

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOGRAMETRİK DİJİTAL HAVA KAMERALARINDA
KALİBRASYON PARAMETRELERİNİN ZAMANSAL
DEĞİŞİM ANALİZİ

Abdullah KAYI

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeodezi ve Fotogrametri Programı

Danışman

Prof. Dr. Bülent BAYRAM

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOGRAMETRİK DİJİTAL HAVA KAMERALARINDA
KALİBRASYON PARAMETRELERİNİN ZAMANSAL DEĞİŞİM
ANALİZİ**

Abdullah KAYI tarafından hazırlanan tez çalışması 12.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeodezi ve Fotogrametri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bülent BAYRAM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bülent BAYRAM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Uğur ACAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tolga BAKIRMAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zaide DURAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Bülent BAYRAM sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Fotogrametrik Dijital Hava Kameralarında Kalibrasyon Parametrelerinin Zamansal Değişim Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Abdullah KAYI

Bu alışma, Harita Genel Müdürlüğü ile Yıldıız Teknik niversitesi arasında haritacılık alanında işbirliği protokolü kapsamında 12.04.2017 tarihinde imzalanan “Fotogrametrik Dijital Geniş Formatlı Hava Kameralarında Kalibrasyon Parametrelerinin Zamansal Değişimin Analizi” adlı proje ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tez sürecim hem akademik düşünce hem de hayat görüşü olarak olgunlaşmamı sağlayan bir süreç olmuştur. Bu süreçte yaşadıklarım ve öğrendiğim bilgiler bundan sonra devam edecek hayat mücadelesinde yolumu aydınlatacaktır.

Tez konusunu belirleme sürecinde bana ve çalışmalarına inanan, tezin yazımı sürecinde benden desteğini esirgemeyen ve bu zor süreci sağlıklı yürütmemi sağlayan Tez danışmanım Prof. Dr. Bülent BAYRAM'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Jüri üyelerine vermiş oldukları katkılardan dolayı teşekkür ederim. Burada Prof. Dr. Dursun Zafer Şeker'e ayrı bir parantez açmak istiyorum. Tez yazımı ve tezden üretilen yayınlarda yaptığımız sayısız çevrim içi toplantılarında düşünce ve bilgilerini benimle paylaştığı için kendisine sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

Benim için çok zorlu geçen bu süreçte beden desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler.

Abdullah KAYI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	35
1.3 Hipotez	36
2 BORESİGHT DÖNÜKLÜK AÇILARININ ZAMANSAL DEĞİŞİM ANALİZİ	37
2.1 Giriş	37
2.2 Boresight Dönüklük Açılarının Tanımı ve Belirlenmesi	37
2.3 Operasyonel Kalibrasyon Yöntemi	38
2.4 Boresight Dönüklük Açılarının Kararlılığı	39
2.5 Boresight Dönüklük Açılarının Yıllık Değişiminin Analizi	41
2.5.1 UCE-100 Geniş Formatlı Dijital Hava Kamerası Kalibrasyonu	42
2.5.2 UCE-80 Geniş Formatlı Dijital Hava Kamerası Kalibrasyonu	49
3 FARKLI YÖNTEMLERLE BELİRLENEN BORESİGHT DÖNÜKLÜK AÇILARININ DOĞRUDAN COĞRAFI KONUMLANDIRMA VE BİRLEŞTİRİLMİŞ ALGILAYICI YÖNELTMESİ DOĞRULUĞUNA ETKİSİ	66
3.1 Giriş	66
3.2 Farklı Yöntemlerle Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi	67
3.2.1 Özel Kalibrasyon Test Uçuşuyla Boresight Dönüklük Açılarının ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Hesaplanması	68
3.2.2 Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Işın Demetleriyle Blok Dengelemesine Ek Bilinmeyen Olarak Tanımlanarak Hesaplanması	68
3.2.3 Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Dengelenmiş Dış Yönelme Elemanları ile Yaklaşık Dış Yönelme Elemanları Arasındaki Farkların Ortalamasıyla Belirlenmesi	71
3.3 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Test Bölgesinde Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya ve Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi	72

3.3.1	Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Test Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi	73
3.3.2	Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Test Alanında Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi	76
3.4	Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Proje Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya ve Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi	78
3.4.1	Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları Ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Proje Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi	82
3.4.2	Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları Ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi	85
4	SONUÇ VE ÖNERİLER	88
4.1	Giriş	88
4.2	Akademik Arşiv Taraması Sonucu Elde Edilen Bilgiler	88
4.3	Boresight Dönüklük Açılarının Zamansal Değişiminin Analizi	90
4.4	Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya ve Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesine Etkisi ..	92
4.4.1	Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Test Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi	92
4.4.2	Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Test Alanında Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi ...	93
4.4.3	Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Proje Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi	94
4.4.4	Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Proje Alanında Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi ...	96
4.5	Tezden Elde Edilen Kazanımların Fotogrametrik Çalışmalara Etkisi	97
	KAYNAKÇA	98
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	105

SİMGE LİSTESİ

κ	Kappa
ω	Omega
Φ	Phii

KISALTMA LİSTESİ

CCD	Charge Coupled Device
EURODAC	Eurpean Dijital Airborne Camera Certification
EUROSDR	European Spatial Data Research
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation Sistem
KOH	Karesel Ortalama Hata
OEEPE	The European Organisation for Experimental Photogrammetric Research
PDOP	Position Dilution of Precision
PPP	Precise Point Positioning
UCE-100	Ultracam Eagle 100 mm Odak Uzaklıklı Kamera
UCE-80	Ultracam Eagle 80 mm Odak Uzaklıklı Kamera
USGS	United State Geological Survey
YKN	Yer Kontrol Noktası

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	42
Şekil 2.2	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	44
Şekil 2.3	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında gerçekleştirilen test uçuşu.....	47
Şekil 2.4	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	68
Şekil 2.5	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016/2 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	51
Şekil 2.6	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2015 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	53
Şekil 2.7	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2014 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	55
Şekil 2.8	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2013 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	57
Şekil 2.9	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu.....	59
Şekil 2.10	Bergama test bölgesi	63
Şekil 3.1	Ankara-Haymana test bölgesi test uçuşu ve YKN dağılımı.....	69
Şekil 3.2	Ankara-Haymana test bölgesi test uçuşu ve denetleme-kontrol noktası dağılımı.....	98
Şekil 3.3	Eskişehir 1/250.000 proje alanı.....	79
Şekil 3.4	Eskişehir 1/250.000 proje alanında seçilen kalibrasyon alanı.....	80

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Kalibrasyon uçuşlarının yıllara göre dağılımı	41
Tablo 2.2	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	43
Tablo 2.3	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri.....	43
Tablo 2.4	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	45
Tablo 2.5	UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri	45
Tablo 2.6	UCE-100 dijital hava kamerasının 2016-2017 yılları arasındaki boresight dönüklük açılarının değişimi	46
Tablo 2.7	Blok dengeleme sonuçları.....	48
Tablo 2.8	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	50
Tablo 2.9	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri	50
Tablo 2.10	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016/2 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	52
Tablo 2.11	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016/2 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri.....	52
Tablo 2.12	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2015 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	54
Tablo 2.13	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2015 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri.....	54
Tablo 2.14	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2014 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	56
Tablo 2.15	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2014 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri.....	56
Tablo 2.16	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2013 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	58
Tablo 2.17	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2013 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri.....	58
Tablo 2.18	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri.....	60
Tablo 2.19	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri.....	60
Tablo 2.20	UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012-2016 yılları arasında hesaplanan kalibrasyon değişimleri	62
Tablo 2.21	Denetleme noktalarına gelen artık hatalar ve ölçümlerin standart sapmaları	64
Tablo 3.1	Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin bağlama noktaları-kontrol noktalarıyla hesaplanması	68
Tablo 3.2	Boresight dönüklük açılarının ışın demetleriyle blok dengelemesiyle hesaplanması	70

Tablo 3.3	Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin ışıın demetleriyle blok dengelemesi ile hesaplanması.....	70
Tablo 3.4	Blok dengelemesi sonucunda elde edilen değerlerin gösterimi.....	71
Tablo 3.5	Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin fark yöntemiyle hesaplanması.....	72
Tablo 3.6	Farklı yöntemlerle hesaplanan Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri.....	73
Tablo 3.7	Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğuna etkisi.....	74
Tablo 3.8	Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin birleştirilmiş algılayıcı doğruluğuna etkisi	77
Tablo 3.9	Farklı yöntemlerle hesaplanan Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri.....	81
Tablo 3.10	Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğuna etkisi.....	83
Tablo 3.11	Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi doğruluğuna etkisi.....	85

Fotogrametrik Dijital Hava Kameralarında Kalibrasyon Parametrelerinin Zamansal Değişim Analizi

Abdullah KAYI

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bülent BAYRAM

Kalibrasyon ölçümlerin doğru ve sistematik olmasını sağlamak için sadece sonuçların doğruluğunu yükseltmek değil aynı zamanda ölçüm hassasiyetlerini belirleme faaliyeti olarak tanımlanmıştır. Bir başka tanıma göre ise kalibrasyon iyi hazırlanmış koşullarda niteliksel belirleme sürecidir. Bu kapsamda fotogrametrik alanda 1963 yılından günümüze birçok akademik çalışma yayınlanmıştır. Bilimsel çalışmaların büyük bir kısmı GNSS/IMU bütünleşik sistemin hava fotogrametrisinde kullanılmaya başlandığı 2001-2004 yılları arasında yapılmıştır. Kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi sürecine genel olarak sistem kalibrasyonu denilmektedir. Sistem kalibrasyonu sistemlerin kendi kalibrasyonları ve birbirine göre kalibrasyonları olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Sistemlerin bireysel kalibrasyonu fabrika kalibrasyonu, birbirlerine göre kalibrasyonuna ise kullanıcı kalibrasyonu olarak tanımlanmıştır. Kullanıcı kalibrasyonu genel olarak algılayıcı sistemler ile navigasyon sistemler arasındaki konum ve dönüklüğün belirlenmesidir. Başka bir deyişle GNSS anteni, IMU ve kamera arasındaki fiziksel bağıntının modellenmesidir. Sistem kalibrasyonunun ilk bileşeni GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki fiziksel mesafe olan öteleme vektörünün ölçülmesidir. İkinci bileşeni ise IMU platform koordinat sistemi ile kamera perspektif merkezi

koordinat sistemi arasındaki dönüklük olarak ifade edilen Boresight dönüklük açılarının hesaplanmasıdır. Her ne kadar dijital fotogrametrik hava kameralarının kalibrasyon sürecine yönelik birçok makale yayınlanmış, birçok konu üzerinde akademik camiada görüş birliği sağlanmış olsa da diğer fotogrametrik alanlarda yaşanan gelişmeler (Örn: otomatik detay çıkarımı, yoğun eşleme tekniğiyle sayısal yüzey modeli üretimi) sebebiyle bazı önemli ayrıntılar atlanmış ve sorular cevapsız bırakılmıştır. Kamera kalibrasyon süreci ile ilgili akademik çalışmalar “ne” ve “nasıl” sorularına cevap vermekle birlikte en az bu sorular kadar önemli olan “hangi sıklıkta” ve “gereklilik” sorularına cevap verilmemiştir. Bu tezde, hangi sıklıkta sistem kalibrasyonunun yapılması gerektiği araştırılacak, özel kalibrasyon uçuşları ve özel kalibrasyon test alanlarına ihtiyacın gerekliliği sorgulanacaktır. Bu tezin sonucunda ticari hayatın aktörleri olan kamera kullanıcıların karşılaştıkları ve akademik çalışmalarda cevaplanmamış problemlerine çözüm aranacak ve birbiriyle iç içe olması gereken akademik-ticari alanın birbirine yaklaşması sağlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kalibrasyon, sistem kalibrasyonu, boresight dönüklük açıları, kalibrasyon uçuşu, boresight dönüklük açılarının değişimi

Analysis of the Temporal Change of Photogrammetric Aerial Digital Cameras Calibration Parameters

Abdullah KAYI

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Bülent BAYRAM

Calibration is defined not only to increase the accuracy of the results but also to determine the measurement precision in order to ensure that the measurements are accurate and systematic. According to another definition, calibration is a qualitative determination process in well prepared conditions. In this context, many academic studies have been published since 1963 in the photogrammetric field. Most of the scientific studies were carried out between 2001-2004 when the GNSS / IMU integrated system was used in aerial photogrammetry. The process of determining the camera calibration parameters is generally called system calibration. The system calibration is divided into two parts: calibration of sensors individually and calibration of sensors relative to each other. The self calibration of the systems is defined as factory calibration, and relative calibration is defined as user calibration. User calibration is generally the determination of the position and orientation between the sensor and the navigation systems. In other words, the physical relationship between the IMU, GNSS antenna and the camera is modeled. The first component of the system calibration is the measurement of the lever-arm, which is the physical distance between the GNSS antenna and the camera perspective center. The second component is the calculation of Boresight misalignment, which is expressed as

the rotation between the IMU platform coordinate system and the camera perspective coordinate system. Although many articles have been published on the calibration process of digital photogrammetric aerial cameras and a consensus has been achieved in the academic community on many issues, some important details have been omitted due to developments in other photogrammetric fields (e.g. automatic detail extraction, digital surface model production with dense matching technique) and questions were left unanswered. Although the academic studies related to the camera calibration process respond to the questions of “what” and “how”, they do not respond to the questions of “frequency” and “necessity” which are as important as these questions. In this thesis, the frequency of system calibration will be investigated, and the need for special calibration flights and special calibration test areas will be questioned. As a result of this thesis, solutions will be sought for the problems, which is not not answered in academic studies, faced by camera users who are the actors of commercial and the academic-commercial field, which should be intertwined with each other, will be brought closer to each other.

Keywords: Calibration, system calibration, boresight misalignment, calibration flight, stability of boresight misalignment

1.1 Literatür Özeti

Dijital hava kameralarının kalibrasyonu günümüze kadar uzanan uzun bir süreç sonucunda şu anki haline erişmiştir. Kalibrasyon, diğer mühendislik alanlarına paralel olarak fotogrametri biliminde de kendine uygulama alanı bulmuştur. Bu bölümde 1963 yılından 2020 yılına kadar kamera kalibrasyonları ile ilgili akademik arşiv taranmış, özeti çıkarılmış ve konu ile ilgili tarihsel süreç ortaya konulmuştur.

Eisenhart yaklaşımı olarak kabul edilen ve ölçüm aletlerinin neden kalibre edilmesinin vurgulandığı çalışmada kalibrasyon tanımı da yapılmıştır. Kalibrasyon, dışsal hata kaynaklarını ortadan kaldırabilmek ve temel ölçümleri olabildiğince sistematik hatalardan arındırmak amacıyla sadece sonuç ürünün değil aynı zamanda ölçüm aletlerinin de duyarlılığını arttırarak, yapılan ölçümlerin doğru ve sistematik bir şekilde yapılması süreci olarak tanımlanmıştır [1].

Ackermann, GNSS destekli hava fotogrametrisi uygulama kuralları ve doğruluk modelleri adlı çalışmasında GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafenin ölçülmesi gerektiğini ifade etmiştir. Ayrıca GNSS sinyallerinin 10 saniye veya daha uzun süre boyunca kesildiği durumlarda belirsizlik çözümlerinin yalnızca tahmini olarak yapıldığını ve bunun GNSS kayıklığına sebebiyet verdiğini belirtmiştir. Bu hata, ışın demetleriyle blok dengelemesi aşamasında giderildiği için GNSS sinyal kesintilerinin göz ardı edilerek hava fotoğrafı çekiminin standart uygulamalara göre devam ettirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Faz belirsizliklerinin çözümü için GNSS kayıtlarının hava fotoğrafı çekimi gerçekleştirilmeden birkaç dakika önce başlatılmasına ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Hava fotoğrafı çekimi esnasında sinyal kesilmelerinin yaşanması durumunda faz belirsizlik çözümlerinin son işleme aşamasında C/A kodu ve

P/A kodu kullanılarak belirlenebileceğini aktarmıştır. GNSS kayıklık parametrelerinin blok halinde tek bir değer değil de uçuş kolonlarında ayrı ayrı etkiye/değerlere sahip olabileceğini, bu durumda her bir uçuş kolonundaki GNSS kayıklık parametresinin belirlenmesi için ek parametrelere ihtiyaç duyulacağını belirtmiştir. Hava fotoğraflarının yan ve ileri bindirme oranlarının artırılması ve yer kontrol noktası sayısının çoğaltılması sayesinde söz konusu ek parametrelerin elde edilebileceği gibi proje alanında dik uçuş kolonları planlanarak operasyonel çözümlerinin de üretilebileceğini ifade etmiştir [2].

Schwarz vd. tanımlanmış harita yüzeyinde resim koordinat sisteminden arazi koordinat sistemi ilişkisini açıklayan denklemi analiz etmiş, uygulamada konum bilgisi toplayan sistemler (GNSS, IMU) ile kamera perspektif merkezi arasında öteleme vektörü veya dönüklük farklarının olabileceğini belirterek, söz konusu denkleme bunların eklenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Öteleme vektörünün uçuş öncesinde belirlenebileceğini, IMU sisteminin kamera platform koordinat sistemiyle paralel olarak montajının yapılmasının fiziksel olarak mümkün olmadığını, bu iki düzlem arasında dönüklüğün hassas yer kontrol noktalarının olduğu test alanında belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, proje alanı yeterli doğrulukta ve sayıda yer kontrol noktası barındırıyorsa, kalibrasyon uçuşunun proje uçuşu sırasında da yapılabileceğini ifade etmişlerdir [3].

Skaloud vd. havadan fotoğraf çekiminin performansını analiz ettikleri çalışmalarında, iç yöneltme elemanlarını hassas bir şekilde belirlemek için kameranın kalibrasyonunu laboratuvar ortamında gerçekleştirmişler ve GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafeyi geleneksel yersel ölçümlerle belirlemişlerdir. IMU düzlemi ile görüntüleme sensörü düzlemi arasında sabit bir dönüklüğün mevcut olduğunu ve çekim anında kamera perspektif merkezinin konum ve dönüklüğünün belirlenmesinde bu sabit dönüklüğün dikkate alınması gerektiğini dile getirmişlerdir. Her iki cihazdaki (IMU ve kamera) sensör eksenleri fiziksel olarak gözlenemediğinden, dönüklük matrisinin fiziksel olarak ölçülmesinin olanaksız olduğunu ifade ederek kalibrasyon uçuşuyla aradaki dönüklük matrisinin belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Kalibrasyon uçuşunda algılayıcı sistem, IMU ve GNSS anteni arasında görelî konum ve dönüklüğün sabit kaldığı ve uçuş şartlarında değişkenlik göstermediği kabul ettikleri önemli bir varsayımdır. Bu ise GNSS anteninin ve IMU'nun uçaktaki sert bir platform üzerine sabitlenmesi ve algılayıcı sistemin de aynı platforma kilitlenmesiyle sağlanabileceğini ifade etmişlerdir [4].

Mostafa vd. sistem kalibrasyonu için GNSS'ten elde edilen konum, IMU'dan elde edilen dönüklük ve görüntülerden türetilmiş nokta koordinatlarına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca dijital hava kameralarının iç yöneltme elemanları ve distorsiyon parametrelerini belirlemek amacıyla kalibre edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. GNSS/IMU entegrasyonu gerçekleştirilmiş dijital hava kamera sistemini tasarlamış ve yapılan ilk testlerin sonuçlarını tartışmışlardır. Kalibre edilmiş odak uzaklığıyla yapılan ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda düşey bileşende 20 m. iyileşmenin olduğu, diğer yönlerde daha hassas sonuçların elde edildiğini belirtmişler ve kamera kalibrasyon parametrelerinin iç yöneltme elemanları dahil uçuşta belirlenmesi gerektiğini ileri sürmüşlerdir [5].

Haala vd. GNSS anteniyle IMU sisteminin algılayıcı sisteme olan fiziksel mesafesini tanımlamak amacıyla ek kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinin sistem kalibrasyonu için gerekli olduğunu ifade etmişlerdir. Kamera perspektif merkezinin konumunu elde etmek için GNSS/IMU entegre sistemin konumuna sabit bir öteleme vektörünün eklenmesi gerektiğini ve bu öteleme vektörü bileşenlerinin, uçuş görevinden önce geleneksel ölçme teknikleriyle ölçülebileceğini açıklamışlardır. Ayrıca, IMU ve algılayıcı sistem arasında sabit bir dönüklüğün olduğunu ve kamera perspektif merkezinin hassas dönüklük parametrelerini hesaplarken sabit dönüklük matrisinin de hesaba katılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Her iki cihazdaki sensör eksenini gözlenemediğinden, dönüklük matrisinin az sayıda bağlama ve kontrol noktası kullanılarak kalibrasyon uçuşuyla belirlenebileceğini belirtmişlerdir [6].

Clarke vd. ışın demetleriyle blok dengelemesinde yaşanan gelişmeler sayesinde yeni kamera kalibrasyon tekniklerinin geliştiğini ifade etmişlerdir. Bunlardan biri “iş başı” veya “operasyonel” kalibrasyon olarak adlandırılmış ve lens distorsiyonu, odak uzaklığı, asal noktasının kayıklıkları ve diğer parametrelerinin ışın demetleriyle blok dengelemesi aşamasında ek bilinmeyen olarak tanımlanarak hesaplanması süreci olarak tanımlamışlardır [7].

Cramer konum ve dönüklük bilgisi toplayan GNSS/INS sistemi ile kamera perspektif merkezi arasındaki fiziksel mesafe ile algılayıcılar arasındaki zamansal kayıklığın giderilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Konumsal ötelemenin geleneksel yersel ölçümlerle

belirlenebileceğini, IMU'nun kamera platform sistemine paralel olarak montajının mümkün olmaması nedeniyle iki sistem düzlemi arasında oluşan dönüklük matrisinin dengelenmiş dönüklükler ile başlangıç dönüklüklerin farklarının ortalaması alınarak hesaplanabileceğini ifade etmiştir. Kamera düzlemi ile IMU düzlemi arasındaki dönüklük matrisinin her iki algılayıcının konumunda bir değişiklik olmadığı sürece sabit kalacağını belirtmiştir. Doğrudan coğrafi konumlandırmanın geleneksel blok dengelemesinin yerini alıp alamayacağı hususunu araştırmak maksadıyla Stuttgart'da iki farklı ölçekte hava fotoğrafı çekimi gerçekleştirmiş ve sonuçları analiz etmiştir. GNSS/IMU entegre sisteminde IMU hatalarının GNSS verileriyle düzeltilmesi nedeniyle GNSS'in sistem doğruluğunda ana rol oynadığı sonucunu çıkarmış ve GNSS verilerini en doğru şekilde işlenmesi hususunu irdelenmiştir. Bu maksatla farklı mesafelerdeki sabit yer GNSS istasyonlarını kullanarak en doğru GNSS çözümünü tüm dengeleme bloğuna uygulamıştır. Yer kontrol noktalı blok dengelemesi ile doğrudan coğrafi konumlandırma arasında yatay yönde 15 cm düşey yönde ise 30 cm karesel ortalama hata farkının olduğunu hesaplamış bunun nedeninin ise hassas olmayan iç yöneltme elemanlarının kullanılması olarak ifade etmiştir. İç yöneltme elemanları hatalarının kayıklık ve öteleme parametreleriyle korelasyon halinde olduğu ve bu yüzden bağımsız olarak tespitinin zor olduğunu belirtmiştir. Hassas iç yöneltme parametreleriyle bahse konu hataların 10 cm'ye düşebileceğini ifade etmiştir [8].

Skaloud doğrudan coğrafi konumlandırma yaklaşımını formüle etmiş ve hassas dış yöneltme elemanlarını belirlemek için şu dört ana işlem adımının izlenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bunlardan ilki algılayıcıların montajıdır. Montajın kötü yapılmasının veri işleme sürecinde giderilemeyecek gürültülere sebep olacağını belirtmiştir. Algılayıcı montajının, GNSS anteni ile algılayıcılar arasındaki mesafenin kalibrasyon ve ölçüm hatalarından en az etkilenecek şekilde tasarlanması ve sistemler arasında differansiyel hareketlilikten kaçınılacak ölçüde montajın yapılması şekilde iki temel prensibinin olduğunu ifade etmiştir. GNSS anteninin uçağın dışında uyduları görebilecek şekilde monte edilmesi zorunluluğu, kamera ile GNSS anteni arasında fiziksel mesafenin her zaman olacağını sadece mümkün olduğu kadar aynı düşey doğrultuda monte edilmesinin yatay yönde oluşacak kayıklığı en aza indireceğini ifade etmiştir. Sistemler arasında oluşacak differansiyel değişimin her ne kadar algılayıcılar uçağa sıkı sıkıya monte edilse

bile uçuş anında oluşacak titreşim sebebiyle toplanan veride gürültüye neden olacağı, IMU'nun kamera sisteminin içine monte edilmesiyle bir nebze bu diferansiyel değişimin önlenebileceğini söylemiştir. Algılayıcı sekronizasyonunu ikinci işlem adımı olarak belirtmiş ve sekronizasyon hatalarının genel, özel ve olası olarak incelemiştir. Gerçek fotoğraf çekim anı ile sistemin kaydettiği an arasındaki sistem gecikmesinden kaynaklı zamansal kayıklığın kamera üreticileri tarafından modellendiğini belirtmiştir. Olası bir sekronizasyon hatasının veride gürültüye neden olacağını ifade etmiştir. Üçüncü işlem adımı başlangıç değerlerinin düzeltilmesi ve son işlem adımı olarak sistem kalibrasyonu olduğunu söylemiştir. Sistem kalibrasyonunun sistemlerin ayrı ayrı kalibrasyonu ve birbirlerine göre kalibrasyonu olmak üzere ikiye ayırmıştır. Sistemlerin ayrı ayrı kalibrasyonunun iç yöneltme elemanlarının hassas bir şekilde belirlenmesi süreci olduğunu, sistemlerin birbirine göre kalibrasyonunun ise kamera ile konum ve dönüklük bilgisi toplayan sistemlerinin arasındaki fiziksel mesafe ve dönüklüklerinin belirlenmesi süreci olarak tanımlamıştır [9].

Ahokas vd. görüntülerin mekansal kalitesinin önceden tahmin etmenin mümkün olamayacağını, atmosferik koşullarla birlikte sistemlerin uçuş anındaki koşullardan etkilenmelerinin görüntülerin mekansal kalitesini azaltacağını ve operasyonel kalibrasyon yönteminin atmosferik ve uçuş anındaki etkileşimi modelleme için yegâne kalibrasyon yöntemi olduğunu ifade etmişlerdir [10].

Cramer vd. GNSS anteni ile algılayıcı sistem perspektif merkezi arasındaki fiziksel mesafeyi öteleme vektörü olarak tanımlamış ve yersel ölçümlerle belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte IMU platform koordinat sistemi ile algılayıcı platform koordinat sistemi arasındaki dönüklüğün fiziksel olarak gözlenemeyeceğinden yersel ölçümlerle belirlenemeyeceğini, uygun kalibrasyon süreci sonucunda dönüklük matrisinin hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Dengelenmiş dış yöneltme elemanlarının dönüklükleri ile yaklaşık dış yöneltme elemanları arasındaki farkların ortalamasının alınması yöntemiyle hesaplanan dönüklük matrisinin kamera veya IMU'nun yerinin değiştirilmediği sürece sabit kalacağını ifade etmişlerdir. Tüm bunlara rağmen sistem kalibrasyonundaki problemlerin devam ettiğine dikkat çekmiş, entegre sistemlerin özel kalibrasyon alanlarında belirli zaman aralıklarında kalibre edilse bile kalibrasyon alanı ile proje alanı arasındaki değişkenlerin modellenememesi ve sistematik hataların farklı

olması sebebiyle elde edilen değerlerin proje alanlarındaki gerçek durumu her zaman yansıtamayacağını belirtmişlerdir. Sistematik hatalar esas olarak sıcaklık, basınç, atmosferdeki kırılmaya bağlı değişiklikler gibi çevresel etkilerden kaynaklandığından bunların önceden modellenmesinin mümkün olamayacağını ileri sürmüşlerdir [11].

Burman algılayıcı sistem ve GNSS anteni arasındaki mesafenin yersel ölçümlerle belirlenebileceğini, IMU platform koordinat sistemi ile algılayıcı sistemin platform koordinat sistemi arasındaki dönüklüğün ise dengelenmiş dış yönetme elemanlarının dönüklükleri ile GNSS/INS sisteminden elde edilen yaklaşık dış yöneltme elemanlarının dönüklüklerinin karşılaştırılmasıyla elde edilebileceğini ifade etmiştir. Sistemlerin uçağa montajı yapılırken GNSS anteninin tüm sistemlere, IMU'nun ise özellikle algılayıcı sisteme olabildiğince yakın montajının yapılmasının öteleme vektörünün etkisini ve titreşimden kaynaklı açisal hızdaki gürültüyü azaltacağını belirtmiştir [12].

Alamus vd. fotogrametrik görüntülerin hassas yöneltilmesi için IMU, GNSS ve algılayıcı sisteme bağlı bazı yardımcı parametrelerinin doğru tespit edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu yardımcı parametreler kameraya (kamera kalibrasyon parametreleri), montaja (öteleme vektörü, boresight dönüklükleri) ve göreve veya projeye (GNSS kayıklık parametreleri ve self kalibrasyon değerleri) bağlı değerler olarak tanımlamışlardır. Kamera ve montaja bağlı yardımcı parametrelerin kalibrasyon uçuşuyla belirlenebileceği, bununla birlikte söz konusu yardımcı parametrelerin özellikle de boresight dönüklük açılarının sabit kalması için özel bir çabanın gösterilmesi gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Görev veya projeye bağlı yardımcı parametrelerden olan GNSS kayıklığında ise uçuş anında yeterli ve uygun uydu dağılımı ile, uçağın yerdeki sabit GNSS istasyonuna olan mesafesinin kısa olması ve IMU gözlemlerinin hassas bir şekilde kaydedilmesi durumunda, GNSS/IMU entegrasyonu sayesinde konum ve dönüklük bilgilerinin GNSS kayıklığı etkisi olmadan elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte uygulamadaki tecrübelerine dayanarak GNSS kayıklığının görüntülerin konum ve dönüklüklerinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Doğrudan coğrafi konumlandırma yaklaşımında, algılayıcıların birbirleriyle olan geometrik ilişkilerinin bilinmesi gerektiğini belirtmiş ve boresight dönüklüklerinin kalibrasyon uçuşuyla belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Görüntülerin hassas yöneltilmesi için boresight dönüklüklerinin güncel şekilde belirlenmesi gerektiğini fakat

bunun zaman ve maliyet açısından optimum çözüm olmayacağına dikkat çekmişlerdir. Boresight dönüklüklerinin değişme periyodunun araştırılması ve gerekli zamanlarda boresight dönüklüklerin belirlenmesinin gerektiğini belirtmişlerdir. Aralarında 20 gün fark bulunan iki farklı kalibrasyon uçuşunda hesaplanan boresight dönüklüklerinin sabit kaldığını ifade etmişlerdir [13].

Bäumker ve Heimes yüksek doğruluk isteyen projelerde IMU ve kamera arasındaki dönüklük matrisinin belirlenmesi gerektiğini, IMU'nun bazı uygulamalarda kameraya sıkıca monte edildiğini, teoride IMU ile kamera platform koordinat sistemleri arasında paralellik olması gerekirken uygulamada ufak dönüklüklerin olduğunu ve bunların kalibre edilerek belirlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Geleneksel jeodezik ölçümlerle boresight dönüklükleri ölçülemediğinden kalibrasyon uçuşuyla operasyonel olarak belirlenebileceğini, kalibrasyon alanında uygun dağılımlı yeterli sayıda yer kontrol noktasının olması gerektiğini, dengeleme sonucunda elde edilen her bir fotoğrafa ait dönüklüklerin belirlenerek IMU sisteminden elde edilen dönüklüklerle karşılaştırılarak boresight dönüklüklerin hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir [14].

Cramer ve Stallmann GNSS/IMU sisteminin kamera perspektif merkezinden ayrı konumlandırılması nedeniyle oluşan konum ve dönüklük farklarının sistemler arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanan zamansal kayıklıklar kadar dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir. Boresight dönüklük açıları dışındaki diğer sistem kalibrasyon parametrelerinin GNSS destekli fotogrametrik uygulamalardaki prensiplere göre belirlendiğini, öteleme vektörünün uçağın üst tarafında bulunan GNSS anteni ile algılayıcı sistem perspektif merkezi arasındaki mesafe olarak tanımlanıp yersel ölçümlerle belirlendikten sonra GNSS/IMU veri işleme aşamasında hassas olarak hesaplanabileceğini aktarmışlardır. Özetle tüm sistemlerin dönüklük ve konumlarının algılayıcı sistem perspektif merkezine indirgenmesi amaçlandığını ifade etmişlerdir. Özellikle GNSS/IMU destekli fotogrametrik uygulamalarda sistem kalibrasyonun önem kazandığını belirtmiş ve odak uzaklığı ile düşey bileşenler arasında korelasyonunun yüksek olduğunu, laboratuvar ortamında belirlenen odak uzaklığı ile uçuş ortamında belirlenen odak uzaklığının farklı olması nedeniyle 1:10.000 ölçekli bir fotoğraf çekiminde 20 cm'ye yakın hataların ortaya çıkabileceğini açıklamışlardır. Kalibrasyon alanıyla test alanının bağımsız olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Sistem kalitesinin esas

olarak yöneltme modülleri ve görüntüleme bileşenleri de dahil olmak üzere hassas genel sistem kalibrasyonuna bağlı olduğunu ve bu parametrelerin doğrudan coğrafi konumlandırma uygulamalarında mutlaka önceden belirlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Sistem kalibrasyon parametrelerinin küçük bir kalibrasyon alanında belirlenerek ayrı bir test veya proje alanında uygulanacağı, bu durumda kalibrasyon sahasında belirlenen sistem kalibrasyon parametrelerinin sürekliliği ve proje alanına uygulandığı durumdaki hassasiyeti konusunda araştırmaların devam ettiği ve kesin bir yargının oluşmadığını belirtmişlerdir. İdeal senaryonun kalibrasyon parametrelerinin proje alanının küçük bir sahasında belirlenmesi ve tüm proje alanına uygulanması gerektiğini, bu sayede fazla uçuş ve kalıcı kalibrasyon test sahası oluşturmak zorunda kalınmayacağını, hem maliyetin düşürüleceği hem de proje alanı için en uygun kalibrasyon parametrelerinin belirlenebileceğini aktarmışlardır. Yer kontrol noktası olmadan boresight dönüklükleri ve kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenebileceğini, bununla birlikte operasyonel kalibrasyon için güçlü kalibrasyon bloğunun ve fazla bindirme oranlarına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir. GNSS kayıklık ve odak uzaklığının yer kontrol noktası olmadan tespit edilemeyeceğini belirtmişlerdir. Herhangi bir sebepten dolayı kalibrasyon ve proje uçuşu arasındaki sistem koşulları önemli ölçüde değişirse, bu tür sistematik hataların telafisinin sadece test alanında en az bir yer kontrol noktasının bulunması durumunda mümkün olacağını, başka bir deyişle bazı hataların yer kontrol noktası olmadan tespit edilemeyeceğini ve bu hataların doğruluğu önemli ölçüde bozacağını ifade etmişlerdir [15].

Habib ve Schenk asal nokta hatasının yatay bileşenleri, odak uzaklığının ise düşey bileşenleri etkilediğini ifade etmişlerdir [16].

Kruck, GNSS kayıklık parametrelerin bir uçuş kolonundan diğerine değiştiğini bunun sebebinin faz belirsizlik parametrelerinin sabitleme hatasından kaynaklandığını, IMU platform koordinat sistemi ile algılayıcı platform koordinat sistemi arasındaki dönüklüğün (boresight dönüklük açılarının) blok dengelemesi aşamasında bilinmeyen olarak tanımlanarak hesaplanabileceğini ifade etmiştir [17].

Mostafa ulusal haritacılık kuruluşlarının kalibrasyon sertifikası vermediğini, kalibrasyon sertifikasyonu sürecinin tamamen üretici firmalar tarafından yönetildiğini, bununla

birlikte boresight kalibrasyonunun analog kameralarda başarıyla gerçekleştirilmesine rağmen dijital hava kameraları için henüz kabul edilmiş bir kalibrasyon yaklaşımının belirlenemediğini ifade etmiştir. Boresight dönüklük açılarının IMU platform sistemi ile algılayıcı platform koordinat sistemi arasındaki dönüklük olarak tanımlamış ve IMU'nun kameraya sıkı bir şekilde montajının yapıldığı sürece dönüklük açılarının değişmeyeceğini ifade etmiştir. Boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde iki yöntem olduğunu bunlardan ilkinin her bir fotoğrafın birbirinden bağımsız olarak fotoğraf koordinat sisteminden referans koordinat sistemine dönüşüm matrisinin blok içindeki yer kontrol noktaları kullanılmadan belirlenmesi, IMU ölçümleri ile IMU platform koordinat sistemi ile referans koordinat sistemi arasındaki dönüşüm matrisinin belirlenmesi ve bu iki matrisin çarpımıyla boresight matrisinin belirlenmesi şeklinde ifade etmiştir. İkinci metod olarak ise boresight dönüklükleri dolaylı olarak ışın demetleriyle blok dengelemesine gözlem değerleri olarak tanıtılmakta ve dönüklüklerin blok dengelemesi sonucunda hesaplanması olarak tanımlamıştır. Birinci yöntemde yer kontrol noktası sadece sonuçların iyileştirilmesinde kullanılabilirken ikinci yöntemde mutlaka yer kontrol noktasının kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Operasyonel kalibrasyonun laboratuvar kalibrasyonundan ayıran en önemli etkenin parametrelerin gerçek uçuş şartlarında belirlenmesi olduğunu ifade etmiştir [18].

Forlani ve Pinto IMU ile algılayıcı sistem arasındaki dönüklüğün dengelenmiş dış yöneltme parametreleri ile GNSS/IMU'dan doğrudan elde edilen değerler arasındaki farklardan yararlanarak hesaplanabileceğini belirtmiş, kalibrasyonun hangi sıklıkta yapılması gerektiği hususunda yeterli araştırma olmadığı ve bu konunun daha detaylı araştırılması gerektiğini ifade etmişlerdir [19].

Schmitz vd. ışın demetleriyle blok dengelemesinde GNSS uydularının dağılımının bir uçuş kolonundan diğer uçuş kolonuna sürekli değişmesinden dolayı oluşan sistematik GNSS hatalarından kurtulmak için GNSS kayıklığının hesaplandığını, zamana bağlı olarak değişen bu hataların proje alanıyla sabit GNSS istasyon arasındaki mesafenin artmasıyla ve iyonosfer, troposfer ve yörüngeden kaynaklı hatalarla birlikte etkisinin artacağını ve güvenilmez veya yanlış faz belirsizlik çözümlerine sebebiyet vereceğini ifade etmişlerdir. Uçuş kolonlarının çok uzun olmaması bu hatanın modellenebilmesi ihtimalini kuvvetlendirirken diğer parametrelerle yüksek korelasyon halinde olması

hesaplanmasının güçleşmesine sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir. Dinamik GNSS uygulamalarındaki kayma ve sürüklenme etkilerinin büyüklüğünün gerçek geometrik GNSS koşullara bağlı olduğunu, bunun ölçüsünün GDOP ve PDOP değerleriyle hesaplandığını, sabit GNSS istasyon verilerini kullanmanın maliyet açısından uygun bir çözüm olduğunu, tek nokta çözümü yerine ağ yapılı çözümün kullanılmasıyla daha uzun mesafelerde bile faz belirsizliklerin hassas olarak çözümlenebileceğini açıklamışlardır. Kayma ve sürüklenme parametrelerinin ışıın demetleriyle blok dengelemesinde uçuş kolonlarına ayrı ayrı uygulanması gerektiğini ve her bir uçuş kolonuna ait bağımsız bir kayıklık ve sürüklenme değerinin hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir [20].

Vallet entegre sistemlerde kullanılan algılayıcı kalibrasyonunun veri toplama aşamasından önce yapılması gerektiğini ve kalibrasyonun algılayıcıların kendi kalibrasyonlarıyla birbirlerine göre kalibrasyonları (zaman ve fiziksel mesafe) olarak ikiye ayrıldığını ifade etmiştir. Algılayıcıların kendi kalibrasyonu; kamera iç yönelme elemanları ve diğer sistem bileşenlerini içerirken sistemlerin birbirlerine göre kalibrasyonunda kamera ile IMU sistemi arasındaki konum ve dönüklüğün yanı sıra veri iletimi ve dahili donanım gecikmeleri nedeniyle doğal olarak mevcut olan sabit senkronizasyon kayıklığının belirlenmesini içerdiğini belirtmiştir. Sistemlerin kalibrasyonu amacıyla havalimanının yakınında kalıcı bir kalibrasyon test alanının kurulmasını ve böylece kalibrasyonun her görevden önce ve sonra rutin olarak gerçekleştirilebileceğini ve GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafenin yersel jeodezik ölçümlerle belirlenebileceğini ifade etmiştir [21].

Jacobsen dış yönelme parametreleri adlı makalesinde kamera üreticileri tarafından hesaplanan kamera kalibrasyon değerlerinin odak uzaklığı, asal noktanın konumu ve lens distorsiyonlarını içerdiğini ifade etmiştir. Kolinarite eşitliği sayesinde fotoğraf noktası, projeksiyon merkezi ve yer noktası aynı ışık üzerinde bulunmakta ve fotoğrafın bu eşitlikte tamamen düz olarak kabul edildiğini, her ne kadar lens distorsiyonu, yerin küreselliği ve ışığın kırılma değerleri hesaplansa bile bunların sadece gerçeğe yakın modellemeler olduğunu ifade etmiştir. Bunun yanında odak uzaklığının uçuş esnasında sıcaklık ve basınç gibi dışsal etmenlerle değişmesi indirgenmiş yer kontrol noktalı bloklarda bozulmalara neden olabileceğini belirtmiştir. Matematiksel model ile gerçek görüntü geometrisi arasındaki farkların sistematik görüntü hataları olarak tanımlanmış ve

bu hataların fotoğraftan fotoğrafa değişkenlik göstereceğini söylemiştir. Buradan hareketle boresight dönüklükleri ve iç yöneltme elemanlarının belirlenmesinin doğrudan algılayıcı yöneltmesi için gerekli olduğunu ifade etmiştir. Bu maksatla test bölgesinde iki farklı yükseklikten yapılacak kalibrasyon uçuşu ile gerçek odak uzaklığı belirlenebilecek ve düzeltilmiş odak uzaklığıyla GNSS kayıklığı ve boresight dönüklükleri hesaplanmasının uygun yöntem olduğunu belirtmiştir [22].

Mostafa vd. GNSS/IMU bütünleşik sistemin kalibrasyonunu, algılayıcıların kendi kalibrasyonları ve genel sistem kalibrasyonundan oluştuğunu, algılayıcıların kalibrasyonun laboratuvar ortamında, sistem kalibrasyonunun ise GNSS/IMU veri işleme aşamasında yapıldığını ifade etmişlerdir. Genel sistem kalibrasyonunun anten ve kamera arasında bulunan mesafe ile IMU ve kamera düzlemi arasındaki dönüklüğün belirlenmesini içerdığını belirtmişlerdir [23].

Mostafa vd. GNSS/IMU sistemi ile kamera platform düzlemi arasındaki konum ve dönüklüğü belirlemek maksadıyla iki farklı tarihte iki farklı yükseklikte kalibrasyon uçuşunun gerçekleştirildiğini ve boresight dönüklük açılarının hesaplandığını ifade etmişlerdir. Boresight dönüklük parametrelerinin kararlılığını tespit edebilmek maksadıyla bir gün arayla yapılan iki uçuşta dönüklük açılarının değişmediğini belirtmişlerdir [24].

Cramer kamera ile konum ve dönüklük verisi toplayan sistemlerinin (GNSS, IMU) ayrı yerlere montajı nedeniyle sistemler arasındaki konum ve dönüklük matrisinin hesaplanması gerektiğini, IMU ile kamera arasındaki dönüklüğün literatürde boresight dönüklükleri olarak isimlendirildiği ve doğrudan coğrafi konumlandırma uygulamalarından önce mutlaka hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir. GNSS/IMU sistem bileşenleri ile kamera arasındaki değerler her ne kadar küçük olsa da resim koordinat sisteminden fotoğraf koordinat sistemine dönüşümünde büyük hatalara sebebiyet vereceğinden hassas olarak hesaplanmak zorunda olduğunu, kalibrasyon bölgesinde elde edilen kalibrasyon parametrelerinin proje alanında uygulanabilirliğini ve sistem kalibrasyonunun kararlılığı konusunda araştırma yapılması gerektiğini aktarmıştır [25].

Himle öteleme vektörünü, GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafe olarak tanımlamış, yersel jeodezik ölçümlerle santimetre hassasiyetinde ölçülebileceğini ve yüksek doğruluk elde etmek için hesaplanmasının gerekli olduğunu ifade etmiştir [26].

Cramer GNSS anteninin uçağın tepesinde bulunması nedeniyle kamera perspektif merkez ile arasında konumsal farklılığın olduğunu, öteleme vektörü olarak nitelendirilen bu konumsal farkın GNSS/IMU veri işleme aşamasında hesaba katıldığını ve veri işleme aşaması sonucunda elde edilen konumun kamera perspektif merkezinin fotoğraf çekim anındaki konumu olduğunu ifade etmiştir. Boresight dönüklük açılarının yer kontrol noktası olmadan hesaplanabilmesi sebebiyle ek kalibrasyon uçuşu yapılmasına gerek olmadığını, bununla birlikte etkili bir operasyonel kalibrasyon yapılması için yüksek bindirmeli bir uçuş bloğunun olması gerektiğini belirtmiştir. Yer kontrol noktası ihtiyacının GNSS kayıklık parametrelerinin belirlenmesinde ihtiyaç duyulduğu, bazı sistematik veya sistematik olmayan hataların tespit edilemediği ve bu sebeple en az bir yer kontrol noktasının proje alanında olması gerektiğini ifade etmiştir [27].

Mostafa kamera kalibrasyon sertifikasının sadece üretici kurumlar tarafından verildiğini, resmi haritacılık kurumlarının kalibrasyon sertifikası programı olmadığını belirttiikten sonra, boresight kalibrasyonunun hangi metodlarla nasıl yapılacağını açıklamıştır. İlk yöntemdeki üç işlem adımını şu şekilde ifade etmiştir: her bir fotoğrafın birbirinden bağımsız olarak fotoğraf koordinat sisteminden referans koordinat sistemine dönüşüm matrisinin blok içindeki yer kontrol noktaları kullanılmadan belirlenmesi, IMU ölçümleri ile IMU platform koordinat sistemi ile referans koordinat sistemi arasındaki dönüşüm matrisinin belirlenmesi, bu iki matrisin çarpımıyla boresight matrisinin belirlenmesi. İkinci metod ise boresight dönüklüklerinin dolaylı olarak blok dengelemeye gözlem değerleri olarak tanıtılması ve dönüklüklerin hesaplanmasıdır. İlk yöntemde yer kontrol noktası sadece sonuçların iyileştirilmesinde kullanılırken ikinci yöntemde mutlaka yer kontrol noktasının kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Operasyonel kalibrasyonun uçuş şartlarını modelleyebilecek en uygun kalibrasyon yöntemi olduğunu ifade etmiştir. Bu yöntemin kısıtları ise maliyet ve zamandan dolayı her zaman kalibrasyon uçuşunun yapılamayacak olması olarak belirtmiştir [28].

Heipke vd. sistem kalibrasyon parametrelerinin özellikle boresight dönüklük açılarının ve algılayıcıların birbirleriyle olan senkronizasyonlarının zaman içinde kararlılığının araştırılması için GNSS anteni ile algılayıcı sistem perspektif merkezi arasındaki öteleme vektörünün hesaba katılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Yapılan değerlendirme sonucunda; GNSS/IMU ölçümlerindeki sistematik hataların yer kontrol noktası olmadan giderilemeyeceğini, kameranın iç yöneltme elemanlarındaki değişimin kamera kalibrasyon protokolünün yanlış değerler içerdiği anlamına gelmeyeceğini, sadece daha genel modellerin verilen girdi değerlerini daha iyi açıklayabileceğini ileri sürmüşlerdir. Asal nokta ile öteleme vektörü yatay bileşenleri arasında ve odak uzaklığı ile GNSS kayıklık parametresi düşey bileşeni arasında yüksek korelasyon olduğunu ifade etmişlerdir. Kalibrasyon uçuşunun iki farklı yükseklikte yapılması durumunda odak uzaklığı ile GNSS kayıklık parametresi düşey bileşeninin ayrı ayrı hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, iç yöneltme elemanlarının mümkün olduğunca sistem kalibrasyonuna dahil edilmesi gerektiğini önermişler ve iki farklı yükseklikte kalibrasyon uçuşu yapılmaması durumunda kalibrasyon uçuşunun proje uçuşuyla aynı yükseklikte yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Zaman içerisinde sistem kalibrasyon parametrelerinin kararlılığı hakkında şu an bir açıklama yapılamayacağını, halihazırda sistem kalibrasyonunun her proje bloğundan önce veya sonra yapılması gerektiğini özellikle GNSS kayıklık parametreleri değişim sebeplerinin yeterince açık olmaması nedeniyle daha tutarlı sonuçların elde edilebilmesi için araştırmaların devam etmesi gerektiğini ifade etmişlerdir [29].

Jacobsen ve Wegmann kalibrasyon parametrelerinin kararlılığının araştırılması gereken bir problem olduğunu ve hangi sıklıkla sistemlerin kalibre edilmesi gerektiğinin yeterince açık olmadığını ifade etmişlerdir. Sistemlerin kalibrasyon sıklığının uçuş koşullarına ve donanım bileşenlerinin dikkatli bir şekilde kullanılmasına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bileşenler uçaktan sökülüp tekrar monte edildikten sonra aralarındaki geometrik ilişki değişmiş olacağından sistemlerin kalibre edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Odak uzaklığının operasyonel koşullar altında değiştiğini, boresight parametrelerinin belirlenmesinde eğer iki ayrı yükseklikte uçuş gerçekleştirilirse odak uzaklığının da belirlenebileceğini, eğer uçuşlar tek uçuş yüksekliğinde yapılırsa ve yer kontrol noktaları yaklaşık olarak aynı yükseklikte olursa düşey yöndeki GNSS kayıklık parametresi ile

odak uzaklığı değişiminin hesaplanmasının imkânsız olacağını ifade etmişlerdir. Bunun sebebinin odak uzaklığı ile GNSS kayıklık parametresi arasındaki yüksek korelasyona dayandırmışlardır. Boresight parametreleri yerel teğetsel koordinat sisteminde hesaplanmışsa bunu ulusal net koordinat sisteminde kullanılmaması gerektiği veya tersi durumun da yapılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir. Doğrudan algılayıcı yöneltmesinin dar boğazı olarak fotoğraf çiftlerinden oluşturulan stereo modellerde görülen y paralaksının giderilememesini belirtmiş ve bu paralaksın yer kontrol noktası kullanılmadan sadece resim koordinatlarını içeren bağlama noktalarıyla giderilebileceğini ifade etmişlerdir [30].

Pinto vd. sistem kalibrasyonunun IMU ve GNSS sistemlerinin kamera perspektif merkezine olan konum ve dönüklüklerinin belirlenmesi süreci olarak tanımlamışlardır. GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafenin joedezik ölçümlerle santimetre hassasiyetinde ölçülebileceğini, IMU ile kamera platform koordinat sistemi arasındaki dönüklüğün ise fiziksel olarak ölçülemeyeceğinden dengelenmiş dış yöneltme elemanları ile GNSS/IMU sisteminden elde edilen yaklaşık dış yöneltme elemanları arasındaki farkın ortalamasının alınmasıyla hesaplanacağını belirtmişlerdir. Kalibrasyon prosedürünün ne sıklıkla tekrarlanması gerektiği ile ilgili akademik çalışmalar olmasına rağmen bulguların teknik tavsiyeden öte gidemediği ve operasyonel bir prosedürün ortaya konulamadığını ifade etmişlerdir [31].

Baron vd. GNSS/IMU sistemi tarafından toplanan konum ve dönüklük verileri ile kamera perspektif merkezi arasındaki ilişkinin doğru olarak belirlenmesinin ve bu ilişkinin kararlılığının veya değişiminin modellenmesi gerektiğini, operasyonel kalibrasyon yönteminin yüksek maliyetli olduğunu ve sistem kalibrasyon parametrelerinin nasıl ve ne sıklıkta kalibre edilmesi gerektiği hakkında bir rehber oluşturmanın oldukça zor olabileceğini ifade etmişlerdir. Farklı tarihlerde yapılan kalibrasyon uçuşları neticesinde (28 Mayıs- 7 Haziran ve 19 Haziran) boresight dönüklük açılarının değişimi tespit edilmiş ve en uygun çözümün boresight dönüklük matrisinin her uçuşa yönelik olarak tahmin edilmesine izin veren bazı ek parametreleri tanımlamak olarak değerlendirmişlerdir [32].

Heipke vd. kalibrasyon uçuşunu iki farklı yükseklikte ve kolonların ikisinin çift yönlü uçuşuyla gerçekleştirdiklerini ifade etmişlerdir. OEEPE testi sonucunda sistem

kalibrasyonunun gerekli olduğunda yapılması gerektiğini, eğer kalibrasyon uçuşu iki farklı uçuş yüksekliğinde yapılamazsa, kalibrasyon uçuşunun mutlaka proje yüksekliğinde yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Test uçuşu kalibrasyon uçuşundan hemen sonra gerçekleştirildiği için sistem kalibrasyon parametrelerinin zaman içindeki kararlılığı ile ilgili bir açıklamanın yapılamayacağını, GNSS/IMU sisteminin kullanılmasının yaygınlaşmasıyla kalibrasyonun hangi sıklıkta yapılacağı hususunun ayrıntılı olarak araştırılabileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte sistem kalibrasyonun yüksek doğruluk isteyen projelerden önce veya sonra yapılması gerektiğini önermişlerdir [33].

Heipke vd. sistem kalibrasyon parametrelerini boresight dönüklük açıları, GNSS kayıklık parametreleri, öteleme vektörü ve kamera iç yöneltme elemanları olarak tanımlamışlardır [34].

Mostafa GNSS sinyallerinin faz kesiklikleri veya uydu geometrisinin uçağın hızını da hesaba katarak hızla değişimi ve benzeri sebeplerle faz belirsizliği çözümünde hatalara sebebiyet vereceğini, fotogrametrik uygulamalarda GNSS kayıklık parametresi olarak tanımlanan bu hatanın modellenmeye çalışıldığını, proje alanında planlanan dik kolonlar sayesinde GNSS kayıklığının modellenebileceğini ifade etmiştir [35].

Wegmann geleneksel 6 parametrelili sistem kalibrasyonundan bahsetmiş ve 3 GNSS kayıklığı ve 3 boresight dönüklüğünün oluştuğu bu 6 parametrenin test uçuşuyla hesaplanabileceğini ifade etmiştir. Boresight dönüklüklerinin ölçekten bağımsız yani her ölçekte aynı değer olarak hesaplanmasına rağmen GNSS kayıklığının ölçeğe bağlı olduğunu belirtmiştir. 6 parametrelili sistem kalibrasyonunun yanı sıra her ne kadar laboratuvar ortamında hesaplanırsa da odak uzaklığı ve asal noktanın konumunun da uçuş şartlarında yeniden hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir. İç yöneltme elemanlarının uçuş şartlarına bağlı olarak, sıcaklık ve basınç gibi dış faktörler tarafından etkilenebileceği belirtmiştir. İç yöneltme elemanlarının 6 parametrelili sistem kalibrasyonu ile beraber hesaplanması için farklı yükseklikte ve bir uçuş kolonunun çift yönlü uçulmasının yeterli olacağını belirtmiştir. Kamera asal noktası ile GNSS kayıklığının uçuş kolonunun çift yönlü uçulmasıyla ayrı ayrı hesaplanmaya imkân vereceğini açıklamıştır. GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafenin

geleneksel ölçme teknikleri kullanılarak uçuştan önce ölçülebileceğini, boresight dönüklük açılarının ise uçuştan sonra hesaplanabileceğini ifade etmiştir. Fredrikstad Test sahasında 9 paralel ve 2 dik kolondan oluşan 1\5000 ölçekli hava fotoğraflarını 6 parametrelili sistem kalibrasyon değerlerini uygulayarak yer kontrol noktası kullanmadan yöneltmiştir. Doğrudan coğrafi konumlandırma sonucunda 49 bağımsız denetleme noktasına gelen hataların karesel ortalaması yatay yönde (X/Y) 10/11 cm düşeyde (Z) 13 cm olmuştur. İç yöneltme elemanlarını da içeren 9 parametrelili sistem kalibrasyonu ile yapılan doğrudan coğrafi konumlandırma yöntemi sonucunda 49 bağımsız denetleme noktalarına gelen artık hataların karesel ortalama hatası bir önceki çözüme göre 2 kat iyileşmiş ve yatayda (X/Y) 5,8/6,8 cm düşeyde 8,8 cm olarak hesaplanmıştır. Sonuçların iyileşmesini uçuş anında sıcaklık ve basınç gibi etmenlerden dolayı odak uzaklığında ve asal noktada yaşanan bozulmaların doğru modellenmesi olarak açıklamıştır. Sistem kalibrasyonunun mümkün olan her durumda yapılması gerektiğinin altını çizen yazar kalibrasyonun iki farklı uçuş yüksekliğinde gerçekleştirilmemesi durumunda proje yüksekliği baz alınarak yapılması gerektiğini tavsiye etmiştir [36].

Honkaavara vd. sistem kalibrasyonunun asıl amacının IMU ile kamera platform koordinat sistemleri arasındaki boresight dönüklük açılarının hesaplanması olarak tanımlamışlardır. Makul kalibrasyon alanı ve blok yapıları, ölçeğin kalibrasyon üzerine etkisi, hangi parametrelerin kalibrasyon sürecine dahil edilmesi, kalibrasyon parametrelerin sürekliliği diğer bir değişle kalibrasyonun hangi sıklıkta yapılması, test sahasında belirlenen kalibrasyon parametrelerinin proje alanında uygulanabilirliği ve hassasiyetleri hususlarının irdelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Kalıcı bir kalibrasyon alanının inşası ve uygun blok yapılarının belirlenmesi ve blok yapısının çeşitli parametrelerin belirlenmesindeki etkisini incelemek için farklı ölçeklerde veri setleri kullanıldığını (1: 3.300, 1: 4.000, 1:8.000, 1:16.000) ifade etmişlerdir. 1992 yılından itibaren kullanılan 4 km * 5 km büyüklüğündeki Sjøkulla sahasında 1:3.300, 1:4.000, 1:8.000 ve 1:16.000 ölçeğinde hava fotoğrafı çekiminin gerçekleştirildiğini ve bu hava fotoğraflarının 20 µm seviyesinde tarandığını açıklamışlardır. Farklı blok şekillerinde tek bir ölçekte GNSS anteni ile kamera arasındaki mesafe, GNSS kayıklığı ve boresight dönüklük açılarının hesaplandığını, aynı bölgeye ait iki farklı ölçekte ise bunlara ek olarak iç yöneltme elemanlarının da belirlendiğini belirtmişlerdir. Kalibrasyon değerleri girilmeden yapılan

yöneltme işleminde denetleme noktalarına gelen artık hatalar tüm bloklarda birbirine yakın çıkmış, kalibrasyon değerlerinin uygulandığı yöneltme işlemlerinde ise %80 ileri bindirmeli ve blok köşelerinde çapraz kolonların mevcut olduğu blokların doğruluğunun diğerlerine göre daha yüksek olduğu ve blok yapısı ne olursa olsun kalibrasyon değerlerinin yöneltme sonuçlarını kayda değer şekilde iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Tavsiye edilen kalibrasyon uçuşunun 4 yatay ve 2 dik kolondan oluştuğu, ileri bindirmenin %80, yan bindirmenin ise %60 olacak şekilde yapılması gerektiğini belirtmişlerdir [37].

Pinto ve Forlani algılayıcıların (Kamera, GNSS ve IMU) fiziksel olarak farklı yerlere monte edildiğinden ve eşzamanlı olarak veri kaydettiğinden, IMU, GNSS ve kamera arasındaki konum ve dönüklüklerin hesaplanması için sistem kalibrasyonun gerekli olduğunu, algılayıcılar arasındaki konumların genellikle yersel jeodezik ölçüm yöntemiyle santimetre hassasiyetinde ölçülebildiğini, buna rağmen boresight dönüklük açılarının ise fotogrametrik yöntemlerle belirlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. En uygun kalibrasyon yöntemi ve kalibrasyonun ne sıklıkta yapılması gerektiği sorularının halen cevaplanmadığını belirtmişlerdir. Boresight dönüklük açılarının ışın demetleriyle blok dengelemesinde kolinarite eşitliğine bilinmeyen olarak tanımlayarak elde etmişlerdir. Test sonuçlarında denetleme noktalarına gelen artık karesel ortalama hataların santimetre seviyesinde kaldığını ve yaklaşımın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ifade etmişlerdir [38].

Mostafa geleneksel boresight dönüklüklerinin belirlenmesi yönteminin blok dengelemesindeki yer kontrol noktalarına dayandığını, buna rağmen PosCal yazılımı sayesinde bu dönüklüklerin yer kontrol noktasına ihtiyaç duymadan belirlenebildiğini ifade etmiştir. Yer kontrol noktası kullanılmadığı için sürecin doğruluğunun GNSS/IMU bütünleşik sistem tarafından toplanan verinin doğruluğuyla doğrudan orantılı olduğunu açıklamıştır. Yer kontrol noktasının sadece kalite kontrol amaçlı ve sadece blok köşelerinde kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Aynı çalışmada bağlama noktalarının boresight parametrelerinin hesaplanmasındaki etkisi araştırılmış ve sadece Von Gruber noktalarının kullanılması sonucunda elde edilen değerlerle, tüm bağlama noktalarının kullanılması ile elde edilen değerler arasında önemli bir değişikliğin olmadığını gözlemiştir. Bununla birlikte kolon sayısının boresight parametrelerinin

belirlenmesindeki etkisini de araştırmıştır. Kolon sayısının artırılması kalibrasyon bloğunda kullanılacak fotoğraf sayısını arttırmakta bu ise IMU baş açısı hatasının daha iyi modellenebilmesi anlamına gelmektedir. Kalibrasyon bölgesine ait ilk blokta yeterli kadar fotoğraf kullanılarak hesaplanan boresight değerlerinin roll açısının düşük doğruluklu olduğu, 2 adet yer kontrol noktası kullanımı ile bu hatanın giderilebildiği, tüm yer kontrol noktalarının kullanılmasının ise değerleri çok değiştirmediği gözlemiştir. Çalışma sonucunda yer kontrol noktası kullanılmadan çift kolonlu kalibrasyon uçuşunun en uygun yöntem olduğunu ileri sürmüştür [39].

Jacobsen doğrudan coğrafi konumlandırma için sistem kalibrasyonunun neden gerekli olduğu konusunu birçok açıdan yaklaşılarak incelemiştir. Ataletsel ölçüm sisteminin 3 adet jiroskop ve 3 adet ivmeölçerden oluştuğunu açıklamıştır. GNSS'e göre daha yüksek frekansta veri toplama yeteneğine sahip olan IMU, uzun zamanda GNSS'in aksine tutarlı veri toplayamadığını, uzun zamanlı IMU ölçümlerinin GNSS verisiyle düzeltilmesi gerektiğini ifade etmiştir. IMU platform merkezi ile algılayıcı perspektif merkezi arasındaki eksenler birbirine teoride paralel olması gerekirken uygulamada bunun mümkün olmadığını ve bu dönüklük matrisinin hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir. Boresight dönüklükleri denilen bu dönüşüm matrisi ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda elde edilen fotoğraflara ait dönüklükler ile IMU'dan gelen dönüklerin karşılaştırılması ile elde edilebileceğini, GNSS kayıklığının ise yer koordinat sistemine bağlı olarak oluştuğunu ve uçuş yönüyle yüksek korelasyon içinde olduğunu, uçuş yönünün etkisini bertaraf etmek amacıyla çift yönlü uçuşların gerçekleştirilmesi gerektiğini bu sayede sadece yer koordinat sisteminin etkisinin gözlenebileceğini ifade etmiştir. İç yöneltme elemanlarının laboratuvar kalibrasyonunda belirlenmesine rağmen uçuş yüksekliğine bağlı olarak değiştiğini, aynı değişimin asal noktanın konumunda da yaşandığını ifade etmiştir. Kalibrasyon uçuşuyla iç yöneltme elemanlarının belirlenmesi için uçuşun iki farklı yükseklikte yapılması gerektiğini ifade etmiş ve bunun sebebinin aynı yükseklikte yapılacak kalibrasyon uçuşunda GNSS'in sabit hataları ile iç yöneltme elemanlarının hatası arasında yüksek korelasyon olduğunu ve bunları birbirinden ayırmanın mümkün olmadığını açıklamıştır. Sabit GNSS hataları uçuş yüksekliğinden bağımsız iken iç yöneltme elemanlarının değişiminin uçuş yüksekliğine bağlı olduğunu ifade etmiştir. İki farklı uçuş yüksekliğinde yapılan kalibrasyon uçuşu sayesinde iç

yöneltme elemanlarının değişiminin belirlenebileceğini ifade etmiştir. Eğer proje ve boresight kalibrasyon uçuşu aynı yükseklikte yapılırsa iki ayrı uçuş yüksekliğine gerek olmadığını, sabit GNSS hatalarının iç yöneltme elemanlarının değişmesi neticesinde oluşan hataları da içereceğini ifade etmiştir. Bu senaryonun sadece doğrudan coğrafi konumlandırmada geçerli olacağını, yer kontrol noktası kullanımının bu hataları gidereceğini açıklamıştır. UTM projeksiyonundaki ölçek sabitesinin 0,9996 olmasının 100 m bir yükseklik farkında 4 cm bir hataya neden olduğunu, bu nedenle ölçek faktörünün yeniden hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir. Referans meridyenine 110 km uzaklıkta bulunan OEEPE test alanında belirlenen ölçek sabitesinin 0,99975 olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple kalibrasyon uçuşunda belirlenen parametrelerin referans meridyenine uzaklığına göre farklı değerler alacağını ifade etmiştir. Ayrıca IMU'nun başlangıç değeri olarak roll, pitch ve yaw sisteminde veri topladığını, buradaki ana dönüklük olan yaw açısının coğrafik kuzeyi baz aldığını, fotogrametrik kappa açısının ise grid kuzeyini baz aldığını aradaki farkın ise meridyen konvergenesi olduğunu ifade etmiştir. Dönüşüm matrisiyle, navigasyon dönüklükler fotogrametrik dönüklüklere dönüşmektedir. UTM projeksiyonundaki ölçek sabitesini 0,9996 alındığı zaman hesaplanan odak uzaklığı (f:153,394) ile ölçek sabitesinin 0,99975 alındığı zaman hesaplanan odak uzaklığıyla (f:153,396) hesaplanan yer koordinatlarına gelen karesel ortalama hatalarda özellikle düşey yönde 25 cm bir iyileşmenin yaşandığını ifade etmiştir. Kullanılan jeoid modelinden kaynaklı hataları incelenmiş ve doğu-batı uçuşunda 4 ila 4,4 cm, kuzey-güney uçuşunda 0,7 ila 1 cm arasında değiştiğini gözlemiştir. Bu hataların GNSS kayıklığının belirlenmesiyle giderilebileceğini ifade etmesine rağmen bunun sadece kalibrasyon uçuşunun proje alanına uzaklığıyla bağlı olmadığını belirtmiştir. Boresight parametrelerinin sürekliliği konusunda 42 günlük bir periyotta yapılan analizde roll açılarının 0,02 derece pitch ve yaw açısının ise 0.015 derece değiştiği gözlenmiş bunun ortofoto üretimi için kabul edilebilir olduğunu ifade etmiştir. Doğrudan coğrafi konumlandırma ile yöneltilen fotoğraf çiftlerinden oluşturulan modellerde y paralaksının bağlama noktalarıyla giderilebileceğini söylemiştir [40].

Cramer ve Stallmann doğrudan coğrafi konumlandırma performansının, bu yaklaşımın ekstrapolasyon yapısından dolayı genel sistem kalibrasyonunun kalitesiyle sınırlı olduğunu ifade etmiş, algılayıcı sistemler ile navigasyonel sistemler arasındaki dönüklük

ve konum farklarının doğru ve son derece hassas olarak belirlenmesinin gerekliliğini açıklamışlardır. Kalibrasyon parametrelerinin kararlılığı ve geçerliliği konusunda yeterli çalışma yapılmadığını ifade etmişlerdir. Öteleme vektörünün günlük uçuş şartlarına bağlı olarak değişeceğinden günlük olarak hesaplanması gerektiğini, bununla birlikte boresight dönüklük açılarının fiziksel olarak ölçülmesinin mümkün olmaması sebebiyle sistem kalibrasyonu ile belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Boresight parametrelerinin zamana göre sürekliliğini araştırmak amacıyla 29 Ocak-12 Mart tarihleri arasında tek kolonda çift yönlü 8 kalibrasyon uçuşu yapılmış ve değişimleri gözlemişlerdir. Kappa yönündeki değişimin 0.009 mgon olduğu ve bunun yüksek doğruluk isterli projeler için kabul edilemez sınırlarda olduğunu ifade etmişlerdir. Bu değerlerin sadece boresight parametrelerinin değişiminden kaynaklanmadığını, GNSS/IMU sisteminin konum hatalarından da etkilendiğini ileri sürmüşlerdir. Bu hatalardan arınmış boresight parametrelerinin standart sapmalarının GNSS/IMU konum verisinin gürültü sınırları içerisinde kaldığını, 2 aylık bir süreçte boresight dönüklük açılarının değişmeden sabit bir şekilde kaldığını açıklamışlardır. Kalibrasyon alanında belirlenen sistem kalibrasyon parametrelerinin, diğer parametrelerle olan korelasyon ilişkisi sebebiyle ve uçuştan kaynaklı sistematik olmayan hatalardan dolayı oluşan gürültü nedeniyle proje alanındaki gerçek durumu ne kadar modelleyebildiği sorusunu sormuşlardır. Diğer bir deyişle test alanı ile proje alanındaki sistem kalibrasyon parametrelerinin farklı olabileceğini, korelasyon ve diğer sistematik olmayan hata kaynakları nedeniyle bu değerlerin uçuştan uçuşa değişebileceğini ifade etmişlerdir. Yine de yüksek bindirme oranlarında güçlü blok yapısında belirlenen boresight dönüklük açılarının belirli bir aralıkta sabit kalacağı ve daha uzun zaman periyotları için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [41].

Colomina modern algılayıcı yöneltme teknolojileri ve prosedürleri kapsamında, IMU sisteminin bileşenleri ve çalışma prensiplerini, jiroskop ve ivmeölçerin matematiksel modellerini, GNSS teknolojilerini, GNSS/IMU entegre sistemin topladığı verinin yersel jeodezik koordinat sisteminden yer merkezli yer sabit koordinat sistemine dönüşümünü açıklamıştır. Kamera kalibrasyon süreçlerini ayırmış ve iç yöneltme elemanlarının laboratuvar ve operasyonel kalibrasyonla belirlenebileceğini, kamera nodal noktasının (paralaksın olmadığı nokta) laboratuvar kalibrasyonu ile belirlenebileceğini, kamera ile GNSS anteni arasındaki mesafenin yersel ölçümlerle belirlenebileceğini ve uçuş sonrası

hassaslaştırılabileceğini, kamera ile IMU arasındaki dönüşüm matrisinin operasyonel olarak ve son olarak da kamera ile GNSS arasındaki zamansal farklılığın laboratuvar ve operasyonel kalibrasyon ile belirlenebileceğini ifade etmiştir. Bunun için 4 ana yönde iki farklı uçuş yüksekliğinde küçük bir blokla kalibrasyon uçuşunun yapılması gerektiğini ifade etmiştir [42].

Schroth, boresight dönüklük açılarının belirlenmesi için proje alanından bağımsız bir kalibrasyon test sahasının havalanına yakın olarak inşa edilmesi gerektiğini, kalibrasyon uçuşu ile proje uçuşunun aynı yükseklikte yapılmasının uygun olacağını ve en hassas kalibrasyon yönteminin günlük uçuş saatine göre günlük veya biri başlangıçta diğeri gün sonunda olacak şekilde günde iki defa tekrarlanmasını gerektiğini ifade etmiştir [43].

Tempelmann vd. boresight dönüklük açılarının ışıın demetleriyle blok dengelemesi aşamasında veya özel boresight kalibrasyon uçuş verileriyle belirlenebileceğini, yer kontrol noktası kullanılmayan doğrudan coğrafi konumlandırma tekniğinde yüksek doğruluğu sağlamak için boresight dönüklük açılarının belirlenmesi gerektiğini, laboratuvar kalibrasyonuna nazaran operasyonel kalibrasyon yönteminin gerçek durumu daha iyi modellediğini ifade etmişlerdir [44].

Skaloud ve Schaer boresight kalibrasyonunun belirlenmesi için iki yaklaşımın olduğunu bunlardan birincisinin her bir fotoğraf için ayrı ayrı boresight dönüklük açılarının hesaplandığı ve sonrasında ağırlıklı ortalamalarının alındığı yöntem ile IMU ölçümlerinin blok dengelemesi aşamasında ek gözlem parametreleri olarak tanımlanması ve dengeleme sonucunda boresight dönüklük parametrelerinin hesaplanması olarak ifade etmişlerdir. Boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde sistematik hataların tespiti ve tüm sistemin kontrolünün sağlanması ile ölçümler arasında zamansal ve mekansal korelasyonların belirlenmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Kullanıcılar için küçük bir blokta boresight dönüklük açılarının belirlenmesinin fayda sağlayacağı, zamansal korelasyonun boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde etkili olduğu ve boresight dönüklük parametrelerinin harita üretimi sürecinde kullanılmasının doğruluğu arttıracağını açıklamışlardır [45].

Cramer akademik çalışmalarda doğrudan coğrafi konumlandırmanın doğruluğunun test alanlarında araştırıldığı lakin ticari uygulamalarda araştırılmasının yapılmadığını ifade

etmiş ve bu maksatla Suudi Arabistan’da yapılan uçuşlarda bunu araştırmıştır. Sistem kalibrasyonunun uzun dönem performansını test etmek maksadıyla her gün tek kolon çift yönlü uçulmuştur. Bu şekilde 8 gün boyunca 16 kolon uçuşu gerçekleştirilmiştir. İki farklı yükseklikten uçuşun mümkün olmaması sebebiyle, yüksekliğe bağlı kalibrasyon değerleri ile uçuş yönüne bağlı kalibrasyon değerlerini birbirinden ayırmak mümkün olmadığını ifade etmiş fakat projenin aynı yükseklikte devam etmesi sebebiyle bu ayrıma gerek kalmadığını belirtmiştir. İlk gün belirlenen kalibrasyon değerleri sonraki günlere uygulanarak doğruluk analizi yapılmıştır. Boresight dönüklük açılarındaki değişiminin GNSS/IMU sistem doğruluğuna yakın olarak beklendiği gibi 10’’-20’’ arasında olduğunu, konum kayıklığının ise 10-40 cm arasında değişmekte olduğunu, değerlerin bu kadar yüksek çıkmasının ise fotoğraf formatının fiziksel ilişkisi ile merkez projeksiyonun matematiksel modelinin birbirine uyumlu olmaması (Odak uzaklığı-Radyal simetri etkisi) ve tespit edilemeyen GNSS yörünge hataları ve veri işleme aşamasındaki diğer etmenler olarak ifade etmiştir. İlk gün elde edilen boresight parametrelerinin sonraki projelere uygulanmasıyla elde edilen doğrudan coğrafi konumlandırma sonuçları sonucunda 21 denetleme noktasına gelen artık hataların karesel ortalama hatalarının yatay bileşende (X\Y yönünde) 18/12 cm, düşey bileşende ise (Z yönünde) 46 cm olduğunu, bloğun ortasında 1 adet yer kontrol noktası kullanılmasıyla hataların farkedilir bir şekilde düştüğü ve yatay bileşende (X\Y yönünde) 7/9 cm düşey bileşende ise (Z yönünde) 14 cm karasel ortalama hataların hesaplandığını ifade etmiştir [46].

Jacobsen IMU’nun kamera gövdesine sabitlenmesine rağmen kamera ile IMU sistemleri eksenlerinin birbirine paralel olmadığı ve aradaki dönüklüğün belirlenmesi gerektiğini ifade etmiştir. GNSS anteni ile kamera arasındaki mesafenin fiziksel olarak ölçülebilmesine rağmen IMU ile kamera arasındaki dönüklüğün ışın demetleriyle blok dengelemesi aşamasında belirlenebileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte GNSS kayıklığının bir uçuş kolonunun çift yönlü uçulmasıyla belirlenebileceğini, kalibrasyon uçuşunun tek yükseklikte yapılması durumunda odak uzaklığıyla GNSS kayıklığının etkisinin ayırt edilemeyeceğini, eğer proje ile kalibrasyon uçuşu aynı yükseklikte ise odak uzaklığının etkisinin GNSS kayıklığı içinde kaybolacağı, GNSS kayıklığı ve odak uzaklığının ayrı ayrı belirlenmesinin kalibrasyon uçuşunun iki farklı yükseklikte yapılmasıyla mümkün olacağını ifade etmiştir. Boresight dönüklük açılarının ne kadar

süre sabit kalacağı hususunun cevaplanması gerektiğini, yeni nesil dijital hava kameralarında IMU'nun sabitlenmesi ile uzun dönemli bir kararlılığın bekleneceğini, 42 gün süreyle her gün yapılan kalibrasyon uçuşu neticesinde hesaplanan değişimin yüksek doğruluk gerektiren projelerde kabul edilebilir sınırların dışında kaldığı buna rağmen ortofoto üretimi amaçlı projeler için kullanılabileceğini ifade etmiştir [47].

Honkavaara sistem kalibrasyon parametrelerini tanımlamış ve GNSS kayıklık parametrelerinin uçuş yönüne bağlı fakat ölçekten bağımsız olması sebebiyle farklı yönlerde uçuşların gerçekleştirilmesi gerektiğini, farklı uçuş yüksekliğinde yapılacak kalibrasyon uçuşuyla iç yöneltme elemanlarının tespit edilebileceğini ifade etmiştir. Yapılan analizler sonucunda kare şeklindeki blokların boresight parametrelerini belirlemede daha efektif olduğu, yer kontrol noktası kullanımının doğrulama dışında bir etkisinin olmadığını sadece odak uzaklığı, asal noktanın konumu ve datum dönüşümlerinin belirlenmesinde gerekli olduğunu açıklamıştır. Sistem kalibrasyonunun sıklığı konusunda düşük doğruluk isterli projelerde sonbahar veya ilkbaharda, orta doğruluk isterli projelerde 1 haftadan fazla olmaması, yüksek doğruluk isterli projelerde harita yapılacak alanda, çok yüksek doğruluk isterli projelerde ise daha fazla uygulamalı test çalışmasının yapılarak uygun yaklaşımın belirlenmesi gerektiğini ifade etmiştir [48].

Honkavaara vd. Sjukulla test bölgesinde 2 ay boyunca 8 kez RC20 analog hava kamerasıyla boresight parametrelerinin sürekliliğini araştırmışlardır. İki farklı ölçekte yapılan uçuşlar neticesinde (1:3.000-1:4.000 ve 1:6.000-1:16.000) 0-2 gün arası ile 2-4 aylık süreçte boresight açılarının kararlılığını izlemişlerdir. Gün bazlı süreçte 6 mgon aylık dönemde ise 20 mgonluk bir değişim olduğu gözlenmiş ve uzun dönemdeki değişimin büyümesinin nedeninin kamera sistemindeki lens sisteminin değişmesi olduğunu ifade etmişlerdir [49].

Wegmann vd. sistem kalibrasyonu sırasında, algılayıcılara has parametreler ile farklı algılayıcılar arasındaki ilişkiyi açıklayan parametrelerin belirlenmesi gerektiğini, bu parametrelerin kameranın iç yöneltme elemanları, IMU ile görüntü koordinat sistemi arasındaki açısal farklar (boresight dönüklük açıları) ve ek parametrelerin modellenmesini içereceğini belirtmişlerdir. Boresight dönüklük açılarının yalnızca fotogrametrik yöntemlere belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Düz bir kalibrasyon

alanında GNSS kayıklığı düşey bileşeni ile odak uzaklığı arasındaki korelasyonun kalibrasyon uçuşunun iki farklı yükseklikte gerçekleştirilmesi durumunda belirlenebileceğini, asal nokta hatası ile GNSS kayıklığı yatay bileşenin ise en az bir uçuş kolonunun çift yönlü uçulmasıyla ayrı ayrı tespit edilebileceğini belirtmişlerdir [50].

Merchant vd. analog hava kameralarının aksine dijital hava kameraların birçok bileşeni olduğunu ve bu bileşenlerin operasyonel anlamda birbirleriyle etkileşim halinde olduğunu gerçeğinden yola çıkarak bu etkileşimin laboratuvar kalibrasyonu ile ölçülemeyeceğini ve operasyonel kalibrasyon yaklaşımının uygulanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu amaçla yapılan test uçuşuyla belirlenen kalibrasyon değerleri ile laboratuvar kalibrasyon değerleri karşılaştırılmış, beklenildiği gibi düşey yönünde 1 m varan bir iyileşmenin olduğunu ifade etmişlerdir [51].

Cramer, dijital hava kamera kalibrasyonlarının nasıl yapılacağı ile ilgili yazılı bir standart bulunmadığı noktasından hareketle EuroSDR çatısı altında dijital hava kamera kalibrasyonu adıyla bir çalışma grubunun oluşturulduğunu açıklamıştır. Klasik fotogrametrik yaklaşımda laboratuvar kalibrasyonunun standart bir yöntem olduğunu ve her iki yılda bir yapılması gerektiğini ifade etmiştir. Gelişen teknolojiye paralel olarak kameralara GNSS/IMU bileşenlerinin entegre olmasıyla sistemlerin bütünleşik kalibrasyonlarının daha karmaşık bir hal aldığını ve sistem kalibrasyonu için operasyonel kalibrasyonunun yapılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu kapsamda orta formatlı dijital hava kamerası olarak Applanix\Emerge DSS, geniş formatlı dijital hava kamerası içinse ZI-Imaging DMC ve dijital havasal tarayıcı sistemler için de Leica ADS40 seçildiğini belirtmiştir. Bu çalışma ile dijital hava kameralarının karmaşık iç mimarileri ve bütünleşik sistemlerin senkronizasyonu amacıyla kalibrasyonun önem kazandığını, laboratuvar kalibrasyonunun öneminin azaldığını ve operasyonel kalibrasyonunun yükselen trend olduğunu ifade etmiştir [52].

Honkavaara doğrudan coğrafi konumlandırma yönteminin doğruluğunun artırılması için operasyonel kalibrasyon yönteminin olmazsa olmaz olduğunu, sadece boresight kalibrasyonunun yeterli olmayacağını bununla birlikte iç yöneltme elemanlarına gelen düzeltmelerin de hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir. Bu maksatla RC20 analog film kamerası ile 1/8.000 ve 1/16.000 ölçeğinde çekilmiş 10 farklı blok yapısında ve tek bir

ölçek verisi kullanılarak sistem kalibrasyonu gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın en büyük kısıtının sistem kalibrasyonu parametrelerinin aynı blokta belirlenerek değerlendirilmesi olduğunu belirtmiş, fakat çeşitli blok yapılarında belirlenen parametrelerin blok yapısına göre değişkenliğinin gözlenmesi açısından faydalı olduğunu eklemiştir. Blok yapılarını kapsamlı (4 yatay-2 dikey), artı (1 yatay-1 dikey) ve tek kolondon oluşturmuştur. Yapılan değerlendirmede kapsamlı ve artı şeklindeki blokta hesaplanan boresight dönüklüklerin standart sapmaları birbirine yakın çıkarken tek kolonda bu değerlerin iki kat arttığını gözlemiştir. İlk kalibrasyon ile son kalibrasyon arasındaki 4 aylık süreçte boresight dönüklük açılarının değişmediğini ifade etmiştir [53].

Cramer sistem kalibrasyonun özel olarak hazırlanmış kalibrasyon alanlarında belirlenmesi gerektiğini, geometrik kalibrasyonunun operasyonel olarak belirlenebileceğini ifade etmiştir. Analog kameralar için hazırlanan kalibrasyon prosedurlerinin digital kameraların karmaşık yapıları nedeniyle uygulanamayacağını belirtmiştir [54].

Hutton ve Mostafa doğrudan coğrafi konumlandırma yöntemi doğruluğunun artırılması için, IMU'nun uçağa sıkıca monte edilmesini, IMU düzlem koordinat sistemi ile kamera platform koordinat sistemi arasındaki dönüklüğün hesaplanmasını, kamera perspektif merkezi ile GNSS anteni arasındaki mesafenin ölçülmesini ve kamera iç yöneltme elemanlarının belirlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. IMU'nun mümkün olduğunca kamera perspektif merkezine yakın ve paralel olarak montajının yapılması gerektiğini, IMU ile kamera düzlemleri arasındaki dönüklüğün boresight dönüklük açıları olarak tanımlandığını, boresight dönüklük açılarının IMU'nun sabit kaldığı sürece değişmeyeceğini ifade etmişlerdir. Öteleme vektörünün IMU ve GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafe olarak tanımlamışlardır [55].

Yastıklı ve Jacobsen sistem kalibrasyon parametrelerini, sistemlerin kendi kalibrasyonları ve birbirleriyle olan ilişkisel kalibrasyonları olarak ikiye ayırmışlardır. Sistemlerin birbirlerine göre kalibrasyonunda GNSS anteni ve IMU ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafeyle IMU düzlemi ile kamera düzlemi arasındaki dönüklüğün belirlenmesi olarak ifade etmişlerdir. Kameranın iç yöneltme elemanları her ne kadar laboratuvar ortamında hassas olarak belirlense de uçuş anında basınç ve sıcaklık gibi dış

etmenlerle laboratuvar ortamındaki değerlerin değişebileceğini ve operasyonel kalibrasyon yöntemiyle uçuş şartlarındaki değişimin modellenebileceğini belirtmişlerdir. Odak uzaklığı ile GNSS kayıklığı düşey bileşeni arasındaki korelasyon sebebiyle kalibrasyon uçuşunun en az iki farklı yükseklikte yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. GNSS kayıklığı yatay bileşeni ile asal nokta arasındaki korelasyon sebebiyle en az bir uçuş kolonunun çift yönlü uçulması gerektiğini belirtmişlerdir [56].

Honkavaara vd. Sjukulla test bölgesinde UltracamD dijital hava kamerasıyla toplam 10 saatlik uçuş verisiyle sistemin güvenilirliği ve teknik performansını analiz ettikleri çalışmalarında eşzamanlı yapılan kalibrasyon uçuşlarıyla RC20 analog hava kamerasıyla UltracamD dijital hava kamerasını karşılaştırmışlardır. Karşılaşılan en büyük problemin GNSS/IMU verisinin doğruluğunun düşük olduğu, bunun sebebinin ise kamera montajındaki jiroskopun stabil olarak monte edilememesi olduğunu ifade etmişlerdir. Bu problem neticesinde kameranın i yöneltme parametrelerinin duyarlılığı azalmış ve fotoğrafların kalitesinde bozulmalar yaşandığını ileri sürmüşlerdir. Sonbaharda yapılan bu uçuşların güneş açısının düşük olması sebebiyle olumsuz bir etki yarattığını da ayrıca ifade etmişlerdir [57].

Casella ve Franzini GNSS anteni ile kamera perspektif merkezi arasındaki mesafenin (teleme vektörü) uçuştan uçuşa değiştiğini, yanlış hesaplanmış odak uzaklığı veya modellenememiş sistematik hataların varlığı sebebiyle farklı uçuş yüksekliğinde öteleme vektörünün değişeceğini belirtmişlerdir [58].

Cramer laboratuvar kalibrasyonu ile operasyonel kalibrasyon arasındaki temel farkın kalibrasyon değerlerinin gerçek şartlar ile yapay şartlarda belirlenmesi olarak açıklamıştır. Bununla birlikte birçok kamera kalibrasyon prosedürü hem laboratuvar hem de operasyonel kalibrasyon sürecini içermekte olduğunu ifade etmiştir. Mevcut uygulamalarda laboratuvar kalibrasyonunun öneminin azaldığını ve operasyonel kalibrasyonun öneminin arttığını gözlemlemiştir. Operasyonel kalibrasyonun kullanıcı tarafından üretici firmanın verdiği laboratuvar kalibrasyon değerlerini doğrulamak amacıyla yapılmakta olduğunu belirtmiştir. Bu kapsamda Frederikstad test sahasında DMC, UltracamX ve ADS40 hava kameralarıyla test verisinin toplandığı ve elde edilen sonuçların paylaşılacağını bildirmiştir [59].

Skaloud sistem kalibrasyondan anlaşılması gereken hususun özetle algılayıcılar arasındaki konum (öteleme vektörü), dönüklük (boresight dönüklük açıları) ve zaman sekronizasyonu olarak tanımlamıştır. Öteleme vektörünün iç yöneltme elemanlarından ve/veya GNSS ölçümlerinden kaynaklanan diğer sistematik hatalarla yüksek korelasyon içinde olduğunu ifade etmiştir [60].

Smith vd. Milton Keynes test sahasında %60 ileri %20 yan bindirme oranlarında Ultracam D dijital hava kamerasıyla gerçekleştirmiş oldukları kalibrasyon uçuşu sonuçlarını paylaşmışlardır. 3 kez tekrarlanan bu uçuşlar neticesinde boresight parametrelerinin büyük değişiminin roll açısında olduğu, pitch ve yaw dönüklüğünde ise değişimin az olduğunu ifade etmişlerdir. Boresight kalibrasyonunun tek uçuş kolonu ve 2 adet yer kontrol noktası kullanılarak yapılan hesaplama ile 4 uçuş kolonu 17 yer kontrol noktası kullanılarak yapılan hesaplama arasında dönüklüklerinin standart sapma farkının iki kat olduğunu belirtmişlerdir. Bağlama noktalarının boresight değerlerinin hesaplanmasında önemli bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir [61].

Honkavaara vd. DMC ve UltracamD dijital hava kameralarıyla Skojulla test bölgesinde farklı yer örnekleme aralıklarında hava fotoğrafı çekimlerinin yapıldığını, yatay doğrulukların birbirlerine yakın çıktığını ama analog hava kameraların yatay doğruluğunun daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. DMC dijital hava kamerasının nokta belirleme doğruluğunun UltracamD dijital hava kamerasından daha yüksek olduğunu, ek parametrelerin geliştirilmesi kaydıyla çoklu lens sistemli kameraların büyük bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir [62].

Honkavaara vd. dijital fotogrametrik sistemlerin geometrik, konumsal çözünürlük, spektral ve radyometrik kalibrasyonlarının yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu kapsamda Sjojulla test sahasında 5-50 cm çözünürlük aralığında kullanılabilen test-bar hedefleri, kalıcı yer kontrol noktaları, gri ölçekleme işaretlerinin hazırlandığını ve DMC geniş formatlı dijital hava kamerasının geometrik, radyometrik ve konumsal kalibrasyon sonuçlarını paylaşmışlardır [63].

Franzini operasyonel uçuş şartlarıyla etkileşime giren odak uzaklığının değişimini analiz etmiş, yükseklik ve atmosferik etkilerin bu değişimin başlıca nedenleri olarak öngörmüştür. Sistem kalibrasyonunu operasyonel yöntemlerle belirlemiş ve bağımsız bir

test uçuşuyla kalibrasyon değerlerinin doğruluğunu kontrol etmiş ve analizler neticesinde 6 parametrelili sistem kalibrasyon parametrelerinin her zaman belirlenmesi gerektiğini, bloğa ait küçük bir bölgede kalibrasyon parametrelerinin hesaplanarak tüm bloğa uygulanması gerektiğini, öteleme vektörü ile GNSS kayıklığı arasında tam korelasyon olduğunu, kalibrasyon uçuşuyla proje uçuşunun aynı yükseklikte olması gerektiğini ifade etmiştir [64].

Cramer sistem kalibrasyonunu, sistemlerin bilinmesi gereken niceliklerini tanımlama süreci olarak tanımlamıştır. Dijital hava kameralarının kalibrasyonlarını geometrik ve radyometrik olarak ikiye ayırmış ve radyometrik kalibrasyonun laboratuvar ortamında, geometrik kalibrasyonun ise operasyonel kalibrasyon olarak yapılması gerektiğini ifade etmiştir. Analog kameraların aksine dijital hava kameralarının kalibrasyonlarıyla ilgili standart ve yönergenin olmadığına dikkat çekmiş ve USGS ve EUROSDR'ın digital hava kameralarını kalibrasyon standartları ile ilgili çalışmaların başlatıldığını ve kabul edilebilir ve uygulanabilir bir kalibrasyon yönteminin belirlenmesinin amaçlandığını ifade etmiştir [65].

Casella vd. öteleme vektörünün kararlılığının düşük olduğunu, odak uzaklığının uçuş yüksekliğiyle bağlı olarak değiştiği bu sebeple proje alanıyla aynı yükseklikte yapılacak kalibrasyon uçuşuyla odak uzaklığının belirlenebileceğini ifade etmişlerdir [66].

Stensaas ve Lee USGS kamera kalibrasyon yönergesindeki dörte dörtlük kalibrasyon süreç matrisinin sütununda sözleşme yönergesi, üretici ve veri sağlayıcı sertifikasyonu ve doğruluk standartlarını, satırda ise sözleşme acentası, digital hava algılayıcıları üreticileri, dijital veri üreticileri ve veri sağlayıcılar olduğunu ifade etmişler ve sürecin bu matrise göre yönetilmesi gerektiğini savunmuşlardır [67].

Stensaas temel olarak, geleneksel kamera kalibrasyonunun amacını, ortaya çıkan görüntü üzerindeki noktaların iki boyutlu koordinat ölçümlerini kullanarak pozlama anında kameraya giren ışın demetinin kesin geometrisini yeniden yapılandırabilmek olarak tanımlamıştır. Algılayıcıların geometrik kalibrasyonu olarak hassas kalibrasyon aletleri kullanarak laboratuvar kalibrasyonu, laboratuvar yöntemleri ile dijital algılayıcı kalibrasyonu ve operasyonel kalibrasyon olmak üzere üç yöntem olduğunu ifade etmiştir. USGS tarafından pek çok farklı amaç için kullanılan birçok farklı sistemin tüm

gereksinimlerini karşılamak için dijital görüntüleme sistemlerinin kalibrasyonu için uygun prosedür oluşturma motivasyonu ile hareket ettiğini belirtmiştir [68].

Yastıklı vd. 21 hava fotoğrafı ve lidar verisinden türetilen 25 adet yer kontrol noktasıyla Redlake MS 4100 dijital hava kamerasının iç yöneltme elemanlarını, GNSS kayıklığını ve boresight dönüklüklerini hesapladıkları çalışmalarında GNSS/IMU tabanlı uygulamaların sistem kalibrasyon hatalarına karşı son derece hassas olduğu için, görüntü algılayıcısının boresight dönüklük açıları ve geometrik kalibrasyonu da dahil olmak üzere sistem kalibrasyonunun yapılmasının hassas veri toplanması için hayati öneme sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Veri edinimi sırasında varsayılan matematik model ile fiziksel durum arasındaki herhangi bir tutarsızlığın nesne düzeyinde hataya neden olabileceğini, bu nedenle kamera ile IMU gövde çerçevesi arasındaki dönüklük ile öteleme vektörünün hesaplanması ve kameranın geometrik kalibrasyonunun yapılması gerektiğini belirtmişlerdir [69].

Skaloud doğrudan coğrafi konumlandırmayı uzay zamanında bazı olayların başlangıç bilgisini etme etme süreci olarak tanımlamıştır. Algılayıcı tipini göre ilgilenilen nesnenin başlangıç noktasını zaman, konum, dönüklük ve hız gibi dış yöneltme parametreleriyle belirlenmesi gerektiğini ve bu bilgilerin doğrudan ölçme aletleriyle elde edildiği durumda doğrudan coğrafi konumlandırma yönteminin gerçekleştirilmiş olacağını ifade etmiştir. Doğrudan coğrafi konumlandırma tekniğinde dış yöneltme parametrelerinin istenilen doğruluklara uygun olarak hesaplanmasının garanti edilemeyeceğini, bunun sebebinin ise tespit edilemeyen algılayıcıyı hareketleri olduğunu ifade etmiştir. Doğrudan coğrafi konumlandırma güvenilirliğinin, yaklaşımın darboğazı olduğunu yöntemin doğruluğunun artırılması için operasyonel kalibrasyon sürecinde kamera ve yardımcı navigasyon sistemlerinin birbirleriyle ilişkilerinin ve sistemlerin iç yöneltme parametrelerinin de belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Montaj parametrelerinin belirlenmesi kapsamında GNSS anteni ile kamera arasındaki fiziksel mesafenin belirlenmesi (öteleme vektörü) ve IMU ile kamera arasındaki dönüklüğün belirlenmesi (boresight dönüklük açıları) olarak ikiye ayırmıştır. Öteleme vektörünün hassas şekilde ölçülmesinin zorunlu olmadığını fakat gözetildiğini ve GNSS/IMU verileriyle kalman filtrelemesi yöntemiyle hassas bir şekilde belirlenebildiğini ifade etmiştir. Öteleme vektörünün diğer sistematik hatalarla

yüksek korelasyon içinde olduğunu açıklamıştır. Boresight dönüklük açılarının hassas bir şekilde belirlenmesi gerektiğini ifade etmiştir [70].

Cramer EuroSDR altında kurulan EuroDAC'ın bir araya gelme motivasyonundan bahsetmiş ve Avrupa kıtasında geçerli olacak ülkeden ülkeye değişmeyen kabul edilebilir, sürdürülebilir bir sertifikasyon ve standartizasyon çalışması olarak tanımlamıştır. Bu kapsamda kullanıcı ihtiyaçlarının belirlenmesi, kamera üreticilerini görüşlerinin alınması, EuroDAC sürecinin modellenmesi, EuroDAC sürecinin kabul edilmesi ve bu sürecin üyeler tarafından uygulanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilgi duyan tüm kişi, kurum ve kuruluşların projeye dâhil olabileceğini duyurmuştur [71].

Kurz vd. doğrudan coğrafi konumlandırma yaklaşımıyla yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulmadan fotoğrafların dış yöneltme elemanlarının belirlenebildiğini ifade etmişlerdir. DLR 3K kamerasının iç yöneltme elemanlarını laboratuvar kalibrasyonu ile boresight dönüklüklerini ise test uçuşuyla belirlemişlerdir. İç yöneltme elemanları, laboratuvar ortamında self kalibrasyonlu blok dengelemesi ile hesaplanmış, boresight dönüklükleri ise operasyonel ortamda GNSS/IMU verileriyle 3 ışınli bağlama noktalı ve yer kontrol noktası kullanılmadan hesaplanmıştır. Kalibre edilmiş boresight dönüklük açılarının doğruluğunun uçuş anındaki dönüklüklerde yaşanan değişim ile doğru orantılı olduğunu ifade etmiştir [72].

Honkavaara hava fotogrametrisinin güvenilirliği, doğruluğu ve verimliliğinin kalibre edilmiş yüksek kaliteli sensörler ve hassas veri işleme sürecine dayandığını, dijital algılayıcı sistemlerin kalibrasyon süreçlerinin geliştirildiğini ve bu süreçte yaşanan temel zorlukların dijital sistemlerde geniş çaplı değişimler, radyometrik kalibrasyon ihtiyacı ve doğru sistem kalibrasyonu olduğunu ifade etmiştir. Çalışmasının amacını dijital fotogrametrik havadan görüntüleme sistemlerinin kalıcı bir test alanında sistem kalibrasyonunun gerekliliği olarak açıklamıştır. Kalibrasyon sürecini belirli durumlarda, sistem girdilerini çıktılarına dönüştürmek için gerekli olan model ve parametreleri ve bu dönüşüm parametrelerinin doğruluğu olarak tanımlamıştır [73].

Qtaishat vd. uçuş kolonu, yer kontrol noktası ve bağlama noktasının boresight dönüklüklerin hesaplanmasındaki etkisini araştırmışlardır. UltracamX dijital hava kamerası için yer kontrol noktası kullanılmadan tek kolonla yapılan hesaplamada pitch

bileşeninin, RMK TOP 15 analog hava kamerası için ise de roll bileşeninin düşük doğrulukla belirlendiğini tespit etmişlerdir. Her iki kamerada da baş açısının yer kontrol noktasından bağımsız olarak hesaplandığı gözlemişlerdir. Bununla birlikte 2 adet yer kontrol noktası ile tüm yer kontrol noktalarını kullanmak açısından kayda değer bir farkın olmadığını ifade etmişlerdir. Genel olarak yapılan tüm seçenekler tek kolon seçeneği hariç diğer çözümler birbirine yakın çıkmıştır. Bağlama noktaları sayısının boresight parametrelerinin hesaplanmasında sınırlayıcı bir etkiye sahip olmadığını, 1172, 434, 368 ve 268 adet bağlama noktalı bloklarda kalibrasyon değerlerinin birbirine yakın çıktığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak UltracamX dijital hava kamerası için tek kolonlu blok hariç boresight parametrelerini belirlerken yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulmadığı ve yer kontrol noktası, bağlama noktası ve kolonların değişken olarak kullanıldığı farklı blok biçimlerinde belirlenen kalibrasyon parametrelerinin birbirlerine çok yakın çıktığını ifade etmişlerdir [74].

Honkavaara vd. operasyonel kalibrasyon için inşa edilen kalıcı veya geçici birçok test alanının mevcut olduğunu ve Nasa'nın kullandığı Stennis Uzay Merkezi Test Alanı, Almanya'da bulunan Vaihingen, Norveç'te Fredrikstad, İtalya'da Pavia ve son olarak USGS'in kullandığı Madison Test alanlarını örnek olarak sıralamışlardır. Finlandiya Jeodezi Enstitüsünün inşa ettiği ormanlık alan, göl ve kırsal barındıran Sjököla test alanı diğerlerine göre açıklık ve kullanılabilirlik sebebiyle daha üstün olduğunu ifade etmişlerdir. Sjököla test alanı 1994 yılında yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları ve uydu görüntülerin testi için inşa edildiğini, görüntü ve fotoğrafların radyometrik, geometrik ve konumsal çözünürlüğün test edilmesi için gerekli yer hedeflerinin olduğunu belirtmişlerdir. Kalıcı bir test alanının özelliklerini, tüm yıl boyunca kullanılabilen, bakımı için yapılacak faaliyetlerin en aza indiricek şeklinde kendi kendini idame edebilen, sürekli olarak izlenebilen ve kullanımı herhangi bir kısıta bağlı olmayan diye tanımlamışlardır. Bu kapsamda araziye hedeflerin atmosferik şartlardan etkilenmemesi için, çakıl, kil, kum ve fiber maddelerden oluştuğunu açıklamışlardır. Konumsal, radyometrik ve geometrik kalibrasyonlar için ayrı ayrı olacak şekilde kalıcı ve gerektiğinde taşınabilir hedeflerin araziye yerleştirildiğini ifade etmişlerdir [75].

Cramer Avrupa kıtasında geçerli olacak kamera kalibrasyonu ve geçerlilik standartlarını belirlemek amacıyla bir araya gelen EuroSDR'in alt çalışma grubu olan EuroDAC'ın

Çalışma prensipleri, devam eden projeler ve vizyonundan bahsetmiştir. Bu maksatla ADS40, UltracamD ve DMC dijital hava kameralarının geometrik ve radyometrik kalibrasyonlarının yapıldığını, ADS40 dijital hava kamerasının self kalibrasyonu için 12 ebner parametreleri yeterli olurken, UltracamD ve DMC dijital hava kameraları için bu parametrelerin yeterli olmadığı ek parametrelere ihtiyaç duyulduğunu ifade etmiştir. Operasyonel kalibrasyon yönteminin zamanla önem kazanacağını belirtmiştir. Tüm sistemin kontrol edilebildiği operasyonel kalibrasyon ile sistemin iç yöneltme elemanlarının tespitinin ve uçuş anındaki değişiminin modellenmesi için gerekli olduğunu, bunun için yeterli yer kontrol noktasının olduğu test alanlarına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmiştir. Bu maksatla Finlandiya tarafından Sjukulla, İtalya’da Pavia, Almanya’da Vaihingen, Norveç’de Fredriksat test sahasının inşa edildiği veya uluslararası kullanıma açıldığı, İspanya’nın da bu maksatla test sahası inşa etmeye başladığını ifade etmiştir. Sonuç olarak analog hava kameralarını kalibrasyon yöntem ve standartlarının belli olduğu buna rağmen geometrik açıdan karmaşık bir yapıya sahip dijital hava kameraları için hala genel geçer bir kalibrasyon yöntemi ve standartının belirlenmediği, üretici firmalar tarafından yapılan kalibrasyonun tek dokümantasyon olduğu ve doğrulanmasına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmiş ve Alman Ulusal Standardı DIN 18740 göre kamera kalibrasyonun uçuştan en az 1 yıl önce doğrulanması veya en az iki yıl önce yeniden kalibre edilmesi gerektiğini ifade etmiştir [76].

Qtaishat vd. yeni gelişen dijital hava kamera sistemlerinin geleneksel analog kamera sistemlerinin aksine çoklu lens sistemleriyle çalışması, fotoğrafların bir veya birden çok CCD ile kaydedilmesi neticesinde çok karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Bu karmaşık yapıyla çekilen fotoğrafların kullanılabilmesi için, karmaşık geometrik yapılarının anlaşılması, gerçek kamera değerlerinin belirlenmesi, kalibre edilmiş kamera geometrisi ile perspektif geometri arasındaki ilişkinin analiz edilmesi ve kamera kalibrasyonlarının hangi sıklıkta yapılması gerektiğinin analiz edilmesi gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Bunların bir kısmının uzun süreli tecrübe ve araştırma gerektirirken bir kısmının ise kısa süreçlerde araştırılabileceğini ifade etmişlerdir. Bu kapsamda UltracamX dijital hava kamerasının geometrisini analiz etmek, eğer varsa uygun bir kalibrasyon yöntemini belirlemek, alternatif kamera kalibrasyon yaklaşımlarını irdelemek, fotoğraf, yer kontrol ve bağlama noktası sayısının kalibrasyon matrisini

belirlemeye etkisini araştırmak maksadıyla kalibrasyon uçuşları gerçekleştirmişlerdir. Tüm blok yapılarında yer kontrol noktası kullanılmadan boresight parametrelerinin belirlendiği ve sadece tek kolonlu bloklarda yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulduğunu, bağlama noktası sayısının kalibrasyon sürecine etkisinin göz ardı edilebilecek kadar küçük olduğunu ifade etmişlerdir [77].

Honkaavara vd. operasyonel kalibrasyonda tüm değerlerin belirlenememesi, çok fazla değişken ve dış etmenin olması nedeniyle iyi modellenememesi sebebiyle en doğru kalibrasyon yönteminin kontrollü koşullarda yapılan laboratuvar kalibrasyonu olduğunu ifade etmişlerdir. Operasyonel kalibrasyonunun karmaşık bir yöntem olduğu ve uçuş parametrelerinin ve sistemin ölçüm kapasitesinin hesaplandığı bir yaklaşım olarak tanımlamışlardır. Kalıcı fotogrametrik test alanının faydalarından bahsetmiş, test alanıyla ilgili ne kadar az değişken olursa o derece kullanışlı olacağını ifade etmişlerdir. Farklı test bölgerinde yapılan kalibrasyonlar ile sistemde meydana gelen değişiklerin hangisinin sistemle hangisinin test bölgesiyle ilgili olduğu ayrımının yapılamayacağını belirtmişlerdir. Test bölgesi kolay kullanılabilir ve meteorolojik olarak uçuşa uygun bölgede inşa edilmesi gerekliliğini ifade etmişlerdir. Test bölgesinde geometrik, radyometrik ve konumsal çözünürlüğü test edecek hedeflerin olması gerekliliği ifade edilmiş ve Sjøkulla test alanının bu özellikleri barındırdığı bildirmişlerdir [78].

Stensaas vd. uluslararası çapta kabul görülecek şekilde dijital hava algılayıcıların kalibrasyon süreç işlem adımlarının ayrıntılı şekilde oluşturulmasını gerektiğini ifade etmişlerdir [79].

Cramer dijital hava kameralarının kalibrasyonu adlı raporunda kamera üreticilerinin, yazılım firmalarının, ulusal haritacılık kuruluşlarının ve gönüllü akademisyenlerin çalışmalarını derlemiştir. GNSS kayıklığı, öteleme vektörü ve boresight dönüklük açılarının genel sistem doğruluğu için mutlaka hesaba katılması gerektiğini ifade etmiştir [80].

Blazquez vd. kalibrasyon kavramının çeşitli boyutları olduğunu: algılayıcı ve sistem kalibrasyonu; zamansal, mekansal, radyometrik ve spektral kalibrasyon; laboratuvar, operasyonel ve self kalibrasyon; fiziksel ve sayısal yönelimli kalibrasyon olarak sıralamışlardır [81].

Cramer vd. geniş formatlı dijital hava kameraları için uçuş planının en az iki çapraz uçuş kolonu olacak şekilde 5-7 uçuş kolonundan ve her bir kolon da 10-15 fotoğraftan oluşması gerektiğini, ileri bindirmenin %80 yan bindirmenin ise %60 olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Düz alanlarda odak uzaklığı ile düşey bileşenler arasındaki korelasyon sebebiyle iki farklı uçuş yüksekliğinde uçuş planının yapılması gerektiğini, yüksek irtifalı uçuşlarda doğu-batı yönünde 3 kuzey-güney yönünde ise 2 uçuş kolonunun planlanmasının en uygun çözüm olduğunu ifade etmişlerdir. Test bölgesinde inşa edilecek yer kontrol noktalarının sayısı ve dağılımının ise yer örnekleme aralığına göre değişkenlik gösterdiğini açıklamışlardır. Yer kontrol noktalarının doğruluğunun yer örnekleme aralılığından 10 kat hassas şekilde ölçülmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak dijital hava kameraları için genel bir standart ihtiyacının gerekli olduğunu ifade etmişlerdir [82].

Qtaishat GNSS/IMU veri işleme sürecinin hassas bir şekilde yapılması ve sistem kalibrasyon parametrelerinin yüksek doğrulukla belirlenmesi durumunda doğrudan coğrafi konumlandırmanın bütünsel algılayıcı yöneltmesi doğruluğuna yaklaşacağını ifade etmiştir [83].

Tang doğrudan coğrafi konumlandırmanın doğası gereği var olan sistematik etkilerden arındırılmasını, boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklığının öncelikle hesaplanması gerektiğini ifade etmiştir. Sistem kalibrasyonunun en zor sürecinin birbirleriyle korelasyon içinde bulunan parametrelerin bağımsız olarak hesaplanması olduğunu belirtmiştir [84].

Passini vd. son nesil dijital hava kameralarından Ultracam Eagle, DMC II 140 ve DMCII 250'yi geometrik ve radyometrik doğruluklarını araştırmak amacıyla, farklı test alanlarında farklı yüksekliklerde, farklı bindirme oranlarında ve çift yönlü uçuşların yapıldığı farklı blok yapılarında operasyonel kalibrasyon yöntemiyle sistem kalibrasyon parametrelerini hesaplamışlardır. Uçuşun çift yönlü yapılması asal nokta hatası ve GNSS kayıklığının birbirinden bağımsız hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamış, boresight dönüklükleri hesaplanmış ve farklı yüksekliklerde yapılan uçuş sayesinde odak uzaklığına gelen düzeltmelerin hesaplandığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte Bluh yazılımı kullanılarak kameraların self kalibrasyonu da yapmışlardır. Sonuç olarak; uçuş

kolonlarının çift yönlü uçulmasıyla asal nokta ile GNSS kayıklığı yatay bileşenlerinin birbirinden bağımsız olarak belirlenmesini, uçuşun iki farklı yükseklikte yapılmasıyla kameranın odak uzaklığının kalibre edilmesini sağlamışlardır. Operasyonel kalibrasyon sayesinde sistem kalibrasyon parametreleri uçuş şartlarında kalibre edilmiş ve gerçek durumun daha iyi modellendiğini ifade etmişlerdir [85].

Merchant laboratuvar kalibrasyonunda uçuş şartlarına bağlı olan değişkenler ve bunların kalibrasyon parametrelerine etkilerinin göz ardı edildiğini, sıcaklığın temel etken olduğu bunun yanında uçaklarda camın etkisinin hesaplanması gerektiğini ifade etmiş ve bunlarla ilgili yaptığı çalışmalarda operasyonel kalibrasyon ile elde edilen değerlerin laboratuvar kalibrasyon değerlerine göre daha yüksek doğruluk sağladığını ifade etmiştir [86].

Merchant laboratuvar kalibrasyonunun mükemmel ortam durumunu yansıttığını fakat çevresel etmenlerin özellikle sıcaklık ve basınç gibi dış etmenlerin etkisinin modellenemediğini bu yüzden operasyonel kalibrasyonun yapılması gerektiğini, operasyonel kalibrasyonun sadece kalibrasyon amacıyla değil aynı zamanda üretici firma tarafından yapılan laboratuvar kalibrasyonun değerlerini doğrulama amacını taşıdığını da ifade etmiştir [87].

Day ve Jennings Boresight kalibrasyonun kalıcı test alanında yapılmasının uygulama yönünden birtakım kısıtlara sahip olduğu, hava durumu, uçuş izinleri ve diğer nedenlerle bu uçuşların her zaman mümkün olamayacağını ifade etmişlerdir. Pratik bir çözüm arayışından hareketle açık kaynaklardan yer kontrol noktası toplamış ve oluşturulan geçici test bloğunda boresight dönüklük açılarını belirlemişlerdir. Sonuçlar analiz edildiğinde boresight dönüklükleri hesabının görece bağlama noktalarına dayandığını, yer kontrol noktalarının sadece doğrulama amaçlı kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [88].

1.2 Tezin Amacı

Literatür taraması sonucunda 1963 yılından günümüze kadar yapılan akademik çalışmalarda fotogrametrik dijital hava kameralarının boresight dönüklük parametrelerinin tanımı ve belirlenme yöntemleri analiz edilmiştir. Özel kalibrasyon uçuşunun tanımı yapılmış ve ideal kalibrasyon uçuş yapısı ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Boresight dönüklük parametrelerinin sonuç ürün doğruluğuna etkisi araştırılmış ve özellikle doğrudan coğrafi konumlandırma yönteminde mutlak doğruluk için duyulan

ihtiyaç açıklanmıştır. Kamera kalibrasyon süreci ile ilgili akademik çalışmalar “ne” ve “nasıl” sorularına cevap vermekle birlikte en az bu sorular kadar önemli olan “hangi sıklıkta” ve “gereklilik” sorularına cevap verilmemiştir.

Ticari hayatta yaygın kullanıma sahip olan fotogrametrik dijital hava kameralarının hangi sıklıkta kalibrasyonlarının yapılması gerektiği kullanıcılar ve standart koyucu karar verme mekanizmaları için bilinmesi gerekli bir bilgidir ve ne yazık ki bu soruya cevap verecek kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada farklı dijital hava kameralarının boresight dönüklük parametrelerinin 5 yıllık zaman içerisindeki değişimi analiz edilerek kalibrasyonun hangi sıklıkta yapılması gerektiği sorusuna cevap aranmıştır. Kalibrasyon parametreleri farklı yöntemlerle hesaplanarak ve en uygun kalibrasyon yöntemi belirlenmiş, proje alanının küçük bir bölümünde hesaplanan değerler ile test alanında hesaplanan kalibrasyon değerlerinin doğrulukları karşılaştırılarak kalibrasyon uçuşuna gerek olup olmadığının cevabı araştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Boresight dönüklük açılarının her uçuş sezonu öncesinde belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda açıların 5 yıllık değişimleri analiz edilerek kalibrasyonun hangi sıklıkta yapılması gerektiği araştırılacaktır.

Boresight dönüklük açılarının farklı hesaplama yöntemleri olsa da Fark yöntemiyle hesaplanan değerlerin gerçeği daha iyi yansıtacaktır. Bu kapsamda farklı yöntemlerle hesaplanan parametreler kalibrasyon ve proje alanında test edilecektir.

Boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde özel kalibrasyon test uçuşuna gerek olmadığı, standart fotogrametrik hava fotoğrafı çekim uçuşlarının yeterli olup olmayacağı araştırılacaktır.

BORESIGHT DÖNÜKLÜK AÇILARININ ZAMANSAL DEĞİŞİM ANALİZİ

2.1 Giriş

Bu bölümde boresight dönüklük açılarının zamansal değişimi yıllık olarak gözlenerek hangi sıklıkta kalibrasyon yapılması gerektiği sorusuna cevap aranmıştır. Boresight dönüklük açılarının tanımı ve hesaplanma yöntemlerinden kısaca bahsedilerek, boresight dönüklük açılarının hesaplandığı operasyonel kalibrasyon yöntemi açıklanmış ve akademik çalışmalarda boresight dönüklük açılarının kararlılığı ile ilgili yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler paylaşılmıştır. Boresight dönüklük açılarının yıllık değişimini analiz etmek maksadıyla Harita Genel Müdürlüğü envanterinde bulunan UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 ve 2017 yıllarında gerçekleştirilen özel kalibrasyon uçuşlarıyla boresight dönüklük açılarının yıllık değişimi hesaplanmıştır. Aynı şekilde UCE-80 dijital hava kamerası kullanılarak 2012-2016 yılları arasında gerçekleştirilen özel kalibrasyon uçuş verileriyle boresight dönüklük açılarının değişimi gözlenmiştir. Her iki veri setiyle farklı yıllarda hesaplanan boresight dönüklük açılarının doğrudan coğrafi konumlandırmaya etkisi de araştırılmıştır.

2.2 Boresight Dönüklük Açılarının Tanımı ve Belirlenmesi

Fotoğraf çekim anında kamera perspektif merkezinin konum ve dönüklüğü GNSS/IMU entegre sistem tarafından ölçülmektedir. IMU uçağın fotoğraf çekim anındaki dönüklüğünü kamera platform koordinat sistemini düzlem kabul ederek ölçmesi gerekirken kendi platform koordinat sistemini düzlem kabul ederek ölçmektedir. IMU platform koordinat sistemi ile kamera platform koordinat sistemi teoride birbirine paralel olmasına rağmen, gerçekte paralel olmaları mümkün değildir. IMU koordinat sistemi düzlemi ile kamera platform koordinat sistemi düzlemi arasındaki dönüklükler boresight dönüklükleri olarak tanımlanmıştır [3, 14, 61, 69]. Boresight dönüklük açılarını doğrudan ölçmek, sistem eksenlerin fiziksel olarak gözlenememesi nedeniyle mümkün değildir. Bu

sebepten dolayı boresight dönüklük açıları özel kalibrasyon uçuşlarıyla hesaplanmaktadır [31, 36, 63, 81]. Boresight dönüklük açılarının hesaplanması için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ilki, ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda elde edilen dengelenmiş dış yöneltme elemanları ile GNSS/IMU bütünleşik sistemiyle doğrudan elde edilen yaklaşık dış yöneltme elemanları arasındaki farkların ortalamasıdır [8, 18, 19, 50]. Diğer bir yöntem ise ışın demetleriyle blok dengelemesine boresight dönüklük açılarının ek bilinmeyen olarak dahil edilmesidir [15, 17, 28, 45]. Görüntülerin birbirlerine göre göreceli konumlarına dayanan bir başka yöntemde ise, boresight dönüklük açıları bağlama noktaları kullanılarak hesaplanmaktadır [72]. Bağlama noktalarının ve yer kontrol noktalarının boresight dönüklük açılarının hesaplanmasındaki rolü de araştırılmıştır. Bağlama noktaları sayısının boresight dönüklük açılarının hesaplanmasındaki etkisinin çok küçük olması nedeniyle, boresight dönüklük açılarının minimum sayıda bağlama noktası ile hesaplanabileceği ileri sürülmüştür [39, 61, 74, 77]. Boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde kontrol noktaları sayısının etkisi başka bir tartışma konusudur. Yer kontrol noktasının boresight dönüklük açılarının belirlenmesindeki gerekliliği kullanılan yöntemle göre değişkenlik göstermektedir. Boresight dönüklük açılarının ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda hesaplandığı veya dengelenmiş dış yöneltme parametreleriyle GNSS/IMU sisteminden elde edilen yaklaşık dış yöneltme parametreleri arasındaki farkların ortalamasının alınmasıyla hesaplanan yöntemlerde güçlü blok yapısı için yer kontrol noktası gerektiği savunulmuştur. Boresight dönüklük açılarının hesaplanmasında uygulanan kalibrasyon yöntemi görüntülerin göreceli konumlarına bağlı olduğundan, yer kontrol noktalarının boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde herhangi bir etkisinin olmadığı ve yer kontrol noktalarının boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde sadece doğruluğu teyit etmek amacıyla kullanıldığı ifade edilmiştir [39, 44, 48, 88].

2.3 Operasyonel Kalibrasyon Yöntemi

Operasyonel kalibrasyonun ilk uygulamaları yakın mesafe fotogrametrik çalışmalarda görülmüştür [7]. Günümüzde ise operasyonel kalibrasyon yöntemi havai fotogrametrik uygulamalarda daha sık kullanılmakta ve laboratuvar kalibrasyonunun yerini almaya başlamıştır [52, 63]. Operasyonel kalibrasyonun havai fotogrametrik uygulamalarda

yaygınlaşmasının yegane sebebinin kalibrasyon parametrelerin laboratuvar şartlardan ziyade uçuş (gerçek) şartlarında belirlenmesi olarak açıklanmıştır [10, 22, 36, 40]. Kalibrasyon uçuşunun temel varsayımının, IMU ile kamera arasındaki göreceli pozisyonun uçuş anında sabit kalması gerçeğine dayandığı [4] bu sebepten dolayı kamera ve IMU sisteminin uçağa sağlam bir şekilde montajının yapılması [55] ve IMU sisteminin olabildiğince kameraya yakın monte edilmesi gerektiği savunulmuştur [12]. Dış yöneltme parametrelerinin ekstrapolasyon tekniğiyle hesaplandığı doğrudan coğrafi konumlandırma yaklaşımında en küçük hata kaynakları bile doğruluğu çok fazla etkileyeceğinden, operasyonel kalibrasyon yöntemiyle belirlenen kalibrasyon parametreleri doğruluğu kayda değer ölçüde iyileştirmektedir. Operasyonel kalibrasyon yönteminde öteleme vektörü, boresight dönüklük açıları ve odak uzaklığı belirlenebilmektedir [42, 47, 84, 85]. Operasyonel kalibrasyon yöntemi iki farklı uçuş yüksekliğinde gerçekleştirilirse, iç yöneltme elemanları da dahil tüm sistem kalibrasyon parametreleri hesaplanabileceği ifade edilmiştir [36, 82]. Operasyonel kalibrasyon yönteminin kullanılacağı kalibrasyon alanının birtakım özelliklere sahip olması gerektiği sıklıkla dile getirilmiştir. Kalibrasyon uçuşu yüksek bindirme (%80 ileri bindirme, %60 yan bindirme) oranlarıyla güçlü bir geometriye sahip olmalı, test bloğu en az 2 dik- 3 yatay uçuş kolonuyla kare ağ şeklinde tasarlanmalı, bir yatay ve bir dik uçuş kolonunun her iki yönde de uçulması gerektiği belirtilmiştir [82]. Kalibrasyon uçuşuyla birlikte yer bazlı hatalar da hesaplanacaksa (GNSS kayıklığı gibi) yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulacağı ifade edilmiştir [27, 36, 76]. Kalibrasyon sahası ile proje alanı referans meridyenine göre farklı uzaklıktaysa, kalibrasyon alanında hesaplanan değerlerin proje alanındaki geçerliliğinin azalacağı dile getirilmiştir [15, 40].

2.4 Boresight Dönüklük Açılarının Kararlılığı

Kalibrasyon parametrelerinin ölçümü zaman içinde değişim göstereceğinden tekrarlanması gereken bir süreçtir [1]. Tekrarlı ölçülerin hangi sıklıkta yapılması gerektiği ise ölçülen parametrelerin kararlılığı gözlenerek yanıtlanması gereken bir sorudur. Akademik literatür incelendiği zaman “ne”, “nasıl” ve “hangi sıklıkta “ soruları bir çok makalede gündeme getirilmiş, kısa dönem çalışmalarıyla “ne” ve “nasıl” sorularının cevabı bulunduktan sonra uzun dönem tecrübeleriyle bulunacak “hangi sıklıkta” sorusu

cevapsız bırakılmıştır [25, 80, 15, 19]. Boresight dönüklük açılarının kararlılığı günlük, haftalık veya aylık olarak incelenmiş, yıl bazlı bir çalışma yapılmamıştır. Bununla birlikte yapılan çalışmalarda bir görüş birliğine ulaşılamamıştır. Bu bölümde deneysel deneyimlere dayanan nicel yorumlarla, öngörülere dayanan nitel yorumlar sıralanmıştır.

IMU ve algılayıcı sistem uçağa sıkıca monte edilirse, bu iki cihazın konumu ve birbirine göre dönüklüğü uçuş anında değişmeyeceği için hesaplanan boresight dönüklük açılarının sabit kalacağı ileri sürülmüştür [18, 55]. IMU ve algılayıcı sistemin uçaktan sökülüp tekrardan montajının yapıldığı durumlarda boresight dönüklük açılarının değişeceği ifade edilmiştir [6, 30, 74, 77]. IMU ve algılayıcı sistem arasındaki fiziksel mesafenin olabildiğince az olması, sistemlerin birbirlerine yakın montajı uçuş koşullarından daha az etkilenmelerini sağlayacağı dile getirilmiştir [40].

Kalibrasyon sıklığını belirlemede en önemli konu yapılacak işin özelliğine göre istenen doğruluk olduğu açıklanmıştır [4, 40, 48]. Yüksek doğruluk ihtiyacı yoksa, ilkbahar ve sonbaharda uçuş sezonu öncesi ve sonrasında kalibrasyonun yapılması, normal doğruluk istenen projelerde kalibrasyonun her hafta yapılması ve son olarak yüksek doğruluk gereksinimi için kalibrasyonun günlük veya her uçuş bloğundan önce ve sonra yapılması gerektiği belirtilmiştir [5, 29, 33, 43].

Kalibrasyon sahası kullanılan hava alanına yakın inşa edilmişse ve/veya uçuş görevinin uzun saatler sürmesi halinde, boresight dönüklük açılarının günlük olarak belirlenmesi gerekeceği ileri sürülmüştür [21, 53]. Günlük test uçuşunun maliyeti yüksek olacağından, uçuş yerine ek parametreler belirlenerek boresight dönüklük açılarının günlük değişiminin modellenmesi gerektiği vurgulanmıştır [32].

Analog hava kameralarıyla yapılan testlerde 42 günlük değişim izlenmiş ve ϕ yönünde 1.2 arcmin ve κ yönünde 0.9 arcmin değişim gözlenmiştir [40]. 43 günlük değişimin izlendiği başka bir çalışma da değişimlerin ω , ϕ ve κ yönünde 0.18 arcmin, 0.3 arcmin ve 0.48 arcmin olduğu ifade edilmiştir [41]. Bu konuda yapılan başka bir değişim analizinde 4 aylık süreçte 1.08 arcmin değişimin olduğu ve GNSS/IMU ve kamera sistemlerinin gelişmesine paralel olarak değişimin daha stabil bir hal alacağı ileri sürülmüştür [49].

Vexcel Ultracam D dijital hava kamerası ve Posav 510 GNSS/IMU entegre sisteminin kullanıldığı araştırma da 4 aylık süreçteki değişimler izlenmiştir. Roll, Pitch ve Yaw yönünde sırasıyla 0.766,-1.442 and 0.231 arcmin değişimler gözlenmiş ve bu değişimlerin nedeninin kameranın uçaktan sökülüp tekrar takılması olabileceği ifade edilmiştir [77].

2.5 Boresight Dönüklük Açılarının Yıllık Değişiminin Analizi

Bu bölümde UCE-100 ve UCE-80 geniş formatlı dijital hava kameralarının boresight dönüklük açılarının yıllara yönelik değişimi analiz edilmiştir. Tablo 2.1’de ayrıntısı verilen yıllarda özel boresight kalibrasyon uçuşları Harita Genel Müdürlüğüne gerçekleştirilmiştir. Test uçuşları iki farklı yükseklikte en az 3 yatay ve en az 2 dik olacak şekilde planlanmış, bir yatay bir dik uçuş kolonunun iki yönlü uçuşu yapılmıştır. GNSS/IMU verilerinin işlenmesi sürecinde GNSS verilerinin kronik hatalarını içerdiğinden ve bu hatalar da zamana bağlı olarak değiştiğinden Tusaga-Aktif istasyon verileri yerine daha küresel ve zamandan bağımsız hatalar içeren PPP çözümü tercih edilmiştir. Bu sayede tüm veri seti aynı hataları içeren veri işleme aşamasından geçmiştir. GNSS/IMU verilerinin işlenmesi PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Boresight dönüklük açıları değişiminin doğrudan coğrafi konumlandırmaya etkisi bağımsız test alanında incelenmiş ve denetleme noktalarına gelen hataların karesel ortalaması hesaplanmıştır.

Öncelikle UCE-100 dijital hava kamerası ile 2016 ve 2017 yılları arasındaki gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş verileriyle boresight dönüklük açıları hesaplanmış ve test bölgesinde 40 adet denetleme noktasıyla doğrudan coğrafi konumlandırmaya etkisi araştırılmıştır. Akabinde aynı analiz yöntemi UCE-80 dijital hava kamerası ile 2012-2016 yılları arasındaki yapılan kalibrasyon uçuş verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.1 Kalibrasyon uçuşlarının yıllara göre dağılımı

Kamera	Kalibrasyon Uçuş Yılları				
UCE-100	2017	2016			
UCE-80	2016	2015	2014	2013	2012

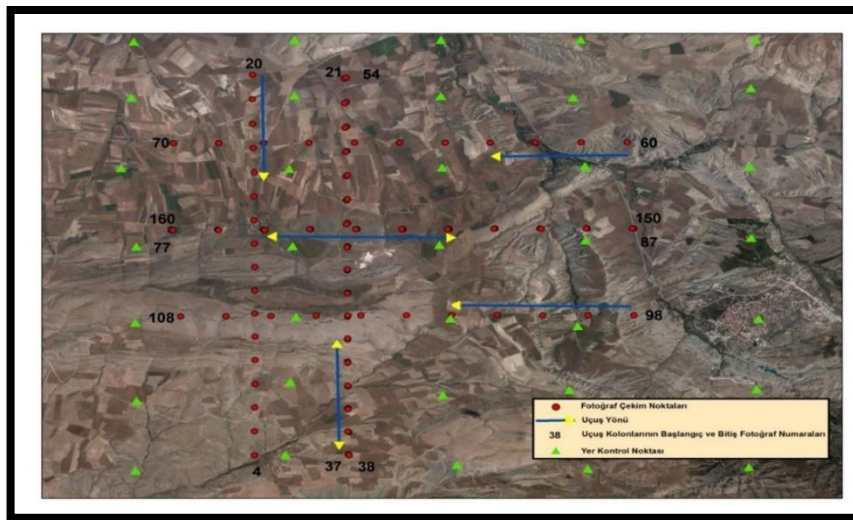
2.5.1 UCE-100 Geniş Formatlı Dijital Hava Kamerası Kalibrasyonu

UCE-100 geniş formatı dijital hava kamerasıyla özel kalibrasyon uçuşları 2016 ve 2017 yıllarında arasında gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde 2017 yılı ikinci bölümde ise 2016 yılına ait kalibrasyon uçuş verileriyle boresight dönüklük açıları hesaplanmıştır. Üçüncü bölümde iki yıla ait boresight dönüklük açılarının karşılaştırılması yapılmış son bölümde ise boresight dönüklük açıları değişiminin doğrudan coğrafi konumlandırmaya etkisi araştırılmıştır.

2.5.1.1 2017 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- **Özel Kalibrasyon Uçuşu-2017**

UCE-100 dijital hava kamerasıyla 9 Ağustos 2017 tarihinde Ankara il sınırları içerisinde bulunan Haymana test alanında 3 kolon doğu-batı 2 kolon kuzey-güney istikametinde olacak şekilde 168 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 95 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte ve farklı istikametteki uçuş kolonlarının bir tanesinin çift yönlü uçulmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1). Doğu-batı istikametindeki uçuşlar 11'er hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında, güney-kuzey istikametindeki uçuş kolonları ise 17 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.2 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
09.08.2017	1	DB	11	30
	2	BD	11	30
	2	DB	11	30
	3	DB	11	30
	4	GK	17	25
	5	KG	17	25
	5	GK	17	25

- **GNSS/IMU Veri İşleme ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2017**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs19613.sp3, igs19613.clk, igs19617.erp, CGIM2210.17n ve P1C11707.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre göreceli konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açıları, test bölgesine inşa edilen 28 adet yer kontrol noktasıyla GNSS kayıklığı hesaplanmış ve Tablo 2.3’de sunulmuştur.

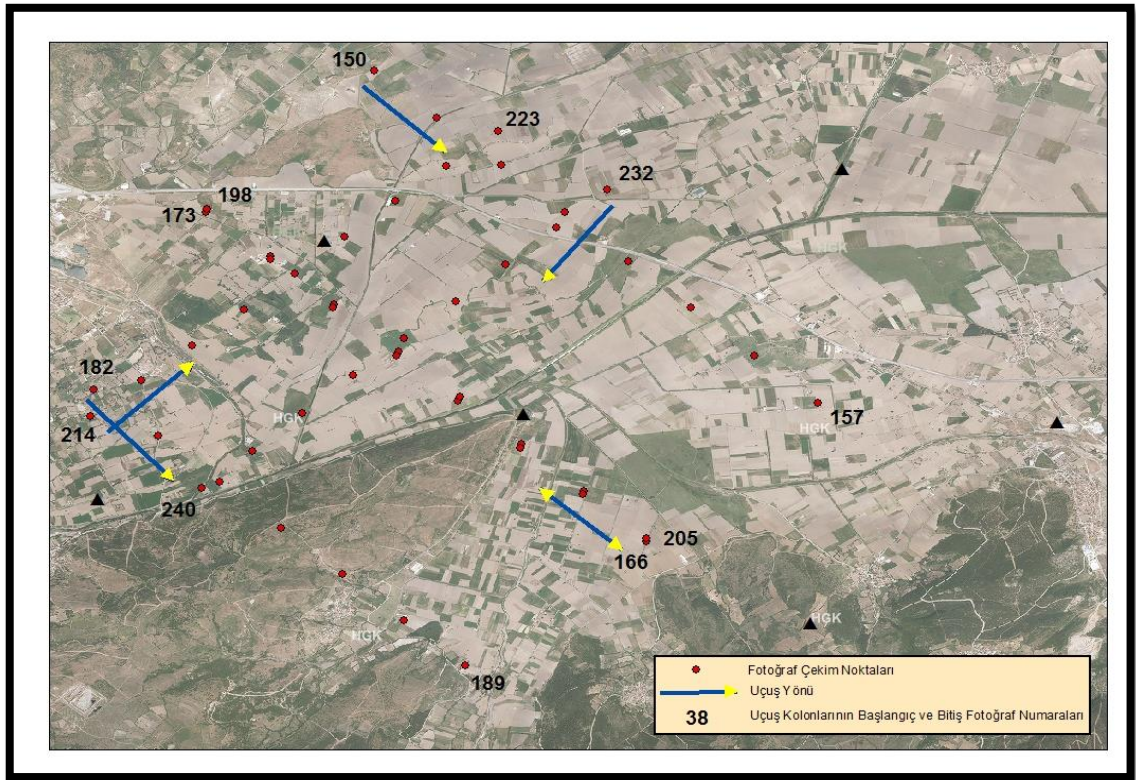
Tablo 2.3 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
7.418	9.321	16.426	0.17	0.09	0.09	0.802	-0.388	-2.687

2.5.1.2 2016 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- Özel Kalibrasyon Uçuşu-2016

UCE-100 dijital hava kamerasıyla 18 Kasım 2016 tarihinde İzmir ili sınırları içerisinde bulunan Bergama test alanında 3 kolon güneydoğu-kuzeybatı 2 kolon da kuzeydoğu-güneybatı istikametinde olacak şekilde 72 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 52 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte ve güneydoğu-kuzeybatı istikametindeki uçuş kolonlarının bir tanesinin çift yönlü uçulmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil-2.2). Güneydoğu-kuzeybatı istikametindeki uçuşlar 8'er hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında, kuzeydoğu-güneybatı istikametindeki uçuş kolonları ise 10 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.2 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.4 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
18.11.2016	1	KB-GD	8	30
	2	GD-KB	8	30
	2	KB-GD	8	30
	3	KB-GD	8	30
	4	GB-KD	10	25
	5	KD-GB	10	25

- **GNSS/IMU Veri İşleme ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2016**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs19235.sp3, igs19235.clk, igs19237.erp, CGIM3230.16n ve P1C11611.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre göreceli konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açıları, test bölgesinde inşaa edilen 6 adet yer kontrol noktası ile GNNS kayıklığı hesaplanmış ve Tablo 2.5’de sunulmuştur.

Tablo 2.5 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
5.282	6.549	12.895	0.10	0.12	0.22	1.240	-0.010	-0.270

2.5.1.3 UCE-100 Dijital Hava Kamerasının Boresight Dönüklük Açıları Değişimi Analizi

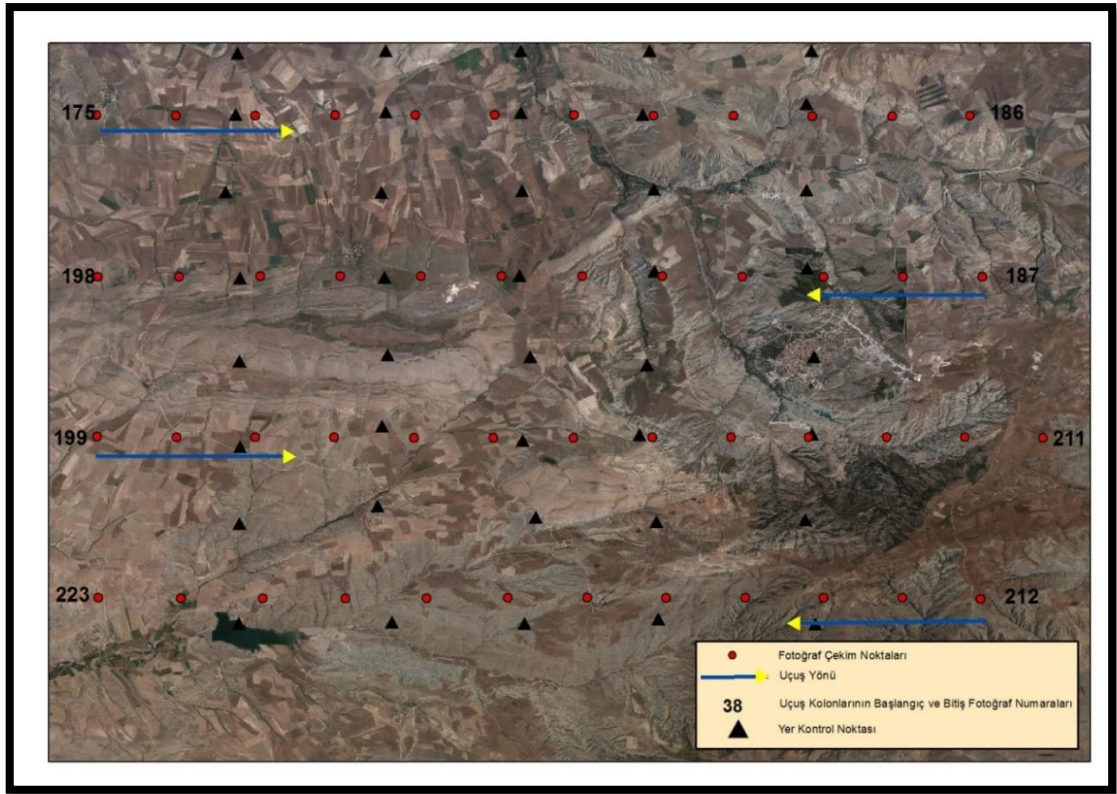
UCE-100 dijital hava kamerasıyla 18 Kasım 2016 tarihinde yapılan kalibrasyon uçuşunu müteakip bir sonraki kalibrasyon uçuşu 09 Ağustos 2017 tarihinde yapılmıştır. 2016 yılı uçuş sezonu sonu ile 2017 uçuş sezonu ortasına tekabül eden 9 aylık süreçte boresight dönüklük açılarının değişimi gözlenmiştir. Tx açısında 2.1355 arcmin, Ty açısında 2.772 arcmin ve Tz açısında 3,531 arcmin değişim hesaplanmıştır. 1 yıllık süreçte boresight dönüklük açılarının sabit kalmadığı ve en fazla değişimin Tz yönünde 3,531 arcmin olduğu tespit edilmiştir. Boresight dönüklük açılarının değişimleri Tablo 2.6’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.6 UCE-100 dijital hava kamerasının 2016 ve 2017 yıllarında hesaplanan Boresight dönüklük açılarının değişimi

Tarih	Boresight (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
09.08.2017	7.418	9.321	16.426	0.802	-0.388	-2.687
18.11.2016	5.282	6.549	12.895	1.240	-0.010	-0.270

2.5.1.4 UCE-100 Dijital Hava Kamerası Boresight Dönüklük Açıları Değişiminin Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi

UCE-100 dijital hava kamerasının boresight dönüklük açıları 1 yıl arayla iki kez hesaplanmış ve değişim Tablo 2.6’da gösterilmiştir. Bu bölümde arcmin açı biriminde hesaplanan değişimin doğrudan coğrafi konumlandırma uygulamalarında neden olduğu konumsal hata değeri hesaplanmıştır. Bu maksatla, 284 km² test alanında Doğu-Batı istikametinde 30 cm yer örnekleme aralığında %60 ileri %30 yan bindirme oranlarında (standart fotogrametrik proje uçuşu) 4 kolon 49 adet hava fotoğrafı çekimi 09 Ağustos 2017 tarihinde Ankara-Haymana Test bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 UCE-100 dijital hava kamerasıyla 2017 yılında gerçekleştirilen test uçuşu

09 Ağustos 2017 tarihindeki uçuşların veri işleme iki farklı aşamayla gerçekleştirilmiştir. 2016 ve 2017 yılı kalibrasyon uçuşlarıyla hesaplanan Boresight dönüklük açıları ayrı ayrı kullanılarak PPP yöntemiyle GNSS/IMU veri işleme gerçekleştirilmiştir. Boresight dönüklük açıları değişiminin doğrudan coğrafi konumlandırmaya etkisinin gözlenebilmesi için öteleme vektörü ve GNSS kayıklık değerleri sabit alınmıştır. Test bölgesine inşa edilen 40 adet yer kontrol noktası dengelemede denetleme noktası olarak kullanılmış ve otomatik bağlama noktası toplattırılarak denetleme noktalarına gelen hataların karesel ortalamasıyla ölçümlerin standart sapmaları hesaplanmıştır. Dengelem sonuçları ayrıntılı olarak Tablo 2.7’de sunulmuştur.

Tablo 2.7 Blok dengeleme sonuçları

Yıl	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
	ω	ϕ	K	X	Y	Z
2017	0.004	0.008	0.006	0.793	0.481	0.620
2016	0.034	0.049	0.051	0.905	0.208	0.939
Yıl	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
2017	0.157	0.161	0.157	0.161	0.157	0.161
2016	0.209	0.168	0.209	0.168	0.209	0.168

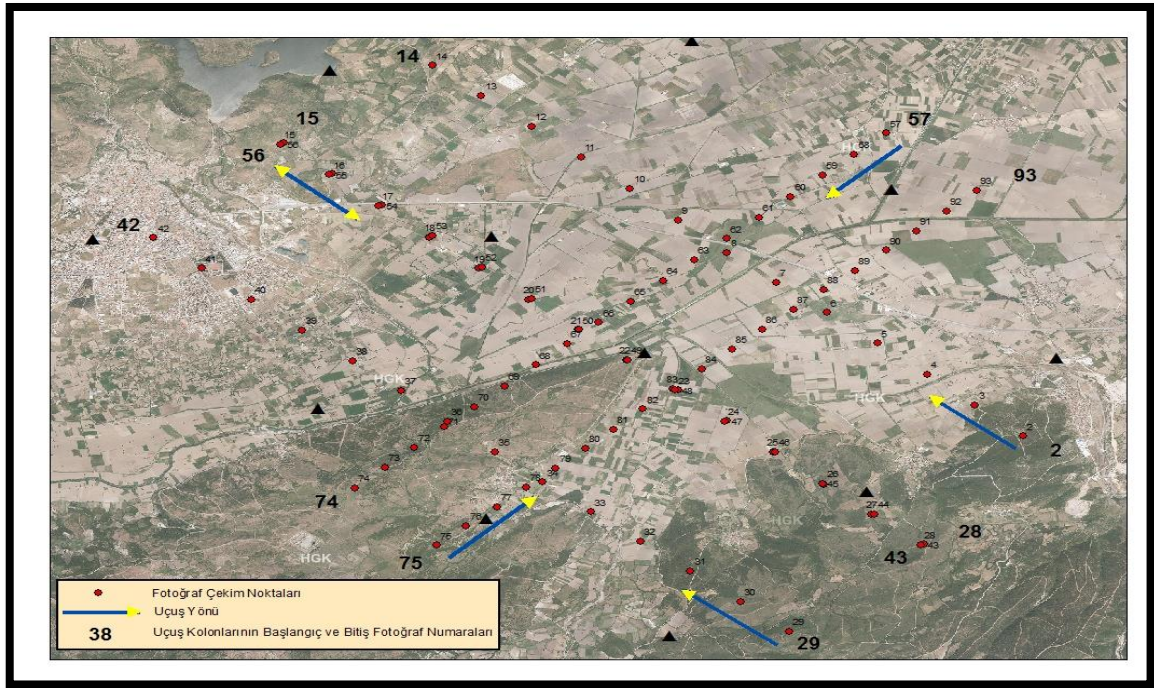
IMU gözlemlerine gelen artık hataların karesel ortalamasının her yönde arttığı gözlenmiştir. Özellikle Kappa yönünde 2017 yılından 2016 yılına nazaran 0.045° hata artışı hesaplanmıştır. Söz konusu hataların iki farklı yılda belirlenmiş boresight dönüklük açıları arasındaki farkla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar GNSS verilerinin işlenmesinde GNSS kayıklık ve öteleme vektörleri sabit girilmiş ve hesaplanan yaklaşık dış yöneltme parametrelerinin konumları aynı olsa da denetleme noktalarına gelen artık hataların karesel ortalamaları hesaplandığında Y yönü hariç diğer yönlerde artış olduğu gözlenmiştir. Aynı şekilde GNSS gözlemlerine gelen artık hataların arttığı, dönüklüklerin standart sapmalarının ise büyüdüğü gözlenmiştir. Özel kalibrasyon uçuşları arasında bir yıllık süre zarfında boresight dönüklük açılarının değiştiği ve bu değişimin yer kontrol noktası kullanılmayan doğrudan coğrafi konumlandırma uygulamalarında doğruluğa iki piksel seviyesinde etkilediği hesaplanmıştır.

2.5.2 UCE-80 Geniş Formatlı Dijital Hava Kamerası Kalibrasyonu

2.5.2.1 2016 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- Kalibrasyon Uçuşu-2016 Bergama

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 14 Ekim 2016 tarihinde İzmir ili sınırları içerisinde bulunan Bergama test alanında 3 kolon güneydoğu-kuzeybatı 2 kolon da kuzeydoğu-güneybatı istikametinde olacak şekilde 168 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 92 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte ve güneydoğu-kuzeybatı istikametindeki uçuş kolonlarının bir tanesinin çift yönlü uçulmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.4). Güneydoğu-kuzeybatı istikametindeki uçuşlar 13-14'er hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında, kuzeydoğu-güneybatı istikametindeki uçuş kolonları ise 18-19 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.4 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.8 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
14.10.2016	1	GD-KB	13	30
	2	KB-GD	14	30
	2	GD-KB	14	30
	3	GD-KB	14	30
	4	GB-KD	18	25
	5	KD-GB	19	25

- **GNSS/IMU Veri İşleme ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2016-Bergama**

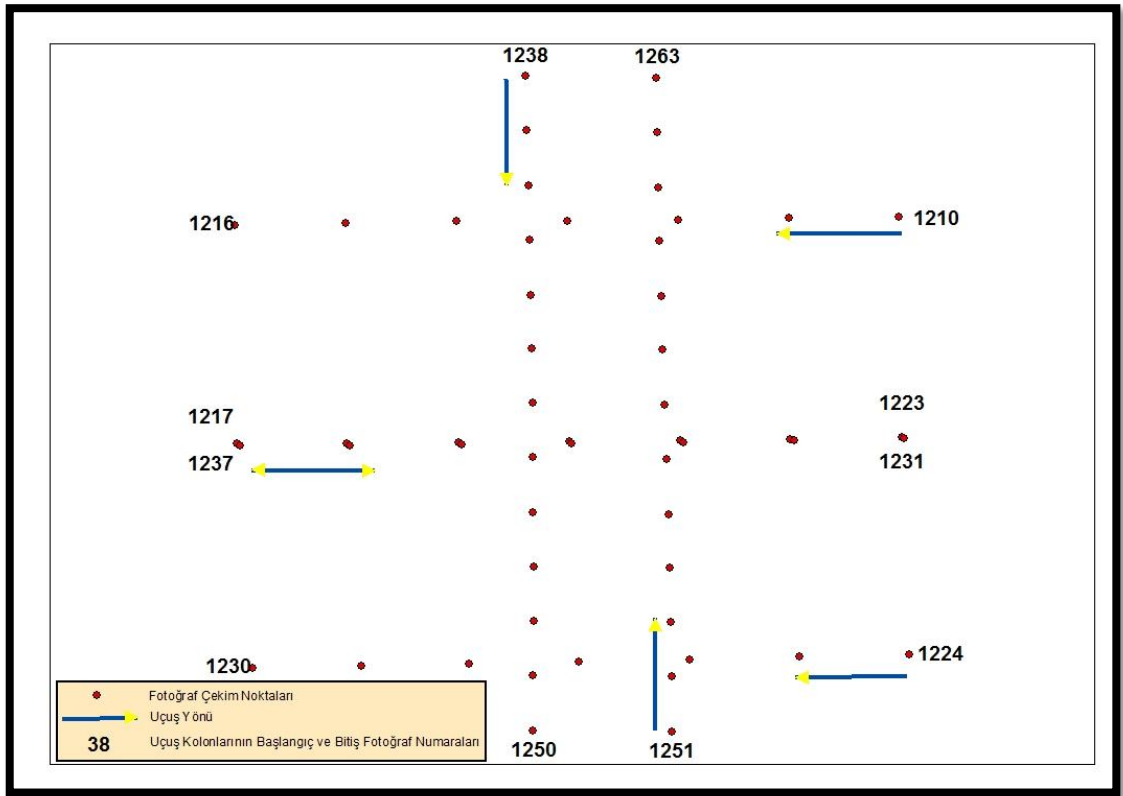
GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs19185.sp3, igs19185.clk, igs19187.erp, CGIM2880.16n ve P1C11610.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre göreceli konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açıları, test bölgesinde tesis edilen 11 adet yer kontrol noktası ile GNSS kayıklık parametreleri hesaplanmış ve Tablo 2.9’da sunulmuştur.

Tablo 2.9 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
-5.541	-1.752	1.792	0.14	0.25	0.36	0.440	-0.070	-0.530

- **Kalibrasyon Uçuşu- 2016/2**

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 07 Haziran 2016 tarihinde 3 kolon doğu-batı 2 kolon da kuzey-güney istikametinde olacak şekilde 52 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 54 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte ve doğu-batı istikametindeki uçuş kolonlarının bir tanesinin çift yönlü uçulmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.5). Doğru-batı istikametindeki uçuşlar 7'er hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında, kuzey-güney istikametindeki uçuş kolonları ise 13 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.5 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016/2 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.10 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016/2 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
07.06.2016	1	D-B	7	30
	2	B-D	7	30
	2	D-B	7	30
	3	D-B	7	30
	4	G-K	13	25
	5	K-G	13	25

- **GNSS/IMU Veri İşleme ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2016/2**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs19002.sp3, igs19002.clk, igs19027.erp, CGIM1590.16n ve P1C11606.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre göreceli konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açıları hesaplanmış ve Tablo 2.11’de sunulmuştur. Test bölgesinde yer kontrol noktası olmadığı için GNSS kayıklığı hesaplanamamıştır.

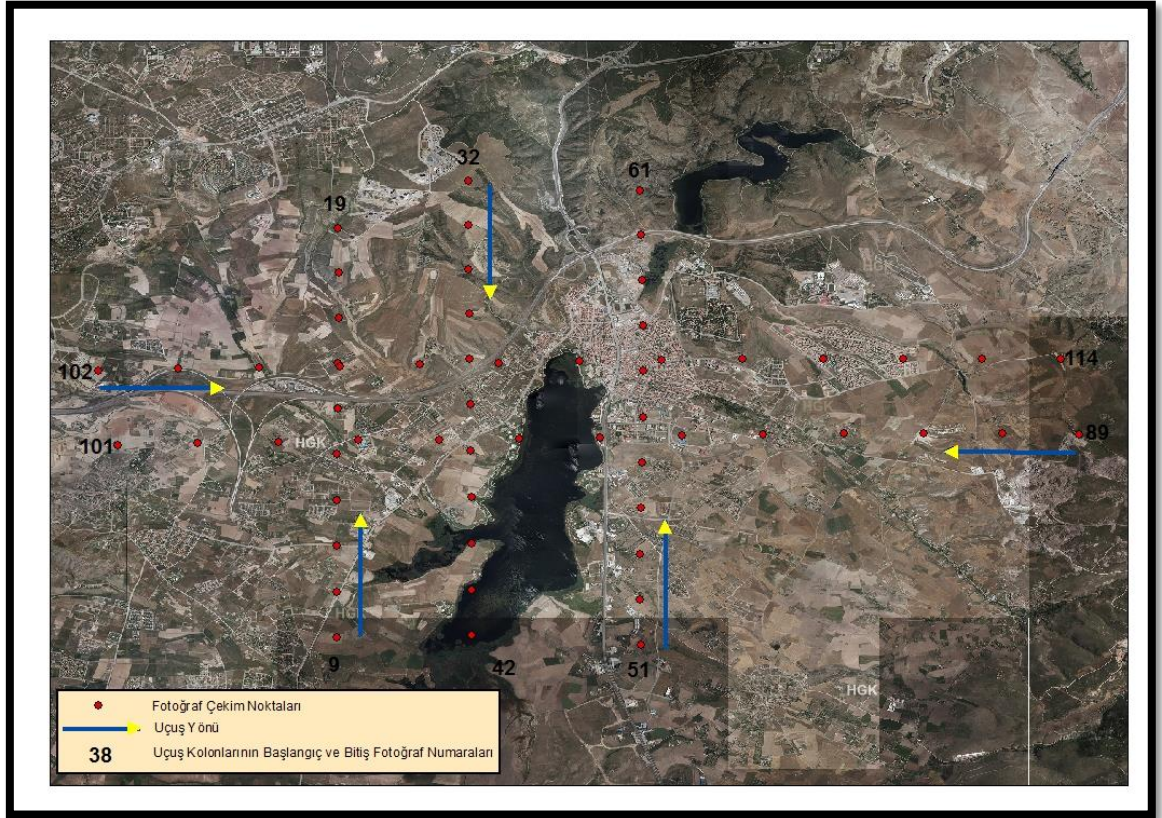
Tablo 2.11 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2016/2 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
-5.417	-1.932	1.766	0.18	0.12	0.14	-	-	-

2.5.2.2 2015 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- Kalibrasyon Uçuşu-2015

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 17 Nisan 2015 tarihinde Ankara il sınırları içerisinde bulunan Gölbaşı test alanında 3 kolon doğu-batı 2 kolon da kuzey-güney istikametinde olacak şekilde 131 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 59 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). Doğru-batı istikametindeki uçuşlar 11'er hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında, güney-kuzey istikametindeki uçuş kolonları ise 13 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.6 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2015 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.12 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2015 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
17.04.2015	1	KG	11	30
	2	GK	11	30
	3	KG	11	30
	4	DB	13	25
	5	BD	13	25

- **GNSS/IMU Veri İşleme ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2015**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs18404.sp3, igs18404.clk, igs18407.erp ve P1C11504.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açılarını hesaplanmış ve Tablo 2.13’de sunulmuştur. Test bölgesinde yer kontrol noktası olmadığı için GNSS kayıklığı hesaplanamamıştır.

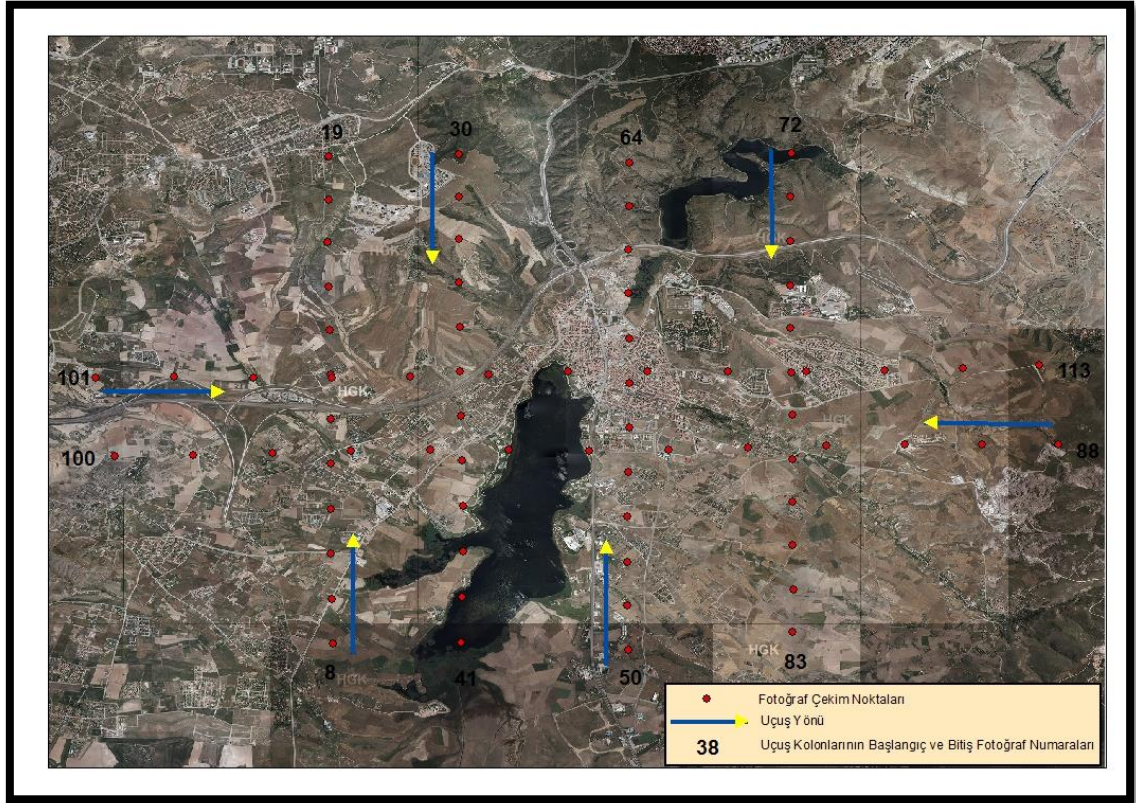
Tablo 2.13 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2015 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
-6.243	-1.797	0.612	0.17	0.15	0.18	-	-	-

2.5.2.3 2014 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- Kalibrasyon Uçuşu-2014

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 01 Ağustos 2014 tarihinde Ankara il sınırları içerisinde bulunan Gölbaşı test alanında 2 kolon doğu-batı 4 kolon kuzey-güney istikametinde olacak şekilde 140 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 74 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Doğru-batı istikametindeki uçuşlar 13'er hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında, güney-kuzey istikametindeki uçuş kolonları ise 12 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.7 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2014 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.14 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2014 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
01.08.2014	1	KG	12	30
	2	GK	12	30
	3	KG	12	30
	4	GK	12	30
	5	DB	13	25
	6	BD	13	25

- **GNSS/IMU Verilerinin İşlenmesi ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2014**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs18035.sp3, igs18035.clk, igs18037.erp ve P1C11408.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açıları hesaplanmış ve Tablo 2.15’de sunulmuştur. Test bölgesinde yer kontrol noktası olmadığı için GNSS kayıklığı hesaplanamamıştır.

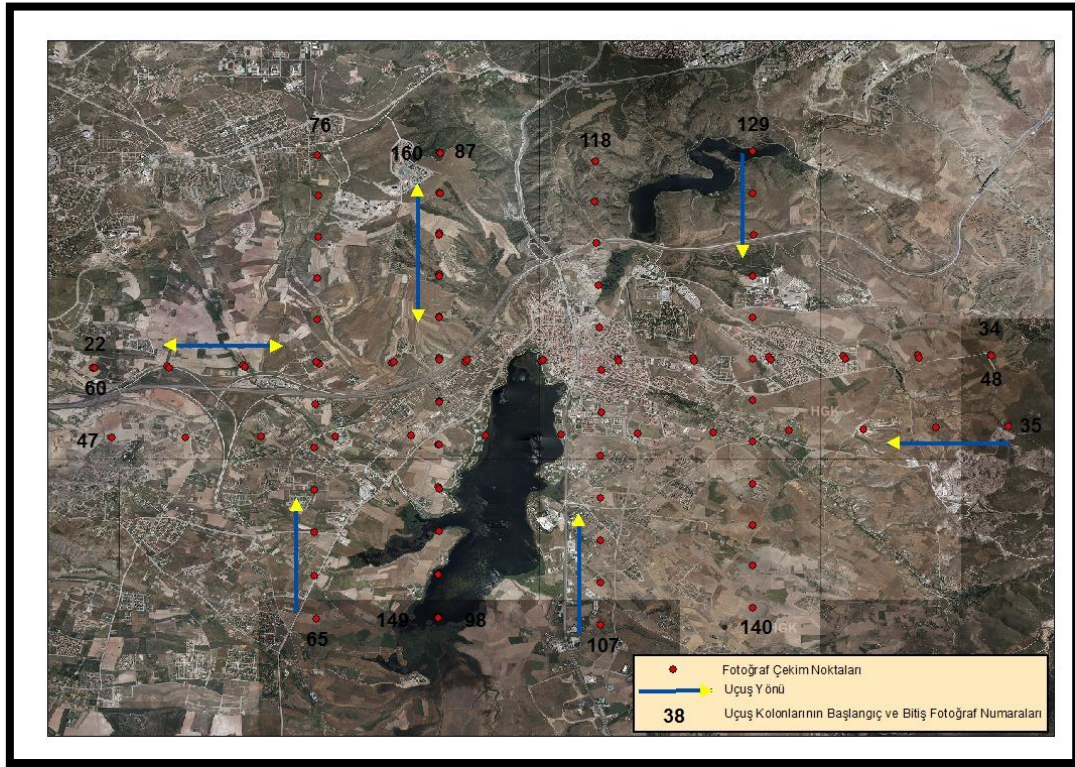
Tablo 2.15 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2014 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
-6.733	2.470	2.070	0.19	0.21	0.22	-	-	-

2.5.2.4 2013 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- Kalibrasyon Uçuşu-2013

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 25 Nisan 2013 tarihinde Ankara il sınırları içerisinde bulunan Gölbaşı test alanında 2 kolon doğu-batı 4 kolon kuzey-güney istikametinde olacak şekilde 140 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 99 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte ve her iki istikamette bir kolonun gidiş-geliş uçulması suretiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Doğü-batı istikametindeki uçuşlar 13'er hava fotoğrafı olacak şekilde 25 cm yer örnekleme aralığında, güney-kuzey istikametindeki uçuş kolonları ise 12 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.8 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2013 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.16 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2013 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
25.04.2013	1	GK	12	30
	2	KG	12	30
	2	GK	12	30
	3	GK	12	30
	4	KG	12	30
	5	DB	13	25
	6	BD	13	25
	6	DB	13	25

- GNSS/IMU Veri İşleme ve Boresight Parametrelerinin Belirlenmesi-2013**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs17374.sp3, igs17374.clk, igs17377.erp ve P1C11304.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açıları hesaplanmış ve Tablo 2.17’de sunulmuştur. Test bölgesinde yer kontrol noktası olmadığı için GNSS kayıklığı hesaplanamamıştır.

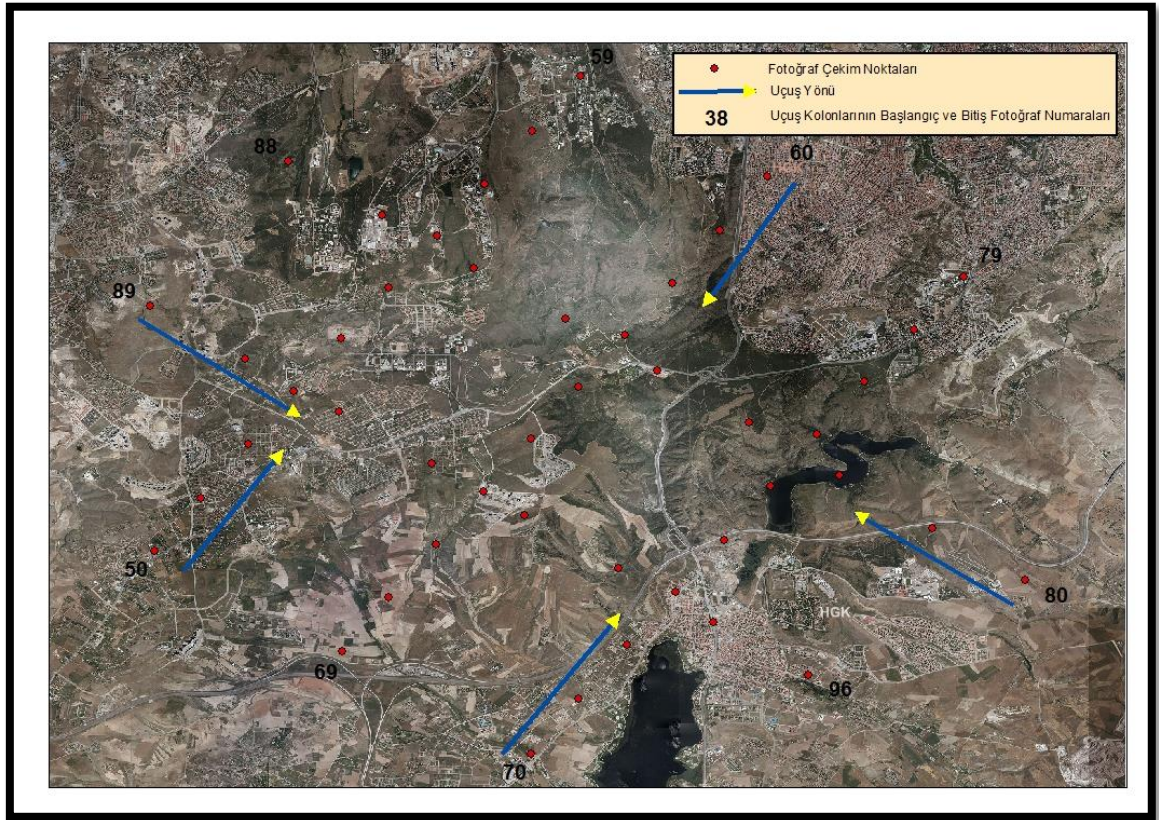
Tablo 2.17 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2013 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
-6.742	2.191	2.311	0.12	0.14	0.30	-	-	-

2.5.2.5 2012 Yılında Gerçekleştirilen Özel Kalibrasyon Uçuşu

- Kalibrasyon Uçuşu-2012

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 02 Ağustos 2012 tarihinde Ankara il sınırları içerisinde bulunan Gölbaşı test alanında 3 kolon güneybatı-kuzeydoğu 2 kolon kuzeybatı-güneydoğu istikametinde olacak şekilde 156 km²lik alanda %80 ileri %60 yan bindirmeli 48 adet hava fotoğrafı çekimi yapılmıştır (Şekil 2.9). Güneybatı-kuzeydoğu istikametindeki uçuşlar 10'ar hava fotoğrafı olacak şekilde, kuzeybatı-güneydoğu istikametindeki uçuş kolonları ise 9 adet hava fotoğrafı olacak şekilde 30 cm yer örnekleme aralığında planlanmıştır. Kalibrasyon uçuşuyla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 2.18'de verilmiştir.



Şekil 2.9 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşu

Tablo 2.18 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012 yılında gerçekleştirilen kalibrasyon uçuş bilgileri

Tarih	Uçuş Kolonu	Uçuş Yönü	Fotoğraf Adeti	Çözünürlük (cm)
02.08.2012	1	GB-KD	10	30
	2	KD-GB	10	30
	3	GB-KD	10	30
	4	KB-GD	9	30
	5	GD-KB	9	30

- **GNSS/IMU Veri İşleme ve Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi-2012**

GNSS/IMU verileri PosPAC MMS 7.1 yazılımı kullanılarak INFusion PPP tekniğiyle işlenmiştir. Uçuş tarihine ait hassas efemeris verileri (igs16994.sp3, igs16994.clk, igs16997.erp ve P1C11208.DCB) ilgili adreslerden indirilmiştir. Hava fotoğraflarının birbirlerine göre konumlarından bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açılarını ve hesaplanmış Tablo 2.19’da sunulmuştur. Test bölgesinde yer kontrol noktası olmadığı için GNSS kayıklığı hesaplanamamıştır.

Tablo 2.19 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012 yılında hesaplanan kalibrasyon değerleri

Boresight (Arcmin)			Boresight KOH (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
-7.434	-3.050	5.096	0.16	0.15	0.17	-	-	-

2.5.2.6 UCE-80 Geniş Formatlı Dijital Hava Kamerası Boresight Dönüklük Açılarının Değişiminin Analizi

UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012-2016 yılları arasında 2016 yılında 2 adet olmak üzere toplam 6 kalibrasyon uçuşu gerçekleştirilmiştir.

Boresight açılarının değişimi 2012 yılı uçuş sezonu ortasıyla 2013 yılı uçuş sezonunun başlangıcında 8 aylık dönemde gerçekleştirilen iki kalibrasyon uçuşları ile gözlemlenmiştir. İki kalibrasyon uçuşları arasındaki fark Tx yönünde 0.692 arcmin, Ty yönünde 5.241 arcmin ve Tz yönünde 2.785 arcmin olarak hesaplanmıştır. İlk bakışta, özellikle Tx ve Tz yönündeki çarpıcı değişim dikkat çekmektedir. IMU'nun 2012 uçuş sezonu sonunda arızalanmasından dolayı kameradan çıkartılıp tekrardan montajının yapılması söz konusu farkın tek mantıklı açıklamasıdır. Jacobsen ve Wegmann [30] tarafından ifade edilen "IMU uçaktan çıkarılıp yeniden monte edilirse geometrik ilişki değişebilir" ifadesi artık deneysel gözlemlerle kanıtlanmıştır. IMU kameradan çıkarılırsa, boresight dönüklük açılarının yeniden hesaplanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

2013 yılında hesaplanan boresight dönüklük açıları ile 2014 yılında belirlenen değerler arasındaki değişim Tx, Ty ve Tz için sırasıyla 0.009 arcmin, 0.279 arcmin ve 0.241 arcmin olarak hesaplanmıştır. Digital hava kamerası 2013-2014 kış sezonunda uçak hangarda beklerken uçaktan çıkartılmamış ve algılayıcı sistemde herhangi bir arıza meydana gelmemiştir. Dolayısıyla IMU ile kamera arasındaki geometri dışsal bir etmenle değişmemiştir. Boresight dönüklük açılarının dış faktörlerden bağımsız olarak 16 aylık süreçte sabit kalmadığı gözlenmiştir. Tx yönündeki açı sabit kalırken, Ty ve Tz yönlerindeki değişikliklerin yegâne sebebinin uçuş şartlarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ezcümle boresight dönüklük açıları yıllık olarak sabit olmadığı ve uçuş sezonunun başında belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

İki boresight dönüklük açıları (2014-2015 yılları) arasındaki değişim Tx yönünde 0.49 arcmin, Ty yönünde 4.267 arcmin ve Tz yönünde 1.458 arcmin olmuştur. Özellikle Ty ve Tz yönünde böylesine büyük bir fark için yapılacak tek açıklama kameranın 2015 yılında yapılan kalibrasyon uçuşu öncesi fabrika kalibrasyonu için üretici firmaya gönderilmesi olduğu düşünülmektedir.

2015-2016 yılları arasında hesaplanan boresight dönüklük açılarında beklentilerin aksine büyük değişimler gözlenmiştir. Boresight dönüklük açılarının değişimi Tx yönünde 0.826 arcmin, Ty yönünde 0.135 arcmin ve Tz yönünde 1.154 arcmin olarak hesaplanmıştır.

2016 yılında uçuş sezonundan önce (Haziran) ve uçuş sezonundan sonra (Ekim) iki ayrı kalibrasyon uçuşu gerçekleştirilmiştir. Boresight dönüklük açıları arasındaki farklar Tx

yönünde 0,124 arcmin, ty yönünde 0,18 arcmin ve Tz yönünde 0,026 arcmin olarak hesaplanmıştır. Sonuçların birbirine yakın olması, uçuş mevsiminde kalibrasyonun yenilenmesine gerek olmadığını göstermektedir.

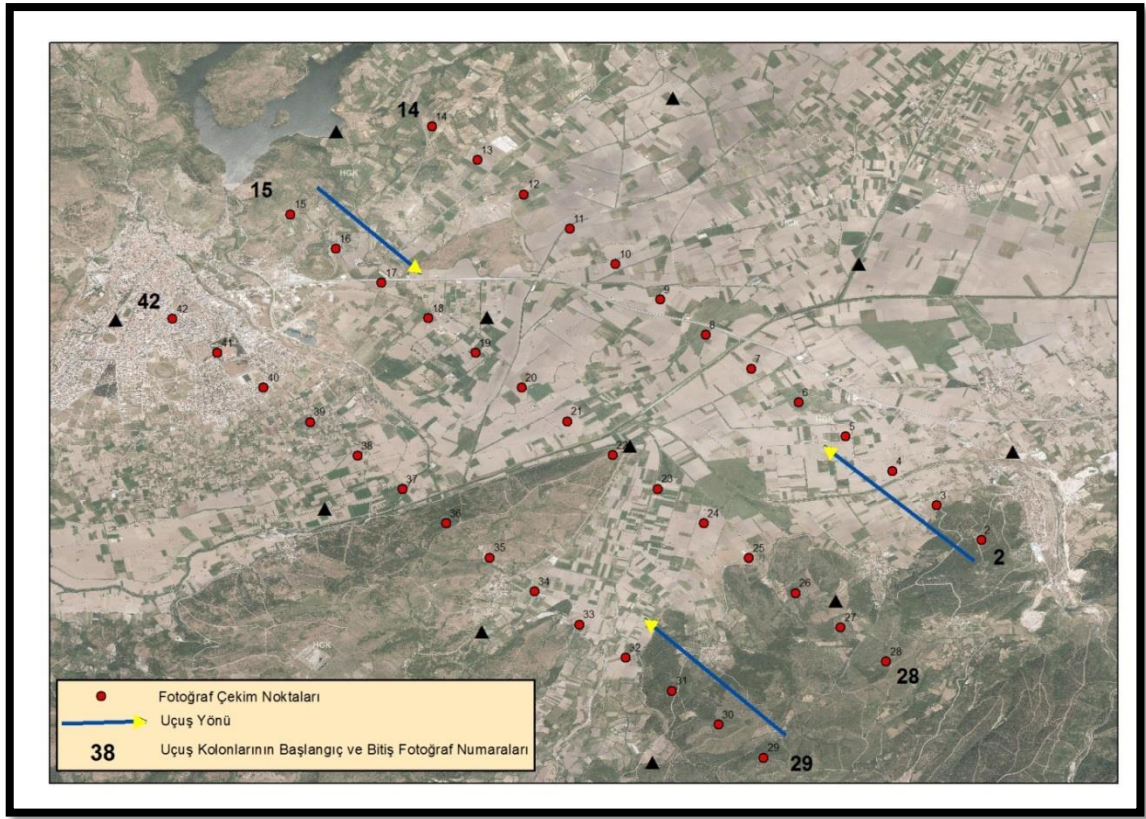
Bu değerler ışığında Boresight dönüklük açılarının yıl bazlı sabit kalmadığı açıkça ifade edilebilir. 2012-2016 arasındaki hesaplanan değerler Tablo 2.20’de sunulmuştur.

Tablo 2.20 UCE-80 dijital hava kamerasıyla 2012-2016 yılları arasında hesaplanan kalibrasyon değişimleri

Tarih	Boresight (Arcmin)			Boresight RMS (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
	Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
14.10.2016	-5.541	-1.752	1.792	0.14	0.25	0.36	0.44	-0.07	-0.53
07.06.2016	-5.417	-1.932	1.766	0.18	0.12	0.14	-	-	-
17.04.2015	-6.243	-1.797	0.612	0.17	0.15	0.18	-	-	-
01.08.2014	-6.733	2.470	2.070	0.19	0.21	0.22	-	-	-
25.04.2013	-6.742	2.191	2.311	0.12	0.14	0.30	-	-	-
02.08.2012	-7.434	-3.050	5.096	0.16	0.15	0.17	-	-	-

2.5.2.7 UCE-80 Geniş Formatlı Dijital Hava Kamerasının Boresight Dönüklük Açıları Değişiminin Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya Etkisi

UCE-80 dijital hava kamerasının boresight parametreleri 2012-2016 yılları arasında hesaplanmış ve değişimleri Tablo 2.20’de sunulmuştur. Bu bölümde arcmin açı biriminde hesaplanan değişimlerin doğrudan coğrafi konumlandırma uygulamalarında neden olduğu konumsal hata değeri hesaplanacaktır. Bu maksatla, 108 km² test alanında kuzeybatı-güneydoğu istikametinde 30 cm yer örnekleme aralığında 3 kolondan oluşan 42 adet hava fotoğrafı çekimi 14 Ekim 2016 tarihinde Bergama Test bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Bergama test bölgesi

14 Ekim 2016 tarihindeki uçuş verisinin GNSS/IMU veri işlemesi 2012-2016 yılları arasında hesaplanan boresight açıları kullanılarak PPP yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Boresight dönüklük açıları değişiminin doğrudan coğrafi konumlandırmaya etkisinin gözlenebilmesi için öteleme vektörü ve GNSS kayıklık değerleri sabit alınmıştır. Test bölgesine tesis edilen 11 adet yer kontrol noktası dengelemede denetleme noktası olarak kullanılmış ve bağlama noktası toplattırılarak denetleme noktalarına gelen hataların karesel ortalama hatası ile ölçümlerin standart sapmaları hesaplanmış ve Tablo 2.21’de gösterilmiştir.

Tablo 2.21 Denetleme noktalarına gelen artık hatalar ve ölçümlerin standart sapmaları

Yıl	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
	ω	ϕ	κ	X	Y	Z
2016	0.012	0.014	0.007	1.028	1.353	1.943
2016	0.012	0.017	0.007	1.342	1.396	2.176
2015	0.015	0.012	0.019	1.007	1.324	1.909
2014	0.065	0.045	0.009	1.045	1.370	1.922
2013	0.016	0.017	0.010	1.026	1.317	1.915
2012	0.016	0.032	0.050	1.130	1.351	1.926
Yıl	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
2016	0.659	0.211	0.659	0.211	0.659	0.211
2016	0.725	0.240	0.725	0.240	0.725	0.240
2015	0.706	0.174	0.706	0.174	0.706	0.174
2014	0.684	0.213	0.684	0.213	0.684	0.213
2013	0.689	0.220	0.689	0.220	0.689	0.220
2012	0.707	0.375	0.707	0.375	0.707	0.375

IMU gözlemlerine gelen artık hataların karesel ortalaması hesaplanmış ve her yönde hataların arttığı gözlenmiştir. 2012-2013 yılları arasında kappa yönünde 0.040° fark gözlenmiştir. Söz konusu değişimin IMU sisteminin kameradan çıkartılıp tekrar takıldığı zaman diliminde yaşandığı tespit edilmiştir. 2014-2015 yılları arasında omega açısında hesaplanan 0.040° hata farkının ise kameranın fabrika kalibrasyonuna gönderildiği zaman

dilimine rastlamaktadır. Denetleme noktalarına gelen artık hataların kareleri birbirine yakın çıkmıştır. Bunun sebebinin Bergama Test bölgesindeki denetleme noktaları sayısının az olması ve dağılımının yeterli olmaması gösterilebilir. Bununla birlikte denetleme noktalarına gelen artık hataların beklenenden yüksek çıkması denetleme noktalarının doğruluklarının güvenilirliğinin tartışılmasına neden olmuştur. 2012-2016 yılları arasında boresight dönüklük açılarının stabil kalmadığı, yıldan yıla değiştiğinin gözlemlendiği, IMU ve GNSS gözlemlerine gelen artık hataların karesel ortalamaları ile boresight dönüklük açılarının değişimleri arasında doğru orantı olduğu gözlenmiştir.

FARKLI YÖNTEMLERLE BELİRLENEN BORESİGHT DÖNÜKLÜK AÇILARININ DOĞRUDAN COĞRAFİ KONUMLANDIRMA VE BİRLEŞTİRİLMİŞ ALGILAYICI YÖNELTMESİ DOĞRULUĞUNA ETKİSİ

3.1 Giriş

Bu bölümde; farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametreleri GNSS/IMU veri işleme aşamasında kullanılmış ve her bir yönteme ait yaklaşık dış yöneltme parametreleri hesaplanmıştır. Akabinde farklı çözümlerle hesaplanan yaklaşık dış yöneltme parametrelerinin doğrudan coğrafi konumlandırma ve birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi doğruluğuna etkisi proje ve test alanında ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu kapsamda UCE-100 dijital hava kamerası kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyon uçuşuyla farklı yöntemlerle Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri belirlenmiştir. Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri GNSS/IMU veri işleme sürecine dahil edilerek test bölgesi ve proje alanında gerçekleştirilen uçuşlara yönelik ayrı ayrı yaklaşık dış yöneltme parametreleri hesaplanmıştır. Test ve proje alanındaki bağımsız denetleme noktalarına gelen artık hatalar doğrudan coğrafi konumlandırma ve birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi tekniğiyle hesaplanmıştır.

Literatürde Boresight dönüklük açılarının hesaplanması için 3 ayrı yöntemin kullanıldığı gözlenmiştir. Bunlardan ilki, ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda elde edilen dış yöneltme parametreleri dönüklük açıları (ω , ϕ , κ) ile GNSS/IMU veri işleme sonucunda elde edilen yaklaşık dış yöneltme parametreleri dönüklük açıları arasındaki farkın ortalamasının alınması şeklindedir. Bu sayede her bir fotoğrafa ait iki farklı dış yöneltme parametreleri dönüklükleri arasındaki açısal farkın ortalaması boresight

dönüklük açılarını vermektedir [8, 19, 45]. Işın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda elde edilen dönüklük parametreleri ile GNSS/IMU veri işleme sonucunda elde edilen yaklaşık dönüklük parametreleri arasındaki farkın hesaplanmasıyla elde edilen kalibrasyon matrisinin doğruluğu blok dengelemesinin doğruluğuyla doğrudan orantılıdır. Ezcümle, dış yöneltme parametrelerini konum ve dönüklük olarak ikiye ayrıldığında dönüklükle ilgili düzeltmeler veya hesaplanan farkların dönüşüm matrisi Boresight dönüklük açılarını vermektedir.

İkinci yöntem ise Boresight dönüklük açılarının doğrudan ışın demetleriyle blok dengelemesine ek bilinmeyen olarak tanımlanarak belirlenmesidir [17, 72, 28, 45].

Son yöntem ise yer kontrol noktası kullanılmadan sadece bağlama noktaları yardımıyla boresight dönüklük açılarının belirlenmesidir. Bu yöntemde fotoğrafların birbirleriyle olan konumlarına göre dönüklük açılara gelen düzeltmeler hesaplanarak Boresight dönüklük açıları belirlenmektedir. Söz konusu yöntemin çıkış noktası yer kontrol noktalarının Boresight dönüklük açılarının hesaplanmasında doğruluğu artırıcı bir etkiye sahip olmadığının anlaşılması üzerine olmuştur [39, 44, 48, 88].

3.2 Farklı Yöntemlerle Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Kalibrasyon ve test uçuşu Ankara/Haymana test bölgesinde UCE-100 geniş formatlı dijital hava kamerası kullanılarak Harita Genel Müdürlüğünce gerçekleştirilmiştir. Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri üç farklı yöntemle belirlenmiştir. Bunlardan ilki PosPac MMS yazılımı kullanılarak bağlama noktaları yardımıyla Boresight dönüklük açılarının, yer kontrol noktası yardımıyla GNSS kayıklık parametrelerinin hesaplanmasıdır. İkinci yöntem Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin ışın demetleriyle blok dengelemesine bilinmeyen olarak tanıtılarak Inpho Match-AT yazılımı kullanılarak hesaplanmasıdır. Son yöntem ise ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda elde edilen dengelenmiş dış yöneltme parametreleri ile GNSS/IMU veri işleme aşamasında elde edilen yaklaşık dış yöneltme parametreleri arasındaki farkın ortalamasının alınması şekliyle hesaplanmasıdır. Farklı yöntemlerle Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin belirlenmesi alt bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.1 Özel Kalibrasyon Test Uçuşuyla Boresight Dönüklük Açılarının ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Hesaplanması

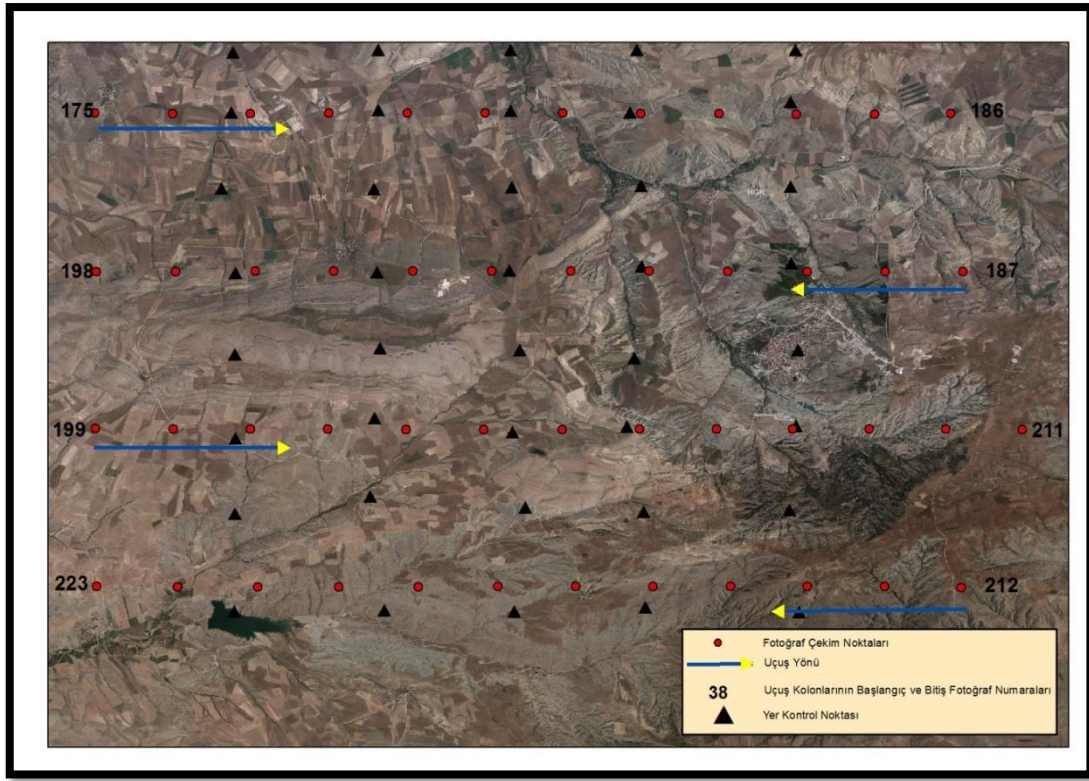
Özel kalibrasyon test uçuşu, UCE-100 dijital hava kamerasıyla 9 Ağustos 2017 tarihinde Ankara il sınırları içerisinde bulunan 168 km²'lik Haymana kalibrasyon test alanında 95 adet hava fotoğrafının %80 ileri %60 yan bindirmeli olacak şekilde çekilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon uçuşu iki farklı yükseklikte ve farkı istikametteki uçuş kolonlarının bir tanesinin çift yönlü uçulmasıyla yapılmıştır. Pospac MMS 7.1 yazılımı kullanılarak fotoğrafların birbirlerine göre konumlarından elde edilen bağlama noktalarıyla Boresight dönüklük açıları ve yer kontrol noktalarıyla GNSS kayıklık parametreleri hesaplanmış ve Tablo-3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin bağlama noktaları-kontrol noktalarıyla hesaplanması

Boresight (Arcmin)			Boresight RMS (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
7.418	9.321	16.426	0.17	0.09	0.09	0.802	-0.388	-2.687

3.2.2 Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Işın Demetleriyle Blok Dengelemesine Ek Bilinmeyen Olarak Tanımlanarak Hesaplanması

Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri ışın demetleriyle blok dengelemesine ek bilinmeyen olarak tanımlanmış ve dengeleme sonucunda Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri hesaplanmıştır. Bu yöntemde, 284 km²'lik Ankara-Haymana Test bölgesinde 09 Ağustos 2017 tarihinde 30 cm yer örnekleme aralığında %60 ileri %30 yan bindirme oranlarında doğu-batı istikametinde 4 kolon 49 adet hava fotoğrafı çekimi gerçekleştirilmiştir. Test bölgesine uygun dağılımla 40 adet yer kontrol noktası inşa edilmiş ve uçuş planı ve yer kontrol noktalarının dağılımı Şekil-3.1'de gösterilmiştir. Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri iki alternatif üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 3.1 Ankara-Haymana test bölgesi test uçuşu ve ykn dağılımı

3.2.2.1 Işın Demetleriyle Blok Dengelemesi ile Sadece Boresight Dönüklük Açılarının Hesaplanması

İlk yöntemde özel kalibrasyon uçuşunda belirlenen GNSS Kayıklık parametreleri GNSS/IMU veri işleme aşamasında sisteme tanıtılmış, Boresight dönüklük açıları ise 0 (sıfır) olarak girilmiştir. Bu sayede GNSS kayıklık parametreleri tanımlanmış yaklaşık dış yöneltme parametreleri kullanılarak ışın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda sadece Boresight dönüklük açılarının hesaplanması amaçlanmıştır. GNSS/IMU veri işlemesi Pospac MMS 7.1 yazılımı ile PPP çözümü yapılarak hesaplanmıştır. Test bölgesine inşa edilen 40 adet yer kontrol noktası sayesinde geometrisi güçlü bir blok oluşturulmuş ve bu noktalar dengelemede tam kontrol noktası olarak kullanılmıştır. Işın demetleriyle blok dengelemesi Inpho Match-AT 8.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Işın demetleriyle blok dengelemesinde Boresight dönüklük açılarını ek bilinmeyen olarak tanımlanmış ve hesaplanmış değerler Tablo-3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2 Boresight dönüklük açılarının ışın demetleriyle blok dengelemesiyle hesaplanması

Boresight (Arcmin)			Boresight RMS (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
7.47	9.492	16.080	-	-	-	0.802	-0.388	-2.687

3.2.2.2 Işın Demetleriyle Blok Dengelemesiyle Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Birlikte Hesaplanması

İkinci yöntemde ise Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri blok dengelemesine bilinmeyen olarak tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Bu çözümde GNSS/IMU veri işleme aşamasında yaklaşık dış yöneltme elemanlarının hesaplanmasında Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri 0 (sıfır) olarak tanımlanmıştır. PocPac MMS yazılımı kullanılarak PPP çözümü ile elde edilen yaklaşık dış yöneltme parametreleri blok dengelemesinde kullanılmıştır. 40 yer kontrol noktasının kullanıldığı blok dengelemesi sonucunda Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerine getirilen düzeltmeler hesaplanmış ve Tablo-3.3’de sunulmuştur.

Tablo 3.3 Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin ışın demetleriyle blok dengelemesi ile hesaplanması

Boresight (Arcmin)			Boresight RMS (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
7.464	9.486	16.074	-	-	-	-0.007	-0.169	-1.753

3.2.3 Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Dengelenmiş Dış Yönelme Elemanları ile Yaklaşık Dış Yönelme Elemanları Arasındaki Farkların Ortalamasıyla Belirlenmesi

Işın demetleriyle blok dengelemesi sonucunda elde edilen dış yönelme parametreleri ile dengelemeye gözlem olarak girilen yaklaşık dış yönelme elemanları arasındaki farkların ortalamasıyla hesaplanan yöntemde izlenen işlem adımları sırasıyla aşağıda açıklanmıştır. GNSS/IMU veri işleme aşamasında Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri 0 (sıfır) olarak tanımlanarak Pospac MMS 7.1 yazılımı PPP çözümüyle hesaplanmıştır. Işın demetleriyle blok dengelemesi Inpho Match-AT 8.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Blok dengelemesi uygun dağılımlı 40 adet yer kontrol noktası ile gerçekleştirilmiş (Tablo-3.4) ve bu sayede konum ve dönüklüğe gelen sistematik veya sistematik olmayan hatalar giderilmiştir.

Tablo 3.4 Blok dengelemesi

YKN (Adet)	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
40	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z
	0.003	0.007	0.002	0.052	0.040	0.092
	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	Omega	Phi	Kappa
	0.203	0.312	0.107	0.3	0.3	0.1

Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin hesaplanma hassasiyeti dengeleme hassasiyetiyle doğru orantılıdır. Bu kapsamda; kontrol noktalarına gelen hatalar X-Y yönünde 5 cm, Z yönünde ise 9 cm olarak hesaplanmıştır. Söz konusu değerler blok dengelemesinin doğruluğunun yüksek olduğunu ve dengelenmiş dış yönelme elemanlarının hatalardan dengeleme doğruluğu oranında arındığına işaret

etmektedir. Dengelenmiş dış yöneltme parametreleri ile yaklaşık dış yöneltme elemanları arasındaki farkların ortalaması Tablo-3.5’de sunulmuştur.

Tablo 3.5 Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin fark yöntemiyle hesaplanması

Boresight (Arcmin)			Boresight RMS (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
7.403	9.544	16.314	-	-	-	0.007	-0.164	-1.759

3.3 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Test Bölgesinde Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya ve Birleştirilmiş Algılayıcı Yöneltmesi Doğruluğuna Etkisi

Farklı yöntemlerle elde edilen kalibrasyon değerlerinin test bölgesinde doğrudan coğrafi konumlandırma ve birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi doğruluğuna etkisi araştırılmıştır. Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin belirlendiği farklı yöntemler sırasıyla aşağıda ifade edilmiştir.

- (1) PosPac MMS yazılımı kullanılarak kalibrasyon uçuş verileri hesaplanmış ve bundan sonraki bölümlerde bu çözüm Ö.K.T.U. olarak adlandırılmıştır (Özel Kalibrasyon Test Uçuşu)
- (2) Blok dengelemesinde test uçuşu verileri kullanılarak sadece Boresight dönüklük açılarının belirlendiği çözüm “DenBore”, Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri birlikte hesaplanmışsa “DenBorGNSS” olarak adlandırılmıştır.
- (3) Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri test uçuş verileri kullanılarak, dengelenmiş dış yöneltme parametreleri ile yaklaşık dış yöneltme parametreleri arasındaki farkın ortalamasının alınmasıyla hesaplanmışsa bu çözüm “Fark” olarak adlandırılmıştır.

(4) Yöntemlerin doğruluğa etkisini daha iyi analiz edebilmek maksadıyla Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri değerleri GNSS/IMU veri işleminde sıfır olarak tanımlanmış ve yaklaşık dış yöneltme elemanları hesaplanmıştır. Bu yöntem “Sıfır” olarak tanımlanmıştır.

Dört farklı yöntemle belirlenen 5 farklı Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri Tablo-3.6’da sunulmuştur.

Tablo 3.6 Farklı yöntemlerle hesaplanan Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri

Yöntem	Boresight (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
Ö.K.T.U	7.418	9.321	16.426	0.802	-0.388	-2.687
DenBore	7.470	9.492	16.080	0.802	-0.388	-2.687
DenBorGNSS	7.464	9.486	16.074	-0.007	-0.169	-1.753
Fark	7.403	9.544	16.314	0.007	-0.164	-1.759
Sıfır	0	0	0	0	0	0

Boresight dönüklük açıları arasındaki en düşük ve en yüksek değerler arasındaki fark Tx yönünde 0.067 arcmin, Ty Yönünde 0.223 arcmin ve Tz yönünde 0.352 arcmin olarak hesaplanmıştır.

3.3.1 Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Test Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi

Farklı yöntemlerle hesaplanan Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğuna etkisi 30 cm yer örnekleme aralığında %60 ileri %30 yan bindirme oranlarında 4 kolon 49 hava fotoğrafından oluşan test bloğunda araştırılmıştır (Şekil-3.1). Farklı yöntemlerle belirlenen Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri kullanılarak

GNSS/IMU veri işleme her bir yöntem için ayrı ayrı yapılmıştır. Hesaplanan yaklaşık dış yöneltme elemanları blok dengelemesine gözlem olarak tanıtılmıştır. Blok dengelemesinde 40 adet yer kontrol noktası bağımsız denetleme noktası olarak tanımlanmıştır. Dengeleme aşamasında ayrı ayrı bağlama noktaları toplattırılmış ve yöntemlerin yalın doğruluklarının hesaplanması amacıyla BoreSight dönüklük açıları ve GNSS Kayıklık parametreleri hesaplatılmamıştır. Ayrıntılı dengeleme sonuçları Tablo-3.7’de sunulmuştur.

Tablo 3.7 Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğuna etkisi

Yöntem	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
	ω	ϕ	κ	X	Y	Z
Ö.K.T.U	0.006	0.008	0.006	0.791	0.725	0.447
DenBore	0.006	0.007	0.002	0.800	0.694	0.453
DenBoreGNSS	0.006	0.007	0.002	0.221	0.689	0.666
Fark	0.006	0.007	0.005	0.223	0.662	0.648
Sıfır	0.118	0.156	0.258	1.305	0.768	1.418
	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	ω	ϕ	κ
Ö.K.T.U	0.160	0.216	0.193	0.4	0.4	0.1
DenBore	0.171	0.209	0.196	0.4	0.4	0.2
DenBoreGNSS	0.157	0.225	0.200	0.4	0.4	0.2
Fark	0.156	0.224	0.197	0.4	0.4	0.2
Sıfır	0.732	0.768	0.334	1.4	1.4	0.5

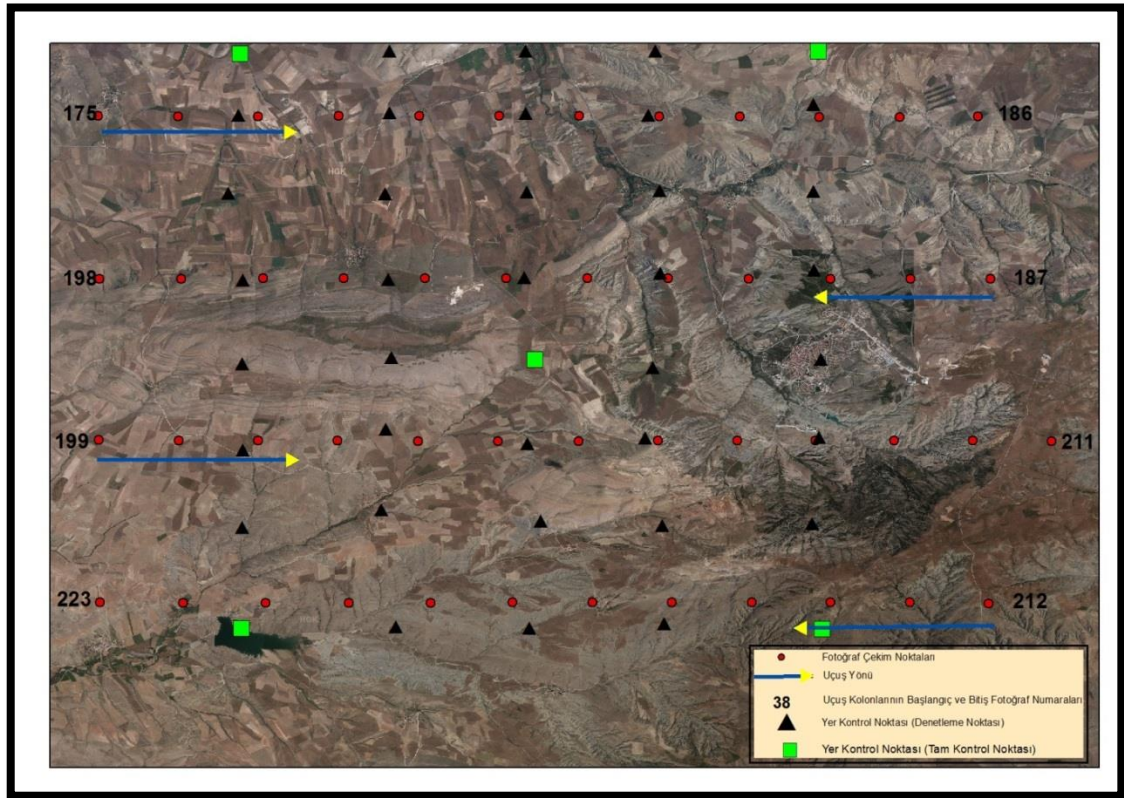
IMU ve GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ve dönüklüklerin ortalama standart sapmasında “Sıfır” çözümü ile diğer çözümler arasında kayda değer bir fark olduğu gözlenmiştir.

Denetleme noktalarına gelen hataların karesel ortalama değerleri analiz edildiğinde aşağıdaki hususlara ulaşılmıştır;

- “Ö.K.T.Ü.” çözümünde yatay yönde 2.5 piksel düşey yönde 1.5 piksel hata hesaplanmıştır. Düşey yönde “Denbore” çözümü ile birlikte en hassas çözüm olmuştur.
- “Denbore” çözümünde yatay yönde 2.5 piksel düşey yönde 1.5 piksel hata hesaplanmıştır. Düşey yönde “Ö.K.T.Ü.” çözümü ile birlikte en hassas çözüm olmuştur.
- “DenboreGNSS” çözümü yatay yönü X doğrultusunda piksel altı, Y doğrultusu ve düşey yönde de 2 piksel hata hesaplanmıştır. Yatay yön X doğrultusunda “Fark” çözümü ile birlikte en hassas çözüm olmuştur.
- “Fark” çözümü yatay yönü X doğrultusunda piksel altı, Y doğrultusu ve düşey yönde de 2 piksel hata hesaplanmıştır. Yatay yön X doğrultusunda “DenboreGNSS” çözümü ile birlikte en hassas çözüm olmuştur.
- “Sıfır” çözümü yatay yönü Y doğrultusunda 2.5 piksel, X doğrultusu ve düşey yönde de 4.5 piksel hata hesaplanmıştır. Tüm yönlerde beklenildiği üzere doğruluğu en düşük çözüm olmuştur.
- Farklı yöntemlerle hesaplanan GNSS kayıklığı ve Boresight dönüklük açılarının doğrudan coğrafi konumlandırma tekniğinde X yönündeki doğruluğu 4 ile 6 kat etkilediği, Y yönünde çok fazla bir etkiye sahip olmasa da Z yönünde 2-3 kat değiştirdiği gözlenmiştir.
- Ezcümle “DenBoreGNSS- Fark” çözümü X yönünde, “Ö.K.T.Ü- DenBore” çözümü ise Z yönünde daha doğru sonuçlar vermiştir.

3.3.2 Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Test Alanında Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi

Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi doğruluğuna etkisi araştırılmıştır. Bu maksatla blok dengelemesinde 5 adet yer kontrol noktası tam kontrol noktası, 35 adet yer kontrol noktası ise denetleme noktası olarak kullanılmıştır (Şekil-3.2).



Şekil 3.2 Ankara-Haymana test bölgesi test uçuşu ve denetleme-kontrol noktası dağılımı

Işın demetleriyle blok dengeleme ile 35 denetleme noktasına gelen artık hatalar ayrı ayrı hesaplanmış ve Tablo 3.8’de sunulmuştur.

Tablo 3.8 Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi doğruluğuna etkisi

Yöntem	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
	ω	ϕ	K	X	Y	Z
Ö.K.T.Ü	0.002	0.005	0.006	0.314	0.113	0.835
DenBore	0.002	0.005	0.002	0.319	0.110	0.835
DenBoreGNSS	0.003	0.007	0.002	0.147	0.106	0.199
Fark	0.003	0.008	0.005	0.150	0.107	0.203
Sıfır	0.120	0.158	0.264	0.313	0.242	1.620
	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	ω	ϕ	K
Ö.K.T.Ü	0.268	0.232	0.289	0.3	0.3	0.1
DenBore	0.275	0.223	0.290	0.3	0.3	0.1
DenBoreGNSS	0.163	0.234	0.094	0.3	0.3	0.1
Fark	0.161	0.233	0.094	0.3	0.3	0.1
Sıfır	0.236	0.382	0.182	1.0	1.2	0.4

Farklı yöntemlerle belirlenmiş yaklaşık dış yöneltme parametreleriyle ışın demetleriyle blok dengelemesi yapılmış ve 5 adet yer kontrol noktası tam kontrol noktası olarak kullanılmıştır. Denetleme noktalarının karesel ortalama hatası, IMU ve GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ile dönüklüklerin ortalama standart sapması hesaplanmıştır.

IMU ve GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ile dönüklüklerin ortalama standart sapmasında “Sıfır” çözümü hariç diğer çözümler birbirine yakın çıkmıştır.

Denetleme noktalarının karesel ortalama hatasında ise aşağıdaki bulgular tespit edilmiştir.

- “Ö.K.T.Ü.” çözümünde yatay yön X doğrultusunda piksel, Y doğrultusunda piksel altı ve dikey yönde 3 piksel hata hesaplanmıştır.

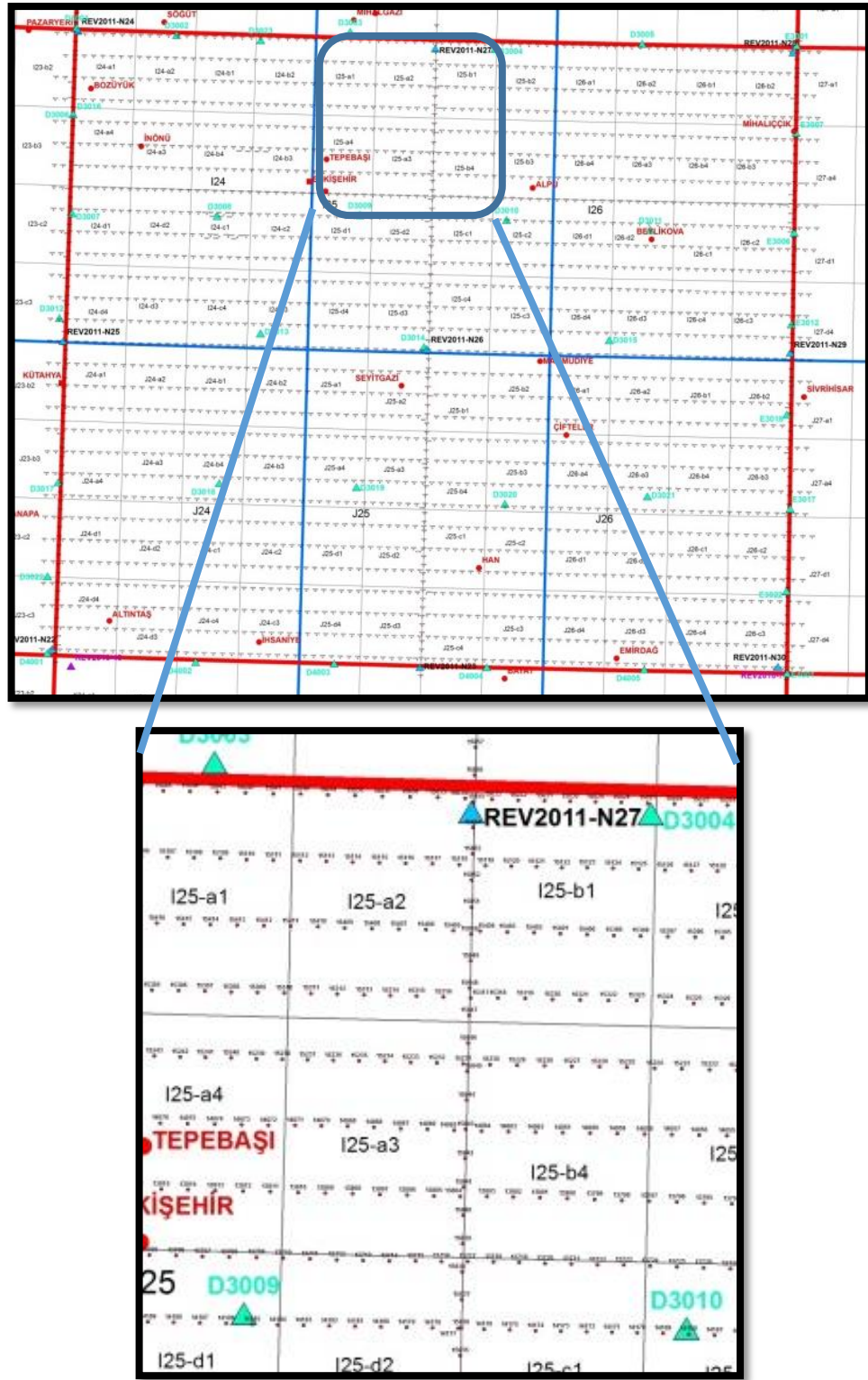
- “Denbore” çözümünde yatay yön X doğrultusunda piksel, Y doğrultusunda piksel altı ve düşey yönde 3 piksel hata hesaplanmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözüm sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.
- “DenboreGNSS” çözümü yatay ve düşey yönde piksel altı doğruluk hesaplanmıştır.
- “Fark” çözümü yatay ve düşey yönde piksel altı doğruluk hesaplanmıştır.
- “DenBoreGNSS” ve “Fark” çözümleri yatay ve düşey bileşenlerde piksel altı doğruluk ile en doğru sonuçların hesaplandığı yöntem olduğu gözlenmiştir.
- “Sıfır” çözümü yatay yönde piksel düşey yönde 5 piksel hata hesaplanmıştır. Tüm yönlerde beklenildiği üzere doğruluğu en düşük çözüm olmuştur.
- Düşey bileşen yönünde “DenBore” ve “Ö.K.T.Ü” çözümünde 2.5 piksel doğruluk hesaplanmış ve her ne kadar 5 adet yer kontrol noktası kullanılmış olsa bile “DenBoreGNSS” ve “Fark” çözümlerinin doğruluğuna erişilememiştir.
- Yatay bileşende olmasa bile düşey bileşen de GNSS kayıklık parametresinin doğruluğa doğrudan etkisi olduğu anlaşılmıştır.

3.4 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açıları ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Proje Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya ve Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi

Test alanında belirlenen Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri aynı test bölgesinde kalibrasyon uçuşundan bağımsız olarak uçulan %60 ileri-%30 yan bindirmeli 4 kolon-49 hava fotoğrafından oluşan proje uçuşuna uygulanmış ve denetleme noktalarına gelen hatalar hem doğrudan coğrafi konumlandırma hem de birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi yaklaşımıyla ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Bu bölümde ise test bölgesinde elde edilen parametreler standart fotogrameterik proje alanında uygulanarak doğrudan coğrafi konumlandırma ve birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi doğruluğuna etkisi araştırılmıştır. Bu maksatla proje alanı olarak Eskişehir 1/250.000 paftası (14.400km²) seçilmiştir (Şekil-3.3). Proje alanı %60 ileri-%30 yan

Proje alanının 9 kolon-204 fotoğraftan oluşan küçük bir bölgesinde alt blok oluşturulmuştur (Şekil-3.4). Işın demetleriyle blok dengelemesinde 4 yer kontrol noktası tam kontrol noktası olarak kullanılmış ve Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri hesaplanmıştır. Bu çözüm “Proje” olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.4 Eskişehir 1/250.000 proje alanından seçilen kalibrasyon alanı

Sırasıyla “Ö.K.T.Ü”, “ Denbore”, “DenboreGNSS”, “ Fark”, “ Proje” ve “ Sıfır” çözümleri uygulanmıştır. Tablo 3.9’da “Proje” çözümü dâhil tüm yaklaşımlardan elde edilen Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri sunulmuştur.

Tablo 3.9 Farklı yöntemlerle hesaplanan Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri

Yöntem	Boresight (Arcmin)			GNSS Kayıklık (Metre)		
	Tx	Ty	Tz	X	Y	Z
Ö.K.T.U	7.418	9.321	16.426	0.802	-0.388	-2.687
DenBore	7.47	9.492	16.080	0.802	-0.388	-2.687
DenBorGNSS	7.464	9.486	16.074	-0.007	-0.169	-1.753
Fark	7.403	9.544	16.314	0.007	-0.164	-1.759
Proje	7.386	9.312	16.314	-0.131	-0.103	0.933
Sıfır	0	0	0	0	0	0

Proje alanında seçilen kalibrasyon bölgesinde belirlenen Boresight dönüklük açıları ile test alanında farklı yöntemlerle belirlenen değerler arasında yapılan karşılaştırmada değerlerin birbirine yakın çıktığı gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında Boresight dönüklük açılarının belirlenmesinde özel bir kalibrasyon uçuşuna olan ihtiyacın gerekliliğinin sorgulanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Proje alanında seçilen kalibrasyon bölgesinde belirlenen GNSS kayıklığı ile test alanında farklı yöntemlerle belirlenen değerler arasında X yönünde 0.124 m, Y yönünde 0.061 ve Z yönünde 2.686m fark olduğu hesaplanmıştır.

Özellikle Z yönünde oluşan fark nedeniyle GNSS kayıklık parametrelerinin proje bazlı belirlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

3.4.1 Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları Ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Proje Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi

Farklı yöntemlerle elde edilen Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri kullanılarak elde edilen yaklaşık dış yöneltme parametreleri, 36 kolon 2736 fotoğraftan oluşan ve Şekil-3’de gösterilen Eskişehir (1/250.000 ölçekli pafta) proje alanında uygulanarak doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğuna etkisi araştırılmıştır.

Eskişehir 1/250.000 ölçeğindeki proje alanının hava fotoğrafı çekimi 10.08-11.08-19.08-24.08-25.08 ve 07.09.2017 tarihlerinde toplam 6 günlük uçuş sonunda tamamlanmıştır. Her bir gün için GNSS/IMU veri işlemesi PPP yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Dengelemeye girilmek üzere 6 farklı yaklaşık dış yöneltme parametreleri veri kümesi oluşturulmuştur. Dengelemede kullanılan tüm yer kontrol noktaları denetleme noktası olarak tanımlanmıştır.

IMU gözlemleriyle GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası, dönüklüklerin ortalama standart sapması ve denetleme noktalarına gelen artık hataların karesel ortalaması yeteri kadar bağımsız denetleme noktası ile (33 yatay- 45 düşey) blok dengelemesi sonucunda hesaplanmış ve Tablo-3.10’da sunulmuştur.

Tablo 3.10 Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin proje alanında doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğuna etkisi

Yöntem	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
	ω	ϕ	K	X	Y	Z
Ö.K.T.Ü	0.003	0.007	0.006	0.941	0.340	5.171
DenBore	0.003	0.008	0.008	0.941	0.342	5.171
DenBoreGNSS	0.003	0.008	0.008	0.230	0.292	4.304
Fark	0.003	0.009	0.006	0.237	0.291	4.309
Proje	0.003	0.007	0.006	0.147	0.246	2.106
Sıfır	0.122	0.154	0.273	0.431	0.506	2.795
	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	ω	ϕ	K
Ö.K.T.Ü	0.267	0.206	0.158	0.4	0.5	0.1
DenBore	0.267	0.206	0.157	0.4	0.5	0.1
DenBoreGNSS	0.267	0.206	0.158	0.4	0.5	0.1
Fark	0.267	0.206	0.158	0.4	0.5	0.1
Proje	0.260	0.189	0.142	0.4	0.5	0.1
Sıfır	0.299	0.287	0.187	1.0	1.3	0.3

IMU ve GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hataları “Sıfır” çözümü hariç birbirine yakın çıkmış ve “Proje” çözümünde belirlenen kayıklık parametreleri diğer çözümlerden farklı olduğu için GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası “Proje” çözümünde daha hassas olduğu gözlenmiştir.

Dönüklüklerin ortalamasının standart sapması “Sıfır” çözümü hariç diğer bütün çözümlerde birbirine yakın çıkmıştır.

Denetleme noktalarına gelen artık hataların karesel ortalama hatasında aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde ilk göze çarpan hususun proje alanının küçük bir bölgesinde belirlenen Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin kullanıldığı çözümün doğruluğunun diğeri çözümün doğruluklarına göre daha hassas olduğudur. En hassas ikinci çözüm ile arasında X-Z yönlerinde 2 kat fark olduğu gözlenmiştir.

- “Ö.K.T.Ü.” çözümünde yatay yön X doğrultusunda 3 piksel, Y doğrultusunda piksel ve düşey yönde 17 piksel hata hesaplanmıştır.
- “Denbore” çözümünde yatay yön X doğrultusunda 3 piksel, Y doğrultusunda piksel ve düşey yönde 17 piksel hata hesaplanmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” özüm sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.
- “DenboreGNSS” özümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 15 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Fark” özümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 15 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “DenBoreGNSS” ve “Fark” özümleri birbirine yakın çıkmıştır.
- “Proje” özümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 7 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Proje” özümü yatay ve düşey yönde en hassas çözüm olmuştur.
- “Sıfır” özümü yatay yönde 1.5 piksel düşey yönde 9 piksel hata hesaplanmıştır.
- “Sıfır” çözümünün düşey yönünde iyi çıkmasının sebebi proje alanında belirlenen GNSS kayıklığı z bileşeninin pozitif bir değeri taşıması ve test alanında belirlenen GNSS kayıklık parametresi z bileşeninin negatif değeri olmasıdır.
- Doğrudan coğrafi konumlandırma sonucunda x ve y yönünde piksel altı doğruluk yakalanırken z yönünde meydana gelen 6 piksellik hatanın blok içerisinde GNSS kayıklık bileşen değeriğiliğinin liner olmamasının neden olduğu düşünölmektedir.
- Blok yapısının büyük olması uçuş kolonlarının uzun olması söz konusu düşey hassasiyetini düşüren sebepler olarak sayılabilir.

3.4.2 Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Boresight Dönüklük Açıları Ve GNSS Kayıklık Parametrelerinin Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi

Farklı yöntemlerle elde edilen Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametreleri kullanılarak elde edilen yaklaşık dış yönelme parametreleri, 36 kolon 2736 fotoğraftan oluşan ve Şekil-3’de gösterilen Eskişehir (1/250.000 ölçekli pafta) proje alanında kullanılarak birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi doğruluğuna etkisi araştırılmıştır.

Eskişehir 1/250.000 ölçeğindeki proje alanında hava fotoğrafı çekimi 10.08-11.08-19.08-24.08-25.08 ve 07.09.2017 tarihlerinde toplam 6 günde tamamlanmıştır. Her bir gün için GNSS/IMU veri işlemesi PPP yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Dengelemeye girilmek üzere 6 farklı yaklaşık dış yönelme parametreleri veri kümesi oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçların birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi doğruluğuna etkisinin araştırılması maksadıyla 33 adet tam yer kontrol noktası 12 adet denetleme noktası kullanılmıştır. IMU gözlemleriyle GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası, dönüklüklerin ortalama standart sapması ve denetleme noktalarına gelen artık hataların karesel ortalama hatası blok dengelenmesi sonucunda hesaplanmıştır. Dengeleme sonuçlarıyla ilgili ayrıntılı bilgi ve Tablo-3.11’de sunulmuştur.

Tablo 3.11 Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin proje alanında birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi doğruluğuna etkisi

Yöntem	IMU Gözlemlerinin KOH (Derece)			Denetleme Noktalarının KOH (Metre)		
	ω	φ	K	X	Y	Z
Ö.K.T.Ü	0.003	0.007	0.006	0.221	0.103	2.044
DenBore	0.003	0.008	0.008	0.221	0.103	2.044
DenBoreGNSS	0.003	0.008	0.008	0.068	0.069	1.697
Fark	0.003	0.009	0.006	0.069	0.069	1.698
Proje	0.003	0.007	0.006	0.045	0.051	0.862
Sıfır	0.122	0.154	0.273	0.065	0.073	1.088

Tablo 3.11 Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin proje alanında birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi doğruluğuna etkisi (devamı)

	GNSS Gözlemlerinin KOH (Metre)			Dönüklüklerin Ortalama Standart Sapması (Derece/1000)		
	X	Y	Z	ω	ϕ	K
Ö.K.T.Ü	0.374	0.253	0.363	0.4	0.5	0.1
DenBore	0.374	0.253	0.362	0.4	0.5	0.1
DenBoreGNSS	0.281	0.228	0.299	0.4	0.5	0.1
Fark	0.282	0.228	0.300	0.4	0.5	0.1
Proje	0.264	0.197	0.200	0.4	0.5	0.1
Sıfır	0.289	0.276	0.254	1.0	1.3	0.3

IMU ve GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hataları Sıfır çözümü hariç birbirine yakın çıkmış ve proje çözümünde belirlenen kayıklık parametreleri diğer çözümlere göre farklı olduğu için GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası proje çözümünde daha hassas olduğu gözlenmiştir.

Dönüklüklerin ortalamasının standart sapması sıfır çözümü hariç diğer bütün çözümlerde birbirine yakın çıkmıştır.

Denetleme noktalarına gelen artık hataların karesel ortalama hatasında aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- “Ö.K.T.Ü.” çözümünde yatay yönde piksel altı, düşey yönde 7 piksel hata hesaplanmıştır.
- “Denbore” çözümünde yatay yönde piksel altı, düşey yönde 7 piksel hata hesaplanmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözüm sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

- “DenBoreGNSS” çözümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 5 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Fark” çözümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 5 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “DenBoreGNSS” ve “Fark” çözümleri birbirine yakın çıkmıştır.
- “Proje” çözümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 2.5 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Proje” çözümü yatay ve düşey yönde en hassas çözüm olmuştur.
- “Sıfır” çözümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 3.5 piksel hata hesaplanmıştır.
- Sonuçlar irdelendiğinde ilk göze çarpan hususun Proje alanının küçük bir bölgesinde belirlenen Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin kullanıldığı çözümlerin doğruluğunun diğer çözümlerin doğruluklarına göre daha hassas olduğudur. En hassas ikinci çözüm ile arasında Z yönünde 2 kat fark olduğu gözlenmiştir.
- Sıfır çözümünün düşey yönünde iyi çıkmasının sebebi ise Proje alanında belirlenen GNSS kayıklığı z bileşeninin pozitif bir değer taşıması ve diğer çözümlerde belirlenen GNSS kayıklık parametresi z bileşenlerinin ise negatif değerli olmasıdır.
- Doğruluğu en düşük sonuçların “Ö.K.T.Ü” ve “DenBore” çözümleri olduğu, en hassas çözüme “Proje” çözümüyle ulaşıldığı gözlenmiştir.
- “Sıfır” çözümü “Proje” çözümü ile birlikte diğer çözümlerden daha hassas çıkmıştır. Bunun nedeni GNSS kayıklık ve Boresight açılarının proje alanı değişkenlerine göre uygun olarak belirlenmemesidir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Giriş

Geniş formatlı dijital hava kameralarının kalibrasyon parametrelerinin zamansal değişiminin analiz edildiği bu tez çalışmasında 1960-2020 yılları arasında akademik arşiv büyük bir hassasiyetle taranmıştır. Sistem kalibrasyonu temalı yapılan çalışmalar son derece dağınık bir şekilde işlenmiş ve literatürde toplu bir çalışmanın bulunmadığı gözlenmiştir. Sistem kalibrasyonu parametrelerinin tanımı ve hesaplanma süreçleri, özel kalibrasyon test uçuşu ve test alanının nasıl olması gerektiği soruları farklı yazarlar tarafından incelenmiş ve hemen hemen aynı bulgulara ulaşılmıştır. Bunlara rağmen ticari hayatın yani uygulayıcıların en önemli kriteri olan ve en az “nasıl” sorusu kadar önem işgal eden “hangi sıklıkta” kalibrasyon yapılması sorusu cevapsız bırakılmıştır. Uzun dönem çalışmalarla araştırılması gereken bu sorunun fazla emek isteyen bir çalışma olması ve yeteri kadar verinin olmaması sebebiyle araştırılmadığı gözlenmiştir. Akabinde tarihsel süreç içerisinde akademik camianın farklı popüler konulara yoğunlaşması sebebiyle tamamen unutulmuş ve deneysel gözlemlere dayanmayan kabullerle sürecin izlendiği gözlenmiştir.

4.2 Akademik Arşiv Taraması Sonucu Elde Edilen Bilgiler

Bu bölümde, tezin hipotezini oluşturan konular hakkında 1963'ten 2020'ya kadar yayınlanan 82 makale ve tez incelenmiştir. Dijital hava kameralarının kalibrasyonu birçok yazar tarafından bağımsız olarak araştırılmış ve hemen hemen aynı bulgulara ulaşılmıştır. Buna rağmen, bazı meselelerde görüş birliğine varılamamış ve hatta bazı sorular cevapsız bırakılmıştır. Görüş birliğine varılamayan ve cevapsız bırakılan sorular esasında tezin hipotezini oluşturan konulara altlık teşkil etmektedir. Uzlaşmaya varılan konular özetlenmiş, anlaşmazlıklar dile getirilmiş ve cevaplanmayan sorular tespit edilerek aşağıda ifade edilmiştir.

Görüş birliğine varılan konular şunlardır:

- Doğrudan coğrafi konumlandırma tekniğinde öteleme vektörünün hesaplanmasının doğruluğu arttırdığı gözlenmiştir.
- Öteleme vektörü yersel ölçümlerle kaba şekilde belirlendikten sonra GNSS/IMU veri işleme sürecinde Kalman Filtreleme tekniğiyle hassas şekilde belirlenmelidir.
- Öteleme vektörü uçuştan uçuşa değişmektedir.
- Boresight dönüklük açıları test sahasında özel kalibrasyon uçuşuyla belirlenmelidir.
- Boresight dönüklük açılarının hesaplanmasında bağlama nokta sayısının bir etkisi yoktur.
- Boresight dönüklük açılarının hesaplanmasında tercih edilen yöntemle göre yer kontrol noktalarının gereksinimi değişmektedir.
- GNSS kayıklığı düşey bileşeni ile odak uzunluğu arasında yüksek korelasyon nedeniyle, GNSS kayıklığının odak uzaklığından bağımsız olarak belirlenmesi iki farklı irtifada gerçekleştirilecek test uçuşuyla mümkün olmaktadır.
- GNSS kayıklığı yatay bileşeni ile asal nokta hataları arasındaki korelasyon nedeniyle, GNSS kayıklığının asal noktadan bağımsız belirlenmesi uçuş kolonunun çift yönlü uçulmasıyla gerçekleşmektedir.
- Sistem kalibrasyonu iki bölüme ayrılmıştır: algılayıcıların kendi kalibrasyonu ve birbirlerine göre kalibrasyonu. Algılayıcıların münferit kalibrasyonları genellikle fabrika veya laboratuvar kalibrasyonu ile yapılırken, birbirlerine göre kalibrasyonu operasyonel kalibrasyon yöntemiyle yapılmaktadır.
- Operasyonel kalibrasyonun laboratuvar kalibrasyonuna göre en önemli avantajı sistem kalibrasyon parametrelerinin uçuş şartları ve atmosferik etkiler içerisinde modellenmesidir.
- Kalibrasyon uçuşunun yüksek bindirme oranlarıyla güçlü bir test bloğuna sahip olması gerekmektedir.

- Sistem kalibrasyonunda yer bazlı hatalar belirlenecekse yer kontrol noktasına mutlaka ihtiyaç duyulmaktadır.
- Algılayıcı sistemlerin (Kamera ve IMU) uçağa montajında, yerleri değiştirildiğinde veya tekrardan sökölüp takıldığında Boresight dönüklük açılarının yeniden hesaplanması gerekmektedir.

Boresight dönüklük açılarının hangi sıklıkta belirlenmesi gerektiği hususunda bir görüş birliği sağlanamamış, günlük her uçuş öncesi ve/veya sonrasında, haftalık ve uçuş sezonu öncesi ve/veya sonrasında belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Birçok akademik çalışmada dile getirilse de cevaplanmamış ve tezin hipotezini oluşturan sorular şunlardır;

- Boresight dönüklük açılarının kararlılığı konusunda deneysel olarak 4 aylık sürecin ötesine geçilememiş, yıl bazlı Boresight dönüklük açılarının değişim analizi yapılmamıştır.
- Sistem kalibrasyon parametrelerinin yüksek bindirme oranlarında özel bir test uçuşuyla belirlenmesi ile proje alanında standart proje uçuşuyla belirlenmesinin karşılaştırılması yapılmamıştır. Dolayısıyla Özel kalibrasyon test uçuşu ve sahasının gerekliliği araştırılmamıştır.
- Farklı yöntemlerle belirlenen sistem kalibrasyon parametrelerinin doğrulukları karşılaştırılmamıştır.
- Belirlenen sistem kalibrasyon parametreleri fotogrametrik proje alanlarında ticari uygulamalarda araştırılmamış sadece test sahasında yapılan incelemelerle sınırlı kalmıştır.

4.3 Boresight Dönüklük Açılarının Zamansal Değişiminin Analizi

Bu bölümde Boresight dönüklük açılarının zamansal değişimi yıllık olarak gözlenmiş hangi sıklıkta kalibrasyon yapılması gerektiği incelenmiştir. İki farklı kamera sisteminde yapılan değerlendirme sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

IMU ile Kamera arasındaki fiziksel mesafenin değişmesi:

IMU arızalanması sebebiyle kamera yuvasından çıkartılmıştır. Yeniden montajında kamera ile IMU arasındaki fiziksel mesafe ve dönüklükler değişmiştir. 2012 yılı uçuş sezonu ortasıyla 2013 yılı uçuş sezonunun başlangıcında 8 aylık dönemde gerçekleştirilen iki kalibrasyon uçuşları ile bu değişim gözlemlenmiştir. İki kalibrasyon uçuşları arasındaki fark Tx yönünde 0.692 arcmin, Ty yönünde 5.241 arcmin ve Tz yönünde 2.785 arcmin olarak hesaplanmıştır. IMU kamera yuvasından çıkartıldığında boresight dönüklük açılarının büyük değişime uğradığı gözlenmiştir.

Sert uçuş şartları ve uzun uçuş sezonu:

2013 yılında hesaplanan boresight dönüklük açıları ile 2014 yılında belirlenen değerler arasındaki değişim Tx, Ty ve Tz için sırasıyla 0.009 arcmin, 0.279 arcmin ve 0.241 arcmin olarak hesaplanmıştır. Boresight dönüklük açılarının dış faktörlerden bağımsız olarak 16 aylık süreçte sabit kalmadığı gözlenmiştir. Tx yönündeki açı sabit kalırken, Ty ve Tz yönlerindeki değişikliklerin yegâne sebebinin uçuş şartlarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. 2015-2016 yılları arasında hesaplanan boresight dönüklük açılarında Tx yönünde 0.826 arcmin, Ty yönünde 0.135 arcmin ve Tz yönünde 1.154 arcmin değişim hesaplanmıştır. Ezcümle boresight dönüklük açıları yıllık olarak sabit olmadığı ve uçuş sezonunun başında belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kameranın fabrika kalibrasyonu için üretici firmaya gönderilmesi:

2015 yılı uçuş sezonu öncesinde kamera fabrika kalibrasyonu yapılması için üretici firmaya gönderilmiştir. Bu süreçte kameranın iç yöneltme elemanları laboratuvar ortamında hassas bir şekilde belirlenmiştir. 2014 yılı uçuş sezonu başlangıcıyla 2015 uçuş sezonu başlangıcında (fabrika kalibrasyonundan sonra) yapılan kalibrasyon sonucunda boresight dönüklük açıları arasındaki değişim Tx yönünde 0.49 arcmin, Ty yönünde 4.267 arcmin ve Tz yönünde 1.458 arcmin olmuştur. Özellikle Ty ve Tz yönünde böylesine büyük bir fark için yapılacak tek açıklama kameranın 2015 yılında yapılan kalibrasyon uçuşu öncesi fabrika kalibrasyonu için üretici firmaya gönderilmesi olduğu düşünülmektedir.

Uçuş sezonu süresince oluşan değişim:

2016 yılında uçuş sezonundan önce (Haziran) ve uçuş sezonundan sonra (Ekim) iki ayrı kalibrasyon uçuşu gerçekleştirilmiştir. Boresight dönüklük açıları arasındaki farklar Tx yönünde 0,124 arcmin, ty yönünde 0,180 arcmin ve Tz yönünde 0,026 arcmin olarak hesaplanmıştır. Sonuçların birbirine yakın olması, uçuş mevsiminde kalibrasyonun yenilenmesine gerek olmadığını göstermektedir.

4.4 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Doğrudan Coğrafi Konumlandırmaya ve Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesine Etkisi

Farklı yaklaşımlarla hesaplanan kalibrasyon parametreleri GNSS/IMU veri işleme aşamasında kullanılmış ve her bir yönteme ait yaklaşık dış yönelme parametreleri hesaplanmıştır. Akabinde farklı çözümlerle hesaplanan yaklaşık dış yönelme parametrelerinin doğrudan coğrafi konumlandırma ve birleştirilmiş algılayıcı yönelme doğruluğuna etkisi proje ve test alanında ayrı ayrı araştırılmış ve aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

4.4.1 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Test Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi

- “Sıfır” çözümü hariç diğer çözümlerin IMU gözlemlerinin karesel ortalama hatası, GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ve dönüklüklerin ortalama standart sapması birbirine yakın çıkmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözümlerinde GNSS kayıklık parametrelerinde aynı değerler kullanılmış, Boresigt dönüklük açıları farklı yöntemlerle hesaplanmıştır. Her iki çözümde de yatay yönde 2.5 piksel düşey yönde 1.5 piksel hata hesaplanmıştır
- “DenboreGNSS” ve “Fark” çözümlerinde aynı veri seti kullanılarak farklı yöntemlerle GNSS kayıklık parametreleri ve Boresight dönüklük açıları hesaplanmıştır. Yöntemler farklı olsa bile aynı veri seti kullanıldığı için iki kalibrasyon değerleri de birbirine yakın çıkmıştır. Buna paralel olarak her iki çözümde de X doğrultusunda piksel altı, Y doğrultusu ve düşey yönde de 2 piksel hata hesaplanmıştır.

- “Sıfır” çözümü yatay yönü Y doğrultusunda 2.5 piksel, X doğrultusu ve düşey yönde de 4.5 piksel hata hesaplanmıştır. Tüm yönlerde beklenildiği üzere doğruluğu en düşük çözüm olmuştur.
- Farklı yöntemlerle hesaplanan GNSS kayıklığı ve Boresight dönüklük açılarının doğrudan coğrafi konumlandırma tekniğinde X yönündeki doğruluğu 4 ile 6 kat etkilediği, Y yönünde çok fazla bir etkiye sahip olmasa da Z yönünde 2-3 kat değiştirdiği gözlenmiştir.
- “DenBoreGNSS- Fark” çözümü X yönünde, “Ö.K.T.Ü- DenBore” çözümü ise Z yönünde daha doğru sonuçlar vermiştir. “Sıfır” çözümü her yönde en kötü sonuçların hesaplandığı yöntem olmuştur.
- En uygun çözümün dengeleme sonucunda elde edilen “DenBoreGNSS” yaklaşımı olduğu tespit edilmiştir. Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin birlikte belirlendiği çözüm en uygun çözümdür.

4.4.2 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Test Alanında Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi

- “Sıfır” çözümü hariç diğer çözümlerin IMU gözlemlerinin karesel ortalama hatası, GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ve dönüklüklerin ortalama standart sapması birbirine yakın çıkmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözümlerinde GNSS kayıklık parametrelerinde aynı değerler kullanılmış, Boresight dönüklük açıları farklı yöntemlerle hesaplanmıştır. Her iki çözümde de yatay yön X doğrultusunda piksel, Y doğrultusunda piksel altı ve düşey yönde 3 piksel hata hesaplanmıştır.
- “DenboreGNSS” ve “Fark” çözümlerinde aynı veri seti kullanılarak farklı yöntemlerle GNSS kayıklık parametreleri ve Boresight dönüklük açıları hesaplanmıştır. Yöntemler farklı olsa bile aynı veri seti kullanıldığı için iki kalibrasyon değerleri de birbirine yakın çıkmıştır. Buna paralel olarak çözümlerin sonuçları birbirine yakın çıkmış ve her iki çözümde de yatay ve düşey yönde piksel altı doğruluk hesaplanmıştır.
- “Sıfır” çözümü yatay yönde piksel düşey yönde 5 piksel hata hesaplanmıştır. Tüm yönlerde beklenildiği üzere doğruluğu en düşük çözüm olmuştur.

- Birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesinin kullanıldığı bu yöntemde 5 yer kontrol noktası kullanılmıştır. Yer kontrol noktası kullanılmasına rağmen “DenBore” ve “Ö.K.T.Ü” çözümünün doğruluğu “DenBoreGNSS” ve “Fark” çözümlerinin doğruluğuna erişememiştir.
- Blok dengelemesinde her ne kadara 5 adet yer kontrol noktası kullanılsa da yaklaşık dış yöneltme parametrelerinin hassasiyetleri elde edilen sonuçları doğrudan etkilemektedir. Yer kontrol noktası sayısının yeterli olmaması GNSS/IMU veri işleme hassasiyetlerinin önemini arttırmaktadır.
- Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin sadece doğrudan algılayıcı yöneltmesi yaklaşımında değil birleştirilmiş algılayıcı yönetmesi yaklaşımında da etkili olduğu, GNSS/IMU veri işleme aşamasında mutlaka sürece dâhil edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

4.4.3 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Proje Alanında Doğrudan Coğrafi Konumlandırma Doğruluğuna Etkisi

- Proje alanında standart fotogrametrik uçuşlarla belirlenen (%60 ileri, %30 yan) Boresight dönüklük açıları ile test bölgesinde özel kalibrasyon uçuşlarıyla (%80 ileri, %60 yan) belirlenen Boresight dönüklük açılarının aynı değerlerde olduğu görülmüştür. Boresight parametrelerinin belirlenmesinde özel kalibrasyon uçuşların yapılması ve test bölgesinde yoğun ve sık yer kontrol noktaları ile sağlam blok oluşturulmasının sorgulanması gerekmektedir.
- Test alanında belirlenen GNSS kayıklık değerleri ile proje alanında belirlenen değerler arasında doğruluğu etkileyecek derecede farkların olduğu gözlenmiştir. GNSS kayıklık parametreleri proje bazlı değişkenlik göstermektedir. GNSS kayıklık parametrelerinin uçuş kolonlarının fazla uzun olması ve proje alanının büyük olması sebepleriyle liner bir değişim göstermemektedir.
- “Sıfır” çözümü hariç diğer çözümlerin IMU gözlemlerinin karesel ortalama hatası, GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ve dönüklüklerin ortalama standart sapması birbirine yakın çıkmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözümlerinde GNSS kayıklık parametrelerinde aynı değerler kullanılmış, Boresigt dönüklük açıları farklı yöntemlerle hesaplanmıştır. Her iki

çözümde de yatay yön X doğrultusunda 3 piksel, Y doğrultusunda piksel ve düşey yönde 17 piksel hata hesaplanmıştır.

- “DenboreGNSS” ve “Fark” çözümlerinde aynı veri seti kullanılarak farklı yöntemlerle GNSS kayıklık parametreleri ve Boresight dönüklük açıları hesaplanmıştır. Yöntemler farklı olsa bile aynı veri seti kullanıldığı için iki kalibrasyon değerleri de birbirine yakın çıkmıştır. Buna paralel olarak çözümlerin sonuçları birbirine yakın çıkmış ve her iki çözümde de yatay yönde piksel altı ve düşey yönde 15 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Proje” sahasında belirlenen GNSS kayıklık parametreleri ile diğer yöntemlerle belirlenen GNSS kayıklık parametreleri arasında kaydadeğer bir fark olduğu gözlenmiştir. Bunu paralel olarak “Proje” çözümünde bütün yönlerde diğer çözümlerden daha iyi sonuçlar hesaplanmıştır. “Proje” çözümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 7 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Sıfır” çözümü yatay yönde 1.5 piksel düşey yönde 9 piksel hata hesaplanmıştır.
- Sıfır çözümünün “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözümlerinden iyi çıkmasının sebebi proje alanında belirlenen GNSS kayıklığı z bileşeninin pozitif bir değer taşıması ve test alanında belirlenen GNSS kayıklık parametresi z bileşeninin negatif değerli olmasıdır.
- Doğrudan coğrafi konumlandırma sonucunda yatay yönde piksel altı doğruluk yakalanırken z yönünde meydana gelen 6 piksellik hatanın blok içerisinde GNSS kayıklığı değişikliğinin liner olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Blok yapısının büyük olması uçuş kolonlarının uzun olması söz konusu düşey hassasiyetini düşüren sebepler olarak sayılabilir.
- Doğrudan coğrafi konumlandırma tekniği kullanılacak ise öncelikle proje alanında küçük bir alanda en az 4 yer kontrol noktası olacak şekilde Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böyle bir imkân yoksa DenboreGNSS veya Fark yöntemlerine göre belirlenen değerlerin kullanılmasının doğruluğu arttıracığı tavsiye edilmektedir.

4.4.4 Farklı Yöntemlerle Belirlenen Boresight Dönüklük Açılarının Proje Alanında Birleştirilmiş Algılayıcı Yönelmesi Doğruluğuna Etkisi

- “Sıfır” çözümü hariç diğer çözümlerin IMU gözlemlerinin karesel ortalama hatası, GNSS gözlemlerinin karesel ortalama hatası ve dönüklüklerin ortalama standart sapması birbirine yakın çıkmıştır.
- “Ö.K.T.Ü.” ve “Denbore” çözümlerinde GNSS kayıklık parametrelerinde aynı değerler kullanılmış, Boresight dönüklük açıları farklı yöntemlerle hesaplanmıştır. Her iki çözümde de yatay yönde piksel altı düşey yönde ise 7 piksel hata hesaplanmıştır.
- “DenboreGNSS” ve “Fark” çözümlerinde aynı veri seti kullanılarak farklı yöntemlerle GNSS kayıklık parametreleri ve Boresight dönüklük açıları hesaplanmıştır. Yöntemler farklı olsa bile aynı veri seti kullanıldığı için iki kalibrasyon değerleri de birbirine yakın çıkmıştır. Buna paralel olarak çözümlerin sonuçları birbirine yakın çıkmış ve her iki çözümde de yatay yönde piksel altı ve düşey yönde 5 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Proje” sahasında belirlenen GNSS kayıklık parametreleri ile diğer yöntemlerle belirlenen GNSS kayıklık parametreleri arasında kaydadeğer bir fark olduğu gözlenmiştir. Bunu paralel olarak “Proje” çözümünde bütün yönlerde diğer çözümlerden daha iyi sonuçlar hesaplanmıştır. “Proje” çözümü yatay yönde piksel altı, düşey yönde 3 piksel doğruluk hesaplanmıştır.
- “Sıfır” çözümü yatay yönde piksel altı düşey yönde ise 4 piksel hata hesaplanmıştır.
- Proje alanının küçük bir bölgesinde belirlenen Boresight dönüklük açılarının ve GNSS kayıklık parametrelerinin kullanıldığı çözümün doğruluğu diğer çözümlerin doğruluklarına göre daha hassas olmuştur. En hassas ikinci çözüm ile arasında Z yönünde 2 kat fark olduğu gözlenmiştir.
- Birleştirilmiş algılayıcı yönelmesi yaklaşımında yatay yönde piksel altı doğruluğun tüm çözümlerde sağlandığı, “DenboreGNSS”, “Fark” ve “Proje” çözümünün en hassas çözümler olduğu gözlenmiştir. Düşey yönde “Proje” çözümünün diğer çözümlere göre daha hassas olmakla birlikte 3 piksel doğruluk yakaladığı gözlenmiştir.

Bunun sebebi yeteri kadar yer kontrol noktası olmadığı ve GNSS kayıklığı düşey bileşeninin proje içerisinde liner değişim göstermemesi olduğu değerlendirilmektedir.

- Birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi tekniği kullanılacak ise öncelikle proje alanında küçük bir alanda en az 4 yer kontrol noktası olacak şekilde Boresight dönüklük açıları ve GNSS kayıklık parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böyle bir imkân yoksa DenboreGNSS veya Fark yöntemlerine göre belirlenen değerlerin kullanılmasının doğruluğu arttıracığı tavsiye edilmektedir.

4.5 Tezden Elde Edilen Kazanımların Fotogrametrik Çalışmalara Etkisi

Bu bölümde tezden elde edilen bulguların güncel havai fotogrametri çalışmalarına katkısı ifade edilmiştir. Havai fotogrametri uygulamalarında kullanılan algılayıcı sistemler ile navigasyonel sistemler arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve bu belirlenen değerlerin değişim analizinin yapılması sistem doğruluğunu ve üretilen ürün doğruluğunu arttıracığı gözlenmiştir. Sistem kalibrasyon parametreleri olarak adlandırılan bu değerlerin belirlenmesinde özel bir kalibrasyon test sahası ve uçuşuna gerek olmadığı bunun yerine proje alanında yapılan standart fotogrametrik uçuşların kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen değerler sadece geniş formatlı dijital hava kameralarında değil navigasyonel sistemlerin kullanıldığı (GNSS ve IMU) tüm algılayıcı sistemlerde kullanılabilir. Taşıyıcı sistemler olarak adlandırılan uçak, helikopter, insansız hava aracı ve diğer sistemlerde de kullanım alanı bulacaktır.

- [1] C. Eisenhart, "Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument calibration systems", *Journal of Research, National Bureau of Standards*, 67C(2): 161-187, 1963.
- [2] F. Ackermann, "Operational rules and accuracy models for GPS-aerotriangulation," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(B3): 691-700, 1992.
- [3] K. P. Schwarz, M. A. Chapman, M. W. Cannon, ve P. Gong, "An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 59, No. 11, p. 1667-1674, 1993.
- [4] J. Škaloud, M. Cramer, ve K.P. Schwarz, "Exterior orientation by direct measurement of position and attitude," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 (B3): 125-130, 1996.
- [5] M. M. Mostafa, K. P. Schwarz, ve P. Gong, "A fully digital system for airborne mapping," In *KIS97 Proceedings, Banff, Canada, June* (pp. 3-6), 1997.
- [6] N. Haala, D. Stallmann ve M. Cramer, "Calibration of directly measured position and attitude by aerotriangulation of three-line airborne imagery," In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, part 3/1, pp. 23-30, 1998.
- [7] T. A. Clarke ve J. F. Fryer, "The development of camera calibration methods and models," *Photogrammetric Record*, 16(9): 51-66, 1998.
- [8] M. Cramer, "Direct geocoding - is aerial triangulation obsolete?," In *Photogrammetric Week*, Winchmann Verlag, Fritsch/Spiller eds., Heidelberg, Germany, 1999.
- [9] J. Skaloud, "Optimizing georeferencing of airborne survey system by INS/DGPS," Ph.D. Dissertation, Department of Geomatic Engineering, The University of Calgary, Canada, 1999.
- [10] E. Ahokas, R. Kuittinen, ve J. Jaakkola, "A System to control the spatial quality of analogue and digital aerial images," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.33,pp:45-52, 2000.
- [11] M. Cramer, D. Stallmann, ve N. Haala, "Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/1; PART 3), 198-205, 2000.
- [12] H. Burman, "Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS" (Doctoral dissertation, Institutionen för geodesi och fotogrammetri), 2000.

- [13] R. Alamús, A. Baron, ve J. Talaya, "Integrated sensor orientation at ICC, mathematical models and experiences," In Proceedings of the OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 2001.
- [14] M. Bäumker ve F. J. Heimes, "New calibration computing method for direct georeferencing of image and scanner data using the position and angular data of an hybrid inertial navigation system," In Proceedings of the OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 2001.
- [15] M. Cramer ve D. Stallmann, "On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry," In Proceedings of the OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 2001.
- [16] A. Habib ve T. Schenk, "Accuracy analysis of reconstructed points in object space from direct and indirect exterior orientation methods," In OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, 2001.
- [17] E. Kruck, "Combined IMU and sensor calibration with BINGO-F," In Proceedings OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Hannover, Germany, pp.1-3, 2001.
- [18] M. M. Mostafa, "Digital multi-sensor systems-calibration and performance analysis," In OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, Germany, 2001.
- [19] G. Forlani ve L. Pinto, "Integrated INS/DGPS systems: calibration and combined block adjustment," In Proceedings of the OEEPE Workshop: Integrated Sensor Orientation, Institute for Photogrammetry and Geoinformation, pp. 85-96, 2001.
- [20] M. Schmitz, G. Wübbena, A. Bagge, ve E. Kruck, "Benefit of rigorous modeling of GPS in combined AT/GPS/IMU-bundle block adjustment," In OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales/European Organization for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE), Hannover, 2001.
- [21] J. Vallet, "Handheld mobile mapping system for helicopter-based avalanche monitoring," In OEEPE workshop Integrated Sensor Orientation, Vol. 1, pp. 1-12, 2001.
- [22] K. Jacobsen, "Exterior orientation parameters," PERS, Dec. 2001, pp 1321 – 1332, 2001.
- [23] M. M. Mostafa, J. Hutton, ve E. Lithopoulos, "Airborne direct georeferencing of frame imagery: An error budget," In Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMS2001), 2001.
- [24] M. Mostafa, J. Hutton, ve B. Reid, "GPS/IMU products-the applanix approach," In Photogrammetric Week, Vol. 1, pp. 63-83, 2001.
- [25] M. Cramer, "On the use of direct georeferencing in airborne photogrammetry," Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur-und Vermessungswesen, Institut für Photogrammetrie, 2001.

- [26] S. Himle, "Sensor integration and data fusion in praxis," In: Fritsch/Spiller (eds.): Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 239-247, 2001.
- [27] M. Cramer, "Performance of GPS\inertial solutions in photogrammetry," In Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, 2001.
- [28] M. M. Mostafa, "Boresight calibration of integrated inertial/camera systems," In Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001), Banff, AB, Canada, pp. 5-8, 2001.
- [29] C. Heipke, K. Jacobsen ve H. Wegmann, "The OEEPE Test On integrated sensor orientation," In Proceedings of the OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 2002.
- [30] K. Jacobsen ve H. Wegmann, "Dependencies and problems of direct sensor orientation," In Proceedings of the OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 2002.
- [31] L. Pinto, G. Forlani, D. Passoni, "Experimental tests on the benefits of a more rigorous model in IMU/GPS system calibration," a National Research Program COFIN, Ministry of the University and Scientific Research of Italy, 2002.
- [32] A. Baron, W. Kornus, ve J. Talaya, "ICC experiences on Inertial/GPS sensor orientation," In ISPRS WG I/5 Workshop, Theory, Technology and Realities Inertial/GPS sensor orientation, 2003.
- [33] C. Heipke, K. Jacobsen, ve H. Wegmann, "Analysis of the results of the OEEPE test: Integrated Sensor Orientation," In OEEPE Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings, Editors, 2002.
- [34] C. Heipke, K. Jacobsen, H. Wegmann, Q. Andersen, ve B. Nilsen, "Test goals and test set up for the OEEPE test: Integrated Sensor Orientation," Integrated Sensor Orientation, OEEPE Official Publication, 2002.
- [35] M. M. Mostafa, "Quality control of direct georeferencing data," International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences, 34(1), pp. 142-147, 2002
- [36] H. Wegmann, "Image orientation by combined (A)AT with GPS and IMU," In: Proceedings of ISPRS Commission I Mid-term Symposium, Denver, Colorado, USA, 2002.
- [37] E. Honkavaara, E. Ahokas, J. Jaakkola, J. Hyypä, R. Ilves, ve J. Vilhomaa, "Investigation on system calibration of GPS/IMU and camera for direct georeferencing," Photogrammetric Computer Vision. Vol XXXIV, Part 3B. Proceedings of ISPRS Commission III symposium, Graz, Austria, pp. 1682-1750, 2002.
- [38] L. Pinto ve G. Forlani, "A single step calibration procedure for IMU/GPS in aerial photogrammetry," In Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III Symposium, Graz, Austria, 2002.

- [39] M. R. Mostafa, "Camera/IMU boresight calibration: New advance and performance analysis," Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Annual Meeting, Washington, DC, pp. 21-26, 2002.
- [40] K. Jacobsen, "Calibration aspects in direct georeferencing of frame imagery," International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences, 34(1), pp. 82-88, 2002.
- [41] M. Cramer ve D. Stallman, "System calibration for direct georeferencing," In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3A., pp. 79-84, 2002.
- [42] I. Colomina, "Modern sensor orientation technologies and procedures," Proceedings of OEEPE workshop Integrated Sensor Orientation in OEEPE, Official publication No. 43., pp. 59-72, 2002.
- [43] R. Schroth, "Direct georeferencing in practical applications," In: Proceedings of Workshop: Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS/Sensor Orientation, ISPRS WG I/5, Barcelona 2003, on CD- ROM, 5 p., 2003.
- [44] U. Tempelmann, L. Hinsken, ve U. Recke, "ADS40 calibration and verification process," in: Grün A., Kahmen H. (Eds.), Optical 3-D Measurement Techniques VI, pp. 48-54, 2003.
- [45] J. Skaloud ve P. Schaer, "Towards a more rigorous calibration," ISPRS International Workshop on Theory, Technology and Realities of Inertial/ GPS Sensor Orientation, Commission 1, WG I/5, Castelldefels, Spain, pp. 22-23, 2003.
- [46] M. Cramer, "Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation—recent test results," In Photogrammetric Week, Vol. 3, pp. 161-172, Stuttgart, Germany, 2003.
- [47] K. Jacobsen, "System calibration for direct and integrated sensor orientation," Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS/Sensor Orientation in Proceedings of ISPRS International Workshop Group I/5. Castelldefels, Spain (on CD), 2003.
- [48] E. Honkavara, "Calibration block structures for GPS/IMU camera system calibration," The Photogrammetric of Finland, Vol. 19, No. 2, pp. 3-15, 2003.
- [49] E. Honkavaara, R. Ilves, ve J. Jaakkola, "Practical results of GPS/IMU/camera system calibration," Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS/Sensor Orientation in Proceedings of ISPRS International Workshop Group I/5. Castelldefels, Spain (on CD), 2003.
- [50] H. Wegmann, C. Heipke, K. Jacobsen, ve I. Wegmann, "Direct sensor orientation based on GPS network solutions," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 35(B1), pp. 153-158, 2004.
- [51] D. C. Merchant, T. Schenk, A. Habib, ve T. Yoon, "USGS/OSU progress with digital camera in situ calibration methods," Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, TS WG II/1: Real Time Mapping Technologies, pp.19, 2004.
- [52] M. Cramer, "EuroSDR network on digital camera calibration," Report Phase I, 2004

- [53] E. Honkavaara, "In-flight camera calibration for direct georeferencing," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B1), pp. 166- 171, 2004.
- [54] M. Cramer, "Digital airborne cameras-status and future," In *Proceedings of ISPRS Hannover Workshop*, 2005.
- [55] J. Hutton ve M. Mostafa, "10 years of direct georeferencing for airborne photogrammetry," *GIS Business (Geobit)*, pp. 33-41, 2005.
- [56] N. Yastikli ve K. Jacobsen, "2005 influence of system calibration on direct sensor orientation," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 71 No 5, pp. 629-633, 2005.
- [57] E. Honkavaara, L. Markelin, R. Ilves, P. Savolainen, J. Vilhomaa, E. Ahokas, J. Jaakkola, ve H. Kaartinen, "In-flight performance evaluation of digital photogrammetric sensors," In *proceedings of ISPRS Hannover Workshop High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, P. 6, 2005.
- [58] V. Casella ve M. Franzini, "Experiences in GPS/IMU calibration. rigorous and independent cross-validation of results," *High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing in Proceedings of ISPRS Hannover Workshop*. Hannover, Germany (on CD), 2005.
- [59] M. Cramer, "EuroSDR: digital camera calibration and validation," *GeoInformatic*, 2(8), pp. 16-19, 2005.
- [60] J. Skaloud, "Reliability in direct georeferencing: An overview of the current approaches and possibilities," In *EuroSDR workshop EuroCOW on Calibration and Orientation*, Castelldefels, Spain, 2006.
- [61] M. J. Smith, K. Qtaishat, D. W. G. Park, ve A. Jamieson, "IMU and digital aerial camera misalignment calibration," *The Calibration and Orientation Workshop. A Workshop of the EuroSDR Commission 1 and the ISPRS working Group 1/3*. Spain, 2006.
- [62] E. Honkavaara, J. Jaakkola, K. Nurminen, E. Ahokas, ve L. Markelin, "Theoretical and empirical evaluation of geometric performance of multi-head large format photogrammetric sensors," *ISPRS Commission I symposium*, pages, 2006.
- [63] E. Honkavaara, J. Jaakkola, L. Markelin, J. Peltoniemi, E. Ahokas, ve S. Becker, "Complete photogrammetric system calibration and evaluation in the Sjökuulla test field–case study with DMC," In *Proceedings of EuroSDR Commission I and ISPRS Working Group 1/3 Workshop, EuroCOW*, 2006.
- [64] M. Franzini, "Independent and rigorous assessment of standard and refined methodologies for GPS/IMU system calibration in aerial photogrammetry," *Geodesy and Geomatics XVIII cycle*, Politecnico di Milano, 123p, 2006
- [65] M. Cramer, "Calibration and validation of digital airborne cameras," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(B1), unpaginated CDROM, 6 p, 2006.

- [66] V. Casella, R. Galetto, ve M. Franzini, "An Italian project on the evaluation of direct georeferencing in photogrammetry," Proceedings Eurocow, 2006.
- [67] G. Stensaas, G. Y. Lee, ve J. Christopherson, "The USGS plan for quality assurance of digital aerial imagery," submitted for publication in PE&RS, under current review process, 2006.
- [68] G. Stensaas, "US geological survey digital aerial mapping camera certification and quality assurance plan for digital imagery," In Photogrammetric week, Vol. 7, pp. 107-116, 2007.
- [69] N. Yastikli, C. Toth, ve D.A. Grejner-Brzezinska, "In-situ camera and boresight calibration with LiDAR data." In Proc. The Fifth International Symposium on Mobile Mapping Technology, MMT, Vol. 7, 2007.
- [70] J. Skaloud, "Reliability of direct georeferencing-beyond the Achilles' heel of modern airborne mapping," In Photogrammetric Week, pp. 227-241, 2007.
- [71] M. Cramer, "European digital airborne camera certification-EuroDAC, 2007.
- [72] F. Kurz, R. Müller, P. Reinartz, ve M. Schoeder, "Calibration of a wide-angle digital camera system for near real time scenarios," ISPRS Hannover Workshop, 2007.
- [73] E. Honkavaara, "Calibrating digital photogrammetric airborne imaging systems using a test field," Publications of the Finnish Geodetic Institute. Ph.D. Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2008.
- [74] K. S. Qtaishat, M. J. Smith, ve D. W. G. Park, "Direct georeferencing and ultracamD misalignment calibration," ASPRS conference, Portland, USA, 2008.
- [75] E. Honkavaara, J. Peltoniemi, E. Ahokas, R. Kuittinen, J. Hyyppä, J. Jaakkola, ve J. Suomalainen, "A permanent test field for digital photogrammetric systems" Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 74(1), pp. 95-106, 2008.
- [76] M. Cramer, "The EuroSDR approach on digital airborne camera calibration and certification," International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, pp. 1753-1758, 2008.
- [77] K. S. Qtaishat, M. J. Smith ve D. W. G. Park, "The interior and exterior calibration for ultracam D," the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 37, pp. 695-701, 2008.
- [78] E. Honkavaara, L. Markelin, E. Ahokas, R. Kuittinen, ve J. Peltoniemi, "Calibrating digital photogrammetric airborne imaging systems in a test field," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXVII. Part B1.Beijing, 2008.
- [79] G. Stensaas ve G. Lee, "Driving toward a worldwide acceptance procedure for digital airborne sensors," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B1), pp.561-566, 2008.
- [80] M. Cramer, "Digital camera calibration," Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2009.

- [81] M. Blázquez, I. Colomina, A. C. F. Gauss, ve P. M. Tecnologia, “On the role of self-calibration functions in integrated sensor orientation,” Proceedings of EuroCOW, Castelldefels, Spain, 2010.
- [82] M. Cramer, G. Grenzdörffer, ve E. Honkavaara, “In situ digital airborne camera validation and certification—The future standard,” In ISPRS Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, 2010.
- [83] K. S. Qtaishat, “Assessing the performance of different direct-georeferencing with large format digital cameras. Jordan Journal of Civil Engineering, 5(4), pp. 545-551, 2011.
- [84] R. Tang, “A rigorous and flexible calibration method for digital airborne camera systems,” International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39, B1, 2012.
- [85] R. Passini, K. Jacobsen, ve D. Day, “Accuracy and radiometric study on latest generation large format digital frame cameras,” In Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop Jacie, 2012.
- [86] D. C. Merchant, “Aerial camera metric calibration—history and status,” Proceedings of ASPRS 2012 Annual Conference, Sacramento, 2012.
- [87] D. C. Merchant, “ASPRS aerial camera system calibration guidelines,” Proceedings of ASPRS 2013 Annual Conference, Baltimore, 2013.
- [88] D. Day, ve F. Jennings, “Using open source datasets to perform imu lever arm calculations,” Proceedings of ASPRS 2013 Annual Conference, Baltimore, 2013.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. K. Abdullah, B. Bayram, ve D. Z. Şeker, “Historical development of digital photogrammetric aerial sensor calibration,” Feb-Fresenius Environmental Bulletin, 2021.
2. K. Abdullah, B. Bayram, ve D. Z. Şeker, “The analysis on the annual change of digital aerial camera’s IMUs boresight misalignment,” Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2021.

Projeler

1. Harita Genel Müdürlüğü ile Yıldız Teknik Üniversitesi arasında haritacılık alanında işbirliği protokolü kapsamında 12.04.2017 tarihinde imzalanan Fotogrametrik Dijital Geniş Formatlı Hava Kameralarında Kalibrasyon Parametrelerinin Zamansal Değişimin Analizi adlı proje.