

## Bina Zarfının Termal Görüntüler ile Fotogrametrik Modellenmesi

### Photogrammetric Modeling of Building Envelope with Thermal Images

Deniz Sakalp<sup>1</sup>, Özgün Akçay<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, 17100, Çanakkale/Türkiye.

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 17100, Çanakkale/Türkiye.

#### ARAŞTIRMA MAKALESİ

##### \*Sorumlu yazar:

Özgün Akçay  
akcay@comu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1166498

##### Yayın süreci

Geliş tarihi: 24.08.2022  
Kabul tarihi: 25.01.2023  
Basım tarihi: 28.03.2023

#### Özet

Termal kameralı İnsansız Hava Araçları (İHA) görüntüleri ile üretilen nesne yüzey sıcaklıkları ve üç boyutlu geometrileri günümüzde pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Başlangıçta kullanımı sadece askeri alanla sınırlanan insansız hava araçlarının 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 ısı köprüleri termal kameralar ile görüntülenerek bina ısı kaçaklarının kolayca belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Termal görüntüleme geniş kullanımına rağmen, dar görüş alanı ve mekânsal çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle sınırlıdır. Çalışmada, Ankara ilinin Gölbaşı ilçesinde yer alan bir binanın görünür ve termal görüntüleri insansız hava aracı ile elde edilerek inceleme için yeni bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu yaklaşım, İHA'ya monte iki kameradan elde edilen termal ve görünür görüntülerden Structure from Motion (SfM) tekniğine dayalı üç boyutlu tek bir model oluşturulmasına dayanmaktadır. Bu çalışma sonucunda görünür ve termal verilerin eş-kayıt edilmesi sayesinde elde edilen fotogrametrik model ile bina incelemenin ve yorumlamanın elverişli olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** İHA, Termal sensör, Görüntü füzyonu, Fotogrametri

#### Abstract

Object surface temperatures and three-dimensional geometries produced with thermal camera images of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are used in many application areas nowadays. 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. Failures of insulation systems allow an energy flow that directly affects the facade structure, triggering unexpected temperature changes and increased energy consumption. These thermal bridges can be viewed with thermal cameras, making it possible to easily identify building heat leaks. Although thermal imagery has been used in a wide range, it is limited due to low spatial resolution and narrow field of view. In the study, a new approach has been adopted for the examination by obtaining the visible and thermal images of an unmanned aerial vehicle of a building in the Gölbaşı district of Ankara. This approach is based on the creation of a single three-dimensional model based on the Structure from Motion (SfM) technique from thermal and visible images obtained from two cameras mounted on the UAV. As a result of this study, it has been seen that the building examination and interpretation are convenient with the photogrammetric model obtained by co-registering the visible and thermal data.

**Keywords:** UAV, Thermal sensor, Image fusion, Photogrammetry

## 1. Giriş

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke, nüfusuna oranla daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ülkemizde tüketilen enerjinin yaklaşık yüzde otuz beşinin binalarda kullanıldığı belirtilmektedir (İMO, 2015). Enerjinin en çok tüketildiği alanlardan biri olan yapılarda ısı yalıtımı uygulamalarının enerji tasarrufu sağlaması, korozyonu önlemesi, zararlı gaz emisyonlarının azaltılması gibi birçok faydası ifade edilmektedir (Bektaş vd., 2017). Enerji üretimindeki zorluklara karşılık artan enerji ihtiyacı, binalardaki enerji tüketiminin düşürülmesi ve verimliliğinin artırılması konularında önemli bir gereksinimi ortaya çıkarmıştır. Özellikle binalarda enerji verimliliğinin artırılması için binaların dışarıya veya ısıtılmayan bölümlerine bakan duvar, çatı, döşeme, cam, havalandırma vb. unsurlarına doğru bir ısı yalıtım uygulaması önerilmektedir (Bayraktar ve Bayraktar, 2016). Binalarda ısı yalıtımının gereksinimlerinin hesaplanması ve uygulanması sırasında başvuru kaynağı olarak TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. (TSE, 2013). Demir (2011) çalışmasında ifade edilen sürdürülebilir enerji kavramına dayalı olarak, bina enerji yönetiminin sürdürülebilir normlar ile uyumunun sağlanması için bir bina ısı gözlem teknolojisi ihtiyacı öne çıkmıştır. Binanın yüzey sıcaklıkları termal görüntüleme kullanılarak elde edilebilir ve binanın ısı performansı üç boyutlu görselleştirme ile belirlenebilir. Termal görüntüleme, binalardaki ısı sızıntılarını, yüzey nemini ve yapısal sorunları tespit etmek için basit ve etkili bir yaklaşımdır (Kyllili vd., 2014). Termal kamera ile çıplak gözle ve dijital kameralarla belirlenemeyecek tespit ve analizler yapılabilmesi mümkündür. Termal görüntüleme bu özelliği ile bina yorumlama, mekaniksel ve elektriksel bakım, yangın saptama, tıp gibi birbirinden farklı pek çok alanda kullanıma sahiptir (Rakha ve Gorodetsky, 2018). Örneğin bilgisayar donanımlarının kullanıma bağlı oluşan sıcaklık dağılımının belirlenmesi (Durgut ve Akçay, 2016), bina enerji simülasyonlarının oluşturulması (Kim vd., 2015) bazı termal uygulama alanlarına ilişkin çalışmalar olarak sayılabilir. Bu değerlendirmeler ışığında, insansız hava aracı ile nesnenin çoklu sensörlü verisinin elde edilmesi uzaktan algılama ve yakın resim fotogrametrisi için büyük bir potansiyele sahiptir.

Termal görüntülerin çeşitli analizlere sağlayacağı katkılar oldukça değerlidir ancak üç boyutlu modelleme üretiminde gerekli nokta eşleşmesinde zorluklar mevcuttur. Bu nedenle İHA temelli termal görüntüleme ve uzaktan algılama uygulamalarında kullanımı kısıtlanmıştır (Gade ve Moeslund, 2014). Bu kısıtlamalar altında, Sledz vd. (2018) yaptığı araştırmada Dijital Yüzey Modeli (DYM) ve ortofoto gibi fotogrametrik çıktılar için termal görüntülerin kullanılma potansiyelini incelemiştir. Özellikle, termali de içeren çok sensörlü kameraları ile İHA'lar, dijital bina modeli oluşturmak ve yüzey sıcaklık bilgisi üretmek suretiyle bina bilgi modeli oluşturulmasına ve bina sürdürülebilirliğine katkı sağlar (Han ve Huh, 2019). Lagüela vd. (2012) bina yüzeyi termal analiz çalışmasında sadece fotogrametrik modelin son adımı olan ortomozaik görüntüleri birleştirmeyi denemiştir. Görüntü temelli dokulandırma teknikleri kullanılarak İHA ile elde edilen görüntülerin işlenmesi sonucu iki boyutlu görüntüye 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 nokta bulutları ve ortofotolar gibi yüksek çözünürlüklü haritalama ürünlerinin 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 kamerasının odak uzaklığı ve sensör boyutu gibi geometrik koşullar sağlanmalıdır. Bunun yanı sıra uçuşun gerçekleştirildiği hava koşulları, uçuş yüksekliği ve iyi bir görüntü eşleme için binanın tüm cephelerinin yüksek bindirmeli olarak çekilmesi hususu da önem taşımaktadır. Termal görüntülerin çözünürlüğünün düşük olması ve yüksek oranda gürültü içermesi nedeniyle doğrudan özellik saptama ve görüntü eşleme tekniklerinin uygulanması durumunda, üç boyutlu model üretimi için yeterli eşleşme noktaları üretilemez. Bu durum, termal görüntülerin görüntü kaydını ve üç boyutlu nokta bulutu üretimini zorlaştırmaktadır. Eşleşmiş 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 kaydedilebilir.

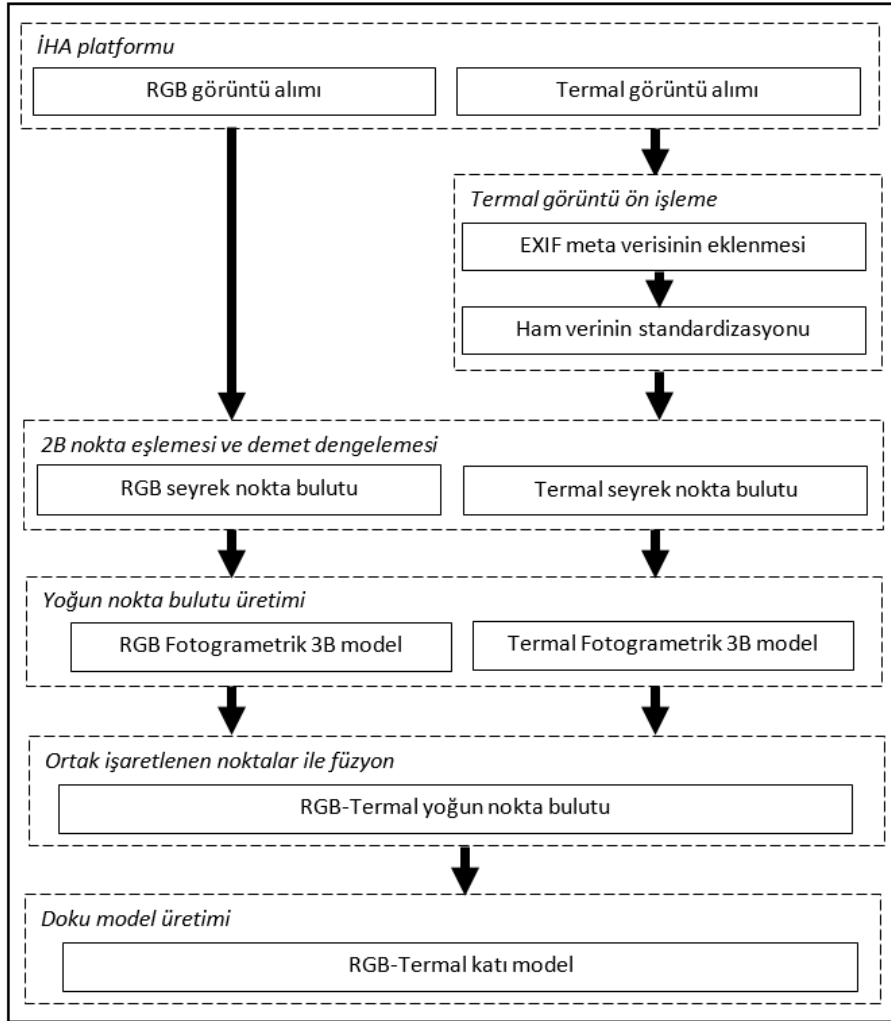
İlgili çalışmalar ele alındığında, Han ve Huh (2019) yaptığı çalışmada RGB ve termal modelleri ayrı değerlendirdiği görülmektedir. Bu durum iki model arasındaki geometrik kıyaslamada doğruluk problemi ortaya koymaktadır. Diğer yandan, Javadnejad vd. (2020) çalışması incelendiğinde, termal nokta bulutunu doğrudan oluşturmadan, RGB ve termal görüntüler arasında iki boyutlu dönüşüm ile üç boyutlu termal bilginin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca termal görüntüler arasında radyometrik tutarsızlıklara neden olan radyometrik düzeltmenin uygulanmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, RGB ve termal ortak üç boyutlu noktalar seçilerek modellerin birleştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca termal görüntülere normalizasyon uygulanarak kendi aralarındaki radyometrik bozukluklar iyileştirilmiştir. Bu uygulamayı gerçekleştirmek için İHA'ya monte edilen RGB ve termal sensörlere sahip kameralar içeren bir sistem kullanılmıştır. Oluşturulan model bina enerji performansının hızlı bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır. Makalede, bölüm 2.1 veri kazanımı ve kullanılan araçları açıklamaktadır. Bölüm 2.2'de görünür görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutu üretimi, termal görüntülerin sıralanıp hizalanması ile elde edilen termografik mozaikin üretimi ve RGB yoğun nokta bulutunun termal mozaik ile dokulandırılması sonucu elde edilen bulguları ve analiz sonuçlarını içermektedir.

Bölüm 2.3’de ise RGB ve termal modellerin füzyonu açıklanmıştır. Son olarak bölüm 3’te çalışmada önerilen yöntemin performansına değinilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Termal kamera, insan gözü ve dijital kameralar aracılığıyla belirlenemeyecek tespit ve analizler yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Termal görüntüleme ile ısı kaçaklarını tespit etmek basit ve etkili bir yaklaşımdır. Sözü edilen fotogrametrik yöntem, ana hatlarıyla Şekil 1’de gösterilmiştir. Çalışma, yüksek çözünürlüklü RGB görüntülerle nispeten düşük çözünürlüklü termal görüntülerin eş kayıt edilmesi ile sıcaklık bilgisi ve geometrik bilginin basitleştirilmiş füzyonuna dayanmaktadır.

Termal görüntülerin kullanımı farklı kamera teknolojileri dikkate alınarak kullanılabilir. Bu çalışmada elde edilen ham termal görüntülerin kamera konumlarını içeren EXIF meta verisi eklenmesi ve görüntülerin relatif sıcaklık göstergelerinin kendi aralarında standartlaştırılması gerekir. Bu ön işlem sonrası, elde edilen termal ve orijinal RGB iki boyutlu görüntülerden, temeli SfM fotogrametrisi yöntemine dayanan Agisoft Metashape programı ile üç boyutlu nokta bulutları ayrı ayrı üretilmiştir. Daha sonra, termal seyrek nokta bulutu ile yüksek çözünürlüklü RGB seyrek nokta bulutunun füzyonu gerçekleştirilmiştir. Füzyon işlemi her iki modelin belirgin ortak noktaları manuel olarak tespit edilerek oluşturulmuştur. Füzyonu gerçekleştirilmiş RGB-Termal seyrek nokta bulutunun ardından sırası ile yoğun nokta bulutu ve RGB-Termal yüksek çözünürlüklü katı modeli üretilmiştir. Üretilen katı model ile binanın yalıtım durumunu incelemek elverişlidir. Önerilen yöntem, fotogrametrik teknikler kullanılarak söz konusu binanın termografik görüntülerinin sıralanıp hizalanması ile dokulandırılmış yüksek çözünürlüklü üç boyutlu model kaydı ile görüntü füzyonunu mümkün kılmaktadır. Elde edilen nihai ürün, bina ısı yalıtım sistemlerinin eksiklerinin ortaya konması için otomatik bir sistem niteliği taşımaktadır. Tüm işlem adımları bir sonraki bölümde sırasıyla daha detaylı anlatılmıştır.



Şekil 1. Görüntü füzyonu için işlem adımları

## 2.1 Veri Kazanımı

Çalışmanın amacı, RGB ve termal görüntülerin kombinasyonu ile sırayla gerçekleştirilmesi gereken fotogrametrik işlem adımlarına bağlı olarak uygun bir veri toplama yöntemiyle görünür görüntülerden elde edilen yoğun nokta bulutunun termal görüntülerle dokulandırılıp binanın ısı yalıtım değerlerini gözlemlemektir.

Çalışma, Türkiye'nin başkenti Ankara'nın Gölbaşı ilçesi Örencik mahallesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesi Şekil 2'de uydu görüntüsünde görülmektedir. Konut bölgesinde yer alan betonarme 5 katlı bina, çatı, duvar yapısı ve etrafında bulunan ağaç ve araba sayısı azlığı nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca, bina cephelerinin yalıtım malzemesi içermesi, cam kaplama gibi yansıma özelliğine sahip malzemelerin cephelerde fazla olmaması, çatının açık şekilde gözlemlenebilir olması, binanın başka bir bina ile bitişik nizam olmaması ve binanın müstemilat içermemesi fotogrametrik değerlendirme açısından belirlenen başlıca kriterlerdir.



Şekil 2. a) Çalışma alanının Google Maps uydu görüntüsü b) binanın İHA görüntüsü

Çalışmada kullanılan İHA pek çok alanda kullanılan hassas alçak irtifa İHA platformu olan DJI Phantom 4 RTK'dir (Nex ve Remondino, 2014). Kullanılan çoklu sensörlü kamera ise yüksek çözünürlüklü RGB sensöre sahip aynı zamanda termal görüntüleme sağlayan Yuneec E10Tx'dir. Veri seti, enine ve boyuna %80-90 yüksek bindirme oranlı olarak Yuneec E10Tx kamerası ile ortalama 60.5 metre yüksekliğinde kazanılmıştır. Söz konusu binanın ve yakın çevresinin modellenebilmesi için uygun hava koşullarında ve yükseklikte nadir ve oblik olarak görüntülerin alımı 18 Kasım 2020 tarihinde saat 13:30'da gerçekleştirilmiştir. Veri alımı sırasında çevresel koşullar da etkilidir. Özellikle termal görüntülerde ışın yansıma hatalarının optimum ölçekte olması için rüzgar hızının ve sıcaklığın uygun, yağmurun yağmadığı bir havada görüntüler temin edilmiştir. Böylelikle görüntü alımı sırasında meydana gelebilecek hata değerleri ve bakış açısı farklılıkları nedeniyle oluşabilecek düşük eşlenik nokta sayıları iyileştirilmektedir. Fotogrametrik değerlendirme amaçları için sıklıkla kullanılan Agisoft Metashape programı, alımı gerçekleştirilen iki boyutlu dijital görüntülerin üç boyutlu konumsal verisini üretmeyi sağlamaktadır.

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). Bu nedenle çalışma kapsamında yer kontrol noktası tesis edilmemiştir. Kullanılan çoklu sensörlü kameranın teknik özellikleri Tablo 1 ve 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Görünür veri kazanımı için kullanılan RGB kameranın özellikleri

Kamera	Yuneeç E10TvX
Renk Hassasiyeti	RGB
Resim Boyutu	1920x1080 piksel
Odak Uzaklığı	23 mm
Görüş Alanı	89.6°
Yer örnekleme aralığı	~6 cm/piksel

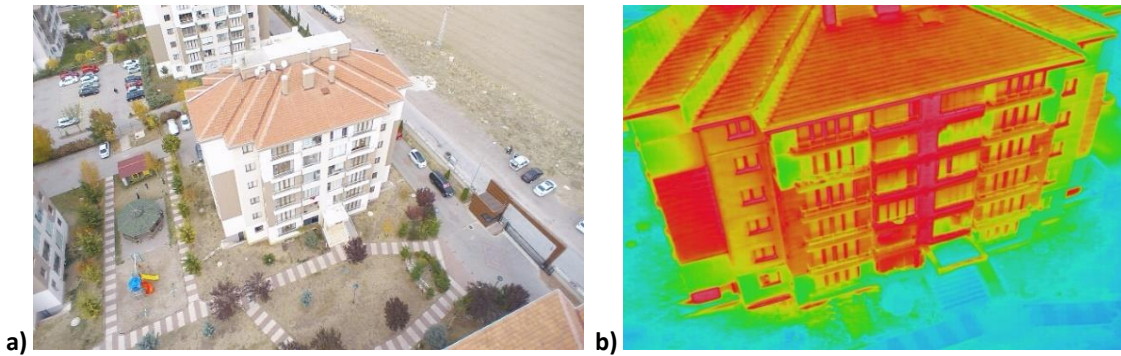
**Tablo 2.** Termal veri kazanımı için kullanılan kameranın özellikleri

Kamera	Yuneeç E10TvX
Renk Hassasiyeti	Termal
Resim Boyutu	640x512
Odak Uzaklığı	6.3 mm
Görüş Alanı	32°
Yer örnekleme aralığı	~11 cm/piksel

Fotogrametrik kısıtlar göz önünde bulundurularak elde edilen yüksek bindirme oranlı çekilmiş RGB ve termal görüntü örneği Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** a) Yuneeç E10TvX kamerası ile çekilmiş yüksek bindirmeli oblik çekilmiş iki RGB görüntü (a ve b)



**Şekil 4.** Yuneeç E10TvX kamerası ile eş zamanlı çekilmiş RGB görüntü (a) ve termal görüntü (b)

## 2.2 Veri İşleme

Binanın enerjisiyle ilgili yorum ve incelemeleri gerçekleştirmek 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 imkânı sağlamaktadır. Özellikle büyük alanlar söz konusu olduğunda termal modellerin avantajları olmasına rağmen fotogrametrik zorluklar nedeniyle kullanımı kısıtlanmıştır.

İlk olarak, termal kameranın çözünürlüğü RGB kameralara kıyasla düşüktür. Bu durum görüntülerin nokta eşlemesi esnasında 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, nihai yüksek çözünürlüklü katı modelin üretilebilmesi için yer kontrol noktası gibi hassas mutlak bir nokta konumuna ihtiyaç duyulmaz. Bu nedenle, RTK (Real Time Kinematic) donanımlı bir insansız hava aracına monte edilen çoklu sensörlü kamera ile eş zamanlı olarak elde edilen RGB ve termal görüntülerin Agisoft Metashape yazılımı kullanılarak iç ve dış yönelmeleri demet dengelemesi ile gerçekleştirilmiştir. Ancak fotogrametrik işlemler öncesi termal görüntülerin üretildikleri kamera teknolojisine dayalı kalibrasyon, normalizasyon, konum etiketlerinin eklenmesi gibi bazı ön veri işlemleri önem taşımaktadır.

### 2.2.1 Termal verilerin ön işleme

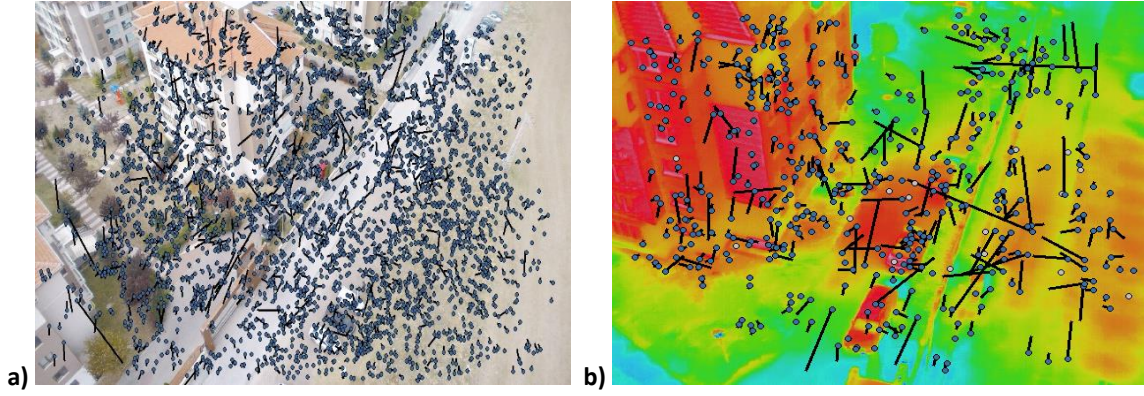
Yunec 10TVX termal kamera ile iki farklı formatta görüntü kaydı alınmıştır. Birincisi jpeg formatta, ikincisi ise tiff formattadır. jpeg formatlı görüntü doğrudan nesnelerin sıcaklık bilgilerini göstermesine rağmen sadece görsel analiz için üretilmiştir ve fotogrametrik değerlendirmeye uygun değildir. Çünkü görüntüler arasında sıcaklık görselleştirmeleri arasında tutarsızlıklar vardır. Diğer tiff formatı ise fotogrametrik değerlendirmeye uygun kaydedilen görüntülerdir. Bu görüntüler gri tonlarda üretilmektedir ve çıplak gözle detayları ayırmak imkansızdır. Bu çalışmada tiff görüntüler ön işleme sonrası fotogrametrik değerlendirmeye dahil edilmişlerdir. Bu ön işlemenin birinci adımı, tiff görüntülerin eksik EXIF verilerini tamamlamak gereğidir. Özellikle görüntü konum bilgileri tiff görüntüler yerine jpeg görüntülerde yer almaktadır. Bu çalışmaya özel yazılan Python kodları ile EXIF verileri jpeg görüntülerden tiff görüntülere kopyalanmıştır. Bunun avantajı dengelemede ön bilgi olarak konum bilgilerinin kullanılmasının sağlanması ve daha sağlam bir yönelme elde edilmesidir. İkinci ön işlem adımı ise tiff görüntüler arasında standardizasyonun sağlanması ve görselleştirmenin çıplak gözle görünür hale getirilmesidir. Bu kamera görüntüleri radyometrik bir kalibrasyon işleminden geçirilmemiştir. Bu nedenle aynı sahneye ait iki termal görüntü arasında yer yer önemli düzeylerde radyometrik farklılıklar gözlenmektedir. Bu sorunun etkisini azaltmak için iki yöntem irdelenmiştir. Birincisi lokal standardizasyon olarak adlandırdığımız görüntünün radyometrik olarak tek başına 0-255 aralığına ölçeklenmesi diğeri ise global standardizasyon olarak adlandırdığımız tüm görüntüler arasında belirlenen maksimum ve minimum değerler belirlenerek tüm görüntülerin bu uç değerlere göre radyometrik ölçeklenmesidir. Sırasıyla standardizasyon yapılmamış tiff, lokal standardizasyon yapılmış tiff ve global standardizasyon yapılmış tiff görüntüler fotogrametrik olarak değerlendirilerek karşılaştırılmıştır (Tablo 3). Buna göre üretilen otomatik bağlantı sayıları ve üç boyutlu nokta sayıları değerlendirildiğinde her iki standardizasyonun radyometrik iyileştirme sağlamaları nedeniyle nokta eşleme sayılarının arttırdığı görülmektedir. Fotogrametrik füzyon işlemleri için her iki standardizasyon arasında anlamlı bir fark olmasa da lokal standardizasyon uygulanmış görüntüler tercihen kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Standardizasyonun fotogrametrik değerlendirme sonuçlarına etkisi

Kullanılan termal görüntü türü	Bağlantı nokta sayısı	Üç boyutlu nokta sayısı
Standardizasyon uygulanmamış	11904	35000
Lokal standardizasyon uygulanmış	13449	42324
Global standardizasyon uygulanmış	13399	42333

### 2.2.2 RGB ve termal seyrek nokta bulutlarının üretimi

Çalışmada kullanılan programın temeli olan SfM algoritması, görüntülerin otomatik nokta çıkarımı ile başlamaktadır. Çeşitli nokta çıkarımı algoritmalarından biri olan özellik tabanlı nokta çıkarımı algoritması Scale Invariant Feature Transform (SIFT), aynı bölgeyi kapsayan görüntüler arasında büyük oranlarda değişiklik gösterebilen dönüklük, öteleme ve ölçek gibi konumsal dönüşüm parametrelerinden 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 yönelme değerleri olduğu gibi anahtar noktaların üç boyutlu konumundan eş zamanlı çözümü ile üretilir (Snavely vd., 2006). Fotogrametrik kıyımlandırma için kullanılan program SIFT algoritması ile özellik tanıma vektörleri aracılığıyla her bir görüntüye bağlantı noktaları atamaktadır. RGB ve termal görüntü örneğinde bağlantı noktaları Şekil 5' de gösterilmiştir.

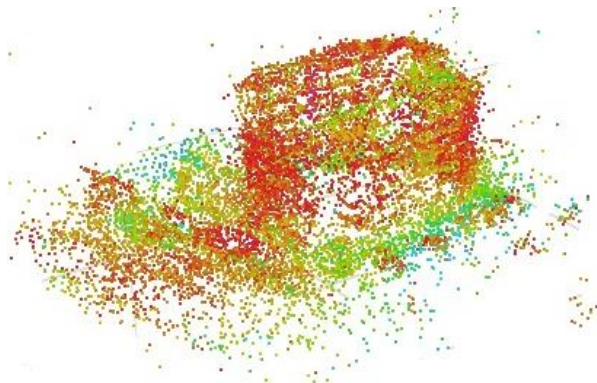


Şekil 5. a) RGB bağlantı noktaları b) termal bağlantı noktaları

İki boyutlu görüntü noktalarının çıkarımı ve eşlemesine dayalı olarak demet dengelemesi gerçekleştirilerek bu noktaların üç boyutlu koordinatları üretilmektedir. İlk aşamada üretilen bu nokta bulutu görüntülerin en iyi şekilde yönlendirilmesine yönelik olarak belirlenen model noktalarıdır ve tüm alanın nokta bulutunu üretmeyi amaçlamaz. Optimum bir performans için otomatik nokta eşlemesine dayanan fotogrametrik model için 40000 nokta ve 4000 eşlenik nokta limit olarak belirlenmiştir. Üretilen RGB ve termal seyrek nokta bulutları Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

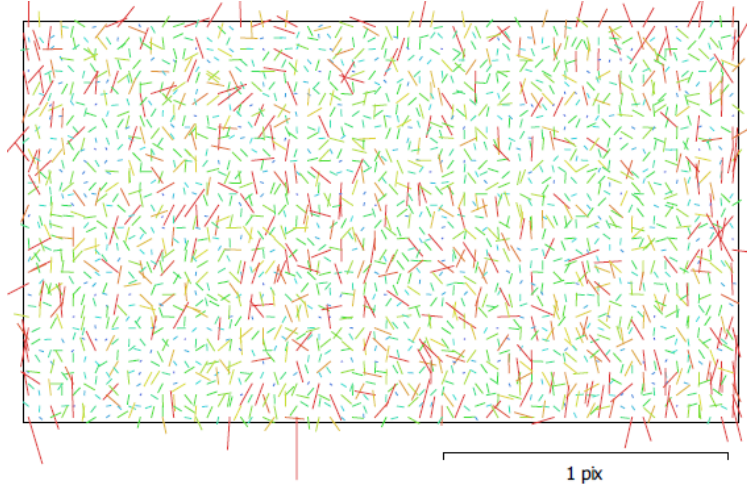


Şekil 6. RGB seyrek nokta bulutu



Şekil 7. Termal seyrek nokta bulutu

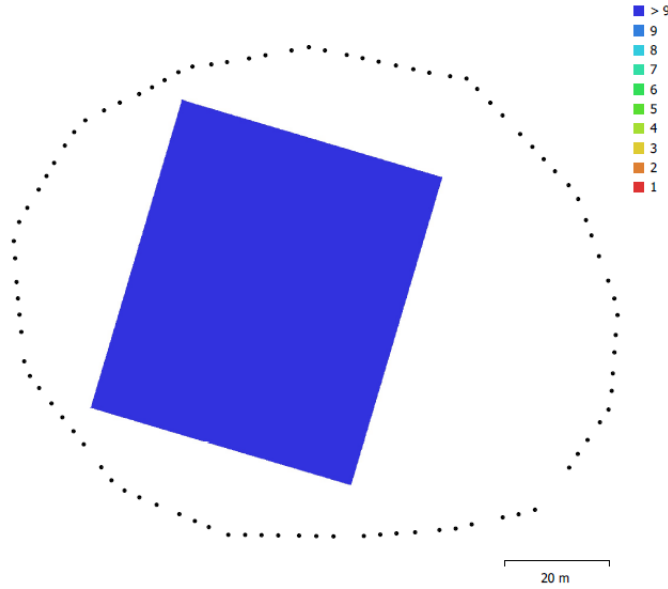
Çoklu sensörlü kameranın proje anında gerçekleştirilen kalibrasyonu sonucu distorsiyon modellenmiş ancak görüntülerde fotogrametrik görüntü koordinatları ölçmesi sonucu oluşan nokta konumlarının hataları vektörel olarak Şekil 8’de gösterilmiştir. Görüntü ölçme hataları, karşılık gelen hücrelerdeki pikseller için üç boyutlu model üretim sonucu ortaya çıkan hataların ortalama vektörlerini gösterir. Yani değerlendirme grubundaki tüm görüntüler ve hücrenin içindeki tüm pikseller arasında ortalama alınarak belirlenir. Bu hatalar büyük oranda 1 pikselden daha küçük olduğu için kabul edilebilir düzeydedir.



Şekil 8. Yuneec E10Tvx kamerasının vektörel konum hataları

### 2.2.3 RGB ve termal yoğun nokta bulutlarının üretimi

Fotogrametrik zorunluluklar dikkate alınarak, yüksek bindirme oranlı termal ve RGB görüntülerin kazanımı ve yönltilmesi sonucu termal ve RGB nokta bulutları üretilmiştir. 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 3 boyutlu modelin üretilmesi kaçınılmazdır. Çalışmada, İHA'ya entegre edilen çoklu sensörlü kamera ile çekilmiş RGB görüntülerin uçuş planı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Kamera konumlarının nesne üzerinde yer alan konumları

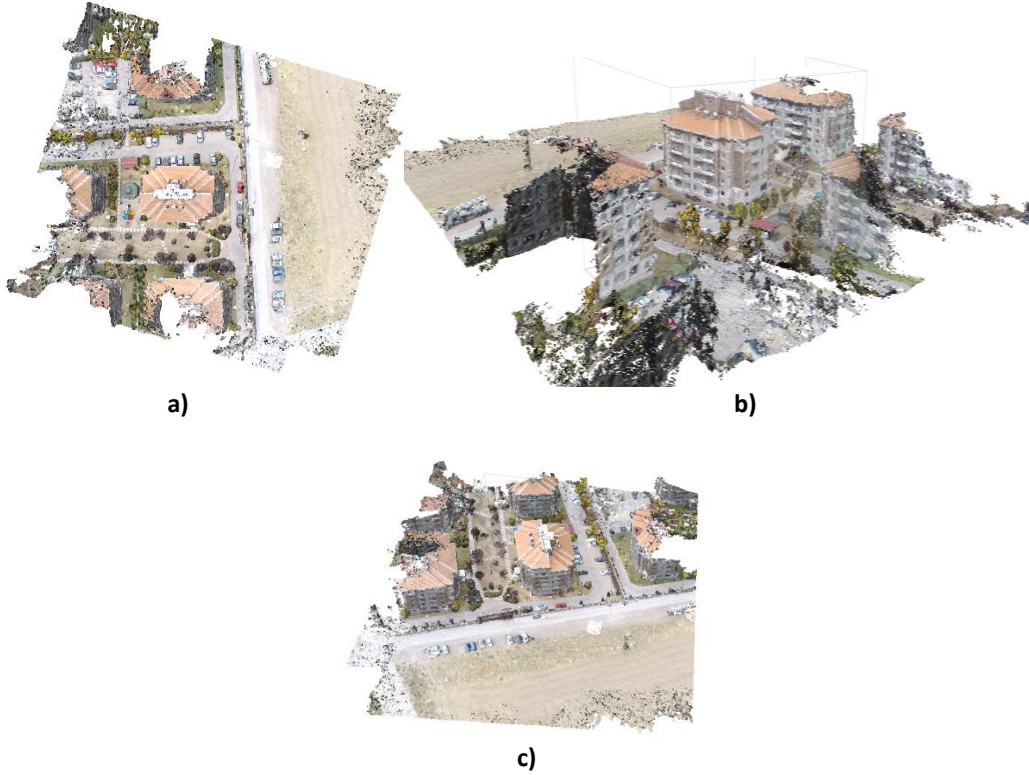
Uçuş planına dair kamera konum sayısı, uçuş yüksekliği, bağlantı noktası sayısı ve ölçek gibi birtakım bilgiler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Uçuş planına dair birtakım bilgiler

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

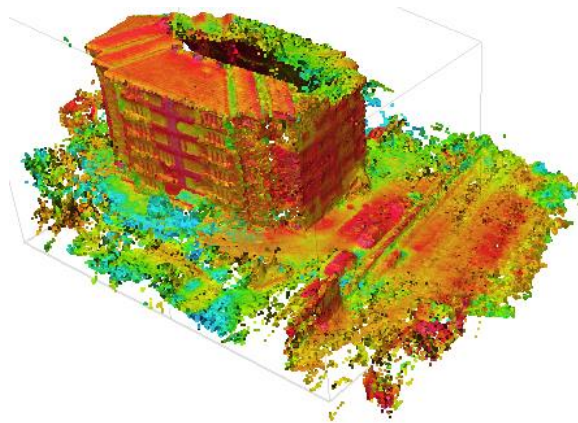


Termografik ve metrik bilginin kombinasyonu için tek yol lazer tarama ile termograflerin füzyonu değildir. Bu yöntemin tercih edilmeyip İHA fotogrametrisi talebinin artmasının nedeni zamanın kısıtlı oluşu ve pratik olmayışındandır. Çoklu-görüş stereo (multi-view stereo) algoritması yoğun nokta bulutu üretmek için kullanılır. Bu algoritma seyrek nokta bulutu üretiminde belirlenen yöneltme parametrelerine dayalı görüntü çiftlerinin epipolar geometrisi ile yoğun nokta üretir. Fotogrametrik modelin derinlik bilgisi burada belirleyici bir kriter oluşturmaktadır. Katı modeller, sayısal arazi modelleri, sayısal yükseklik modelleri ve ortofotolar gibi ürünler yoğun nokta bulutundan üretildiği için gereklidir. RGB ve termal seyrek nokta bulutlarının çoklu stereo görüntüler ile yoğunlaştırılması ayrı fotogrametrik değerlendirmeler ile birbirinden bağımsız şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretilen RGB yoğun nokta bulutunun çeşitli açılardan görünümü Şekil 10'da verilmiştir.



**Şekil 10.** a) RGB yoğun nokta bulutu önden görünüm b) RGB yoğun nokta bulutu kuzey-batı görünümü c) RGB yoğun nokta bulutu-güney-doğu görünümü

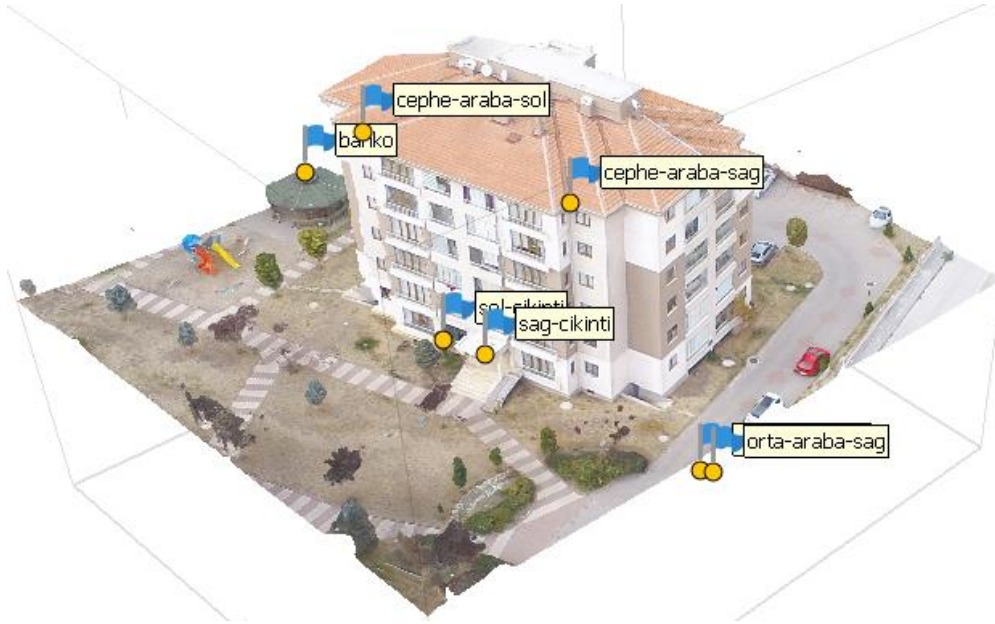
Termografik görüntülerin kayıt edilmesi ile elde edilen termografik yoğun nokta bulutu üretimi derinlik haritasından belirlenen düşük güvenilirlik noktaları filtrelenerek gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, bakış açısı etkileri elimine edilerek termografik mozaik üretimi için gerekli olan yoğun nokta bulutu elde edilmiştir (Şekil 11).



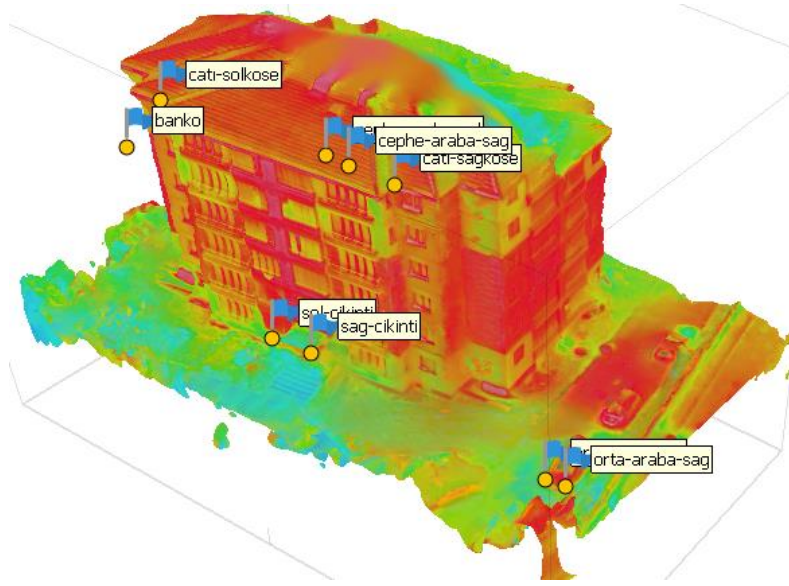
**Şekil 11.** Termografik yoğun nokta bulutu

### 2.3 RGB-TIR Model Füzyonu

Bina yorumlama için termografinin asıl yararı, fotogrametrik ölçme ve değerlendirmenin düzenli bir izleme ve kontrol yöntemi olarak kullanılma potansiyelidir. Harcanan emeğin azalması ile yüzlerce nokta ölçme ihtiyacını da ortadan kaldırmaktadır. Termografik ve metrik bilgiyi kombine etmek için yüksek hassasiyetli birincil çözüm binanın üç boyutlu geometrik bilgisinin lazer tarama ile belirlenerek termografileri füzyon etmektir. Bu çalışmada daha düşük maliyetli geometrik modelleme RGB görüntülerden fotogrametrik model ve yüksek çözünürlüklü üç boyutlu nokta bulutu üretimi ile gerçekleştirilmiş sonra termal görüntülerle dokulandırılması hedeflenmiştir. Ancak yaklaşım birkaç hata barındırabilir. İlk olarak, termal görüntüler RGB görüntüler ile kıyaslandığında çözünürlüğü düşüktür. Termal görüntüdeki düşük çözünürlük durumunun en belirgin dezavantajı modeller arasında sağlam bir dönüşüm sağlamak için gerekli yüksek çözünürlüklü RGB görüntü arasında ortak noktaların tespit etme zorluğudur. İkinci olarak, termal görüntülerin veri kazanım süreci binanın yüzey sıcaklıkları hızlıca değiştiği için sonuçları etkilemede önemli rol oynar. Bu yüzden veri toplama süreci hızlı olmalıdır. Fakat aynı zamanda hızlı termal görüntü kazanımı doğruluğu etkileyen bulanık görüntü üretmeye eğilimlidir (Li vd., 2022). Termografik görüntülerin birleştirilmesi ile oluşturulan termografik mozaik, görüntü eşleme algoritmalarına tabi tutularak görüntü füzyonunu mümkün kılmaktadır. Böylelikle, bina ısı yalıtımının kalitesinin incelenmesi için RGB ve termal bilgiyle yüklü model analize katkı sağlar. Ayrıca termal ve RGB görüntülere dayalı oluşturulan fotogrametrik bina yüzey sıcaklık modeli, lazer tarama yöntemi ya da diğer jeodezik ölçme yöntemlerine göre hız ve maliyet açısından da önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Sunulan yaklaşım ile düşük çözünürlüklü termal görüntülere doğrudan görüntü eşleme algoritmalarını uygulamak yerine füzyonu gerçekleştirilmiş görüntüler kullanılmaktadır. Doğru bir füzyon model için her iki modelde işaretlenen ortak noktaların mümkün olduğunca belirgin nesne unsurları olması önemlidir. Otomatik bir tespit algoritmasına dayalı olmayan bu tespit işleminin başarısı kullanıcının manuel işaretleme yeteneğine bağlıdır. RGB ve termal katı model üzerinde işaretlenen noktalar Şekil 12 ve 13’de verilmiştir.



Şekil 12. RGB katı modeli üzerinde işaretlenen nokta konumlarının gösterimi



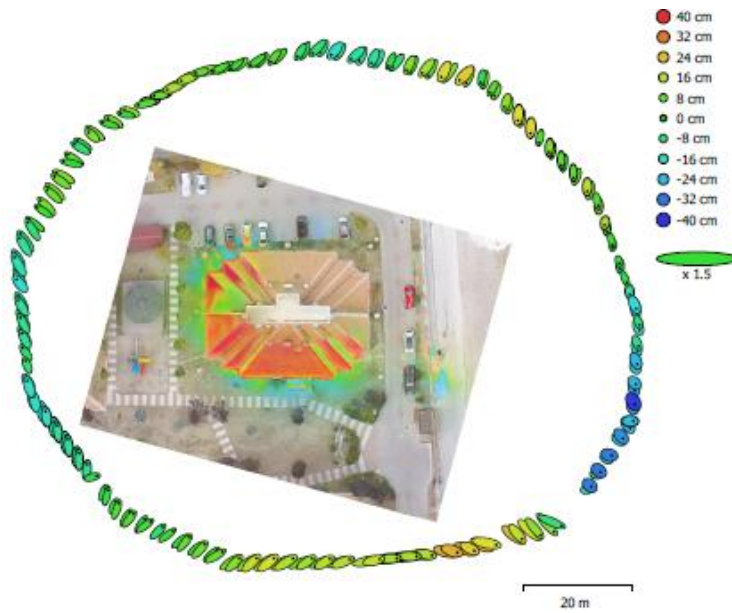
Şekil 13. Termal katı modeli üzerinde işaretlenen nokta konumlarının gösterimi

Veri füzyonuna dair kamera parametreleri Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 5. Veri füzyonuna dair birtakım parametreler

Kamera Konumu Sayısı	184
Uçuş Yüksekliği	60.5 m
Alan Boyutu	$3.62 \times 10^3 \text{ m}^2$
Bağlantı Noktası Sayısı	84.729
Ölçek	315.003

Füzyonu gerçekleştirilmiş RGB ve termal yoğun nokta bulutunun kamera konumlarının hata tahminlerine dair görsel Şekil 14' te verilmiştir.



Şekil 14. Kamera konumları ve hata tahminleri

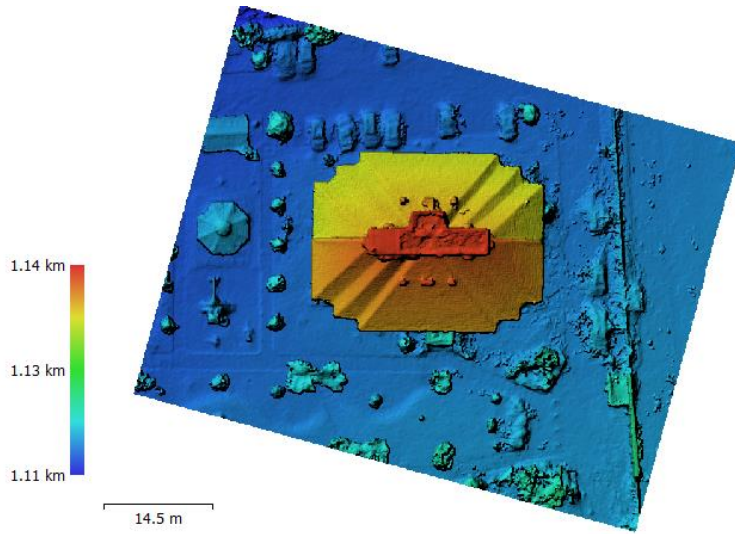
Üç boyutlu nokta bulutunda termal ve RGB verilerin sıklığı, yoğun nokta bulutu elde edildikten sonra elde edilebilecek sayısal yükseklik modelinin kalitesini arttırmaktadır (Kršák vd., 2016). Füzyonu gerçekleştirilmiş veriden elde edilen katı modelin görselleri Şekil 15’ de verilmiştir.



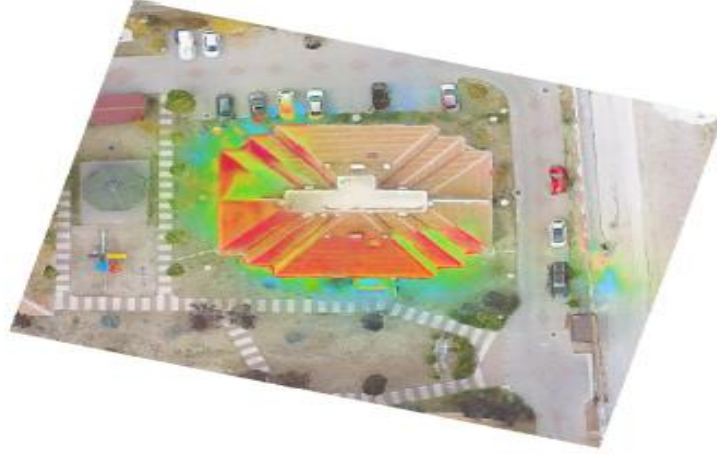
Şekil 15. Füzyonu gerçekleştirilmiş katı modelin farklı açılardan gösterimi

### 2.3.1 RGB-TIR sayısal yükseklik modeli ve ortofoto üretimi

Fotogrametrik model ile üretilen yoğun nokta bulutlarının yükseklik boyutu kullanılarak SYM üretilmektedir. Üretilen SYM’nin yükseklik seviyelerini farklı renklendirmeler ile görselleştiren mutlak normal bakış açısından görüntüleri oluşturulabilmektedir. Ayrıca SYM, ortofoto üretimi için oldukça önemlidir. Üretilen SYM fotogrametrik yöneltme parametrelerine bağlı olarak görüntülerden alınan piksel renk değerlerinin bir düzleme projeksiyonu ile gerçekleştirilir. Ortofoto üretimin kalitesi görüntülerin çözünürlüğü ve fotogrametrik modelin kalitesi ile doğru orantılıdır. Şekil 16, görüntü füzyonuna dayalı sayısal yükseklik modelini göstermektedir. Diğer taraftan füzyonu gerçekleştirilmiş görüntüler ile oluşturulan ortofoto Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 16. Füzyonu gerçekleştirilmiş sayısal yükseklik modeli (SYM)



Şekil 17. Füzyonu gerçekleştirilmiş modelin ortofotosu

### 2.3.2 RGB-TIR modelinin analizi

İHA'ya entegre edilen çoklu sensörlü kameraların parametreleri, bu parametreleri bilinmeyen olarak kabul eden ve tüm modelin dengelemesine katılması yöntemiyle diğer bir ifadeyle iş anında kamera kalibrasyonu ile belirlenmiştir. 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. Kalibrasyon parametrelerine dair bilgiler Tablo 6'da verilmiştir. F ifadesi odak uzaklığını, K1 ve K2 radyal distorsiyon parametrelerini ve P1 ve P2 teğetsel distorsiyon parametrelerini ifade etmektedir.

Tablo 6. RGB kameranın kalibrasyon korelasyon matrisi

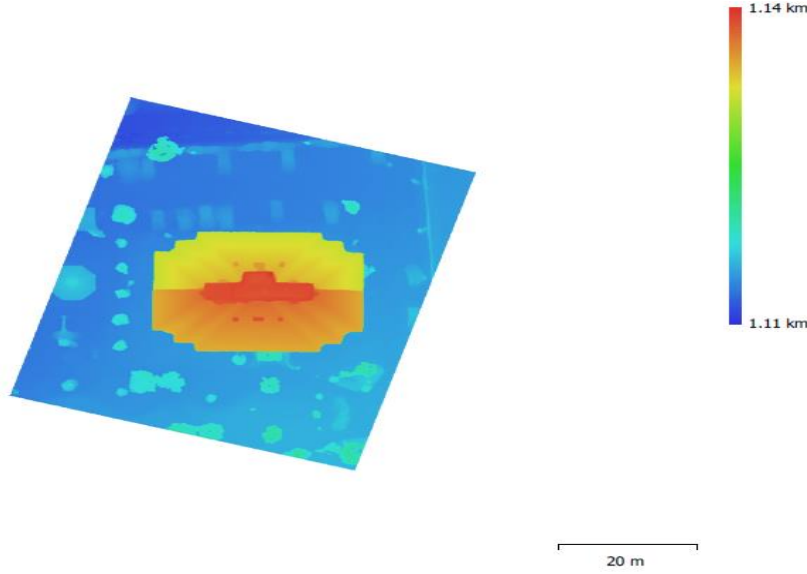
	Değer	Hata	F	K1	K2	P1	P2
F	1255.94	0.14	1.00	-0.14	0.46	0.04	-0.40
K1	-0.11010	0.00092		1.00	-0.81	-0.06	-0.19
K2	0.09916	0.00011			1.00	0.04	-0.13
P1	-0.00039	0.00002				1.00	0.01
P2	0.00016	0.00002					1.00

RGB sensöre oranla termal sensörün distorsiyon değerleri yüksektir. Tablo 7'de termal sensörün kalibrasyon korelasyon matrisi verilmiştir.

Tablo 7. Termal kameranın kalibrasyon 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

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 eşlenik noktası üretilmemektedir. Bu nedenle yüksek çözünürlüklü üç boyutlu RGB modelden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında inşa edilen RGB sayısal yükseklik modelinin çözünürlüğü 9.82 cm/piksel, termal modelin 18.43 cm/piksel iken, füzyon modelin çözünürlüğü 14.90 cm/piksel olarak belirlenmiştir. İnşa edilen RGB-Termal sayısal yükseklik modeli Şekil 18'de gösterilmiştir.



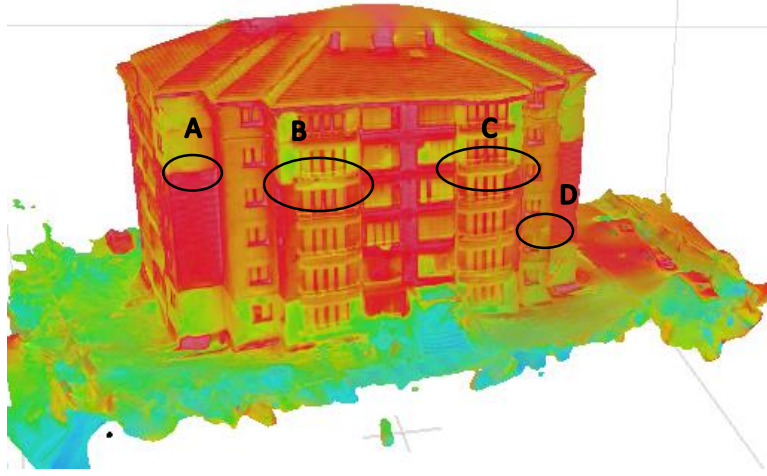
Şekil 18. İnşa edilmiş sayısal yükseklik modeli boyutları

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Çoklu sensörlü kamera ile kazanılan termal görüntülerin gün ışığında kazanılmış olması ve termal görüntülerin doğası gereği kapsama alanı dar, pürüzlü ve bulanık olması gibi nedenlerle daha düşük çözünürlüklü termal nokta bulutu elde edilmiştir. 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. 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 füzyon gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, termal görüntülerin dar kapsama alanı ve farklı yükseklikten alınması nedeniyle ortaya çıkabilecek hatalar elimine edilmiştir. Güncel literatür değerlendirildiğinde Han ve Huh (2019)'dan farklı olarak bu çalışmada RGB ve termal modellerin birlikte değerlendirmesi ile model doğruluklarındaki iyileştirmeler sunulabilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, Javadnejad vd. (2020) çalışmasından farklı olarak füzyon işleminin doğrudan üç boyutlu füzyona dayalı olarak gerçekleştirilmesi ile farklı spektrumda elde edilen görüntülerin nokta eşleşmesindeki otomatik işlem zorluğu aşılabılmıştır. Bu makalede öne çıkan diğer bir husus ise sensör yetersizliğine ve gün ışığı, İHA titreşimleri vb. dış etkilere dayalı olarak termal görüntülerin birbirleri arasında ortaya çıkan radyometrik farklılıkların iyileştirmesinin sağlanması olmuştur. Bu iyileştirme fotogrametrik ölçü kalitesini doğrudan artıran bir etki olarak gözlenmiştir.

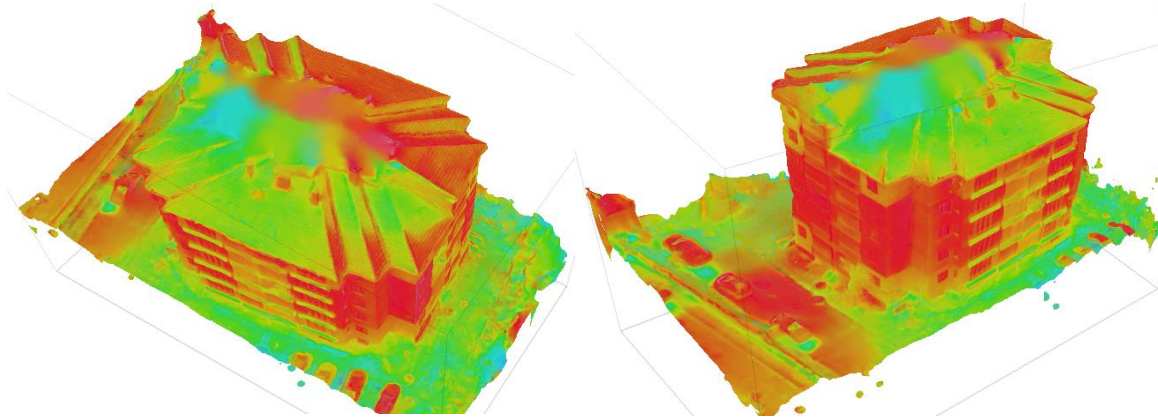
Termal görüntülerin üzerine gün ışığı etkisinin geceye kıyasla daha fazla bozucu olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkılarak daha geniş kapsamlı uygulama ve analizler için gece saatlerinde yapılacak veri kazanımının doğruluğu arttıracak değerlendirilmektedir. Veri alımı gerçekleştirilecek unsurun etrafında termal alımı güçlendirebilecek ağaç, araba gibi nesnelerin miktarı ve mesafesi de dikkat edilmesi gereken diğer bir etken olarak öne çıkmaktadır. Uygulama kapsamında, özellikle çatı, balkon ve pencerelerde yalıtımsızlık sebebiyle ısı kaçakları yoğun olarak tespit edilmiştir. Termal görüntüleme malzeme türüne bağlı olarak ışın yayılımını kaydettiği için sadece yalıtıma bağlı mutlak sıcaklık değişimlerini değil aynı zamanda malzeme değişimine bağlı sıcaklık değişimlerini de verir. Ancak bu çalışmada çekim anında üretilebilen radyometrik özellikli termal bir görüntü formatı olmadığından mutlak sıcaklık değerleri elde edilememiştir. Gösterilen tüm analiz ve sonuçlar göreceli sıcaklık değişimlerine dayalı oluşturulmuştur. Mutlak sıcaklık bilgisi olmadığından makalede sunulan görseller için ayrıca sıcaklık değerlerine karşılık gelecek bir lejant oluşturulamamıştır. Bu durum, sıcaklık farklarındaki niceliksel değişimlerin ortaya konulamaması nedeni ile çalışmanın kısıtlayıcı bir etkisi olarak değerlendirilmektedir. Ancak diğer taraftan RGB görüntüye dayalı olarak homojen malzeme yüzeylerinin kendi içerisinde değerlendirmesi de önemlidir. Örneğin, binada üzerinde sabitlenmiş yağmur ve atık su tahliye boru hatları da sıcaklık farklılıkları göstermektedir. Cephelelerdeki homojen malzemelerin olduğu yüzeylerdeki sıcaklık farklılıklarının olması ise potansiyel yalıtım hatalarına işaret etmektedir. Potansiyel yalıtım hata kaynaklarının fotogrametrik inceleme dışında uzmanlar tarafından yerinden de incelenmesi önemlidir. Katlar arasında sıcaklık farkları göz önüne alındığında, ısı yalıtımının hataları sebebiyle veya harcanılan yakıt miktarı farklılıkları nedeniyle meydana gelip gelmediği tahmini yürütülebilmektedir. Şekil 19' da yoğun ısı kaçaklarının tespit edildiği bazı öne çıkan yerler belirtilmiş olup siyah daireler ile işaretlenmiştir. A bölgesi cephe malzeme yüzeyi farklılığı nedeniyle sıcaklık farkı ortaya koymaktadır.

B ve C bölgesi balkon üzerinde yer alan bölgede sıcaklık farkı göstermektedir ve bunun muhtemel sebebi o bölgedeki yalıtım eksikliğidir. Yine D bölgesinde homojen yüzey malzeme olan bölgede yer alan sıcaklık farkı potansiyel yalıtım hatasını göstermektedir. Kesin tespit için o bölgelerin yalıtım uzmanları tarafından yerinde ve yakından incelenmesi önemlidir.



Şekil 19. Termal üç boyutlu modelin güneybatı cephesi üzerinde tespit edilen bazı sıcaklık farkları

Bina ısı yalıtımının eksikliklerinin tespit edilmesine yardımcı olmak için fotogrametrik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sonuç olarak füzyonu gerçekleştirilmiş görüntüler, yüksek çözünürlüklü termal bilgiler ile donatılmış görünür görüntülerdir. İHA ile yüksek kaliteli üç boyutlu model üretimi sırasında uçuş planı büyük önem taşımaktadır. Görüntü alımı sık ve binanın tüm cephelerini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmelidir. İyi bir uçuş planı oluşturulsa bile kazanılan termal görüntülerle üretilen üç boyutlu modellerde boşluklar oluşabilmektedir. Uygulama kapsamında üretilen modelin bozuk yönleri Şekil 20’de verilmiştir. Bozuklukların en önemli etkeni gün ışığının geliş yönüne bağlı olarak yansıma etkisi ortaya koyması ve buna bağlı olarak termal görüntüleme radyometrik farklılıklar oluşmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle çatı incelendiğinde bu etki çatının iki farklı yarısında renk tonlarında oluşan farklılıklar olarak gözlenmektedir. Diğer etki ise düşük çözünürlüğe bağlı olarak çatı ve cephe üzerindeki detayların seçilmesindeki zorluklardır.



Şekil 20. Termal katı modelin bozuk yönleri

Termal görüntülerin yönlendirilmesi ve eşlenmesi zordur ancak görünür görüntüler referans alınarak bu güçlük ortadan kaldırılabilmektedir. Sonuç olarak, veri birleştirilmesi ile termal model ile belirlenen sıcaklık noktalarının RGB modeldeki karşılıklarının tespit edilebilmesi nedeni ile sıcaklık farklarının bina yüzeyindeki yerleri doğrudan anlaşılabilir. Ancak termal model ölçme noktalarının yüksek hataya sahip olduğu lokasyonlarda tutarsızlıklar kaçınılmaz olarak ortaya çıkmaktadır. 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 RGB ve termal verilerin yaz, kış ve gece, gündüz olmak üzere gerçekleştirilecek veri kazanımı ile zamansal analiz aracılığıyla bozucu etkileri ortaya konulabilir.

## Teşekkür

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FBA-2020-3306.

## Kaynaklar

- Bayraktar, D., & Bayraktar, E. (2016). Mevcut binalarda ısı yalıtımı uygulamalarının değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 59-66.
- Bektaş, V., Çerçevik, A. E., & Kandemir, S. Y. (2017). Binalarda ısı yalıtımının önemi ve ısı yalıtım malzemesi kalınlığının yalıtıma etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 36-42.
- Demir, N. (2011). *Yüksek yapılar ve sürdürülebilir enerji* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.
- Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications*, 25(1), 245-262.
- 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). Thermal data fusion for building insulation. In *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 2019. Proceedings.* (pp. 368-371). IEEE.
- İMO. (2015). *Binalarda ısı yalıtımı ve ısı yalıtım malzemeleri*. Yapı Malzemeleri Komisyonu, Retrieved from [http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17182\\_44\\_51.pdf](http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17182_44_51.pdf)
- 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.
- Kim, J. B., Jeong, W., Clayton, M. J., Haberl, J. S., & Yan, W. (2015). Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. *Automation in construction*, 50, 16-28.
- Kršák, B., Blišťan, P., Pauliková, A., Puškárová, P., Kovanič, L. M., Palková, J., & Zelížňaková, V. (2016). Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*, 91, 276-287.
- 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.
- Li, Q., Cao, R., Zhu, J., Hou, X., Liu, J., Jia, S., & Qiu, G. (2022). Improving synthetic 3D model-aided indoor image localization via domain adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 183, 66-78.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
- 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.
- 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*, 42(1), 413-420.
- Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3), 835-846.
- 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. doi: 10.1371/journal.pone.0178090.
- Tarık, T., & Öcalan, T. (2020). PPK GNSS Sistemine Sahip İnsansız Hava Araçları ile Elde Edilen Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluğunun Farklı Yaklaşımlarla İrdelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(1), 22-28.
- TSE. (2013). *TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. Retrieved from [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/cf3e258fbdf3eb7\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/cf3e258fbdf3eb7_ek.pdf)