



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA
KULLANILAN METRİK OLMAYAN
KAMERALARIN KALİBRASYONU**

Gülüstan KILINÇ KAZAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Gölüstan KILINÇ KAZAR tarafından hazırlanan “İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Metrik Olmayan Kameraların Kalibrasyonu” adlı tez çalışması 03/02/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK

.....

Danışman

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK

.....

Üye

Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Lutfiye KARASAKA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Gülüstan KILINÇ KAZAR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN METRİK OLMAYAN KAMERALARIN KALİBRASYONU

Gülüstan KILINÇ KAZAR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Hakan KARABÖRK

2021, 73 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK
Dr. Öğr. Üyesi Lutfiye KARASAKA**

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanımı, gelişen teknolojik imkanlarla günümüzde oldukça ilerlemiştir. Mühendislik çalışmalarında zaman, maliyet ve doğruluk kavramları çok önemlidir. İHA ile zorlu topografik şartlarda bile daha az zamanda yüksek doğruluk sağlanmaktadır. İHA ile yapılan haritacılık faaliyetlerinde doğruluğa ve maliyete etkisinden dolayı entegre kameralar çok önemli donanımlardır. İHA'lardan yüksek doğrulukta veri elde etmek için görüntü alımı işleminin gerçekleştirildiği kamera büyük önem arz etmektedir.

İHA'ya entegre olarak kullanılan dijital kameralar çoğunlukla hafif ve düşük maliyetli olan, metrik olmayan kameralardır. Metrik olmayan kameralarda distorsiyon gibi merceğe kusurları daha sık şekilde görülmektedir. Distorsiyon benzeri merceğe kusurlarının sonuç ürünlere olan etkilerini azaltabilmek için uygun bir kalibrasyon yöntemi tespit edilmeli ve entegre İHA kamerasının kalibrasyonu gerçekleştirilmelidir. Kamera kalibrasyonu ile elde edilen parametreler (odak uzaklığı, asal nokta koordinatları, radyal ve teğetsel distorsiyonlar) entegre İHA kamerası için fotogrametrik olarak yapılan çalışmalarda bir gereklilik olarak bilinmektedir. Kamera kalibrasyon yöntemleri içerisinde en çok tercih edilen kendi kendine kalibrasyon (self calibration) yöntemi olarak görülmektedir. Araştırmalarda bazen kendi kalibrasyon ağı kurularak bazen de hazır kalibrasyon ağını kullanarak sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.

Altı tane kalibrasyon test alanı ve iki tane farklı İHA kullanılan bu çalışmada kendi kendine kalibrasyon yöntemi ve yazılım kütüphanesinde bulunan kalibrasyon değerleri test edilmiştir. Oluşturulan kalibrasyon test alanlarından elde edilen kalibrasyon parametreleri kullanılarak ışın demetleri ile blok dengelemesi sonucuna göre doğruluk analizleri yapılmıştır. Devamında da kendi kendine kalibrasyon yöntemiyle farklı kalibrasyon değerleri kullanılarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Karşılaştırmalar ise arazide yapılan farklı yüksekliklerde 215 m genişliğinde 215 m uzunluğunda engebeli bir araziden üretilen 3B model üzerinden gerçekleştirilmiştir. Model üretirken arazide 43 tane Yer Kontrol Noktası (YKN) tesis edilmiş ve YKN'lerin konumları GNSS ile hızlı statik yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Görüntü alımı sonrasında 3B model üretmek üzere YKN'lerin büyük kısmı dengeleme amaçlı geri kalanları da denetleme amaçlı olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu görüntülerin değerlendirmesinde, kalibrasyon adımından kendi kendine kalibrasyon uygulaması yapılmıştır. Farklı kalibrasyon yöntemlerinin sonucunda elde edilen görüntülerin model doğruluğuna etkisini arazide belirlenen Denetleme Noktalarının (DN), Karesel Ortalama Hatası (KOH) incelenmiştir. Her iki İHA için de, kullanımda olan yönetmeliğe göre, kendi kendine kalibrasyon yönteminin kabul edilebilir doğrulukta olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Metrik olmayan kamera, Kendi kendine kalibrasyon, İHA

ABSTRACT

MS THESIS

CALIBRATION OF NONMETRIC CAMERAS USED IN UNMANED AEIRAL VEHICLE

Gülüstan KILINÇ KAZAR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Hakan KARABÖRK

2021, 73 Pages

Jury

**Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK
Asst. Prof. Dr. Üyesi Lütüfiye KARASAKA**

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has advanced today with the developing technological possibilities. The concepts of time, cost and accuracy are essential in engineering studies. With the UAV, high accuracy is achieved in less time, even in difficult topographic conditions. Integrated cameras are critical equipment due to their effect on accuracy and cost in photogrammetry activities with UAVs. The camera on which the image acquisition is performed is of great importance to obtain high accuracy data from UAVs.

The digital cameras used in integration with the UAV are mostly light and low-cost non-metric cameras. Lens deficiencies such as distortion are more common in non-metric cameras. An appropriate calibration method should be determined to reduce the effects of distortion-like lens defects on the final products, and the calibration of the integrated UAV camera should be performed. The parameters obtained by camera calibration (focal length, principal point coordinates, radial and tangential distortions) are a requirement in photogrammetric studies for an integrated UAV camera. It is seen as the most preferred method of self-calibration among camera calibration methods. In most researches, results have been obtained sometimes by establishing its calibration system and sometimes using a ready-made calibration system.

In this study, using six calibration test fields and two various UAVs, the software library's self-calibration method and calibration values were tested. Accuracy analyses were performed according to bundle block adjustment with assistance beams using calibration parameters obtained from the calibration test areas created. Subsequently, different results were obtained by using different calibration values with the self-calibration method. The comparisons were made on the 3D model produced from a rough terrain of 215 m wide and 215 m long at different heights in the field. While creating the model, 43 Ground Control Points (GCPs) were established in the area, and the locations of GCPs were determined by the fast static GNSS method. After the image acquisition, most of the GCPs were used for adjustment purposes and the rest for check-point to produce a 3D model. Also, in the evaluation of these images, a self-calibration application was made from the calibration step. The effect of the images obtained as a result of different calibration methods on the model's accuracy was investigated. For both UAVs, the self-calibration way is of acceptable accuracy, according to the laws in use.

Keywords: Non-metric camera, Self calibration, UAV

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve tez dönemi boyunca danışmanlığımı yürüten ve tüm bilgi ve birikimlerini bana destek olmak için kullanan Sayın Prof. Dr. Hakan KARABÖRK' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte yardımlarını esirgemeyen tez çalışmasında benimle beraber her türlü zorluğa katlanan Arş. Gör. Bilgehan MAKİNECİ'ye, yapılan arazi ve büro çalışmalarında destek sağlayan kıymetli hocalarımız Prof. Dr. Ekrem TUŞAT ve Arş. Gör. Fatih UYSAL hocama, iş hayatımdan anlayış ve destek olan ekip arkadaşlarıma ve akademik çalışmam için sabırla yanımda olan sevgili eşim Fatih KAZAR'a ve canım babam Adnan KILINÇ'a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Gülüstan KILINÇ KAZAR
KONYA-2021



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Kullanılan İHA'lar ve Entegre Kameralarının Özellikleri	24
3.2. Farklı Kamera Kalibrasyon Yöntemleri ve Matematik Modelleri.....	25
3.3. Kalibrasyon Test Alanları	31
3.4. Kontrol Amaçlı Arazide Oluşturulan Test Alanı	34
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	36
4.1. Kalibrasyon Test Alanlarından Elde Edilen Kamera Kalibrasyon Parametreleri 38	
4.1.1. T4 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri	38
4.1.2. T3 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri	41
4.1.3. L2 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri	44
4.1.4 L3 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri	45
4.2. Aynı Kameranın Farklı Test Alanlarında Elde Edilen Kamera Kalibrasyon Parametrelerin Kıyaslaması	47
4.3. Kontrol Amaçlı Arazide Oluşturulan Test Alanın Değerlendirilmesi	48
4.3.1. Uçuş planlaması	49
4.3.2. Yazılımda görüntülerin değerlendirilmesi	51
4.3.3. Elde edilen kalibrasyon parametrelerinin arazide kullanılması	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

m: Metre
mm: Milimetre
°: Derece
φ: Fi
λ: Lamda

Kısaltmalar

BÖHHBÜY: Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği
CCD: Charged Coupled Device
DN: Denetleme Noktası
GNSS: Global Navigation Satellite System
İHA: İnsansız Hava Aracı
KOH: Karesel Ortalama Hata
RTK: Real Time Kinematic
SYM: Sayısal Yüzey Modeli
TM: Transverse Mercator
TUREF: Turkish National Reference Frame
USGS: United States Geological Survey
YÖA: Yer Örnekleme Aralığı
YKN: Yer Kontrol Noktası
WGS84: World Geodetic System 1984
3B: 3 Boyutlu
2B: 2 Boyutlu

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin de yardımıyla gelişen ve kendini yenileyen ölçme teknikleri, İHA tabanlı ölçmenin yaygınlaşmasına ve gerekse ticari gerek akademik alanda daha sık kullanılmaya başlamasına sebep olmaktadır (Ulvi, 2015). Her geçen gün İHA teknolojisi gelişmekte bunun yanı sıra geliştiriciler talep doğrultusunda İHA donanımları ve yazılımları geliştirmeye devam etmektedir. Özellikle klasik jeodezik ölçme yöntemlerine göre düşük maliyetli olduğu için tercih edilen İHA, yersel ölçme ekipmanlarının yerini almakta ve giderek yaygınlaşmaktadır. Fotogrametrik yöntemde kullanılan en önemli donanım kameradır. Bu bağlamda kamera teknolojisi de paralel olarak gelişim göstermiştir (M Cramer, Przybilla, & Zurhorst, 2017). Özellikle de maliyeti yönünden avantajlı olan dijital kameralar tercih edilmektedir. Maliyeti yönünden avantajlı olmasına rağmen bu dijital kameralar metrik değildir. Metrik kamerada tam bir merkezsiz izdüşüm söz konusudur ve iç yöneltme parametreleri bilinir. Metrik olmayan dijital kameraların fotogrametrik değerlendirme için dezavantajı, iç yöneltme elemanlarının bilinmemesidir (Yıldız ve ark, 2005).

Metrik olmayan kameralarda kullanılan lenslerin düşük kalitede olması nedeniyle sistematik olarak geometrik hatalar meydana gelir. Metrik olmayan kameraların fotogrametrik harita üretimi için kullanılması durumunda, ortaya çıkan geometrik hataların düzeltilmesi ve iç yöneltme parametrelerinin hassas bir biçimde elde edilmesi için kamera kalibrasyonu yapılmalıdır. (Fryskowska ve ark, 2016).

Geçmişten günümüze kadar gelişen teknoloji ile değişen donanımlar üzerinden kameranın kalibrasyonu üzerine çok sayıda çalışmada, kalibrasyonun doğruluk etkileri tartışılmıştır (Remondino & Fraser, 2006); (Yanagi ve Chikatsu, 2015); (Pérez, Agüera, & Carvajal, 2011); (M Cramer et al., 2017). Kameranın kalibrasyonu üzerine bahsedilen çalışmalarda da genel olarak kendi kendine kalibrasyon (self calibration) tercih edilmiştir. Kendi kendine kalibrasyon, kalibrasyon parametrelerini belirlemek için kalibre edilmemiş bir kameradan alınan görüntülerden bulunan bilgileri kullanır (Fraser 1997). Kamera kalibrasyonu üzerine yapılan literatür taramasında da görüldüğü üzere, İHA'ya monte edilebilen birçok kamera türü bulunmakta ve bunların kalibrasyonu için kullanılan farklı algoritmalar ve kalibrasyon yöntemleri bulunmaktadır. Kendi kendine kalibrasyon yöntemi için araştırmacılar bazen kendi kalibrasyon ağını oluşturmuş ya da hazır kalibrasyon ağıları kullanmışlardır. Işın demetleri blok dengeleme temeline dayanan otomatik bir yöntem olan kendi kendine kalibrasyonun her ne kadar işleri

kolaylaştırıyor olsa da yöntemin doğruluğu ve model doğruluğuna etkisi halen incelenmektedir. Fotogrametrik yöntem ile değerlendirmede bilinmeyen değişken sayısının fazla oluşu ve kendi kendine kalibrasyon için kullanılan algoritmaların yazılıma göre değişkenlik göstermesi otomatik yöntemlerle elde edilen parametrelerin güvenilirliği nedir sorusunu ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, birçok ticari yazılımda otomatik olarak da yürütülen kalibrasyon işleminin öneminin irdelenmesi, kendi kendine kalibrasyon (Self Calibration) yönteminin doğruluğunun incelenmesi ana amaçtır. Bunun yanı sıra İHA’larda kullanılan kameralar için temin edilen varsayılan parametrelerin, farklı kalibrasyon test alanları kullanılarak yapılan kalibrasyon işleminden elde edilen parametrelere mesafeleri incelenmiştir. Kendi kendine kalibrasyon yöntemin güvenilirliği problemini incelemek ve iyileştirmek adına önceden tasarlanmış, kalibrasyon test alanları ile kameranin kalibrasyon sonuçlarını araziye uygulanmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Laboratuvarında klasik yapılan 2B ve farklı mesafelerde 3B kalibrasyon test alanlarının yanı sıra, farklı yüksekliklerde, portatif, 3B belirli bir ölçekte tasarlanan kalibrasyon test alanları arazide kamerayı kalibre etmek için kullanılmıştır. Bu test alanlarında kalibre edilen kameralar kontrol amaçlı test alanına uygulanmış ve modele etkileri incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İHA’da elde edilen sonuçların doğruluğu ve hassasiyeti gün geçtikçe artmakla birlikte, gelişen bu teknolojiye beklenen verim de aynı oranda artmaktadır. En verimli halde kullanmak için gerekli olan kamera modeli, kamera cinsi (metrik, yarı metrik), kullanılan İHA’nın fiziksel özelliklerin iyi seçilmesi ve genelde göz ardı edilmekle beraber kamera kalibrasyon parametrelerinin dikkatli biçimde elde edilmesi gereklidir. Kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi konusu, kullanılan yazılımın kalibrasyona etkisi, seçilen kamera türünün kalibrasyona etkisi, uygulanan kalibrasyon metodunun kalibrasyona etkisi, uçuş planlamasının kalibrasyona etkisi, tesis edilen YKN sayısının ve doğruluğunun kalibrasyona etkisi, çok geniş bir literatür tarafından irdelenmektedir. Bu konuda yapılan birçok araştırmadan birkaçına bu bölümde yer verilmiştir.

Sabit kanatlı İHA’nın kullanıldığı örnek bir çalışmada, gelişen teknolojinin getirisi olan çift frekanslı RTK alıcısı ile donatılmış İHA kullanılarak 4 değişkenli bir deney yapılmıştır. Bu deney süresince engebeli ve düz iki çalışma alanında İHA üzerine gömülü RTK alıcısı verileri kullanılarak ve ihmal edilerek sonuç ürünler elde edilmiş, ayrıca uçuş planları da çapraz uçuşlar eklenerek çeşitlendirilmiştir. Bu çalışma tüm bu konfigürasyonların kullanıldığı durumların kendi kendine kalibrasyon üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuç olarak daha hassas YKN tesisine önemine değinilmiştir. Kendi kendine kalibrasyonun model üzerindeki etkisi aynı kamera yazılım uygulamasından net analiz edilememiş olsa da ikinci test alanının arazi yapısının biraz daha düz olmasından kaynaklı asal nokta koordinatları ve odak uzaklık değerleri biraz daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Gerke & Przybilla, 2016).

İHA doğruluğunu artırmak için sabit kanatlı bir İHA sisteminde kullanılmış olan RTK özellikli çift frekanslı bir GNSS sistemi kullanıldığı bir diğer çalışmada uçuş planı (normal uçuş ve çapraz uçuş), kontrol noktaları, RTK-GNSS kullanılarak ölçülen ölçümleri de içermiştir. Gerke & Przybilla, 2016 çalışması ile aynı şekilde farklı yaklaşımların ve yapılandırmaların blok dengeleme kalitesini artırmaya yardımcı olduğunu ve aynı zamanda YKN’lerin sayısını azaltmaya izin verdiğini analiz etmişlerdir. Fakat birden çok yazılımın (Agisoft Photoscan ve Pix4Dmapper) farklı yaklaşımların ve yapılandırmaların uygulanması kendi kendine kalibrasyonun net analiz edilmesine katkı sağlayabilmiştir. Çalışmada kullanılan iki alandan birincisi bir engebeli

depolama alanı, ikinci arazi düz bir endüstri müzesidir. İki test alanında da %85 ileri ve %65 yan bindirme kullanılmış, ilk alan için 105 m yükseklikten 1900 görüntü ikinci test alanı için 75 ve 105 m yükseklikten 700 görüntü alınmıştır. Bu iki test alanında değişen parametreler; uçuş planı (düz ve çapraz), kontrol noktalarının sayısı ve dağılımı, RTK-GNSS ile ölçümün blok doğruluğuna etkisi ve parametre değiştirilerek blok dengeleme sonuçları üzerindeki etkileri açıklanmıştır. İlk olarak uçuş planı ve kontrol noktası düzenlemelerin bloğun doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Kontrol noktalarının azaltılması halinde doğruluk kaybı gözlemlenmiştir. Arazi seçiminin etkileri bazı farklılıklar ortaya çıkarmış ayrıca karesel ortalama hatalarına bakıldığında Pix4D yazılımı daha iyi bir doğruluk sağlamıştır. İkinci olarak RTK ölçümlerin bloğun doğruluğuna etkisini Agisoft yazılımı ile çapraz ve normal uçuş, RTK'lı ve RTK'sız yer kontrol noktalı ve kontrol noktasız sonuçları incelenmiştir. Bu aşamada YKN'li YKN'siz blok dengelemesi ile kendi kendine kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. İki İHA görüntü uçuşunda çapraz uçuşun, doğrulukta artış sağladığı ve aynı zamanda asgari kontrol noktası sayısını azalttığı gösterilmiştir. RTK-GNSS ile dış yöneltme parametreleri ölçülen konum parametreleri, blokta kalite artışı sağlamıştır. Aynı şekilde yer kontrol noktasının azalması durumunda bile RTK uygulaması ile daha doğru sonuçlar elde edilmiştir (Przybilla, Reuber, Baumker, & Gerke, 2015).

Kendi kendine kalibrasyonun doğruluğuna temel etkisi olan, kullanılan ve gelişmeye devam eden, maliyet yönünden sık tercih edilen dijital CCD sensörlü kameraların kendi kendine kalibrasyon kalitesinin tartışıldığı bir çalışmada dijital kamera kalibrasyonu için kalibrasyon kağıdı geometrisinin ne kadar iyi olması gerektiği konusuna değinilmiştir. Buna ek olarak, kendi kendine kalibrasyonun matematiksel denklemi kısaca incelenmiştir. İlk araştırmada kendi kendine kalibrasyonun matematik denkleminde yer alan radyal ve teğetsel distorsiyonun en çok olduğu mesafenin odak uzaklığının yaklaşık 15 katından daha yakın cisim mesafelerinde belirgin olduğunu belirlenmiştir ve geniş formatlı bir film kamerasında 240 mm odak uzaklığına sahip bir lens için, 3.6 m'den daha yakın cisim mesafeleri gerektiren birçok yakın mesafe uygulamasında problem teşkil eden bir durum olduğu belirtilmiştir. CCD kameralarda ise farklı bir durumun söz konusu olduğu tartışılmıştır. Odak uzaklığı 10 mm veya 20 mm olan distorsiyon varyasyonunun etkilerinin bir mercek için, önemli bir metrik problem oluşturmaması gereken cisim mesafelerinin 15 cm ila 30 cm olması gerektiği varsayılmıştır. Bu varsayımı test etmek için, 1.5 m, 2.3 m, 3 m ve 4.6 m cisim mesafelerinde Kodak DCS420 fotoğraf makinesine takılan 20 mm'lik bir Nikon lensin

distorsiyon değişimi incelenmiştir. Her mesafe ayarı arasında radyal distorsiyon da kesinlikle tutarlı bir değişiklik görülmüş, 20 mm lensin çalışma formatının büyük bir kısmı için, 3 m cisim mesafesi aralığında distorsiyondaki değişim 0.1 m veya daha az olduğu belirlenmiştir. Fakat 15 mm odak uzunluğuna sahip daha geniş açılı bir lens için, iki radyal distorsiyon belirlemesindeki değişimin daha yüksek olduğu test edilmiştir. Kendi kendine kalibrasyonun formülasyonun incelenmesinde, distorsiyon parametreleri p_1 ve p_2 ile asal noktalar x_0 ve y_0 arasında güçlü bir projektif bağlantı olduğu söylenmiş ve 0.98'e kadar olan korelasyon katsayısı değerleriyle sıkça karşılaşılmıştır. Bu korelasyonun kendi kendine kalibrasyonda önemli ölçüde bozucu etkilerin ana noktadaki bir kayma (ve optik eksenin etkili bir eğimi) ile telafi edilebileceği anlamına gelmiştir. Kararlı bir iç yöneltme parametreleri verildiğini ve p_1 , p_2 ve x_0 ve y_0 arasındaki yüksek düzeyde projektif bağlantıya rağmen, kendi kendine kalibrasyon yoluyla distorsiyonun azaltılması için çok tekrarlanabilir sonuçlar elde edilebileceğini göstermişlerdir. Bu nedenle, büyük odak uzunluğuna sahip dar açılı lensler, düzlem dışı görüntü deformasyonundan kısa odak uzunluklu, geniş açılı lenslere göre çok daha az etkilenmiştir.

Dijital kamera üzerine yapılan diğer bir çalışmada, odak düzlemindeki düzensizliği telafi etmeye çalışırken, yüzey topografyasını doğrudan ölçmek ve düzeltmeler uygulamak için gerçekten tatmin edici bir alternatif olmadığını öne sürmüşler ve bir DCS420 CCD sensörün odak düzlüğünü belirleme girişiminde Kodak şirketinden iki adet 14 mm x 9 mm KAF-1600 yongası almışlardır. Bu iki yonganın yüzey topoğrafyası daha sonra Avustralya Ulusal Ölçüm Laboratuvarı Melbourne Şubesi'nde hem düzlük interferometresi hem de Wyko faz kaydırmalı interferometre kullanılarak ölçülmüştür. Laboratuvar tarafından CCD çipinin optik olarak bir kırınım yansıtma ızgarası olarak işlev gördüğü, yalnızca speküler yansımalar değil, aynı zamanda geliş açısı dışındaki açılarda daha yüksek dereceli yansımalar sağladığı bulunmuştur. Ayrıca kendi kendine kalibrasyon yaklaşımının faydalarından birinin de basit olması olduğunu dile getirmişlerdir (Fraser, 1997).

İHA üzerine monte edilen bir bileşenle standartlaşan iş akışına uygun maksimum kalkış ağırlığı 5 kg' dan az olma dezavantajına uyularak ve yüksek doğruluk GNSS/IMU bilgilerine sahip, uzaktan kumandalı uçak sistemi için kamera bileşeni olarak Macs-Micro' nun değerlendirmesi yapılmıştır. Monte edilen kamera uçuş öncesi ve sonrası Berlin Uygulamalı Bilimler Üniversitesi' nde bulunan kodlu işaretçileri olan bir 3B kalibrasyon alanı kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu 3B test alanında, görüntü

elde etme kalibrasyon alanına göre farklı mesafelerde, başlangıç noktalarında ve yükseklik seviyelerinde dokuz farklı yerde yapılmıştır. Her bir konumda görüş hattı eksenini etrafında 4 farklı açıda (0 °, 90 °, 180 ° ve 270 °) 4 görüntü kaydedilmiştir. İç yöneltme ve dış yöneltme parametreleri bir blok dengelemesi sırasında hesaplanmıştır. Radyal distorsiyon bozulma parametrelerinde değişiklik gözlenmemiştir. Uçuş sonrası kalibrasyonun sonuçları, asal nokta değeri x_0 için 0.15 piksel ve kalibre edilmiş odak uzunluğu için 0.02 piksel olarak farklılık göstermiştir. Ek olarak sensörün elde ettiği görüntünün yansımından oluşan hataları gidermek için kendi kendine kalibrasyona ilave radyometrik kalibrasyon yapılmıştır. Kameranin sensör ve parametrelerinin kalibrasyonundan sonra 2015 Ekim ayında Berlin-Adlershof'ta ki Alman Havacılık ve Uzay Merkezi kampüsünde 12m yükseklikteki bir binaya 39 tane (80m x 70m bir alanda zeminde 19 YKN, duvarda 20 YKN) YKN tesis edilmiştir. Tüm YKN'leri jeodezik cihazlarla çok hassas bir şekilde ölçülmüş ve YKN'lerin standart sapması 3 mm olarak elde edilmiştir. Bilinen iç yöneltme parametreleri, sonradan işlenmiş navigasyon verileri ve geleneksel bir fotogrametrik yazılım (Trimble Match AT) kullanılmış ve 155 adet görüntü ile işlem yapılmıştır. Nokta karşılıkları En Küçük Kareler Eşleştirme algoritması ile belirlenmiştir. 7 kontrol noktası ve 32 YKN ile yaklaşık XY yönünde 0.8 piksel, Z yönünde 0.4 piksel doğruluk elde edilmiştir. YKN'siz olarak 39 kontrol noktasında da XY yönünde 0.9 piksel, Z yönünde 1.2 piksel doğruluk elde edilmiştir. Endüstriyel sınıf bir kamerayı yüksek kaliteli Çift frekanslı GNSS alıcısı ve endüstriyel sınıf bir MEMS-IMU ile birleştirme yaklaşımını doğrulamıştır. Uygulanan iş akışı, yaygın kamera sistemleriyle aynı olduğu ifade edilerek ve MACS-Micro'nun bu prototipini İHA fotogrametrisine uygulanabileceğinin yorumlamışlardır(Kraft, Geßner, Meißner, Przybilla, & Gerke, 2016).

Kamera seçiminin önemini anlatan birçok çalışma yapılmıştır ve örnek bir çalışmada da kamera sistemlerinin seçimi ve bu seçimde dikkat edilmesi gereken kriterler incelenmiştir. Sıklıkla kullanılan ticari kameraları arasındaki genel farklılıklar irdelenmiş ve doğruluk değerlendirmesi için kameralar sınıflara ayrılarak farklı sınıflardan iki farklı kamera test edilmiştir. Tercih edilebilecek fotogrametrik kameralarda olması gerekenlere değinilmiştir. Kompakt kameralar sistem kameralara nazaran aynasız olması nedeniyle daha hafif ve mekanik olarak daha ucuzdur, bu nedenle İHA'larda sık tercih edildiği belirtilmiştir. Test olarak Canon'un geleneksel kompakt fotoğraf makinesi ile Ricoh'un Zeiss optik sistemli bir sistem kamerası karşılaştırılmıştır. Her iki kamera sistemi de farklı test alanları kullanılarak uzun bir süre

boyunca birkaç kez kalibre edilmiştir. Tüm kalibrasyonlar 2B test alanları kullanılarak yapılmış, Ricoh/Zeiss için ilave bir 3B kalibrasyon test alanı kullanılmıştır. Tüm kalibrasyonlar 8 bakış açısına göre gerçekleştirilmiştir. Australis yazılımın da kendi kendine kalibrasyon yönteminde Brown'un fiziksel parametre modeli kullanılmıştır. Ricoh/ Zeiss kamerasının daha yüksek cisim alanı doğruluğu sağladığını göstermiştir. Canon için 0.1 piksel Ricoh/zeiss için 0.05 pikselin altında doğrulukla daha iyi sonuç vermiştir. Yapılan kalibrasyon sonrası 1000 m x 400 m dik bir arazi tanımlanmıştır. %80 yana %70 ileri iki şerit şeklin de Canon ile Mart 2012 Ricoh/Zeiss kamera ile Ağustos 2012 uçuş gerçekleştirilmiş ve Trimble'in inpho / Match AT yazılımı kullanılmıştır. Havai dengelemede ek parametrelerin rolü de her iki görüntü ilişkilendirmesi için de incelenmiştir. Match AT'de uygulanan Ebner (12 parametre) ve Grün'den (44 parametre) polinom modelleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, basit kameralar bile fotogrametrik uygulamalarda başarıyla kullanılabilir ancak hepsinden önemlisi iyi optik kalitenin yanı sıra kamera seçimi ve ek olarak mekanik ve yazılım entegrasyonunun dikkate alınmasının önemli olduğu belirtilmiştir (Michael Cramer & Leinss, 2016).

İHA uygulamalarında kullanılan kameralar hakkında genel bir bakış 2017'deki bir çalışmada da irdelenmiştir. Dokuz farklı kamera sistemi iki farklı kamera kalibrasyon yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bir laboratuvar da kalibrasyon için 3B tanımlanmış test alanlarında, kalibrasyon, Aicon 3D-Studio yazılımı kullanılarak ışın demetleri ile blok dengelemesinin bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir. Diğer bir kalibrasyon yönteminde de arazide 3B test alanı kalibrasyonunda farklı bir ağ konfigürasyon oluşturulmuştur. Bu test alanında endüstriyel bir müzeye dönüştürülmüş eski bir taş kömürü tesisi kullanılmıştır. Laboratuvar da yapılan kalibrasyonda DJI kamera için iki farklı görüntü formatında değerlendirilmiştir. Dosya formatının değişmesinin etkisi incelenmiş ve en iyi sonuçları laboratuvar da Sigma DP1 kamera ve DJI kamerasının TIF formatı göstermiştir. Arazide yapılan kalibrasyonunda DJI Phantom 3 Inspire sisteminden çok daha istikrarlı bir performans göstermiştir. Kalibrasyonun araziden önce laboratuvar da yapılmasının gerek olmadığı belirtilmiştir. DJI kamera da sıkıştırılmış görüntü formatının kalibrasyonda kullanılması tavsiye edilmiştir. Farklı olarak kendi kendine kalibrasyonla arazide yapılan kalibrasyon blok geometrisinin yani oluşturulan konfigürasyonun önemine değinilmiştir (M Cramer et al., 2017).

Maliyet yönünden hesaplı olmasından ötürü İHA için çok tercih edilen metrik olmayan kameraların kalibrasyonu üzerine de birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan

birinde metrik olmayan kamera iki farklı kalibrasyon alanında kalibre edilmiştir. İlk kalibrasyon "YKN tabanlı" olarak adlandırılır ve ticari yazılımla işlenen coğrafi referanslı verilere dayandırılmış ve ikinci kalibrasyon standart "Dama tahtası tabanlı" olarak belirlenmiştir. İki farklı kamera kalibrasyonuna dayalı olarak iç yöneltme parametrelerini 3B model üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir. Kamera olarak Canon EOS Rebel T3 kullanılmış olup matematiksel model olarak kendiliğinden kalibrasyonun temeline dayanan eş doğrusallık denklemi kullanılmıştır. Geleneksel matematik modeli uygulamak için Pix4D, PhotoScan, OpenCV ve Agisoft Lens'ten türetilen iç yöneltme parametrelerini mm cinsinden odak uzaklığı ile kalibrasyondan elde edilen bozulma katsayıları arasındaki doğrudan korelasyona göre İç yöneltme parametrelerinin dönüşümü kullanılmıştır (H Hastedt & T Luhmann, 2015; H Hastedt & T Luhmann, 2015). YKN tabanlı kamera kalibrasyonu Campinas Üniversitesi'nde (22.8184°S, 47.0647° W) gerçekleştirilmiştir. 12 görüntü, 33 yer kontrol noktası ve 14 kontrol noktası ile sonuçlanmış ve duvardaki YKN basılı hedeflerin yerel koordinatları bir total station kullanılarak elde edilmiştir. Blok dengelemesi yöntemini yani hem görüntüleri hem de YKN işlemek için Pix4D ve PhotoScan kullanılmıştır. Dama tahtası test alanı ile yapılan kalibrasyondan 17 görüntü alınmış, parametre kıyaslamaları yanı sıra Karesel Ortalama Hata ile ilgili sonuçlar hem YKN tabanlı kalibrasyonda hem de dama tahtası tabanlı kalibrasyonda Agisoft yazılımı ile iyi sonuçlar alınmıştır. Bu deneylerde kabul edilebilir doğruluğun yanı sıra Agisoft Lens'in, kamera kalibrasyonu için daha hızlı çözüm olduğu belirtilmiştir (Yodono Garcia, Cândido de Oliveira, Fernandes, & Cortijo Costa, 2020). Yine metrik olmayan kameralar üzerine farklı kalibrasyon test alanında DJI 4 pro, Nikon SLR D60 ve iPad mini 4 kameralar gibi fotogrametrik amaçlar için kullanılabilen kameraların performansı değerlendirilmiştir. Kalibrasyon bir laboratuvarında kendi kendine kalibrasyon yöntemi ile Photomodeller yazılımında yapılmıştır. Yazılımın basılı kalibrasyon kâğıdı kullanılmıştır. 8 görüntü alınmış ve 0° yatay ve 90 derece dikey konumda görüntü elde edilmiştir. Görüntü işlemeden sonra iç yöneltme parametreleri elde edilmiştir. Veriler, cisimden 100 cm yükseklikte ve 30 cm mesafedeki kamera konumlarına göre üç kez elde edilmiştir. DJI 4 pro ve iPad kameralarının 0.15 ile 0.25 arasında bir karesel ortalama hata elde edilmiş, Nikon SLR D60 kameranın ise 0.05 piksel ile 0.1 piksel arasında bir karesel ortalama hata kaydettiğini göstermiştir. Nikon SLR D60, DJI 4 Pro ve iPad kameralarına kıyasla daha iyi olduğunu ispatlamış ve test edilen metrik olmayan kameraların fotogrametrik amaçlar için kabul edilebilir olduğu varsayılmıştır (Abdullah, Tahar, Rashid, Osoman,

& Technology, 2019) . Kameranın kalibrasyonu için kendi kalibrasyon ağırlarını oluşturma üzerine yapılan bir çalışmada da, kameranın kalibrasyonu için yapılan bir taşınabilir çerçeve 2 farklı çalışmada kullanılmıştır. Farklı cisim mesafelerinin kalibrasyonun kamera parametrelerine etkisi, farklı kamera kalibrasyon alanların kamera parametreleri üzerine etkisi ve İHA' nın farklı yüksekliklerdeki uçuşunun kamera kalibrasyonuna etkisi incelenmiştir. Metrik olmayan kamera Sony Nex 6 laboratuvarında ve Malezya Teknik Üniversitesi futbol sahasında 400 mm x 400 mm boyutunda siyah ahşap panel 36 adet beyaz yuvarlak hedefler, yuvarlak çapları kamera mesafesine göre belirlenmiştir. 15 m, 25 m, 55 m ve 1.4 m kamera mesafesi kullanılmış ve 8 görüntü alınmıştır. Laboratuvarında da 1.5 m x 1 m taşınabilir kalibrasyon çerçevesi kullanılmıştır. Kamera ve görüntü yakalama tekniği 15, 25 ve 55 metrelik kamera mesafe kalmış ve uzun mesafelerde İHA kamera mesafe kalibrasyonunu karşılaştırmak için 1.4 m kullanılmıştır. Kalibrasyon için Australis yazılım kullanılmıştır. Her kamera mesafesinde farklı iç yöneltme parametreleri elde edildiği belirtilmiştir. 1.4, 15, 25 ve 55 metrelik kamera mesafe kalibrasyonun da aynı eğilime sahip parametre grubu gözlemlenmiş ve 5 gözlemden çıkarımlar yapılmış her kamera mesafesinde asal noktalar ve radyal bozulma katsayılarından k_1 ve k_3 parametreleri başlangıçta ortalama değerleri düşürmüş ve daha sonra 55 m kamera mesafesi kalibrasyonunda tekrar yükseltmiştir. k_2 ve p_1 parametresi için, ortalama değerler başlangıçta ortalama değerleri artırmış ve daha yüksek kamera mesafesi kalibrasyonunda tekrar azaltmıştır. p_2 ve b_1 gibi diğer iki parametre, değerini diğerlerine göre benzersiz bir değişim sergilendiği yorumlanmıştır. Kamera mesafesinin kalibre etmek ve ölçüm doğruluğunu araştırmak için başka bir araştırmada görüntü haritalama doğruluğu değerlendirmesi için farklı kamera mesafelerinde kalibrasyon parametrelerini kullanmışlardır. 1.5 m kamera mesafesi laboratuvarında ve 15 ve 25 m kamera mesafesi arazide kalibrasyonu aynı kamera ve yazılımla yani; Sony NEX6 dijital kamera kullanılarak değerlendirilmiştir. Doğruluk değerlendirmesini yapmak için Australis yazılımında ışın demetleri ile blok dengelemesi ile kendi kendine kalibrasyon uygulanmıştır. 1.5 metre kamera mesafesinde kullanılan portatif bir kamera kalibrasyon çerçevesi piksel boyutuna göre hedef işaretleri belirlenmiştir. 15 ve 25 metre kamera mesafesine yönelik kamera kalibrasyonu, taşınabilir özel bir siyah-beyaz düz ahşap hedef kullanılarak yapılmıştır. Bu hedefler her kamera mesafesi için 36 tane kullanmak üzere, Malezya Teknik Üniversitesi'nin 2500 metre karelik düz alanlı bir futbol sahasında arazi kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Her kamera mesafesine beş gözlem kurulmuştur. Görüntü

haritalama doğruluğu ile kullanılan kamera parametreleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. 25 metre kamera mesafesindeki kamera parametresi, 25 metre mesafenin görüntü eşleme için en iyi ve ortalama doğruluk için en uygun mesafe olduğu gösterilmiştir. 1.5 metre kamera mesafesindeki kamera parametresi, yalnızca 15 metrelik görüntü eşlemesi için en iyi ortalama doğruluğa neden olduğu görülmüştür. Haritalamada daha iyi doğruluk elde etmek için birkaç kamera mesafesindeki kamera kalibrasyonu önemine değinilmiştir (A. Yusoff, 2015; A. R. Yusoff, Ariff, Idris, Majid, & Chong, 2017).

Bir arazi ve laboratuvar kalibrasyon karşılaştırılmasında da, laboratuvar kalibrasyonu işlemi bir kalibrasyon ızgarası kullanılarak tamamen otomatik yapılmıştır. Arazi testi için düz bir yüzey ve 67 hedef nokta belirlenmiştir. Kalibrasyon alanı yaklaşık olarak 25 x 25 m ve zeminden ortalama rakımın 50 m olduğu bir arazi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan İHA, Microdrones tarafından modellenmiş md4-200'dür. Microdrone ayrıca standart bir dijital metrik olmayan kamera olan Pentax Optio A40 kamera ile donatılmıştır. Kalibrasyonu gerçekleştirmek için her iki durumda da Photomodeler Scanner yazılımı kullanılmıştır. Her iki çalışmada da arazi kalibrasyonundan elde edilen iç yöneltme parametrelerinin standart hataları ve piksel değerlerine göre arazi kalibrasyonu daha iyi sonuç göstermiştir. Laboratuvarda yapılan kalibrasyon 1.940 piksel hata ile tamamlanmıştır. Arazide yapılan kalibrasyon ise, 0.282 piksel hata ile daha iyi sonuçlandırılmıştır (Pérez, Agüera, & Carvajal, 2011).

Kamera mesafeleri ve farklı yüksekliklerin kamera kalibrasyonu için önemini ele alan çalışmalar vardır. İHA'nın farklı yüksekliklerde uçuşmasının kamera kalibrasyonuna etkisi üzerine, Canon Power Shot SX230 HS marka metrik olmayan yüksek çözünürlüklü bir dijital kamera farklı yüksekliklerde 80 m, 100 m ve 120 m'de kullanılmıştır. 80 m yükseklikte kamera konfigürasyon kurulumunu kullanan kamera kalibrasyonunun sonuçları, odak uzaklığı ve asal nokta koordinatları en düşük ve en iyi standart sapma değerlerini göstermiştir. Diğer 100 m ve 120 m de standart sapma değerleri birbirine yakındır. Benzer şekilde farklı bir çalışmada da Konya ili Meram ilçesinde yapılmıştır. 10 adet yer kontrol noktası kullanılmıştır. Kontrol noktaları çalışma alanını homojen olarak kapsayacak şekilde tesis edilmiştir. Canon EOS 550D, Canon A810 Dijital Kamera, Pentax Optio RZ18 farklı dijital kameralar araziden 25m, 50m, 75m ve 100m yüksekliklerinde çalışma alanında görüntü alım işlemi İHA ile yapılmıştır. Farklı yüksekliklerde PM(PhotoModeller) yazılımında yapılan dengeleme işlemi sonuçlarında karesel ortalama hatanın piksel değerleri bulunmuş ve bu değerler piksel değerlerinin arazideki karşılık değerleri ile çarpılarak farklı yüksekliklerdeki

kareesel ortalama hatalar bulunmuştur. Görüldüğü üzere üç kamera çeşidi için ve iki çalışmada da yapılan yükseklik analizinde, fotogrametrik değerlendirme için farklı yüksekliklerde alınan görüntülerde, yükseklik arttıkça hassasiyet azalmıştır (Hamid & Ahmad, 2014); (Ulvi, 2015). Maliyeti yönüyle sık tercih edilen dijital kameraların farklı kalibrasyon yöntemleriyle veya farklı sahalardan elde edilen veriler ile yapılan kendi kendine kalibrasyon işleminden elde edilen parametreler iyi uyumu halen incelenmektedir. Bunlara benzer başka bir çalışmada da küçük ve orta formatlı dijital kameraların kendi kendine kalibrasyonu üzerine Australis yazılımında ışın demetleri ile blok dengelemesi yöntemi ile farklı iki test alanındaki kalibrasyon sonuçları kıyaslanmıştır. Kalibrasyonun belirlenmesinde doğrusallık denklemlerini kullanan ücretsiz bir ağ çözümü kullanılmıştır. Test alanları hakkında söylenenler, kendi kendine kalibrasyon ve ışın demetler ile blok dengelemesi için alüminyum bir kafesin üzerine yerleştirilmiş kodlanmış hedefler kullanılmıştır. İkinci bir yöntemde, küçük bir sert kutuya yapıştırılan kodlanmış hedeflerin küçültülmüş bir versiyonu kullanılmıştır. Her iki yöntem de farklı kamera konumlarından ve yönlerinden hedeflerin görüntüleri alınmıştır. Işın demetleri ile blok dengelemesi problemine çözüm, Australis yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Her iki yöntemden elde edilen çözümlerin kamera kalibrasyon parametrelerinin birbirine yakın olduğu gösterilmiştir (Moe, Sampath, Christopherson, & Benson, 2010).

Dijital kameraların kalibrasyonu üzerine yapılan başka bir çalışmada ise yine iki farklı test alanı kullanılmıştır. Farklı yazılımlar kullanarak kamera kalibrasyonlarının sonuçları özetlenmiştir. Bir Leica Digilux 1 ile elde edilen bir 3B test alanı ve 10 görüntü 1120 x 840 piksel görüntü çözünürlüğünde dijital kamera ile odak uzaklığı sabit, 90 derece açıda görüntüler alınmış ve test alanının da PhotoModeler, Australis, SGAP (IGP-ETHZ) yazılımları ile kendi kendine kalibrasyon sürecinde ışın demetleri ile blok dengelemesi ile kareesel ortalama hata değerleri verilmiştir. DLT, Tsai, Heikkilä yazılımlarından da kareesel ortalama hatalar elde edilmiştir. Diğer test alanı içinde 2B dama kalibrasyon test alanı kullanılmıştır. Bu test için kendi kendine kalibrasyon tekrar kullanılarak araştırma tekrarlanmıştır. Aynı yazılımlarla uygulanmıştır. Elde edilen kamera parametreleri oldukça benzer olduğu görülmüştür. Australis ve SGAP' ta yazılımlarından elde edilen KOH mikron değerleri diğer yazılımlara göre daha iyidir. Birinci test alanında elde edilen Australis yazılımından asal nokta koordinatları kareesel ortalama hatası ikinci test alanına kıyasla biraz daha iyi bir sonuç vermektedir (Remondino & Fraser, 2006).

İHA'lara günümüzde devam eden yenilikler eklenmekte ve tercih edilmektedir. Bu talep yersel fotogrametri yanında hava fotogrametrisi alanında da kolaylık olarak tercih edilen İHA'nın araştırılması konusunda da motivasyon sağlamaktadır. Bu durumda standart yazılımlar, kameralar veya hazır ağ kalibrasyonlar yerine yeni İHA uygulamaları için yeni yöntemler incelenmeye devam edilmiştir. Maliyet baz alınarak metrik olmayan dijital kamera bulunduran, DJI Phantom 2 Vision Plus mikro İHA'da iki aşamalı yeni bir süreç sunulmuş ve sonuçlar standart tek adımlı kamera kalibrasyon prosedürüyle karşılaştırılmıştır. İki aşamalı süreç, başlangıçta tüm görüntülerde distorsiyonu kaldırmayı içerir ve daha sonra bu görüntüleri foto-regülasyonda kendi kendini kalibrasyon ile kullanmıştır. Kolinearite (doğrusallık) koşulu denklemi matematik modeli tanımlanmıştır. Kendi kendine kalibrasyon ve İki adımlı kalibrasyon yöntemleri uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır ve önerilen iki adımlı kalibrasyonun mikro İHA için daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Burada geliştirilen kamera kalibrasyon yöntemi ile elde edilen iç yönelme parametrelerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Mikro İHA üzerine keşfedilen bu yeni yöntemden sonra küçük İHA kameralarının kalibrasyonunda yeni bir yöntem önerilmiştir (Gašparović & Gajski, 2016).

Buna benzer bir konuda da, Japonya' da dijital kameralardan farklı olarak mobil kameralar kullanılmıştır. Araştırmacılar, bir mobil kamera kullanılarak ölçülen sensör değerlerini değerlendirmek için bir test hedefi kullanarak kamera kalibrasyonu gerçekleştirmiştir. SONY marka bir dijital kamera ile Xperia Z Android mobil kamera test edilmiştir. 13 tane kontrol noktası kullanılarak ışın demetleri ile blok dengelemesi yöntemi kullanılarak kamera kalibrasyonu yapılmıştır. Kamera kalibrasyonundan sonra kontrol noktaları için KOH değerleri hesaplanarak doğruluk belirlenmiştir. Görüntüleri kullanarak kamera kalibrasyon tekniklerini ve İHA'lar için mobil cihazdan gelen sensör değerlerinin dönüklük parametresini değerlendirmiştir. Dijital kamera ile yapılan normal kamera kalibrasyonu, Android cihazın sensör değerini kullanarak yapılan kalibrasyonla aynı sonucu vermiştir. Android cihazın görüntü ve sensör değerlerinin kullanıldığı deneyde, standart sapmadan daha büyük bir KOH elde edilmiştir. Bu sonuç, tüketici sınıfı dijital kamera kullanılarak elde edilen sonucun farklı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, araştırmacılar, ortaya çıkan büyük KOH'un kullanılan kamera kalibrasyon tekniğinden kaynaklandığına inanmaktadır. Çünkü aynı hata normal kamera kalibrasyonunda da elde edilmiştir. Bu nedenle, bir Android cihazın sensör

değeri, ölçüm doğruluğunda büyük bir fark görülmediğinden bir İHA’da da kullanılabileceği göstermiştir (Takahashi & Chikatsu, 2015).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanıcılar için büyük kolaylık sağlayan İHA, zorlu ve yüksek maliyetli alanlarda avantajlarından ötürü çok fazla tercih edilmekte ve bu talep teknolojik gelişmeleri tetiklemektedir. Gelişen İHA teknolojisi ile üretim maliyetinin düştüğü bilinmektedir. Fakat sonuç ürünün konumsal doğruluk kriteri çok göz önüne alınmamaktadır. Bu duruma rağmen gelişmekte olan yazılım ve donanımlar mühendislik alanına hızla dahil olmaya devam etmektedir. Buna karşın seçilen araç ve/veya donanımdan yersel ölçmenin mümkün olamadığı, zorlu topoğrafyaya sahip alanlarda hassas konum doğruluğu ve yüksek çözünürlük beklenmektedir (A. Yusoff, 2015). Doğru görüntü geometrisi, uygun iş akışı, YKN tesisi ve iyi bir yazılım seçiminin yanında ilk olarak elde edilen görüntünün temelini oluşturan kamera sisteminin seçiminin önemi büyüktür. Kamera seçimi, yüksek çözünürlük ve iyi bir konum doğruluğu için oldukça önemlidir. Bu konu çok geniş bir literatüre ve teknolojiye sahip olmakla birlikte kameralar maliyet yönünden ele alındığında görüntü geometrisinin temelini oluşturan iç yöneltme parametrelerinin hassas bir şekilde hesaplandığı metrik kameralar çok tercih edilememektedir. Düşük maliyetli dijital kameralarla yüksek hassasiyetli haritalamalar, kamera kalibrasyonu gerektirir.(Weng, Cohen, & Herniou, 1992; A. Yusoff, 2015). Metrik kameraların maliyet yönünden zor ulaşılabilirliği, teknik kullanıcıyı metrik olmayan dijital kameralara yönlendirmektedir. Bu kameraların merceğinin distorsiyon parametreleri de dahil olmak üzere kameraların iç yöneltme değerlerinin belirlenmesi için kameranın kalibrasyonunun yapılması oldukça önemlidir (Fryskowska ve ark. 2016). Kameranın kalibrasyonu önceden kalibrasyon değerleri kullanılarak veya kendi kendine kalibrasyon yöntemi ile yapılabilir. En popüler yöntem, 1970 yılında yakın fotogrametri literatürüne giren ışın demetleri ile blok dengelemesi ile gerçekleştirilen kendi kendine kalibrasyondur (Fraser, 1997). Kullanılan bu kameralar sınırlı kalitede olduğundan kamera kalibrasyonunu otomatikleştiren hassas bir kendi kendine kalibrasyon gerekmektedir. Bu alanda birçok yaklaşım ve yorum vardır.

Yapılan literatür çalışmasında kameranın kalibrasyonu için ele alınan ve değerlendirilen farklı kameraların ve farklı yazılımların test edilmesi, kalibrasyonun otomatik olarak yapılmasının yanında önceden kalibre edilen kameranın test edilmesi ve kamera kalibrasyonu için standart yazılımların sağladığı kalibrasyon test alanları dışında hem 2B hem de 3B oluşturulan kamera test alanları ve bunların hepsinin modele ve

kalibrasyon parametrelerine etkisi üzerine çalışıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında farklı iki İHA, DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi/4K kullanılmıştır. Bunlara entegre metrik olmayan dijital kameraların kalibrasyonu için arazi ve laboratuvarında farklı malzeme ve konfigürasyonda 2B ve 3B oluşturulan, koordinatları bilinen bazı hedef noktalar kullanılarak bir kalibrasyon test alanı oluşturulmuştur. Oluşturulan kalibrasyon test alanlarının her iki İHA kullanılarak görüntüleri alınmıştır. Her bir kalibrasyon test alanından elde edilen görüntüler yaygın olarak kullanılan bir ışın demetleri ile dengeleme yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kendi kendine kalibrasyon parametreleri kullanılmıştır. Yani kalibrasyon süreci tamamen otomatiktir ve bir İHA için 6 tane olmak üzere toplam 12 tane kalibrasyon sonucu elde edilmiştir. Bunun yanı sıra oluşturulan kalibrasyon parametrelerinin aynı İHA ve kamera için değerler ön kalibrasyon (pre-calibration) parametreleri olarak girilmiştir. Engelibeli bir arazi olan Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nun 215 m x 215 m arazisi, bu kalibrasyon parametrelerini ve model doğruluğunu test etmek için iki İHA ile de farklı yüksekliklerde görüntü alımı yapmak için kullanılmıştır. Görüntü alımından önce hem dengeleme yapabilmek hem de kalibrasyon parametrelerinin dengelemeye doğruluğunun etkisini inceleyebilmek için araziye 43 tane YKN tesisi yapılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Tesis Edilen Yer Kontrol Noktaları

3.1. Kullanılan İHA'lar ve Entegre Kameralarının Özellikleri

Bu çalışmada iki farklı İHA kullanılmıştır (Şekil 3.2). Bunlardan biri DJI Phantom 4 Pro, 2006 yılında kurulmuş, yaklaşık % 70 pazar payıyla Çinli bir minyatür kopter (İHA) üreticisidir. Diğeri ise 1994 yılında kurulan Fransa üretimi Parrot İHA'dır. Parrot İHA, DJI Phantom 4 Pro' dan daha önce üretilmiş. Fakat ilk Parrot İHA'sını piyasaya giriş olarak 2010 da üretmiştir. DJI vücudu aynı anda hem dayanıklı hem de hafif kılan titanyum ve magnezyum karışımından yapılmıştır. Parrot Anafi de hafif plastik ve karbon fiber karışımından yapılmıştır. Çizelge 3.1, çalışma için kullandığımız DJI İHA ve Parrot İHA şirketlerinde bulunan ürünlerden birinin karşılaştırmasını açıklamaktadır (DJI, 2020; Versus, 2020).



Şekil 3.2. Kullanılan İHA'lara ait görseller. (DJI P4 Pro (a), Parrot Anafi (b))

Çizelge 3.1. Kullanılan İHA ve entegre kameraların özellikleri

İHA	DJI P4 Pro	Parrot Anafi
Genişlik	300 mm	240 mm
Yükseklik	300 mm	65 mm
En düşük potansiyel çalışma sıcaklığı	0°	-10°
Maksimum çalışma sıcaklığı	40°	40°
Maksimum uçuş süresi	30 dk	25 dk
Maksimum uçuş mesafesi	7 km	4 km
Maksimum uçuş hızı	20 m/sn	15.3 m/sn
Engel tespiti	Var	Yok
GNSS desteği	GPS, GLONASS	GPS, GLONASS
Kamera modeli	FC6310	Anafi
Sensör tipi	CMOS	CMOS
Fotoğraf formatı	JPEG, DNG	JPEG, DNG
Sensör çözünürlüğü	20 Mpixel	21 Mpixel
Piksel boyutu	2.4 µm	1.3 µm
	8,8 mm / 24 mm	4 mm
Odak uzaklığı	(35 mm Eşdeğeri)	(35 mm Eşdeğeri)
Min. Deklanşör hızı	8-1/8000 sn	1-1/10000 sn
Görüş alanı (FOV)	84°	69°
Ağırlık	1375 g	320 g
Pil kapasitesi	5870 mAh / 89,2 Wh	2700 mAh / 20,52 Wh

3.2. Farklı Kamera Kalibrasyon Yöntemleri ve Matematik Modelleri

Kamera kalibrasyonu işlemi, kameranın iç yöneltme parametrelerinin elde edilmesi için yapılır. Kamera kalibrasyonu, 2B görüntülerden metrik bilgileri ayıklamak için 3B bilgisayar vizyonunda gerekli bir adımdır (Zhang, 1999). Kameranın kalibrasyonu ile edilen bu iç yöneltme parametreleri, kalibre edilmiş odak uzaklığı, resim ana noktası koordinatları ve distorsiyon parametreleridir. Distorsiyon parametreleri, radyal ve teğetsel distorsiyonu modellemek için kullanılan katsayılardır. Cisimden gelen ışın, objektife girişte optik eksenle belli bir açı yapıyorsa, çeşitli mercek hatalarından dolayı objektiften çıkışta optik eksenle farklı bir açıda çıkış yapacaktır. Böylece obje noktasının görüntüsü, olması gereken yerden bu iki farklı açı arasındaki fark kadar farklı bir yerde meydana gelecektir. İşte bu iki açı arasındaki farktan gelen görüntü kayıklığı distorsiyon hatası olarak adlandırılmaktadır (Gülbüz, H.1982). Bundan meydana gelen distorsiyonlar, görüntü geometrisini etkiler, görüntü üzerinde

cismin konumunun değişimine sebep olur. Bu nedenle herhangi bir geometrik distorsiyonun varlığı, fotogrametri de çok önemlidir ve kameranın geometrik kalibrasyonu ile bu durum ortadan kaldırılabilir. Bu distorsiyon iki çeşittir.

- Radyal Distorsiyon
- Teğetsel Distorsiyon

Radyal distorsiyon, merceklerdeki açısal büyütme ile orantılı olarak merceğe aynı uzaklıktan ancak farklı açılara sahip hedeflerden gelen ışık ışınlarının izdüşüm düzleminin önünde ya da arkasında odaklanması sonucu oluşan görüntü ötelemesi şeklindeki distorsiyondur. İzdüşen ışık ışının izdüşüm merkezinin (resim düzleminin) önünde ya da arkasında odaklanmasına göre distorsiyon pozitif veya negatif olarak adlandırılır (Şekil 3.3). Radyal mercek distorsiyonu matematiksel olarak bir polinom fonksiyonu ile şu şekilde ifade edilir.

$$\delta_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (3.1.)$$

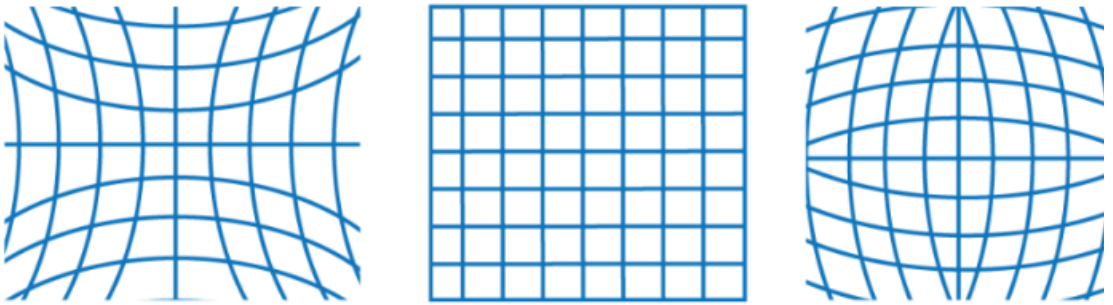
Bu açısal değişimin etkisinin, resim koordinat sistemi içerisinde x ve y yönlerindeki bileşenleri ise;

$$\delta_{rx} = \delta_r (x - x_0) \div r \quad \delta_{ry} = \delta_r (y - y_0) \div r \quad (3.2.)$$

olarak ifade edilir.

Genelde distorsiyon fonksiyonu, radyal elemanların özellikle de radyal fonksiyonun ilk teriminin etkisi altındadır. Bir resmin gerçek koordinatları (X,Y), distorsiyona uğramış koordinatları (X',Y') ve gerçek normleştirilmiş resim koordinatları (x,y) olmak üzere; bu koordinatlar arasında şu bağıntılar yazılabilir.

$$X' = X + k(X - X_0)(x^2 + y^2) \quad Y' = Y + k(Y - Y_0)(x^2 + y^2) \quad (3.3.)$$



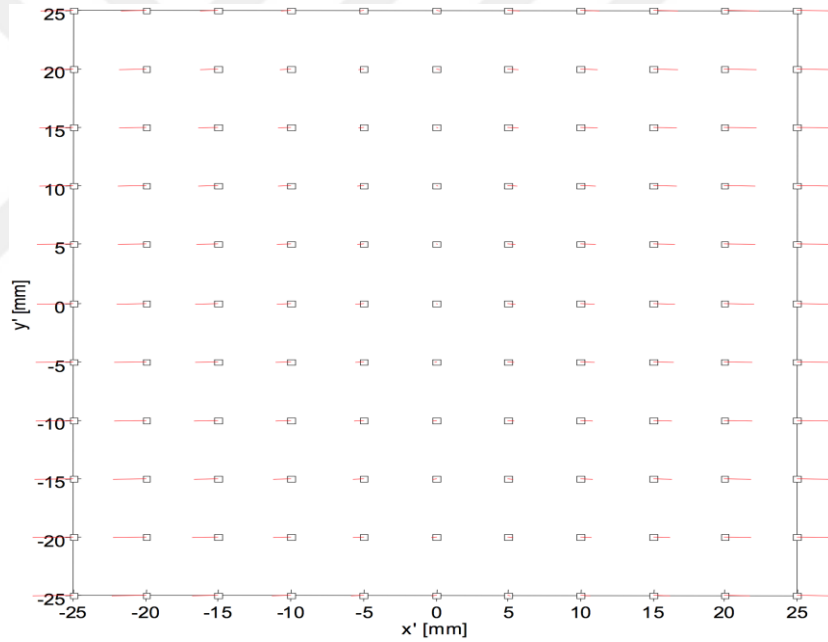
Şekil 3.3. Radyal distorsiyonun görüntüye etkileri

Teğetsel distorsiyon ise lens elementleri ve görüntü sensörünün merkezlerinin çakışık olmaması ve bunların düzlemlerinin paralel olmamasından kaynaklanmaktadır. Görüntü üzerindeki etkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.4) (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2013). Bu sebepten oluşan görüntü kayması yine resim düzleminin koordinat eksenlerine göre bileşikleri ile ifade edilecek olursa;

$$\delta_x = p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0) \quad (3.4.)$$

$$\delta_y = p_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) \quad (3.5.)$$

elde edilir.



Şekil 3.4. Teğetsel distorsiyon ve görüntüye etkileri

Ölçümlerin kalitesi doğrudan ürünlerin kalitesini etkiler. Kamera geometrisi ve kalibrasyonu dikkate alınması gereken hususlardan biridir (M Cramer et al., 2017) Güvenilir kalibrasyon, kamera parametrelerinin fiziksel olarak doğru olduğu, yani dış yönlendirme parametrelerinin kalan bilinmeyenlerinden mümkün olan en iyi şekilde ayrıştırıldığı anlamına gelir.

Bu çalışmada kullanılan yöntem popüler olan 1970 yıllarında yakın resim fotogrametrisine giren ışın demetleri ile blok dengelemesi yapan kendi kendine

kalibrasyondur. Bu yöntem dünya çapında araştırmacılar tarafından en sık kullanılan yöntemdir. Otomatik olarak gerçekleşme kolaylığı da olduğu için çok tercih edilir. Fakat bu otomatik işlem adımının model doğruluğuna daha iyi etki etmesi için iyi bir kalibrasyon daha doğru sonuçları getirir. Maliyet yönünden tüketicinin tercih ettiği metrik olmayan kameralarında kalibrasyonu bu yüzden bir o kadar önemlidir.

Metrik bir kamerada tam bir merkezsiz izdüşüm söz konusudur. Projeksiyon merkezi, kamera odak uzaklığı ve asal noktanın konumu bilinir. Metrik olmayan dijital kameraların fotogrametrik değerlendirmede çok önemli olan iç yöneltme elemanlarının bilinmemesi söz konusudur.

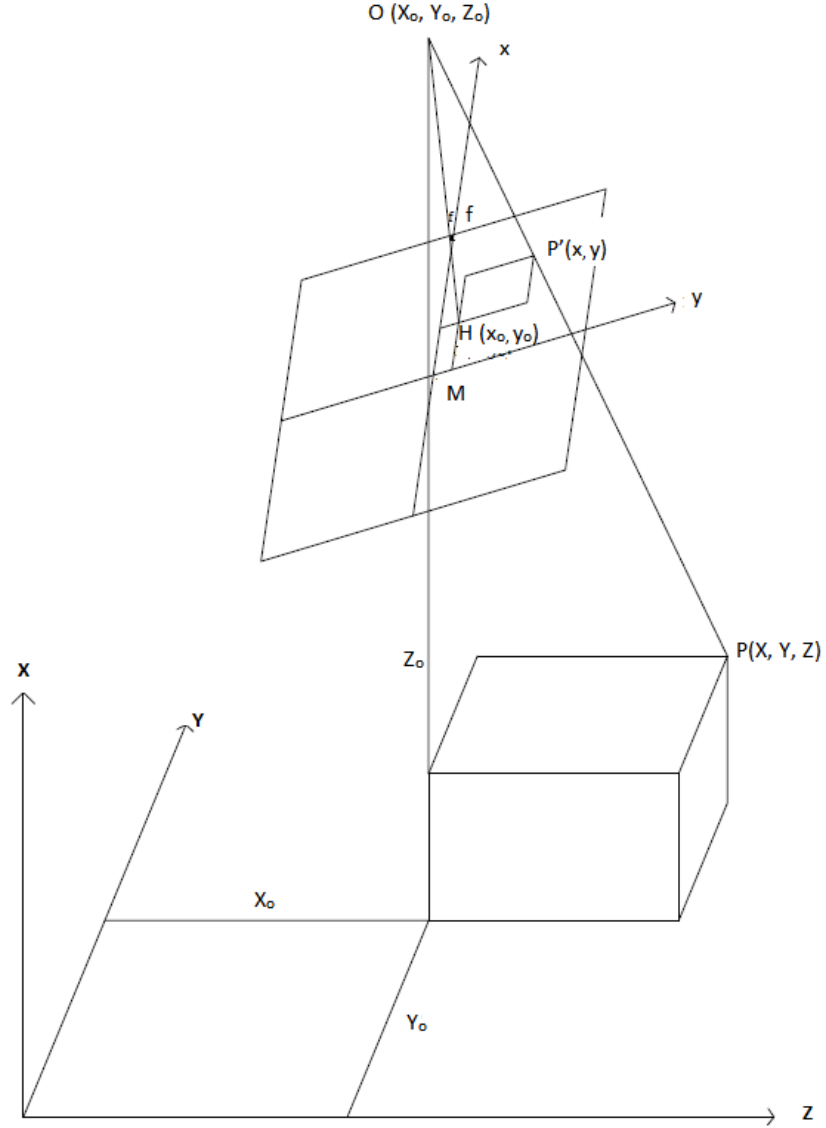
Kendi kendine kalibrasyon ışın demetleri ile blok dengelemesi aracılığıyla perspektif geometrik bir modelle gerçekleştirilmiştir.(Brown, 1971) Işın demetleri ile blok dengelemesi, tüm sistem parametrelerinin eş zamanlı olarak belirlenmesini ve ayıklanan kalibrasyon parametrelerinin kesinliği ve güvenilirliğinin tahminlerini sağlar. Ayrıca, iç yöneltme ve dış yöneltme parametreleri ile nesne noktası koordinatları ve bunların belirlenebilirlikleri arasındaki korelasyonlar da ölçülebilir. Elverişli bir ağ geometrisi gereklidir, yani tercihen 3B nesnenin yakınsak ve döndürülmüş görüntüleri, görüntü formatı boyunca iyi dağıtılmış noktalarla elde edilmelidir. Eğer ağ geometrik olarak zayıf ise, korelasyonlar en küçük kareler tahmininde kararsızlıklara yol açabilir. Orijinal olarak formüle edilen 8-aşamalı “fiziksel” modeldir. Bu, odak uzaklığı ve temel nokta iç yöneltme parametrelerini içerir. (Brown, 1971)

Yöneltme için kullanılan ışın demetleri ile blok dengelemesi işlemi görüntü çekim merkezi üç boyutlu koordinatlarının yardımı ile iç yöneltme parametrelerinin dengelemeye bilinmeyen olarak katılması ve koordinatları iyi bilinen yer kontrol noktalarının denkleme dahil edilmesi sonucu görüntü alım merkezi koordinatlarını yüksek bir doğrulukla hesaplama algoritmasıdır.(Gruen & Huang, 2013)

Işın demetleriyle blok dengeleme ayrıca iç yöneltme ve dış yöneltme elemanlarını aynı anda iyileştirebilir (Triggs, 1998). Işın demetleriyle dengeleme yöntemi, mühendislik çalışmalarını ve yapıları fotogrametrik yöntemlerle üretirken karşılaşılabilecek çeşitli durumlarda gerekli olan ve gerekli esnekliği sağlayan güçlü bir hesaplama tekniğidir (Stuart Grans 2006).

Kendi kendine kalibrasyonda ışın demetleri ile blok dengelemesi modeli en esnek, genel ve hassas sensör modeli olarak kabul edilir. Işın demetleri ile blok dengelemesi sistematik hatalar, lens distorsiyonu, yeryüzü eğriliği ve kırılma için görüntü ölçülerini otomatik olarak düzeltme olanaklarına sahiptir. Işın demetleri ile blok

dengelemesinin temeli doğrusallık koşuludur. Fotogrametrinin de tekniği olan tek görüntü ile iki boyutlu (2B) değerlendirme için kullanılabildiği gibi genellikle görüntü çiftleri ile 3B değerlendirme için kullanılmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Doğrusallık koşulu, görüntü ve cisim koordinatları

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (3.6.)$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (3.7.)$$

Denklem 3.6 ve 3.7’de (X, Y, Z) cisim koordinat sistemi, (x, y) ise görüntü koordinat sistemini göstermektedir. O (X_o, Y_o, Z_o) izdüşüm merkezi olup, görüntünün çekildiği noktayı temsil eder. f, kalibre edilmiş odak uzaklığını, H (x_o, y_o) görüntü ana noktasını, M resim orta noktasını, P(X, Y, Z) P noktasının cisim koordinatlarını, P’(x, y) ise P noktasının görüntü koordinatlarını belirtir. Doğrusallık koşulu ise O, P’ ve P noktalarının bir doğru üzerinde olması olarak tanımlanır. Bu koşul yukarıdaki Denklem 3.6 ve 3.7 ile matematiksel olarak ifade edilmektedir. Burada r_{i,j} dönme matrisi R’nin elemanlarıdır. (Kraus, 2007)

Kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi için uygulanan kendi kendine kalibrasyonun (Gruen & Huang, 2013)’ e göre bilinmeyenlerinin çözülmesi denklemi de matematik modelde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

Genel fotogrametrik model şu şekilde ifade edilir;

$$V = A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 - l \quad (3.8.)$$

V : Görüntü koordinat artıklarının bir vektörüdür.

X₁, X₂, X₃ : Sırasıyla dış yöneltme elemanları, iç yöneltme ve ek kalibrasyon parametresi için parametre içeren vektörlerdir.

l: Uyumsuzluk değerinin vektörü

Doğrusal en küçük kareler yaklaşımı ile Denklem 3.8 ‘nin çözümü kendi kendine kalibrasyon ile iyi bilinen fotogrametrik ışın demetleri ile blok dengelemesinin temelidir. Kendi kendine kalibrasyon ile ışın demetleri ile blok dengelemesi için pratik algoritmaya adım atması Denklem 3.8 işlevsel modelinden gelen önemli bir adımdır.

Sabit XYZ cisim noktası koordinatlarının varlığında Denklem 3.8 deki sıfır olacak olan düzeltme terimleri X₂ ‘nin ortadan kaldırılmasıyla birleştirilir. Kalan;

$$V = A_1 X_1 + A_3 X_3 - l \quad (3.9.)$$

X₁: Dış yöneltmenin 6 elemanını kapsıyor

$$X_3 = (x_o \ y_o \ k_1 k_2 k_3 p_1 p_2 a_1 a_2)^T$$

X₃: asal nokta koordinatları, distorsiyon bozulmaları, x/y ölçek oranı ve düzlem içi distorsiyon kayma terimlerini kapsar.

k₁, k₂, k₃: radyal distorsiyon parametreleri

p₁, p₂: teğetsel distorsiyon parametreleri

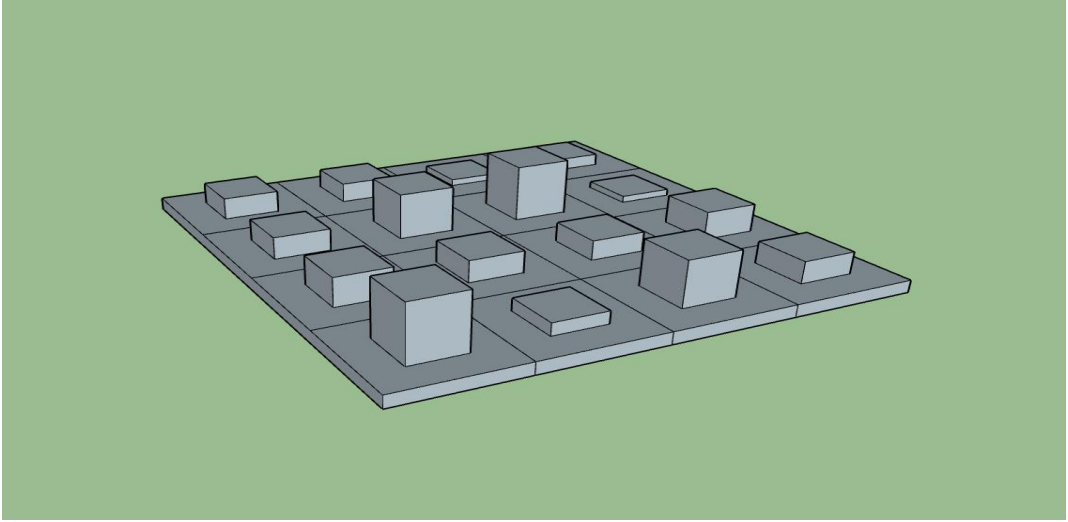
3.3. Kalibrasyon Test Alanları

Literatürde ağ farklılığı, malzeme farklılığı, laboratuvar ve arazi olmak üzere alan farklılığı olan, 2B ve 3B oluşturulan birçok test alanı mevcuttur. Bu çalışmada laboratuvar da hem 2B ve 3B olmak üzere farklı malzemelerden oluşan iki test alanı duvara monte şekilde kullanılmıştır. Ayrıca 3B test alanı laboratuvar şartlarının dışında arazide merkez noktası tayin edilerek farklı mesafelerde farklı yapılandırmalar oluşturularak kullanılmıştır.

Kameranin kalibrasyon kalitesini artırmak için oluşturulan test alanların da dikkat edilmesi gereken faktörler uygulanmaya çalışılmıştır.

- Görüntü içindeki noktaların dağılımı önemlidir. Görüntü noktasının dağılımı tüm görüntülerde olmasa da tüm model alanını kapsayacak şekilde olmalıdır. (teğetsel ve radyal distorsiyon bozulmalarından ötürü).
- Fotogrametrik ağ yapılandırması önemlidir. Dört veya daha fazla görüntü kullanılması tavsiye edilmektedir. 2B dağılım yeterli olsa da 3B iyi dağıtılmış cisim koordinatları noktası tercih edilmelidir.
- Kendi kendine kalibrasyon yapan blok dengelemesi varyans faktörü veya birim ağırlığının standart hatası da kalibrasyon kalitesini gösterir.

Kalibrasyon için oluşturulan platformumuz ahşap, taşınabilir, 3 boyutlu bir test alanı olarak tasarlanmıştır. Öncelikle oluşturulacak test alanı AUTOCAD ortamında 3B çizilmiştir (Şekil 3.6). 1m x 1m olmak üzere 4 tane aynı platformdan farklı yüksekliklerde kolonlar oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Platform üzerinde belli bir ölçekte ve eşit kesilen kare referans noktalarının üzerine kaliteli bir kağıtla standartlara benzer bir referans alınacak ve uçuştta orta noktanın rahat anlaşılır olması için yuvarlak siyah beyaz bir referans noktası seçilmiştir. Bir 1m x 1m platformda 16 tane kutu bölme noktası oluşturulmuştur. Her bir kalibrasyon test alanının da iki tane 45 cm, dört tane 30 cm, dört tane 15 cm, iki tane 20 cm ve dört tane 5 cm yüksekliklerden oluşan her bir yükseklik 20 cm x 20 cm 64 tane kutu bölme oluşturulmuştur. Kutu bölmelerin üzerine eşdeğer 19 cm çapında siyah beyaz referans noktaları yapıştırılmıştır.



Şekil 3.6. CAD Ortamında Tasarlanan 3B Model



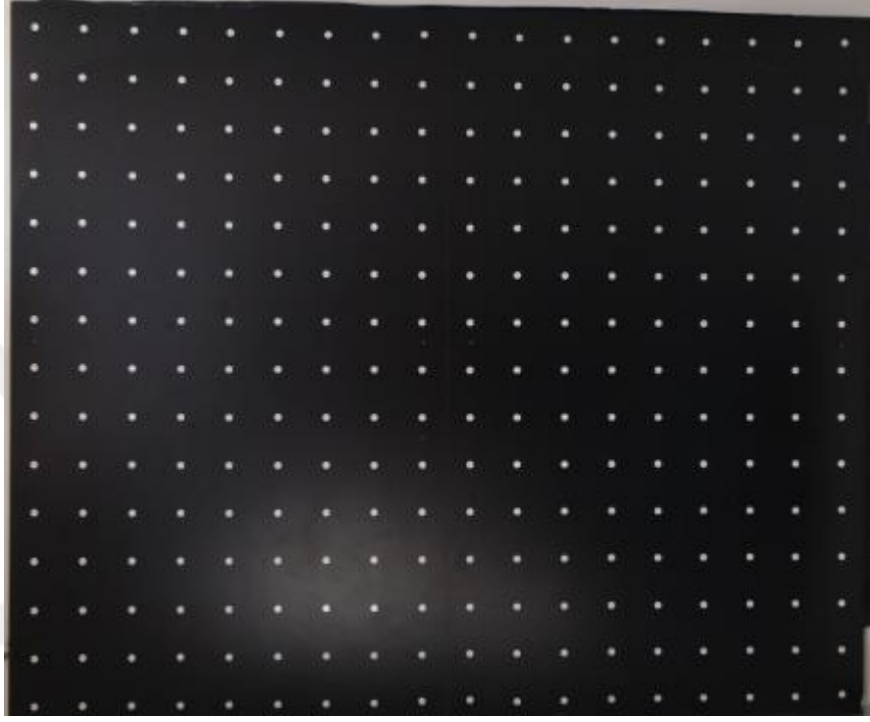
Şekil 3.7. Oluşturulan 1 m x 1 m boyutundaki 4 platform

Şekil 3.7 'de gösterilen başlangıç noktası belirlendi. Bu belirlenen başlangıç noktası, orta nokta kabul edildi. Total-station ile bilinen bu noktadan referans noktaları koordinatlandırılmıştır. Bu noktaya ayrıca kalibrasyon test alanının kenar uzunluklarını belirlemek için 2 m mesafede 1 m x 1 m platformlar yerleştirilerek arazide T4 olarak isimlendirilen 4 m x 4 m bir kare konfigürasyon oluşturuldu.

Kullanılan ikinci kalibrasyon T3 test alanı da aynı ölçülerdeki ahşap 3B 1 m x 1 m platformlar bu kez başlangıç noktasından 1 m mesafede kare şeklini alan yani

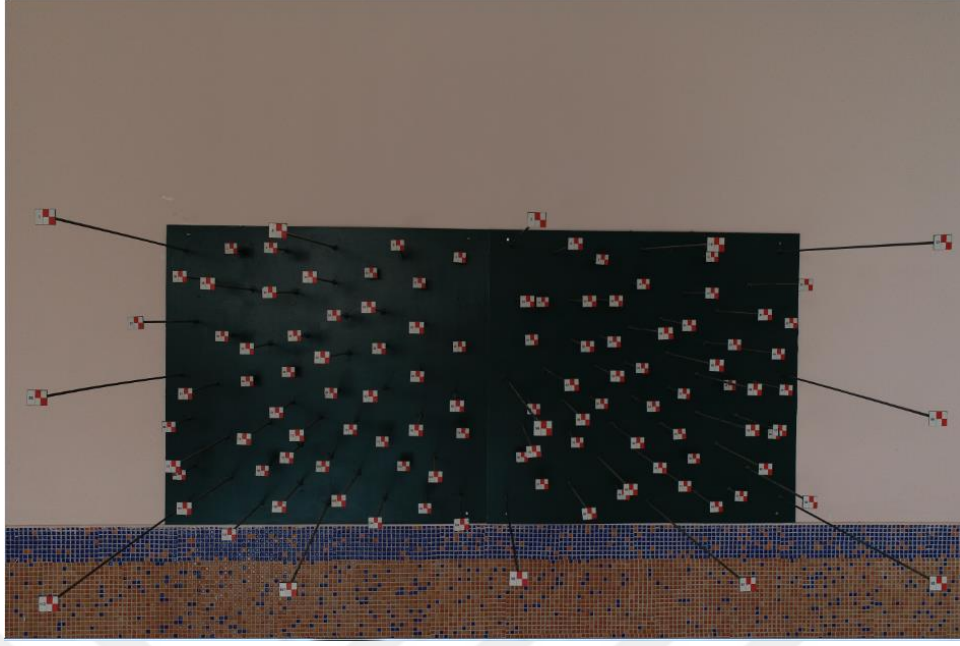
başlangıç noktasına yakın mesafe bir konfigürasyon oluşturulmuştur. 3 m x 3 m kare platformda farklı yüksekliklerde dağılmış 64 tane referans noktası bulunmaktadır.

Fotogrametri yazılımlarında da önümüze sıklıkla çıkan klasik kalibrasyon test alanı, 2B satranç tahtası test alanına benzer bir test alanıdır. Bu çalışmada L2 olarak isimlendirilen ve duvara monte edilmiş satranç tahtası platformu kullanılmıştır (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. L2 Kalibrasyon test alanı

Ayrıca son olarak da L3 olarak isimlendirdiğimiz bir 3B kalibrasyon test alanı bu çalışmada kullanılmıştır. Farklı derinliklerde hedefler kullanılarak oluşturulmuş 1.2 m x 2.6 m boyutlu bir platform duvara monte edilmiştir. 112 adet farklı uzunluklarda demir çubuğun sabitlendiği bir yüzey olan test alanında, bu referansların orta noktalarının yazılımda kolay ayırt edilebilmesi adına üzerlerine kırmızı ve beyaz renklerden oluşan işaretler iliştilmiştir. (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. L3 Kalibrasyon test alanı

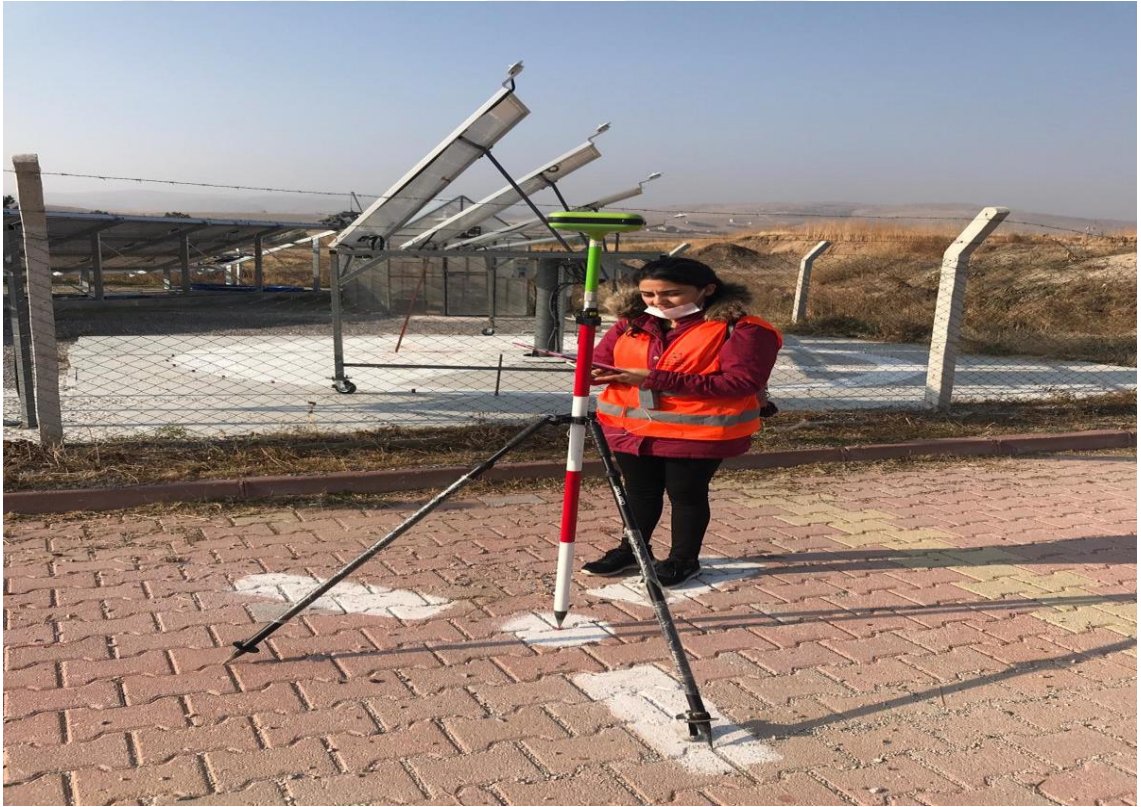
3.4. Kontrol Amaçlı Arazide Oluşturulan Test Alanı

Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunun çevresinde 215 m enine 215 m boyuna ortalama 1166 m ortometrik yükseklikte engebeli bir arazi, farklı test alanlarından elde edilen kalibrasyon parametrelerinin model doğruluğuna etkisini test etmek için kullanılmıştır (Şekil 3.10). Arazi Teknik Bilimler Yüksekokulunun bir ana bina ve birçok ek binasından meydana gelmektedir. İki İHA ile farklı yüksekliklerde görüntü alımı yapılmıştır. Konum doğruluğuna faydasının yanı sıra kamera kalibrasyonundan sonra kalan sistematik hatalardan kaynaklı blok deformasyonu etkilerini de hafifleteceği bilindiğinden, ilk olarak arazide iyi bir YKN dağıtımı yapılmış ve tesis edilen noktaların en yüksek doğrulukta koordinat bilgisi hızlı statik yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Bu engebeli araziye 43 adet YKN tesisi edilmiştir. BÖHHBÜY kapsamında belirtilen YKN tesisi yönergelerine uyulmuştur. YKN 3 kanatlı oluşturulmuş, orta nokta 10 cm çapında ve kanatlar enine 5 cm boyuna 15 cm olarak kullanılmıştır. Ayrıca mevcutta arazide bulunan bir önceki arazi çalışmalarından kalan 4 kanatlı YKN'ları ise iyileştirilerek kullanılmıştır.

Çalışmada tesis edilen her YKN' de hızlı statik yöntemi ile sabit iki noktadan her noktada 15 dakika olacak şekilde statik GNSS verisi toplanmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.10. Kontrol amaçlı arazide oluşturulan test alanı



Şekil 3.11. YKN hızlı statik ölçümü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

İHA'ya monte metrik olmayan kameralarının kalibrasyonu, 6 farklı test alanında ışın demetleri ile blok dengelemesi temeline dayanan kendi kendine kalibrasyon yöntemi ile her iki kamera içinde gerçekleştirilmiştir. Takip edilen işlem adımları ve kalibrasyon raporlarından elde edilen parametreler aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur. Literatürden farklı 3B oluşturulan portatif bir kalibrasyon test alanı daha önceki bölümlerde bahsettiğimiz gibi iki farklı mesafede farklı konfigürasyonlarda kullanılmıştır. Literatürde kamerayı kalibre etmek için test edilen 3B karışık arazi ve yapılaraya sahip alanlardan farklı olarak belirli bir eş düzen ve ölçekte oluşturulan farklı yükseklikteki test alanları değerlendirilmiştir. Oluşturulan 3B taşınabilir kalibrasyon test alanı kullanılarak arazide görüntü alımı yapılmıştır. Laboratuvarında 2B ve 3B kalibrasyon test alanları yapılmıştır ve kalibrasyon sonuçları raporlanmıştır. Her bir kalibrasyon test alanının farklı yüksekliklerde, 45° ve 90° açılarla her iki İHA içinde görüntüler alınmıştır. Görüntülerin çekildiği farklı yükseklik ve açılar her test alanı için aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 4.1) (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1. DJI Phantom Pro 4 için kalibrasyon sahalarında görüntülerin çekildiği yükseklik ve açılar

	YÖA(cm)	Yükseklik(m)	Açı(°)
T4	0.14_0.27_0.41	5_10_15	45°- 90°
T3	0.14_0.27_0.41	5_10_15	45°- 90°
L2.1	0.07	2.5	45°- 90°
L2.2	0.1	3.5	45°- 90°
L3.1	0.07	2.5	45°- 90°
L3.2	0.1	3.5	45°- 90°

Çizelge 4.2. Parrot Anafi için kalibrasyon sahalarında görüntülerin çekildiği yükseklik ve açı

	YÖA(cm)	Yükseklik(m)	Açı(°)
T4	0.17_0.34_0.51	5_10_15	45°- 90°
T3	0.17_0.34_0.51	5_10_15	45°- 90°
L2.1	0.09	2.5	45°- 90°
L2.2	0.12	3.5	45°- 90°
L3.1	0.09	2.5	45°- 90°
L3.2	0.12	3.5	45°- 90°

Agisoft Metashape Pro yazılımının, oluşturulan kalibrasyon test alanlarının fotoğraflarını çekmek için yönergeleri ise şu şekildedir.

- Odak uzaklığının çekim işlem boyunca sabit kaldığından emin olunmalı. (yakınlaştırma lensi olması durumunda özellikle)
- Fotoğraf üzerindeki parlamadan kaçınılmalı ve gerekirse ışık kaynakları uzaklaştırılmalı.
- Tercihen fotoğrafların görüntü çerçevesi kalibrasyon test alanı ile kaplanmalıdır.

Bu yönergeler doğrultusunda çekilen kalibrasyon test alanının görüntüleri yazılıma bir dizi kalibrasyon deseni görüntüsü olarak yüklenmiştir.

Agisoft yazılımı blok dengelemesi içermektedir. Görüntüdeki bağlantı noktalarını eşleştirmekte ve her bir görüntü için kameranın konumunu bulmaktadır. Daha sonra kamera kalibrasyon parametrelerini (iç yöneltme ve dış yönetme parametreleri) tahmin etmekte ve geliştirmektedir. Fotoğraf hizalama (Align Photos) gerçekleştirirken yazılım, doğrusal olmayan radyal bozulmalar dahil olmak üzere lens iç ve dış yöneltme parametrelerini tahmin etmektedir. Tahminin başarılı olması için farklı kameralarla çekilmiş fotoğraflarla ayrı ayrı uygulanması çok önemlidir. Doğrusal olmayan distorsiyonlar Brown' un distorsiyon modeli kullanılarak modellenmiştir. Brown' un bu yazılımda uygulanan distorsiyon modeli kamera kalibrasyonu özellikleri tanımlarken parametrelerin oluşturması için kamera türü seçilmektedir. Agisoft yazılımının kullanıcılar için oluşturduğu kılavuzda, Brown' un modelinin frame kameralar (çerçeve kamera) için iyi çalıştığını belirtmiştir. Diğer kamera türlerinden olan balık gözü ve çok geniş açılı lensler bahsedilen bozulma modeli tarafından zayıf bir şekilde simüle edildiğinden bu yüzden kamera türünün seçimi önemli yazılımda seçilen kamera türüne göre kamera kalibrasyon aşamasında yazılıma uygun distorsiyon modeline geçmektedir.

Kullanılan iki İnsansız hava aracı DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi'nin kameralarının türü hakkında net bir veri elde edilmemesinin yanında bu konuda yoruma dayalı birçok kaynak bulunmaktadır ama tüketicilerinin bu iki kamera tanımı içinde kullandıkları tür çerçeve kamera türüdür. Bir kalibrasyon grubundaki kaynak veriler bir çerçeve kamera ile çekildiyse, kamera oryantasyon parametrelerinin başarılı bir şekilde tahmin edilmesi için odak uzaklığının mm cinsinden sensör piksel büyüklüğünün mm cinsinden bilinmesi yeterlidir. Yine de yazılıma fotoğraflar yüklendiğinde bu veriler normalde EXIF meta verilerinden otomatik olarak görüntületilmektedir.

Fotoğraflar yazılıma yüklendikten sonra görüntü çözünürlüğüne veya kamera türüne, odak uzaklığı gibi EXIF meta verilerine göre otomatik olarak kalibrasyon

gruplarına ayrılır. Kendi kendine kalibrasyon yöntemi ile yazılımda her iki insansız hava aracı için 6'şar tane kamera kalibrasyon dosyası oluşturulmuştur. Görüntü koordinatları ve kamera parametreleri belirlenmiştir.

4.1. Kalibrasyon Test Alanlarından Elde Edilen Kamera Kalibrasyon Parametreleri

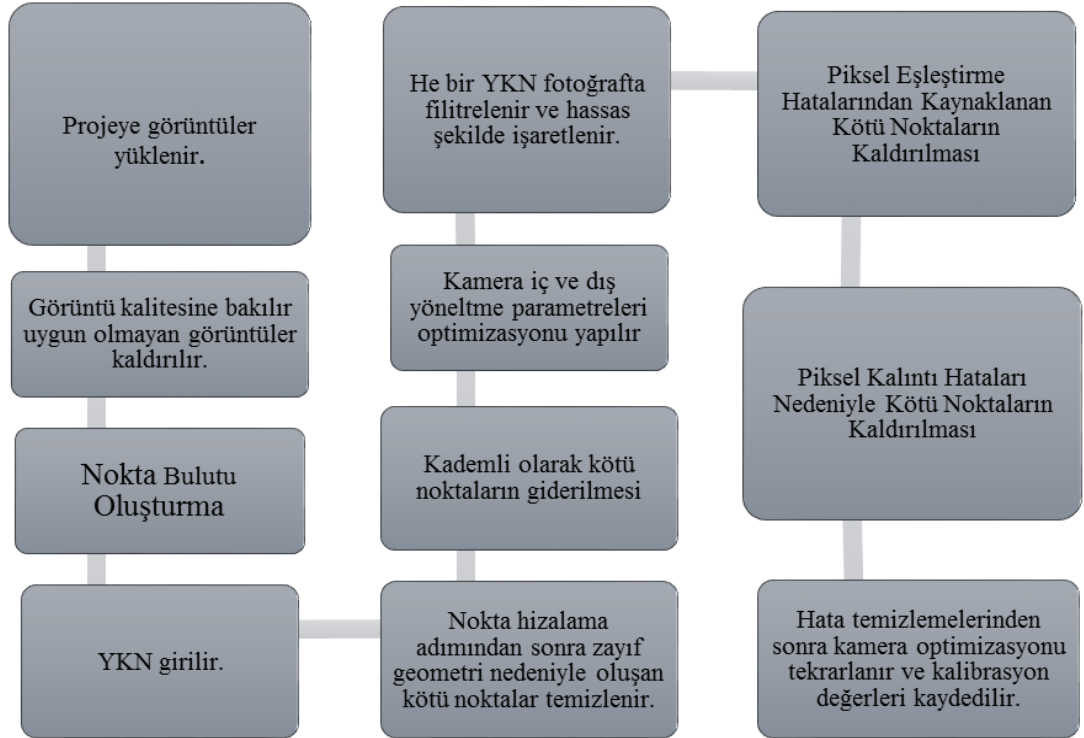
4.1.1. T4 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri

Kalibrasyon test alanımız da rasgele dağılan 45, 30, 15, 20 ve 5 cm yüksekliklerden oluşan 64 tane kare platformun üzerine yapıştırılan eşdeğer referans noktalarının, orta noktası başlangıç alınarak total-station ve reflektör yardımıyla lokal koordinatları okundu. Bu belirlenen başlangıç noktası, orta nokta kabul edildi. Bu başlangıç noktasına göre diğer noktalar koordinatlandırıldı. Bu nokta ayrıca kalibrasyon test alanının kenar uzunluklarını belirlemek için tayin edilmiştir. Başlangıç alınan noktadan Dji Phantom 4 Pro ve Parrot ile görüntü alımı yapılmıştır. Farklı yükseklikte ve 90° ve 45° olmak üzere iki açıdan Dji Phantom 4 pro için toplam 17 tane, Parrot Anafi için toplam 29 tane görüntü alınmıştır. (Şekil 4.1). Agisoft yazılımında kendi kendine kalibrasyon işlem adımları başlatılmıştır. Metrik olmayan kamera kullanılmasından kaynaklı iç yöneltme parametreleri, görüntülerin yazılıma eklenmesiyle gelmemiştir. Kendi kendine kalibrasyon metodu ile Agisoft yazılımında, fotoğraf hizalama işlem adımında, ışın demetleri ile blok dengelemesi sonucunda iç yöneltme parametreleri üretilir. Total-Station'dan elde edilen lokal koordinatlar da işleme dahil edilir. Görüntü koordinatları işlem (process) sonucunda yaklaşık olarak referans panelindeki girilen işaretler ile elde edilen değerlerin iyi bir sonucu ifade etmesi için istenen değerlerdir.



Şekil 4.1. Arazide 3B kalibrasyon test alanı görüntü alımı

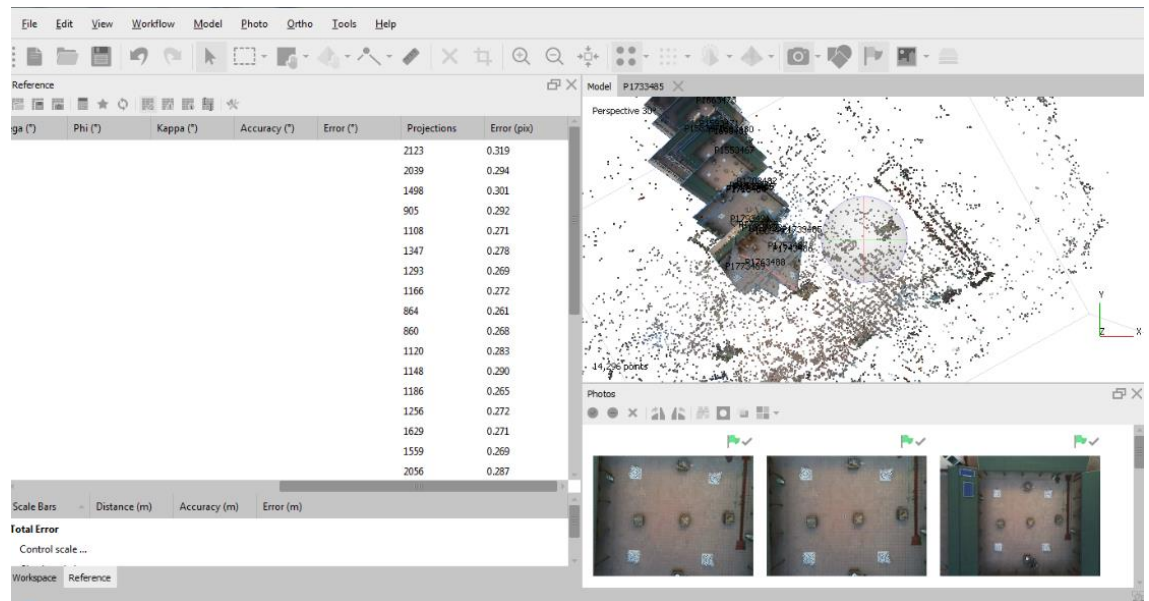
Tüm test alanlarına ait kalibrasyon raporu elde etmek için yazılımdaki iş akışı şema ile gösterildi (Şekil 4.2) (UAS Proje Team). Yazılıma yüklenen fotoğrafların görüntü kalitesi test edilir. Kamera ayrıntılarından görüntülenir. 1 görüntü kalitesi en iyisidir, ancak 0,7'den düşük herhangi bir değere sahip görüntü daha kaliteli bir görüntüyle değiştirilmeli veya diğer fotoğraflarla yeterince örtüşme izin vermiyorsa kaldırılmalıdır. Değerler 1 ve üzeri olduğu için fotoğraflar bir eleme yapılmadan kullanılmıştır. Daha sonra kamera konumları ve seyrek nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu işlem için fotoğraf hizalama (align photos) butonu kullanılmıştır. Açılan pencerede görüntü çözünürlük ayarı yüksek(high) seçilmiştir. Her görüntüdeki eşleştirme noktaları, bağlantı noktası limiti ve nokta bulutun ne sıklıkla oluşturulacağı belirlenmiştir. Ardından optimizasyon işlemi ile blok dengelemesi gerçekleştirilmiştir. Yazılım iç ve dış yöneltme parametrelerini tespit etmiş ve kamera lensindeki bozulmalar için ölçümler ve düzeltmeler yapmıştır. Ayrıca optimizasyon süreci hizalama sonuçlarını iyileştirebilmekte ve hataları azaltabilmektedir. Daha sonra kademeli olarak hatalı noktaların giderilmesinde kılavuzda tavsiye edilen nokta seçimleri ile noktalar kaldırılmıştır. Her farklı kamera ve farklı test alanı için bu işlem adımları tekrar tekrar yapılmış ve kalibrasyon raporları kaydedilmiştir.



Şekil 4.2. Fotogrametrik değerlendirme iş akışı

İç yöneltme parametreleri ve görüntü koordinatlarını iyileştirerek parametreler üretilmiştir. Yazılımdan gelen exif verilerine dayanarak DJI'ın kamerası FC6310 için odak uzaklık 8.8 mm ve sensör piksel boyutu 2.4 mikron x 2.4 mikron olarak Parrot'ın Anafi kamera odak uzaklık 4 mm ve sensör piksel boyutu 1.3 mikron x 1.3 mikron olarak başlangıç değerleri verilmiştir. Parametre değerlerinin ilk yaklaşımı ne kadar iyi olursa, kameranın o kadar doğru otomatik kalibrasyonu gerçekleştirilebilmektedir. DJI için başlangıç olarak kameradan tanımlanan ve bütün DJI ile çekilmiş kamera görüntülerinde başlangıç olarak yazılımda tanımlanan odak değeri 3648 piksel, Parrot İHA'na monte Anafi kamera içinde yazılımda tanımlanan odak 2975.66 piksel olarak tanımlanmıştır. Dengeleme sonrası projeksiyonların (her fotoğraftaki nokta sayısı) 100 altına düşmemesi ve görüntünün piksel hatasının 0.3 ideal hedef olarak belirlenmiştir. Bu test alanı ve DJI Phantom 4 Pro için elde edilen ortalama piksel hatası 0.280 olup ideal tanımdan daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. (Şekil 4.3). Parrot İHA için ise yaklaşık 0.310 piksel hatası elde edilmiştir.

Kamera kalibrasyonundan sonra elde edilen iç yöneltme parametreleri; asal nokta, odak uzaklığı, radyal ve teğetsel distorsiyon değerleri kalibrasyon dosyası olarak her iki İHA içinde kaydedilmiştir. Elde edilen kalibrasyon dosyası bu test alanı ve iki İHA'na monte edilmiş metrik olmayan dijital kameralar için aşağıdaki tablodaki gibi görünmektedir. (Çizelge 4.3).



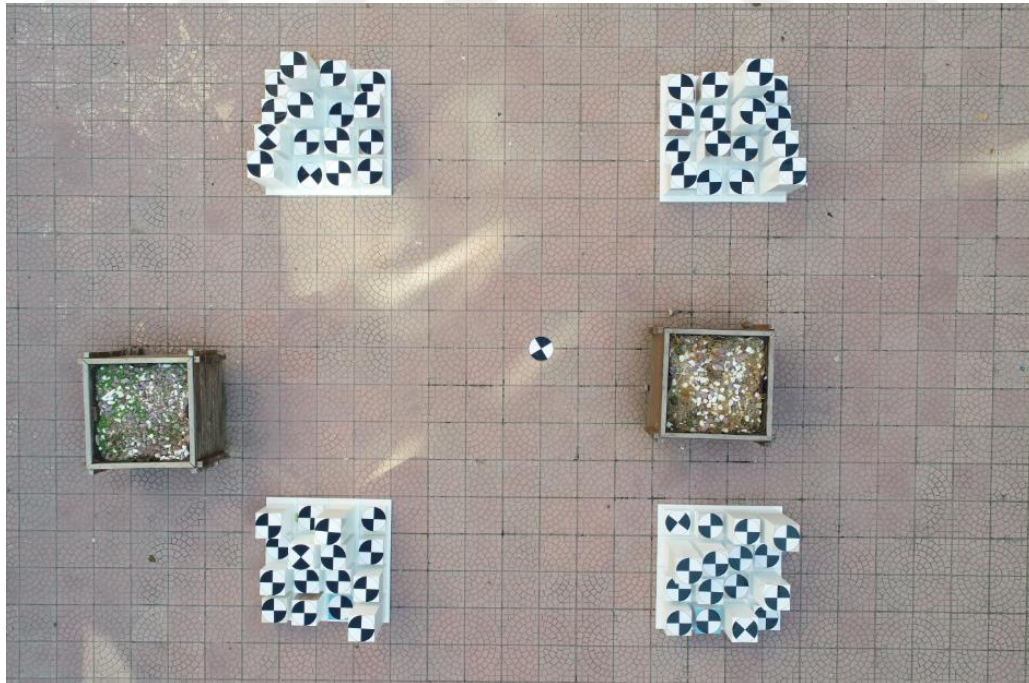
Şekil 4.3. T4 DJI için dengeleme sonucu

Çizelge 4.3. T4 test alanında oluşan kamera kalibrasyon parametreleri

KAMERA KALİBRASYON PARAMETRELERİ	Kamera FC6310	Kamera ANAFİ
Odak Uzaklık (f) (piksel)	3683.63	2990.88
Asal Nokta(xo) (piksel)	-6.401	8.22
Asal Nokta(yo) (piksel)	11.862	-15.41
Radyal Distorsiyon Parametresi (k1)	4.46×10^{-3}	-4.77×10^{-3}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k2)	-7.94×10^{-3}	2.21×10^{-2}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k3)	1.06×10^{-2}	-2.89×10^{-2}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi (p1)	-1.71×10^{-4}	5.06×10^{-4}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi (p2)	2.60×10^{-4}	-1.40×10^{-3}

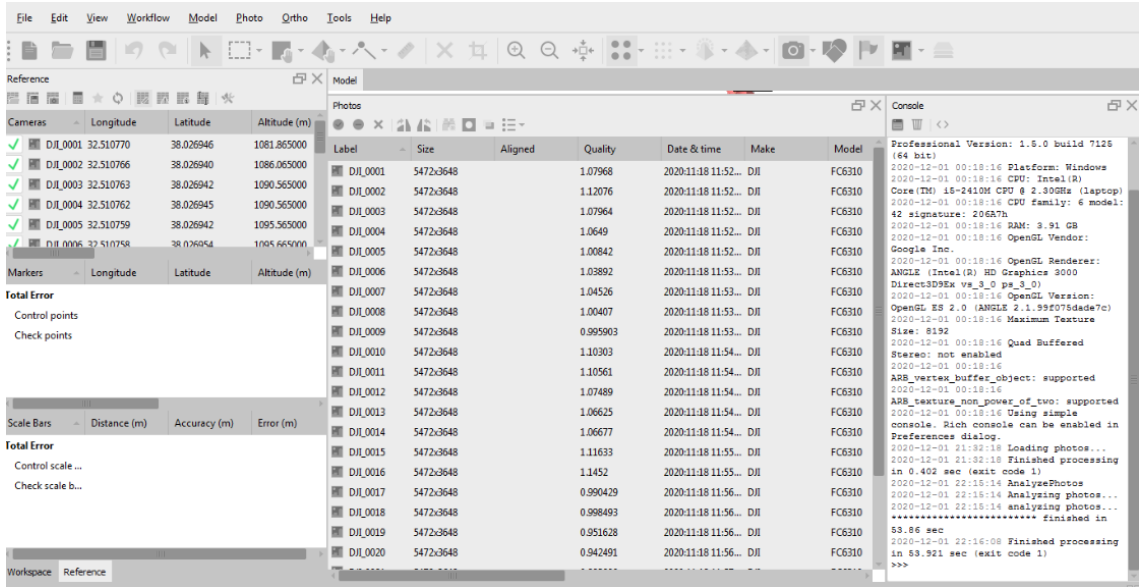
4.1.2. T3 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri

T3 kalibrasyon test alanında referans noktalarının total-station ve reflektör yardımıyla lokal koordinatları elde edilmiştir. Farklı yükseklikte, 90° ve 45° olmak üzere iki açıdan DJI Phatom 4 ve Parrot ile görüntü alımı yapılmıştır. (Şekil 4.4). DJI Phantom 4 pro için toplam 25 tane, Parrot Anafi için toplam 26 tane görüntü alımı yapılmıştır.

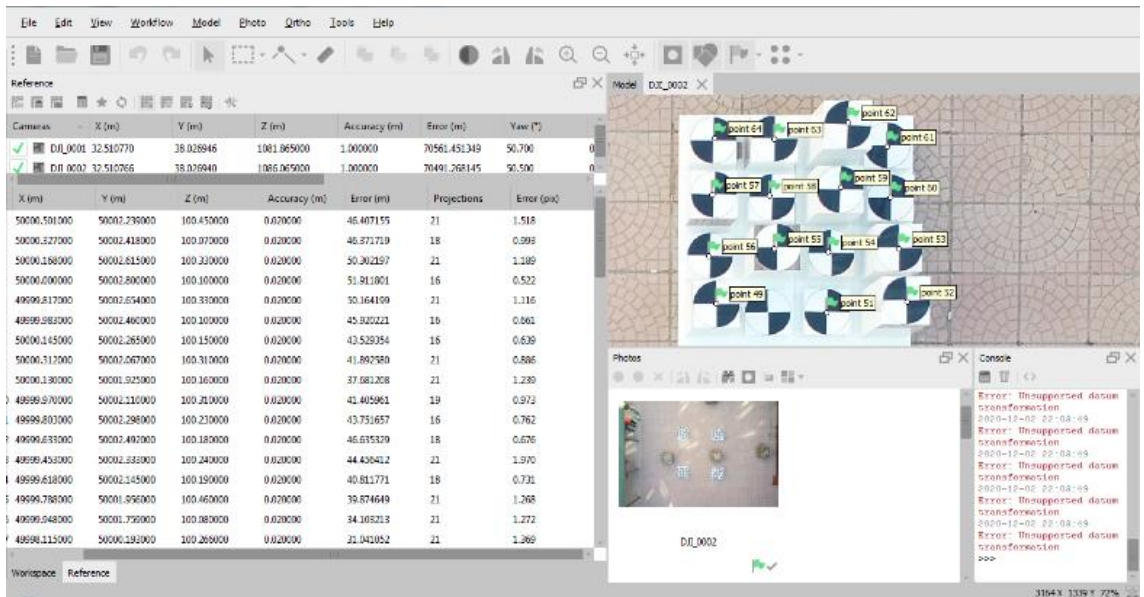
**Şekil 4.4.** T3 kalibrasyon alanı

Kullanılan yazılımda diğer test alanlarında belirtilen iş akışı uygulanmıştır. Görüntüler yüklenmiş ve yazılımda tüm görüntüler seçilerek görüntü kalite kontrolleri

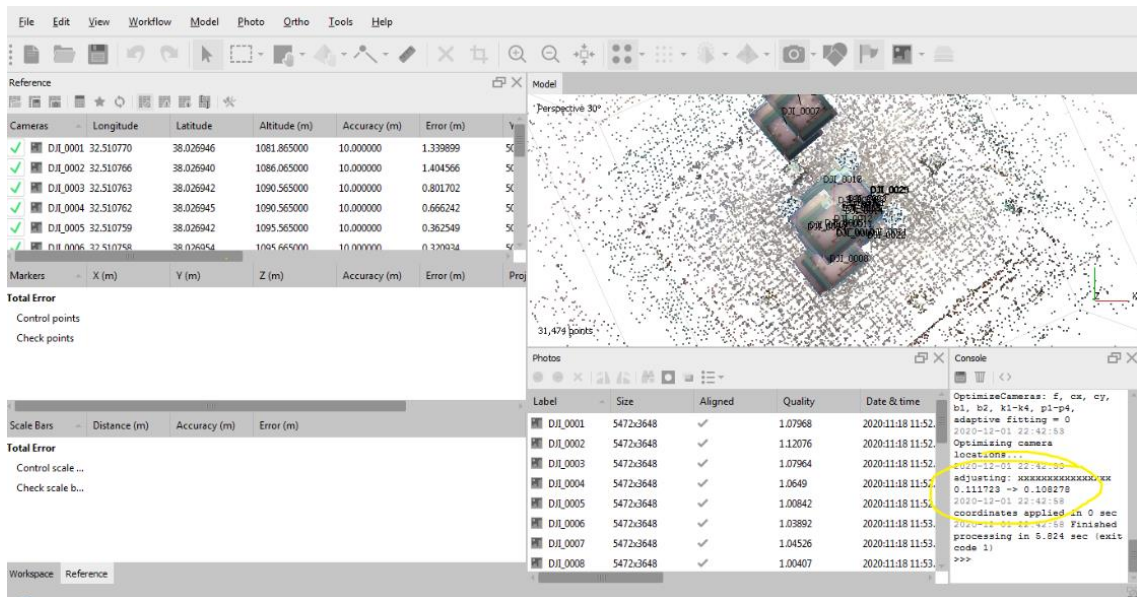
yapılmıştır (Şekil 4.5). Bu aşamaya kadar yapılan bütün test alanlarında ideal görüntü kalitesi sağlanmıştır. Zayıf kalite gereği elenen görüntü bulunmamaktadır. Bu adımı takiben 64 adet referans noktasının koordinatları yazılıma girilmiştir (Şekil 4.6). Görüntüler hizalanmıştır ve hizalanmış görüntüler için kamera iç yönelme ve dış yönelme parametreleri optimizasyonu başlatılmıştır (Şekil 4.7). Daha sonra elde edilen nokta bulutundan hatalı noktalar kaldırılmış ve sonuç olarak görüntü piksel hataları elde edilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.5. Fotoğraf görüntü kalitesi



Şekil 4.6. Referans nokta koordinatlarının girilmesi



Şekil 4.7. Kamera optimizasyonunun yapılması

Pitch (°)	Roll (°)	Accuracy (°)	Error (°)	Projections	Error (pix)
0.100	0.000	10.000	1.757	3777	0.653
0.000	0.000	10.000	1.479	4051	0.431
0.100	0.000	10.000	1.525	3880	0.353
0.100	0.000	10.000	1.391	3974	0.365
0.000	0.000	10.000	1.210	4184	0.388
0.000	0.000	10.000	1.218	3964	0.345
0.000	0.000	10.000	1.102	4551	0.364
0.000	0.000	10.000	1.972	4014	0.353
0.000	0.000	10.000	1.818	4169	0.355
0.000	0.000	10.000	1.526	4182	0.370
0.000	0.000	10.000	1.531	3726	0.373
0.100	0.000	10.000	1.437	3824	0.408
0.000	0.000	10.000	1.327	3853	0.375
0.000	0.000	10.000	1.193	3823	0.380
0.000	0.000	10.000	0.851	3798	0.509
0.000	0.000	10.000	0.996	4252	0.478
46.200	0.000	10.000	3.665	3832	0.332
46.200	0.000	10.000	4.302	3821	0.335
46.200	0.000	10.000	2.091	3788	0.290
46.200	0.000	10.000	1.834	3797	0.295
46.200	0.000	10.000	1.571	3860	0.370

Şekil 4.8. Görüntü piksel hataları listesi

DJI Phantom Pro 4 için görüntü piksel hatası 0.4 ve Parrot için ise yaklaşık 0.36 piksel hatası elde edilmiştir. Yazılımdan gelen exif verilerine dayanarak DJI'ın kamerası FC6310 için odak uzaklık 8.8 mm ve sensör piksel boyutu 2.4 mikron x 2.4 mikron olarak Parrot'un Anafi kamera odak uzaklık 4 mm ve sensör piksel boyutu 1.3 mikron x 1.3 mikron olarak başlangıç değerleri verilmiştir. Parametre değerlerinin ilk yaklaşımı ne kadar iyi olursa, kameranın o kadar doğru otomatik kalibrasyonu gerçekleştirilebilmektedir.

Kamera kalibrasyonundan sonra elde edilen iç yöneltme parametreleri; asal nokta, odak uzaklığı, radyal ve teğetsel distorsiyon değerleri kalibrasyon dosyası olarak her iki İHA içinde kaydedilmiştir. Elde edilen kalibrasyon dosyası bu test alanı ve iki İHA'na monte edilmiş metrik olmayan dijital kameralar için aşağıdaki tablodaki gibi görünmektedir. (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. T3 test alanında oluşan kamera kalibrasyon parametreleri

KAMERA KALİBRASYON PARAMETRELERİ	Kamera FC6310	Kamera ANAFİ
Odak Uzaklık (f)(piksel)	3662.83	2990.69
Asal Nokta(xo) (piksel)	-9.553	8.116
Asal Nokta(yo) (piksel)	11.160	-17.306
Radyal Distorsiyon Parametresi (k1)	4.01×10^{-3}	-7.27×10^{-3}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k2)	1.23×10^{-2}	2.98×10^{-2}
Radyal Distorsiyon Parametresi(k3)	1.35×10^{-2}	-3.44×10^{-2}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p1)	1.51×10^{-4}	6.64×10^{-4}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p2)	2.44×10^{-4}	-1.70×10^{-3}

4.1.3. L2 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreler

Yazılımın tanımladığı exif meta verileri aynı iki İHA kullanıldığı için diğer test alanlarının da tanımlananla aynı exif meta verileri kullanılmıştır. Bu test alanında da lazerli total-station yardımıyla lokal koordinatları okunmuştur. DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi ile test alanında yukarıda bahsedilen iki farklı mesafeden ve açıdan uçuşlar gerçekleştirilmiştir. DJI için 2.5 m mesafeden 14 görüntü, 3.5 m mesafeden 19 görüntü alınmıştır. İlk için 0.350 görüntü piksel hatası, ikincisi için 0.480 görüntü piksel hatası elde edilmiştir. Parrot için yine aynı mesafelerden sırasıyla 7 ve 16 görüntü alınmıştır. 0.6 ve 0.4 piksel hataları elde edilmiştir. Agisoft yazılımında iş akış şemasındaki adımlar gerçekleştirilmiştir.

Yazılımın otomatik olarak gerçekleştirdiği ışın demetleri ile blok dengelemesi ile kendi kendine kalibrasyon sonucu elde edilen kalibrasyon dosyası bu test alanı ve iki İHA'na monte edilmiş metrik olmayan dijital kameralar için aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. L2 test alanında DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi için elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri

DJI P4 PRO	L2.1	L2.2
Odak Uzaklık (f)(piksel)	3706.64	3765.06
Asal Nokta(xo) (piksel)	-23.222	-11.99
Asal Nokta(yo) (piksel)	-65.73	-3.66
Radyal Distorsiyon Parametresi (k1)	3.58×10^{-2}	8.62×10^{-2}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k2)	-5.14×10^{-2}	-2.38×10^{-1}
Radyal Distorsiyon Parametresi(k3)	3.87×10^{-2}	2.31×10^{-1}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p1)	-1.21×10^{-3}	-1.42×10^{-4}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p2)	-4.24×10^{-3}	3.06×10^{-3}

PARROT ANAFİ	L2.1	L2.2
Odak Uzaklık (f)(piksel)	2994.31	3007.38
Asal Nokta(xo) (piksel)	26.69	0.786
Asal Nokta(yo) (piksel)	5.687	-51.899
Radyal Distorsiyon Parametresi (k1)	-2.03×10^{-2}	4.29×10^{-3}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k2)	8.17×10^{-2}	1.95×10^{-3}
Radyal Distorsiyon Parametresi(k3)	-9.70×10^{-2}	-6.18×10^{-4}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p1)	3.07×10^{-3}	1.16×10^{-3}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p2)	-4.29×10^{-4}	-3.87×10^{-3}

4.1.4 L3 Kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreler

Test alanındaki her bir metal çubuğun merkezi total-station yardımıyla lazer ile okunmuştur ve lokal koordinatları belirlenmiştir. İki İHA ile test alanının farklı yükseklik ve açılarda görüntüleri alınmıştır. Bu bağlamda 2.5 m ve 3.5 m mesafeden DJI Phantom 4 Pro için 31' er görüntü alınmıştır. Sırasıyla 0.348 ve 0.480 görüntü piksel hatası elde edilmiştir. Parrot Anafi için 2.5 m den 46 görüntü, 3.5 m 27 görüntü alınmıştır. Bu mesafelerden yapılan dengeleme sonucu sırasıyla 0.379 ve 0.580 görüntü piksel hatası elde edilmiştir. Kullanılan yazılımda diğer test alanlarında belirtilen iş akışı uygulanmıştır. Görüntüler yüklenmiş ve görüntü kalite kontrolleri yapılmıştır. Bu aşamaya kadar yapılan bütün test alanlarında ideal görüntü kalitesi sağlanmıştır. Zayıf

kalite gereği elenen görüntü bulunmamaktadır. Bu adımı takiben 112 adet referans noktasının koordinatları yazılıma girilmiştir. Görüntüler hizalanmıştır ve hizalanmış görüntüler için kamera iç yöneltme ve dış yöneltme parametreleri optimizasyonu başlatılmıştır. Daha sonra elde edilen nokta bulutundan hatalı noktalar kaldırılmış ve sonuç olarak görüntü piksel hataları elde edilmiştir. Perez ve diğ. 2011 yılında bir çalışmada laboratuvar ve arazide yapılan kameranın kalibrasyonu için kullanılan bir yazılımında verilen bilgiye göre Photomodeler eğitimine göre, 1.0 pikselden küçük bir değer iyi bir kalibrasyonu gösterir ve çok iyi kalibrasyonlarda 0.4 pikselden daha küçük olduğu belirtilmiştir. 1.0 pikselin altını baz alırsak elde ettiğimiz bütün kalibrasyon parametreleri ideal piksel hatasındadır.

Yazılımın otomatik olarak gerçekleştirdiği ışın demetleri ile blok dengelemesi ile kendi kendine kalibrasyon sonucu elde edilen kalibrasyon dosyaları iki İHA için aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. L3 test alanında DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi için elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri

DJI P4 PRO	L3.1	L3.2
Odak Uzaklık (f)(piksel)	3633.55	3702.39
Asal Nokta(xo) (piksel)	-127.66	24.337
Asal Nokta(yo) (piksel)	-196.13	-22.527
Radyal Distorsiyon Parametresi (k1)	-5.35×10^{-4}	3.97×10^{-2}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k2)	-2.17×10^{-2}	-1.10×10^{-1}
Radyal Distorsiyon Parametresi(k3)	1.69×10^{-2}	1.13×10^{-1}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p1)	-8.70×10^{-3}	-2.75×10^{-3}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p2)	-2.22×10^{-2}	-2.89×10^{-3}
PARROT ANAFİ	L3.1	L3.2
Odak Uzaklık (f)(piksel)	2862.09	2929.08
Asal Nokta(xo) (piksel)	8.25	-13.989
Asal Nokta(yo) (piksel)	4.849	-32.985
Radyal Distorsiyon Parametresi (k1)	-3.66×10^{-2}	-1.47×10^{-2}
Radyal Distorsiyon Parametresi (k2)	1.08×10^{-2}	1.67×10^{-2}
Radyal Distorsiyon Parametresi(k3)	-4.28×10^{-3}	-8.94×10^{-3}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p1)	-4.88×10^{-3}	-1.76×10^{-3}
Teğetsel Distorsiyon Parametresi(p2)	-3.44×10^{-4}	-2.41×10^{-3}

4.2. Aynı Kameranın Farklı Test Alanlarında Elde Edilen Kamera Kalibrasyon Parametrelerinin Kıyaslaması

DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi İHA' ları için metrik olmayan kameraların farklı kalibrasyon test alanları için odak uzaklığı, asal nokta değerleri, radyal ve teğetsel bozulma parametreleri kıyaslanmıştır. Bütün kamera kalibrasyon işlemleri Agisoft yazılımında yapılmıştır. Yodona G. Ve ark 2020 yılında birkaç yazılımda bu çalışmaya benzer 2B ve 3B test alanlarında kamera kalibrasyonu yorumlamış ve parametre kıyaslamaları yanı sıra Karesel Ortalama Hata ile ilgili sonuçlar hem 3B kalibrasyonda hem de 2B kalibrasyonda Agisoft yazılımı ile iyi sonuçlar alınmıştır. Bu deneylerde kabul edilebilir doğruluğun yanı sıra Agisoft Lens'in, kamera kalibrasyonu için daha hızlı çözüm olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda kullandığımız yazılımın seçimi test alanlarımızda hız sağlamıştır fakat farklı yazılımlarla test edilmemiştir. Kalibrasyon parametreleri her test alanı için farklılık göstermiştir ve her testte farklı bir konfigürasyon ve referans noktası kullanılması sebebiyle beklenen bir durumdur. Test için kullanılan referans noktalarının sayısı dahi değişkendir. Parrot' un kalibrasyon parametreleri DJI 'ya göre birbirine daha yakın değerler olarak elde edilmiştir. Odak uzaklık değeri, exif verisinden gelen kamera odak uzaklık değerine Parrot' da daha yakındır (Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8).

Çizelge 4.7. FC6310 kamera için farklı kalibrasyon test alanlarından elde edilen kalibrasyon parametreleri

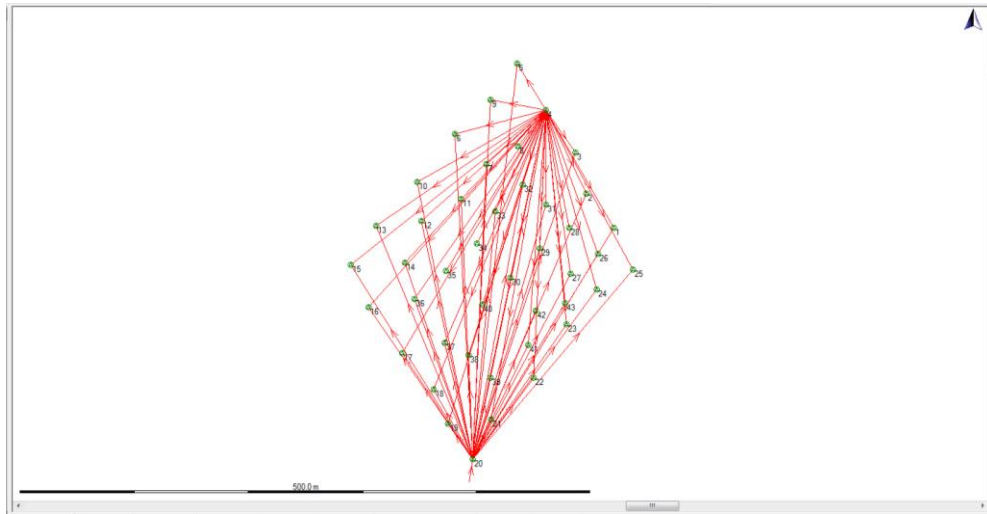
DJI PHANTOM 4 PRO		T4	T3	L2.1	L2.2	L3.1	L3.2
Kamera Kalibrasyon Parametreleri	f(piksel)	3683.63	3662.83	3706.64	3765.06	3633.55	3702.39
	x _o (piksel)	-6.401	-9.553	-23.222	-11.99	-127.66	24.337
	y _o (piksel)	11.862	11.16	-65.73	-3.66	-196.13	-22.527
	k ₁	4.46x10 ⁻³	4.01x10 ⁻³	3.58x10 ⁻²	8.62x10 ⁻²	-5.35x10 ⁻⁴	3.97x10 ⁻²
	k ₂	-7.94x10 ⁻³	1.23 x10 ⁻²	-5.14x10 ⁻²	-2.38x10 ⁻¹	-2.17x10 ⁻²	-1.10x10 ⁻¹
	k ₃	1.06x10 ⁻²	1.35x10 ⁻²	3.87x10 ⁻²	2.31x10 ⁻¹	1.69x10 ⁻²	1.13x10 ⁻¹
	p ₁	-1.71x10 ⁻⁴	1.51x10 ⁻⁴	-1.21x10 ⁻³	-1.42x10 ⁻⁴	-8.70x10 ⁻³	-2.75x10 ⁻³
	p ₂	2.60 x10 ⁻⁴	2.44 x10 ⁻⁴	-4.24x10 ⁻³	3.06x10 ⁻³	-2.22x10 ⁻²	-2.89x10 ⁻³

Çizelge 4.8. Anafı kamera için farklı kalibrasyon test alanlarından elde edilen kalibrasyon parametreleri

PARROT ANAFİ		T4	T3	L2.1	L2.2	L3.1	L3.2
Kamera Kalibrasyon Parametreleri	f(piksel)	2990.88	2990.69	2994.31	3007.38	2862.09	2929.08
	x_o (piksel)	8.22	8.116	26.69	0.786	8.25	-13.989
	y_o (piksel)	-15.41	-17.306	5.687	-51.899	4.849	-32.985
	k_1	-4.77×10^{-3}	-7.27×10^{-3}	-2.03×10^{-2}	4.29×10^{-3}	-3.66×10^{-2}	-1.47×10^{-2}
	k_2	2.21×10^{-2}	2.98×10^{-2}	8.17×10^{-2}	1.95×10^{-3}	1.08×10^{-2}	1.67×10^{-2}
	k_3	-2.89×10^{-2}	-3.44×10^{-2}	-9.70×10^{-2}	-6.18×10^{-4}	-4.28×10^{-3}	-8.94×10^{-3}
	p_1	5.06×10^{-4}	6.64×10^{-4}	3.07×10^{-3}	1.16×10^{-3}	-4.88×10^{-3}	-1.76×10^{-3}
	p_2	-1.40×10^{-3}	-1.70×10^{-3}	-4.29×10^{-4}	-3.87×10^{-3}	-3.44×10^{-4}	-2.41×10^{-3}

4.3. Kontrol Amaçlı Arazide Oluşturulan Test Alanın Değerlendirilmesi

Çalışmamızda kamera kalibrasyonundan elde edilen parametrelerin uygulanacağı alana tesis edilen 43 tane YKN'den arazinin köşe noktalarından iki nokta tayin edilmiştir. Bu tayin edilen noktalar N.20 ve N.5 ülke nirengi ağı noktaları olarak sabit tutulmuş ve toplanan bu veriler ile üçgenler oluşturulmuştur. Her noktada ikişer baz hesaplanmıştır. (Şekil 4.9) TUSAGA-Aktif ağı KNY1 istasyonun ITRF96 datumu 2005.0 epöğündaki koordinatları sabit alınarak GNSS ağ dengelemesi gerçekleştirilmiştir. Dengeleme sonucuna göre noktaların yatay koordinatları için standart sapmalar enlemde en yüksek $\sigma_\phi = \pm 0.0047$ m, $\sigma_\lambda = \pm 0.0122$ m elde edilmiştir. Noktaların TM projeksiyonu 33° dilim orta meridyenine göre projeksiyon koordinatları hesaplanarak X, Y değerleri elde edilmiştir.

**Şekil 4.9.** İki noktadan baz alarak üçgenlerin oluşturulması

N.20 noktasından çıkış alınarak bütün YKN'larına geometrik nivelman yapılmıştır. N20 noktasına tekrar gelindiğinde lup kapanma hatası 0.004 m olarak elde edilmiş ve lup içerisine dağıtılmıştır. N20 noktasının ortometrik yüksekliği sabit alınmak suretiyle bütün YKN'ların ortometrik yüksekleri bulunmuştur.

GNSS gözlemlerinden ve ağ dengelemesinden yatay koordinatlar, geometrik nivelman ölçmelerinden yükseklikler elde edilmiştir. Böylece bütün YKN'lar için 3B (2B+H) koordinatları mm doğrulukla elde edilmiştir. DJI Phantom 4 Pro ve Parrot Anafi ile tesisleri tanımlanmış arazide uçuş gerçekleştirilmiştir.

Hem DJI Phantom 4 Pro için hem de Parrot Anafi için uçuş planlaması %80 yan %65 ileri bindirmede uçulmuştur. İki İHA için farklı YÖA aralıklar da 1.5 cm YÖA'nda yaklaşık 55 m, 2 cm YÖA'nda yaklaşık 75 m, 2.5 cm YÖA'nda yaklaşık 95 m yüksekliklerden görüntüler elde edilmiştir. Yaklaşık ifade edilmesi, iki İHA içinde seçilen YÖA ufak bir değişikliklerle farklı yüksekliğe sebep olmuştur. Bu farkın sebebi YÖA'nın farklı iki kameranın özelliği olan sensör piksel boyutu ve lensin odak uzaklığı ile bağlantısından kaynaklanmıştır. Farklı yüksekliklerde ve 90° açıda alınan görüntülere oluşturulan altı farklı kalibrasyon parametresi ile yazılımda ön kalibrasyonu yapılmış ve sonuç model elde edilmiştir. Ayrıca farklı yüksekliklerde ve her iki İHA için de alınan görüntülerin yazılımın kendi kendine kalibrasyonla ürettiği parametreler ve bu parametrelerinin modelin görüntü ve koordinat bilgisine doğruluğu kıyaslanmıştır.

4.3.1. Uçuş planlaması

Üretilen kamera kalibrasyon parametrelerinin modele etkilerini değerlendirmek için arazide uygulama yapılmıştır. Bu arazi Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokuluna ait engebeli ve 215 m x 215 m boyutlarındadır. 43 adet YKN tesis edilmiştir ve arazi çalışmalarında tesislerin oluşturulmasından bahsedilmiştir. Konum doğruluğu mm doğrulukla elde edilmiştir. Bu durum hem modelin konum doğruluğunu hem de kalibrasyon işlemi sonuçlarının etkilerini iyi anlamda etkilemiştir. Uçuş planı Pix4d Mapper Capture yazılımında hazırlanmıştır. Bu yazılımda uçuş hızı, uçuş yüksekliği, bindirme oranları ve görüntü alım alanının ayrı ayrı tanımladığı 6 uçuş gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10). 3 tanesi farklı yüksekliklerde DJI Phantom Pro 4 İHA ile 3 tanesi de Parrot Anafi için görüntü alımı gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için

kullandığımız aynı iki İHA için arazinin farklı yüksekliklerde 1.5 cm, 2 cm ve 2.5 cm YÖA’ nda her iki İHA içinde görüntü alımı yapılmıştır (Şekil 4.11) . Görüntüler nadirden ve %80 yana %65 ileri bindirmeli olarak ve farklı yüksekliklerde elde edilmiştir.



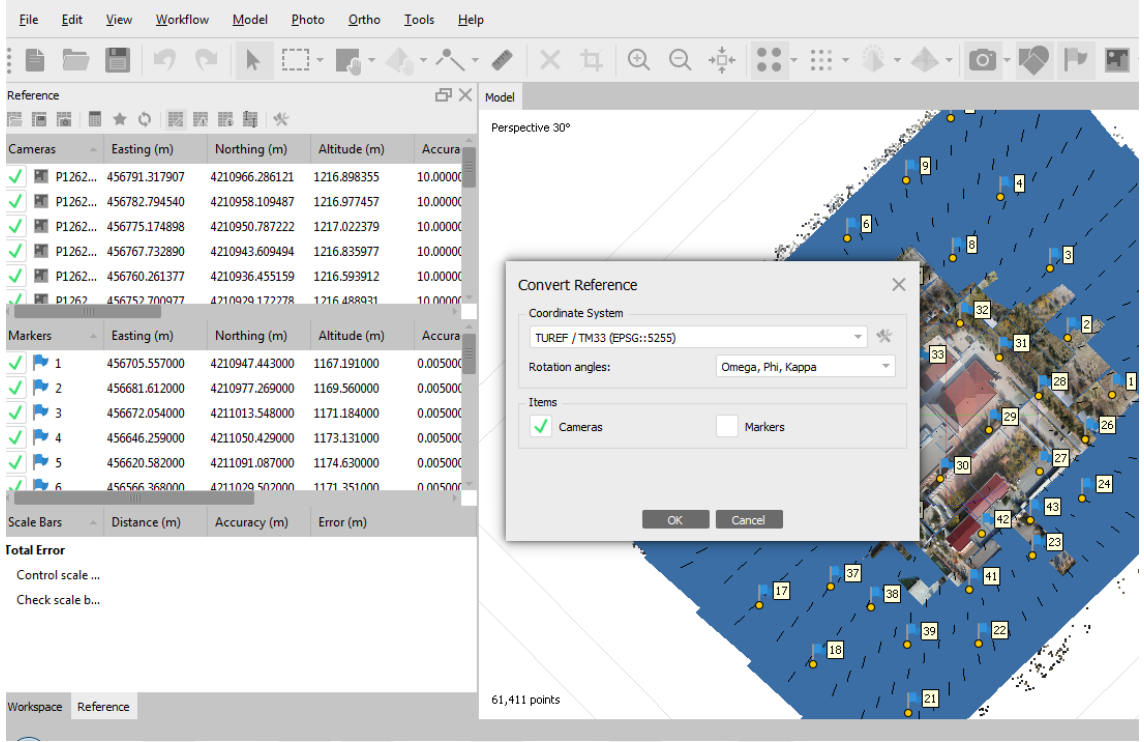
Şekil 4.10. Pix4D Capture uygulaması ile hazırlanan uçuş planları, DJI Phantom Pro4 için farklı yüksekliklerde



Şekil 4.11. Arazide görüntü alımı

4.3.2. Yazılımda görüntülerin değerlendirilmesi

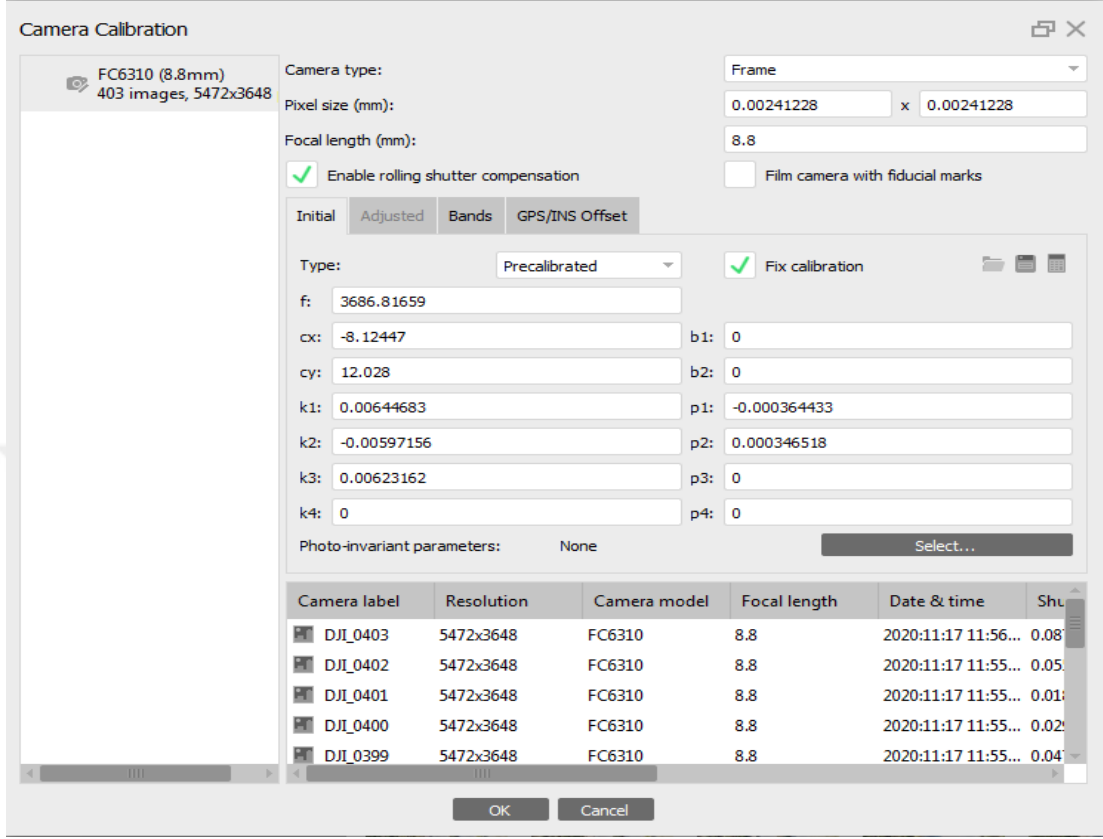
Günümüzde kullanımı devam eden açık kaynak kodlu veya ticari amaç için hazırlanmış birçok yazılımı bulabiliriz. Bu yazılımlardan Agisoft Metasahpe Pro yazılımı çalışmamız için kullanılmıştır. Agisoft Metasahpe Pro İHA ile elde edilen görüntülerin işlenmesi için seyrek nokta bulutu, 3 boyutlu model, sayısal arazi modeli, orto-mozaiik üretimine imkân veren bir yazılımdır. Kullanılan yazılım, araçlar ve kameralar kalibrasyonun etkisini irdelemek için ve başka olumsuz bir farklılık katmamak adına aynı kullanılmıştır. Görüntüleri değerlendirmek için işlem adımlarından öncelikle görüntüler yazılıma yüklenmiştir. Yüklenen görüntülere referans ayarlarından tanımlanan koordinat sistemi WGS 84' ün YKN koordinat sistemi ile görüntü koordinat sistemin uygun hale getirmek için TUREF/TM33 (Turkish National Reference Frame) yani Türkiye Ulusal Referans Çerçevesine dönüşüm yapılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Koordinat sistemi dönüşüm aşaması

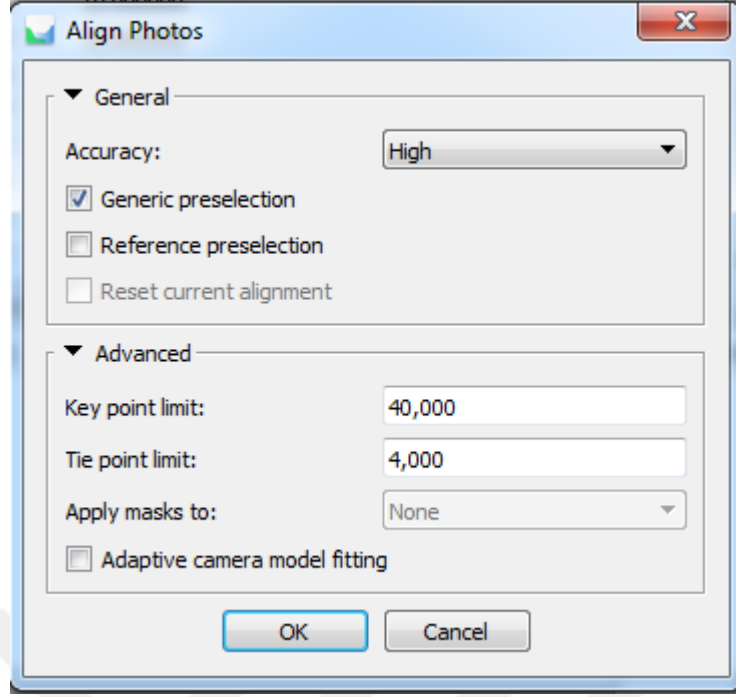
Her iki İHA için 6 tane kalibrasyon test alanından elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri, kontrol amaçlı uygulama alanında yine her iki İHA ile farklı yüksekliklerden elde edilen görüntüler kullanılarak 3B model üretmek için işlem adımları şu şekildedir; Tools menüsünden Camera Calibration penceresinden kaydedilen her test alanı için kamera kalibrasyon dosyasından, ilk T4 ahşap test alanından elde edilmiş değerler yüklenmiştir. Parametrelerin başlangıç değerleri fotoğrafları Hizala veya Kameraları Optimize Et işlemleri sırasında değişmemesi için kalibrasyon penceresinden 'Fix calibration' seçeneği seçilmiştir (Şekil 4.13). Kendi kendine kalibrasyonla ürettiğimiz kalibrasyon parametreleri çalışma alanı için önceden hesaplanan (precalibrated) değerlerle arazi sonuçları incelenmiştir. Kıyaslama için yazılımın sabit kalibrasyon parametresi belirlenmeden kendi kendine kalibrasyon yöntemi ile ürettiği kalibrasyon parametrelerinin etkileri de incelenmiştir. Buradaki exif meta verileri kameranın fabrika verilerinden alınarak tanımlanmıştır. Enable rolling shutter compensation kutusunun seçimi hareketli perde telafisini engellemek için seçilmiştir. Bu durum ve bundan önceki ve sonraki işlem adımları her iki İHA için ve her farklı yükseklik için tekrar tekrar yapılmıştır. Oluşturulan nokta bulutu, sayısal yükseklik modeli ve orto-mozaiik ve bütün işlem adımları raporlanmıştır. Her farklı yükseklikte

kamera için eş test alanlarının raporları kaydedilmiştir. İlave olarak her yükseklik için yazılıma otomatik işlem adımları yaptırılarak sonuçlar kıyaslanmıştır.

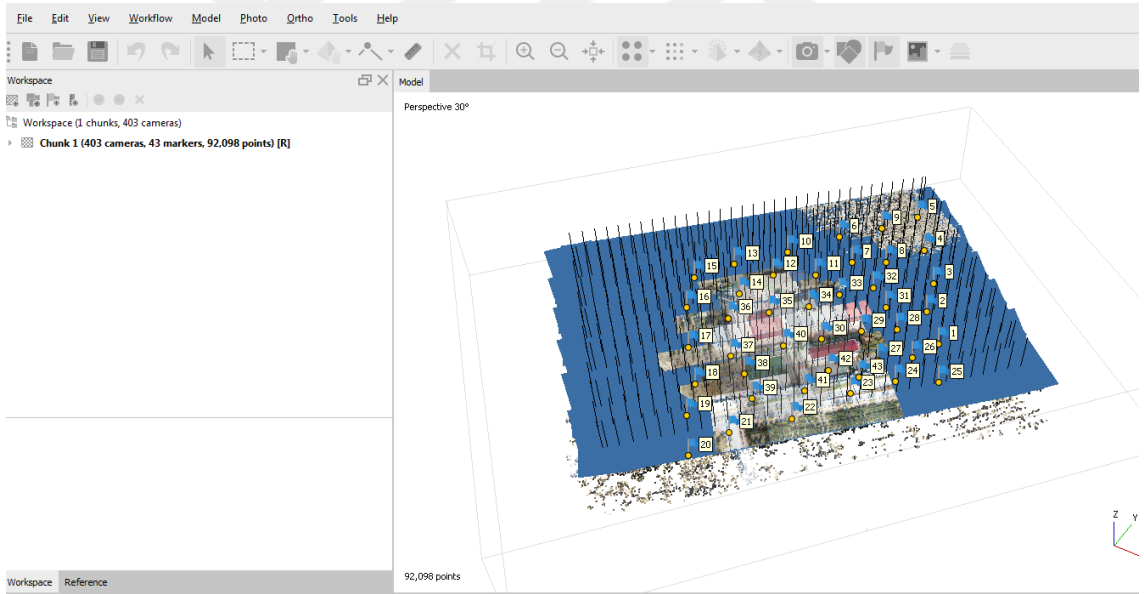


Şekil 4.13. Üretilen kalibrasyon parametrelerini sabitlemek

Görüntülerin hizalanması için Workflow menüsünden Align Photos komutu seçilmiştir (Şekil 4.14). Bu işlem adımı görüntü çiftlerinden ortak noktaları otomatik olarak eşleyerek her bir fotoğrafın kamera konumunu düzeltmekte ve seyrek nokta bulutunu oluşturmaktadır. Açılan pencerede görüntü çözünürlük ayarı yüksek(high) seçilmiştir. Her görüntüdeki eşleştirme noktaları, bağlantı noktası limiti ve nokta bulutun ne sıklıkla oluşturulacağı belirlenmiştir. Fotoğraf sayısının fazla olmasından kaynaklı gecikmeyi engellemek için de generic preselection etkinleştirilmiştir. Fotoğraf adedinin fazlalığı işlem süresini etkilemektedir. Bu otomatik işlem sıralamasında gerçekleşenler; noktalar tespit edilir, görüntü çiftleri seçilir, eşleşen noktalara göre kamera tahmini olarak konumlandırılır. Hizalamayı hızlandıran bu seçimler sonrası seyrek nokta bulutu oluşur ve hizalama sonucu iyileştirilmiş kamera konumları ve dönüklükleri ekranda görünür. (Şekil 4.15).

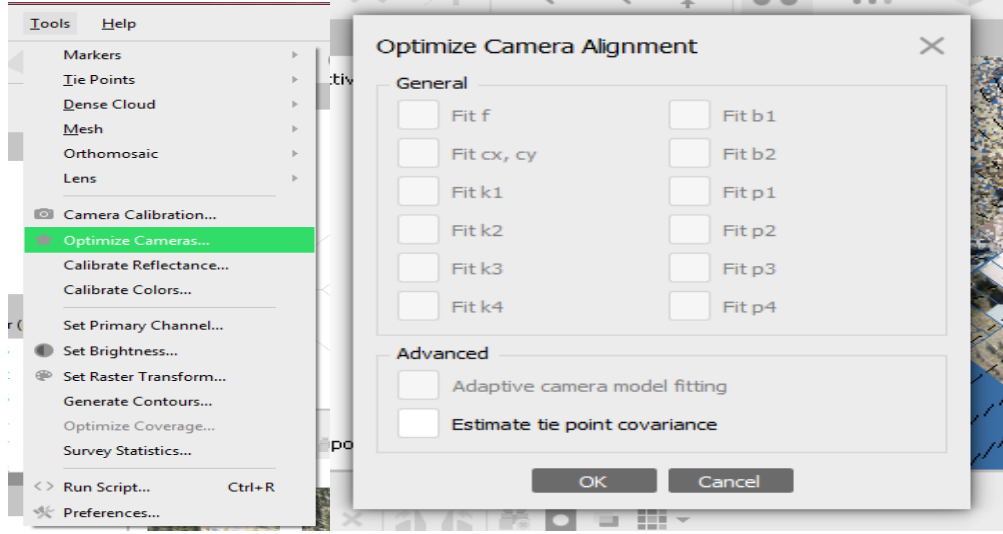


Şekil 4.14. Görüntülerin dengelenmesi için yapılan ayarlar



Şekil 4.15. Seyrek nokta bulutu

Kameranın iç ve dış yöneltme parametrelerini hesaplamak için ve kamera lensindeki distorsiyon hatalarını ölçümleri ve düzeltmelerinin gerçekleştirilmesi amacıyla optimizasyon işlem adımı gerçekleştirilir. Parametreler sabit olduğu için bu işlem adımı Optimize Camera Alignment penceresi seçildiğinde kamera parametrelerini seçilmesine izin verilmemiştir (Şekil 4.16.). Yine de bu işlem adımı yoğun nokta bulutu oluşturma işlemine kadar görüntü koordinatları ve YKN' larının iyileştirilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.16. Kamera iç ve dış parametrelerin optimizasyonu

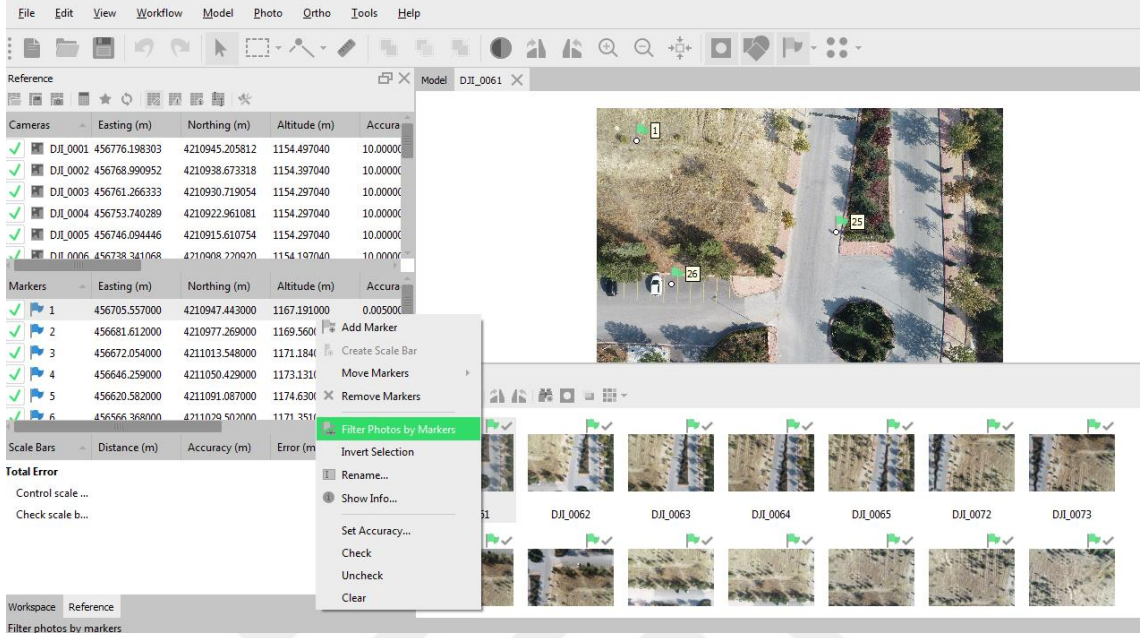
Ortaya çıkacak modeli, coğrafi referans doğruluğunu ve kalibrasyondan kalan sistematik hataları da iyileştirmek için YKN'ları tanımlanmıştır. Reference penceresindeki Import seçeneğinden yazılıma YKN koordinat bilgileri getirilmiştir. Yazılıma .txt uzantılı nokta dosyası yüklenir (Şekil 4.17). Bloкта bağlama noktaları ile birlikte YKN ve denetleme noktaları da ölçülür. Denetleme noktaları dış yöneltme parametrelerinin hesabında kullanılmaz, fotogrametrik nirengi işleminin doğruluğunun değerlendirilmesinde kullanılır. Tesis edilen 43 noktanın 13 tanesi dengeleme işlemi yapılmadan önce Referans penceresinden işaretlenerek dengelemeye bilinmeyen olarak girmiştir. Bu seçilen noktalara Denetleme Noktası(DN) denir, bilinen ve hesaplanan koordinat değerlerinin model doğruluğuna etkisi ve kalitesi bu noktalardan anlaşılır. DN'lerin seçimi arazide homojen dağılmış orta noktalardan seçilmiş geriye kalan 30 YKN köşe ve kenarda yer almıştır.

Şekil 4.17. Koordinat bilgilerinin tanımlanması

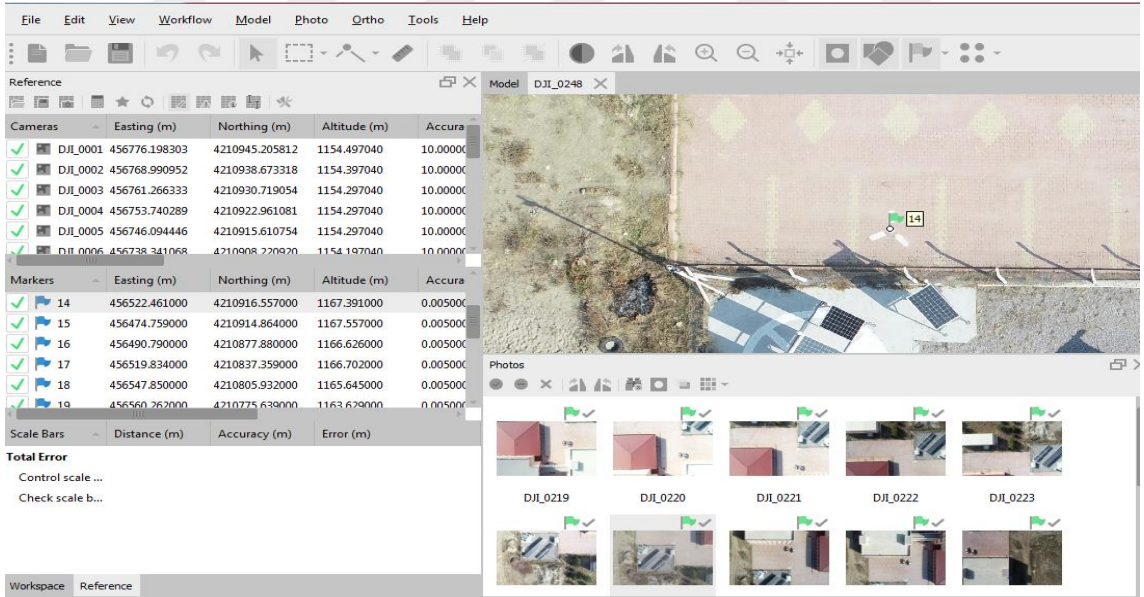
Yüklenen noktaların üzerine sağ tıklanarak Filter photos by markers seçeneği seçildiğinde noktalar yapılan dengeleme ve optimizasyon sayesinde her noktanın ait olduğu görüntüde belirir ve fotoğraf üzerinde işarete yakın bir şekilde filtreleme panelinde görüntülenir. (Şekil 4.18). Yazılım yaklaşık noktayı tahmin edemediğinde ilk noktanın seçimi ve ikinci nokta ile eşleşmesi durumunda tahminler güçlenir. Ya da görüntünün üzerine sağ tıklayarak place markers seçeneğinden içe aktarılan koordinat hangi görünen YKN' na tesis edilecekse bulunur ve işaretlenir (Şekil 4.19). Bu işlem YKN bulunan bütün fotoğraflar için tekrar edilir.

Noktalar üzerine simgelenen mavi bayrak okunmamış nokta anlamına gelmektedir. Hassas bir şekilde noktanın manuel olarak işaretlenmesi ile yeşil bayrak belirir ve nokta okunmuştur. Güneş parlamasından kaynaklı özellikle DJI Phantom 4 Pro ile elde edilen görüntülerde işareti bulmak zorlaşmıştır ve bu noktalar noktaya sağ tıklayarak unpin marker okunmamış nokta durumuna getirilmiştir. Ağaç, yaprak ve gölgelenme gibi durumların söz konusu olduğu noktalarda bindirmeli görüntülerde okunabilen noktalar okunmuş okunulmayan görüntüler işaretlenmemiştir (Şekil 4.20).

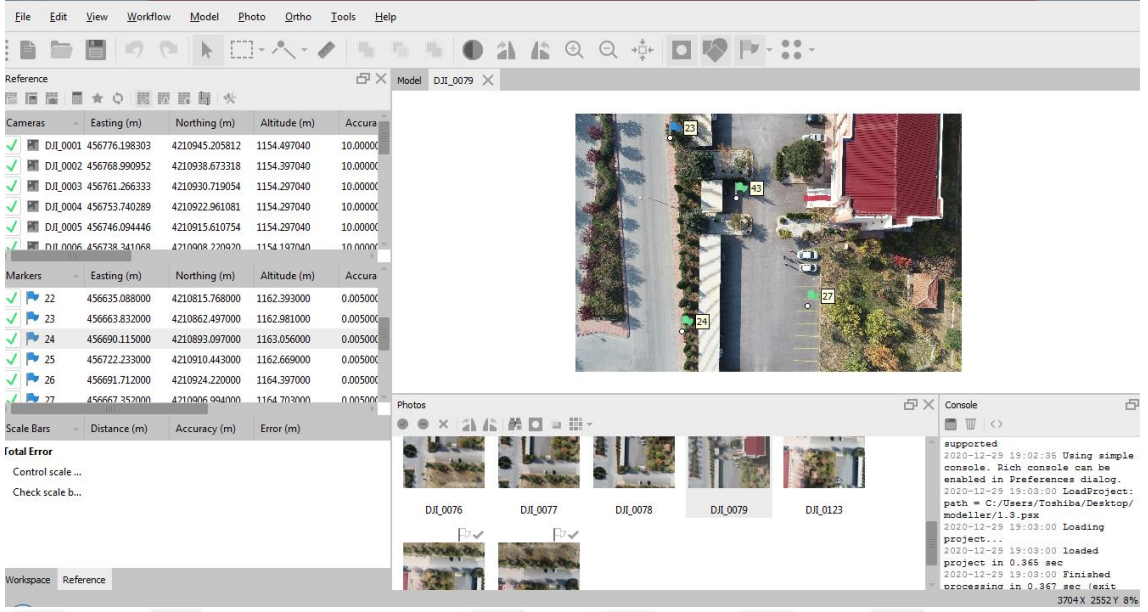
Böyle noktaların okunmaması genel doğruluğa daha iyi etki etmiştir. Son olarak bütün fotoğraflardaki işaretlerin konumları gözden geçirilerek en yüksek doğruluk yakalanmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.18. Noktaların görüntülerde filtrelenmesi

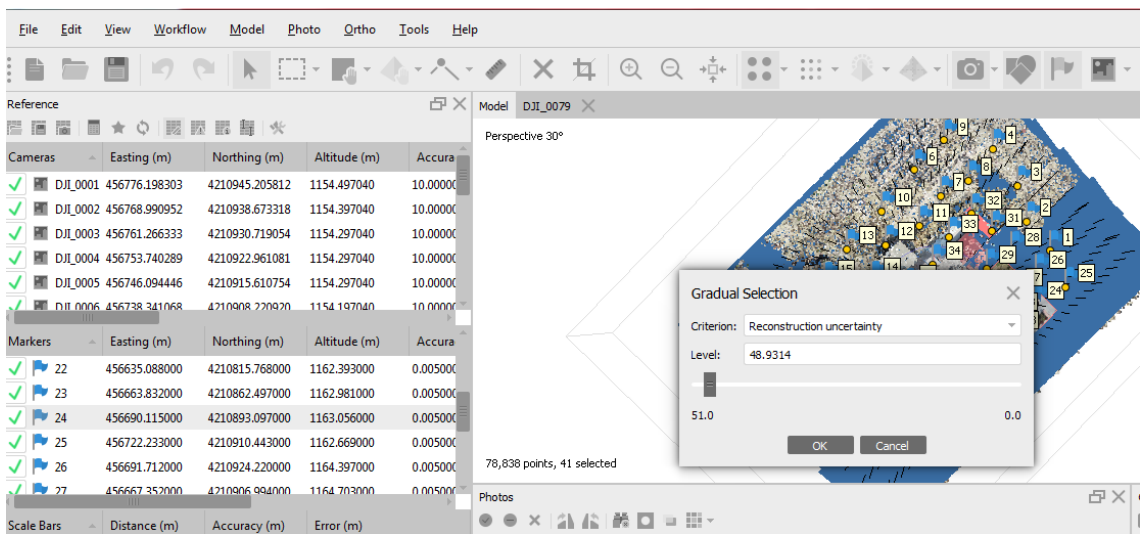


Şekil 4.19. Noktaların işaretlenmesi



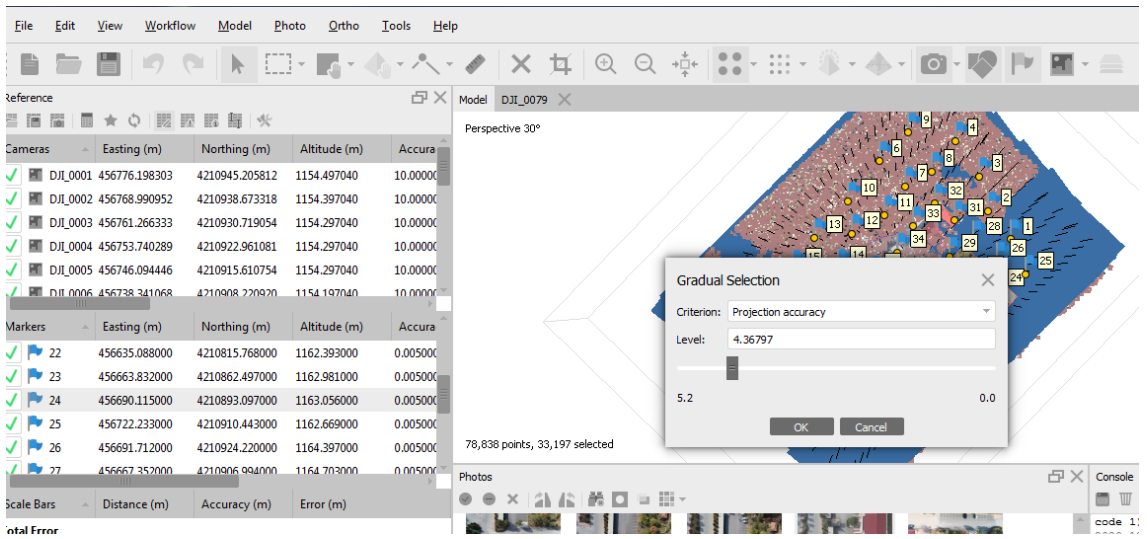
Şekil 4.20. İşaretlenmiş ve işaretlenmemiş noktaların görünümü

Genel modelin geometrisini iyileştirmek için Model menüsünden Gradual Selection aşamalı seçim seçeneği ile noktalar 3 adımda elenir ve bu işlem gerektiği kadar tekrarlanır. Bu söz konusu adımlar USGS UAS Project Office'in yapmış olduğu çalışmadan takip edilmiştir. İlk adım Gradual Selection penceresinden seçilen Reconstruction Uncertainty (Yeniden Yapılandırma Belirsizliği) zayıf geometri nedeniyle kötü noktaları ortadan kaldırmak için uygulanmıştır. Modelin sol altta bulunan nokta sayısının içinden belli seviyede nokta seçilir yukarıda belirtilen proje ofisi şiddetle bu değerin 50 'nin altı seçilmesini tavsiye etmektedir (Şekil 4.21). Seçilen noktalar Delete Selection komutu ile silinmiştir.



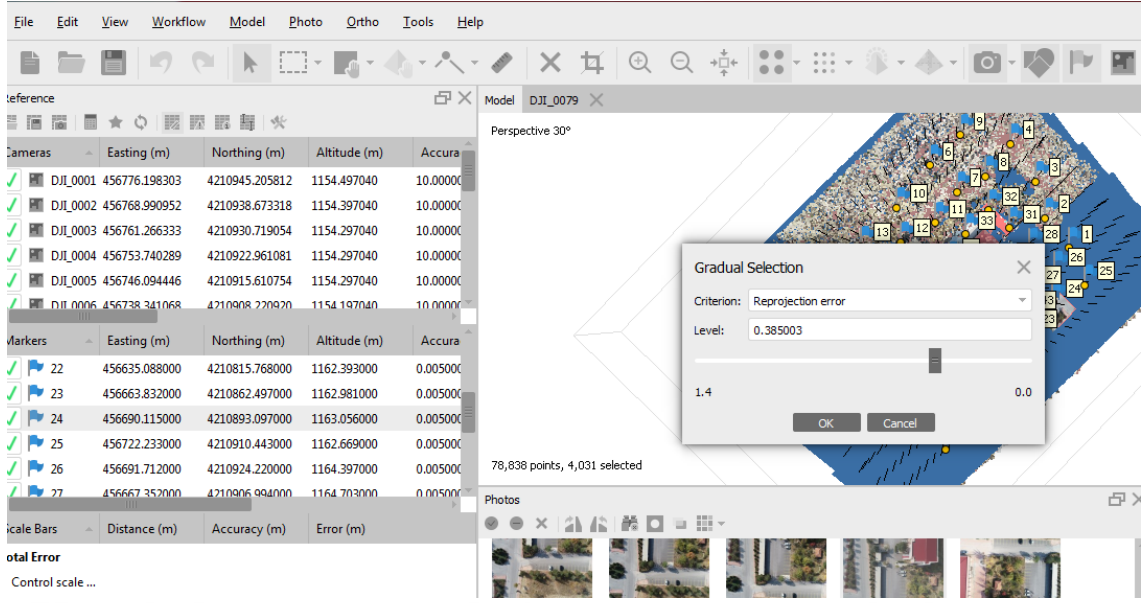
Şekil 4.21. Zayıf geometriden kaynaklı kötü noktaların kaldırılması

Her adımdan sonra kamera optimizasyon işlemi iyileşmeyi görmek için tekrarlanır. Parametrelerin sabitlendiği için bu durum onları etkilemez oluşan kamera ve noktaların konum doğruluğunu iyileştirir. İkinci adımda Gradual Selection penceresinden seçilen Projection Accuracy piksel eşleştirme hatalarından kaynaklanan kötü noktaları elemek için uygulanmıştır. Seviyesi sol alttaki noktaların yüzde 50 düzeyinde seçilmesi tavsiye edilmektedir (Şekil 4.22). Bu şekilde noktalar tekrar seçilir ve Delete Selection komutu ile silinir. Reference penceresinden tekrar optimizasyon yapılmıştır ve piksel hata değerlerinde iyileşme incelenmiştir.



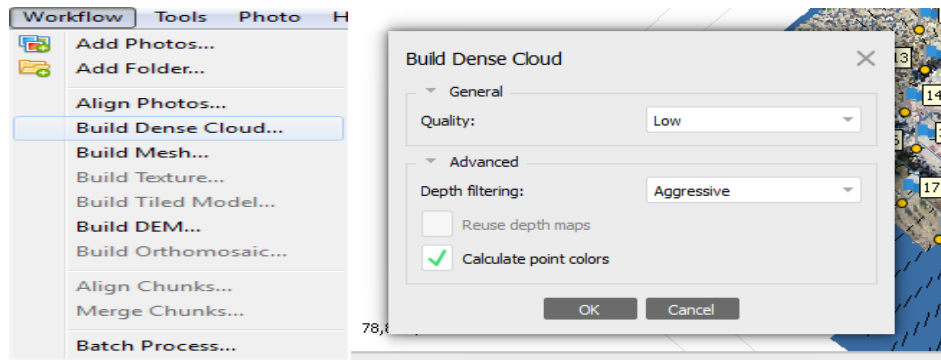
Şekil 4.22. Piksel eşleştirme hatalarından kaynaklanan kötü noktaların kaldırılması

Üçüncü adımda Gradual Selection penceresinden seçilen Reprojection Error (Tekrar Biçimlendirme Hatası) piksel kalıntı hataları nedeniyle kötü noktaların kaldırılması için son aşama olarak gerçekleştirilir. Noktaların yüzde onundan fazlasının seçilmemesi tavsiye edilmiş ve bu işlem ideal görüntü piksel hatası olan 0.3 yakalayana kadar her tekrarda seçimi yüzde onun altında tutarak tekrarlanabileceği belirtilmiştir (Şekil 4.23). Bu çalışmada her adım bir kez uygulanmış ve her aşamada optimize edilmiştir.

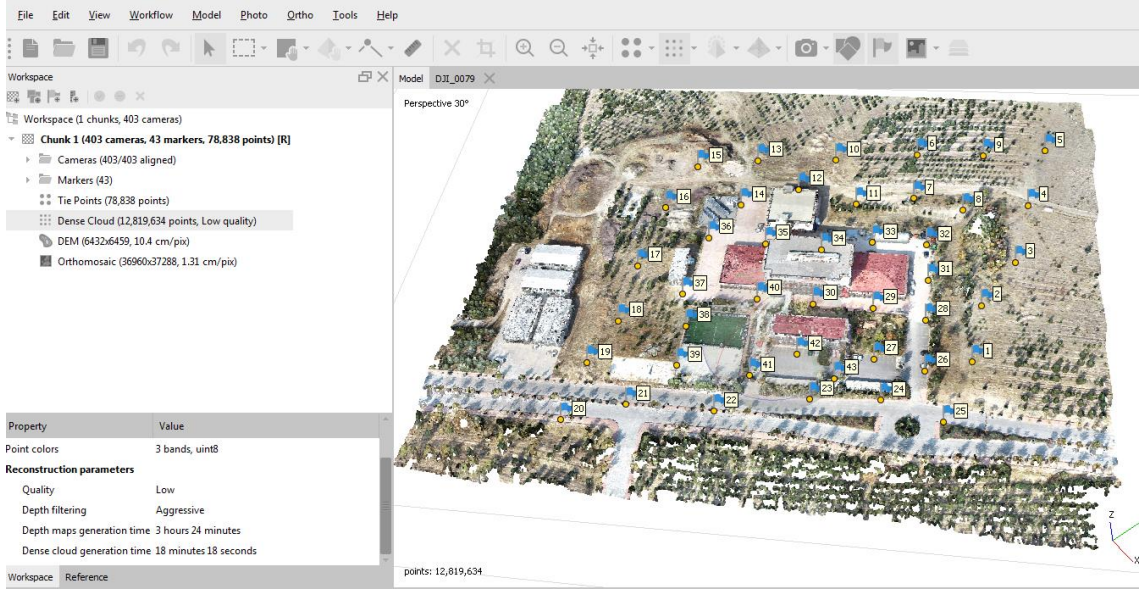


Şekil 4.23. Piksel kalıntı hataları nedeniyle oluşan kötü noktaların kaldırılması

Uygulanan tüm işlem adımlarında kalibrasyon test alanından kendi kendine kalibrasyonla elde edilen parametreler kullanılarak ve sabit tutularak dengeleme yapılmıştır. Modeli doğru bir şekilde oluşturmak için birkaç 3B noktasını hesaplayan ve daha iyi tahmin edilen kamera konumlarından yoğun bir nokta bulutu üretilebilir. Workflow menüsünden Build Dense Cloud butonu seçilir. Açılan pencerede Şekil 4.24'deki gibi ayarlar yapılır. (Şekil 4.24) Build Dense Cloud penceresinden Quality seçeneği yine daha yüksek kalitede işlemler hem zaman hem de donanımsal yapıya sahip iyi bir bilgisayar gerektirdiği için low kullanılmıştır. Depth filtering seçeneği ile alan anlamlı küçük ayrıntılar içermiyorsa, aykırı değerlerin çoğunu ayırmak için Aggressive derinlik filtreleme modunun seçimi önerilmektedir. Eğer model zayıf dokulu ve ufak detaylarla karmaşık bir yapıya sahipse mild seçeneği önerilmektedir ve OK tuşu tıklanarak yoğun nokta bulutu oluşturma işlemi başlatılır (Şekil 4.25).



Şekil 4.24. Yoğun nokta bulutu oluşturma penceresi

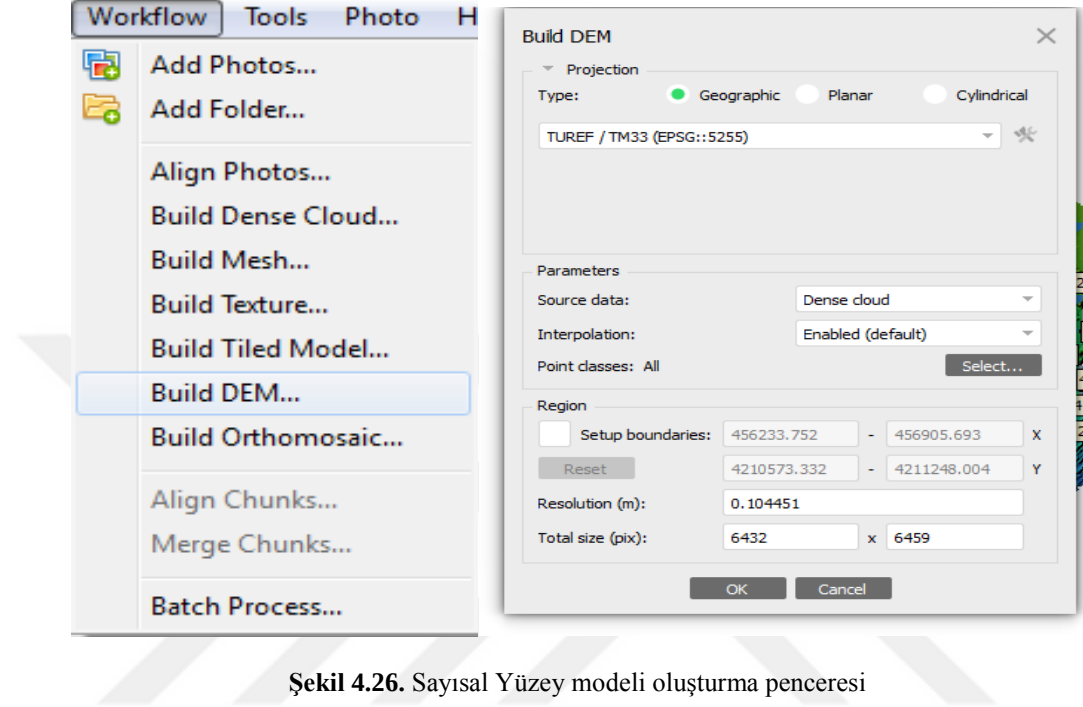


Şekil 4.25. Yoğun nokta bulutu

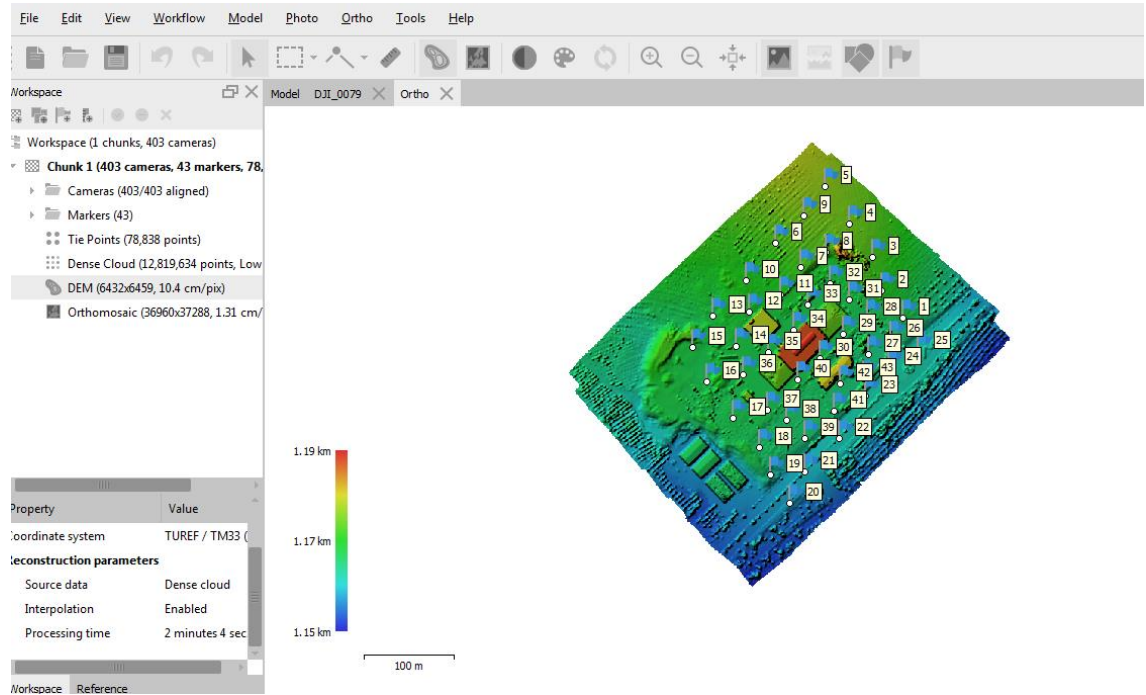
Model kullanılarak istenilen koordinat sisteminde ve projeksiyonda sayısal bir yüzey modeli oluşturulabilir. Bir SYM, bir yüzey modelini, yükseklik değerlerinin düzenli bir ızgarası olarak temsil eder. SYM, yoğun bir nokta bulutu, seyrek nokta bulutu, derinlik haritaları veya bir ağ kullanılarak görüntülenebilir. SYM'leri dijital anlamda nokta ve çizgi elemanları ile arazi yüzeyinin geometrik gösterimini sağlarlar. Yumuşak veya sert kırıklı çizgilerle ve noktalarla tanımlanabilen morfolojik detaylarla tamamlanan, düzenli veya düzensiz dağılımdaki noktalarla arazi yüzeyinin temsil edilmesidir. Noktalar ve çizgiler, aralarındaki lokal enterpolasyonlarla birlikte arazi yüzeyini temsil ederler (Koçak, 1988). Yer yüzeyinin; X, Y, Z koordinatları bilinen çok sayıda özel nokta ile istatistiksel olarak ve sürekli bir formda, bilgisayarda temsilidir. Sürekli bir yüzeyin, sonlu sayıda eleman ile dijital olarak temsilini sağlar. Bilgisayar ortamında yer yüzeyinin temsilidir (Habib, 2008). En doğru sonuçlar, yoğun nokta bulutu verilerine göre hesaplanır.

Kaynak veriler dense cloud (yoğun bulut) veya mesh model (üçgen yüzeyler) kullanılabilir. Fakat daha iyi doğruluk için yoğun bulut kullanımı önerilmektedir. Workflow seçeneğinden Build Dem menüsü açılır. Geographic (Coğrafi) seçilir. Açılır liste bir coğrafi koordinat sistemi seçimine veya özelleştirilmiş bir coğrafi koordinat sisteminin parametrelerini yüklemek için kullanılır. Varsayılan olarak ayarlanan koordinat sistemi, modelin kendisi için önceden seçilen koordinat sistemidir. Source data yükseklik verileri sonuçları, zaman sınırlaması nedeniyle Yoğun Bulut Oluşturma (dense cloud) adımıyla kaçınarak Seyrek Buluttan (sparse cloud) seçilmiştir. Enabled

(default) Etkin (varsayılan) enterpolasyon modu ile yazılım, sahnenin en az bir görüntüde görünen tüm alanları için SYM hesaplar. SYM üretimi için etkin (varsayılan) ayar önerilir. Pencereden seçilen seçenekler aşağıdaki şekildedir (Şekil 4.26). SYM bu parametrelerle üretilmiştir (Şekil 4.27).

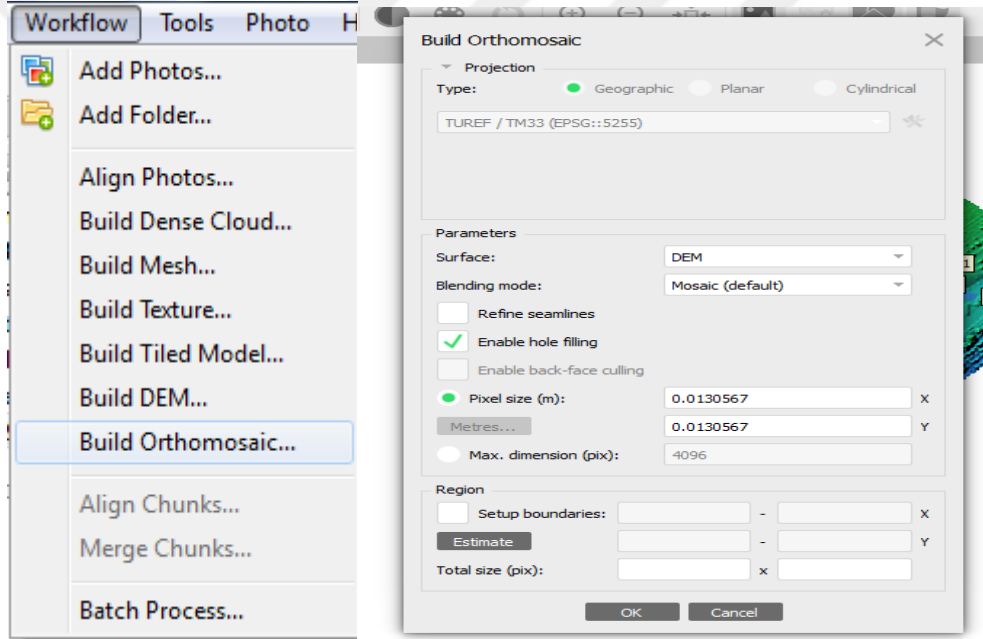


Şekil 4.26. Sayısal Yüzey modeli oluşturma penceresi

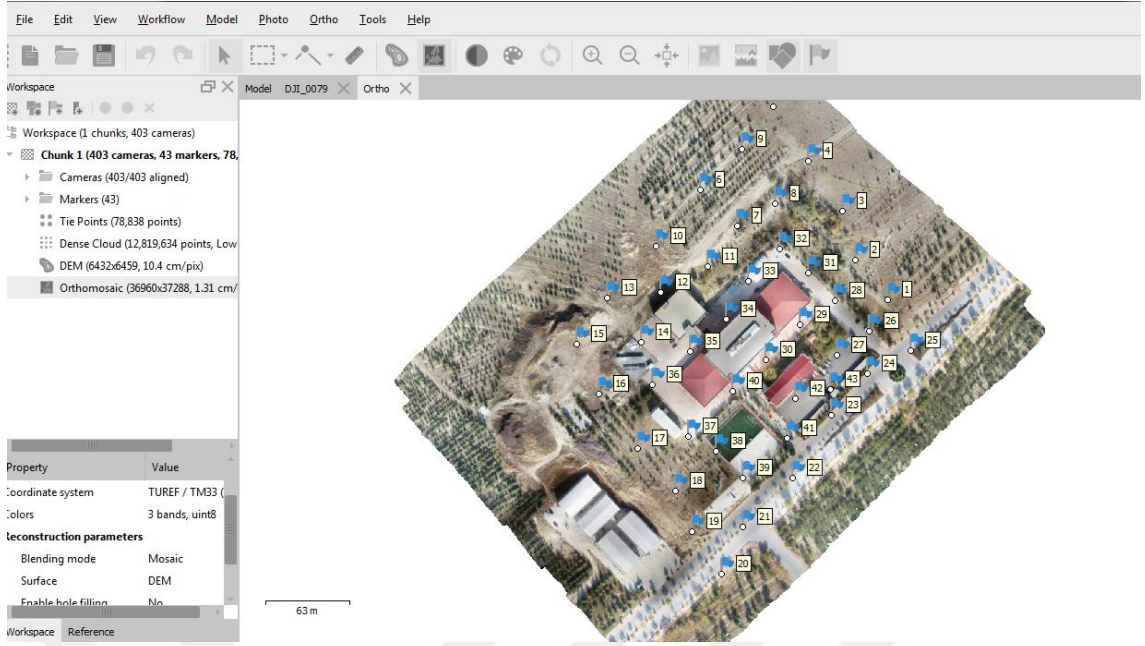


Şekil 4.27. Sayısal yüzey modeli

Model kullanılarak istenilen koordinat sisteminde ve projeksiyonda dijital bir orto-mozaiik oluşturulabilir. Ortomozaik havadan veya uydu görüntülerine göre oluşturulur. Ortomozaik, orijinal görüntülerin ortorektifikasyonu elde edilir (şekil 4.28). Workflow seçeneğinden Build Orthomosaic seçeneği seçilmiştir. Gelen pencerede yine SYM gibi bilinen referans koordinatları olduğu için Geographic (Coğrafi) seçilir. Mozaik bağımsız olarak harmanlanan birkaç frekans alanına veri bölme yaklaşımı uygular. Enable hole filling (Boşluk doldurmayı etkinleştir) bu seçeneği, kaynak yüzey modelinin diğer kısımlarını g lgelendiren çok sayıda küçük parçanın bulunduğu karmaşık yüzey durumunda tuz ve biber etkisinin  nlenmesine yardımcı olduğu için varsayılan olarak etkinleştirilmiştir. Yalnızca çok özel görevler durumunda, işlevi kapatmanız tavsiye edilmektedir. (şekil 4.29).

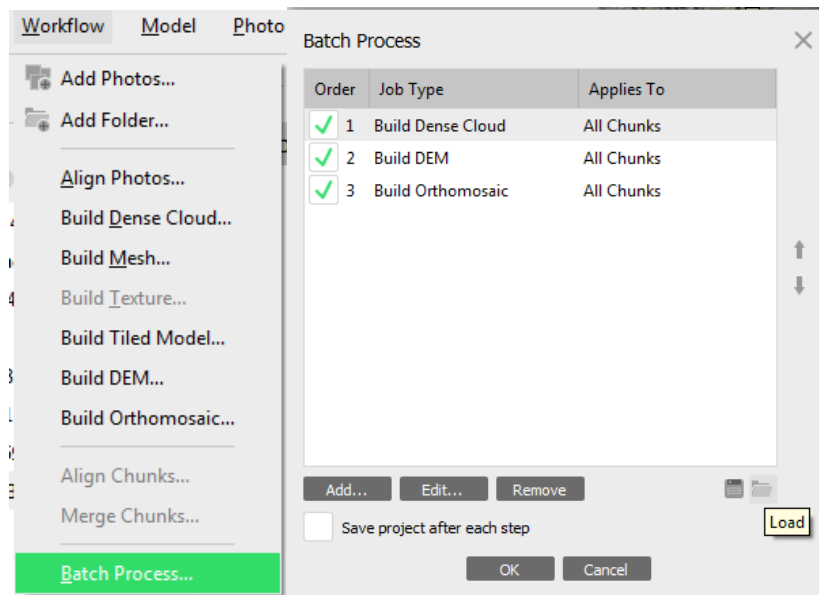


şekil 4.28. Orto-mozaiik oluşturma penceresi



Şekil 4.29. Ortomozaik harita

Bu işlem adımları her kalibrasyon test alanı, her yükseklikte ve her iki farklı İHA için uygulanmıştır. Son üç işlemin yazılımda workflow menüsünden Batch process seçeneğinden işlem adımlarına göre Build Dense Cloud→Build Dem→Build Orthomosaic içeriğinde istenilen özellikler tanımlanarak biraz uzun süren bu işlemler art arda kendini devam ettirmektedir. Bu şekilde diğer test çalışmaları bu iş planının kaydedilmesi ve her seferinde yüklenmesi ile otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 4.30.).



Şekil 4.30. Toplu işlem

Tüm iş akışı belirlenen kamera kalibrasyon parametreleri ile üretilen her bir kalibrasyon parametreleri için her yükseklikte incelenmiştir. Ayrıca her yükseklik için yazılımın otomatik olarak işlem yapılması ve farklı yükseklikte alınan görüntülerin farklı test alanlarına uyarlanmasıyla yazılımın otomatik ürettiği parametrelerle kıyaslanmıştır ve bu durum iki farklı İHA için ve bunlara monte edilmiş iki farklı metrik olmayan kamera için de yorumlanmıştır.

4.3.3. Elde edilen kalibrasyon parametrelerinin arazide kullanılması

Kendi kendine kalibrasyonla yazılımın tamamen kendi otomatikleştirmesi, hizalama ve dengeleme sonucu oluşan modelin dönüşen görüntü koordinatları, YKN ve DN'lerin arasından DN'lerin KOH'larının cm cinsinden değerlerinin ve kendi kendine kalibrasyonla önceden test alanlarında kalibre edilen kameranın kalibrasyon parametrelerinin yazılımda ön kalibrasyon işlemine göre üretilen modelin dönüşen DN'lerin KOH'ları kıyaslanmıştır. Test alanlarında kameranın kalibrasyonu da, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda(TBMYO) yapılan her iki İHA için farklı yükseklikteki uçuşlarda eş zamanlı olarak yapılmıştır. Farklı test alanlarından yapılan kalibrasyon parametrelerinin, farklı yüksekliklerde görüntü alınan bir arazide uygulanarak otomatik kendi kendine kalibrasyonla yapıldığındaki doğruluğu kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamadan ötürü DN'lerin farklılaşma etkisi incelenmediği için ve aynı etkiyi göstermesi için bütün dengeleme işlemlerinde aynı 13 DN seçilmiştir. Aşağıdaki çizelgede DJI Phantom 4 Pro İHA' nın model doğruluğu DN'ler ile incelenmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. DJI Phantom Pro4 İHA için farklı yüksekliklerden alınan görüntülerin farklı kalibrasyon test alanlarından elde edilen dengelenmiş DN'lerinin KOH'ları

Kalibrasyon Test Alanları	TEST ALANLARI(DJI PHANTOM 4 PRO)								
	TBMYO1 YÖA=1.5 cm			TBMYO2 YÖA=2 cm			TBMYO3 YÖA=2.5 cm		
	Denetleme Noktaları(DN) KOH			Denetleme Noktaları(DN) KOH			Denetleme Noktaları(DN) KOH		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
T4	0.94 cm	1.16 cm	3.21 cm	1.39 cm	1.15 cm	3.64 cm	1.10 cm	0.69 cm	2.59 cm
T3	1.87 cm	1.12 cm	8.15 cm	1.96 cm	1.32 cm	8.08 cm	1.40 cm	1.15 cm	8.06 cm
L3.1	2.54 cm	3.09 cm	4.55 cm	1.90 cm	2.57 cm	6.42 cm	2.15 cm	2.36 cm	5.97 cm
L3.2	1.91 cm	2.79 cm	7.97 cm	2.68 cm	2.73 cm	7.46 cm	3.07 cm	2.65 cm	7.79 cm
L2.1	2.92 cm	2.84 cm	6.83 cm	3.00 cm	1.93 cm	7.84 cm	4.34 cm	3.82 cm	8.07 cm
L2.2	2.34 cm	1.46 cm	8.84 cm	1.36 cm	2.42 cm	7.00 cm	3.47 cm	1.96 cm	8.91 cm
Kendi kendine kalibrasyon	0.98 cm	0.79 cm	1.97 cm	1.24 cm	0.90 cm	1.87 cm	1.15 cm	0.91cm	1.80 cm

Önceden kalibre edilen kamera ile modelin dengelemesinde DN'lere etkileri kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama, BÖHKBÜY Madde 61'de 'Blok dengeleme sonucunda, denetleme noktalarının karesel ortalama hataları üretilecek harita veya ortofoto ölçeği için gerekli yer örnekleme aralığı cinsinden; X ve Y koordinatlarında $\pm 0.75 \times YÖA$ (dahil)'dan ve Z koordinatında $\pm 1 \times YÖA$ (dahil)'dan küçük olmalıdır. Denetleme noktalarında maksimum farklar; X ve Y koordinatlarında $\pm 1.5 \times YÖA$ (dahil)'dan ve Z koordinatında $\pm 2 \times YÖA$ (dahil)'dan küçük olmalıdır.' ifadesine göre yapılmıştır. Yönetmelikteki bu doğruluk kriterine göre yazılıma herhangi bir veri girilmeden kendi kendine kalibrasyon işlemi yapıldığında elde edilen DN'lerin KOH'ları yatay ve düşey olarak genele göre bakıldığında iyi sonuçlar vermiştir. T4 test alanının kontrol amaçlı araziye, kalibrasyon parametrelerinin uygulanması sonucunda da yatay ve düşey de yönetmelikteki doğruluklar sağlamıştır. Genel olarak düşeyde hata bütün test alanlarında biraz fazla gözlemlenmiştir. Arazide 3B test alanı olan T4' den diğer test alanlarına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca yükseklik arttıkça da genel olarak bütün test alanlarında yatayda yönetmelik kriterleri sağlamıştır. Genel olarak düşeyde KOH değerleri yüksek fakat arazide 3B kalibrasyon olan T4 ve kendi kendine kalibrasyonda düşeyde değerler daha iyi gözlemlenmiştir. Cramer 2017 yılındaki bir çalışmada 9 farklı kameranın kalibrasyonun sonuçlarını incelemiştir. Kullandığımız

DJI kameranın bir alt sürümü DJI Phantom 3 için arazideki performansının iyi olduğunu ve laboratuvar da ön kalibrasyona gerek olmadığını belirtmiştir. Çalışmamızda da DJI'nın yeni sürüm modeli kullanılmıştır. DJI Phantom 4 Pro için M.Cramer çalışmasına benzer olarak laboratuvar da ön kalibrasyona gerek olmadan kendi kendine kalibrasyon yeterli görülmüştür. Bunun yanı sıra laboratuvar da yapılan farklı mesafelerden kalibrasyonda hem 2B hem de 3B test alanlarından uzak mesafeden kalibrasyonla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kalibrasyon için önceden hazırlanan test alanlarının zaman ve maliyet harcanarak oluşturulmasına gerek olmadığı görülmüştür. Bunu destekleyen bir fikirde Fraser 1997 kendi kendine kalibrasyon üzerine incelemeler yapmış ve bu yöntemin basit olduğunu dile getirmiştir. Sonuçlarda bu basit yöntemi doğruluk açısından da tercih edilebilir olduğunu göstermiştir. Ve arazi sonuçlarına olumsuz bir etken daha zaman kaybına sebep olabilecek DJI ile görüntü alımında eş zamanlı kullanılan Parrot İHA' ya göre güneş parlaması fazla olmasını referans noktalarının seçimi zorlaştırmaktadır. Parrot' un görüntü kalitesi daha iyidir. Aşağıdaki çizelge Parrot Anafi İHA' nın model doğruluğu DN'ler ile incelenmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Parrot Anafi İHA için farklı yüksekliklerden alınan görüntülerin farklı kalibrasyon test alanlarından elde edilen dengelenmiş DN'lerinin KOH'ları

Kalibrasyon Test Alanları	TEST ALANLARI(PARROT ANAFİ)								
	TBMYO1 YÖA=1.5 cm			TBMYO2 YÖA=2 cm			TBMYO3 YÖA=2.5 cm		
	Denetleme Noktaları(DN) KOH			Denetleme Noktaları(DN) KOH			Denetleme Noktaları(DN) KOH		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
T4	1.24 cm	0.93 cm	2.14 cm	1.29 cm	0.85 cm	1.70 cm	1.14 cm	1.15 cm	2.17 cm
T3	1.26 cm	0.85 cm	1.77 cm	1.24 cm	1.18 cm	1.71 cm	1.33 cm	1.11 cm	2.24 cm
L3.1	2.79 cm	1.81 cm	4.65 cm	3.97 cm	2.55 cm	5.29 cm	2.86 cm	1.97 cm	3.21 cm
L3.2	1.91 cm	1.35 cm	4.02 cm	2.50 cm	1.70 cm	7.56 cm	2.22 cm	1.60 cm	7.43 cm
L2.1	1.35 cm	1.17 cm	7.18 cm	0.92 cm	2.05 cm	5.93 cm	1.24 cm	1.75 cm	5.21 cm
L2.2	1.26 cm	1.36 cm	7.43 cm	1.84 cm	1.91 cm	8.15 cm	1.93 cm	1.63 cm	5.32 cm
Kendi kendine kalibrasyon	1.28 cm	1.05 cm	1.66 cm	1.61 cm	0.90 cm	2.97 cm	2.80 cm	3.64 cm	4.23 cm

Parrot İHA'nın piksel hataları DJI göre daha iyi sonuç vermiştir. Parrot'dan elde edilen kalibrasyon parametrelerinin Exif verisinden gelen odak uzaklığına yakın

değerler olması ve görüntü kalitesi daha iyi olması etken olabilir. Yine Parrot için de kendi kendine kalibrasyon iyi sonuç vermiştir. DJI göre neredeyse bütün test alanlarımızla gerçekleştirilen kalibrasyon sonuçlarının modele etkisi kendi kendine kalibrasyon sonuçlarına daha yakın ve kabul edilebilir doğrulukta elde edilmiştir. Düşey yönde burada da KOH değerleri kabul edilebilir doğruluktan fazla elde edilmiştir. Aynı şekilde laboratuvar da uzak mesafe kalibrasyon daha iyi sonuç vermiştir. Literatürde Parrot için kalibrasyon incelemesi görülmemiştir. Çalışmamızda görüleceği üzere daha gündemde olan DJI göre sonuçların gayet iyi olduğu gösterilmiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Maliyeti yönüyle İHA’larda metrik kamera kullanılamasa da, metrik olmayan entegre kameralar için iç yöneltme parametrelerinin otomatik hesaplanmasına yönelik donanım ve yazılımlar giderek gelişmektedir. Bu maliyet kolaylığının yanında otomatikleşen bu kalibrasyon, görüntülerden doğru iç yöneltme parametreleri ve güvenilir 3B modeller üretebilmek için önemli bir ilk adımdır. Bu adımın tanımlanan görüntü koordinat, referans koordinat bilgisi gibi model öncesi tanımlanan her iş akışının başlangıç zinciri olarak doğru parametrelerle elde edilmesi önemlidir.

Kamerayı kalibre etmek için iç yöneltme parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Otomatikleşen bu işlem adımı uygulanan yöntem kendi kendine kalibrasyon olup, yazılımın ürettiği parametrelerle 3B model üretilebilir. Ticari olarak yenilikçi pazara sahip ve sık kullanılan İHA’larından DJI ve Parrot laboratuvarında ve arazideki test alanlarında yapılan kamera kalibrasyon sonucu elde edilen parametreleri farklılıklar göstermiştir. Bu test alanlarında yapılan kalibrasyona göre kendi kendine yapılan kalibrasyon işleminden elde edilen DN’lerin KOH’ları kıyaslanmıştır. Bu çalışmada; her iki İHA için de oluşturulan kalibrasyon test alanları ile önceden kalibre edilen kameranın kullanılması mı yoksa kendi kendine yapılan kalibrasyonla mı model doğruluğuna daha iyi etki eder? sorusunun cevabı farklı kamera kalibrasyon test alanları ile incelenmiştir. İki İHA içinde BÖHHBÜY’e göre kendi kendine kalibrasyon kabuledilebilir doğruluğu göstermiştir. Oluşturulan test alanları ile de bunun sağlandığı durumlar da olmuştur. Fakat zaman alarak oluşturulan bu test alanları bunun yanı sıra maliyete sebep olmaktadır. Bu yüzden kendi kendine kalibrasyon tercih edilebilir olduğu görülmüştür. Parrot için neredeyse bütün test alanları kabul edilebilir doğruluğu sağlamıştır. Fakat DJI da 3B arazi ve laboratuvarında yapılan kalibrasyon değerleri daha iyi olduğu görülmüştür.

YKN’lerin yüksek doğrulukla elde edilmesi ve blok dağılımının iyi olması da ürettiğimiz kalibrasyon parametrelerinin sistematik hatalarını da iyileştirerek otomatik kalibrasyon dahil daha iyi sonuçlar elde etmemize katkı sağlamıştır. Birçok kalibrasyon parametresi üretilmiş ve sonuçlarının ne kadar değişime sebep olabileceği gösterilmiştir. Bu adımın önemi vurgulanmıştır. Oluşturulan test konfigürasyonlarının dağılımı, doğru referans noktası alımı, aynı zaman ve hava şartlarında uygulanması, yazılımda manuel olarak referans noktalarının tayini gibi her aşamanın hassasiyetinden daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Otomatikleşen kendi kendine kalibrasyon yönteminin kabul edilebilir

doğrulukta olduğu ve bunun yanı sıra oluşturulan kalibrasyon test alanları ile de bu doğruluk sağlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Abdullah, S., Tahar, K. N., Rashid, M. F. A., Osoman, M. A., & Technology. (2019). Camera Calibration Performance on Different Non-metric Cameras. *Pertanika Journal of Science*, 27(3).
- Brown, D. (1971). Close-range camera calibration Photo. In: Engng.
- Cramer, M., & Leinss, B. (2016). Welche ist am besten?—Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. *J UAV-Vermessung mit unbemannten Flugsystemen: Beiträge zum*, 148.
- Cramer, M., Przybilla, H., & Zurhorst, A. (2017). UAV cameras: Overview and geometric calibration benchmark. *J The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 42, 85.
- DJI. (2020). DJI Phantom 4 Pro. Retrieved from <https://www.dji.com/phantom-4-pro>
- Fraser, C. S. (1997). Digital camera self-calibration. *J ISPRS Journal of Photogrammetry Remote sensing*, 52(4), 149-159.
- Dietrich, J.T., (2014). Applications Of Structure-From-Motion - Photogrammetry To Fluvial Geomorphology, Doktora Tezi, Departmenf Of Geography and the Graduate School of The University of Oregon, Oregon.
- Fryskowska, A., Kedzierski, M., Grochala, A., & Braula, A. (2016). CALIBRATION OF LOW COST RGB AND NIR UAV CAMERAS. *J International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*
- Gašparović, M., & Gajski, D. (2016). *Two-step camera calibration method developed for micro UAV's*. Paper presented at the XXIII ISPRS Congress.
- Gerke, M., & Przybilla, H.-J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *J Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2016(1), 17-30.
- Gruen, A., & Huang, T. S. (2013). *Calibration and orientation of cameras in computer vision* (Vol. 34): Springer Science & Business Media.
- Hamid, N. A., & Ahmad, A. (2014). *Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Hastedt, H., & Luhmann, T. (2015). Analyse der Kamerakalibrierung mit OpenCV. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik—Beiträge der Oldenburg3D-Tage. In: Wichmann Verlag.
- Hastedt, H., & Luhmann, T. (2015). Investigations on the quality of the interior orientation and its impact in object space for UAV photogrammetry. *J International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 40.
- Kraft, T., Geßner, M., Meißner, H., Przybilla, H.-J., & Gerke, M. (2016). *Introduction of a photogrammetric camera system for rpas with highly accurate gnss/imu information for standardized workflows*. Paper presented at the XXII ISPRS Congress, Technical Commission III.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2013). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*: Walter de Gruyter.
- Moe, D., Sampath, A., Christopherson, J., & Benson, M. (2010). *Self calibration of small and medium format digital cameras*: na.

- Pérez, M., Agüera, F., & Carvajal, F. (2011). Digital camera calibration using images taken from an unmanned aerial vehicle. *J International archives of the photogrammetry, remote sensing spatial information sciences*, 38(1/C22).
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., & Gerke, M. (2015). Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. *J Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V*, 24, 45-54.
- Remondino, F., & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *J International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 36(5), 266-272.
- Takahashi, Y., & Chikatsu, H. (2015). Camera Calibration for Uav Application Using Sensor of Mobile Camera. *J The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 40(4), 239.
- Triggs, B. (1998). *Autocalibration from planar scenes*. Paper presented at the European conference on computer vision.
- Ulvi, A. (2015). *Metrik olmayan dijital kameraların hava fotogrametrisinde yakın resim çalışmalarında (yere yakın yüksekliklerde) kullanılabilirliği üzerine bir çalışma*. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Versus. (2020). DJI Phantom 4 Pro vs Parrot Anafi. Retrieved from <https://versus.com/en/dji-phantom-4-pro-vs-parrot-anafi>
- Weng, J., Cohen, P., & Herniou, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *J IEEE Transactions on pattern analysis machine intelligence*, 14(10), 965-980.
- Yodono Garcia, M. V., Cândido de Oliveira, H., Fernandes, R. F., & Cortijo Costa, D. (2020). Evaluation of Different Methods for Non-Metric Camera Calibration. *J Anuario do Instituto de Geociencias*, 43(1).
- Yusoff, A. (2015). *Camera Calibration for Unmanned Aerial Vehicle Mapping*. MSc Thesis). Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia,
- Yusoff, A. R., Ariff, M. F. M., Idris, K. M., Majid, Z., & Chong, A. K. (2017). Camera calibration accuracy at different UAV flying heights. *J The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, 42, 595.
- Zhang, Z. (1999). *Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations*. Paper presented at the Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision.