA fotogrametrisi performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla iki farklı maden işletmesi, çalışma alanı olarak seçilmiştir. Birinci çalışma alanı taş ocağı maden işletmesi, ikinci çalışma alanı ise mermer maden işletme bölgesidir. Birinci çalışma sahasında kullanılan İHA platformu RTK/PPK modülüne sahip değilken bu modül diğer çalışma alanı için kullanılan İHA'da yer almaktadır. Belirlenen çalışma alanlarında İHA fotogrametrisi tekniği ile farklı YKN dağılımı ve sayısı kullanarak üretilen ortofoto ve SYM verilerinin konum doğruluğu incelenmiştir. YKN'lerin sayısına ve dağılımına göre farklı koşul ve senaryolarda üretilen fotogrametrik ürünlerin doğruluk analizleri KOH kriteri ile belirlenmiştir. Şekil 4.1'de çalışmaya ait iş akışı belirtilmektedir.



Şekil 4.1 Çalışmaya ait iş akışı

4.1 Çalışma Alanı 1

Birinci çalışma alanı İsviçre'nin Vaud Kanton'u sınırlarında, Eclepens bölgesinde yer alan bir taş ocağı maden işletmesidir. İsviçre'nin batı sınırlarının büyük çoğunluğunu kaplayan Vaud Kanton'u Cenevre Gölü'nden Neuchatel Gölü ve Morat Gölü'ne kadar uzanmaktadır. Çalışma bölgesi 90 hektarlık alana sahip ve yapısı itibariyle oldukça engebeli ve eğim farkı fazla olan bir alandır (Şekil 4.2). Bu çalışma sahasında kullanılan hava fotoğrafları ve YKN'lere ait veri seti gerekli izinler alınarak Pix4d web sayfasından indirilerek temin edilmiştir [100].



Şekil 4.2 Çalışma alanı 1 sınırları

4.1.1 Kullanılan Ekipmanlar

Birinci çalışma bölgesinde hava fotoğraflarının toplanması aşamasında kullanılan İHA platformu SenseFly eBee Classic'tir. Bu hava aracı yapısı itibariyle sabit kanatlı bir model olup yaklaşık 700 gr ağırlığında ve 1 metre kanat genişliğine sahiptir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 SenseFly eBee classic hava aracı

Saatte 40 ila 90 km/sa hız yapabilen ve tek uçuşta 50 dakikaya kadar havada kalabilme özelliğine sahiptir. Havada kaldığı bu süre zarfında yaklaşık 12 km² alanı tarayabilmektedir. Ebee Classic hava aracına ait diğer tüm teknik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Ebee classic hava aracı teknik özellikleri

SenseFly Ebee Classic	
Ağırlık/Kamera ve Batarya Dahil	0.69 kg/1.1 kg
Kanat Genişliği	1 m
Radyo Link Kapasitesi	3 km
Uçuş Hızı	40-90 km/sa
Maksimum Havada Kalma Süresi	50 dk
Rüzgâr Direnci	45 km/sa ‘ e kadar
Maksimum Kapsama Alanı (Tek Uçuş)	12 km ²
GPS/IMU Desteği	Var
Yer Örnekleme Aralığı (YÖA)	En az 1.5 cm
Mutlak yatay/düşey Doğruluk (YKN’li)	3-5 cm
Mutlak yatay/düşey Doğruluk (YKN’siz)	1-5 m

Hava fotoğraflarının alımında SenseFly Ebee Classic hava aracına sabit SenseFly SODA kamerası yer almaktadır. İHA ile entegreli çalışan bu cihaz 5472*3648 piksel boyutlarında görüntü alabilen 20 megapiksel (mp) çözünürlüğe sahiptir (Şekil 4.4). SenseFly SODA ait teknik özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir.



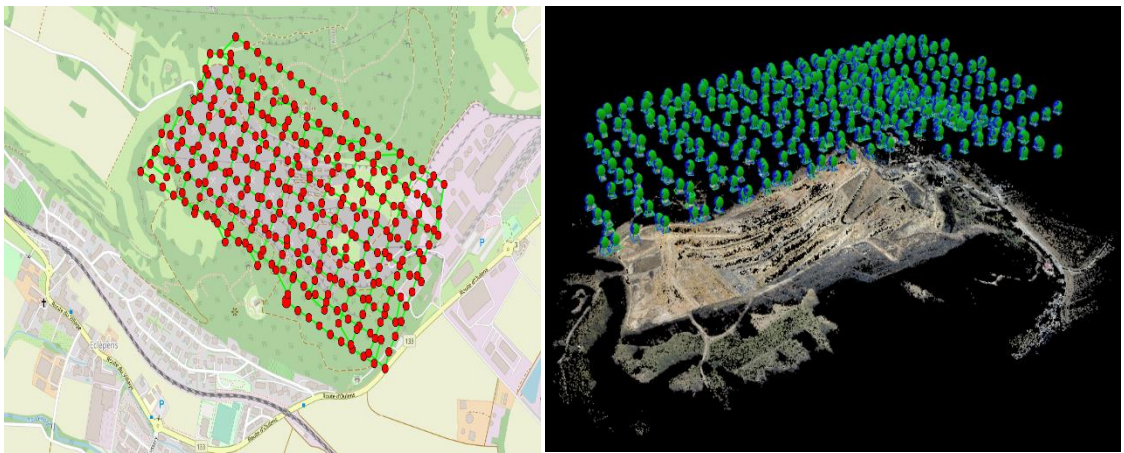
Şekil 4.4 SenseFly SODA kamera

Tablo 4.2 Sense Fly SODA teknik Özellikleri

Fotoğraf Boyutları	5472*3648 (3:2) piksel
Çözünürlük	20 mp
Sensör Büyüklüğü	12.75*8.5 mm
Odak Uzaklığı	10.6 mm
Pozlama Süresi	1/30-1/2000 sn
Lens	F/2.8-11 mm
Fotoğraf Formatı	JPEG, DNG+JPEG

4.1.2 Çalışma Alanı 1 Uçuş Planı

SenseFly Ebee Classic hava aracına sabitlenmiş SenseFly SODA kamerası ile birlikte bir uçuş planına göre hava fotoğraflarının elde edilmesi sürecinde tek uçuş gerçekleştirilmiştir. Uçuş planında hava fotoğraflarının sırasıyla enine ve boyuna bindirme oranları %60 ve %60 olarak belirlenmiştir. Ortalama uçuş yüksekliği 240 m ve çift grid uçuş planı yöntemiyle 347 adet hava fotoğrafı toplanmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Çalışma alanı 1 hava fotoğrafı alım noktaları

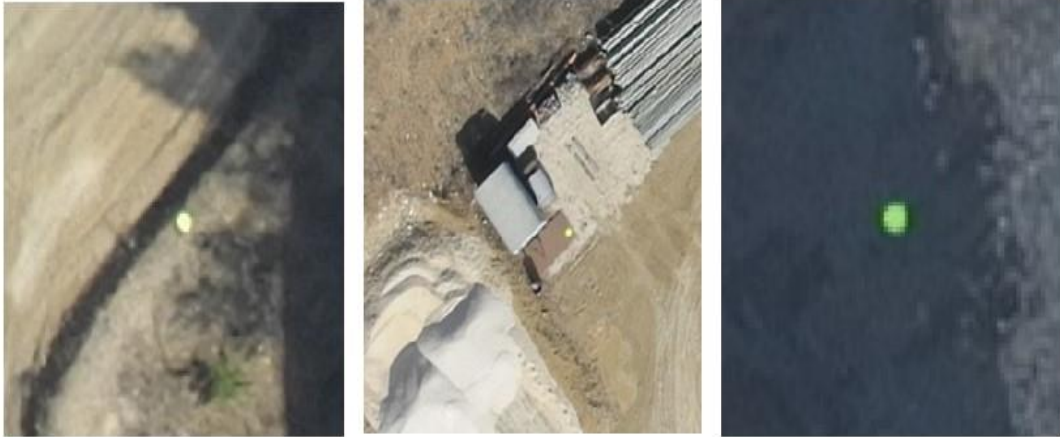
Çalışma Alanı 1 için uçuş esnasında ve sonrasında elde edilen veriler ile ilgili detaylar Tablo 4.3'te yer almaktadır.

Tablo 4.3 Çalışma alanı 1 uçuş planlaması parametreleri

Hava Fotoğrafı Sayısı	347 Adet
Çalışma Alanı	0.9087 km ² / 90.8731 ha
Yer Örnekleme Aralığı (YÖA)	5.40 cm
Fotoğraf Koordinat Sistemi	WGS84
Ortalama Uçuş Yüksekliği	240 m
Uçuş Modu	Tek Uçuş, Çift Grid, Otonom
Enine ve Boyuna Bindirme Oranı	%60-%60

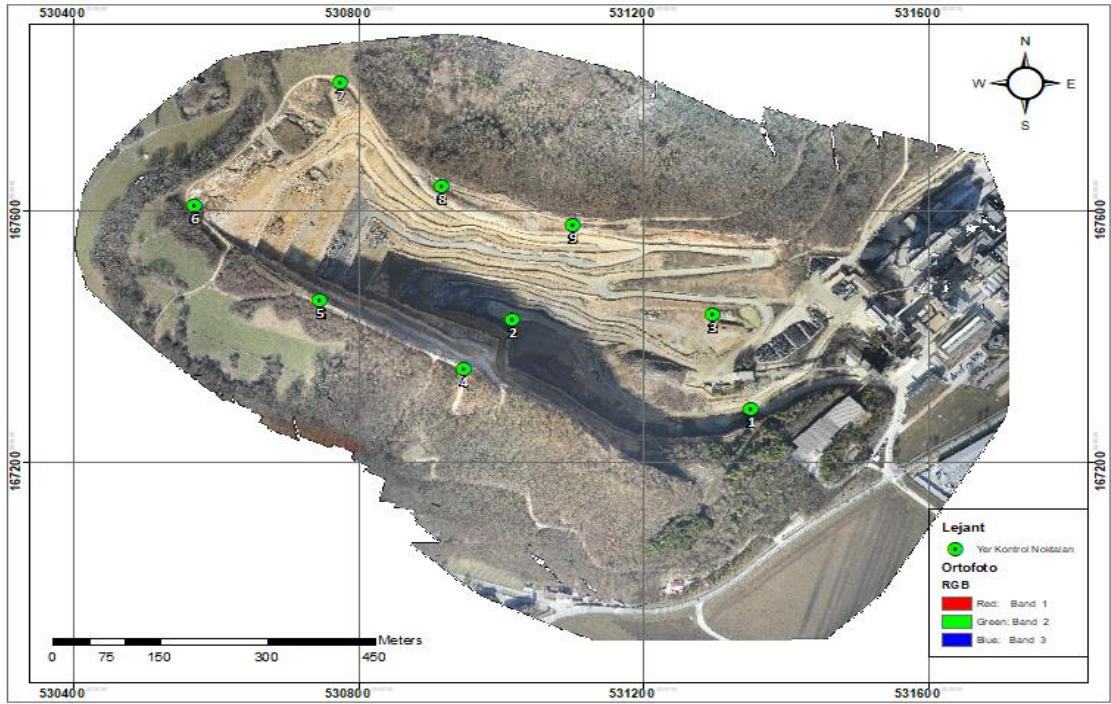
4.1.3 Çalışma Alanı 1'de Yer Kontrol Noktaları

YKN'ler, fotogrametrik çalışmalarda fotoğraf koordinat sistemi ile arazi koordinat sistemi arasındaki ilişkiyi kurmak ve elde edilecek ürünlerin konum doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Bu amaçla çalışma alanı 1 için İHA uçuş planı yapılmadan önce araziye YKN'ler tesis edilmiş ve ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Uçuş öncesi YKN'lerin araziye tesisi ve hava fotoğrafından görünüşleri

Çalışma alanı içerisinde yersel ölçüm tekniğiyle elde edilen 9 adet YKN GNSS alıcısı kullanarak RTK tekniğiyle koordinat değerleri elde edilmiştir. YKN'ler, İsviçre ülke koordinat sistemi olan CH1903 datumu LV03 (EPSG:21781) diliminde ölçülmüştür. Çalışma alanının orta bölgeleri hem sarp hem de taş ocağı işletmesinin imalat alanları olduğu için bu bölgede nokta dağılımı daha seyrek. YKN'ler genel olarak çalışma alanının kenarlarına dağılmıştır. YKN'leri çalışma alanı içerisindeki dağılımı Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 Çalışma alanı 1 YKN dağılımı

Uygulamada çalışma alanı 1 için ölçümü yapılmış 9 adet nokta, hava fotoğraflarının işlenmesi ve sonuç ürünlerin konum doğruluğunun analiz edilmesi aşamalarında hem YKN hem de KN olarak kullanılmıştır. Tablo 4.4'te nokta numaraları ve 3 boyutlu koordinatları verilmiştir.

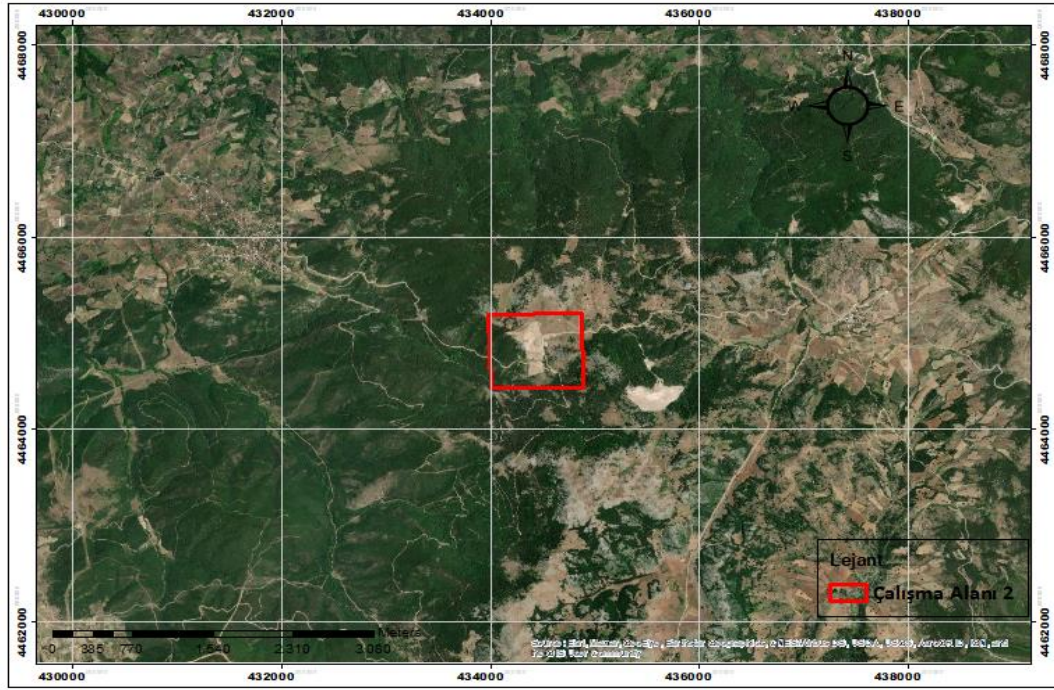
Tablo 4.4 Çalışma alanı 1 YKN koordinatları

Nokta No	Y(m) (Sağa)	X(m) (Yukarı)	H(m)
1	167284,273	531353,239	460,914
2	167426,808	531018,446	458,742
3	167434,863	531299,415	474,195
4	167347,812	530948,692	572,394
5	167457,004	530746,974	566,361
6	167608,28	530571,401	558,969
7	167805,404	530774,684	565,863
8	167638,643	530917,478	574,465
9	167578,015	531102,063	574,874

4.2 Çalışma Alanı 2

İkinci çalışma sahası, Bursa ili Gürsu ilçe sınırları içerisinde yer alan mermer maden işletme bölgesidir. Bursa şehir merkezinden uzak olan bu bölgenin doğusunda Ericcek, batısında Seçköy, güneyinde Dışkaya mevkiileri yer almaktadır. Çalışma sahası 15 ha

alana sahip ve yaklaşık 100 m derinliğinde kazı alanı olan bir açık maden işletmesidir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Çalışma alanı 2 sınırları

4.2.1 Kullanılan Ekipmanlar

İkinci çalışma sahası olan mermer işletmesinde hava fotoğraflarının toplanması aşamasında kullanılan İHA platformu DJI Phantom 4 RTK cihazı olmuştur. Bu hava aracı yapısı itibariyle döner kanatlı bir İHA modelidir. Yaklaşık 1390 gr ağırlığında ve gövde genişliği 31-35 cm arasındadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 DJI Phantom 4 RTK hava aracı

Phantom 4 RTK hava aracına donanımsal olarak entegre edilmiş RTK modülü yer almaktadır. Bu özelliği ile RTK'sız hava araçlarına kıyasla hava fotoğrafları meta verilerinde (EXIF) yer alan konum bilgisini daha fazla mutlak hassasiyet ile gerçek zamanlı, cm düzeyinde konumlandırma olanağı sağlamaktadır. Ayrıca sinyallerin zayıf olduğu bölgelerde uçuş dengesini sağlamak için RTK alıcısının hemen altına kurulmuş yedekli bir GNSS modülü yer almaktadır. Phantom 4 RTK hava aracı için teknik özellikler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 DJI Phantom 4 RTK teknik özellikleri

DJI Phantom 4 RTK	
Ağırlık	1.39 kg
Gövde Genişliği	31-35 cm
Maksimum Hız	50-58 km/sa aralığında
Maksimum Havada Kalma Süresi	30 dk
Radyo Link Kapasitesi	5-7 km aralığında
GPS/IMU Desteği	Var
Yer Örnekleme Aralığı (YÖA)	100 m uçuş yüksekliğinde 2.74 cm
RTK/PPK Modülü	Var
Mutlak Yatay/Düşey Doğruluk (RTK Etkin)	0.1 / 0.1 m
Mutlak Yatay/Düşey Doğruluk (RTK Devre Dışı)	0.5 / 1.5 m

DJI Phantom 4 RTK hava aracına sabit DJI marka FC6310R modelinde kamera yer almaktadır. İHA ile entegre çalışan bu cihaz 5472*3648 (3:2) piksel boyutlarında görüntü alabilen 20 mp çözünürlüğe sahiptir. FC6310R model kameraya ait teknik özellikler Tablo 4.6'da yer almaktadır.

Tablo 4.6 DJI FC6310R kamera teknik özellikleri

DJI FC6310R Kamera	
Fotoğraf Boyutları	5472*3648 (3:2) piksel
Çözünürlük	20 mp
Sensör Boyutları	13.2*8.8 mm
Odak Uzaklığı	8.8 mm
Sensör Hassasiyeti (ISO Aralığı)	ISO 100 – 3200 (Manuel), ISO 100 – 12800 (Otomatik)
Fotoğraf Formatı	JPEG

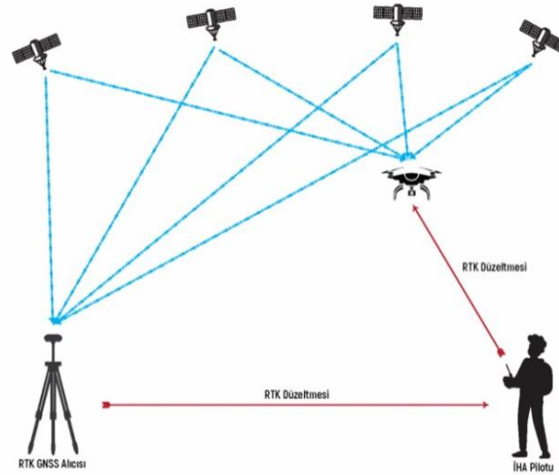
4.2.2 Çalışma Alanı 2 Uçuş Planı

Teknik detayları belirtilen DJI Phantom 4 RTK hava aracı ile çalışma sahası için belirlenen uçuş planına göre hava fotoğrafları elde edilmiştir. Uçuş esnasında ve sonrasında oluşan parametreler Tablo 4.7'de yer almaktadır.

Tablo 4.7 Çalışma alanı 2 uçuş planlaması parametreleri

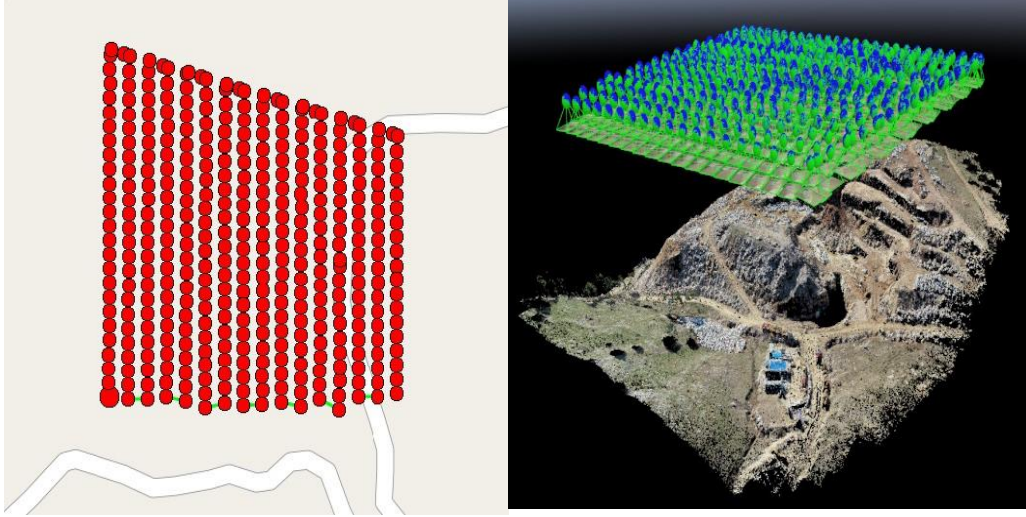
Hava Fotoğrafı Sayısı	454 Adet
Çalışma Alanı	0.1502 km ² / 15.0164 ha
Yer Örnekleme Aralığı (YÖA)	2.45 cm
Fotoğraf Koordinat Sistemi	WGS84
Ortalama Uçuş Yüksekliği	90 m
Uçuş Modu	3 Adet Uçuş, Tek Grid, Otonom
Enine ve Boyuna Bindirme Oranı	%80-%60

Çalışma Alanı 2’de hava fotoğraflarının alımı esnasında İHA’nın RTK modülü aktif halde uçuş gerçekleştirilmiştir. GNSS terminolojisinde “Real Time Kinematic” olarak adlandırılan RTK Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma alanı içerisinde koordinatı iyi bilinen bir noktaya sabit GNSS alıcısı kurulmuştur. Havada görevine devam eden İHA ile sabit GNSS alıcısı eş zamanlı olarak uydu gözlemleri yaparlar. Bu gözlemler esnasında elde edilen düzeltmeler GNSS alıcısından kumandaya ya da direkt olarak hava aracına aktarılır. Bu sayede otonom uçuş esnasında hava fotoğrafları çekim noktası koordinatları ve dönüklük bilgileri daha hassas şekilde kaydedilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 RTK’lı İHA çalışma prensibi [101]

Çalışma alanında elde edilen 454 hava fotoğrafı, çalışma sahasının dışında kalan alanlara ait fotoğraflar elimine edilerek 374 adete indirgenmiştir. Fotogrametrik işlemler esnasında filtrelenen 374 adet hava fotoğrafı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan hava fotoğraflarına ait çekim noktalarının gösterimi Şekil 4.11’de yer almaktadır.



Şekil 4.11 Çalışma alanı 2 hava fotoğrafları alım noktaları

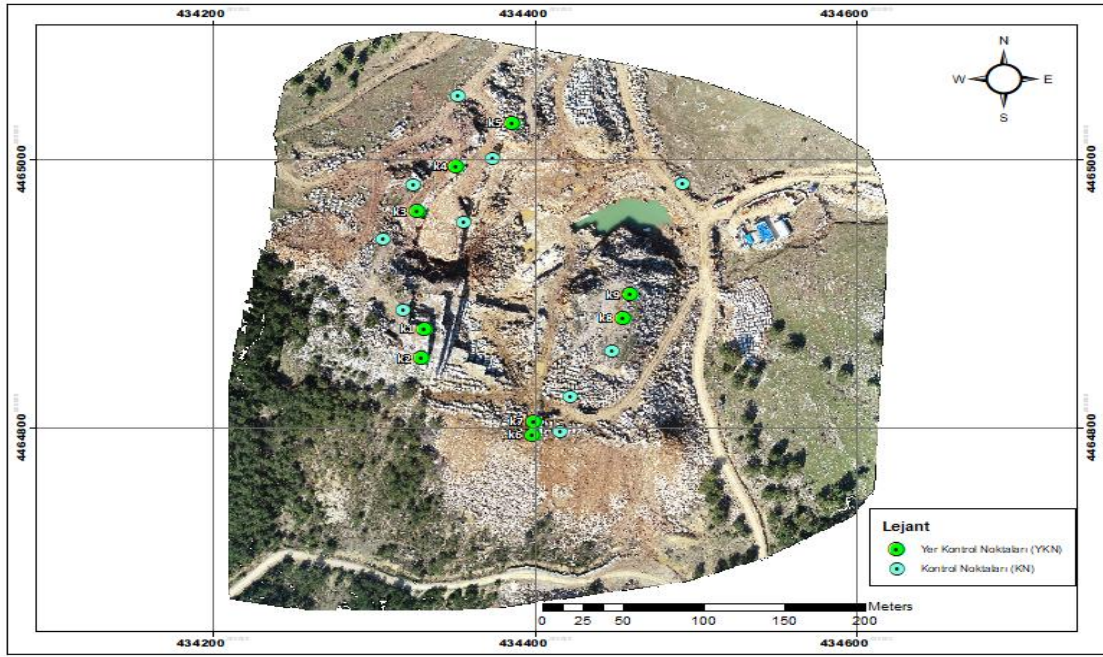
4.2.3 Çalışma Alanı 2’de Yer Kontrol Noktaları

Çalışma alanında İHA uçuşu öncesi YKN’ler ve KN’ler araziye tesis edilip ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.12’de araziye tesis edilen noktaların işaretleri yer almaktadır.



Şekil 4.12 Uçuş öncesi YKN’lerin araziye tesisi ve hava fotoğrafından görünüşleri

Araziye tesis edilen noktaların konumu yersel jeodezik yöntem ile TUSAGA Aktif (CORS-TR) sistemi kullanılarak GNSS Ağ-RTK yöntemiyle elde edilmiştir. GNSS alıcısı ile ölçümü yapılan 19 adet nokta GRS 1980 Elipsoid datumunda, 3 derecelik Türkiye Ulusal Referans Sistemi (TUREF)’nde, epok 2005’te projeksiyonlanmış (ITRF evrensel olarak EPSG:5254) 3 boyutlu koordinatları elde edilmiştir. Hava fotoğraflarının işlenmesi ve sonuç ürünlerin doğruluk analizi çalışmalarında kullanılmak üzere ölçümü yapılan 19 adet noktanın 9 tanesi YKN olarak geriye kalan 10 tanesi ise KN olarak kullanılmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Çalışma alanı 1 YKN ve KN dağılımı

Çalışma Alanı 2’de ölçümü yapılmış YKN ve KN’lerin konum bilgileri ve nokta adları Tablo 4.8’de yer almaktadır.

Tablo 4.8 Çalışma alanı 2 YKN ve KN koordinatları

Nokta Türü	Nokta No	Y (m) (Sağa)	X (m) (Yukarı)	H (m)
YKN	k1	434332,33	4464873,64	905,43
YKN	k2	434330,11	4464851,40	905,21
YKN	k3	434327,15	4464960,81	898,59
YKN	k4	434352,05	4464994,54	898,02
YKN	k5	434386,51	4465026,34	893,60
YKN	k6	434399,28	4464794,77	882,14
YKN	k7	434400,35	4464804,17	881,89
YKN	k8	434455,69	4464881,38	891,71
YKN	k9	434460,10	4464898,95	892,12
KN	a1	434318,91	4464887,40	905,57
KN	a2	434306,08	4464940,00	902,77
KN	a3	434325,19	4464980,38	904,37
KN	a13	434353,05	4465047,16	894,77
KN	a21	434373,71	4465000,76	891,44
KN	a22	434355,82	4464952,74	891,94
KN	a32	434492,04	4464981,51	873,92
KN	a34	434416,49	4464796,74	882,52
KN	a41	434422,85	4464823,38	882,53
KN	a48	434448,08	4464857,41	889,89

4.3 Fotogrametrik İşlem Süresince Kullanılan Donanım ve Yazılım

Hava fotoğraflarının bilgisayar ortamında işlenmesi ve yapılan tüm işlemler için Windows 10 işletim sistemine sahip masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Bu bilgisayara ait teknik özellikler Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9 Kullanılan donanımın teknik özellikleri

İşletim Sistemi	Windows 10 Pro
İşlemci	Intel(R) Xeon(R) CPU E31235 @ 3.20GHz 3.20 GHz
Ekran Kartı	NVIDIA Quadro K600 1Gb
Chipset	Intel X9SAE
Yüklü Fiziksel Bellek (RAM)	DDR3 16 Gb

Uygulamada verilerin işlenmesi ve sonuç ürünlerin üretilmesi için Pix4d yazılımı kullanılmıştır. Çalışma alanlarına ait yoğun nokta bulutu verisi (.las, .laz, .ply, .xyz formatlarında), 3B model (.ply, .fbx, .obj formatlarında), SYM, sayısal arazi modeli (SAM) ve ortofoto (.tiff, jpg formatlarında) üretilmesi mümkündür. Veri işleme süreci 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar ön işleme, yoğun nokta bulutu ve katı model üretimi ve ortomozaik, SYM, SAM ve indeks üretimi aşamalarıdır. Bu çalışmada fotogrametrik projeler için ortofoto ve SYM ürünleri elde edilmiştir.

4.4 İHA Fotogrametrisi İşlem Öncesi Oluşturulan Senaryolar

Çalışma Alanı 1 ve 2 için fotogrametrik işlem öncesi, YKN’lerin konum doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmak için farklı senaryolar belirlenmiştir. İHA uçuşu sonrası elde edilen hava fotoğraflarının işlenmesi esnasında, kullanılacak YKN’lerin sayısı ve dağılımı göz önüne alınarak üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin doğruluk analizi için farklı stratejiler oluşturulmuştur.

Çalışma Alanı 1 olarak adlandırılan taş ocağı maden işletmesi için en elverişsiz koşul ve senaryonun olduğu durum ile beklenen en yüksek doğruluğun (YKN’lerin çalışma alanına homojen olarak dağılması) elde edilebileceği YKN dağılımları kriterleri göz önüne alınarak 2 farklı koşul belirlenmiştir. Belirlenen her koşul içinde YKN sayısında 3’ten 9’a kadar arttırılarak 7 farklı senaryo oluşturulmuştur. Ayrıca YKN kullanmadan ve kullanarak elde edilecek ürünlerin konum doğruluğu farkını tespit etmek için YKN’ler bir senaryoda dahil edilmemiştir. Böylece hava fotoğraflarının işlenmesi esnasında kullanılacak YKN’lerin dağılımı ve sayısında yapılan kombinasyonlar sonucu toplam 14

adet fotogrametrik proje oluşturulmuştur. Çalışma alanı 1 için oluşturulan koşul ve senaryolar Tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10 Çalışma alanı 1 için belirlenen koşul ve senaryolar

Çalışma Alanı 1					
Koşul1			Koşul2		
Proje Adı	YKN Sayısı	Kullanılan YKN’ler	Proje Adı	YKN Sayısı	Kullanılan YKN’ler
Senaryo_0	--	--	Senaryo_1	3	1,6,7
Senaryo_1	3	5,6,7	Senaryo_2	4	1,6,7,3
Senaryo_2	4	5,6,7,8	Senaryo_3	5	1,6,7,3,2
Senaryo_3	5	5,6,7,8,9	Senaryo_4	6	1,6,7,3,2,8
Senaryo_4	6	5,6,7,8,9,3	Senaryo_5	7	1,6,7,3,2,8,5
Senaryo_5	7	5,6,7,8,9,3,1	Senaryo_6	8	1,6,7,3,2,8,5,9
Senaryo_6	8	5,6,7,8,9,3,1,4	Senaryo_7	9 (Tümü)	1,6,7,3,2,8,5,9,4

Çalışma Alanı 2 olarak adlandırılan mermer maden işletme sahasında hava fotoğraflarının alımı esnasında kullanılan İHA platformu RTK/PPK donanımına sahiptir. Bu çalışma alanında YKN kullanmadan ve kullanarak üretilen ürünlerin doğruluk analizi ve YKN sayısının artırılması ile üretilen ürünlerin konum doğruluğu analizleri yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında çalışma alanı 2 için toplam 8 senaryo oluşturulmuştur. Çalışma alanı 2 için belirlenen senaryolar Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11 Çalışma alanı 2 için belirlenen koşul ve senaryolar

Çalışma Alanı 2		
Koşul 1		
Proje Adı	YKN Sayısı	Kullanılan YKN’ler
Senaryo_1	--	--
Senaryo_2	3	5,6,9
Senaryo_3	4	5,6,9,1
Senaryo_4	5	5,6,9,1,3
Senaryo_5	6	5,6,9,1,3,2
Senaryo_6	7	5,6,9,1,3,2,7
Senaryo_7	8	5,6,9,1,3,2,7,8
Senaryo_8	9	5,6,9,1,3,2,7,8,4

4.5 Hava Fotoğraflarının İşlenmesi

Çalışma Alanı 1 ve 2’ye ait hava fotoğraflarının işlenmesi esnasında belirlenen tüm senaryolar için üretilen fotogrametrik ürünlerde farklılık gösteren tek faktör, senaryolara göre kullanılan YKN sayısı ve dağılımdaki farklılıklardır. Bunun haricinde yazılımda tüm

senaryolar (Çalışma Alanı 1 için 14, Çalışma Alanı 2 için 8 adet) için aynı işlem adımları ve belirlenen parametreler kullanılmıştır.

Veri işleme süreci 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar ön işleme, yoğun nokta bulutu ve katı model üretimi ve ortofoto, SYM üretimi aşamalarıdır.

4.5.1 Ön İşleme

Uçuş sonrası elde edilen hava fotoğraflarının işlenmesi sürecinde fotoğrafların yazılıma aktarılması işleminden sonraki aşama fotoğraflara ait koordinat sisteminin seçimi (her iki çalışma alanı için WGS84) ve görüntülerin elde edildiği kamera modelinin seçimidir. İHA üzerinde bulunan sensörler yardımıyla hesaplanan, hava fotoğraflarına ait EXIF meta verilerinde fotoğraflara ait enlem, boylam, yükseklik GPS değerleri ve dönüklük bilgileri (omega, phi, kappa) otomatik olarak elde edilmektedir (Tablo 4.12).

Tablo 4.12 Hava fotoğraflarına ait konum-dönüklük bilgileri (Örnek Gösterim)

Fotoğraf Etiket	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)	Omega (Derece)	Phi (Derece)	Kappa (Derece)
ER-02-0129_0010	46,65162	6,54156	798,03570	6,53858	4,70606	68,1543
ER-02-0129_0011	46,65177	6,54105	796,51721	-0,86482	11,7046	54,5334
ER-02-0129_0012	46,65193	6,54052	796,30908	5,12062	4,9622	69,1442
ER-02-0129_0013	46,65210	6,54000	795,50848	1,24067	12,677	51,4118
ER-02-0129_0014	46,65229	6,53948	796,71728	-5,34532	7,06161	64,7657
ER-02-0129_0015	46,65248	6,53897	795,94201	1,8177	10,6176	51,1026
ER-02-0129_0016	46,65266	6,53845	795,93872	10,6135	6,38617	64,6901
ER-02-0129_0017	46,65285	6,53792	799,18908	-	7,30802	43,8499
ER-02-0129_0018	46,65308	6,53745	799,80981	10,4678	-3,93797	51,1243
ER-02-0129_0019	46,65323	6,53694	796,16668	9,41084	1,28552	76,9091

Üretilcek fotogrametrik ürünlerin koordinat sistemi aşamasında Çalışma Alanı 1 için İsviçre ülke koordinat sistemi olan CH1903 datumu LV03 (EPSG:21781) dilimi tanımlanmıştır. Çalışma Alanı 2’de ise GRS 1980 datumunda, 3 derecelik TUREF sistemi 30. dilimi (ITRF 96 evrensel olarak EPSG: 5254) tanımlanmıştır.

Çalışma sahalarında jeodezik yöntemlerle ölçümü yapıp elde edilen YKN'lerin veri girişi işlemi gerçekleştirildikten sonra YKN sayısı ve dağılımına göre oluşturulan senaryolarda kullanılacak noktalar, her proje için ayrı ayrı tanımlanmıştır (Tablo 4.13 ve Tablo 4.14).

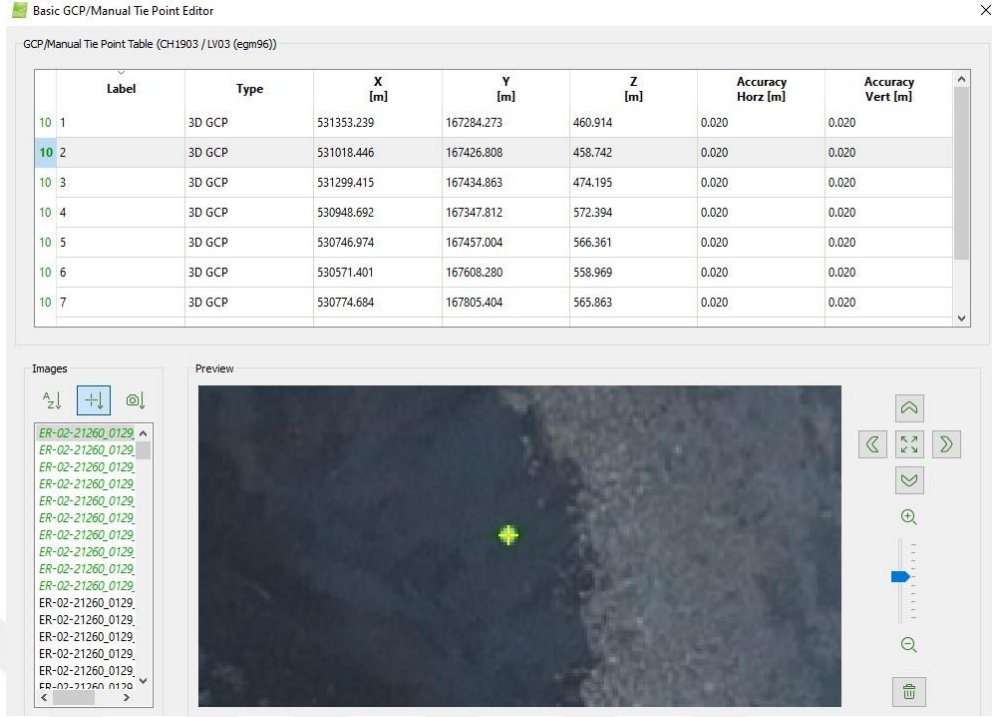
Tablo 4.13 Çalışma alanı 1 için kullanılan YKN'ler

Nokta No	Y(m) (Sağa)	X(m) (Yukarı)	H(m)
1	167284,273	531353,239	460,914
2	167426,808	531018,446	458,742
3	167434,863	531299,415	474,195
4	167347,812	530948,692	572,394
5	167457,004	530746,974	566,361
6	167608,28	530571,401	558,969
7	167805,404	530774,684	565,863
8	167638,643	530917,478	574,465
9	167578,015	531102,063	574,874

Tablo 4.14 Çalışma alanı 2 için kullanılan YKN'ler

Nokta No	Y (m) (Sağa)	X (m) (Yukarı)	H (m)
k1	434332,33	4464873,64	905,43
k2	434330,11	4464851,40	905,21
k3	434327,15	4464960,81	898,59
k4	434352,05	4464994,54	898,02
k5	434386,51	4465026,34	893,60
k6	434399,28	4464794,77	882,14
k7	434400,35	4464804,17	881,89
k8	434455,69	4464881,38	891,71
k9	434460,10	4464898,95	892,12

YKN olarak kullanılacak noktalar tanımlandıktan sonra, her noktanın hava fotoğrafı üzerinde tam konumunu işaretlemek gerekmektedir. Yapılan literatür araştırması sonucunda, her noktayı en az 4-5 farklı hava fotoğrafı üzerinde işaretlenmesini önerilmektedir. Bu sayının artması üretilcek ürünlerin hassasiyetini artırmaktadır. Bu çalışmada her iki çalışma alanı içinde kullanılan YKN'ler ayrı ayrı 10 fotoğrafta işaretlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 YKN'lerin hava fotoğrafları üzerinde işaretlenmesi

Ön işlem adımında görüntü eşleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamanın sonunda yoğun nokta bulutu verisinin elde edilmesinde referans olarak kullanılacak seyrek nokta bulutu verisi üretilmiştir. Ön işlem sürecinde uygulanan süreçler;

- Hava fotoğraflarında anahtar noktaların tespiti.
- Belirlenen anahtar noktaları üzerinden hava fotoğraflarında yer alan ortak özelliklerin eşleştirilmesi sonucu oluşan bağlantı noktaları
- Otomatik havai üçgenlemenin gerçekleşmesi ve sonucunda bağlantı noktalarına ait 3 boyutlu koordinatların hesaplanması
- Kamera konumlandırma
- Işın demetleri ile dengeleme
- Referans koordinat sisteminde seyrek nokta bulutu verisinin elde edilmesidir.

İHA sistemlerinde kullanılan kamera sistemleri sıcak ve titreşim gibi dış koşullara karşı hassastırlar. Bu gibi durumlar kamera kalibrasyonlarını etkilemektedir. Bu sebeple ön işlem aşamasında başlangıçta projeye tanıtılan kalibrasyon parametreleri ve distorsiyonlar ışın demetleriyle dengeleme aşamasında yeniden hesaplanmaktadır [84]. Seyrek nokta bulutu verisi üretimi için anahtar noktaların her bir görüntüde tespiti için orijinal boyutları kullanılmış ve anahtar nokta sayısı için herhangi bir limit

belirlenmemiştir. Eşleştirme stratejisi olarak İHA ile düzenli uçuş yapıldığı için hava grid veya koridor yöntemi uygulanmıştır (Tablo 4.15).

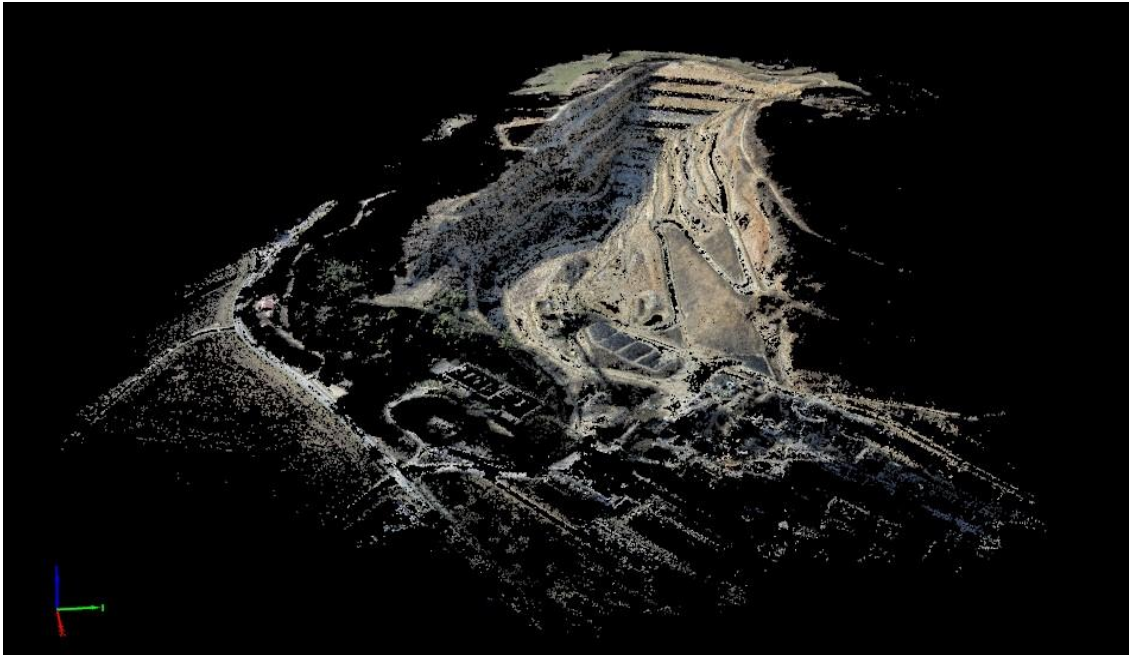
Tablo 4.15 Ön işlem adımında belirlenen parametreler

Yöntem	Belirlenen Parametre
Anahtar Noktaların Tespiti (1,1:2,1:4,1:8)	Orijinal görüntü boyutları
Anahtar Nokta Sayısı Limiti	Yok/Otomatik
Görüntü çiftlerinin eşleşme stratejisi	Hava Grid ve Koridor (Düzenli uçuşlar için)

Çalışma Alanı 1 ve 2 için oluşturulan seyrek nokta bulutu verisine ait detaylar Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4.16 Ön işlem sonucu elde edilen sayısal veriler

	Çalışma Alanı 1	Çalışma Alanı 2
2 Boyutlu Toplam Anahtar Nokta Sayısı	6041136	15595848
3 Boyutlu Toplam Bağlantı Nokta Sayısı	1699600	3425994
Bir Hava Fotoğrafında Bulunan Ortalama Anahtar Nokta Sayısı	60137	67063
Minimum/Maksimum Anahtar Nokta Sayısı	30802/84640	54574/78784
Bir Hava Fotoğrafında Bulunan Ortalama Bağlantı Nokta Sayısı	17410	41700
Minimum/Maksimum Bağlantı Nokta Sayısı	258/34914	12295/50143



Şekil 4.15 Çalışma alanı 1 (taş ocağı maden işletmesi) için seyrek nokta bulutu verisi



Şekil 4.16 Çalışma alanı 2 (mermer madeni işletmesi) için seyrek nokta bulutu verisi

4.5.2 Yoğun Nokta Bulutu ve Katı Model Üretimi

Fotogrametrik işlem süreçlerinde ikinci ana adım yoğun nokta bulutu ve katı model üretim aşamasıdır. Bu işlem aşamasında referans veri olarak ön işleme adımında üretilen bağlantı noktalarının bütünü oluşturarak seyrek nokta bulutu, referans veri olarak kullanılmaktadır. Bir önceki işlem adımında üretilen bağlantı noktalarının yoğunlaştırılması ile yoğun nokta bulutu verisi üretilmiştir. Nokta bulutu üretimi için görüntü boyutu 1/2 diğer bir ifade ile orijinal görüntünün yarı boyutu olarak belirlenmiştir. Doğrudan orijinal görüntü boyutlarının kullanımı durumunda dört kat daha fazla RAM ve işlem süresi gerekmektedir. Nokta yoğunluğu optimum, minimum eşleştirilecek görüntü sayısı 3, çoklu ölçek özelliği aktif ve çıktı verisi (.LAS) formatında belirlenerek tüm nokta bulutu verileri bu parametrelere göre üretilmiştir. Ayrıca çoklu ölçek özelliğinin kullanımı durumunda alt ölçeklerde (1/4 ve 1/8) ek 3B noktalar hesaplanır (Tablo 4.17).

Belirlenen bu parametrelere göre görüntü boyutu 1/2 ve nokta yoğunluğu yönteminin optimum olması durumunda orijinal görüntünün her 8 pikselinde bir 3 boyutlu nokta yer almaktadır [102].

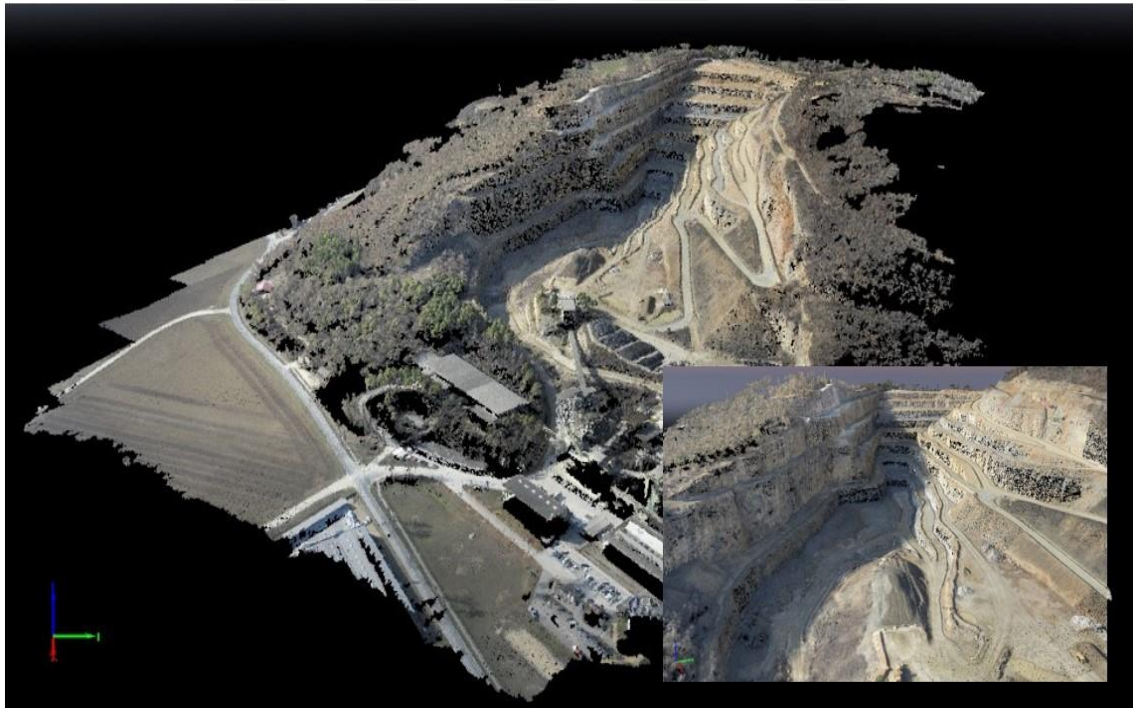
Tablo 4.17 Yoğun nokta bulutu üretim aşamasında parametreler

Yöntem	Belirlenen Parametre
Görüntü Boyutu	1/2 (Orijinal Görüntü Boyutunun Yarısı)
Nokta Yoğunluğu	Optimal
Minimum Eşleşme Sayısı	3
Çoklu Ölçek	Aktif
Çıktı Veri Formatı	.LAS

Her iki çalışma sahası için üretilen yoğun nokta bulutu verisi ile ilgili detaylar Tablo 4.18’de belirtilmiştir.

Tablo 4.18 Çalışma alanı 1 ve 2 için yoğun nokta bulutu parametreleri

	Çalışma Alanı 1	Çalışma Alanı 2
Kapladığı Alan	0.9087 km ² / 90.8731 ha	0.1502 km ² / 15.0164 ha
Grid (Tile) Sayısı	10	8
Toplam Nokta Sayısı	40614344 adet	38702134 adet
Nokta Yoğunluğu (1 m ³ ‘te)	21.59 adet	286.75 adet



Şekil 4.17 Çalışma alanı 1 için üretilen yoğun nokta bulutu verisi



Şekil 4.18 Çalışma alanı 2 için üretilen yoğun nokta bulutu verisi

Verilerin işlenmesi sürecinde ikinci adımın son aşaması katı model üretimidir. Bu veri yapısı genellikle 3 boyutlu verilerin sunumunda ve video gösterimlerinde kullanılmaktadır. Katı model üretimi, yoğun nokta bulutu içinde yer alan noktaların üçgenlenmesi ile düşük, orta ve yüksek çözünürlükte üretilebilmektedir. Katı model üretiminde çözünürlük seviyesinin belirlenmesi kullanılan donanımın ekran kartı özelliklerine bağlıdır. Tez çalışması kapsamında üretilecek katı modeller orta seviye çözünürlükte üretilmiştir (Şekil 4.19).



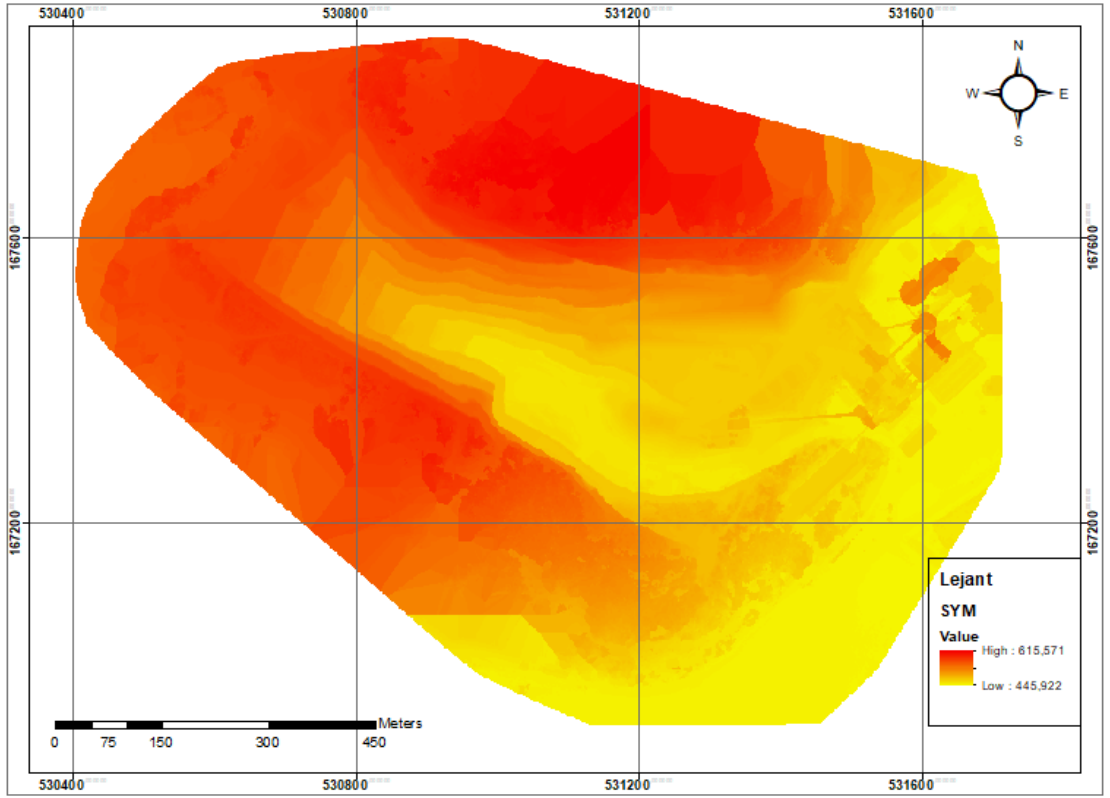
Şekil 4.19 Çalışma alanı 1 (sol) ve çalışma alanı 2 (sağ) için üretilen katı (mesh) model

4.5.3 Ortofoto ve Sayısal Yüzey Modeli Üretimi

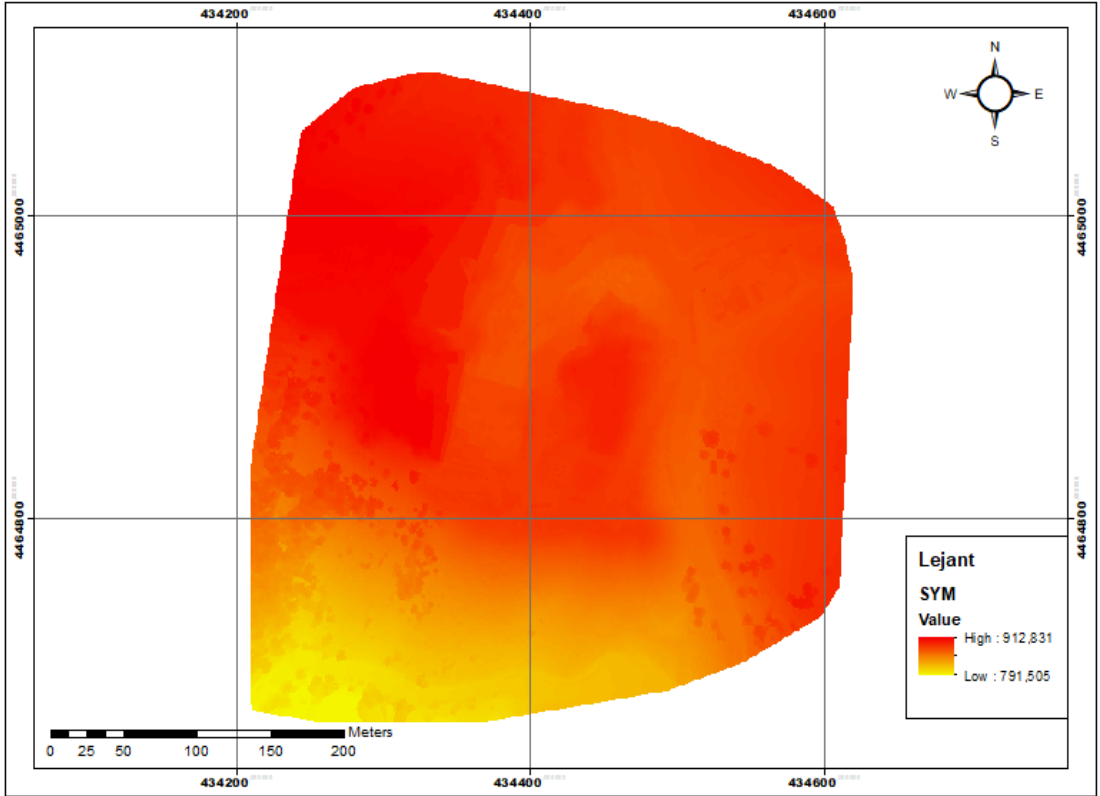
Hava fotoğraflarının işlenmesi sürecinin son aşamasında sonuç ürünler olan ortofoto ve SYM verilerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki adımda üretilen yoğun nokta bulutu, bu aşamada SYM üretilmesi için referans veri olarak kullanılmaktadır. SYM verisinin üretimi için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem delanuay üçgenleme yöntemi, ikincisi ise uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma yöntemiyle SYM üretilmesidir. Yapılan literatür araştırmasına göre delanuay üçgenleme yöntemi eğimin fazla olmadığı düz sahalarda başarı sağlarken, uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma yöntemi daha çok engebeli yükseklik farkının fazla olduğu ve binaların yer aldığı şehir merkezlerinde etkin bir yöntemdir. Tez çalışmasında yer alan açık maden sahaları oldukça engebeli ve eğim farkı fazla olduğu alanlar olduğu için burada uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma yöntemi seçilmiştir. Ortofoto verisi üretiminde ise elde edilen SYM verisi kullanılarak geometrik ve perspektif bozukluklar giderilir. Böylece çalışma sahası için hem SYM hem de ortofoto verileri, GeoTIFF formatında elde edilmiştir. Tablo 4.19’de üretilen sonuç ürünler ile ilgili detaylar verilmiştir.

Tablo 4.19 Çalışma alanı 1 ve 2 için ortofoto ve sayısal yüzey modeli parametreleri

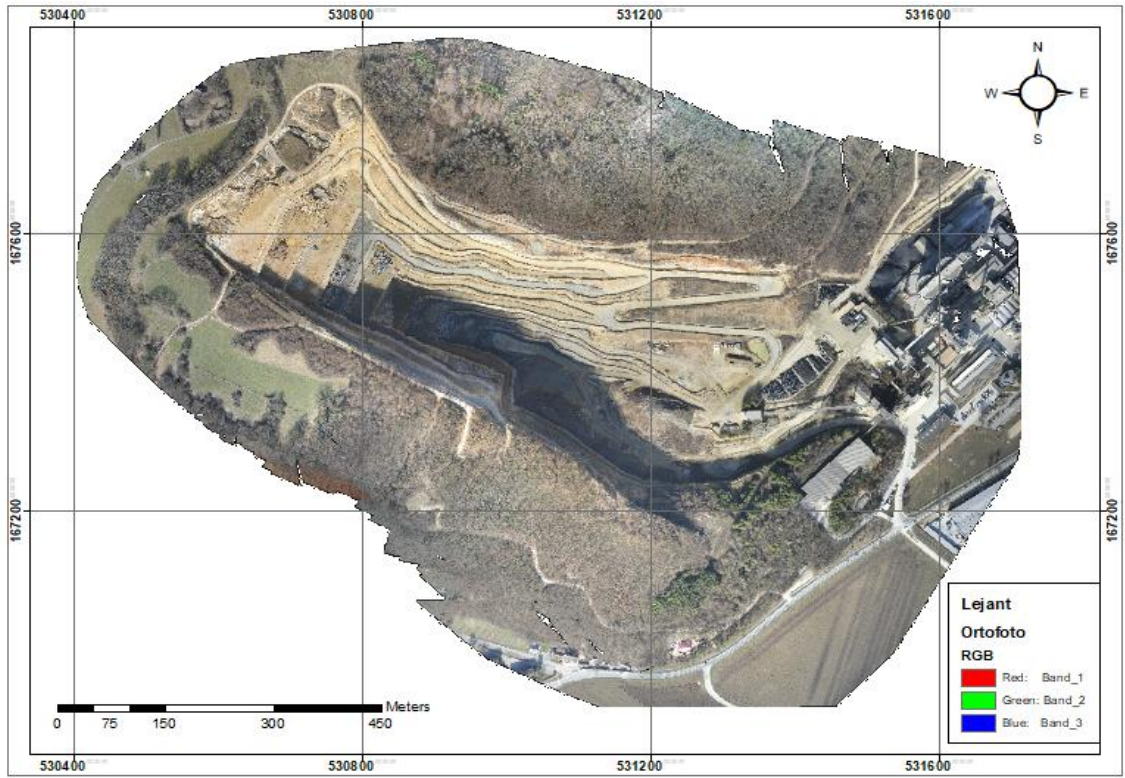
Sayısal Yüzey Modeli	Çalışma Alanı 1	Çalışma Alanı 2
Üretim Yöntemi	Uzaklığın Tersi ile Ağırlıklandırma	Uzaklığın Tersi ile Ağırlıklandırma
Çözünürlük	5.43 cm/piksel	2.45 cm/piksel
Gürültü Giderme Filtresi	Var	Var
Yüzey Yumuşatma	Var	Var
Format	GeoTIFF	GeoTIFF
Ortofoto		
Koordinat Sistemi	CH1903/LV03 (Epsg:21781)	TUREF/TM30 (Epsg:5254)
Çözünürlük	5.43 cm/piksel	2.45 cm/piksel
Format	GeoTIFF	GeoTIFF



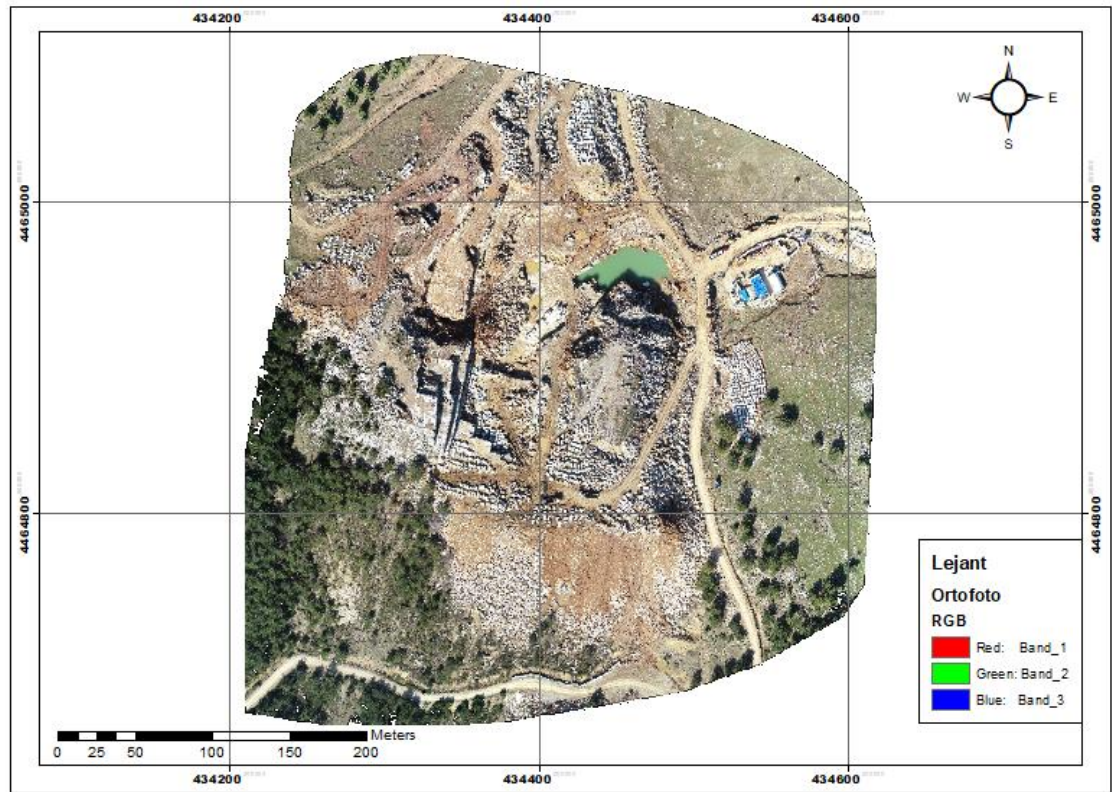
Şekil 4.20 Çalışma alanı 1 için sayısal yüzey modeli (SYM)



Şekil 4.21 Çalışma alanı 2 için sayısal yüzey modeli (SYM)



Şekil 4.22 Çalışma Alanı 1'e ait sonuç ürün ortofoto



Şekil 4.23 Çalışma Alanı 2'e ait sonuç ürün ortofoto

5 DOĞRULUK ANALİZİ

Tez çalışması kapsamında çalışma alanı 1 ve 2 için İHA fotogrametrisi tekniği ile Bölüm 4.4’de belirlenen senaryolara göre ortofoto ve sayısal yüzey modeli verileri üretilmiştir. Çalışma alanı 1 olarak ifade edilen taş ocağı maden işletmesinde toplamda 14, çalışma alanı 2 olarak ifade edilen mermer maden işletmesinde ise 8 adet fotogrametrik projeden veriler elde edilmiştir. Üretimi yapılan bu verilerin doğruluk analizinin yapılabilmesi için sayısallaştırma işlemleri Arcmap 10.8.1 yazılımında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sayısallaştırma işlemi yapılan ortofotoda belirlenen noktaların sağa ve yukarı yönde koordinat bilgileri alınmış ve sayısal yüzey modelinden yükseklik bilgileri elde edilmiştir. Böylece çalışma sahalarında arazi ölçümleri sonucu elde edilen 3 boyutlu koordinatlar ile çalışma kapsamında üretilen verilerden alınan koordinat değerleri arasındaki farklar hesaplanmıştır.

Üretilen ortofoto ve SYM verilerinin konum doğruluğu analizi KOH değerleri kriter alınarak yapılmıştır. KOH_{xy} yatay konum doğruluğu değerleri, KOH_z düşey konum doğruluk değerlerini, KOH_{xyz} ise yatay ve düşey yöndeki bileşenlerin doğruluk değerlerini ifade etmektedir. Denklem 5.1, 5.2 ve 5.3’de bağıntıları verilmiştir.

$$KOH_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - X_{ii})^2 + (Y_i - Y_{ii})^2]}{n}} \quad (5.1)$$

$$KOH_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z_i - Z_{ii})^2]}{n}} \quad (5.2)$$

$$KOH_{xyz} = \sqrt{KOH_{xy}^2 + KOH_z^2} \quad (5.3)$$

KOH_{xy}: Yatay konum doğruluk hatası,

KOH_z: Düşey konum doğruluk hatası,

KOHxyz: Yatay ve düşey yönde doğruluk hatası,

Xi, Yi, Zi: Yersel Ölüm sonucu elde edilmiş koordinat değerleri,

Xii, Yii, Zii: Üretilen ortofoto ve SYM verilerinden alınan koordinat değerleri,

n: ölçü sayısını ifade etmektedir.

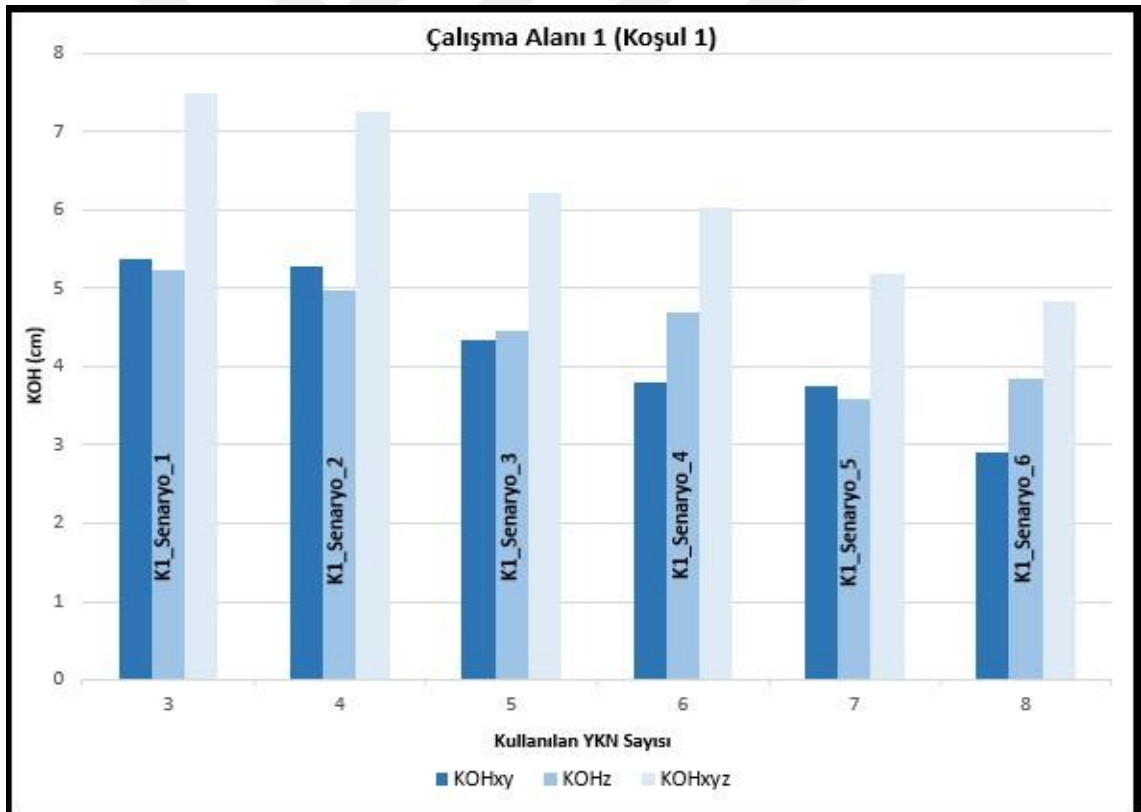
Çalışma Alanı 1 için toplamda kullanılan 9 adet YKN bulunmaktadır. Ölçülen nokta sayısının yetersiz olmasından kaynaklı tüm YKN'ler aynı zamanda KN olarak kullanılmıştır. Ayrıca güneş ışınlarının olumsuz etkisi sebebiyle hava fotoğrafları üzerinde seçimi yapılabilen ancak ortofoto üzerinde seçimi yapılamayan 4 Nolu nokta KOH hesabına dahil edilememiştir. Sonuçta bu çalışma alanında tüm ortofoto ve SYM verileri için 8 adet KN kullanılmıştır. Konum doğruluğu analiz sonuçları Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de ayrıca sonuçların grafik gösterimleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de belirtilmiştir.

Tablo 5.1 Çalışma alanı 1 (koşul 1) analiz sonuçları

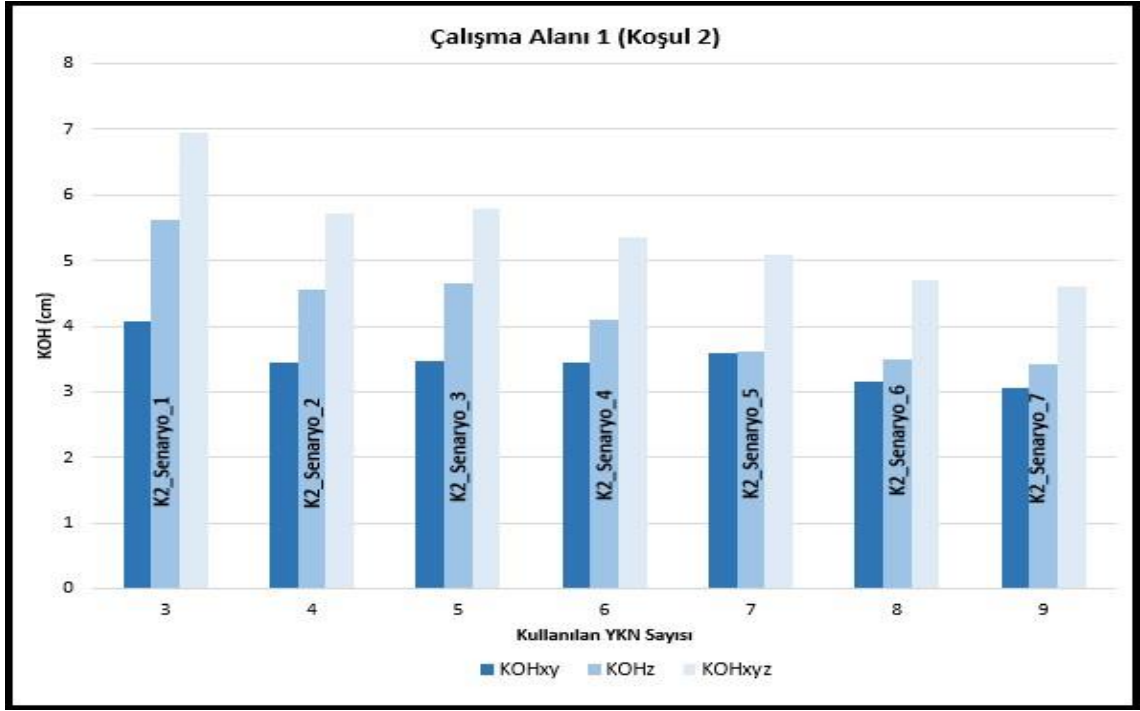
Çalışma Alanı 1 Koşul 1						
Proje Adı	YKN Sayısı	Kullanılan YKN Adları	Kontrol Noktaları (8 Adet)	KOHxy (cm)	KOH_z (cm)	KOHxyz (cm)
Senaryo_0	--	--	Tüm YKN'ler	68,945	97,853	119,702
Senaryo_1	3	5,6,7	"	5,374	5,229	7,498
Senaryo_2	4	5,6,7,8	"	5,287	4,977	7,261
Senaryo_3	5	5,6,7,8,9	"	4,342	4,447	6,215
Senaryo_4	6	5,6,7,8,9,3	"	3,796	4,694	6,037
Senaryo_5	7	5,6,7,8,9,3,1	"	3,752	3,584	5,189
Senaryo_6	8	5,6,7,8,9,3,1,4	"	2,916	3,844	4,825

Tablo 5.2 Çalışma alanı 1 (koşul 2) analiz sonuçları

Çalışma Alanı 1 Koşul 2						
Proje Adı	YKN Sayısı	Kullanılan YKN Adları	Kontrol Noktaları (8 Adet)	KOH _{xy} (cm)	KOH _z (cm)	KOH _{xyz} (cm)
Senaryo_1	3	1,6,7	Tüm YKN'ler	4,067	5,632	6,947
Senaryo_2	4	1,6,7,3	“	3,451	4,566	5,723
Senaryo_3	5	1,6,7,3,2	“	3,458	4,653	5,798
Senaryo_4	6	1,6,7,3,2,8	“	3,441	4,099	5,352
Senaryo_5	7	1,6,7,3,2,8,5	“	3,591	3,607	5,090
Senaryo_6	8	1,6,7,3,2,8,5,9	“	3,146	3,493	4,700
Senaryo_7	9	1,6,7,3,2,8,5,9,4	“	3,068	3,433	4,604



Şekil 5.1 Çalışma alanı 1 (koşul 1) analiz sonuçları grafik gösterimi

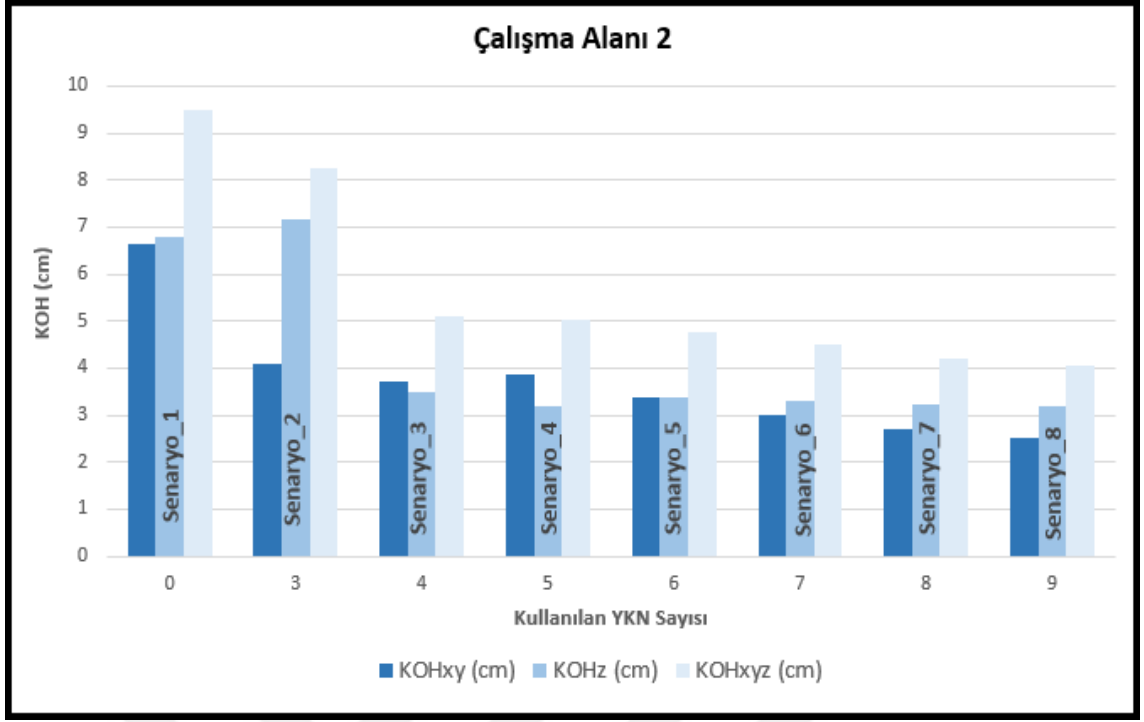


Şekil 5.2 Çalışma alanı 1 (koşul 2) analiz sonuçları grafik gösterimi

Çalışma Alanı 2’de fotogrametrik işlem sürecinde kullanılan 9 adet YKN bulunmaktadır. Belirlenen senaryolara göre YKN sayısındaki değişimler uygulanarak üretilen ortofoto ve SYM verilerinin konum doğruluğu analizi için 10 adet KN kullanılmıştır. Burada hava fotoğraflarının işlenmesi esnasında kullanılan YKN’ler konum doğruluğu analizinde kullanılmamıştır. Analiz sonuçları Tablo 5.3’te ve grafik gösterimi Şekil 5.3’te belirtilmiştir.

Tablo 5.3 Çalışma alanı 2 (koşul 1) analiz sonuçları

Çalışma Alanı 2 Koşul 1						
Proje Adı	YKN Sayısı	Kullanılan YKN’ler	Kontrol Noktaları (10 Adet)	KOHxy (cm)	KOHZ (cm)	KOHxyz (cm)
Senaryo_1	--	--	a1,2,3,13,21,22,32,34,41,48	6,626	6,775	9,476
Senaryo_2	3	k5,6,9	“	4,076	7,171	8,249
Senaryo_3	4	k5,6,9,1	“	3,711	3,489	5,093
Senaryo_4	5	k5,6,9,1,3	“	3,873	3,203	5,026
Senaryo_5	6	k5,6,9,1,3,2	“	3,376	3,360	4,763
Senaryo_6	7	k5,6,9,1,3,2,7	“	3,019	3,318	4,486
Senaryo_7	8	k5,6,9,1,3,2,7,8	“	2,700	3,210	4,192
Senaryo_8	9	k5,6,9,1,3,2,7,8,4	“	2,526	3,183	4,064



Şekil 5.3 Çalışma alanı 2 (koşul 1) analiz sonuçları grafik gösterimi

Çalışma alanı 1’de üretilen ortofoto ve SYM verilerinin konum doğruluğu analiz sonuçlarına göre koşul 1 altında yer alan senaryolar içerisinde YKN kullanmadan (Senaryo_0) üretilen ürünlerin yatayda ve düşeyde sırasıyla KOHxy 68,94 cm, KOHz 97,85 cm değerleri elde edilmiştir. Bu koşul altında YKN’lerin kullanımına bağlı olarak hem yatayda hemde düşeyde en az hata değeri “Senaryo_6” da KOHxy 2,91 cm KOHz 3,84 cm sonuçları alınırken, en yüksek hata değeri “Senaryo_1” KOHxy 5,37 cm KOHz 5,23 cm değerleri elde edilmiştir. Aynı çalışma bölgesinde koşul 2 altında yer alan senaryo sonuçlarına bakıldığında en az hata değeri “Senaryo_7” de KOHxy 3,07 cm KOHz 3,43 iken, en yüksek hata değeri “Senaryo_1” de KOHxy 4,07 KOHz cm 5,63 cm olarak elde edilmiştir.

Çalışma Alanı 2 için sonuç ürünlerin konum doğruluğu analiz sonuçlarında en yüksek hata değeri YKN’lerin kullanılmadığı “Senaryo_1” de KOHxy 6,63cm KOHz 6,77 cm olarak elde edilirken YKN sayısındaki artışa bağlı olarak en az hata değeri tüm YKN’lerin fotogrametrik işlem sürecinde kullanıldığı “Senaryo_8” de KOHxy 2,53 cm KOHz 3,18 cm olarak elde edilmiştir.

Günümüz koşullarında birçok sektörde otomasyona dayalı bir süreç yaşanırken fotogrametri bilimi için de çağımız teknolojisinde gelişimini sürdüren İHA teknolojileri bu konuda önemli bir ilerleme sağlamıştır. Bu çalışma ile açık maden işletmelerinde İHA fotogrametrisi tekniği kullanılmış ve bunun için iki farklı çalışma alanı belirlenmiştir. Birinci çalışma alanı 90 hektar alana sahip İsviçre, Vaud Kanton'u Eclepençe bölgesine ait taş ocağı maden işletmesi, çalışma alanı 2 için ise Bursa, Gürsu bölgesine ait 15 hektar alana sahip mermer madeni işletmesi çalışma alanlarıdır. Hava fotoğraflarının elde edilmesi aşamasında kullanılan İHA sistemi çalışma alanı 1 için RTK/PPK modülüne sahip değilken, çalışma alanı 2'de bu modül bulunmaktadır. Her iki çalışma sahasında yersel ölçüm teknikleriyle elde edilen YKN'ler, fotogrametrik işlem sürecince çalışma alanı 1 için iki koşul altında 14 senaryo ve çalışma alanı 2 için bir koşul altında 8 senaryoda farklı sayı ve dağımlarda kullanılmıştır. Çalışma alanlarında uygulanan senaryolar YKN kullanmadan ve YKN kullanarak 3 adetten 9'a kadar birer artırım olacak şekilde belirlenmiştir. Bu koşul ve senaryolara göre toplam 22 farklı fotogrametrik proje için nihai ürünler olan ortofoto ve SYM verilerinin konum doğruluğu analizi için karesel ortalama hata kriteri kullanılmıştır.

Çalışma alanı 1 için üretilen verilerin konum doğruluğu analizine göre koşul 1 altında yer alan senaryolar içerisinde YKN kullanmadan (Senaryo_0) üretilen ürünlerin yatayda ve düşeyde sırasıyla KOHxy 68,94 cm, KOHz 97,85 cm değerleri elde edilmiştir. Bu koşul altında YKN'lerin kullanımına bağlı olarak hem yatayda hemde düşeyde en az hata payı "Senaryo_6" da 8 adet YKN kullanımıyla KOHxy 2,91 cm KOHz 3,84 cm sonuçları alınırken, en yüksek hata değeri "Senaryo_1" 3 adet YKN kullanımı ile KOHxy 5,37 cm KOHz 5,23 cm değerleri elde edilmiştir. Aynı çalışma bölgesinde koşul 2 altında yer alan senaryo sonuçlarına bakıldığında en az hata değeri tüm YKN'lerin sürece dahil edildiği "Senaryo_7" de KOHxy 3,07 cm KOHz 3,43 iken, en yüksek hata değeri 3 adet YKN kullanımı ile "Senaryo_1" de KOHxy 4,07 KOHz cm 5,63 cm olarak elde edilmiştir. Çalışma alanı 2'de ise en yüksek hata değeri YKN'leri sürece dahil edilmediği "Senaryo_1" de KOHxy 6,63cm KOHz 6,77 cm elde edilirken, en az hata değeri tüm YKN'lerin kullanıldığı "Senaryo_8" de KOHxy 2,53 cm KOHz 3,18 cm olarak elde

edilmiştir. Sonuç ürünlerin üretilmesi aşamasında YKN'lerin kullanılmadığı durumlar incelendiğinde çalışma alanı 1 için yapılan analizde yatay ve düşey bileşkeye bakıldığında “m” hassasiyetinde bir hata payıyla karşılaşırken, çalışma alanı 2’de “cm” hassasiyetinde sonuç ürünler elde edildiği görülmüştür. Bu durum her iki çalışma sahasında kullanılan İHA’ların birbirinden farklı donanıma sahip olması ile bağlantılıdır. Çalışma alanı 2’de kullanılan İHA platformunda RTK/PPK modülünün yer alması sebebiyle, uçuş esnasında hava fotoğrafları çekim noktası koordinat ve dönüklük bilgileri hassas bir şekilde elde edilmektedir. Ancak çalışma alanı 1’de doğrudan GPS/IMU sensörlerinden elde edilen düşük hassasiyetli veriler kullanılmaktadır. YKN’lerin kullanılması durumunda, her iki çalışma alanı için verilerin üretim esnasında kullanılan YKN sayısındaki artış, hem yatayda hemde düşeyde konum doğruluğunu olumlu yönde etkilediği görülmektedir. YKN’lerin sahadaki dağılımının olabildiğince homojen olduğu senaryolarda daha yüksek konum doğruluğuna sahip ürünler elde edilmiştir. Ancak açık maden işletmeleri gibi zor arazi şartlarında YKN’lerin çalışma sahasına homojen dağılımı her zaman mümkün olmayabilir. Bunun için çalışma alanı 1’de birinci ve ikinci koşulda aynı sayıda ve farklı dağılımda YKN’lerin kullanıldığı 1,2,3 ve 4. senaryo sonuçlarını karşılaştırdığımızda YKN’ler arası mesafenin daha yakın ve sahanın belli bir bölümünde toplanmış olduğu durumda konum doğruluğu azalırken, YKN’ler arası mesafenin arttığı ve çalışma sahasının geneline dağıldığı durumlarda yatay ve düşeyde konum doğruluğundan daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür. Çalışma alanı 2’de ise kullanılan YKN’ler arasındaki mesafesinin yakın olması durumlarında yatay konum doğruluğunda artış gözlemlenirken, düşey konum doğruluğunda ise önemli bir değişkenlik görülmemiştir.

Çalışma sonucunda RTK’sız İHA kullanılarak (çalışma alanı 1) fotogrametrik işlem sürecinde YKN’lerin dahil edilmediği durumlarda sonuç ürünlerin hata payının “m” düzeyinde olduğu görülmüştür. Açık maden işletmeleri gibi arazi koşullarının homojen YKN dağılımına elverişli olmadığı alanlarda, az sayıda (en az 3) YKN kullanarak “cm” hassasiyetinde konum doğruluğuna sahip sonuç ürünler üretilmiştir. Bu gibi zor arazilerde az sayıda YKN kullanımının olduğu en elverişsiz durumlarda, en uygun çözümü elde etmek için YKN’ler arası mesafe arttırılmalı ve çalışma alanına olabildiğince dağılmış şekilde konumlandırılmalıdır. Ayrıca arazi koşullarının izin verdiği durumda yükseklik farkının fazla olduğu çalışma alanlarında hem tepe hem de çukur bölgelerine YKN konumlandırılmalıdır. Sonuç ürünlerin konum doğruluğu analizi

için kullanılan YKN'lerin haricinde KN noktalarının yer alması önerilmektedir. Çalışma sahalarında RTK'lı İHA'ların kullanımı (alışma alanı 2) ile YKN kullanımı olmadan önceki nesil İHA'lara kıyasla yüksek hassasiyette çözümler elde edilmiştir. Açık maden işletmelerinde yüksek hassasiyet gerektirmeyen ( rneğin kazı planlaması, k baj hesabı gibi) alışmalarda YKN kullanımı olmadan bu sonuçların yeterli olabileceği düşünülmektedir. Ancak bu gibi durumlarda az sayıda YKN kullanımı ile daha yüksek konum doğruluğuna sahip çözümler elde edilebildiği görülmüştür. Sonuç olarak, açık maden işletmeleri gibi arazi koşullarının homojen YKN dağılımına elverişli olmadığı alanlarda, İHA-Fotogrametrisi tekniği ile elde edilen ürünlerin yüksek doğruluk sağladığı ve bu bağlamda etkin kullanımının uygun olduğu gözlemlenmiştir.



-
- [1] Introduction on photogrammetry, <https://www.scribd.com/document/277243918/Introduction-on-Photogrammetry-by-Koert-Sijmons>, 05.01.2021.
 - [2] F. Karşlı, Fotogrametri. İstanbul Üniversitesi Açık Ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Yayınları, Coğrafi Bilgi Sistemleri, 2017.
 - [3] A. Yaşayan, M. Uysal, A. Varlık, A. Avdan, Fotogrametri. Anadolu Üniversitesi Yayınları, 2016.
 - [4] D. B. Kılınçoğlu, "Farklı İnsansız Hava Araçları İle Elde Edilen Görüntülerin Otomatik Fotogrametrik Yöntemlerle Değerlendirilmesi Ve Doğruluk Analizi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
 - [5] H. Eisenbeiß, "UAV Photogrammetry," ETH Zurich for the degree of Doctor of Science, ISSN 0252-9335, ISBN: 978-3-906467-86-3, Zurich, Switzerland, 2009.
 - [6] V. Prisacariu, "The History And The Evolution Of Uavs From The Beginning Till The 70S," Journal of Defense Resources Management, Vol. 8, Issue 1 (14), 2017.
 - [7] M. Jaud, S. Passot, R. Le Bivic, C. Delacourt, P. Grandjean, N. Le Dantec, "Assessing the accuracy of high resolution digital surface models computed by PhotoScan and MicMac in sub-optimal survey conditions," Remote Sensing, 8(6), 465, 2016.
 - [8] M. Kun, B. Özcan, "Maden ocaklarında insansız hava aracı kullanımı: örnek bir saha çalışması," Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 554-564, 10.25092/baunfbed.624484, 2019.
 - [9] Y. Gül, "Açık maden işletmelerinde insansız hava aracı (İHA) uygulamaları," Türkiye Jeoloji Bülteni, 62, 99-112, 2019.
 - [10] VisualSFM: a visual structure from motion system, <http://ccwu.me/vsfm/index.html>, 05.02.2021.
 - [11] P. Lewinska, K. Pargieła, "Comparative Analysis of Structure-From-Motion Software's—An Example of Letychiv (Ukraine) Castle and Convent Buildings," Journal of Applied Engineering Sciences, 8(2), 2018.
 - [12] U. G. Sefercik, "Sfm Tabanlı Yeni Nesil Görüntü Eşleştirme Yazılımlarının Fotogrametrik 3b Modelleme Potansiyellerinin Karşılaştırması," Türkiye Fotogrametri Dergisi-2020, 2(2), 39-45, 2020.
 - [13] X. Zhang, P. Zhao, Q. Hu, M. Ai, D. Hu, J. Li, "A UAV-based panoramic oblique photogrammetry (POP) approach using spherical projection," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 159, Pages 198-219, ISSN 0924-2716, 2020.
 - [14] K. Ö. Hastaoğlu, Y. Gül, F. Poyraz, B. C. Kara, "Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 83, 101916, ISSN 0303-2434, 2019.

- [15] G. Brunier, E. Michaud, J. Fleury, E. J. Anthony, S. Morvan, A. Gardel, "Assessing the relationship between macro-faunal burrowing activity and mudflat geomorphology from UAV-based Structure-from-Motion photogrammetry," *Remote Sensing of Environment*, Volume 241, 111717, ISSN 0034-4257, 2020.
- [16] J. B. Sankey, T. T. Sankey, J. Li, S. Ravi, G. Wang, J. Caster, A. Kasprak, "Quantifying plant-soil-nutrient dynamics in rangelands: Fusion of UAV hyperspectral-LiDAR, UAV multispectral-photogrammetry, and ground-based LiDAR-digital photography in a shrub-encroached desert grassland," *Remote Sensing of Environment*, Volume 253, 112223, ISSN 0034-4257, 2021.
- [17] N. Micheletti, "Structure from Motion (SfM) Photogrammetry," *British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques*, Sec. 2.2 ISSN 2047-0371, 2015.
- [18] İ. Ulusoy, E. Şen, A. Tuncer, H. Sönmez, H. Bayhan, "3D Multi-view stereo modelling of an open mine pit using a lightweight UAV," *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(2), 223-242, 2017.
- [19] H. Ş. Kapıcıoğlu, "İnsansız hava aracı fotogrametrisinde yer kontrol noktalarının konum doğruluğuna etkisinin incelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi*, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [20] N. Yastikli, "Algılama Sistemlerinin Doğrudan Yöneltilmesi," *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi yönetimi Dergisi*, ss.5-11, 2004.
- [21] W. Linder, *Digital photogrammetry: A Practical Course (Vol. 1)*. Berlin: Springer, 2009.
- [22] Pix4d, <https://www.pix4d.com/blog/why-ground-control-points-important>, 02.03.2021.
- [23] C. Strecha, "The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery," *Photogrammetric Week '11*, Dieter Fritsch (Ed.), Wichmann, 289-294, 2011.
- [24] D. Turner, A. Lucieer, C. Watson, "An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds," *Remote Sensing*, 4, 1392-1410, 2012.
- [25] M. Uysal, A. Toprak, N. Polat, "DEM Generation with UAV Photogrammetry and Accuracy Analysis in Sahitler Hill," *Measurement*, 73, pp.539-543, 2015.
- [26] J.A. Gonçalves, R. Henriques, "UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp.101-111, 2015.
- [27] O. G. Ajayi, M. Palmer, A. A. Salubi, "Modelling farmland topography for suitable site selection of dam construction using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 11, Pages 220-230, ISSN 2352-9385, 2018.
- [28] I. Elkhachy, "Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry," *Alexandria Engineering Journal*, Volume 60, Issue 6, Pages 5579-5590, ISSN 1110-0168, 2021.

- [29] Y. Watanabe, Y. Kawahara, "UAV Photogrammetry for Monitoring Changes in River Topography and Vegetation," *Procedia Engineering*, Volume 154, Pages 317-325, ISSN 1877-7058, 2016.
- [30] D. Wierzbicki, M. Kedzierski, A. Fryskowska, "Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production," *Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, pp. 1–8, 2015.
- [31] C. Amrullah, D. Suwardhi, I. Meilano, "Product accuracy effect of oblique and vertical non-metric digital camera utilization in Uav-photogrammetry to determine fault plane," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* III-6, 41–48, 2016.
- [32] A. E. Hastaoğlu, K. Ö. Hastaoğlu, F. Poyraz, G. Ü. Yavuz, "İHA fotogrametrisi konum doğruluğuna kamera odak uzaklığı etkisinin incelenmesi," *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(1), 22-28, 2021.
- [33] S. Harwin, A. Lucieer "Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery," *Remote Sens.*, 4(6), 1573–1599, 2012.
- [34] F. J. Mesas-Carrascosa, M. D. Notario García, M. Larriva, A. García-Ferrer, "An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaicks to survey archaeological areas," *Sensors*, 16(11), 1838, 2016.
- [35] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. Sarazzi, "UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling current status and future perspectives," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1 (C22), Zurich, Switzerland, 2-7, 2011.
- [36] A. Murtiyoso, P. Grussenmeyer, "Documentation of heritage buildings using closerange UAV images: dense matching issues, comparison and case studies," *Photogramm. Rec.* 32, 206–229, 2017.
- [37] F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, P. Martínez-Carricondo, "Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry," *Journal of Surveying Engineering*, 2017.
- [38] F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, P. Martínez-Carricondo, "Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle," *Measurement*, Volume 98, Pages 221-227, ISSN 0263-2241, 2017.
- [39] K. N. Tahar, "An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block," *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013.
- [40] T. Tonkin, M. Nicholas, "Ground-Control Networks for Image Based Surface Reconstruction: An Investigation of Optimum Survey Designs Using UAV Derived Imagery and Structure-from-Motion Photogrammetry," *Remote Sensing*, 2016.
- [41] F. Carvajal-Ramírez, F. Agüera-Vega, P. Martínez-Carricondo, "Effects of image orientation and ground control points distribution on unmanned aerial vehicle photogrammetry projects on a road cut slope," *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016.

- [42] P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, “Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 72, Pages 1-10, 2018.
- [43] G. Rangel, G. Gonçalves, J. Perez, “The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low cost UASs,” *International journal of remote sensing*, 2018.
- [44] J. Ren, Z. Zhang, H. Gai, W. Kang, “Typical Riedel shear structures of the coseismic surface rupture zone produced by the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake, Qinghai, China, and the implications for seismic hazards in the block interior,” *Natural Hazards Research*, 2021.
- [45] S. Varbla, A. Ellmann, R. Puust, “Centimetre-range deformations of built environment revealed by drone-based photogrammetry,” *Automation in Construction*, 2021.
- [46] G. Forlani, E. DallAsta, F. Diotri, U. M. di Cella, R. Roncella, M. Santise, “Quality assessment of Dsms produced from Uav flights georeferenced with on-board Rtk positioning,” *Remote Sensing*, 2018.
- [47] D. Ekaso, F. Nex, N. Kerle, “Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing,” *Geo-spatial information science*, 2020.
- [48] M. Rabah, M. Basiouny, E. Ghanem, A. Elhadary, “Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery,” *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysicss*, 2018.
- [49] C. Stöcker, F. Nex, M. Koeva, M. Gerke, “Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of Uav-Based mapping,” *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017.
- [50] P. Van Blyenburgh, “UAVs: an overview,” *Air & Space Europe*, 1(5-6), pp.43-47, 1999.
- [51] B. Pakkan, M. Ermiş, “İnsansız hava araçlarının genetik algoritma yöntemiyle çoklu hedeflere planlanması,” *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(3), Ss.77-84, 2010.
- [52] I. Colomina, P. Molina, “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, pp. 79–97. 2014.
- [53] İnsansız hava aracı sistemleri talimatı, http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/2020/SHT-IHA_Rev-04, 27.03.2021.
- [54] A. Torun, “İnsansız hava aracı (İHA) sektörü ve İHA fotogrametrisinin ölçme bağlamında konumlandırılması,” 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 2017.
- [55] R. N. Colwell “History and place of photographic interpretation,” *Manual of photographic interpretation*, vol. 2, pp. 33–48, 1997.

- [56] H. J. Przybilla and W. Wester-Ebbinghaus, "Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug," In: Bildmessung und Luftbildwesen, Zeitschrift fuer Photogrammetrie und Fernerkundung, pp. 137-142, 1979.
- [57] W. Wester-Ebbinghaus, "Aerial Photography by radio controlled model helicopter," The Photogrammetric Record, pp. 85-92, 1980.
- [58] H. Wanzke, "The Employment of a Hot air Ship for the Stereophotogrammetric Documentation of Antique Ruins," International Archives of the 166 Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 746-756, 1984.
- [59] H. Atak, "İnsansız hava araçları kullanarak ortofoto harita Üretimi ve doğruluk analizleri," Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [60] M. Dikmen, "İnsansız hava aracı (İHA) sistemlerinin hava hukuku bakımından incelenmesi," The Journal of Defense Sciences, ss. 145-176, 2015.
- [61] M. Akgül, "İnsansız hava araçları ile yüksek hassasiyette sayısal yükseklik modeli üretimi ve ormancılıkta kullanım olanakları," Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, ss. 104-118, 2016.
- [62] İnsansız hava aracı sistemleri: gökyüzünün yeni yırtıcı kuşları, http://www.academia.edu/2004387/Insansiz_Hava_Araci_Sistemleri_Gokyuzunu_n_Yeni_Yirtici_Kuslari, 04.04.2021.
- [63] A. Kesikoğlu, "Düşük irtifa görüntüleme sistemlerinin ortofoto üretiminde kullanımı," Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [64] E. Gençerk , "İnsansız hava aracı fotogramtrisi uygulaması ile inşaat projesi imalat durumunun araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [65] F. Nex, F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: A review," Applied Geomatics, pp. 1-15, 2014.
- [66] I. Özemir, "İnsansız hava aracı ile fotogrametrik veri üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [67] O. Eroğlu, "İnsansız hava araçlarında arazi verilerine dayalı uçuş yönü sınırlamasız konumlandırma sistemi benzetim çalışması," Yüksek Lisans Tezi, Hava Harp Okulu Komutanlığı Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2013.
- [68] Sensefly Ebee+, <https://paksoytekni.com.tr/index.php/paksoy-topcon/iha/sensefly-ebec-plus>, 23.11.2021.
- [69] A. Karkinli, A. Kesikoğlu, M. Kesikoğlu, Ü. Atasever, C. Özkan, E. Besdok, "İnsansız hava araçları ile sayısal arazi modeli üretimi," Tufuab VIII. Teknik Sempozyumu, Konya, ss. 255-259, 2015.
- [70] Pix4d support, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560189-How-to-manually-calibrate-uncalibrated-Cameras-in-the-rayCloud>, 27.11.2021.
- [71] H. B. Makineci, "Fotogrametrik amaçlı kamera kalibrasyonu yazılımlarının kullanımı üzerine bir araştırma," Türkiye Fotogrametri Dergisi, ss. 14-21, 2020.

- [72] Türkiye Cumhuriyeti Devleti, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği. Resmi Gazete p. 6961-7112, 2018.
- [73] I. Özemir, M. Uzar, “İHA İle fotogrametrik veri üretimi,” VI. UZAL-CBS Sempozyumu, 5-7, 2016.
- [74] H. B. Makineci, “İnsansız hava aracı ile fotogrametrik temelli görüntü alımı ve uçuş optimizasyonu,” Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [75] Ç. Bayık, H. Topan, M. Özendi, M. Oruç A. Cam, S. Abdikan, “Uzaktan algılama görüntülerinden konuma bağlı bilgi üretimi araştırmalarında zonguldak test alanının önemi,” 6. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu-UZAL-CBS, 2016.
- [76] Pix4d support, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-calculator>, 27.11.2021.
- [77] MicMac, <https://micmac.ensg.eu/index.php/Accueil> , 28.11.2021.
- [78] D. G. Lowe, “Distinctive Image Features from ScaleInvariant Keypoints.” International Journal of Computer Vision, 1–28, 2004.
- [79] Y. Tutak, “İha görüntülerinden elde edilen konum verilerinin ulusal ve uluslararası doğruluk kriterlerine göre incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [80] N. Polat, “3B nokta bulutlarından bina tespiti,” Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [81] F. Tekir, “İnsansız hava aracı görüntülerinden bina çatılarının üç boyutlu çıkartılması,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [82] Introduction to SIFT, <https://medium.com/data-breach/introduction-to-sift-scale-invariant-feature-transform-65d7f3a72d40>, Erişim Tarihi: 28.11.2021
- [83] E. Nissen, J. R. Arrowsmith, C. Crosby, “High resolution topography and 3d imaging introduction to structure from motion (sfm) photogrammetry,” Geological Society of America Annual Meeting Short Course, Phoenix, AZ, 2019.
- [84] R. Çömert, “İnsansız hava aracı verilerinden nesne tabanlı sınıflandırma yaklaşımı ile sığ heyelanların tespiti,” Anadolu Üniversitesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [85] K. Kraus, Photogrammetry Geometry from Images and Laser Scans. 2nd edition, Walter de Gruyter, Berlin-NewYork, 2007.
- [86] Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en, 27.11.2021.
- [87] J. P. Dandois, M. Olano, E. C. Ellis, “Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision uav estimates of forest structure,” Remote Sensing 7, 2015.
- [88] H. Eisenbeiss, M. Sauerbier, “Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications,” The Photogrammetric Record, pp. 400–421, 2011.
- [89] N. Yastıklı, “Algılama sistemlerinin doğrudan yönlendirilmesi,” HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, ss. 5-11, 2004.

- [90] H. Topan, "Ortogörüntü üretiminde yer kontrol noktası seçimi ve sonuçlara etkisi," TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 2007.
- [91] J. Skaloud, "Reliability in direct georeferencing: An overview of the current approaches and possibilities," In EuroSDR workshop EuroCOW on Calibration and Orientation, Castelldefels, Spain, 2006.
- [92] C. Ö. Yiğit, A. Torun, I. Şahin, M. Yıldız, "Gps/Imu ve yer kontrol noktasının farklı kombinasyonları ile üretilmiş ortofoto görüntülerin planimetrik doğruluklarının değerlendirilmesi," Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği VII. Teknik Sempozyumu, Trabzon 2013.
- [93] N. Tunalioğlu, A. H. Doğan, U. M. Durdağ, GPS sinyal gürültü oranı verileri ile kar kalınlığının belirlenmesi. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 6(1), ss. 1-9, 2019.
- [94] Türkiye Cumhuriyeti Devleti, Maden Kanunu, Resmi Gazete Kanun No 3213, 1985.
- [95] Madencilik faaliyetleri, https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/22_madenc-l-k-faal-yetler--20200103075114, 18.12.2021.
- [96] G. Önal, "Türkiye'nin maden kaynakları ve ekonomiye katkısı," İTÜ Vakfı Dergisi, Sayı 69, ss. 18-21, 2015.
- [97] M. Saban, "Yer üstü maden işletmelerinde dekapaj maliyetlerinin muhasebeleştirilmesi ve raporlanması," Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 12 (30) , ss. 39-61, 2016.
- [98] B. Kecec, "Madencilik faaliyetlerinde insansız hava araçlarının (İHA) kullanımı," SETSCI Conference Indexing System, pp. 174-178, 2018.
- [99] Maden sahalarının vazgeçilmezi wingraton, <https://www.sistemas.com.tr/haber?h=maden-sahalarinin-vazgecilmezi-wingtraone>, 25.12.2021.
- [100] Pix4d veri seti, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235126-Example-projects-real-photogrammetry-data>, 10.01.2022.
- [101] Pinteknik, <https://www.pinteknik.com.tr/rtk-mi-ppk-mi-hangisi-daha-guvenli/>, 10.01.2022
- [102] Pix4d support, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557799-Menu-Process-Processing-Options-2-Point-Cloud-and-Mesh-Point-Cloud>, 10.01.2022.
- [103] T. Türk, T. Öcalan, "Post processing kinematik donanımlı insansız hava araçlarından elde edilen fotogrametrik ürünlerin doğruluğunun incelenmesi," X. TUFUAB Teknik Sempozyumu, Aksaray, 2019.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. F. Gökçen, A. M. Uzar, N. Tunalıoğlu, Açık Maden İşletmelerinde İHA Fotogrametrisi İle Üretilen Ortofotoların Doğruluk Analizi, ISPEC 9. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, s. 306-307, 2020.

