



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLER İLE BİNA CEPHELERİNİN
TERMAL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ SAKALP

Tez Danışmanı

PROF. DR. ÖZGÜN AKÇAY

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLER İLE BİNA CEPHELERİNİN TERMAL
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ SAKALP

Tez Danışmanı

PROF. DR. ÖZGÜN AKÇAY

Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: FBA-2020-3306

ÇANAKKALE – 2022



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Deniz SAKALP tarafından Prof. Dr. Özgün AKÇAY yönetiminde hazırlanan ve 26/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Fotogrametrik Yöntemler ile Bina Cephelerinin Termal Analizi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Özgün AKÇAY

(Danışman)

Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

Dr. Öğr. Üyesi Emin Özgür AVŞAR

.....

.....

.....

Tez No : 10495955

Tez Savunma Tarihi : 26/08/2022

.....

DOÇ. DR. YENER PAZARCIK
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

.././20..

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Deniz SAKALP

20/07/2022

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarımı esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Özgün AKÇAY'a, çalışma için veri desteğini sağlayan Atay Mühendislik firma çalıŐanlarına, çalıŐmalarım sırasında bana her türlü kolaylığı sağlayan saygıdeğer Harita Teknikeri Halil İbrahim KAYABAŐI'na, motivasyon kaynağım olan kardeŐim Nehir SAKALP'e, benden sevgisini ve takdirini hiç eksik etmeyen halam İnci AYBEY'e ve hayatımın her evresinde bana destek olan anneme ve babama sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.”

Deniz SAKALP
anakkale, Temmuz 2022

ÖZET

FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLER İLE BİNA CEPHELERİNİN TERMAL ANALİZİ

Deniz Sakalp

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Özgün AKÇAY

26/08/2022, 61

Günümüzde insansız hava araçlarına termal kameraların entegre edilmesi ile nesnelerin yüzey sıcaklığı ve üç boyutlu geometrisi elde edilerek pek çok uygulamalara yarar sağlamaktadır. Başlangıçta kullanımı sadece askeri alanla sınırlanan insansız hava araçları düşük maliyet, hız ve tekrarlı uçuş kabiliyeti nedeniyle küçük alanlarda sıkça tercih edilmektedir. Yalıtım sistemlerinin arızaları, beklenmedik sıcaklık değişimlerini ve artan enerji tüketimini tetikleyen sonuç olarak cephe yapısını doğrudan etkileyen bir enerji akışına olanak tanır. Bu ısıl köprüler termal kameralar ile görüntülenerek bina ısı kaçaklarının kolayca belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Termal kameraların geniş kullanımına rağmen, dar görüş alanı ve mekansal çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle sınırlıdır. Çalışmada, bölgenin görünür ve termal görüntüleri insansız hava aracı ile elde edilerek inceleme için geleneksel olmayan bir yaklaşım benimsenmiştir. Sistem, İHA'ya monte edilen çoklu sensörlü kamera ile SfM algoritmasından oluşmaktadır. SfM algoritması sayesinde görünür ve termal nokta bulutlarından üç boyutlu modelin oluşturulması ile elde edilen fotogrametrik model aracılığıyla bina incelemenin ve yorumlamanın elverişli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İHA, Termal Kamera, Görüntü Füzyonu, SfM Algoritması

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF BUILDING FACADES WITH PHOTOGRAMMETRIC METHODS

Deniz SAKALP

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Geomatics Engineering

Advisor : Prof. Dr. Özgün AKÇAY

26/08/2022, 61

The integration thermal cameras of unmanned aerial vehicle utilize for varied applications by obtaining three-dimensional geometry and surface temperature. Unmanned aerial vehicles, which were originally limited to military use, are preferred in small spaces due to their low cost, speed and repetitive flight capability. Deteriorations of insulation systems make possible an energy flow that directly affects the façade structure as a result of unforeseen temperature changes and increased energy the integration with the thermal camera, UAV are enabling easy detection of building heat leaks. Although thermal images have been used in wide-range, is been limited due to low spatial resolution and narrow field of view. In this study, an unusual approach was used to explore the building by obtaining detectable visible and thermal images of the region with unmanned aerial vehicles. The system consist of a multi-sensor camera mounted on the UAV and SfM algorithm. It has been found that it is convenient to examine and interpret the building through the photogrammetric model obtained by creating a three-dimensional model from visible and rhermal point clouds thanks to SfM algorithm.

Keywords: UAV, Thermal Camera, Image Fusion, SfM Algorithm

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
BİRİNCİ BÖLÜM	
GİRİŞ	
1.1. Fotogrametrinin Tanımı, Matematiksel Modeli ve Sınıflandırılması.....	2
1.1.1 Yersel Fotogrametri.....	6
1.1.2 Hava Fotogrametrisi.....	7
1.2. İnsansız Hava Araçları.....	8
1.2.1 İHA'ların Yapısı, Özellikleri ve Sınıflandırılması.....	9
1.2.2 İHA Fotogrametrisi.....	12
1.3 Sayısal Görüntü ve Çoklu Sensörlü Kameralar.....	17
1.4 SfM Algoritması.....	20
1.5 Binalarda Enerji Verimliliği ve Isı Yalıtımı Standartları.....	22
İKİNCİ BÖLÜM	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	
2.1 İHA ve RGB Kamera Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	24
2.2 Fotogrametri ve Termal Kamera Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	25

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	28
MATERYAL YÖNTEM	
3.1 Çalışmanın Amacı.....	29
3.2 Çalışma Bölgesi.....	29
3.3 Kullanılan Donanımlar.....	29
3.4 Fotogrametrik Değerlendirmede Kullanılan Program.....	31
3.5. Veri Kazanımı.....	31
3.6. Veri İşleme.....	33
3.7. Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi.....	35
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	37
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1 RGB Yoğun Nokta Bulutu, Katı Modeli ve Ortofoto Üretimi.....	37
4.2. Termografik Mozaik Üretimi.....	42
4.3 RGB-TIR Katı Modeli ve Ortofoto Üretimi.....	44
4.4 Doğruluk Analizi.....	48
BEŞİNCİ BÖLÜM	50
SONUÇ ve ÖNERİLER	
KAYNAKÇA	55
EKLER	I
EK 1. RGB ORTOFOTO ÜRETİM RAPORU.....	I
EK 2. TERMAL ORTOFOTO ÜRETİM RAPORU.....	V
EK.3 RGB-TERMAL ORTOFOTO ÜRETİM RAPORU.....	IX
ÖZGEÇMİŞ	XIII

SİMGELER VE KISALTMALAR

İHA	İnsansız Hava Aracı
SfM	Structure from Motion
m ²	Metrekare
YÖA	Yer Örnekleme Aralığı
TIR	Thermal Infrared
g	Gram
%	Yüzde oranı
RGB	Red Green Blue
O	İzdüşüm Merkezi
ω, ϕ, κ	Dönüklük Matrisi
P	Koordinat sistemindeki bir nokta
x_0, y_0	Ana nokta koordinatları
c	Odak uzaklığı
Δf	Sapma değeri
GPS	Global positioning system
IMU	Inertial Measurement Unit
EMS	Elektromanyetik Spektrum
λ	Dalga boyu
f	Frekans
E	Enerji
FPA	Focal plane arrays
3B	Üç Boyutlu
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
MVS	Multi-view stereopsis
CBS	Coğrafi bilgi sistemleri
m	Metre
cm	Santimetre
pix	Piksel birimi

TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1.1	İHA sistemleri talimatı mevzuatında İHA'ların sınıflandırılması	11
Tablo 1.2	İHA fotogrametrisi iş akışı	14
Tablo 1.3	Görünür veri kazanımı için kullanılan RGB sensörün özellikleri	30
Tablo 1.4	Termal veri kazanımı için kullanılan termal sensörün özellikleri	31
Tablo 1.5	Uçuş planına dair birtakım bilgiler	39
Tablo 1.6	RGB kameranın kalibrasyon korelasyon matrisi	40
Tablo 1.7	Nokta bulutlarının birleştirilmesine dair bazı parametreler	46
Tablo 1.8	RGB kameranın korelasyon matrisi	48
Tablo 1.9	Termal kameranın korelasyon matrisi	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1.1	Merkezi izdüşüm pozitif konum	3
Şekil 1.2	Merkezi izdüşüm negatif konum	4
Şekil 1.3	Fotogrametrinin matematiksel modeli	4
Şekil 1.4	Hava fotogrametrisi örneği	8
Şekil 1.5	Sabit kanatlı İHA örneği	10
Şekil 1.6	Döner kanatlı İHA örneği	11
Şekil 1.7	Demet dengelemesinin temel ilkesi	16
Şekil 1.8	Elektromanyetik spektrumun dalga boyları	18
Şekil 1.9	Ekran kartının termal kamera ile çekilmiş görüntüsü	19
Şekil 1.10	SfM algoritması işlem adımları	20
Şekil 1.11	Türkiye’de enerjinin sektörlere göre tüketim oranları	22
Şekil 1.12	A) Gölbaşı ilçesinde yer alan binanın uydu görüntüsünde ki yeri B) Binanın güney cephesinden çekilmiş görüntüsü	29
Şekil 1.13	DJI Phantom 4 RTK İnsansız Hava Aracı	30
Şekil 1.14	Yuneec E10Tvx Çoklu Sensörlü Kamera	30
Şekil 1.15	Yuneec E10Tvx kamerası ile kazanılmış yüksek bindirmeli oblik çekilmiş RGB görüntü örneği	32
Şekil 1.16	Yuneec E10Tvx kamerası ile kazanılmış RGB ve termal görüntü örneği	33
Şekil 1.17	RGB seyrek nokta bulutu	34
Şekil 1.18	Termal seyrek nokta bulutu	34
Şekil 1.19	Önerilen metodoloji için işlem adımları	35
Şekil 1.20	%80 bindirme oranlı çekilmiş örtüşen RGB görüntüler	37
Şekil 1.21	Kamera konumlarının nesne üzerinde yer alan konumları	38

Şekil 1.22	Kamera konumları ve yaklaşık hata değerleri	38
Şekil 1.23	Yunec E10Tvx kamerasının vektörel konum hataları	39
Şekil 1.24	Üretilen sayısal yükseklik modeli	41
	A) RGB yoğun nokta bulutu önden görünüm	
Şekil 1.25	B) RGB yoğun nokta bulutu kuzey-batı açısından görünümü	42
	C) RGB yoğun nokta bulutu güney-doğu görünümü	
Şekil 1.26	RGB Ortofoto	42
Şekil 1.27	Bir termal görüntü örneğinde bağlantı noktalarının gösterimi	42
Şekil 1.28	Termografik yoğun nokta bulutu	43
Şekil 1.29	Termografik üç boyutlu katı modeli	43
Şekil 1.30	Termografik ortomozaik	44
Şekil 1.31	RGB katı modeli üzerinde işaretlenen nokta konumlarının gösterimi	45
Şekil 1.32	Termal katı modeli üzerinde işaretlenen nokta konumlarının gösterimi	45
Şekil 1.33	Birleştirilmiş katı modelin farklı açıları	46
Şekil 1.34	Birleştirilmiş sayısal yükseklik modeli (SYM) ve ortofoto	47
Şekil 1.35	RGB-Termal üç boyutlu modelin batı cephesi	51
Şekil 1.36	Termal üç boyutlu katı modelin güneybatı cephesi	52
Şekil 1.37	Termal katı modelin bozuk yönleri	53
Şekil 1.38	Aynı açıdan iki farklı modelin karşılaştırılması	53

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkenin nüfus miktarına oranla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Bu durum binalardaki enerji kullanımının ve verimliliğinin önemini arz etmektedir. Ülkemizde tüketilen enerjinin yaklaşık yüzde on beşinin binalarda kullanıldığı belirtilmektedir (İMO, 2015). Enerjinin en çok tüketildiği alanlardan biri olan yapılarda enerji tasarrufunu sağlayabilmek için ısı yalıtımı yapılmalıdır. Binalarda enerji verimliliğinin artırılması için yalıtım kalitesi geliştirilmelidir. Binalarda ısı yalıtımı TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı'na uygun olarak hesaplanmalı ve yalıtımı doğru bir şekilde yapılmalıdır. Son yıllarda, sürdürülebilir enerji kavramının dikkatleri çekmesiyle birlikte binaların enerji verimliliğini arttırmak için bir bina ısı gözlem teknolojisi gereklidir. Binanın yüzey sıcaklıkları termal görüntüler kullanılarak elde edilebilir ve binanın ısı performansını üç boyutlu görselleştirme ile belirlenebilir. Termal görüntüleme, binalardaki ısı sızıntılarını, yüzey nemini ve yapısal sorunları tespit etmek için basit ve etkili bir yaklaşımdır. Termal kamera, insan gözü ile tespit edilemeyecek ve dijital kameralarla belirlenemeyecek bilgilerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu özelliği ile bina yorumlama, mekaniksel ve elektriksel bakım, yangın saptama, tıp gibi pek çok alanda kullanıma sahiptir (Rakha ve Gorodetsky, 2018). Ek olarak, insansız hava aracı ile nesnenin çoklu sensörlü verisinin elde edilmesi uzaktan algılama ve yakın resim fotogrametrisi için büyük bir potansiyele sahiptir.

Termal görüntüler çeşitli analizlere sağlayacağı katkılar ile değerlidir ancak kayıt ve üç boyutlu modelleme için eşleştirilmesi zordur. Bu nedenle İHA temelli termal görüntüleme ve uzaktan algılama uygulamaları kısıtlanmıştır (Gade ve Moeslund, 2014). Çoklu sensörlü kamera ile insansız hava aracı, dijital bina modelleri oluşturmak için fotogrametri ve ısı üretmek için termal görüntüleme kullanarak elde ettiği bina bilgisi ile bina sürdürülebilirliğine katkı sağlar (Han ve Huh, 2019). Görüntü temelli dokülandırma teknikleri kullanılarak İHA ile elde edilen görüntülerin işlenmesi sonucu iki boyutlu görüntülere kıyasla görselleştirmeyi arttıran yüksek çözünürlüklü üç boyutlu yoğun nokta bulutu üretilebilir (Javadnejad vd., 2020). Bu yöntemin avantajlı olmasının nedenlerinden biri, RGB görüntülerin termal görüntülerden çok daha yüksek spektral çözünürlüğe sahip olması nedeniyle üç boyutlu model üretmek için Structure from Motion (SfM) tekniğinin kullanılmasıdır. SfM, metrik olmayan ticari sınıf kameralar ile yeterli oranda bindirilmiş

resimlerden yüksek çözünürlüklü haritalama ürünlerinin (nokta bulutları ve ortofotolar gibi) elde edilmesinde geniş ölçekte kullanımını sağlayan nispeten yeni bir fotogrametrik yaklaşımdır (Javadnejad vd., 2020). Binanın termal görüntülerle dokulandırılmış RGB yoğun nokta bulutunun üretilebilmesi için termal ve RGB kameranın odak uzaklığı ve sensör boyutu gibi geometrik koşullar sağlanmalıdır. Bunun yanı sıra uçuşun gerçekleştirildiği hava koşulları, uçuş yüksekliği ve iyi bir görüntü eşleme için bir binanın tüm cephelerinin yüksek bindirmeli olarak çekilmesi hususu da önem taşımaktadır. Termal görüntülerin düşük çözünürlüklü olması ve yüksek gürültü içermesi nedeniyle doğrudan özellik saptama ve görüntü eşleme tekniklerinin uygulanması durumunda üç boyutlu model üretimi için yeterli eşlenik nokta üretilemez. Bu durum, termal görüntülerin görüntü kaydını ve üç boyutlu nokta bulutu üretimini zorlaştırmaktadır. Eşlenmiş görüntü çiftlerini arttırmak için termal ve görünür görüntüler ile görüntü füzyonu gerçekleştirilmelidir. Görünür görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutu termal mozaik ile dokulandırılarak üç boyutlu füzyonu gerçekleştirilmiş model kayıt edilebilir.

Bu çalışmada, bina cephe sistemlerindeki ısı köprülerini hızlı bir şekilde tanımlamak için kızılötesi termografi ve insansız hava aracı kullanılarak bir binayı incelemek için geleneksel olmayan bir yaklaşım benimsenmiştir. Sistem, insansız hava aracına monte edilen ve insansız hava aracından çalıştırılan çoklu sensörlü kameradan oluşur. Oluşturulan model mevcut bina enerji performansının hızlı bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır.

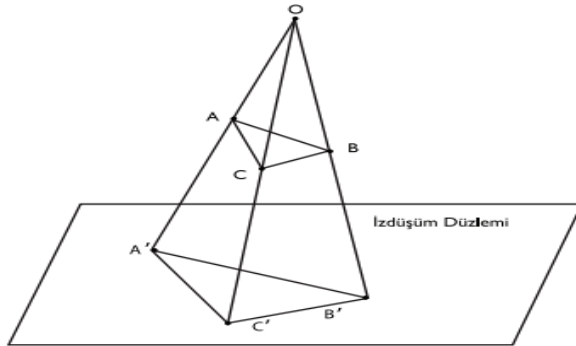
1.1. Fotogrametri

Fotogrametri kelime kökeni bakımından ışık yardımı ile çizerek ölçmek anlamına gelmektedir. Fotogrametri tekniği ile ölçülmek istenen objenin ve yakın çevresinin görüntüleri üzerinde özel donanım ve yazılımlar kullanılarak ölçülen değerler, harita veya plan biçimine dönüştürülmektedir. Yayılmakta olan elektromanyetik enerjinin tespit edilmesi ve analiziyle birlikte nesne ve çevresi hakkında fiziksel temas etmeksizin metrik bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Fotogrametrinin temel amacı cisimlerin metrik bilgilerini fotoğraflar yardımıyla elde etmektir. Fotogrametri yöntemi pek çok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan ilki, fotogrametri tekniği ile görüntüler üzerinde çalışmak yersel yöntemlere oranla daha kolay, hızlı ve ekonomiktir. Ölçülmesi ve ulaşılması güç olan nesnelerin ölçülmesine imkan sağlamaktadır. Fiziksel bir temas olmaksızın yapıldığından

nesnelere zarar verme riski ortadan kaldırılmaktadır. Son olarak, her zaman fotoğraflar üzerinde tekrarlı ölçme yapmayı mümkün kılmaktadır. Bu sebeplerle fotogrametri, yersel yöntemler yerine tercih edilebilir avantajlı bir yöntemdir. Fotogrametri tekniği ile konum bilgileri içeren haritalar, topoğrafik haritalar ve ortofoto gibi tematik haritalar üretmek mümkündür. Fotogrametrinin uygulama alanları arasında jeoloji, ormancılık, tarım, kent planlaması, mimarlık ve çelik ile gemi yapımı enstitüleri sayılabilmektedir.

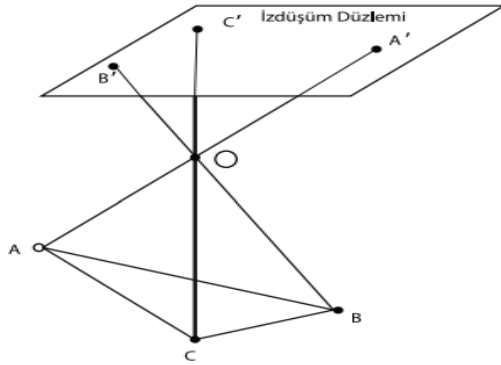
Fotogrametri, fotoğraf çekim noktasına göre iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Hava fotogrametrisi, bir insansız hava aracına entegre edilen kamera ile çekilmiş görüntülerin kullanıldığı fotogrametri uygulamalarıdır. Uçak, helikopter ve insansız hava aracı gibi vasıtalara entegre edilen kameralar ile yeryüzünden alınan resimler kullanılarak yapılan fotogrametri yöntemidir. Buradan elde edilen modeller ile ortofoto üretimi çok yaygın bir uygulamadır (Yılmaz vd., 2018). Yersel fotogrametri ise, fotoğraf çekim noktasının yeryüzünde bir noktadan çekilmiş görüntülerle çalışılan tekniktir. Yakın resim fotogrametrisi olarak bilinen bu fotogrametri yöntemi çok hassas üç boyutlu model oluşturmak için sıklıkla kullanılır (Mohammed ve Yakar, 2016).

Fotogrametrinin geometrik modeli, kamera optik sistemi tarafından görüntünün oluşturulması, matematiksel bakımdan merkezi izdüşümle modellenir (Yılmaztürk ve Terzi, 2018). Merkezi izdüşüm doğrusallık koşuluna dayanmaktadır. Kolinearite (doğrusallık) koşuluna göre, üç boyutlu uzaydaki noktaların izdüşüm düzlemi dışındaki bir O izdüşüm merkezinden geçerek izdüşüm düzlemini deldiği noktalar, o noktaların merkezi izdüşümüdür (Şekil 1.1).



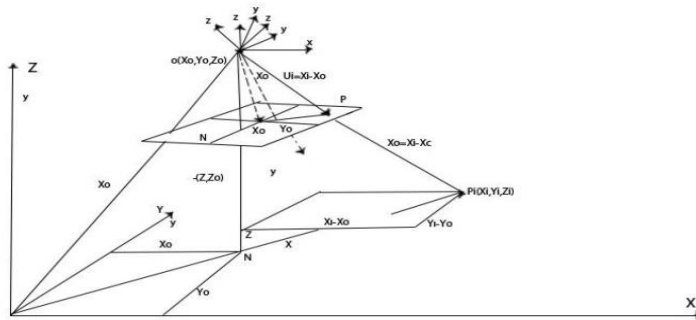
Şekil 1.1 Merkezi izdüşüm pozitif konum (Kraus, 1997)

Fotoğraf, merkezi bir izdüşümdür. O izdüşüm merkezi, kamera optik sisteminin merkezidir ve tüm izdüşüm ışınları bu noktadan geçer. Geometrik olarak bir harita ile düşey bir hava fotoğrafı arasında en önemli fark, farklı izdüşüm sonucu oluşmalarıdır (Yaşayan vd., 2011). Merkezi izdüşüm negatif konum Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2 Merkezi izdüşüm negatif konum (Kraus, 1997)

Kolinearite eşitliğinde, cisim uzayındaki ışınlar, resim çekme makinesinin izdüşüm merkezinden gerçek resim düzlemine bir doğru boyunca izdüşürülür. Böylece, resmin yeniden oluşturulması iki adımda gerçekleştirilebilir. İlk adım, resim çekme makinesinin iç yönlendirme parametrelerinin (ana nokta uzunluğu ve ana nokta koordinatları) belirlenmesidir. İkinci adım ise dış yönlendirme adıdır. Burada X_0 , Y_0 , Z_0 koordinatlarından ω , ϕ , κ dönüklük değerleri ile resimlerin cisim uzay koordinat sistemindeki koordinatların hesaplanması amaçlanmaktadır (Duran, 2003).



Şekil 1.3 Fotogrametrinin matematiksel modeli (Kraus, 1997)

Resim koordinat sisteminde P noktasının konum vektörü;

$$P = \begin{vmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ 0 - c \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

olur. Burada x_0, y_0 ana nokta koordinatları, c ise kalibre edilmiş odak uzaklığını ifade etmektedir.

Resim çekme makinesi sonsuza odaklanmadıkça ana nokta uzaklığı, odak uzaklığına eşit değildir. Bu durumda ana nokta uzunluk değeri, odak uzaklığından Δf kadar sapma değerine sahiptir.

$$c = f + \Delta f \quad (1.2)$$

Cisim uzay koordinat sisteminde P noktasının konum vektörü,

$$P = \begin{vmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{vmatrix} \quad (1.3)$$

olur. Kolinearite eşitliğine göre p ve P cisim vektörleri arasındaki matematiksel bağıntı,

$$P = k.D.p \quad (1.4)$$

$$\begin{vmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ 0 - c \end{vmatrix} = k.D. \begin{vmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada k ölçek faktörü olup,

$$k = \frac{p}{P} \quad (1.6)$$

olarak ifade edilir.

Resim koordinatlarının bilinen değerler olması durumunda cisim koordinatları,

$$k = \frac{1}{k} \cdot D^T \cdot p \quad (1.7)$$

$$\begin{bmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ 0 - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ D^T \\ k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Olarak ifade edilir.

K ölçek faktörünün kolinearite eşitliklerinde her bir ışın için ayrı ayrı belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda oluşan matematiksel ifadelerden k ölçek faktörü yok edilirse;

$$f_1 = x - x_0 + c \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} \quad (1.9)$$

$$f_2 = y - y_0 + c \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} \quad (1.10)$$

Matematiksel ifadeleri elde edilir (Külür, 2002)

Fotogrametri, fotoğraf çekim noktasına göre hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametri olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

1.1.1. Yersel Fotogrametri

Yakın resim fotogrametrisi veya yakın mesafe fotogrametrisi olarak bilinen bu

fotogrametri yöntemi çok hassas üç boyutlu model oluşturmak için sıklıkla kullanılır (Mohammed ve Yakar, 2016). Genellikle kamera ile modeli oluşturulacak obje arasında en fazla 300 metre bulunur. Kameranın yeryüzünde veya yeryüzüne yakın olması durumlarında uygulanan fotogrametri tekniği yersel fotogrametridir. Yersel fotogrametrinin çok geniş kullanım alanları vardır. Bu alanlar arasında, arkeoloji, mimarlık, endüstri, madencilik, tıp, kent planlaması, etüd-proje ve uçak ile gemi enstitüleri sayılabilir. Ancak büyük ölçekli uygulamaların haritalarının yapımı söz konusu olduğunda hava fotogrametrisi daha ekonomik ve hızlıdır. Buna rağmen, yersel fotogrametri harita yapımında ancak belirli koşulların mevcut olması ile uygulanabilir. İlk olarak, arazide fotoğraf çekimine uygun ve araziye egemen noktalar bulunması gereklidir. İkinci olarak, arazinin açık olması ya da bitki örtüsünün seyrek olması beklenilmektedir.

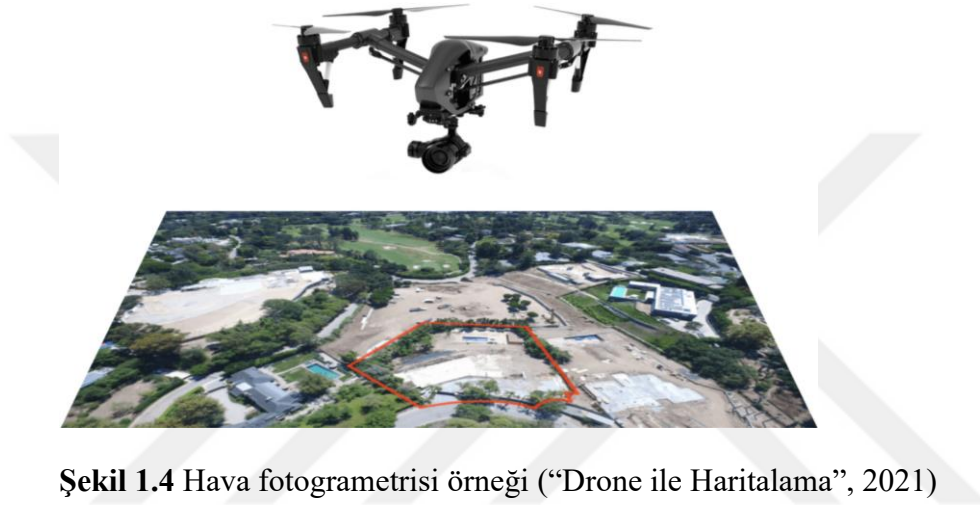
Yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulan uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Hava fotogrametrisi ile karşılaştırıldığında, geniş alanlarda fotoğraf çekmenin ve gerekli ölçmelerin yapmanın güçlüğü nedeniyle tercih edilmez. Buna karşın hava fotogrametrisinin çalışmadığı, ekonomik olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Bir diğer husus da yersel fotogrametri ile hareketli nesnelere ölçülemez.

1.1.2. Hava Fotogrametrisi

Hava fotogrametrisi uçak, helikopter ve insansız hava araçları gibi unsurlara sabitlenen kameralar ile yeryüzünden alınan fotoğraflar aracılığı ile fotogrametrik ürünlerin elde edildiği yöntemdir. Büyük çaplı projelerde, zamandan ve veri boyutundan tasarruf edildiği için en sık kullanılan yöntemdir (Yılmaz vd., 2018).

Başlangıçta yerden çekilen resimler yardımıyla klasik jeodezik problemler için değişik bir yaklaşım sunan fotogrametri, günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte hava fotogrametrisinin gelişmesi sayesinde görüntü alanının büyümesi ve sabit bir resim ölçeğinin sağlamış olduğu yararlar ile harita ve planların elde edilmesinde tercih edilebilir bir yöntem haline gelmiştir. Çünkü hava fotogrametrisi ekonomi, hız ve hassasiyet sağlamıştır. Hava fotogrametrisi yöntemi harita üretimi gibi haritacılık uygulamalarında standart haline gelmiş bir tekniktir. Büyük boyuttaki alanların her türlü harita ve planlarının üretiminde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak hava fotoğrafları sadece harita üretimi için kullanılmaz. Örneğin, bitki örtüsü hakkında bilgi toplamak, yangın izleme, tarihi yapıların

dokümantasyonu ve deformasyon ölçümleri gibi amaçlarla fotoğraf çekilebilir. Görüntü alımı gerçekleştirilecek alana ait uçuşun yönü, doğrultusu ve konumu, rüzgar yönü ve etkisi göz önüne alınarak hazırlanan uçuş planı ile kamera ve tipi belirlenir. Günümüzde yeni nesil kameralarda yer alan GPS/IMU sistemi ile yer kontrol noktası tesis ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. İstenilen hassasiyet oranına bağlı olarak yer kontrol noktalarının tesis edilip edilmeyeceğine karar verilir.



Şekil 1.4 Hava fotogrametrisi örneği (“Drone ile Haritalama”, 2021)

1.2. İnsansız Hava Araçları

İHA için bugüne dek pek çok tanım ve sınıflandırma kabul edilmiştir. İrtifa, ağırlık, boyut, taşıma kapasitesi, uçuş süresi ve menzili, gövde yapısı, yakıt türü, içerdiği donanım ve kullanım alanları gibi parametreler bu konuda etkin rol oynamıştır (Akgül vd., 2016). İnsansız hava araçları (İHA), temelde uzaktan kumanda aracılığıyla kontrol edilebilen tam, yarı otomatik şekilde veya manuel olarak çalıştırılarak çeşitli yüksekliklerde uçuş olanağı ile taşıdığı yükler sayesinde veri toplayan hava araçlarıdır. Standart havadan veri toplama sistemleri (hava lazer tarama ve hava fotogrametrisi vb.), yüksek maliyetleri ve düşük zamansal çözünürlükleri nedeniyle mekansal veri ihtiyaçlarına cevap verememektedir.

Ancak İHA sistemleri, hassas ve detaylı harita bilgisine ihtiyaç duyan birçok meslek disiplinine başarılı bir şekilde veri üretmesinin yanı sıra hava aracı ve üzerinde taşıdığı çeşitli algılayıcı, konum verisi, iletişim bileşenleri sayesinde arkeoloji, kültürel mirasın

belgelenmesi, büyük ölçekli harita yapımı ve afet yönetimi gibi pek çok alanda faaliyet göstermektedir.

1.2.1 İHA'ların Yapısı, Özellikleri ve Sınıflandırılması

İHA sistemleri, kullanıcılara sağladıkları birçok avantaj nedeniyle çeşitli fotogrametri uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. İHA'lar çeşitli yeryüzü gözlemleri için kullanıcılara; kısa bir zaman diliminde ve yüksek zamansal çözünürlükte uygulanabilen ekonomik çözümler sunmaktadır (Yang ve Chen, 2015). İHA'lar düşük irtifa uçuş olanağı sayesinde bir desimetrenin altında uzamsal çözünürlükte görüntüler elde edilebilmesinin yanı sıra gözlenen unsurların geometrik detayları da yüksek hassasiyette belirlenebilmektedir. İHA sistemlerinin uçuş, taşıma kapasitesi ve beklenen doğruluğa bağlı olarak üzerine entegre edilebilecek teknolojilerde mevcuttur. Örneğin, İHA sistemlerinin kullanılacağı uygulama türü ve amacına bağlı olarak tercih edilebilecek modelin yanı sıra çeşitli özellik donanımlarına da sahip olmasına dikkat edilmektedir. Yeni nesil insansız hava araçlarının RTK/PPK (Real Time Kinematics/ Post-Processed Kinematics) sistemlerine sahip olması sayesinde fotogrametrik açıdan zorlu koşullarda bile santimetre hassasiyetinde sonuç ürünlerinin elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Gerçek zamanlı kinematik uydu navigasyonu sayesinde santimetre hassasiyetinde oldukça hassas ve hızlı bir şekilde üç boyutlu haritalama ürünleri elde edilebilmektedir. Yüksek hassasiyette konumlandırma modülü olan RTK donanımına ek olarak, İHA seçiminde mevcut kamera donanımıyla uyumlu olmasına dayanılarak kamera seçimine dikkat edilmektedir. Dijital kamera opsiyonları, GPS/IMU (Inertial Measurement Unit) ve otopilot sistemleri ile desteklenen bir İHA sistemi ile veri toplama, genellikle çok yüksek çözünürlükte fotogrametrik görüntü alımını ifade etmektedir. Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında alçak irtifadaki kullanım kolaylığı ile fotogrametri, uzaktan algılama gibi yöntemlerin küçük ölçekli projelerinde maliyete oranla ekonomik, hızlı ve pratik olması sebebiyle İHA bileşenini bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır (Cao vd., 2019). İHA platformunun taşıma kapasitesine dayanılarak birçok çeşitli algılayıcı sensör entegre edilmektedir. Bu kamera sensörleri, uygulama amacına bağlı olarak termal, multispektral veya gri tonlu görüntülerin elde edilmesini sağlayabilmektedir.

İHA'lar havada kalma süresine ve veri toplama biçimine göre de çeşitli sınıflara ayrılrsa da en yaygın olarak çalışma prensiplerine ve gövde tiplerine göre döner kanatlı İHA, sabit kanatlı İHA, çırpın kanatlı İHA ve keşif balonları ve hibrit veya değiştirebilir tasarımlar olmak üzere beş sınıfa ayrılmaktadır.

Sabit kanatlı İHA'ların hava sürtünmesini azaltmaları için ince kanatları sahiptir ve havada hızlanabilmesi için içten yanmalı motoru veya elektrik motoru vardır. Kontrol yüzeyinde bulunan elemanlardan asansör denilen ve yükseklik belirleyici olan araç yanal eksen kontrolünü, kanatçıklar denilen ve dolaşmada görevli araç boyuna eksen kontrolünü, dümen denilen ve rotayı kontrol eden araç ise düşey eksen kontrol eder (Eisenbeiß, 2009). Sabit kanatlı İHA'lar sahip oldukları bakım ve onarımın kolay olması sebebiyle hızlı uçuş sağlar ve böylelikle geniş alanlar kolaylıkla ölçülebilmektedir. Ek olarak, sahip oldukları uçuş karakteristikleri sayesinde yüklü sensörleri az güç ile uzun mesafelerde taşıma avantajına sahiptir. Ancak kalkış pisti veya fırlatıcıya sahip olmaması ve rüzgarlı havalarda dengeli hareket edememesi dezavantajları arasındadır.



Şekil 1.5 Sabit kanatlı İHA örneği (“Sabit Kanatlı İHA”, 2020)

Döner kanatlı İHA'ların en büyük avantajı, kalkış ve inişini düşey olarak gerçekleştirdiğinden herhangi bir platforma ihtiyaç duymamasıdır. Ek olarak, zemin üzerinde kalabilme ve yüksek manevra kabiliyetine sahiptirler. Dezavantajı ise, kompleks mekanik ve elektronik yapıya sahip olması nedeniyle karmaşık bakım ve onarımının olmasıdır (Gençerk, 2016). Ayrıca, hareket kabiliyetinin zayıf ve uçuş mesafesini kısa olması nedeniyle zaman ve maliyeti arttırmaktadır.



Şekil 1.6 Döner kanatlı İHA örneği (“Döner Kanatlı İHA”, 2018)

Ülkemizde, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından Sivil Havacılık Kanunu’na dayanılarak Türk hava sahasında işletilecek veya kullanılacak sivil İHA sistemlerinin ithali, satışı ve tescili, uçuşa uygunluğunun sağlanması, sistemleri kullanacak kişilerin sağlaması gereken koşullar, hava trafik kontrolleri ve İHA operasyonlarına ilişkin esas ve usulleri belirlemek amacıyla İHA sistemleri talimatı mevzuatı yayınlanmıştır. Bu talimatta İHA’lar kalkış ağırlıklarına göre İHA0, İHA1, İHA2 ve İHA3 olarak dört ayrı sınıfa (Tablo 1.1) ayrılmışlardır (“İnsansız hava aracı sistemleri talimatı”, 2022)

Tablo 1.1 İHA sistemleri talimatı mevzuatında İHA’ların sınıflandırılması

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

İnsansız hava araçları büyük ölçekli harita yapımı, arkeolojik alanların belgelenmesi, tarımsal uygulamalar ve afet yönetimi gibi uygulamalarda İHA Sistemleri Talimatı mevzuatına göre çoğunlukla İHA0 ve İHA1 grubu sistemler kullanılmaktadır.

İHA'lar alışlagelmiş tek veya belirli sayıdaki istasyondan veri kazanma tekniğinden farklı olarak çoklu konum ve açıdan uçuş yeteneğine bağlı olarak büyük esnekliğe sahiptirler (Aicardi vd., 2016). Fiziksel açıdan sunduğu esnekliklere karşın sert hava olaylarında veri kazanım sorunları yaşanmaktadır. Uçuş güvenliği bakımından bazı sorunların üstesinden gelebilmek ve hava koşullarına direnç gösterebilme noktasında İHA'ların aerodinamik ve aviyonik tasarımlarının iyileştirilmesi adına adımlar atılmıştır (Sefercik vd., 2018). Gelişen teknoloji ile birlikte artan çözümlere karşın İHA'ların uçuş süresi ve taşıma kapasitesi veri toplamayı kısıtlandırmıştır. İHA ile uçuş görevi ihtiyaç duyulan YÖA (yer örnekleme aralığı) ve entegre edilen dijital kameranın odak uzaklığı ve sensör boyutu gibi teknik özellikleri göz önüne alınarak özel bir yazılımla planlanmaktadır.

İHA ile elde edilen çözünürlüğü yüksek ve büyük boyutlardaki görüntülerin yoğun veri setlerini kısa zaman, harcanan emek tasarrufu ve yüksek hassasiyette nihai ürün elde edilmesini sağlamak için görüntü işleme ve bilgisayarlı görü (Computer vision) algoritmaları önem kazanmıştır. Son yıllarda, dijital fotogrametri çalışmalarında dijital kameraların entegre edildiği İHA'lar tarafından elde edilen görüntülerden üretilen verilerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır (Öztürk vd., 2017). Elde edilen sonuç ürüne odaklanıldığında fotogrametri ile İHA fotogrametrisi arasında farklar gözlenmemektedir. Ancak hesaplama metotları ve işlem adımları arasında belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu farklılıklar, fotogrametrinin olgunlaşmış geometrik, istatistiksel ve matematik temellere dayanması; İHA fotogrametrisinin ise bilgisayarlı görü alanında nesne tanıma, çok sık nokta bulutundan katı model oluşturma amaçlı görüntü işleme ve geometrik dönüşüm algoritmalarına ve modellerine dayanmasından kaynaklanmaktadır (Torun, 2017). Böylelikle, İHA'lardan elde edilen verileri işleme ve kullanma açısından çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir.

1.2.2 İHA Fotogrametrisi

İHA sistemlerinin ve görüntü işleme yazılımlarının hızlı gelişimi ile farklı uygulama örnekleri karşımıza çıkmaktadır. Bu uygulama örnekleri büyük ölçekli harita yapımı, ortofoto üretimi, arkeolojik alanların belgelenmesi, tarımsal uygulamalar, afet yönetimi ve bina yalıtımı izleme çalışmaları sayılabilir. İHA fotogrametrisinde iki boyutlu nokta bulutundan üç boyutlu model oluşturmak amacıyla görüntü eşleme metotları kullanılmaktadır. Görüntü eşleme algoritmaları temelde gerçek eşlenik noktaların aynı

epipolar çizgilerin üzerinde bulunması mantığına dayanmaktadır. Çoklu görüntülerin değerlendirilmesi büyük önem taşıdığından gelişmiş sayısal görüntü işleme (digital image matching) metotlarından yararlanılmaktadır. Sayısal görüntü işleme, en az haliyle kısmen aynı iki alanı kapsayan iki veya daha fazla dijital görüntüden elde edilen temel özellikler arasındaki ilişkinin (correspondence) otomatik olarak kurulmasıdır (Arslanbek, 2009). Görüntülerin eşleştirilmesi için, detay noktalarının (feature points) en iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Acar, 2012). İyi eşleştirilmiş görüntüler ile yüksek hassasiyette sayısal arazi ve yükseklik modelleri üretilebilmektedir. Dijital donanım ve yazılımlarda son dönem gelişmelerine bakıldığında çekilmiş fotoğrafların kıymetlendirilmeye elverişli olması, veri setlerinden yüksek fayda sağlanması ve sonuç ürünleri üretebilmek için söz konusu yaklaşımlar vazgeçilmez olmuştur. Yeni nesil SfM fotogrametrisi tekniği ile İHA'lar ile elde edilmiş iki boyutlu görüntülerden üç boyutlu model oluşturulmaktadır. SfM, bir nesnenin veya sahnenin farklı bakış açılarından alınan görüntü setlerinden, kamera parametreleriyle birlikte sahnenin üç boyutlu yapısını tahmin ederek oluşturmayı hedefleyen algoritmadır (Çelik vd., 2020). Belirli bir yükseklikten ve bindirme oranıyla sayısal hava kameraları ile kazanılan hava fotoğraflarının SfM yazılımları ile fotogrametrik kıymetlendirilmesi sonucu ortofoto, sayısal yükseklik modelleri, yoğun nokta bulutu ve üç boyutlu model gibi ürünler elde edilmektedir.

Proje gereksinimlerine bağlı insansız hava aracı ve veri alımı gerçekleştirilecek yükseklik, projenin amacına ve ölçeğine, bütçesi ve süresine, meteorolojik koşullar ve yüzey yapısına, ilgili sivil havacılık mevzuatına, hedeflenen hassasiyet değerlerine ve beklenen sonuç ürün kriterleri dikkate alınarak karar verilmektedir. İHA sistemleri pek çok açıdan fotogrametri için yararlıdır. Bu hususa örnek olarak, mevsimsel koşullardan uzaktan algılama ile elde edilecek uydu görüntülerine oranla daha az etkilenme, yersel fotogrametri ile ulaşılamayacak ve riskli bölgelere ulaşabilme, operasyonel kolaylık, düşük yatırım ve işletim maliyeti, hızlı ve nispeten kolay veri işleme gösterilebilmektedir. İHA sistemlerinin sağladığı faydaların yanı sıra çeşitli durumlar tarafından kısıtlandırılmıştır. Bu durumlara, rüzgar hızının artması, puslu ve yağmurlu havalarda, limitli yükleme kapasitesi örnek olarak gösterilmektedir.

İHA fotogrametrisi tekniği ile fotogrametrik ürünler elde etmek için Tablo 1.2'de gerçekleştirilecek adımlar belirtilmiştir.

Tablo 1.2 İHA fotogrametrisi iş akışı

Çalışma Bölgesinin Belirlenmesi
Kamera Kalibrasyonu
Uçuş Planlaması
Hava Fotoğraflarının Alımı
Verilerin İşlenmesi
Sonuç Ürünlerin Elde Edilmesi

Çalışma gerçekleştirilmeden önce ilk olarak çalışma bölgesinde proje sınırları belirlenmelidir. Belirlenen alan içerisinde uygulamada istenilen hassasiyete ve arazi yapısına bağlı olarak uçuş planlaması ve yer kontrol noktası tesisi yapılmalıdır. İHA'ya sabitlenmiş olan kamera veya kameraların kalibrasyonları yapılmalıdır. Kamera kalibrasyonu ile iç yöneltme elemanları belirlenmekte ve kamera distorsiyonları iyileştirilmektedir. Günümüzde sık kullanılan Pix4D, Agisoft Metashape gibi fotogrametri programları kamera yöneltme parametrelerini otomatik olarak tahmin eder ve kamera kalibrasyonunu sağlamaktadır.

Günümüzde çoğunlukla otopilot aracılığı ile uçuş yapan İHA sistemlerinde kullanılan yazılımlar sayesinde uçuş planlama aşaması otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Fotogrametride uçuş planlama aşamaları matematiksel formüllere dayanmaktadır.

Fotoğraf ölçeği denklem 1.11'de görüldüğü gibi uçuş yüksekliğinin kamera odak uzaklığına bölünmesiyle elde edilir.

$$mr = \frac{\text{uçuş yüksekliği}}{\text{Kamera odak uzaklığı}} = \frac{H_g}{f} \quad (1.11)$$

Ayrıca görüntüye ait ölçek harita ölçeğinin arazideki uzunluğa oranı ile elde edilir.

$$Mr = \frac{1}{mr} = \frac{d'}{d} \quad (1.12)$$

Görüntünün yeryüzünde kapladığı mesafe formülü Denklem 1.3'te belirtilmektedir.

$$S = s' \times \frac{Hg}{f} \quad (1.13)$$

Burada s' sensör boyutudur.

B izdüşüm merkezleri arası baz uzaklığı, A ise kolonlar arası uzaklıktır. Enine bindirme oranını q , boyuna bindirme oranını p temsil etmektedir.

$$B = S \times \left(1 - \frac{p}{100}\right)$$
$$A = S \times \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad (1.14)$$

Kolon sayısı, çalışma bölgesi düşey uzunluğunun, kolonlar arası mesafeye bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

$$N_k = \frac{L_a}{A} \quad (1.15)$$

Bir kolondaki fotoğraf sayısı, çalışma bölgesi yatay mesafesinin baz uzunluğuna bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

$$n_r = \frac{L_b}{B} + 1 \quad (1.16)$$

Çalışma bölgesinde toplanan hava fotoğrafı sayısı, kolon sayısı ve kolondaki fotoğraf sayısının çarpılması ile elde edilmektedir.

$$N_r = n_r \times n_k \quad (1.17)$$

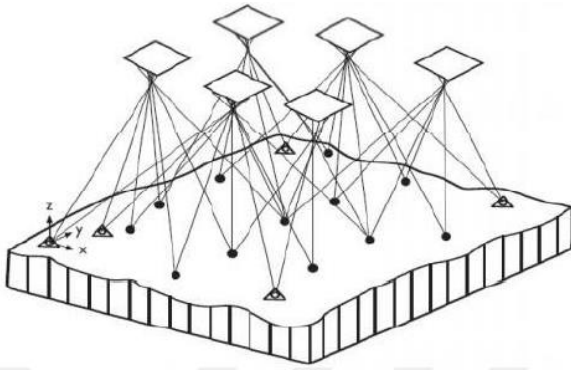
Modelin kapladığı alan ise F_m bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$F_m = S^2 - S \times B \quad (1.18)$$

YÖA, hava fotoğrafında ardışık iki pikselin merkezleri arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. Aynı zamanda bir pikselin arazideki uzunluğu olarak da ifade edilmektedir. Dolayısıyla YÖA ile konumsal çözünürlük arasında ters orantı vardır. Yüksek YÖA değeri düşük konumsal çözünürlüğe karşılık gelmektedir. S_w sensör genişliği (mm), im_w görüntü genişliği (piksel) olmak üzere YÖA hesabı Denklem 1.19'da belirtilmektedir (Özemir ve Uzar, 2016)

$$YÖA(GSD) = (S_w(mm) \times H_g) \div (f \times im_w(piksel)) \quad (1.19)$$

Hava fotoğraflarının çeşitli görüntü işleme yazılımları ile değerlendirilmesi sonucu yoğun nokta bulutu, sayısal yükseklik ve arazi modeli, ortofoto, üç boyutlu katı model gibi ürünler elde edilebilmektedir. Bu yazılımların SfM tekniğine dayanan farklı algoritmaları olsa da temelde çalışma prensipleri benzerdir (Lowe, 2004). SfM, hareketten yapı ifadesiyle hareketli bir kamera yardımıyla yüksek bindirme oranlı elde edilmiş iki boyutlu görüntüler kullanılarak yeryüzünün veya nesnenin üç boyutlu modelini oluşturma tekniğidir. Bu tekniğin temeli demet dengelemesine dayanmaktadır. Demet dengelemesi, en az %60 boyuna ve %20 enine örtü oranına sahip blok yapısındaki resimlerden oluşmaktadır.



Şekil 1.7 Demet dengelemesinin temel ilkesi (Kraus, 1997)

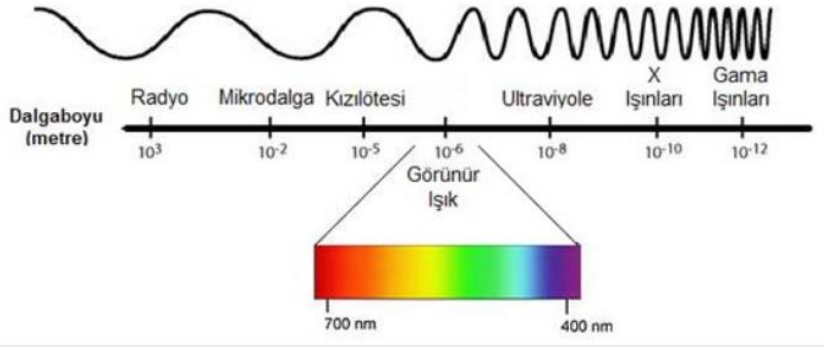
Resim koordinatları ve bunlara ilişkin izdüşüm merkezleri birer uzaysal ışın demetini tanımlamaktadır. Bir bloğun ışın demetlerinin dış yöneltme parametreleri tüm ölçme

resimleri için aynı anda belirlenir. Bunun için bağlantı noktalarının resim koordinatları ve kontrol noktalarının resim ve yer koordinatları mevcuttur (Kraus, 2007).

1.3. Sayısal Görüntü ve Çoklu Sensörlü Kameralar

Sayısal görüntü (Digital image), analog fotoğraftan farklı olarak fiziksel ortamdaki sahneyi her biri bağımsız değere sahip piksellerin oluşturduğu dizilerden oluşan görüntüdür (Campbell ve Wynne, 2011). Fiziksel ortamdaki sahnenin bilgisayara uygun şekilde resim olarak sunumudur. Bu sunumda görüntü piksellere ayrılmış olarak görünmektedir. Sayısal görüntü gri değeri ifade eden bir dizi tamsayıdan oluşur ve bu tam sayı değerleri piksellerde saklanır. Sonuç görüntü on binlerce veya milyonlarca pikselden oluşabilir (Wolf vd., 2014). Sayısal kameralar, ham görüntülerin bilgisayarda işlenmesi için milyonlarca piksel kullanmaktadır. Pozlama başladığında, boş piksellerin her biri fotonları bir elektrik sinyali olarak algılamaya ve depolamaya başlar. Pozlama bittiğinde, kamera her boşluğa bir değer atar ve kamera her bir değeri belirlemeye çalışır. Bit değerleri kayıt altına alınır. Bu teknoloji sensör olarak adlandırılır.

Uzaktan algılamada elde edilen enerjinin cinsi elektromanyetik spektrum içerisinde tanımlanmaktadır. Elektromanyetik spektrum (EMS) diğer adıyla elektromanyetik tayf fizik kuralları ile hareket eden dalga boyu nanometrelerden kilometrelere kadar uzanan ve bu dalga boyları veya frekanslarına göre enerjilerin sıralandığı bir ölçüttür. Elektromanyetik spektrum, dalga boylarına göre atomdan daha küçük değerlerden başlayarak binlerce kilometre uzunlukta olabilen radyo dalgalarına kadar birçok farklı radyasyon tipini içerir ("Elektromanyetik Spektrum", 2022). İnsan gözü ile algılanabilen dalga boyu aralığı görünür bölgedekilerdir. Elektromanyetik spektrumun bölümleri değişik şekillerde isimlendirilir. 0.4 ile 0.7 μm arası görünür bölge olup insan gözü tarafından algılanır ve dalga boyu aralığı küçüktür. Morötesi ışınım görülebilen dalga boyu bakımından görünür bölgeden kısadır. Oldukça enerjik olduğundan insan derisi üzerinde yıkıcı etkiye sahiptir. Kızılötesi radyasyon yaklaşık olarak 1 mm ile 750 nm arasındaki dalga boylarını kapsamaktadır.



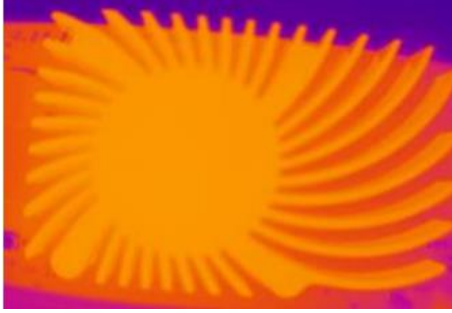
Şekil 1.8 Elektromanyetik spektrumun dalga boyları (“Elektromanyetik spektrum dalga boyları”, 2022)

Elektromanyetik spektrumun termal kızılötesi bölgesinden veri kazanımı ve analizi uzaktan algılama ve fotogrametri için nesne izleme, tanımlama ve tarif etme amaçları için eşsiz bir bilgi sağlayabilmektedir. Termografi, yüzey sıcaklığını saptama ve ölçme amacıyla elektronik optik cihazlar kullanma bilimine verilen isimdir. Termografik kameralar ise söz konusu elektromanyetik tayfin kızılötesi bölümündeki elektromanyetik ışınımı tespit eder ve görüntü veya video oluştururlar. Kızılötesi ışınım tüm cisimlerden salınmaktadır. Bir cisim tarafından salınan ışınımın miktarı sıcaklık arttıkça artar bu nedenle termografi sıcaklıktaki farkları görmemizi sağlar (Çalışan ve Türkoğlu, 2011). Termal kameralar çok az miktarda sıcaklık farklarını bile kolaylıkla aygılayabilir ve bu farkları gerçek zamanlı video görüntüsü şeklinde sunabilir. Termal kameraların sıcak nesnelerin görüntülerini elde etmeleri için iki tür termal kamera vardır (Faundez-Zanuy ve Mekyska, 2011). Sensör yapılarındaki fark nedeniyle sınıflandırılmıştır. İlk sınıf, kameralar uzun dalga kızılötesinde çalışan ve soğutulmayan sensörlerden oluşmaktadır. İkinci sınıf ise, kriyojenik soğutma tekniği ile soğutulan sensörlerden oluşmaktadır.

Termal kameraların suçlu izleme, sağlık, savunma ve bina tanılamaları için çoğunlukla kullanımına başvurulmaktadır. Bina tanılamaları, çatı rutubeti kontrol etmek, nem algılaması ve bina yalıtım kontrolünü kapsamaktadır. Bina yalıtımı kastedildiğinde duvarlar, çatılar ve döşemelerin içine yerleştirilmiş bina termal çevre kaplama inşaat malzemeleri bahsedilmektedir.

Termal kamera görüntülerinde çok sıcak noktalar açık renk ile soğuk noktalar ise koyu renkle gösterilmektedir. Termal kameralar ortamın sıcaklığını siyah-beyaz veya renkli

göstermektedirler. Renkli olarak gösterildiğinde ortam sıcaklığına göre mavi ile sarı renk aralığını kullanır. Mavi en soğuk, sarı ise en sıcak bölgeleri temsil etmektedir. Bir ekran kartının termal kamera ile çekilmiş görüntüsü Şekil 1.9’da verilmiştir.



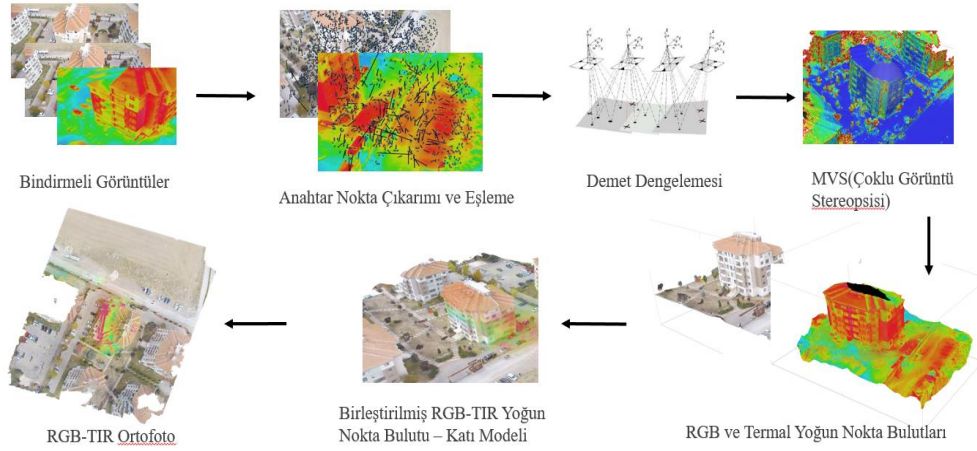
Şekil 1.9 Ekran kartının termal kamera ile çekilmiş görüntüsü (Durgut ve Akçay, 2016)

Modern termal kameraların görüntüleri ve kullanım şekilleri normal kameralar ile benzerdir. Normal kameralarda yer alan CCD ve CMOS sensörleri görünür ışığı algılayabilecek şekilde tasarlanmıştır, kızılötesi ışınımı algılayamazlar. Bu yüzden birçok termal kamera özellikle bu iş için üretilmiş focal plane arrays (FPA) imaj sensörler kullanılmaktadır. FPA’lar daha uzun dalga boylarına cevap verebilmektedir (Çalışan ve Türkoğlu, 2011). Termografi yalıtımın kalitesini ve işlevselliği ortaya koymak için elverişlidir. Termal görüntüleme sistemleri başlangıçta sadece askeri kullanım için geliştirilmesine karşın günümüzde bina yalıtımı inceleme, savunma sistemleri, yangın izleme gibi pek çok alanda kullanılmaktadır (Sledz vd., 2018). Bina yalıtımı esasen bina içerisinde hem kazanım hem de kayıp haline gelebilen ısı transferini kontrol altına almaktadır. Bina cephelerinin TIR görüntüleri ile incelenmesi, ısı kayıplarını, çatlakları, ısı köprülerini, hava kaçaklarını, duvar ve çatılardaki yalıtım sorunlarını, nem kaynaklarını ve termal imza ile ilgili diğer sorunları tespit etmek için kullanılır (Maset vd., 2017). İHA sistemlerine entegre edilen termal görüntüleme kameraları, bina çatısının yanı sıra cepheler için de kolay bir inceleme imkanı sunmaktadır. Ticari sınıfı termal kameralar nispeten pahalıdır ve yangın saptama, elektriksel hat yorumlama ve bina ısı etkinliğini izleme gibi pek çok uygulama için kullanılmaktadır. Ancak uzaktan algılama ve İHA temelli TIR haritalama kısıtlandırılmıştır (Gade ve Moeslund, 2014). Termal görüntüleri sadece SfM tekniği kullanılarak pürüzlü ve geometrik çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle işlemek zorlayıcıdır. Termal görüntülerin bu özelliğinden dolayı yeterli sayıda eşlenik noktası

üretilemediğinden hassasiyeti düşük üç boyutlu model üretilmektedir. Bu durumun üstesinden gelebilmek için yüksek çözünürlüklü RGB görüntülerden yararlanılmalıdır. Yeni nesil çoklu sensörlü kameralar ile yüksek çözünürlüklü 3B termal ve RGB bilgili model üretilmesi mümkündür. RGB görüntülerle termal görüntülerin eş zamanlı elde edilmesinin yanı sıra İHA'ya entegre edilen INS sensörleri ile yer kontrol noktası tesisine ihtiyaç duyulmadan yüksek çözünürlüklü modeller elde edilebilir.

1.4. SfM Algoritması

SfM, metrik olmayan ticari sınıf kameralar ile elde edilmiş yüksek oranda örtüşen görüntülerden yüksek çözünürlüklü haritalama ürünlerinin (nokta bulutları ve ortofotolar) üretilmesi için geniş ölçüde kullanılan nispeten yeni bir fotogrametrik yaklaşımdır (Javadnejad vd., 2018). SfM algoritmasının işlem adımları Şekil 1.10'de gösterilmiştir.



Şekil 1.10 SfM algoritması işlem adımları

SfM tekniği ilk olarak görüntülerden anahtar noktaların (keypoints) otomatik çıkarımı ile başlamaktadır. Çıkarılan anahtar (kilit) noktalar SIFT ve SURF gibi görüntü eşleme algoritmalarına (çok boyutlu maksimum olasılıklı tanımlayıcılara) dayanılarak eşleştiren algoritmalar ile tanımlanmaktadır (Javadnejad ve diğerleri, 2020). Otomatik görüntü eşleştirme ve anahtar nokta çıkarımı için bu algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Görüntü eşleme algoritmalarında yoğunlukla kullanılan Scale Invariant Feature Transform

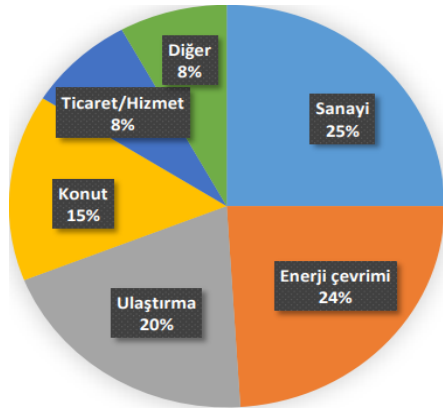
(SIFT) algoritması aracılığıyla fotoğraflar üzerinde ayırıcı değişmez özelliklerin çıkarımı ile farklı açı ve mesafeden alınan fotoğraflar eşlenmektedir. Görüntü eşleme, hareket izleme ve çoklu görüntülerden 3B yapı için obje veya nesne tanıma dahil olmak üzere bilgisayarlı görüde yer alan pek çok probleme temel bir yaklaşımdır. Sözü edilen algoritmalar, bir obje veya nesnenin farklı görüntülerinin eşleştirilmesini sağlayan pek çok görüntü özelliğini tanımlamaktadır. Görüntü eşleme için SIFT özellikleri ilk olarak veri tabanında depolanmış bir dizi referans resimden çıkarılır. Her yeni resim için özellik veri tabanında diğer yeni resim için kıyaslama yapılarak eşlenmektedir.

Seyrek nokta bulutu, demet dengelemesi aracılığıyla kamera iç yöneltme ve dış yöneltme parametreleri olduğu gibi anahtar noktaların üç boyutlu konumu için eş zamanlı bir çözümle üretilmektedir (Lowe, 2004; Snavely vd., 2006). İnşa edilmiş üç boyutlu katı model genellikle sayısı arazi gereksinime bağlı olarak tesis edilen yer kontrol noktaları ile veya İHA'ya entegre edilmiş GPS/INS sistemi aracılığı ile yer referanslandırılmaktadır. Geleneksel demet dengelemesinde, hem yer kontrol noktalarının koordinatları hem de dış yöneltme elemanları kullanılabilir. Yer referanslandırma (Georeferencing), seyrek nokta bulutunu üretmek için demet dengelemesi aşaması sonucunda gerçekleştirilmektedir. Seyrek nokta bulutunun üretilmesi için öncelikle Exchangeable Image File Format (EXIF) meta verisinden alınan bilgiler ile kalibre edilmiş her bir fotoğrafın kamera konum ve yön bilgisi ile hizalanması (Aligning photos) gerekmektedir (Gökçen, 2022). Fotoğraf çiftlerindeki eşlenik noktaların tespit edilmesi sonucu oluşan noktalar ile bağlantı noktaları çıkarılmaktadır. Bağlantı noktaları aracılığıyla çeşitli görüntü eşleme algoritmaları ile görüntüler eşleştirilir. Seyrek nokta bulutunu üretmek için çoklu görüntü stereopsis (MVS-Multiview Stereopsis) algoritması LİDAR ile kıyaslanabilir yoğunlukta görselleştirmeyi sağlamak için kullanılmaktadır (Furukawa ve Ponce, 2010). LİDAR bir lazer tarama teknolojisidir. Belirli bir hedefe gönderdiği sinyallerin hedeften dönene kadar geçen zamanı kayıt ederek yeryüzünün şeklini ve özelliklerini doğrudan ve hassas bir şekilde belirlemektedir. Ancak maliyet ve nokta sayısı yoğunluğu bakımından çoğunlukla tercih edilmez. Katı modeller, sayısal yükseklik ve arazi modelleri gibi haritalama ürünleri yoğun nokta bulutundan üretilmektedir. SfM algoritması bazı dikkate değer ticari SfM yazılımları ile gerçekleştirilmektedir. Bunlara örnek olarak Pix4D mapper, Agisoft Metashape ve Photomodeler verilebilir. SfM tekniği stereo fotogrametride modelleme çalışmaları için lazer tarama ekipmanları ile kıyaslandığında kullanıcı dostu ve düşük bütçeli olduğu görülmektedir (Micheletti vd., 2015; Polat ve Uysal, 2018).

Kızılötesi termografinin LİDAR ile veya RGB görüntüler ile kombinasyonu bina enerji analizlerinde daha yaygın kullanılmaktadır. İHA ile çoklu sensörlü veri füzyonu nispeten yenidir.

1.4. Binalarda Enerji Verimliliği ve Isı Yalıtımı Standartları

İnsanın doğal çevrede yaşadıkça enerjiye olan ihtiyacı artmış ve daha çok enerji üreten fosil yakıtlara yönelmiştir. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkenin nüfus miktarına oranla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Ancak oluşumu milyonlarca yıl süren bu yakıtların tüketilmesi ekolojik dengenin bozulmasına yol açmıştır. Yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarına alternatif doğal enerji kaynakları hususunda yapılan çalışmalar sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kavramlarına dikkat çekmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve enerji tasarrufu üzerine olan çalışmalara hız verilmiştir. Günümüzde tüketilen enerjinin yaklaşık %15'inin binalarda kullanıldığı belirtilmektedir (İMO, 2015).



Şekil 1.11 Türkiye’de enerjinin sektörlere göre tüketim oranları (İMO, 2015)

Bu durum binalardaki enerji kullanımının ve verimliliğinin önemini arz etmektedir. Bu sebeple binalarda kaybedilen enerji miktarını iyileştirmeye yönelik verimlilik uygulamaları ve binanın ihtiyacı olan enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi önem kazanmıştır. Enerjinin en çok tüketildiği alanlardan biri olan yapılarda enerji tasarrufunu sağlayabilmek için ısı yalıtımı yapılmalıdır. Isı yalıtımı, farklı sıcaklıktaki iki

ortam arasındaki ısı geçişini azaltmak için yapılan işlemlerdir. Isınma ve soğuma amaçları için harcanılan enerji miktarını azaltmak ve yaşam konforunu sağlamak amacıyla binaların dış cepheleri, pencere, cam ve doğramaları, çatıları, döşemeleri, iletim tesisatlarında meydana gelen ısı akışını azaltan önlemlerdir. Binalarda ısı kayıp ve kazançlarının düşürülmesi, ısıtma enerjisi harcamalarının azaltılması amacıyla ısı yalıtımı, binaların dışarıya veya garaj, depo gibi ısıtılmayan bölümlerine bakan duvar, çatı, döşeme, cam, doğrama ve ısıtma, soğutma, havalandırma vb. tesisatlarına uygulanır (Manioğlu ve Oral, 2010).

Binalarda ısı yalıtımı TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı'na uygun olarak hesaplanmalı ve yalıtımı doğru şekilde yapılmalıdır. Bu standardın amacı, ülkemizde binaların ısıtılması hususunda tüketilen enerji miktarını azaltarak enerji tasarrufunu arttırmak ve enerji ihtiyacının hesaplanmasında başvurulacak hesap metodunu ve değerlerini ortaya koymaktır. Buna göre doğru ısı yalıtım uygulamalarıyla %50 enerji verimi elde edilmesiyle yaklaşık 8,5 milyar dolar seviyelerinde enerji tasarrufu yapılabilir (İMO, 2015). Bu enerji tasarrufu ile, ısı köprülerinin oluşumu engellerek yalıtımsızlık veya eksik uygulamaların sebep olduğu bina dış yüzeyinin içerisinde oluşabilecek terleme, nem ve küf oluşumunun önüne geçilecek, sağlıklı yaşam konforu sağlanacak ve iklimle bağlı yapı iç ve dış sıcaklık farklarının neden olduğu yapısal sorunlar öncelenecek ve yapı onarım ihtiyacı azalacaktır. Binalarda enerji verimliliğinin artırılması için bir bina gözlem teknolojisi geliştirmek gereklidir. Termal kamera, insan gözü ve dijital kameralar aracılığıyla elde edilemeyecek bilgilerin edinilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden termal görüntüleme, ısı kaçaklarını görüntülemek için basit ve etkili bir yaklaşımdır.

Yaşanılabilir bir dünya için binaların yalıtılması gereklidir. Ek olarak Türkiye gibi enerji bakımından dışa bağımlı ülkelerin ekonomisinde enerji maliyeti ısı yalıtımının önemini arz etmektedir. Yalıtım konusundaki harcamaların azaltılması, yalıtımın bina maliyetini arttırmasına karşın, ilgili mevzuatların düzenlenmesiyle ısı yalıtımıyla ilgili çalışmaların desteklenerek araştırma geliştirme çalışmaları aracılığıyla ürünlerin geliştirilip, yeni ürünlerin ortaya konulması elzemdir. Isı yalıtımı binanın tümü açısından bir bütündür. Binanın sadece dış cephesini yalıtım anlamına gelmez. Aksine bir binanın dış cephesi, çatısı, bodrum katı, penceresi, kapısı, mekanik tesisatı ve varsa havalandırma sistemlerinin tümüne yalıtım yapılmalıdır.

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, termal ve görünür verilerin kombinasyonu ile sırayla gerçekleştirilmesi gereken zorunlulukların yerine getirilip doğru bir veri toplama yaparak, görünür görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutu elde edilip bina yalıtımını yüksek çözünürlükte modellemek, görünür görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutu, termal görüntülerin sıralanıp hizalanması ile dokulandırılarak bina yalıtım ısı değerlerini analiz ederek ısı kaçaklarının tespit edilmesi ve yorumlanması ile ısı yalıtım değerlerini ölçmek amaçlanmıştır.

2.1. RGB ve/ya Termal Kamera Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

Vidas vd. (2013), çalışmasında termal kamera ve görünür kamera kullanılarak binalardaki kalorifer kazanları ve klima gibi sistemlerin üç boyutlu modelini düşük maliyette gerçekleştirmeye çalışmışlardır. Görünür ve termal görüntülerin bir arada kullanılmasında temel zorluklarından biri görüntü birleştirme teknikleridir. Bu konuda yapılan bir çalışma Aslantaş vd. (2014), termal ve RGB kamera kullanarak gerçekleştirdikleri bölge bazlı basit görüntü füzyonu ile ortaya çıkan performanslar sayısal ve görsel olarak verilmiştir. Çalışma sonucunda, birleşmiş görüntülerde laplacian piramidi ve temel birleştirme analizi metotlarının daha başarılı sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Gonzalez-Jorge vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, görünür ve termal görüntülerle otomatik olarak dokulu lazer tarama nokta bulutlarından üretilirse bina bilgi modelleri için kapasitelerinin artacağına değinmiştir. Lazer tarama ile elde edilen binanın görünür verileri ile termal görüntüleri dokulu üç boyutlu modellerin üretilmesi için ortak kayıt yaklaşımları metodolojisi önerilmiştir.

Günümüz çalışmalarına gelindiğinde, Javadnejad vd. (2020), çakıştırılmış termal ve görünür verileri kullanan üç boyutlu kesitli nokta bulutları üretmek için fotogrametrik bir yaklaşım önerilmektedirler. Üç boyutlu kesitli nokta bulutları üretmek için fotogrametrik bir yaklaşım önerilmektedir. Üç boyutlu nokta bulutu standart SfM prosedürleri kullanılarak görünür görüntülerden elde edilmiştir. Termal görüntülerdeki noktaların kenar koordinatları

eş kayıt prosedürlerinden elde edilen üç boyutlu ortak kayıt yaklaşımlarını test etmektedir. Benzer bir çalışmada, geometrik bilgiyi aynı termal görüntülerle birleştiren bir metodoloji anlatılmıştır. Termal görüntülerin sıralanıp birleştirilmesi ile elde edilen dönüşüm parametreleri kullanılarak tahmin edilmiş ve çalışma, dönüşüm parametrelerini elde etmek için iki ve üç boyutlu ortak kayıt yaklaşımlarını test etmektedir. Benzer bir çalışmada, geometrik bilgiyi aynı termal görüntülerle birleştiren bir metodoloji anlatılmıştır. Termal görüntülerin sıralanıp hizalanması ile elde edilen termografik mozağin geometrik çözünürlüğünü arttırmak için gri değer skalasına dönüştürülüp pankromatik görüntüler ile birleştirilerek yüksek çözünürlüklü nokta bulutu elde edilmiştir. Görüntü füzyonu Matlab ortamında geliştirilerek, üç boyutlu model elde edilmiştir (Lagüela vd., 2012). Benzer şekilde, Borrman vd. (2013) ve Hoegner vd. (2018) RGB ve TIR görüntüleri ile lazer tarayıcı aracılığıyla nokta bulutları füzyonunu gerçekleştirmiştir.

Doğal renkli görüntülemenin yada lidarın kızılötesi termografi ile entegrasyonu bina enerji analizlerinde daha yaygındır (Kylili vd., 2014). Örneğin, Ham ve Golparvar-Fard (2013) termal görüntülerin ve RGB görüntülerin eş zamanlı kazanılarak SfM kullanarak üç boyutlu termal model için bir yaklaşım önermiştir. MVS yoğunlaştırma tekniği kullanılarak üç boyutlu termal ve RGB model ayrı ayrı üretilmiştir.

Sledz vd. (2018), 3B bina modelini inşa etmek için RGB ve termal görüntüleri ayrı ayrı işleyerek bir yaklaşım sunmuştur. Üç boyutlu modeli referans verisi için RTK donanımlı bir İHA kullanmışlardır. İnsansız hava aracına monte edilen termal kamera ile bina ısı performansını gözlemlemeyi amaçlayan Han ve Huh (2019) tarafından yapılan çalışma, görünür ve termal görüntülerin insansız hava aracından yararlanılarak üç boyutlu bina modeli elde edilmiştir. Bu çalışmada termal görüntülere sıcaklık düzeltmesi yapılmıştır.

2.1. Fotogrametri ve Termal Kamera Kullanılarak Gerçekleştirilen Çalışmalar

Yeni nesil fotogrametrik yöntemler kullanılarak geleneksel olmayan bir yöntem ortaya koyan bu çalışmaya değin termal kamera kullanımı ve üç boyutlu model üretiminde önemli çalışmalar mevcuttur. İlk olarak termal kamera kalibrasyon yöntemlerini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Klasik kalibrasyon yöntemlerinin termal kameralara uygulanamayacağını savunarak bir kalibrasyon deseni geliştirilmiştir. Kalibrasyon nesnesinin yüksek doğruluğa sahip olduğunu tespit etmiştir (Yang ve Chen, 2011). Konuya

dair çalışmalar incelendiğinde termal üç boyutlu modelleme nesneni olarak genellikle binaların kullanıldığı görülmüştür. Termal kameraların kalibrasyonu nesnesi olarak üç boyutlu yanan lambalara dayalı bir ızgara oluşmaktadır. Bu çalışma termal kameranın doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve geometrik parametreleri doğrulamak için düşük maliyetli taşınabilir bir sistemi göstermektedir (Lagüela vd., 2011).

Weinman vd. (2014), radyometrik düzeltme, geometrik kalibrasyon, benzerliklerin tespiti ve termal bilgiyi birleştirme olmak üzere 4 aşamalı bir üç boyutlu modelleme yöntemi savunmuşlardır. Bu yöntemin bina iç mekanlarında daha uygulanabilir olduğu ortaya konulmuştur. İç bina modellemesi ile ilgili benzer bir çalışma Oreifej vd. (2014), üç boyutlu termal nokta bulutundan duvarları, taban ve tavanı modelleyebilen tam otomatik bir yaklaşım önermişlerdir. Bu metodolojide, lazer tarama ile üç boyutlu geometri oluşturulup, termal kamera ile nokta bulutu elde edilmiş ve optik kamera ile üç boyutlu nokta bulutu elde edilmiştir. Benzer bir çalışma olan Ham ve Golparvar-Fard (2012), yeni üç boyutlu termal görüntüleme algoritması ile yoğun bir termal nokta bulutu oluşturarak üç boyutlu model elde edilmiştir. Termal kameraların ısı kaçaklarını tespit edebilme özelliğinden yararlanılarak bina termal modelleri oluşturulmuştur. Bu çalışmalardan bazıları; Borrmann vd. (2012), yaptıkları çalışmada binalardaki ısıtma ve soğutma sistemlerinin enerji kayıplarını tespit edebilmek için binanın üç boyutlu modelini oluşturmuşlardır.

Stockton (2010), bir veri merkezinde güç tüketimi ve soğutma işlemlerini izleyebilmek için üç boyutlu görüntüleme sistemi üzerinde çalışmıştır. Alba (2011), farklı odak uzaklıklarına bağlı kızılötesi alıcıların kullanımı ve üç boyutlu bina modelini termal görüntülerle dokulandırmak için yeni bir metodoloji tanımlamıştır. Cho ve Wang (2011), Lidar tarayıcı ve termal kamera kullanılarak üç boyutlu termal model oluşturmuşlardır. Bina üç boyutlu modelini elde etmek için lazer tarayıcı ile taranarak bina dış yüzeyleri termal kamera ile görüntülenmiştir. Lidar yöntemi uygulama gereksinimlerine bağlı olarak maliyet açısından külfetlidir ancak üç boyutlu modelin elde edilmesi için yararlı bir teknolojidir. Çalışmada termal kameranın yanı sıra başka kameralarda kullanılmıştır.

Özellikle konu ile ilgili yapılan son çalışmalar değerlendirildiğinde, bina ısı yalıtımının kapsamlı bir şekilde incelenmediği ve termal görüntülerden elde edilen modelin yeterli hassasiyette üretilmediği görülmüştür. Bu tez çalışmasında ise kullanılan insansız hava aracına entegre edilen çoklu sensörlü kamera sayesinde doğruluğun artırılması ile bina

yalıtımının kapsamlı bir değerlendirilmesi yapılmış olup yüksek çözünürlüklü termal bilgi ile donatılmış RGB  boyutlu model üretilmiştir.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

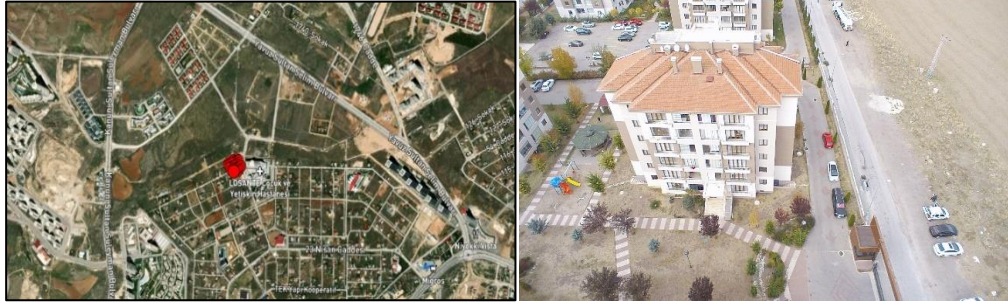
3.1 . Çalışmanın Amacı ve Hedefleri

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkenin nüfus miktarına oranla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Bu durum binalardaki enerji kullanımının ve verimliliğinin önemini arz etmektedir. Binalarda kaybedilen enerji miktarlarını azaltmak için verimlilik uygulamaları ve binanın ihtiyaç duyduğu enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi elzem haline gelmiştir. Enerjinin en çok tüketildiği alanlardan biri olan yapılarda enerji tasarrufunu sağlayabilmek için ısı yalıtımı yapılmalıdır. Binalarda ısı yalıtımı TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı'na uygun olarak hesaplanmalı ve yalıtımı doğru bir şekilde yapılmalıdır. Böylelikle, doğru ısı yalıtım uygulamaları ile yalıtımsızlık ve yetersiz uygulamaların sebep olduğu hasar önlenir, sağlıklı bir yaşam konforu sağlanabilir. Binaların enerji verimliliğinin artırılması için bir bina gözlem teknolojisi geliştirilmelidir. Termal kamera, insan gözü ve dijital kameralar aracılığıyla belirlenemeyecek tespit ve analizler yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Termal görüntüleme ile ısı kaçaklarını görüntülemek basit ve etkili bir yaklaşımdır. Ancak kayıt ve üç boyutlu modelleme için termal görüntülerin eşleştirilmesi zordur. Bu nedenle İHA temelli termal görüntüleme ve uzaktan algılama uygulamaları kısıtlanmıştır (Gade ve Moeslund, 2014). Görüntü yakalama sırasında termal kamera sensöründe meydana gelen gradyent renk kodlaması nedeniyle termal görüntüler bulanık ve pürüzlü olduğu için görüntü eşleme algoritmaları ile yeterli eşlenik nokta sayısına ulaşamaz. Bu nedenle yüksek çözünürlüklü 3B model üretimi gerçekleştirilemez. Bu zorlukları aşmak için çalışmada insansız hava aracına entegre edilen çoklu sensörlü kamera kullanılmıştır. Çoklu sensörlü kamera ile uygulama açısından elverişli bir binanın termal ve görünür görüntüleri eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Etkin bir bina ısı gözlem teknolojisi geliştirmek için termal ve görünür görüntülerin füzyonu sağlanmalıdır. Bu yöntemin avantajlı olmasının nedenlerinden biri, RGB görüntülerin termal görüntülerden çok daha yüksek spektral çözünürlüğe sahip olması nedeniyle üç boyutlu model üretmek için Structure from Motion (SfM) tekniğinin kullanılmasıdır. SfM, metrik olmayan ticari sınıf kameralar ile yeterli oranda bindirilmiş resimlerden yüksek çözünürlüklü haritalama ürünlerinin elde edilmesinde geniş ölçekte kullanımı sağlayan nispeten yeni bir fotogrametrik yaklaşımdır (Javadnejad vd., 2020). Bu

tez çalışması, bina cephe sistemlerindeki ısı köprülerini hızlı bir şekilde tanımlamak için kızılötesi termografi ve insansız hava aracı kullanılarak bir binayı incelemek için geleneksel olmayan bir yaklaşım benimsemiştir. Sistem, insansız hava aracına monte edilen ve insansız hava aracından çalıştırılan çoklu sensörlü kameradan oluşur. Oluşturulan model mevcut bina enerji performansının hızlı bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır.

3.2. Çalışma Bölgesi

Çalışma, Ankara'nın Gölbaşı ilçesinde gerçekleştirilmiştir. Binanın konumu Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Site içerisinde betonarma 5 katlı bina, çatısı, duvar yapısı ve etrafında bulunan ağaç ve araba azlığı nedeniyle tercih edilmiştir.



A

B

Şekil 1.12 A) Gölbaşı ilçesinde yer alan binanın uydu görüntüsünde ki yeri B) Binanın güney cephesinden çekilmiş görüntüsü

3.3. Kullanılan Donanımlar

Çalışmanın amacı, RGB ve termal görüntülerin kombinasyonu ile sırayla gerçekleştirilmesi gereken zorumlulukların yerine getirilip doğru bir veri toplama yaparak rgb görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutunun termal görüntülerle dokulandırılıp binanın ısı yalıtım değerlerini ölçmektir. Bu nedenle, kullanılan İHA pek çok alanda kullanılan hassas alçak irtifa İHA platformu olan DJI Phantom 4 RTK'dır (Nex ve Remondino, 2014). Çalışmada kullanılan insansız hava aracı ve çoklu sensörlü kamera Şekil 3.2 ve 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 1.13 DJI Phantom 4 RTK İnsansız Hava Aracı (“DJI Phantom 4 RTK”, 2022)



Şekil 1.14 Yuneec E10Tvx Çoklu Sensörlü Kamera (“Yuneec E10Tvx”, 2022)

Kullanılan çoklu sensörlü kamera ise yüksek çözünürlüklü RGB sensöre sahip aynı zamanda termal görüntüleme sağlayan Yuneec E10Tvx’dir. Kamera teknik özellikleri Tablo 3.1 ve 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Görünür veri kazanımı için kullanılan RGB sensörün özellikleri

Kamera	Yuneec E10Tvx
Renk Hassasiyeti	RGB
Ağırlık	384 gr
Resim Boyutu	1920*1080 piksel
Odak Uzaklığı	23 mm
Görüş Alanı	89.6°

Tablo 1.4. Termal veri kazanımı için kullanılan termal sensörün özellikleri

Kamera	Yuneec E10Tvx
Renk Hassasiyeti	Termal
Ağırlık	384 gr
Piksel Boyutu	12 µm
Odak Uzaklığı	6.3 mm
Görüş Alanı	32°

3.4. Fotogrametrik Değerlendirmede Kullanılan Program

Agisoft Metashape, alımı gerçekleştirilen dijital görüntülerin fotogrametrik kıymetlendirmesini gerçekleştiren ve üç boyutlu konumsal veri üreten bir yazılım ürünüdür. Çalışmada modelleme amaçlı Agisoft Metashape programı kullanılmıştır. Bu program mimari, arkeoloji gibi alanlarda, yoğun nokta bulutu oluşturma ve düzenlemede, üç boyutlu katı model, SAM, SYM ve ortofoto üretiminde kullanılan bir programdır.

Bu çalışmada kazanılan RGB ve termal görüntülerin nokta bulutları üretilmiş olup işaretleme noktaları yardımıyla nokta bulutları birleştirilmiştir. Birleştirilen RGB ve termal nokta bulutları sayesinde RGB-Termal yoğun nokta bulutu ve katı modeli elde edilmiştir.

3.5. Veri Kazanımı

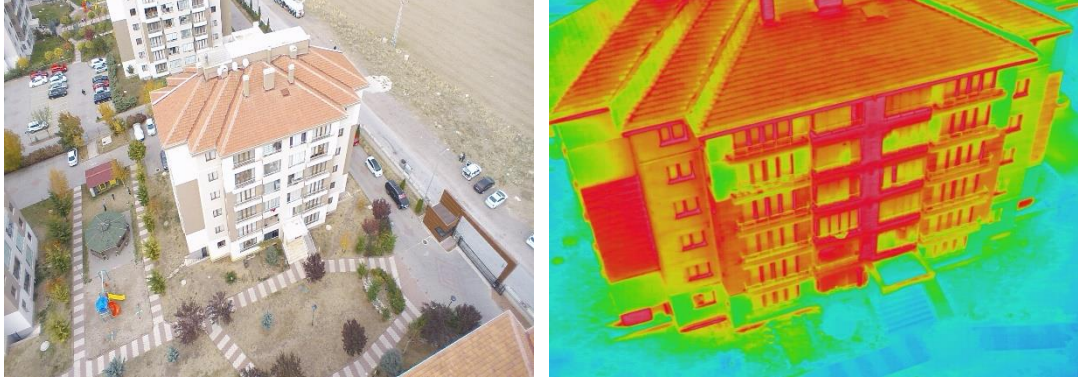
Çalışmanın amacı termal ve geometrik veri kombinasyonunu sağlamak olduğu için veri seti enine ve boyuna %80-90 yüksek bindirme oranlı olarak Yuneec E10Tvx kamerası ile ortalama 60 metre yüksekliğinde kazanılmıştır. Veri kazanımını gerçekleştirmek için birkaç gereklilik vardır. Söz konusu binanın ve yakın çevresinin modellenebilmesi için nadir ve oblik olarak görüntülerin alımı gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, veri alımı sırasında çevresel koşullarda etkilidir. Özellikle termal görüntülerde ışın yansıma hatalarının optimum ölçekte olması için rüzgar hızının ve sıcaklığın uygun, yağmurun yağmadığı bir havada

görüntüler temin edilmiştir. Bu şekilde, görüntü alımı sırasında oluşabilecek hata değerleri ve bakış açısı farklılıkları nedeniyle oluşabilecek eşlenik nokta sayıları iyileştirilmektedir.

RTK donanımlı İHA'lar yardımıyla herhangi bir yer kontrol noktası tesisine gereksinim duyulmadan doğrudan hassas konum belirleme ile yüksek doğruluklu ortofotolar, nokta bulutları ve sayısal yükseklik modelleri üretilebilmektedir (Tarık ve Öcalan, 2020). Resimlerde oluşabilen eğriliklerin ve yükseklik farklarından kaynaklanabilen hataların giderilmesi sonu elde edilen görüntüler ortofotolardır. Ortofoto haritalar, bölgeye ait uydu görüntüleri veya hava fotoğraflarının yine o bölgeye ait sayısal yükseklik modelleri ile ilişkilendirilmesiyle ortofoto haritalar üretilmektedir. Ortofoto haritalar coğrafi bilgi sistemleri (CBS) için kullanışlı bir altlıktır. Bu çalışmada, nihai yüksek çözünürlüklü katı modelin üretilmesi için yer kontrol noktası gibi hassas mutlak nokta konum doğruluğuna ihtiyaç duyulmamıştır. Bu nedenle, RTK donanımlı bir insansız hava aracına monte edilen çoklu sensörlü kamera ile eş zamanlı elde edilen RGB ve termal görüntülerin Agisoft Metashape programı kullanılarak iç ve dış yönelmeleri demet dengelemesi ile gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik açıdan gerçekleştirilmesi gereken zorunlulukların yerine getirilerek elde edilen yüksek bindirme oranlı çekilmiş RGB ve termal görüntü örneği Şekil 3.4 ve 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.15 Yuneec E10Tvx kamerası ile kazanılmış yüksek bindirmeli oblik çekilmiş RGB görüntü örneği



Şekil 1.16 Yuneec E10TvX kamerası ile kazanılmış RGB ve termal görüntü örneği

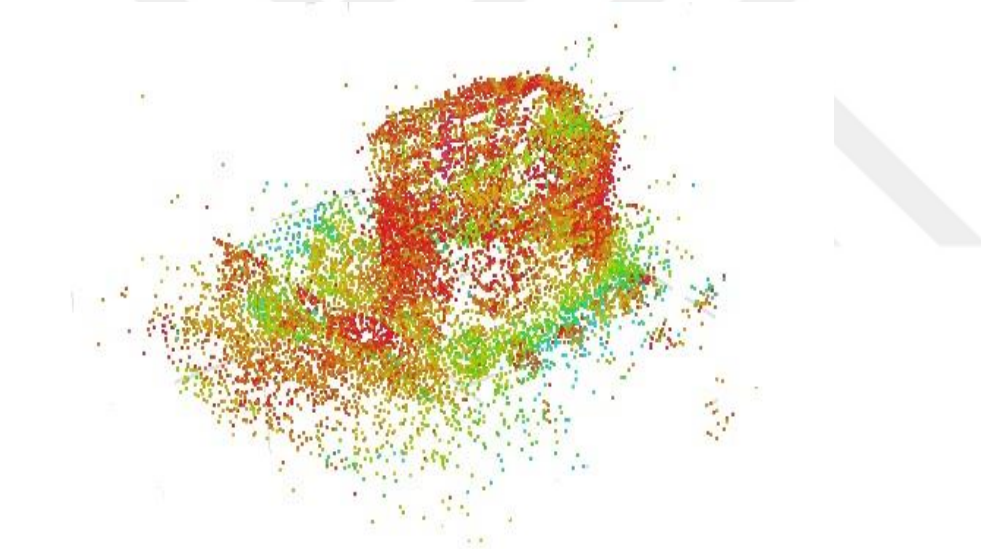
3.6. Veri İşleme

Binanın enerjisiyle ilgili yorum ve incelemeleri gerçekleştirme amacıyla üretilen termal modeller, nem alanları, ısı kayıpları gibi anormal termal alanları belirleyebilmek için üretilmektedir. Bunun yanı sıra, modelin üç boyutlu geometrik bilgisi de anormal termal alanları konumlandırma imkanı sağlamaktadır. Özellikle büyük alanlar söz konusu olduğunda termal modellerin avantajlarına karşın fotogrametrik zorluklar nedeniyle kullanımı kısıtlanmıştır. İlk olarak, termal kameranın çözünürlüğü RGB kameralara kıyasla düşüktür. Bu durum görüntülerin nokta eşlemesi aşamasında kilit nokta çıkarımını olumsuz etkilediği gibi üç boyutlu modelin de kalitesini düşürmektedir. Ek olarak, termal görüntüler görüntü yakalama sırasında dar görüş alanı nedeniyle meydana gelen termal gradyent renk kodlamasından dolayı pürüzlü ve bulanık olduğu için tek başına termal görüntüleri işlemek zorlayıcıdır (Ham ve Golparvar-Fard, 2013).

Çalışmada kullanılan programın temeli olan SfM algoritması, görüntülerin otomatik nokta çıkarımı ile başlamaktadır (Javadnejad vd., 2018). Çeşitli nokta çıkarımı algoritmalarından biri olan özellik tabanlı nokta çıkarımı algoritması SIFT, aynı bölgeyi kapsayan görüntüler arasında büyük oranlarda değişken olabilen dönüklük, öteleme ve ölçek gibi konumsal dönüşüm parametrelerinden tamamen bağımsız, görüntü alım noktası konum değişimi ve yüzey aydınlanma farklılıklarından kısmen bağımsız olarak çalışabilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Su vd., 2017). Seyrek nokta bulutu ise demet dengelemesi prosedürleri aracılığıyla kameranın iç ve dış yöneltme değerleri olduğu gibi anahtar noktaların üç boyutlu konumundan eş zamanlı çözümü ile üretilir (Snavely vd., 2006). Üretilen RGB ve termal seyrek nokta bulutları Şekil 3.6 ve 3.7’de verilmiştir.



Şekil 1.17 RGB seyrek nokta bulutu

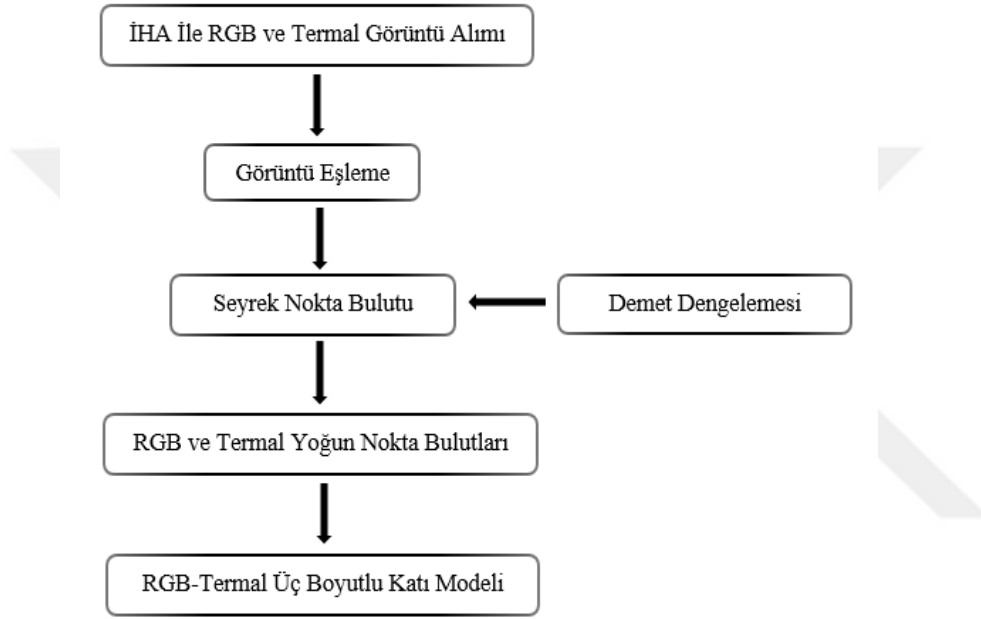


Şekil 1.18 Termal seyrek nokta bulutu

Görüntülerin yöneltilmesi sonucu elde edilen RGB ve termal seyrek nokta bulutlarının arasında belirgin farklar göze çarpmaktadır. İlk olarak, termal kameraların dar görüş alanı nedeniyle RGB seyrek nokta bulutuna göre kapsama alanı dardır. İkinci olarak, termal görüntülerin RGB görüntülere kıyasla bulanık ve pürüzlü olması nedeniyle tespit edilen eşlenik nokta sayısı daha azdır. Bu nedenle çalışma, görüntü eşleme hususunda en son gelişmeleri termografiye transfer ederek veri kombinasyonu metodolojisini önermektedir.

3.7. Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Çalışma, yüksek çözünürlüklü coğrafi olarak referanslandırılmış RGB görüntüler ile RGB görüntülere kıyasla düşük çözünürlüklü termal görüntülerin eş zamanlı olarak kayıt edilmesi ile sıcaklık bilgisi ve geometrik bilginin basitleştirilmiş füzyonuna dayanmaktadır. Önerilen metodoloji ana hatlarıyla Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 1.19 Önerilen metodoloji için işlem adımları

Yaklaşımında, ticari sınıf insansız hava aracına monte edilen çoklu sensörlü kamera kullanılmıştır. İnsansız hava aracına entegre edilen çoklu sensörlü kamera sayesinde binanın ve yakın çevresinin RGB ve termal görüntüleri aynı anda elde edilmiştir. Elde edilen iki boyutlu görüntülerden, temeli SfM algoritması tekniğine dayanan Agisoft Metashape yazılımı ile üç boyutlu nokta bulutları üretilmiştir. SfM tekniğinin ana unsurunu oluşturan görüntü eşleme teknikleri, fotoğraflardan doğrudan nokta bulutlarının otomatik üretimi için fotogrametride kullanılmıştır. Tipik olarak paralel konumlardan aynı objenin görüntü çiftleri arasında aynı yollar için bir araştırma algoritmasından oluşur. Böylece daha yüksek çözünürlüklü nokta bulutu kalitesi elde edilmektedir. Fotogrametrik teknikler kullanılarak söz konusu binanın termografik görüntülerinin sıralanıp yöneltilmesi ile dokulandırılmış yüksek çözünürlüklü üç boyutlu model kaydı ile nokta bulutlarının birleştirilmesi mümkün

hale getirilmiştir. Termal seyrek nokta bulutuna oranla nispeten yüksek çözünürlüklü RGB seyrek nokta bulutu Agisoft Metashape programında birleştirilmiştir. Birleştirilmiş RGB-termal seyrek nokta bulutunun ardından çeşitli fotogrametrik zorunlulukların yerine getirilmesi ile RGB-termal yüksek çözünürlüklü katı modeli üretilmiştir. Üretilen katı model ile binanın yalıtım durumunu incelemek elverişlidir. Nihai ürün ile, bina ısı yalıtım sistemlerinin eksikliklerinin ortaya konması için bir metodoloji önerilmiştir.



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde çalışma kapsamında fotogrametrik zorunlulukların yerine getirilip elde edilen nihai ürünler ve sayısal değerleri verilmektedir.

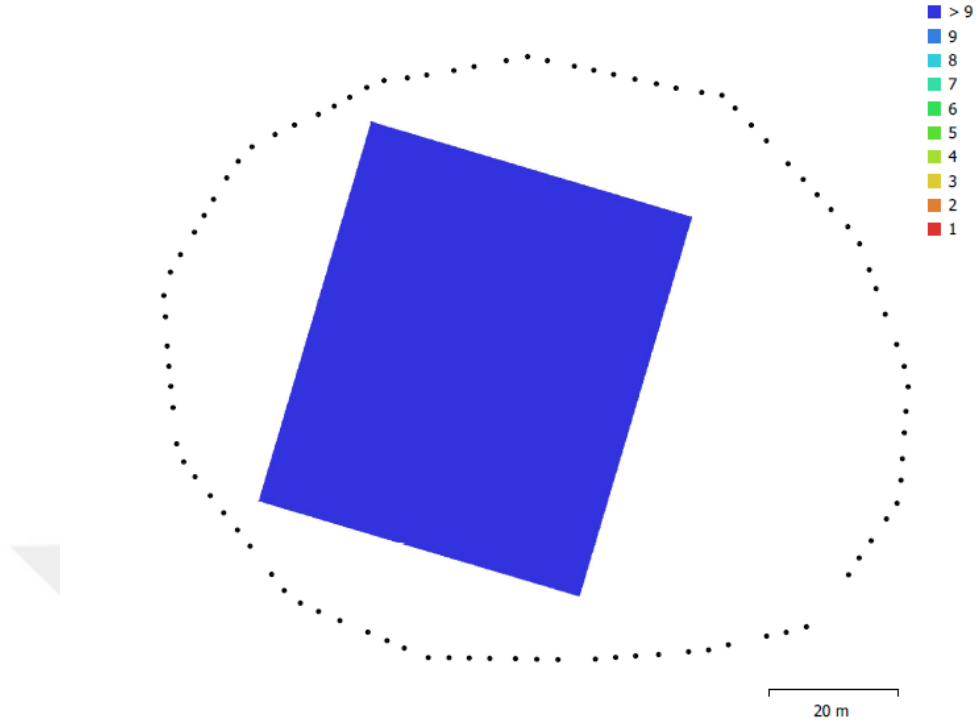
4.1. RGB Katı Modeli

Fotogrametrik zorunluluklar dikkate alındığında, yüksek bindirme oranlı RGB görüntülerin kazanımı ve yöneltilmesi sonucu RGB nokta bulutu üretilmiştir. Yüksek bindirme oranlı RGB görüntü örneği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



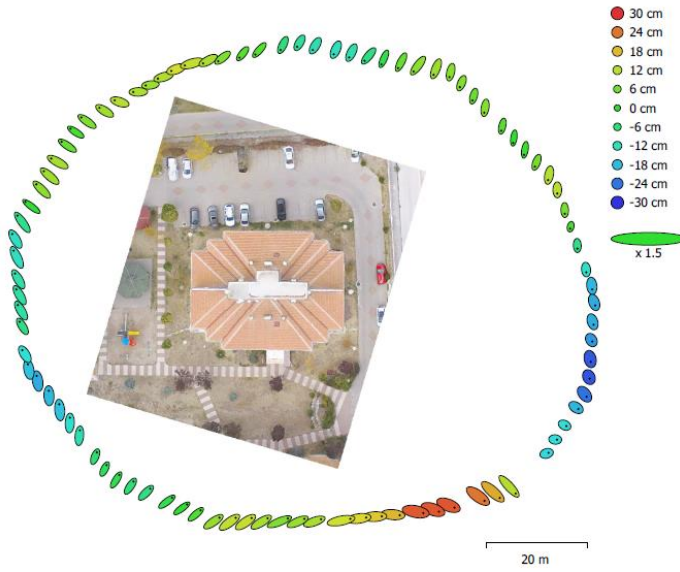
Şekil 1.20 %80 bindirme oranlı çekilmiş örtüşen RGB görüntüler

SIFT görüntü eşleme algoritmasının iyi çalışabilmesi için gerçekleştirilen görüntü alımında uçuş planı büyük önem taşımaktadır. Yüksek oranda bindirmeli görüntülerden oluşan düzenli ve sık kamera konumları ile elde edilmesi istenen nesnenin tüm cephelerinin alındığı bir uçuş planı ile yüksek çözünürlüklü 3B modelin üretilmesi kaçınılmazdır. Çalışmada, İHA’ya entegre edilen çoklu sensörlü kamera ile çekilmiş RGB görüntülerin uçuş planı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.21 Kamera konumlarının nesne üzerinde yer alan konumları

RGB yoğun nokta bulutunun kamera konumları ve hata tahminlerine dair görsel Şekil 14' te verilmiştir.



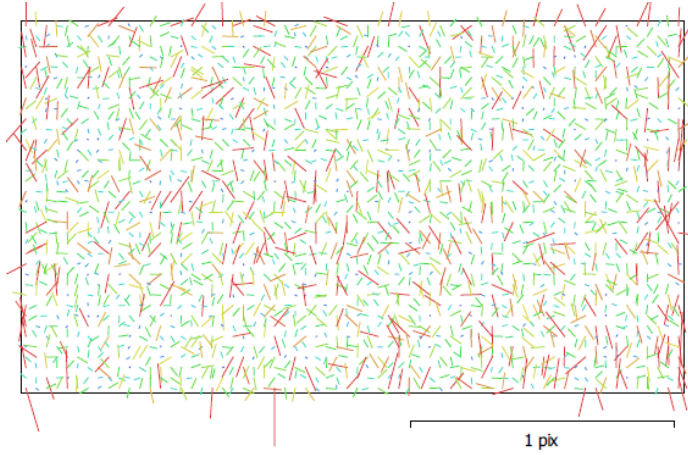
Şekil 1.22 Kamera konumları ve yaklaşık hata değerleri

Kamera kalibrasyonu anlatımından önce uçuşa dair kamera konum sayısı, uçuş yüksekliği, bağlantı nokta sayısı gibi birtakım bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 1.5 Uçuş planına dair birtakım bilgiler

Kamera Konumu Sayısı	92
Uçuş Yüksekliği	60.5 m
Bağlantı Noktası Sayısı	72.853
Ölçek	280.032

Termografik ve metrik bilgi kombinasyonu için tek yol lazer tarama ile termografilerin füzyonu değildir. Bu yöntemin tercih edilmeyip İHA fotogrametrisi talebinin artmasının nedeni zamanın kısıtlı oluşu ve pratik olmayışındandır. Agisoft Metashape programı ile İHA aracılığıyla kazanılan görüntülerin yöneltmesi sonucu görüntüde yer alan anahtar nokta çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Kamera kalibrasyon parametreleri ile görüntülerin işlenmesi adımının ardından görüntülerde meydana gelen vektörel konum hataları Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 1.23 Yuneec E10Tvx kamerasının vektörel konum hataları

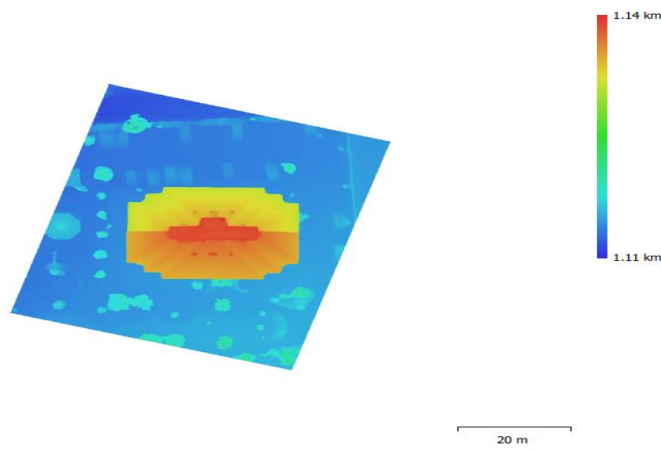
İHA’ya entegre edilen çoklu sensörlü kameranın gerçekleştirilecek uçuş sırasında kamera kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Fotogrametride kullanılan metrik kameraların en önemli özelliği, iç yöneltme elemanları ve kamera distorsiyon hatalarının bilinmesidir. Bir

çeşitli mercek kusuru olan distorsiyonlar fotoğraf üzerinde nesne konumunun değişimine neden olmaktadır. RGB kameranın kalibrasyon parametrelerine dair bilgiler Tablo 4.2’de verilmiştir. F ifadesi odak uzaklığını, K1 ve K2 radyal distorsiyon parametrelerini ve P1 ve P2 teğetsel distorsiyon parametrelerini ifade etmektedir.

Tablo 1.6 RGB kameranın kalibrasyon korelasyon matrisi

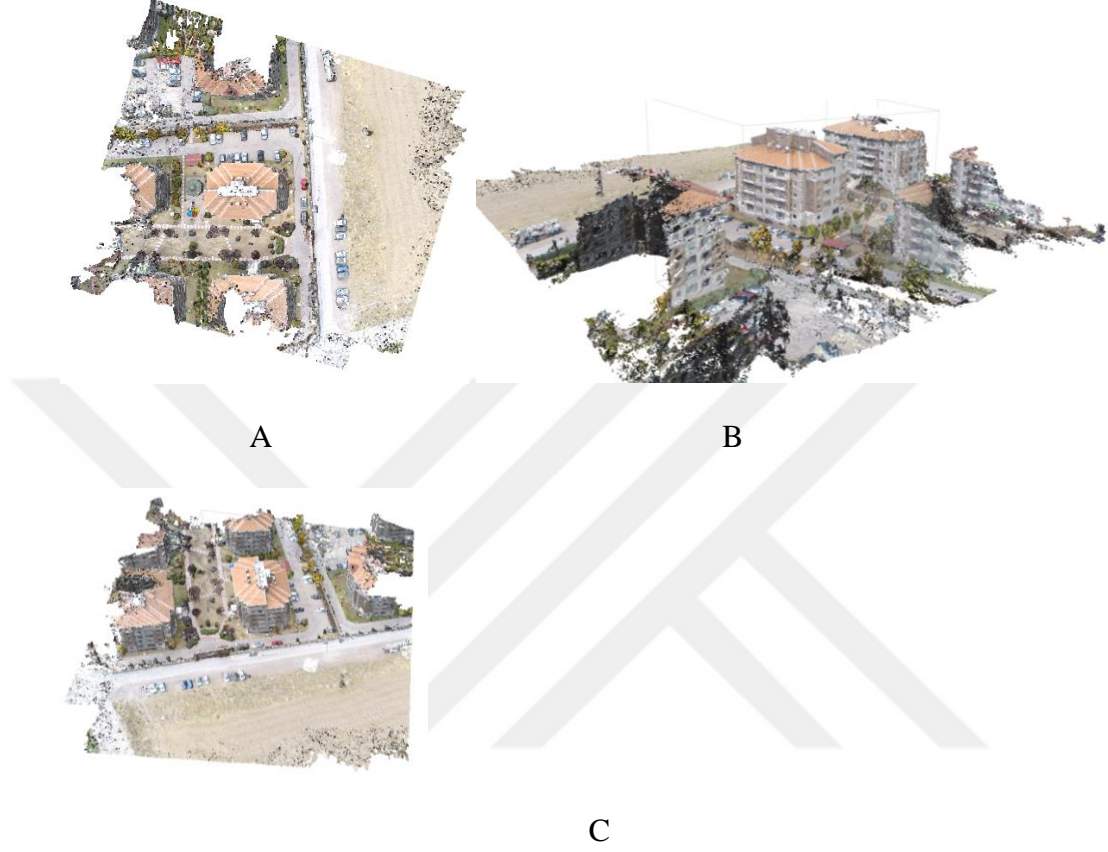
	Değer	Hata	F	K1	K2	P1	P2
F	1255.94	0.14	1.00	-0.14	0.46	0.04	-0.40
K1	-0.11010	0.00092		1.00	-0.81	-0.06	-0.19
K2	0.09916	0.00011			1.00	0.04	-0.13
P1	-0.00039	0.00002				1.00	0.01
P2	0.00016	0.00002					1.00

Nokta bulutlarının birleştirilmesi yöntemi termal verinin yüksek konum doğruluğu ile görselleştirilmesine imkan tanımaktadır. Yöntem ile RGB nokta bulutunun yüksek çözünürlüğü ve nokta sıklığı, termal nokta bulutuna kazandırılmaktadır. Ek olarak, veriler eş zamanlı alınıp birlikte yönetildiği için veri füzyonu kolaylaştırılmaktadır. Birleştirilen RGB ve termal nokta bulutları aracılığıyla elde edilen sayısal yükseklik modeli Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 1.24 Üretilen sayısal yükseklik modeli

Üretilen RGB sayısal yükseklik modelinin çözünürlüğü 9.82 cm/pix, nokta yoğunluğu ise metrekare başına 104 noktadır. Üretilen RGB yoğun nokta bulutunun çeşitli açılardan gösterimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 1.25 A) RGB yoğun nokta bulutu önden görünüm B) RGB yoğun nokta bulutu kuzey-batı görünümü C) RGB yoğun nokta bulutu güney-doğu görünümü

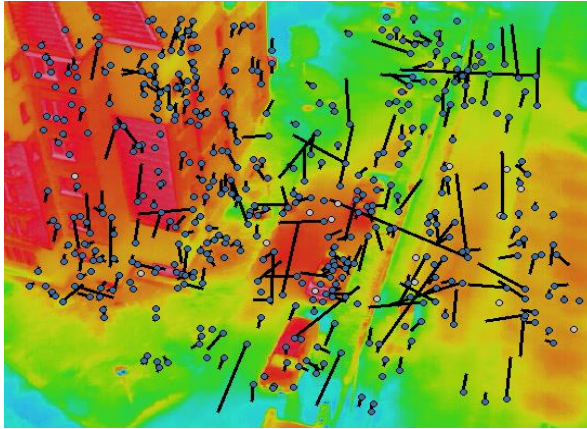
RGB yoğun nokta bulutunun üretiminin ardından Agisoft Metashape programı aracılığıyla ortofotosu elde edilmiş olup Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 1.26 RGB Ortofoto

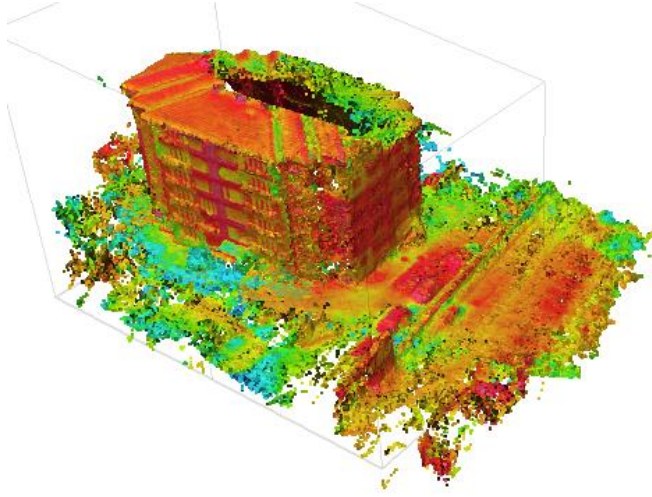
4.2. Termografik Mozaik Üretimi

Yüksek oranla örtüşen stereo görüntüler ile tüm cepheler her açıdan alınmıştır. Böylelikle, bakış açısı etkileri elimine edilerek mozaik üretimi için ihtiyaç duyulan piksel boyutu ve görüntü sınırlarındaki distorsiyonlar iyileştirilmiştir. Program SIFT algoritmasını kullanarak özellik tanıma vektörleri aracılığıyla her bir görüntüye bağlantı noktaları atamaktadır. Bağlantı noktalarının gösterimi Şekil 4.8’dir.



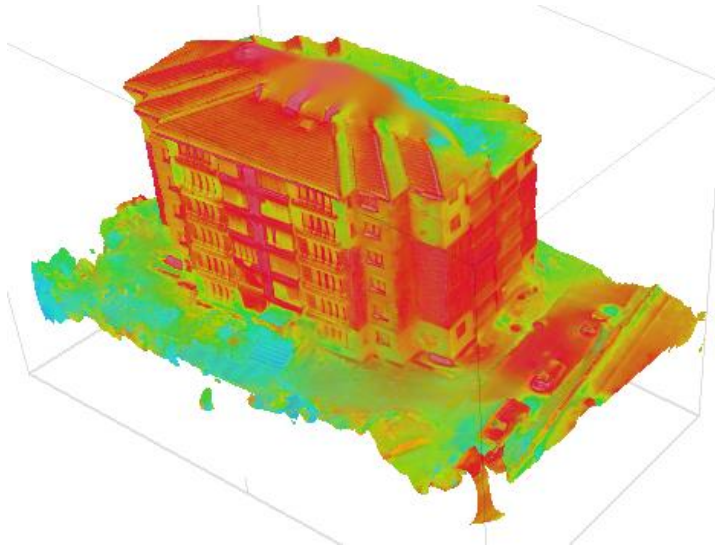
Şekil 1.27 Bir termal görüntü örneğinde bağlantı noktalarının gösterimi

Termografik görüntülerin kayıt edilmesi örtüşen görüntülerin her biri yönelti olarak termografik yoğun nokta bulutu üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen termografik yoğun nokta bulutu Şekil 4.9’da verilmiştir.



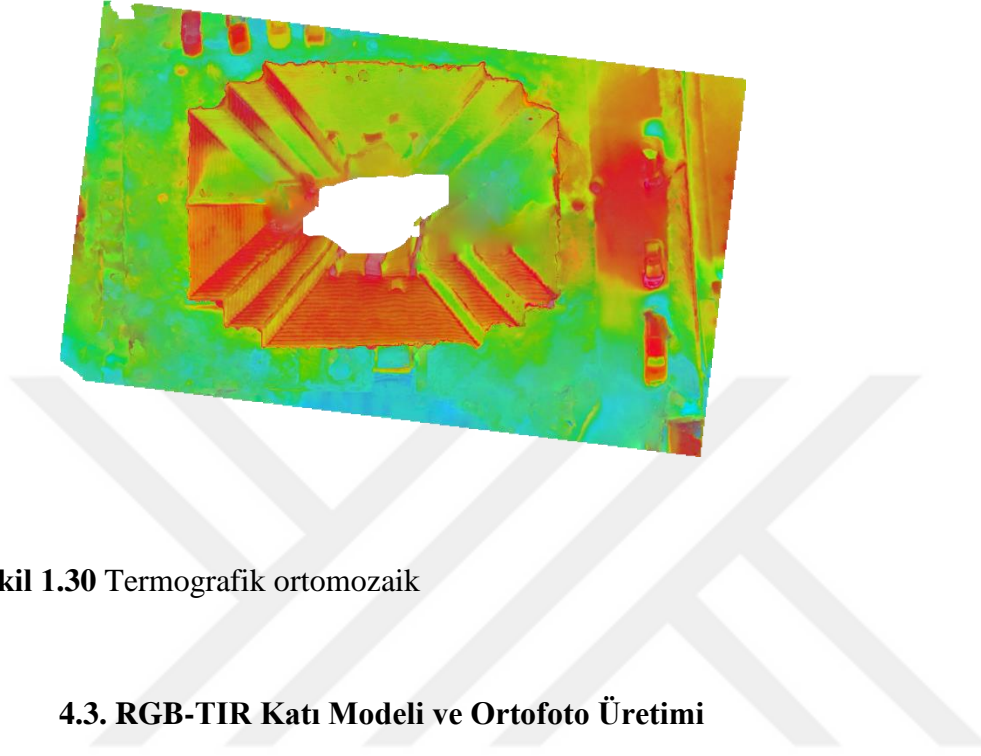
Şekil 1.28 Termografik yoğun nokta bulutu

Çoklu sensörlü kamera ile elde edilen verilerin birleştirilmesi oldukça yeni bir yaklaşımdır. Buna rağmen, sağlayacağı yüksek kalitede metrik bilgiler ve sunduğu termal bilgi ile pek çok uygulamada kullanılabilir. MVS tekniği ile yer referans verisine sahip seyrek nokta bulutu yoğunlaştırılarak yoğun nokta bulutu elde edilmektedir. Yoğun nokta bulutu baz alınarak oluşturulan termografik katı model Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 1.29 Termografik üç boyutlu katı modeli

Termografik yoğun nokta bulutunun Agisoft Metashape programı ile ortomozaik oluşturulmuştur. Oluşturulan ortomozaik Şekil 4.11’de verilmiştir.



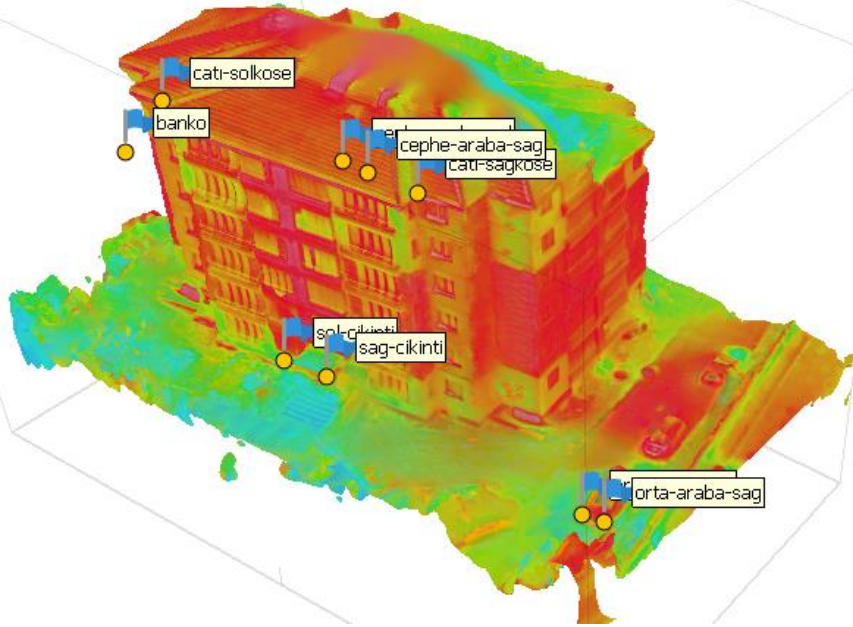
Şekil 1.30 Termografik ortomozaik

4.3. RGB-TIR Katı Modeli ve Ortofoto Üretimi

Bina yorumlama için termografinin asıl yararı, ölçümün sürekli bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Harcanan emeğin azalması ile yüzlerce nokta ölçme ihtiyacını da ortadan kaldırmaktadır. Termografik ve metrik bilgiyi kombine etmek için tek çözüm lazer tarama ile termografileri füzyon etmek değildir. Bu nedenle lazer tarama yöntemi zamanın kısıtlı oluşu ve küçük alanlarda pratik olmayışı nedeniyle tercih edilmez. Önerilen yöntem, düşük çözünürlüklü termal görüntülere doğrudan görüntü eşleme algoritmalarını uygulamak yerine birleştirilmiş görüntüleri kullanmaktadır. Yüksek çözünürlüklü ve konum doğruluğu termal nokta bulutuna kıyasla yüksek RGB nokta bulutuna ve termal nokta bulutuna işaretlenen noktalar aracılığıyla birleştirme işlemi gerçekleştirilebilir. Bu nedenle yüksek kalitede birleştirilmiş nokta bulutları için işaretleme noktaları her iki nokta bulutunda ayrı olmak üzere tanımlanmıştır. İşaretleme noktaları, nokta bulutlarında ortak belirgin unsurlar aranarak atanmıştır. İşaretleme noktalarının RGB ve termal model üzerinde gösterimi Şekil 4.12 ve 4.13’de verilmiştir.



Şekil 1.31 RGB katı modeli üzerinde işaretlenen nokta konumlarının gösterimi



Şekil 1.32 Termal katı modeli üzerinde işaretlenen nokta konumlarının gösterimi

RGB ve termal nokta bulutlarının işaretlenen noktalar referans alınarak füzyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen füzyona dair kamera konum sayısı, uçuş yüksekliği gibi bazı bilgiler Tablo 4.3'te belirtilmiştir.

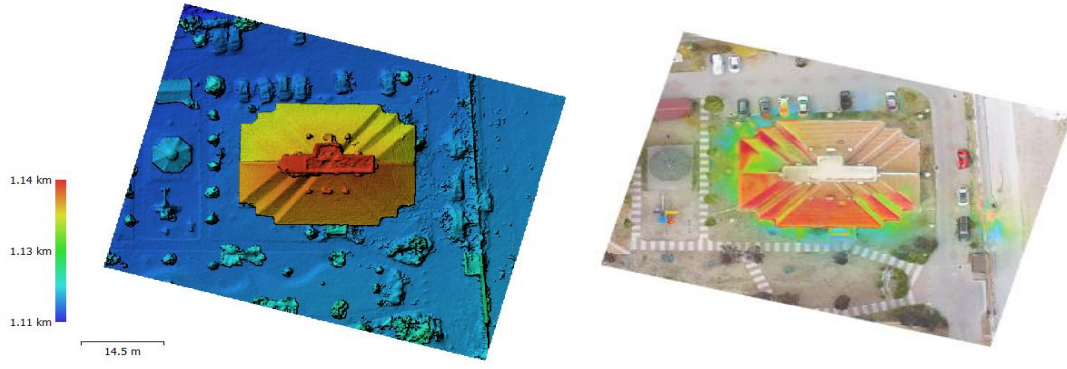
Tablo 1.7 Nokta bulutlarının birleştirilmesine dair bazı parametreler

Kamera Konumu Sayısı	92
Uçuş Yüksekliği	60.5 m
Alan Boyutu	$3.62 \times 10^3 \text{ m}^2$
Bağlantı Noktası Sayısı	84.729
Ölçek	315.003

Üç boyutlu nokta bulutunda termal ve RGB verilerin sıklığı, yoğun nokta bulutu elde edildikten sonra oluşturulacak sayısal yükseklik modelinin kalitesini arttırmaktadır. Birleştirilmiş katı model ve sayısal yükseklik modeli Şekil 4.14 ve 4.15'de verilmiştir.



Şekil 1.33 Birleştirilmiş katı modelin farklı açıları



Şekil 1.34 Birleştirilmiş sayısal yükseklik modeli (SYM) ve ortofoto

Birleştirilmiş RGB-termal yoğun nokta bulutunun çözünürlük değeri 9.79 cm/pix iken metrekare başına düşen nokta yoğunluğu 104'tür.

Nokta bulutlarının birleştirilmesi yöntemi termal verinin yüksek konum doğruluğu ile görselleştirilmesine imkan tanınmaktadır. RGB nokta bulutunun yüksek çözünürlüğü ve nokta sıklığı, termal nokta bulutuna kazandırılmaktadır. Ek olarak, veriler aynı zamanda alınıp birlikte yöneltildiği için nokta bulutlarının birleştirilmesi kolaylaştırılmaktadır.

4.4. Doğruluk Analizi

Tez çalışması kapsamında İHA fotogrametrisi tekniği ile bina ısı yalıtımının kalitesi RGB ve termal görüntülerin füzyonu gerçekleştirilmiştir. RGB görüntülerden elde edilen nokta bulutunun kamera konumları ile yüksek bindirme oranlı görüntüleri alınmıştır. Verilerin programda işlenebilmesi için görüntülerin yöneltme işlemleri Agisoft Metashape yazılımında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, İHA'ya entegre edilen çoklu sensörlü kameranın veri alımından önce kalibrasyonu yapılmıştır. Kameranın kalibrasyon değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Kamera kalibrasyon değerleri termal sensör için farklılık göstermektedir. Çözünürlük boyutları termal kameranın doğası gereği de değişiklik göstermektedir. RGB sensör çözünürlüğü 1920×1080 iken termal sensörün çözünürlüğü 640×512'dir. Bu nedenle iç yöneltme parametreleri farklılık göstermektedir. RGB ve termal kameraların korelasyon matrisleri Tablo 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

Tablo 1.8 RGB kameranın korelasyon matrisi

	Değer	Hata	F	K1	K2	P1	P2
F	1255.94	0.14	1.00	-0.14	0.46	0.04	-0.40
K1	-0.11010	0.00092		1.00	-0.81	-0.06	-0.19
K2	0.09916	0.00011			1.00	0.04	-0.13
P1	-0.00039	0.00002				1.00	0.01
P2	0.00016	0.00002					1.00

Tablo 1.9 Termal kameranın korelasyon matrisi

	Değer	Hata	F	K1	P1	P2
F	1132.04	2.40000	1.00	0.11	-0.02	0.20
K1	-0.19022	0.00200		1.00	-0.01	0.25
P1	-0.00013	0.00028			1.00	-0.01
P2	-0.00078	0.00038				1.00

Burada F odak uzaklığını, K1 ve K2 değerleri radyal distorsiyonu ve P1 ve P2 teğetsel distorsiyon değerlerini ifade etmektedir. RGB yoğun nokta bulutunda toplam nokta sayısı 2792.968 iken termal nokta bulutunda 11.879'dur. Füzyonu gerçekleştirilmiş RGB-termal nokta bulutunun nokta sayısı 84.729'dur. Görüntü eşleme algoritmaları doğrudan termal görüntülere uygulandığında yeterli sayıda eşlenik noktası üretilmemektedir. Fotogrametride kullanılan metrik kameraların en önemli özelliği, iç yöneltme elemanları ve kamera distorsiyon hatalarının bilinmesidir. Bir çeşit mercek kusuru olan distorsiyonlar fotoğraf üzerinde nesne konumunun değişimine neden olmaktadır.

Yüksek kalitede termal nokta bulutu üretiminde bahsedilen zorlukların üstesinden gelmek amacıyla RGB görüntülerden yararlanılmıştır. Metodolojide, RGB ve termal yoğun nokta bulutunda ayrı ayrı işaretlenen belirli bir konumu temsil eden noktalar sayesinde nokta bulutları birleştirilmiştir. Böylelikle, termal görüntülerin dar kapsama alanı ve farklı yükseklikten alınması nedeniyle ortaya çıkabilecek hatalar elimine edilmiştir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde birçok ülkenin nüfus miktarına oranla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyması sebebiyle binalardaki enerji kullanımının ve verimliliğinin önemi artmıştır. Enerjinin en çok tüketildiği alanlardan biri olan yapılarda enerji tasarrufunu sağlayabilmek için ısı yalıtımı yapılmalıdır. Binalarda enerji verimliliğinin artırılması için yalıtım kalitesi geliştirilmelidir. Son yıllarda, sürdürülebilir enerji kavramının dikkatleri çekmesiyle birlikte binaların enerji verimliliğini arttırmak için bir bina ısı gözlem teknolojisi gereklidir. Bu tez çalışmasında, yüksek çözünürlüklü ve konum doğruluğuna sahip RGB görüntüler ile bu görüntülere kıyasla düşük çözünürlüklü olan termal görüntüler birleştirilmiştir. Nokta bulutlarının birleştirilmesi, ısı kaybı haritalama, yangın izleme, elektriksel unsurların tespit edilmesi ve afet yönetimi için büyük potansiyele sahiptir. Bina ısı yalıtımı, termal görüntüler aracılığıyla kısa zaman ve hesap yükünün azaltılması sayesinde kolaylıkla gözlemlenebilir. Gerçekleştirilen çalışmada, çoklu sensörlü kamera ile kazanılan görünür görüntülerin çözünürlüğünün yüksek olması nedeniyle yüksek kalitede üç boyutlu nokta bulutu üretimi gerçekleştirilmiştir. Stereo görüntüler yüksek bindirme oranlı olarak nadir ve oblik çekilmiş görüntülerden oluşmaktadır.

Çoklu sensörlü kamera ile kazanılan termal görüntülerin, gün ışığında kazanılmış olması, termal görüntülerin doğası gereği kapsama alanının dar, pürüzlü ve bulanık olması nedeniyle daha düşük çözünürlüklü termal nokta bulutu elde edilmiştir (Şekil 4.9). Görüntü eşleme algoritmaları doğrudan termal görüntülere uygulandığında yeterli sayıda eşlenik noktası üretilmemektedir. Nokta yoğunluğu konusunda belirgin fark Şekil 4.6 ve 4.9'da açıkça görülmektedir. Ek olarak, RGB nokta bulutu üretim aşamasında tespit edilen bağlantı nokta sayısı 72.853 ve termal nokta bulutu bağlantı noktası sayısı 11.856 değerine odaklanıldığında azalma gözlenmiştir. Termal görüntülerin kalibrasyonu esnasında hata değerlerinin RGB kamera kalibrasyonuna kıyasla arttığı gözlenmiştir. Yüksek kalitede termal nokta bulutu üretiminde bahsedilen zorlukların üstesinden gelmek amacıyla RGB görüntülerden yararlanılmıştır. Metodolojide, RGB ve termal yoğun nokta bulutunda ayrı ayrı işaretlenen belirli bir konumu temsil eden noktalar sayesinde nokta bulutları birleştirilmiştir. Böylelikle, termal görüntülerin dar kapsama alanı ve farklı yükseklikten alınması nedeniyle ortaya çıkabilecek hatalar elimine edilmiştir.

Termal görüntülerin üzerine gün ışığı etkisinin geceye kıyasla daha fazla bozucu olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkılarak daha geniş kapsamlı uygulamalar için veri kazanımı geceleyin yapılmalıdır. Veri alımı gerçekleştirilecek unsurun etrafında termal görüntü kazanımını güçleştirecek ağaç, araba gibi objelerin miktarına ve mesafesine dikkat edilmelidir.

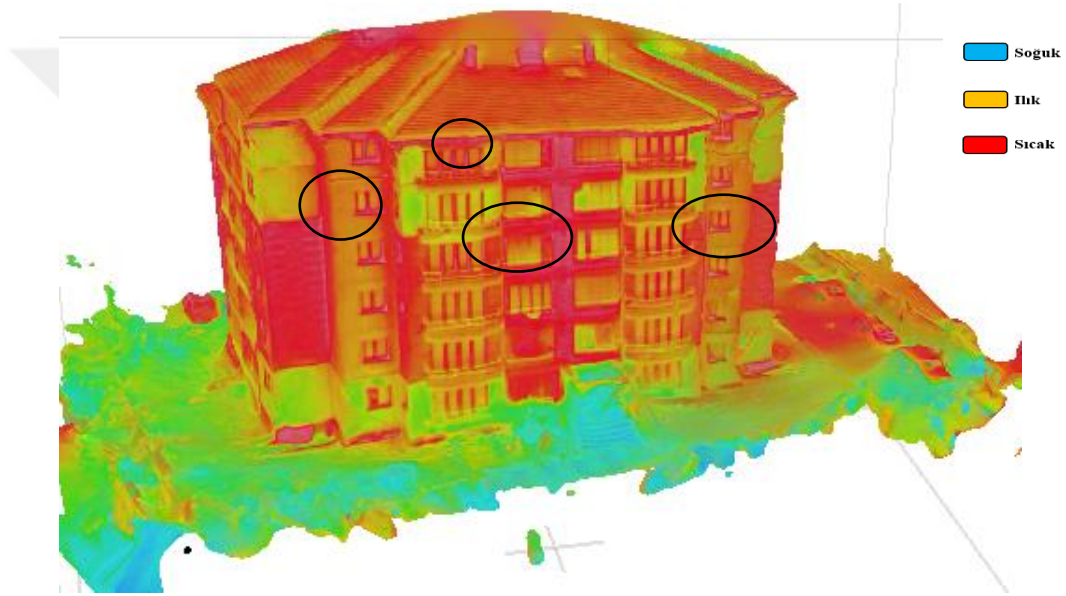


Şekil 1.35 RGB-Termal üç boyutlu modelin batı cephesi

Uygulama kapsamında kazanılan görüntüler yönlendirilmiştir. Böylece mesafeler gerçek bir ölçekte idealize edilmiştir. Bu prosedür görüntü eşleme temeline dayanmaktadır. RGB ve termal görüntüler bahsedilen görüntü füzyonu için ayrı ayrı yönlendirilmiş olup bir dizi kamera konumları hesaplanmıştır. RGB-termal yoğun nokta bulutu ve üç boyutlu katı modeli hesaplanan kamera konumlarına bağlı üretilmiştir. Termografik görüntülerin birleştirilmesi ile oluşturulan termografik mozaik görüntü eşleme algoritmalarına tabi tutularak görüntü füzyonunu mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım ayrıca yer kontrol noktalarının tesis edilme ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Bu algoritma, termal ve dijital görüntüler arasında epipolar geometrisi ve yoğun rekonstrüksiyon için MVS algoritmasını oluşturarak göreceli dönüşümü tek seferlik bir termal kamera kalibrasyonunu içerir.

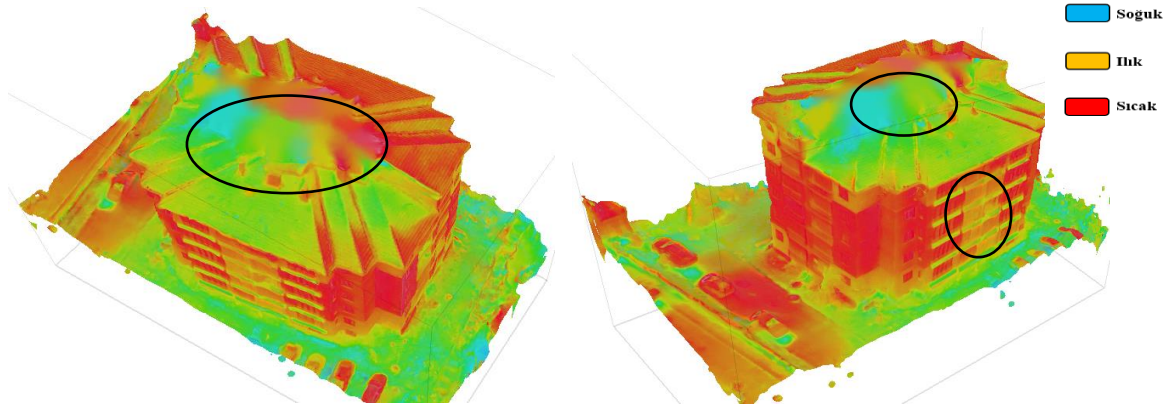
Termografik yorumlama aracılığıyla bir binanın cephe bazlı nemlilik ve ısı kaçakları kolaylıkla hassas bir şekilde gözlenebilmektedir. Ancak yüksek yansıtımlı yüzeyler dikkatli yorumlama gerektirir. Bu da fotogrametri ile mümkündür.

Uygulama kapsamında özellikle çatı, balkon ve pencerelerde yalıtımsızlık sebebiyle ısı kaçakları yoğun olarak tespit edilmiştir. Duvarlardaki ısı yalıtımının uygun olduğu Şekil 5.2’de görüldüğü üzere sıcaklığın yüksek olması ile anlaşılmaktadır. Ayrıca, binada boru hatlarının geçtiği yerler sıcaklık farklılıklarına dayanılarak tahmin edilebilmektedir. Katlar arasında sıcaklık farkları göz önüne alındığında, ısı yalıtımının eksikliği sebebiyle veya harcanılan yakıt miktarının azlığı nedeniyle meydana gelip gelmediği tahmini yürütülebilmektedir. Yoğun ısı kaçaklarının tespit edildiği yerler siyah daireler ile işaretlenmiş olup Şekil 5.2’de verilmiştir.



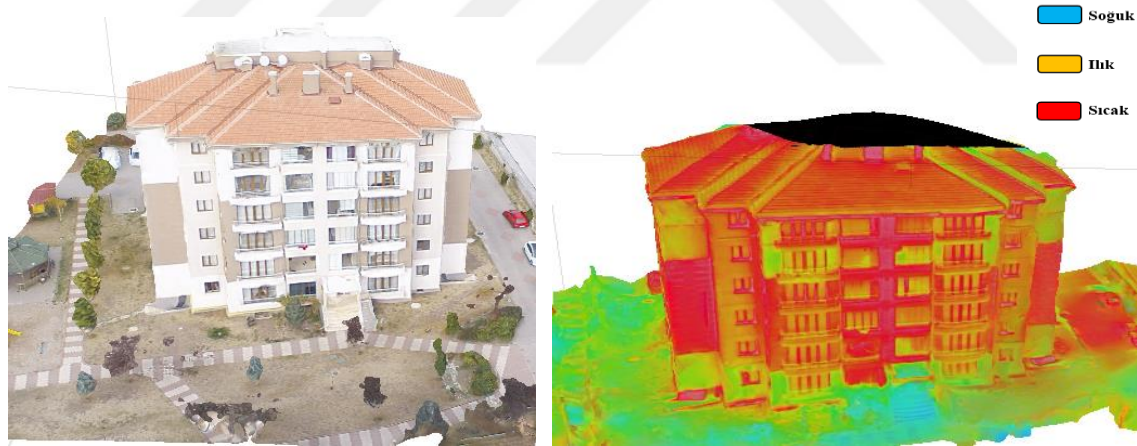
Şekil 1.36 Termal üç boyutlu katı modelin güneybatı cephesi

Binalarda ısı yalıtımı söz konusu olduğunda bina cephelerinin ısıl konforunun minimum enerji kullanılarak sağlanması büyük önem taşımaktadır. Çalışmada, bina ısı yalıtım sistemlerinin eksikliklerinin ortaya konması için yeni bir sistem ortaya konmuştur. Sonuç olarak, birleştirilen nokta bulutları ile üretilen ürünler, yüksek çözünürlüklü termal bilgiler ile donatılmış görünür görüntülerdir. Görüntü alımında kamera konumlarından anlaşılacağı üzere birkaç kamera konumu arasındaki mesafe arttığı için Şekil 5.3’de görüldüğü gibi siyah daireler ile belirtilen model boşlukları meydana gelmiştir.



Şekil 1.37 Termal katı modelin bozuk yönleri

Bu çalışma, İHA kullanılarak SfM tekniği ile termografik ve RGB model birleştirilmiştir. Aynı açıdan termal ve RGB görüntü katı modelin çözünürlük farkı Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 1.38 Aynı açıdan iki farklı modelin karşılaştırılması

Termal görüntülerin yöneltmesi ve eşlenmesi zordur ancak görünür görüntüler referans alınarak bu güçlük ortadan kaldırılabilir. Çalışma sonucunda elde edilen RGB-termal üç boyutlu model enerji iyileştirme çalışmaları, suç araştırmaları ve daha pek çok uygulama için kullanılabilir. Gelecek çalışmalarda daha yüksek çözünürlüklü bir termal kamera kullanılarak ortaya çıkan model boşluklarının giderilmesi amaçlanacaktır. Ek olarak, yer kontrol noktası tesis edilerek nokta konum hatalarının azaltılması hedeflenecektir.

Termal görüntüler güneş ışığının yansımından etkilendiği için termal ve RGB veriler yaz, kış ve gece, gündüz olmak üzere gerçekleştirilecek veri kazanımı ile zamansal analiz aracılığıyla bozucu etkiler ortaya konulabilir. Bu çalışmada ayrıca bina yüzey değerlendirmesi yapılmıştır. Termal kameraların kalibrasyonu, yüksek doğrulukta model üretmek için önemlidir.

Kullanıcıların, sıcaklıkları üç boyutlu noktalar düzeyinde görselleştirmelerini, sorgulamalarını ve analiz etmelerini sağlayan üç boyutlu termal modeller oluşturulmuştur. Isı köprülerinin gözlenmesini sağlayarak, bina enerji tasarrufunun sağlanmasına yönelik bir analiz gerçekleştirilmiştir.



KAYNAKÇA

- Acar, H. (2012). Nokta Belirleme Algoritmaları İle Otomatik Görüntü Eşleştirme. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon
- Aicardi, I., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., & Spanò, A. (2016). UAV Photogrammetry With Oblique Images: First Analysis on Data Acquisition and Processing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Akgül, M., Yurtseven, H., Demir, M., Abdullah, Akay., Gülci, S., & Öztürk, T. (2016). İnsansız hava araçları ile yüksek hassasiyette sayısal yükseklik modeli üretimi ve ormancılıkta kullanım olanakları. *Journal of Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(1), 104-118.
- Alba Ivan Mario L.B., 2011. Mapping Infrared Data On Terrestrial Laser Scanning 3D, Remote Sensing, Milan.
- Ankara'nın Haritadaki Yeri. (10 Ağustos, 2022). Erişim adresi: https://ustaderslik.com/konu/HTML5_Svg_T%C3%BCrkiye_Haritas%C4%B1
- Arslanbek, L. (2009). Farklı kaynaklardan elde edilen sayısal yükseklik modellerinin ortofoto doğruluğuna etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı, Afyonkarahisar
- Aslantas, V., Bendes, E., Kurban, R., & Toprak, A. N. (2014). New optimised region-based multi-scale image fusion method for thermal and visible images. *IET Image Processing*, 8(5), 289-299.
- Borrmann, D., Elseberg, J., & Nüchter, A. (2013). Thermal 3D mapping of building façades. In *Intelligent autonomous systems 12* (pp. 173-182). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Borrmann D., Nüchter A., Dakulovic M. Ve Maurovic I., 2012. The Project Thermal Mapper – Thermal 3D Mapping Of Indoor Environments for Saving Energy, Intelligent Robots and Systems (IROS), 4538-4539.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.

- Cao, L., Liu, H., Fu, X., Zhang, Z., Shen, X., & Ruan, H. (2019). Comparison of UAV LiDAR and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests. *Forests*, 10(2), 145.
- Cho, Y., & Wang, C. (2011). 3D thermal modeling for existing buildings using hybrid LIDAR system. In *Computing in Civil Engineering (2011)* (pp. 552-559).
- Çalışan, M., & Türkoğlu, İ. (2011). Termal kameralar ve uygulamaları. *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011)*, 46, 50.
- Çelik, M. Ö., Yakar, İ., Hamal, S., Oğuz, G. M., & Kanun, E. (2020). Sfm tekniği ile oluşturulan 3B modellerin kültürel mirasın belgelenmesi çalışmalarında kullanılması: Gözne Kalesi örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 22-27.
- Dji phantom 4 rtk. (2022, 7 Temmuz). Erişim adresi: <https://www.djistoreturkiye.com/dji-phantom-4-rtk-6958265168628>
- Döner Kanatlı İHA. (2018, 7 Ocak). Erişim adresi: <https://www.kokpitteyiz.com/doner-kanatli-ihalarin-ucus-prensibi/>
- Drone ile Haritalama. (2021, 20 Haziran). Erişim adresi: <https://dronharita.com/iha-haritalama/>
- Duran, Z. (2003). Tarihi eserlerin fotogrametrik olarak belgelenmesi ve coğrafi bilgi sistemine aktarılması (Dokta tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Durgut, A., & Akçay, Ö. (2016). Termal kamera ile ekran kartının 3 boyutlu modelinin oluşturulması. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 17(1), 51-63.
- Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry.
- Elektromanyetik Spektrum. (2022, 16 Temmuz). Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_spektrum
- Elektromanyetik spektrum dalga boyları. (2022, 16 Temmuz). Erişim adresi: <https://www.canlidershane.net/print?id=47071&url=https%3A%2F%2Fwww.canlidershane.net%2Felektromanyetik-dalgalar-47071%3Fid%3D47071>

- Faundez-Zanuy, M., Mekyska, J., & Espinosa-Duro, V. (2011). On the focusing of thermal images. *Pattern Recognition Letters*, 32(11), 1548-1557.
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Dense 3d motion capture from synchronized video streams. In *Image and Geometry Processing for 3-D Cinematography* (pp. 193-211). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications*, 25(1), 245-262.
- Gençerk, E. Y. (2016). *İnsansız hava aracı fotogrametrisi uygulaması ile inşaat projesi imalat durumunun araştırılması* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- González-Jorge, H., Lagüela, S., Krelling, P., Armesto, J., & Martínez-Sánchez, J. (2012). Single image rectification of thermal images for geometric studies in façade inspections. *Infrared Physics & Technology*, 55(5), 421-426.
- Gökçen, M.F. (2022). Açık maden işletmelerinde yer kontrol noktalarının insansız hava aracı fotogrametrisi ile üretilen ürünlere etkisinin araştırılması (yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Ham Y. Ve Golparvar-Fard M., 2012. Rapid 3D Energy Performance Modeling of Existing Buildings Using Thermal and Digital Imagery. Construction Research Congress. 991-1000.
- Ham, Y., & Golparvar-Fard, M. (2013). An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery. *Advanced Engineering Informatics*, 27(3), 395-409.
- Han, D., & Huh, J. (2019, July). Thermal Data Fusion for Building Insulation. In *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)* (pp. 368-371). IEEE.
- Hoegner, L., Abmayr, T., Tomic, D., Turzer, S., & Stilla, U. (2018, June). Fusion of TLS and RGB point clouds with TIR images for indoor mobile mapping. In *Proceedings of the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference, Berlin, Germany* (pp. 1-9).

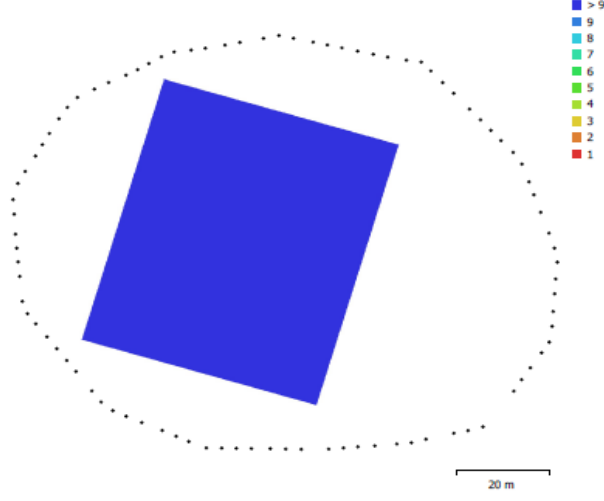
- İnsansız hava aracı sistemleri talimatı. (2022, 8 Eylül). Erişim adresi: http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/2020/SHT-IHA_Rev-04
- Javadnejad, F., Gillins, D. T., Parrish, C. E., & Slocum, R. K. (2020). A photogrammetric approach to fusing natural colour and thermal infrared UAS imagery in 3D point cloud generation. *International Journal of Remote Sensing*, 41(1), 211-237.
- Kraus, K. (1997). *Photogrammetry: Advanced methods and applications*. Dümmler.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans* (Vol. 1). Walter de Gruyter.
- Külür, S. (2002). Fotogrametri Ders Notları (basılmamış). *İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul*.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, 531-549.
- Lagüela, S., Armesto, J., Arias, P., & Herráez, J. (2012). Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques. *Automation in Construction*, 27, 24-31.
- Lagüela S., Gonzalez-Jorge H., Armesto J., Arias P., 2011. Calibration and Verification of Thermographic Cameras For Geometric Measurements, Infrared Physics and Technology, 92-99.
- Lowe, G. (2004). Sift-the scale invariant feature transform. *Int. J.*, 2(91-110), 2.
- Manioğlu, G., & Oral, G. K. (2010). Ekolojik yaklaşımda iklimle dengeli cephe tasarımı. *5. Ulusal Çatı Cephe Sempozyumu*, 15-16.
- Maset, E., Fusiello, A., Crosilla, F., Toldo, R., & Zorzetto, D. (2017). Photogrammetric 3D building reconstruction from thermal images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 25.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 473-486.

- Mohammed, O., & Yakar, M. (2016). Yersel Fotogrametrik Yöntem İle İbadethanelerin Modellenmesi. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 15(2), 85-95.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.
- Oreifej O., Cramer J., ve Zakhor A., 2014. Automatic Generation of 3d Thermal Maps of Building Interiors. American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc. C1-C8.
- Özemir, I., & Uzar, M. (2016). İHA İle Fotogrametrik Veri Üretimi. VI. UZAL-CBS Sempozyumu, 5(7).
- Öztürk, O., Bilgilioğlu, B. B., Çelik, M. F., Bilgilioğlu, S. S., & Uluğ, R. (2017). İnsanz hava aracı (İHA) görüntüleri ile ortofoto üretiminde yükseklik ve kamera açısının doğruluğa etkisinin araştırılması. *Geomatik*, 2(3), 135-142.
- Polat, N., & Uysal, M. (2018). An experimental analysis of digital elevation models generated with Lidar Data and UAV photogrammetry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7), 1135-1142.
- Rakha, T., & Gorodetsky, A. (2018). Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Automation in Construction*, 93, 252-264.
- Sabit Kanatlı İHA. (2020, 5 Mayıs). Erişim adresi: <https://airmim.com/urun/trinity-f90-sabit-kanatli-ih/>
- Sefercik, U. G., Karakış, S., & Atalay, C. (2018). Yüksek Konum Doğruluklu Nokta Bulutu Sağlayan Hava Kaynaklı Lazer İHA Üretimi ve Veri Kalitesinin Değerlendirmesi. VII. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2018), Eskişehir.
- Sledz, A., Unger, J., & Heipke, C. (2018). Thermal IR imaging: Image quality and orthophoto generation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives 42 (2018), Nr. 1, 42(1)*, 413-420.

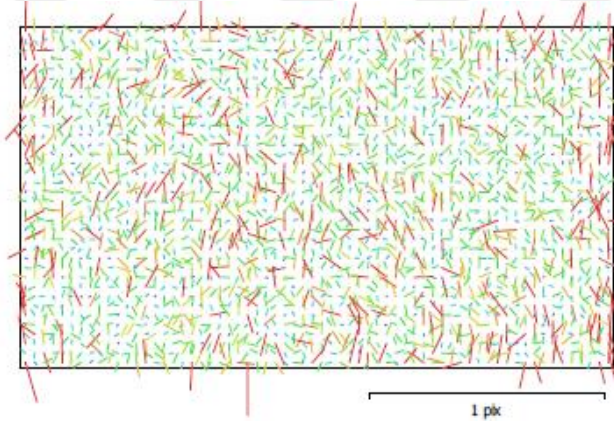
- Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. In *ACM siggraph 2006 papers* (pp. 835-846).
- Stockton G., 2010. Using Thermal Mapping At The Data Center, Proc., InfraMation.
- Su, M., Ma, Y., Zhang, X., Wang, Y., & Zhang, Y. (2017). MBR-SIFT: A mirror reflected invariant feature descriptor using a binary representation for image matching. *PloS one*, 12(5), e0178090.
- Tarık, Türk., & Öcalan, T. (2020). PPK GNSS Sistemine Sahip İnsansız Hava Araçları İle Elde Edilen Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluğunun Farklı Yaklaşımlarla İrdelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(1), 22-28.
- Torun, A. (2017). İnsansız Hava Aracı (İHA) Sektörü Ve İHA Fotogrametrisinin Ölçme Bağlamında Konumlandırılması The Sector of Unmanned Aerial Systems and Positioning UAS Photogrammetry Regarding Surveying Discipline.
- Unger, J., Reich, M., & Heipke, C. (2014). UAV-based photogrammetry: monitoring of a building zone. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives 40 (2014)*, 40(5), 601-606.
- Vidas, S., Moghadam, P., & Bosse, M. (2013, May). 3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera. In *2013 IEEE international conference on robotics and automation* (pp. 2311-2318). IEEE.
- Yaman, O., Sengul, O., Selcuk, H., Calikus, O., Kara, I., Erdem, S., & Ozgur, D. (2015). Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri, İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu.
- Yang R., Chen Y., 2011. Design Of A 3-D Infrared Imaging System Using Structured Light. *IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement*. 608-617.
- Yang, B., & Chen, C. (2015). Automatic registration of UAV-borne sequent images and LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 262-274.
- Yaşayan, A., Uysal, M., Varlık, A., & Avdan, U. (2011). Fotogrametri. *TC Anadolu Üniversitesi Yayın*, (2295).

- Yılmaz, H. M., Mutluođlu, Ö., Ali, Ulvi., Yaman, A., & Bilgilioğlu, S. S. (2018). İnsansız hava aracı ile ortofoto üretimi ve Aksaray Üniversitesi kampüsü örneği. *Geomatik*, 3(2), 129-136.
- Yılmaztürk, F., & Terzi, N. U. (2018). İnşaat mühendisliği malzeme testi uygulamaları için fotogrametrik bir sistem tasarımı. *Geomatik*, 3(2), 108-119.
- Yuneec e10tvx. (2022, 7 Temmuz). Erişim adresi: <https://airmim.com/urun/yuneec-e10tv-e10tvx-kamera-yuneec-h520-h520e/>
- Weinmann, M., Leitloff, J., Hoegner, L., Jutzi, B., Stilla, U., & Hinz, S. (2014). Thermal 3D Mapping For Object Detection in Dynamic Scenes. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(1).
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill Education.

EKLER
EK 1
RGB ORTOFOTO RAPORU



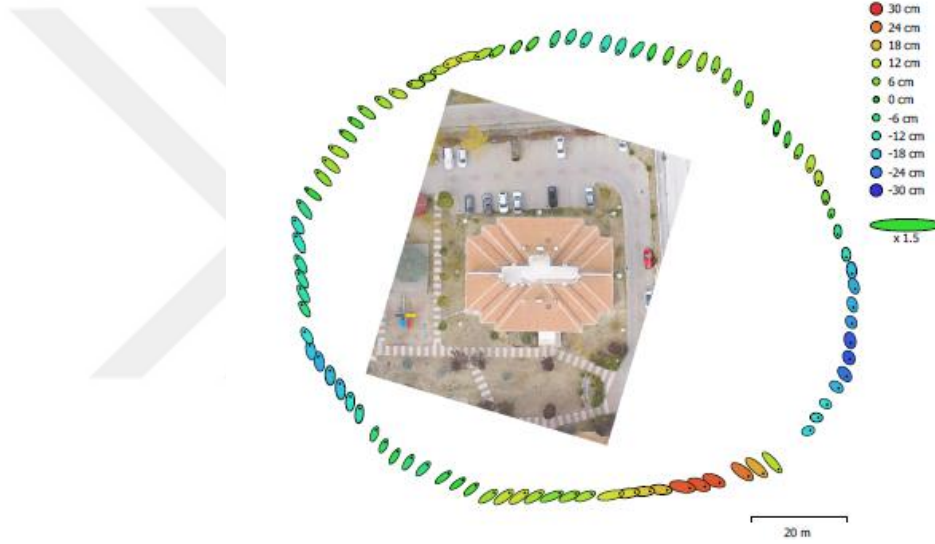
Şekil 1.1 Kamera konumları ve örtüşen görüntüler



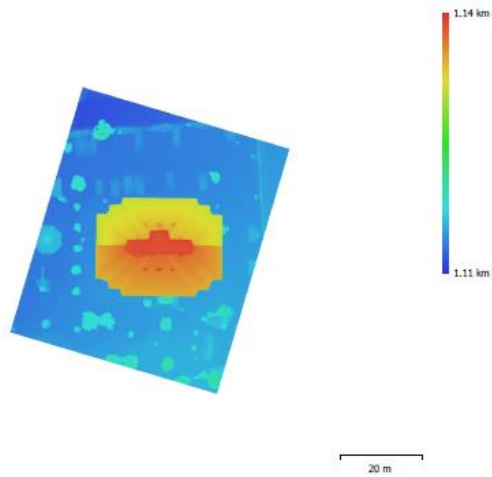
Şekil 1.2 E10Tv 0.2.48E için vektörel konum hataları

Tablo Ek 1.1 Kalibrasyon matrisi

	Değer	Hata	F	K1	K2	P1	P2
F	1255.94	0.14	1.00	-0.14	0.46	0.04	-0.40
K1	-0.11010	0.00092		1.00	-0.81	-0.06	-0.19
K2	0.09916	0.00011			1.00	0.04	-0.13
P1	-0.00039	0.00002				1.00	0.01
P2	0.00016	0.00002					1.00



Şekil 1.3 Kamera konumları ve hata tahminleri



Şekil 1.4 İnşa edilen sayısal yükseklik modeli

Tablo Ek 1.2 Genel özellikler

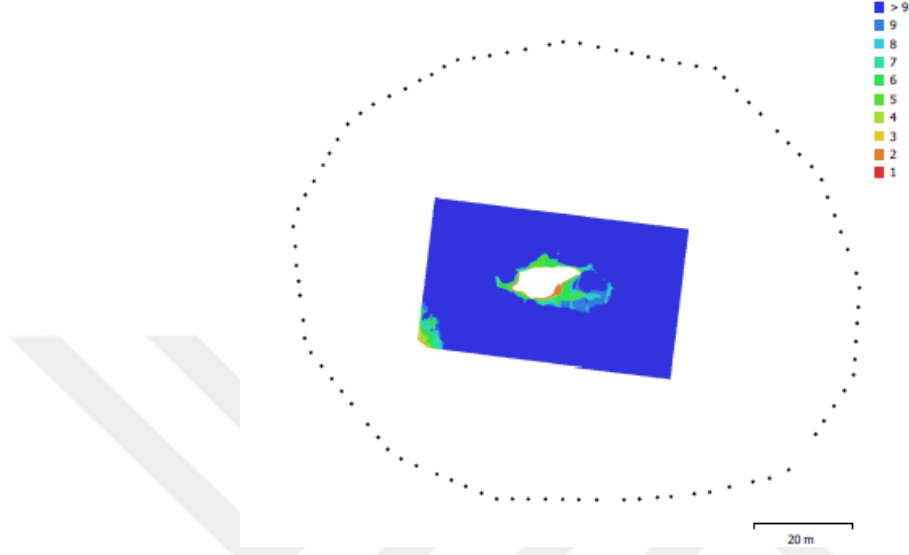
Görüntü Sayısı	92
Tipi	Çerçeve
Çözünürlük	1920*1080
Yöneltmiş Görüntü Sayısı	92
Uçuş yüksekliği	60.5 m
İşaretlenen Nokta Sayısı	7

Tablo Ek 1.3 Nokta bulutu

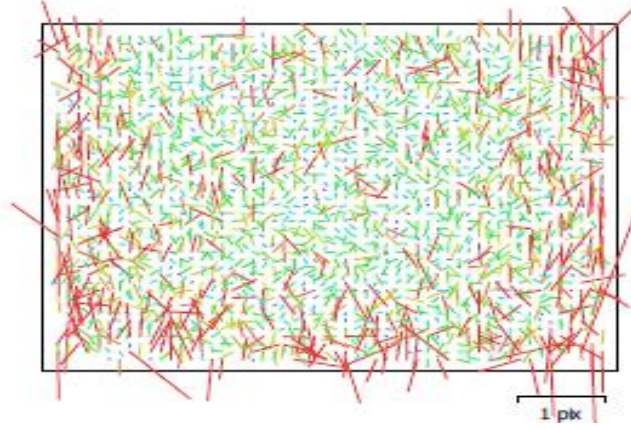
Nokta Sayısı	84.483'ten 72.853'ü
RMS Ölçeklendirme Hatası	0.157702 (0.721456 pix)
En Yüksek Ölçeklendirme Hatası	0.479261 (15.4976 pix)
Ortalama Anahtar Nokta Hatası	3.96767 pix

EK 2

TERMAL ORTOFOTO RAPORU



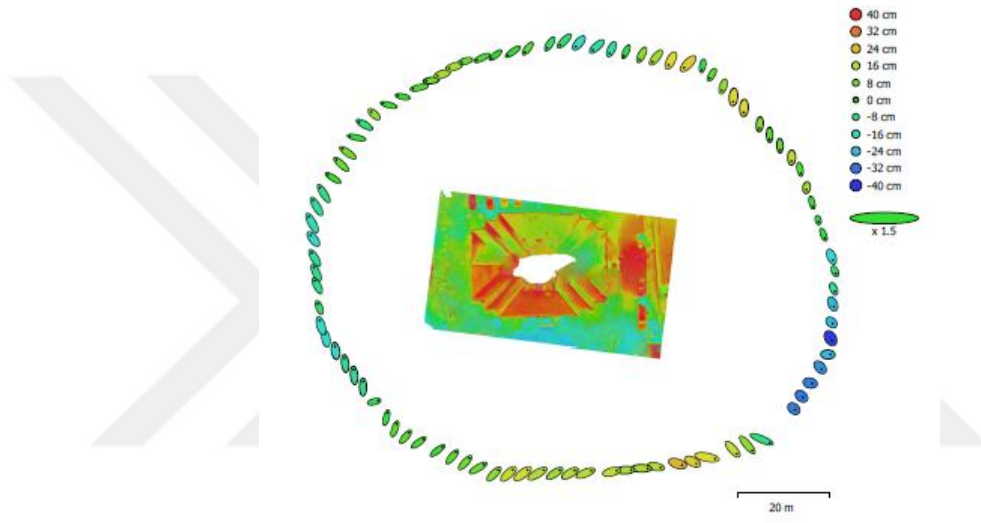
Şekil 2.1 Kamera konumları ve örtüşen görüntüler



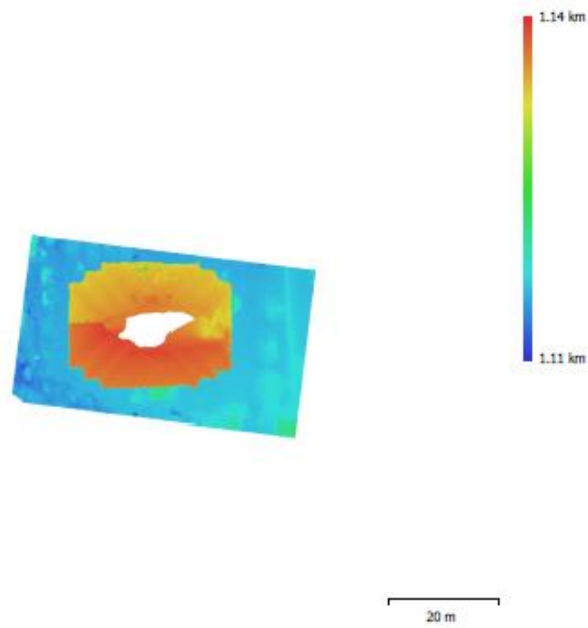
Şekil 2.2 E10Tv 0.2.48E için vektörel konum hataları

Tablo Ek 2.1 Kalibrasyon matrisi

	Değer	Hata	F	K1	P1	P2
F	1132.04	2.40000	1.00	0.11	-0.02	0.20
K1	-0.19022	0.00200		1.00	-0.01	0.25
P1	-0.00013	0.00028			1.00	-0.01
P2	-0.00078	0.00038				1.00



Şekil 2.3 Kamera konumları ve hata tahminleri



Şekil 2.4 İnşa edilen sayısal yükseklik modeli

Tablo Ek 2.2 Genel özellikler

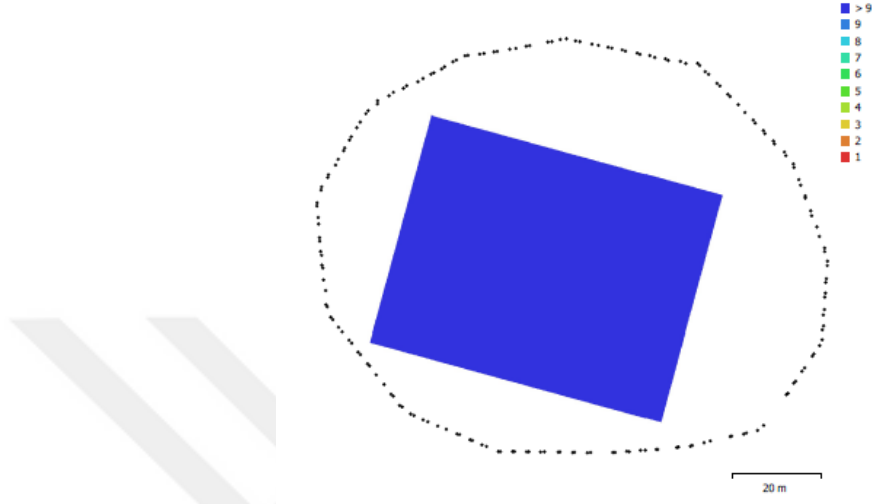
Görüntü Sayısı	92
Tipi	Çerçeve
Çözünürlük	640*512
Yöneltmiş Görüntü Sayısı	92
Uçuş yüksekliği	57.1 m
İşaretlenen Nokta Sayısı	7

Tablo Ek 2.3 Nokta bulutu

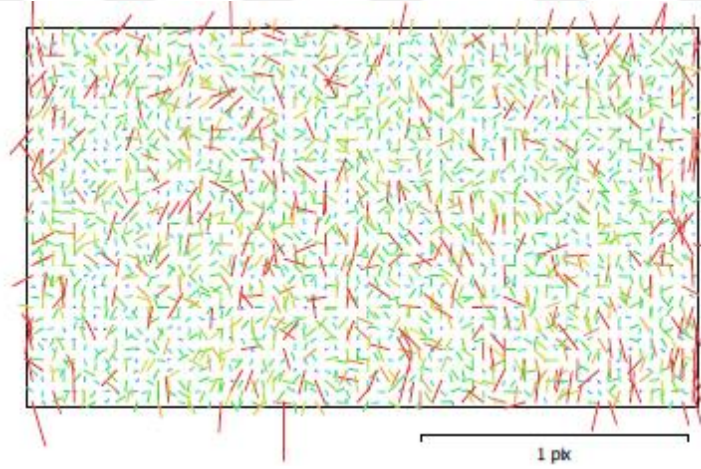
Nokta Sayısı	14.915'ten 11.876'sı
RMS Ölçeklendirme Hatası	0.220221 (0.909232 pix)
En Yüksek Ölçeklendirme Hatası	0.670164 (17.238 pix)
Ortalama Anahtar Nokta Hatası	3.77845 pix

EK 3

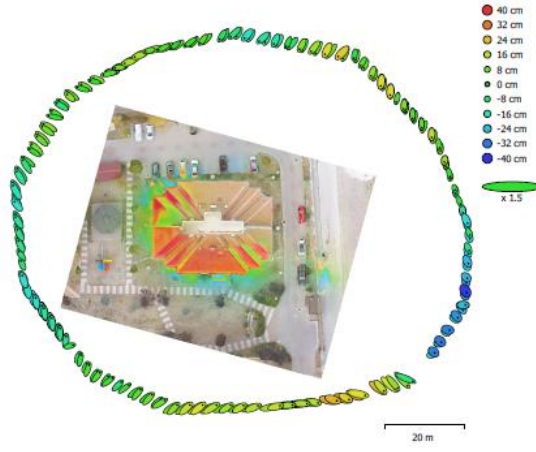
RGB-TERMAL ORTOFOTO RAPORU



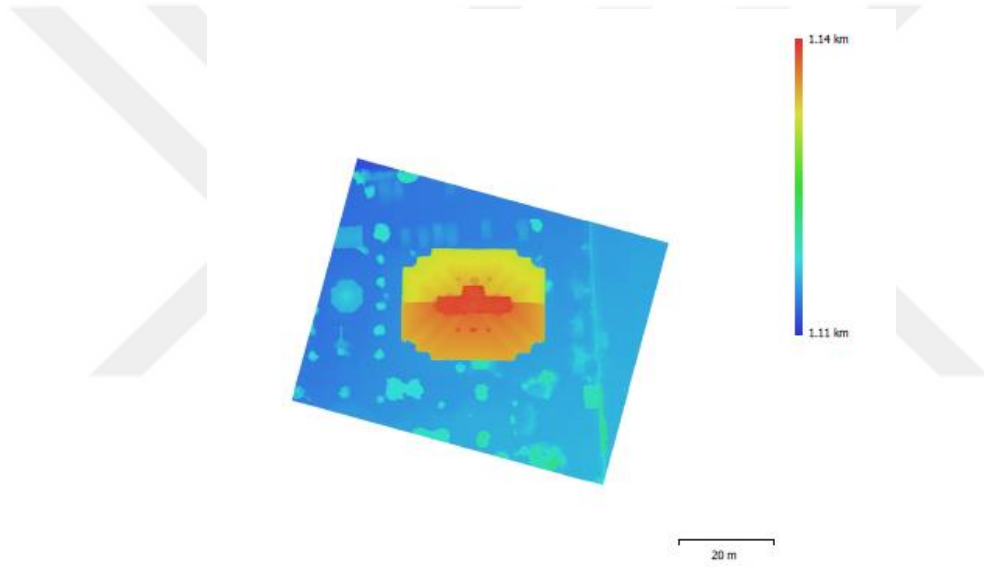
Şekil 3.1 Kamera konumları ve örtüşen görüntüler



Şekil 3.2 E10Tv 0.2.48E için vektörel konum hataları



Şekil 3.3 Kamera konumları ve hata tahminleri



Şekil 3.4 İnşa edilen sayısal yükseklik modeli

Tablo Ek 3.1 Genel özellikler

Görüntü Sayısı	184
Yöneltilmiş Görüntü Sayısı	184
İşaretlenen Nokta Sayısı	9
Tipi	Çerçeve

Tablo Ek 3.2 Nokta bulutu

Nokta Sayısı	99.398'den 84.729'u
RMS Ölçeklendirme Hatası	0.16581 (0.744643 pix)
En Yüksek Ölçeklendirme Hatası	0.670173 (17.238 pix)
Ortalama Anahtar Nokta Hatası	3.94666 pix



