



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİNA ISI YALITIMININ İZLENMESİNDE TERMAL İHA VE
FOTOGRAMETRİNİN KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI**

EMİNE BEYZA DÖRTBUDAK

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİNA ISI YALITIMININ İZLENMESİNDE TERMAL İHA VE
FOTOGRAMETRİNİN KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI**

EMİNE BEYZA DÖRTBUDAK

**HARİTA MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı: Doç. Dr. NİZAR POLAT**

**Şanlıurfa
2025**

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi çalışmamın planlanması, araştırılması ve yürütülmesi sürecinde ilgi ve desteğini esirgemeyen; yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı danışmanım Sayın Doç. Dr. Nizar POLAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu vesileyle, eğitimim süresince bilimsel ve manevi desteklerini esirgemeyen Harran Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm öğretim üyelerine de şükranlarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme; özellikle bugünlere gelmemde büyük emekleri olan annem Zahide DÖRTBUDAK ve babam Mehmet Nuri DÖRTBUDAK'a derin minnet duygularımı ifade etmek isterim. Ayrıca her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili kız kardeşlerim Merve DÖRTBUDAK ve Rümeysa DÖRTBUDAK'a da teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte bana daima sabır, sevgi ve anlayışla destek olan sevgili eşim Üsame SARMIŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
3. GEREÇ VE YÖNTEM	12
3.1. Bina Isı Kaybı Hesaplaması	12
3.2. Kullanılan Yöntemler ve Teknolojiler	22
3.2.1. Termografi	22
3.2.2. Fotogrametri	27
4. BULGULAR	34
4.1. Blok 1 Bulguları	35
4.2. Blok 2 Bulguları	40
4.3. Blok 3 Bulguları	42
5. TARTIŞMA	47
6. SONUÇLAR	52
7. ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	54

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİNA ISI YALITIMININ İZLENMESİNDE TERMAL İHA VE FOTOGRAMETRİNİN KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

EMİNE BEYZA DÖRTBUDAK

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışman: Doç. Dr. NİZAR POLAT
Yıl: 2025, Sayfa : 60

Bu tez çalışmasında, bina cephelerinde yer alan ısı yalıtım zafiyetlerinin tespitine yönelik olarak İHA destekli termal görüntüleme ve fotogrametrik modelleme yöntemlerinin birlikte kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, yapı kabuğundaki enerji kayıplarının belirlenmesi ve yalıtım performansının mevcut durumu hakkında mekânsal ve termal doğruluk içeren veriler elde etmektir. Uygulama alanı olarak Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi seçilmiş; ilgili yapıdan İHA ile termal görüntüler toplanmış, ardından bu görüntüler Agisoft Metashape yazılımı kullanılarak üç boyutlu fotogrametrik modellere entegre edilmiştir. Termal analizlerde iç ve dış ortam sıcaklıkları, duvar yüzey alanları, açıklık alanları, ısı iletim direncini belirten U değerleri ve sıcaklık farkları esas alınarak yüzey ısı iletim kayıpları hesaplanmıştır. Özellikle pencere ve kapı açıklıkları ile betonarme birleşim bölgelerinde oluşan termal anomaliler detaylı olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda, bazı sınırlı yüzey bölgelerinde 208,7 W düzeyinde ısı iletim kaybı gözlemlenirken, bir diğer cephedeki 68,93 m uzunluğundaki ısı köprüsünde 627,3 W düzeyinde kayıp hesaplanmıştır. Buna göre, cephelerin toplam ısı kaybı 714,7 W'ye ulaşmıştır. Bu değerler, çalışılan yapıların mevcut yalıtım durumunun yetersizliğini ortaya koyarken, aynı zamanda İHA destekli termal denetim yönteminin etkinliğini de göstermiştir. Literatürle uyumlu olarak, ısı kayıplarının büyük kısmı küçük yüzeylere sahip bölgesel zafiyetlerden kaynaklanmakta ve bu durum enerji verimliliği açısından ciddi bir performans açığı oluşturduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, İHA destekli termografi ve fotogrametri yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla; yapıların enerji performansı hızlı, güvenilir ve detaylı biçimde analiz edilebilmekte, ayrıca yapılacak iyileştirme çalışmalarına bilimsel veri temeli sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, söz konusu yöntemlerin yapı denetiminde, enerji kimlik belgesi düzenlemelerinde ve sürdürülebilir bina tasarımlarında destekleyici bir mühendislik aracı olarak kullanılması önerilmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: enerji verimliliği, İnsansız Hava Araçları (İHA), Termal görüntüleme, Isı yalıtımı, 3B model

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE UTILIZATION OPPORTUNITIES OF THERMAL UAV AND PHOTOGRAMMETRY IN MONITORING BUILDING THERMAL INSULATION

EMİNE BEYZA DÖRTBUDAK

**HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
GEOMATICS ENGINEERING**

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. NİZAR POLAT
Year: 2025, Page : 60**

In this study, the combined use potential of UAV-assisted thermal imaging and photogrammetric modeling methods was investigated for the detection of thermal insulation deficiencies on building facades. The aim of the study is to identify energy losses through the building envelope and to obtain spatially and thermally accurate data regarding the current state of insulation performance. The Faculty of Engineering building at Harran University was selected as the application area; thermal images of the selected structure were captured via UAV, and these images were subsequently integrated into three-dimensional photogrammetric models using Agisoft Metashape software. In thermal analyses, surface heat transfer losses were calculated based on indoor and outdoor temperatures, wall surface areas, opening areas, U-values indicating thermal transmittance, and temperature differences. Thermal anomalies, especially those occurring around window and door openings as well as at reinforced concrete joints, were examined in detail. As a result of the analysis, a heat transmission loss of approximately 208.7 W was observed in certain localized surface areas, while a linear thermal bridge with a length of 68.93 m on another facade was found to cause a loss of 627.3 W. Accordingly, the total heat loss from the facades reached 714.7 W. These values not only reveal the inadequacy of the current insulation status of the studied buildings but also demonstrate the effectiveness of the UAV-assisted thermal inspection method. In line with the literature, it was determined that a significant portion of heat loss originates from small, localized weaknesses in the building envelope, which create a substantial performance deficit in terms of energy efficiency. Based on the results obtained, it is concluded that the combined use of UAV-assisted thermography and photogrammetry enables the fast, reliable, and detailed analysis of the energy performance of buildings, and provides a scientific data foundation for subsequent improvement efforts. In this context, it is recommended that these methods be employed as a supportive engineering tool in building inspections, the issuance of energy performance certificates, and the design of sustainable buildings.

KEYWORDS: energy efficiency, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Thermal imaging, Thermal insulation, 3D model

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Çalışma Alanı	18
Şekil 3.2.	Mühendislik fakültesi genel görünümü	19
Şekil 3.3.	Çalışmada kullanılan İHA: DJI Mavic 3 Enterprise Thermal	20
Şekil 4.1.	Çalışmada kullanılan bloklar	35
Şekil 4.2.	Blok 1 anomali termal model görünümü	36
Şekil 4.3.	Blok 1 anomali 3B model görünümü	36
Şekil 4.4.	Blok 1 anomalinin İHA kaynaklı RGB görüntüsü	37
Şekil 4.5.	Blok 1 kapı ve pencere anomali	37
Şekil 4.6.	Blok 1 kapı ve pencere anomalinin 3B model görünümü	38
Şekil 4.7.	Blok 1 kapı ve pencere anomalinin İHA kaynaklı RGB görüntüsü	38
Şekil 4.8.	Blok 2’de bulunan anomalilerin termal 3B modelde görünümü	40
Şekil 4.9.	Blok 2’de bulunan anomalilerin 3B modelde görünümü	41
Şekil 4.10.	Blok 2’de bulunan anomalilerin İHA ile elde edilen RGB görüntüsü	41
Şekil 4.11.	Blok 3’te bulunan anomalinin Termal 3B model üzerinde görünümü	42
Şekil 4.12.	Blok 3’te bulunan anomalinin 3B modeldeki görünümü	43
Şekil 4.13.	Blok 3’te bulunan anomalinin İHA ile elde edilen RGB görüntüsü	43
Şekil 4.14.	Blok 3 duvar anomali	44
Şekil 4.15.	Blok 3’deki duvarın 3B model görünümü	44
Şekil 4.16.	Blok 3’te bulunan duvarın İHA ile elde edilen RGB görüntüsü	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Çalışmada kullanılan İHA'nın teknik özellikleri	21
Çizelge 3.2.	İHA termografisi ile geleneksel yöntemlerin karşılaştırması	26
Çizelge 3.3.	Fotogrametrinin Avantaj ve Dezavantajları	30
Çizelge 4.1.	Blok 1 toplam ısı kaybı	40
Çizelge 4.2.	BLOK 3 Toplam ısı kaybı	45

SİMGELER

%	Yüzde
cp	Akışkanın sabit basınçtaki özgül ısısı (J/kg·K)
C°	Santigrat derece
h	Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m ² ·K)
k	Termal iletkenlik
L	Isı köprüsünün toplam uzunluğu
m	Kütleli debi (kg/s)
m²	Metrekare
U	Isı geçiş katsayısı
W	Watt
ΔT	Sıcaklık farkı
ρ	Hava yoğunluğu
ψ	Lineer ısı geçiş katsayısı

KISALTMALAR

DSLR	Digital Single Reflex Camera
3B	3 Boyutlu
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
İHA	İnsansız Hava Aracı
IR	Kızılötesi
KPMG	Klynveld Peat Marwick Goerdeler (Uluslararası denetim, vergi ve danışmanlık şirketi ağı)
LIDAR	Light Detection and Ranging
RGB	Red Green Blue
SYM	Sayısal Yüzey Modeli
TIR	Thermal InfraRed
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UAV-IRT	Unmanned Aerial Vehicle – InfraRed Thermography

1. GİRİŞ

Enerji, günümüz dünyasında ekonomik büyüme, toplumsal refah ve çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir öneme sahiptir. Gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkeler, sanayi, ulaşım, tarım ve konut gibi çeşitli sektörlerde enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Enerji, yalnızca ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilmesi için değil, aynı zamanda bireylerin yaşam kalitesinin artması, konforlu ve güvenli yaşam alanlarının oluşturulması açısından da kritik bir kaynaktır (Yılmaz ve Şahin, 2019).

Enerji tüketimi, nüfus artışı, kentleşme ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak her geçen gün artmaktadır (Bektaş vd.,2017). Fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji kaynaklarının sınırlı oluşu ve bu kaynakların kullanımının yol açtığı çevresel sorunlar, enerji üretimi ve tüketiminde ciddi bir sürdürülebilirlik sorunu ortaya çıkarmaktadır. Sera gazı salımlarının artışı, iklim değişikliği gibi küresel sorunlar, enerji üretiminde ve tüketiminde daha çevreci ve verimli stratejilerin uygulanmasını zorunlu kılmıştır. Bu kapsamda birçok ülke, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmekte veya mevcut enerji tüketimini azaltıcı önlemler geliştirmektedir.

Küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları ele alındığında, binalar önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, bina sektörü dünya genelindeki toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu, enerjiye bağlı karbon salımının ise %26'sını oluşturmaktadır (IEA, 2023). Bu durum, binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejilerin hem ekonomik fayda sağlama hem de iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Enerji tüketimi ve talebi konusu Türkiye genelinde incelendiğinde küresel ölçekten farklı olmadığı görülmektedir. Türkiye’de sanayileşme, nüfus artışı, ekonomik büyüme ve değişen tüketim alışkanlıklarıyla birlikte enerji talebi sürekli artmaktadır. Örneğin, Klynveld Peat Marwick Goerdeler (KPMG) Türkiye’nin APLUS Enerji iş birliğiyle yayımladığı “Enerji Sektör Raporu 2024”e göre, Türkiye’de 2000–2023 yılları arasında elektrik talebinin yıllık bileşik büyüme oranı %4,2 olarak gerçekleşmiştir. Elektrik talebindeki artışın temel nedenlerinden biri, konut ve ticari binalarda iklimlendirme sistemlerine olan ihtiyacın giderek artmasıdır. Özellikle yetersiz ısı yalıtımına sahip binalar, iç ortam konforunu sağlamak amacıyla daha yoğun iklimlendirme sistemi kullanmakta bu durum da enerji tüketiminin ve dolayısıyla toplam enerji talebinin artmasına neden olmaktadır.

Binalarda enerji tüketiminin dağılımı incelendiğinde, tüketim çeşitli alanlara yayılmış olmakla birlikte, bazı kullanım kalemleri toplam tüketim içinde öne çıkmaktadır. Binalarda enerji tüketiminin en büyük kısmı ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerinde gerçekleşmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) 2022 yılı verilerine göre, hanelerde en çok tüketilen enerji kaynağı olan doğal gazın %76,3'ü alan ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Bu durum, konutlarda enerji tüketiminin büyük oranda ısınmaya yönelik gerçekleştiğini göstermektedir (TÜİK, 2023). Bu bağlamda, ısı yalıtımına yönelik yapılacak iyileştirmelerin enerji verimliliğine doğrudan katkı sağlayacağı açıktır. Bir diğer tüketim sebebi olan aydınlatma sistemleri, özellikle ticari binalar ve kamu yapılarında önemli bir enerji tüketim kalemidir. Verimsiz ampuller ve sürekli açık kalan aydınlatma sistemleri enerji tüketimini ciddi ölçüde artırmaktadır. Bu durum da dolaylı olarak ısı yalıtımı ile ilişkilidir. Özellikle sıcak iklimlerde, güneş ışınlamına karşı yetersiz yalıtılmış binalarda iç ortam sıcaklıklarının artması, soğutma cihazlarının kullanımını artırmakta ve bu da elektrik tüketimini doğrudan etkilemektedir (IEA, 2021). Bu bağlamda, pasif ısı kontrolü sağlayan yalıtım uygulamaları yalnızca konforu artırmakla kalmayıp, aynı zamanda sistemlerin elektrik talebini de düşürmektedir. Belirtilen tüketim kalemleri incelendiğinde, binaların enerji performansını artırmak için alınacak en etkili önlemlerden birinin bina ısı yalıtımı olduğu açıkça görülmektedir. Kaliteli bir ısı yalıtımı sayesinde, dış ortam koşullarından kaynaklanan ısı kayıp ve kazançları minimize edilerek enerji gereksinimi önemli ölçüde azaltılabilir (Aydın, 2017).

Isı yalıtımı, binalarda iç ve dış ortamlar arasında gerçekleşen ısı geçişini azaltmak amacıyla yapılan uygulamaların tümünü ifade eder. Bu uygulamalar sayesinde, kışın ısının dışarı çıkması, yazın ise dış ortam sıcaklığının içeri girmesi engellenir. Böylece, konfor koşulları korunurken enerji tüketimi azaltılır ve hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlanır (Çomaklı ve Yüksel, 2004). Gelişmiş yalıtım çözümleri ile ısı köprülerinin, hava sızıntılarının ve nem sorunlarının azaltılması yoluyla iç ortam kalitesi iyileştirilir (Krawczyk vd., 2018; Biswanath vd., 2023). Tüm bu kazanımlar, binaların ömrü boyunca enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. Isı yalıtımı bilimsel olarak ifade edildiğinde, ısının iletim, taşınım ve ışınlım yoluyla hareketine karşı direnç gösteren malzemelerin bina yapı elemanlarına uygulanmasıyla, ısı kayıplarının veya kazançlarının minimize edilmesi sürecidir (ASHRAE, 2017). Binalara uygulanmış doğru ısı yalıtımının sağladığı birçok avantaj bulunmaktadır bu nedenle binaların ısı yalıtım performansının doğru bir biçimde izlenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir (Paralı, 2009).

Binalarda mevcut ısı yalıtımını belirlemek, değerlendirmek ve olası yalıtım eksikliklerini belirlemek amacıyla çeşitli geleneksel ve modern teknikler kullanılmaktadır (Erdabak,2011). Bu tekniklerden geleneksel olarak sınıflandırılabilir yöntemler; proje belgelerinin incelenmesi, ısı akısı ölçümü, iç ve dış ortam sıcaklık farkı ölçümleri iken, modern yöntemler arasında; aktif termografi, kızılötesi (termal) görüntüleme, insansız hava aracı (İHA) termografisi gibi yöntemler modern teknikler olarak sayılabilir (Yang vd., 2022). Bu yöntemler gerek görsel gerekse sayısal analizler sunarak enerji kayıplarının tespit edilmesini mümkün kılmaktadır.

Proje belgelerinin incelenmesi uygulamasında, yapının mimari ve statik projeleri incelenerek kullanılan yalıtım malzemeleri, kalınlıkları ve uygulama teknikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılır. Bu yöntem, yalnızca teorik bilgi sağlar ve sahadaki gerçek uygulama hatalarını ortaya koyamaz (Kaya, 2019).

Isı akısı ölçümünde, duvar ya da pencere gibi yapı elemanlarına yerleştirilen sensörlerle yüzeyden geçen ısı miktarı doğrudan ölçülür. Böylece ısı geçirme katsayısı (U-değeri) saha verilerine dayalı olarak hesaplanabilir (Tian vd., 2021).

İç ve dış sıcaklık farkı ölçümlerinde ise, yapının belirli noktalarında uzun süreli sıcaklık ölçümleri yapılır ve iç-dış sıcaklık farklarından enerji kayıpları analiz edilmeye çalışılır. Bu yöntem, çevresel koşullardan etkilenmeye açık olduğu için genellikle destekleyici veri olarak kullanılır (Fokaides ve Kalogirou, 2011).

Geleneksel yöntemlerin sahada uygulanmasının zaman alıcı, maliyetli ve erişim kısıtlı bölgelerde yetersiz kalması nedeniyle, araştırmacılar son yıllarda daha hızlı, güvenli ve yüksek doğruluk sağlayan modern teknolojilere yönelmiştir. Özellikle İHA termografisi, binaların enerji performansındaki yalıtım kusurlarını tespit etmek için veri sağlarken; 3 boyutlu (3B) modelleme, bu verilerin mekânsal analizini ve görselleştirilmesini mümkün kılar. Bu iki yöntemin birlikte kullanımı, binaların enerji performansının daha kapsamlı ve bütüncül değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Lagüela vd., 2013; Bacco vd., 2020).

Modern yöntemlerden biri sayılabilecek aktif termografide, yüzeye harici bir ısı kaynağı uygulanarak yüzey altı boşluklar, yalıtım eksiklikleri veya uygulama hataları daha hassas bir biçimde tespit edilir (Meola vd., 2005).

Kızılötesi (termal) görüntülemede ise, termal kameralarla yapılan

görüntüleme ile bina yüzeyindeki sıcaklık farkları tespit edilerek yalıtım eksiklikleri, termal köprüler ve ısı kaçakları belirlenmektedir. Bu yöntem pasif olarak uygulandığında çevresel koşullara duyarlıdır (Fokaides ve Kalogirou, 2011).

İHA termografisi, insansız hava araçlarına entegre edilmiş termal kameralar aracılığıyla yüzeylerden yayılan kızılötesi (InfraRed-IR) radyasyonun algılanması ve bu verilerin sıcaklık dağılımı haritası şeklinde görselleştirilmesi sürecidir (Maddahi ve Niyogi, 2021). Bu termal veriler, fotogrametrik yöntemlerle oluşturulan 3B modellerle entegre edildiğinde, yapının geometrik özellikleriyle birlikte termal anomalilerin mekânsal olarak analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Wang vd., 2024). İHA termografisi, binaların dış cephelerinin hızlı, detaylı ve temassız bir şekilde taranmasına olanak tanıyarak, özellikle yüksek yapılar ve erişimi zor alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır (Lagüela vd., 2013; Bacco vd., 2020). Bu çalışmada da söz konusu avantajlardan faydalanılarak, geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşmak amacıyla İHA'lara entegre termal kameralar ve fotogrametri temelli 3B modelleme entegre şekilde kullanılmış; böylece bina cephelerindeki ısı yalıtım durumu değerlendirilmiş ve ısı kayıpları nicel ve nitel olarak analiz edilmiştir.

Çalışma kapsamında, termal görüntüler aracılığıyla cephe yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımları analiz edilerek ısı köprüleri, yalıtımsız alanlar ve olası enerji kaçak noktaları tespit edilmiştir. Böylelikle, yapıların termal performans düzeyi nesnel verilerle ortaya konmuş; bu veriler üzerinden enerji kayıplarının büyüklüğü değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sadece mevcut yalıtım uygulamalarının etkililiğini gözler önüne sermekle kalmayıp, aynı zamanda binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik iyileştirme stratejileri geliştirilmesine de bilimsel bir zeminde katkı sunmaktadır. Çalışma kapsamında, Şanlıurfa Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu alanda gerçekleştirilen İHA uçuşlarıyla elde edilen termal ve görünür bant (RGB) görüntüler, fotogrametrik yöntemlerle işlenerek bina cephelerinin 3B modelleri oluşturulmuştur. Ardından bu modeller üzerinde sıcaklık dağılımı analizleri gerçekleştirilmiş ve ısı yalıtımıyla ilişkili termal anomaliler belirlenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, bina cephelerindeki ısı yalıtım durumunun değerlendirilmesinde İHA termografisi ile fotogrametrinin birlikte kullanımının etkinliğini araştırmaktır. Geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşan bu teknolojiler, yüksek doğrulukta ve hızlı veri toplama imkânı sunarak özellikle erişimi zor ve geniş alanlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Araştırma; veri toplama süreci,

fotogrametrik modelleme, termal görüntüleme prosedürü, görüntü analizleri ve bulguların değerlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Ayrıca, harita mühendisliği perspektifinden İHA tabanlı termal denetimlerin uygulanabilirliği ve bu teknolojilerin kullanım potansiyeli de irdelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, yapıların enerji kayıplarının azaltılması ve sürdürülebilir kampüs stratejilerine katkı sağlanması hedeflenmektedir. Bu yaklaşımın yalnızca çalışma alanıyla sınırlı kalmayıp, benzer yapılarda da uygulanabilecek yönetsel bir model önerisi sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca, İHA termografisi ile fotogrametrik tekniklerin entegrasyonunun, bina ısı yalıtımının izlenmesinde sağladığı teknik ve zamansal avantajlar ortaya konulacaktır.

Bu tez çalışması, toplamda beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm olan Giriş bölümünde, araştırmanın amacı, kapsamı, önemi ve problemin tanımı detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. İkinci bölüm olan Literatür Taraması kısmında, bina ısı yalıtımı, termal görüntüleme teknolojileri, İHA ve fotogrametri konularında daha önce yapılmış çalışmalar incelenerek, araştırmanın teorik temelleri oluşturulmaktadır. Ayrıca, çalışmanın literatüre katkısı ve sınırlılıkları bu bölümde yer almaktadır. Üçüncü bölüm Materyal ve Yöntem kısmında, çalışma alanı, kullanılan İHA platformu ve sensörler, veri toplama süreçleri, fotogrametrik modelleme ve termal görüntüleme prosedürleri detaylandırılmaktadır. Dördüncü bölüm olan Bulgular ve Tartışma bölümünde, elde edilen veriler analiz edilerek, ısı yalıtımının durumu değerlendirilmekte ve sonuçlar ilgili literatür ışığında tartışılmaktadır. Son olarak, beşinci bölüm olan Sonuçlar ve Öneriler kısmında, çalışmanın genel sonuçları özetlenmekte, elde edilen bulgular doğrultusunda öneriler sunulmakta ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için yönlendirmeler yapılmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İHA destekli termal görüntüleme ve fotogrametrik modelleme yöntemlerinin bina cephelerinin izlenmesi ve enerji verimliliği analizinde kullanımına yönelik literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar, özellikle termal kameralarla elde edilen görüntülerin sayısal ortama aktarılması ve üç boyutlu modeller aracılığıyla yapıların ısı kayıplarının değerlendirilmesi yönünde önemli katkılar sunmuştur. Önceki araştırmalardan bazıları aşağıda sunulmaktadır.

Thomas, Jones ve Donne (2000), kızılötesi termografinin yapıların tanısal izlenmesindeki kullanımını ele almışlardır. Çalışmada, termal kameralarla elde edilen görüntülerin yapısal sorunların erken tespiti, enerji kayıplarının analizi ve genel bina performansının izlenmesinde nasıl etkin bir araç olduğu tartışılmıştır. Ayrıca, termografik verilerin yorumlanması ve analizindeki teknik zorluklar ile bu alandaki gelişmeler incelenmiştir. Bu çalışma, termografinin erken dönem uygulamalarını ve diagnostic monitoring alanındaki önemini ortaya koyarak, sonraki araştırmalar için temel oluşturmuştur.

Cho ve Wang (2011), mevcut binaların üç boyutlu termal modellemesi için hibrit LiDAR sistemlerinin kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, LiDAR verileri ile termal görüntülerin entegrasyonu yoluyla, bina yüzeylerindeki sıcaklık dağılımlarının hassas ve detaylı şekilde modellenmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, yapıların ısı kayıplarını tespit etmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılmıştır. Araştırma, fotogrametri ve LiDAR tabanlı yöntemlerin bina termal analizindeki uygulamalarına önemli bir katkı sunmaktadır.

Alba, Barazzetti, Scaioni, Rosina ve Previtali (2011), binaların 3B yüzey modellerine kızılötesi termal verilerin entegre edilmesini ele alan bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, yersel lazer tarayıcılarla elde edilen detaylı 3B geometrik modeller üzerine termal kameralarla toplanan sıcaklık verileri eşleştirilmiş ve bina cephelerinin termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bütünlük yöntemi sayesinde yapıların yüzey sıcaklıklarıyla ilişkili anomali tespiti daha yüksek doğrulukla ve mekânsal bağlamda analiz edilebilmiştir. Çalışma, IR verilerin 3B modellerle bütünlüklerinin, yapıların enerji performans analizlerinde önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir.

Yılmazoğlu (2011), iki örnek binada uygulanan ısı yalıtım sistemlerinin performansını karşılaştırmış ve ekonomik analizler yapmıştır. Çalışmada, yalıtımın

enerji tasarrufuna etkisi ve yatırım geri dönüş süreleri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, doğru ısı yalıtım uygulamalarının enerji tüketimini azaltmada ve maliyet etkin çözümler sunmada önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışma, bina enerji verimliliği alanında ısı yalıtımının ekonomik boyutuna dair önemli veriler sağlamaktadır.

Vidas, Moghadam ve Bosse (2013), bina iç mekânlarının 3B termal haritalamasını gerçekleştirmek amacıyla RGB-D kamera ile termal kamerayı entegre ederek yenilikçi bir sistem geliştirmiştir. Çalışmada, sensör füzyonu ile elde edilen verilerden hem geometrik hem de termal bilgiler birleştirilmiş ve bu sayede bina iç yüzeylerinde sıcaklık dağılımları yüksek doğrulukla modellenmiştir. Geliştirilen yöntem, iç mekanlardaki termal anomalilerin tespiti ve enerji verimliliği analizleri için etkili bir araç olarak önerilmektedir.

Zhang, Jung, Sohn ve Cohen (2015), İHA kullanarak çatı yalıtımının termal kızılötesi yöntemle incelenmesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, İHA tabanlı termal görüntüleme ile çatılardaki ısı kayıplarının tespiti sağlanmış ve bu yöntemin hızlı, etkili ve maliyet açısından avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, termal IR verilerinin doğruluğu ve uygulama alanları detaylı olarak ele alınmış, bina enerji verimliliği çalışmalarına katkı sağlanmıştır.

Bayraktar ve Bayraktar (2018), okul binalarında uygulanan ısı yalıtımının maliyet analizini kapsamlı şekilde incelemiştir. Çalışmada, farklı yalıtım malzemelerinin ve yöntemlerinin ekonomik etkileri değerlendirilmiş; yatırım maliyetleri ile enerji tasarrufu arasındaki denge analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, uygun yalıtım uygulamalarının hem maliyet etkin hem de enerji verimliliğini artırıcı bir rol oynadığını göstermektedir. Bu çalışma, eğitim yapılarında enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik perspektifinden önemli veriler sağlamaktadır.

Şimşek (2019), konut yapılarında yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım malzemelerini fiziksel ve termal özellikleri açısından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada, taş yünü, cam yünü, EPS, XPS ve poliüretan gibi yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları ve çevresel dayanıklılıkları detaylı şekilde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, uygun yalıtım malzemesi seçiminin, iklim koşulları ve yapı türüne göre yapılması gerektiği vurgulanmıştır (Şimşek, 2019).

Demircan (2020), Adapazarı örneği üzerinden binalarda meydana gelen ısı kayıplarının termal kamera yöntemi kullanılarak tespit edilmesini incelemiştir.

Çalışmada, termal görüntüleme tekniklerinin bina yüzeylerindeki sıcaklık farklılıklarını belirlemede etkinliği vurgulanmış ve ısı kaybı bölgelerinin doğru bir şekilde saptanmasına olanak sağladığı gösterilmiştir. Araştırma, sürdürülebilir bina tasarımı ve enerji verimliliği artırma çabalarına katkıda bulunacak önemli veriler sunmaktadır.

Ünver, Adıgüzel, Çivi ve Roshanai (2020), Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde binalarda uygulanan ısı yalıtım tekniklerini incelemişlerdir. Çalışmada, bölgesel iklim koşullarına göre kullanılan yalıtım malzemeleri ve yöntemleri analiz edilmiş, enerji verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, iklim özelliklerine uygun ısı yalıtım uygulamalarının enerji tasarrufu sağlama ve konfor koşullarını iyileştirmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu araştırma, bölgesel yaklaşımların bina enerji performansına katkısını göstermesi açısından önemlidir.

Termal kameralar ile yapılan kızılötesi görüntüleme, bina cephelerinde sıcaklık farklarını görselleştirerek yalıtım eksikliklerinin belirlenmesine olanak sağlar. Bu yöntem, temassız ve hızlı olması nedeniyle sıkça tercih edilmektedir. Fokaides ve Kalogirou (2011), yaptıkları çalışmada termal kameralar yardımıyla, yapı ile dış ortam arasındaki ısı alışverişini etkileyen çatı, dış duvarlar, döşeme, pencere ve kapı gibi elemanlardan oluşan bina kabuğu, bir diğer adıyla bina zarfı üzerindeki yalıtım kusurlarını başarıyla ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde Yılmaz (2021), Erciyes Üniversitesi yerleşkesindeki binalarda gerçekleştirdiği çalışmada termal görüntüleme ile U-değerlerinin yerinde tespitini yapmıştır (Fokaides ve Kalogirou, 2011; Yılmaz, 2021).

Abdelhafiz vd., (2022), termal kameralar kullanarak bina yalıtım etkinliğini değerlendirmek amacıyla yenilikçi bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, termal görüntüleme verileri ile binalardaki ısı kayıpları detaylı şekilde analiz edilmiş ve bu yöntemin özellikle yalıtım eksikliklerinin tespiti için hızlı, güvenilir ve temassız bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, geliştirilen yaklaşımın farklı bina tipleri üzerinde uygulanabilirliği test edilmiş ve enerji verimliliği açısından önemli katkılar sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Sakalp ve Akçay (2023), bina zarfının termal görüntüler kullanılarak fotogrametrik modellemesini incelemişlerdir. Çalışmada, termal verilerin fotogrametrik tekniklerle entegre edilmesi yoluyla bina yüzeylerinin üç boyutlu termal modellerinin oluşturulması ele alınmıştır. Bu yöntem sayesinde, yapıların ısı

kaybı ve yalıtım performansı detaylı şekilde analiz edilerek enerji verimliliği değerlendirmeleri yapılabilmektedir. Araştırma, İHA destekli termal görüntüleme ve fotogrametrinin bina enerji performans izleme alanındaki uygulamalarına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Mayer, Epperlein, Vollmer, Volk ve Schultmann (2023), İHA ile elde edilen görüntülerin bina termografik analizindeki kalitesini incelemiştir. Çalışmada, farklı uçuş parametreleri ve sensör özelliklerinin termal görüntülerin doğruluğu ve detay seviyesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, İHA tabanlı termografi için optimum veri toplama koşullarının belirlenmesine katkı sağlamış ve bu teknolojinin bina enerji performansının izlenmesinde güvenilirliğini artırmıştır. Araştırma, İHA destekli termal görüntülemenin uygulama kalitesini artırmaya yönelik önemli veriler sunmaktadır.

Henn ve Peduzzi (2024), yüksek çözünürlüklü İHA tabanlı termal görüntüleme teknolojisini kullanarak kentsel alanlarda yüzey ısı izleme çalışmalarının doğruluğunu ve uygulama potansiyelini değerlendirmiştir. Araştırmada, farklı yükseklik ve uçuş senaryolarında elde edilen termal verilerin kalibrasyon süreci ve doğruluk analizleri gerçekleştirilmiş; İHA sistemlerinin özellikle kentsel ısı adası etkisinin izlenmesi, yapı zarfı değerlendirmesi ve enerji verimliliği analizlerinde etkili bir araç olduğu ortaya konmuştur. Çalışma, İHA termografi sistemlerinin kent ölçekli çevresel analizlerde yüksek çözünürlük ve mobilite avantajları sunduğunu vurgulamaktadır.

Guedes, Meira, Bias, Pitanga ve Lisboa (2025), İHA'lara entegre sensörlerin bina cephelerindeki patolojilerin analiz ve tespitindeki performansını değerlendirmiştir. Çalışmada, farklı sensör türlerinin (termal, RGB vb.) kullanımıyla, yapı yüzeylerindeki hasar, nem, çatlak ve yalıtım kusurları gibi sorunların tespitinde elde edilen verilerin doğruluk ve etkinliği incelenmiştir. Sonuçlar, İHA tabanlı sensörlerin hızlı, kapsamlı ve detaylı veri sağlayarak bina bakımı ve enerji verimliliği açısından değerli bir araç olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, İHA destekli termal ve fotogrametrik görüntüleme yöntemlerinin bina yüzeylerindeki anormalliklerin tespiti ve izlenmesinde önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yoon, Hwang, Kim ve Lee (2025), bina dış cephelerinde meydana gelen termal anomalilerin otomatik yönetimi amacıyla 3B modelleme ve kayıt yöntemleri geliştirmişlerdir. Çalışmada, İHA'lar tarafından elde edilen termal veriler kullanılarak bina yüzeylerindeki sıcaklık farklılıkları tespit edilmiş ve bu veriler

3B modeller üzerinde entegre edilmiştir. Böylece, termal anormalliklerin zamansal takibi ve analizine olanak tanıyan etkili bir otomasyon sistemi önerilmiştir. Bu yöntem, yapıların enerji verimliliği ve bakım süreçlerinin iyileştirilmesinde yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Zhang, Zhan, Chen, Wang ve Li (2025), İHA ile gerçekleştirilen kızılötesi termografi uygulamalarını inceleyen kapsamlı bir derleme çalışması sunmuştur. Çalışmada, İHA tabanlı termal görüntülemenin bina zarfının ısı performansının değerlendirilmesindeki rolü ve uygulama alanları detaylı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, mevcut teknolojilerin avantajları, sınırlılıkları ve gelecekteki gelişim potansiyelleri değerlendirilerek, enerji verimliliği izleme ve bina yalıtımının iyileştirilmesi için UAV-IRT (Unmanned Aerial Vehicle – InfraRed Thermography)’nin etkinliği vurgulanmıştır. Bu derleme, İHA destekli termografi alanında yapılan araştırmaların sistematik bir değerlendirmesini sunarak, literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

Polat, Memduhoğlu ve Kaya (2025), gece koşullarında İHA ile elde edilen termal veriler kullanarak oluşturulan sayısal yüzey modellerinin (SYM) doğruluğunu değerlendirmişlerdir. Çalışmada, düşük ışık şartlarında termal görüntülemenin arazi modelleme üzerindeki etkileri incelenmiş ve gece termal verilerin yüksek hassasiyetle kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu çalışma, İHA tabanlı termal fotogrametrinin gece veri toplama süreçlerindeki potansiyelini ortaya koyarak, 24 saat süreklilik gerektiren uygulamalarda önemli bir referans sağlamaktadır.

Literatürde İHA ile gerçekleştirilen termal görüntüleme çalışmaları genel olarak bina dış cephelerindeki termal anomalilerin tespiti, yalıtım kusurlarının belirlenmesi ya da 3B modeller üzerinde sıcaklık dağılımlarının analizine odaklanmaktadır (Zhang vd., 2015; Guedes vd., 2025; Mayer vd., 2023). Bununla birlikte bu çalışmaların çoğu, ya tekil analizlerle sınırlı kalmakta ya da yüksek çözünürlüklü fotogrametrik modelleme ile termal verilerin birlikte işlenmesine yeterince odaklanmamaktadır. Ayrıca birçok araştırmada farklı sensör verileri entegrasyonuna yer verilse de, harita mühendisliği bakış açısıyla sistematik bir yöntemsel model önerisi sunulmamaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmanın literatüre özgün katkısı, İHA tabanlı termal kameralar ile elde edilen görüntülerin fotogrametrik yöntemlerle entegre edilerek, bina cephelerinde mevcut ısı yalıtım durumunun üç boyutlu ve analitik bir şekilde değerlendirilmesidir. Araştırma, yalnızca görsel anomali tespitiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda ısı kayıplarının niteliksel ve niceliksel olarak belirlenmesine olanak tanımaktadır. Çalışmada elde

edilen modeller sayesinde, yüzey sıcaklığı farklılıkları mekânsal doğrulukla analiz edilmekte ve termal yalıtım açısından risk taşıyan bölgeler detaylı biçimde tanımlanabilmektedir.

Bir diğer önemli özgünlük ise çalışmanın harita mühendisliği perspektifinden yapılandırılmış olmasıdır. Veri toplama, uçuş planlaması, görsel işleme ve analiz adımlarının tamamı, konumsal doğruluk ve ölçülebilirlik ilkeleri çerçevesinde kurgulanmış ve sistematik bir yöntem olarak sunulmuştur. Ayrıca çalışma, üniversite kampüsü gibi büyük ve erişimi zor alanlarda İHA destekli görüntülemenin sağladığı operasyonel avantajları da değerlendirmekte; böylelikle geniş alanlı yapılarda enerji verimliliği analizleri için uygulanabilir bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması aşağıdaki akademik boşlukları doldurmayı hedeflemektedir:

- Yüksek doğrulukta 3B termal modelleme ile yapı cephelerinin bütüncül olarak analiz edilmesi,
- Fotogrametri ve termal görüntülemenin entegre kullanımıyla mekânsal çözünürlüğü yüksek ve yorumlanabilir verilerin elde edilmesi,
- Enerji kayıplarının yerel sıcaklık farkları üzerinden haritalanmasıyla yalıtım performansının objektif şekilde değerlendirilmesi,
- Harita mühendisliği disiplini kapsamında bir veri üretim ve analiz süreci tanımlanarak, bu yaklaşımın uygulayıcı kurumlar, enerji yöneticileri ve araştırmacılar açısından örnek teşkil edebilecek bir model önerisi sunması hedeflenmektedir.

Bu yönleriyle çalışma hem akademik hem de uygulamalı mühendislik bağlamında sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve bina performansı alanlarına yenilikçi ve ölçülebilir bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde, araştırmanın kapsamı doğrultusunda kullanılan yöntemler, cihazlar, yazılımlar ayrıntılı şekilde tanıtılmıştır. Ayrıca, veri toplama süreçleri ve analiz yöntemleri sistematik bir biçimde açıklanarak çalışmanın bilimsel geçerliliği ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.

Tez çalışması hem arazi hem de ofis uygulamalarını içeren iki aşamalı bir yöntemsel yaklaşımla yürütülmüştür. İlk aşama olan arazi çalışmasında, ilgili binanın cephelerine yönelik veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, termal kamera ile donatılmış İHA kullanılmış; hazırlanan uçuş planı doğrultusunda bina çevresinde farklı açılardan yüksek çözünürlüklü termal ve RGB görüntüler elde edilmiştir. Arazi aşamasının temel amacı, ofis çalışmasında kullanılacak görsel verilerin toplanmasıdır.

İkinci aşama olan ofis çalışmasında ise, toplanan görüntüler kullanılarak bilgisayar ortamında termal 3B bina modeli oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, görüntü işleme alanında yaygın olarak kullanılan ve yüksek doğrulukta sonuçlar üreten Agisoft Metashape yazılımı tercih edilmiştir. Elde edilen 3B modeller üzerinde gerçekleştirilen analizler sayesinde, cephelerdeki sıcaklık dağılımı detaylı biçimde incelenmiş ve ısı yalıtımı açısından zayıf bölgeler ve anomaliler belirlenmiştir.

3.1. Bina Isı Kaybı Hesaplaması

Isı akısı, mühendislik ve fizik disiplinlerinde yaygın olarak kullanılan, birim alan başına birim zamanda aktarılan ısı miktarını ifade eden temel bir büyüklüktür. SI birim sistemine göre ölçüm birimi watt bölü metrekaresi (W/m^2) olan bu nicelik, enerji transfer hızını joule/saniye (J/s) cinsinden tanımlar (Incropera vd., 2007). Isı akısı, yalnızca büyüklüğe değil, aynı zamanda yön bilgisine de sahip olması nedeniyle vektörel bir özelliğe sahiptir (Çengel ve Ghajar, 2015). Bu kavram, özellikle sıcaklık farklarının etkili olduğu yüzeylerde ısı geçişinin analiz edilmesinde kullanılır. Söz konusu akışkanın ya da yüzeyin herhangi bir noktasındaki ısı akısı, o yüzey elemanının sonsuz küçük bir boyuta indirgenmesiyle hassas biçimde tanımlanabilir. Isı akısının yalnızca miktarını bilmek yeterli olmayıp, aynı zamanda yönü de belirlenmelidir çünkü bu yön, enerji akışının nereden nereye gerçekleştiğini ortaya koyar. Bu kavram yapı bilimlerinde vektörel bir büyüklük olarak ele alınır ve termal tasarımları optimize etmek için kritik öneme sahiptir (Remondino vd., 2011). Bu bağlamda, ısı akısının matematiksel ifadesi genellikle Fourier'ın ısı iletim

yasası ile açıklanır.

Isı akısı kavramı, çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.Örneğin, ısıнын pencere çerçevesinden mi yoksa duvar yüzeyinden mi sızdığını tespit etmek, gereksiz müdahaleleri önleyerek daha düşük maliyetle etkili yalıtım iyileştirmeleri yapılmasına olanak tanır (Remondino vd., 2011). Bu sayede mühendisler, termal köprüler, yalıtım boşlukları ve istenmeyen ısı yolları gibi sorunları doğru şekilde saptayarak hedefe yönelik çözümler geliştirebilir.

Isı transferi ve buna bağlı olarak ısı akısı, iki ortam ya da nesne arasında bir sıcaklık farkı oluştuğunda ortaya çıkan doğal bir enerji geçiş sürecidir (Narasimhan, 1999) Bu süreç, doğrudan temas, akışkan hareketi veya elektromanyetik dalga yoluyla gerçekleşebilir. Termodinamik ikinci yasa gereği, enerji her zaman daha yüksek sıcaklığa sahip bir bölgeden daha düşük sıcaklığa sahip bir bölgeye doğru akar ve bu akış, denge sağlanana kadar devam eder (Çengel ve Ghajar, 2015).

Isı transferi temelde üç fiziksel mekanizma aracılığıyla gerçekleşir: iletim (kondüksiyon/conduction), maddesel temasla ısıнын aktarılması; taşınım (convection), akışkanların hareketiyle ısı taşınması; ve ışıınım (radyasyon/radiation), elektromanyetik dalgalar yoluyla ısıнын boşlukta dahi iletilmesidir. Pratikte, bir sistemde meydana gelen toplam ısı akısı, bu üç mekanizmanın bir kombinasyonu olarak ortaya çıkar ve her bir modun katkı oranı, ortamın fiziksel özelliklerine, sıcaklık farkına ve sınır koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Incropera vd., 2007; Kalogirou, 2014). Ancak binalarda gerçekleştirilen ısı kaybı analizlerinde, genellikle iletim ve taşınım mekanizmaları temel alınmaktadır. Elektromanyetik radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı transferi, yüzeyler arasında sıcaklık farkına bağlı olarak ortaya çıksa da, bu etki çoğunlukla yüzey sıcaklıklarının çok yüksek olduğu endüstriyel uygulamalarda veya vakum ortamlarında belirgin hale gelmektedir (Çengel ve Ghajar, 2015). Ancak bina kabuğunda, özellikle dış cephelerde, malzemelerin sıcaklıkları düşük seviyelerde olduğundan, radyatif ısı transferi ikincil öneme sahiptir ve genellikle ihmal edilebilir düzeyde kabul edilmektedir (Evangelisti vd., 2016). Bu nedenle, bu çalışmada elektromanyetik ısı kaybına ilişkin hesaplamalara yer verilmemiş; analizler iletim ve taşınım temelli ısı transferi mekanizmaları üzerinden gerçekleştirilmiştir.

İletim, ısıнын doğrudan fiziksel temas halinde bulunan katı ortamlarda moleküler titreşim ve çarpışmalar aracılığıyla aktarılması sürecidir (Incropera vd., 2007; Çengel ve Ghajar, 2015). Bu mekanizmanın temel belirtisi, daha yüksek

moleküler kinetik enerjiye sahip (sıcak) bölgelerden düşük enerjiye sahip (soğuk) bölgelere doğru gerçekleşen bir enerji geçişidir. Örneğin, bir binanın sıcak iç ortamındaki ısı, duvar yapısındaki katmanlar aracılığıyla dış ortama doğru yayılırken iletim etkisi yaşanır (Holman, 2010; Incropera vd., 2007).

Bir katı malzemedeki iletken ısı akısı miktarını belirleyen başlıca faktörler sıcaklık gradyanı, malzeme kalınlığı ve termal iletkenliktir. Sıcaklık gradyanı, malzeme içindeki sıcaklık farkı, ısı akısının doğrudan sürücüsüdür (Fourier, 1822; Incropera vd., 2007). Malzeme kalınlığında ısı, sıcaklığın yüksek olduğu bölgeden düşük olduğu bölgeye doğru hareket ederken kat etmesi gereken mesafe uzadıkça, ısı akısı azalır. Bu nedenle, daha kalın malzemeler ısıнын geçişini zorlaştırarak ısı kaybını sınırlar. Termal iletkenlik (k) ise malzemenin ısı iletme yeteneğini gösteren bir parametredir; örneğin, alüminyum yüksek k değeri dolayısıyla çok hızlı ısı iletirken, yalıtım malzemeleri düşük k değerleri nedeniyle ısı akışını etkili şekilde sınırlayabilmektedir (Çengel ve Ghajar, 2015; Holman, 2010). Bahsedilen faktörler uygun şekilde belirlenmediğinde, ısı kaybı önemli boyutlara ulaşabilir; ancak doğru malzeme ve kalınlık seçimiyle bu kayıplar efektif biçimde azaltılabilir (Incropera vd., 2007; Holman, 2010).

Isı iletimi, bina kabuğu üzerinden gerçekleşen ısı kaybının temel mekanizmasını oluşturur. Yüzeysel ısı iletim kayıpları, bina bileşenlerinin toplam ısı geçiş katsayısı olan U değeri, yüzey alanı (A) ve iç-dış ortam sıcaklık farkı (ΔT) kullanılarak hesaplanmaktadır. Birim zamanda iletilen toplam ısı enerjisi (Q) Denklem 3.1. ile ifade edilmektedir.

$$Q = U.A.\Delta T \quad (3.1)$$

Bu denklem, bina elemanlarının ısı yalıtım performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmakta ve yapıların enerji performansını değerlendirme, yalıtım ihtiyacını belirleme ve termal anomalilerin teşhisinde önemli bir temel oluşturmaktadır (Balaras ve Argiriou, 2002; Kosny ve Kossecka, 2002). İlgili denklem, yapı elemanları üzerinden gerçekleşen ısı iletim kaybını hesaplamak amacıyla kullanılır. Q , birim zamanda iletilen ısı enerjisini ifade etmekte ve ısı transfer hızı olarak adlandırılmaktadır. Birimi Watt olup, saniyede aktarılan

Joule cinsinden enerji miktarını göstermektedir (Çengel ve Ghajar, 2015). Binalarda ısı enerjisinin önemli bir bölümü, iletim yoluyla yapı elemanları üzerinden çevreye kaybolmaktadır. Bu tür ısı geçişi genellikle duvar, çatı, döşeme gibi dışa bakan yüzeylerde düzlemsel olarak gerçekleşir. Ancak bu yüzeylerdeki yalıtım katmanları sürekli ve düzgün olsa dahi, yapı elemanlarının birleşim bölgelerinde ortaya çıkan ısı köprüleri, toplam ısı kaybının büyük bir kısmını oluşturabilmektedir. Bu tür bölgeler, iletimin tek boyutlu değil, iki veya üç boyutlu olarak gerçekleştiği alanlardır (ISO 10211, 2017).

Isı köprüleri; betonarme giriş ve kolonların dış cepheyle birleştiği noktalar, döşeme çıkmaları, pencere ve kapı kenarları gibi alanlarda sıkça görülür. Isı köprüsü, yapı kabuğunun homojen olmayan bölgelerinde, genellikle malzeme süreksizlikleri, geometrik kesintiler veya montaj hataları sonucu oluşan, çevre koşullarına göre daha yüksek ısı iletkenliğine sahip alanlardır (Straube ve Schumacher, 2002). Bu bölgelerde, ısı direnç düşer ve yoğun ısı akışı meydana gelir; bu durum, bina genelinde termal konforun azalmasına, enerji kayıplarının artmasına ve yoğuşma kaynaklı nem problemlerine neden olmaktadır (Petras ve Jicha, 2014).

Isı köprüleri bölgelerindeki ısı kaybı, yüzey alanı değil, doğrusal uzunluk üzerinden hesaplanır. Bu hesaplamada kullanılan ψ katsayısı, birleşim detayının ısı iletim karakterini ifade eden lineer ısı geçiş katsayısıdır. Isı köprüsü kaynaklı ısı kaybı Denklem 3.2. ile ifade edilir.

$$Q_{kopru} = \psi \cdot L \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Bu denklemde:

ψ , ısı köprüsünün bulunduğu birleşim detayına özgü lineer ısı geçiş katsayısıdır.

L , ısı köprüsünün toplam uzunluğunu

ΔT , iç ve dış ortam sıcaklık farkını ifade eder.

ψ değeri, yapının birleşim detaylarına bağlı olarak EN ISO 14683 veya EN ISO 10211 standartları doğrultusunda belirlenebileceği gibi, detaylı sayısal

modelleme analizleriyle de tespit edilebilir.

Taşınım ise bir akışkanın (sıvı veya gaz) topluluk halinde hareket etmesiyle ısının taşındığı bir ısı transfer mekanizmasıdır (Çengel ve Ghajar, 2015; Incropera vd., 2007). Ev içi iklim kontrol sistemlerinde, örneğin fanlı hava ısıtıcıların ürettiği sıcak havanın dolaşım yoluyla odaya yayılması taşınım ile gerçekleşir (Holman, 2010). Bu süreçte, akışkanın karakteristiği, özellikle karışma derecesi –diğer bir deyişle türbülans– taşınımsal ısı akısını önemli ölçüde etkiler. Daha yoğun karışım ne şekilde tanımlanır sorusunda ise Reynolds sayısı kritik hale gelir: Reynolds sayısının yüksek olması, türbülansı artırarak taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin artışı sağlar (White, 2006; Çengel ve Ghajar, 2015). Bu nedenle, etkin bir taşınım analizi yapılırken akışkan özellikleri, hız ve sıcaklık farkları gibi parametrelerin sistematik şekilde değerlendirilmesi gerekir.

Konveksiyon, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım olmak üzere iki temel başlık altında incelenmektedir (Çengel ve Ghajar, 2020). Doğal taşınım, akışkan hareketi yalnızca sıcaklık farkından kaynaklanan yoğunluk değişimleriyle ortaya çıkar. Buna karşın, zorlanmış taşınım, akışkan hareketi dış bir etki (örneğin fan, pompa, rüzgâr vb.) ile sağlanır ve bu durumda ısı transferi çok daha etkin hâle gelir (Incropera vd., 2011).

Konveksiyonla olan ısı geçişi Denklem 3.3. ile ifade edilmektedir.

$$Q = h.A.\Delta T \quad (3.3)$$

Q: Birim zamanda taşınan ısı miktarı (W),

h: Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m²·K),

A: Isı geçiş yüzey alanı (m²),

ΔT : Yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı olarak tanımlanır.

Zorlanmış taşınım, h değeri genellikle doğal taşınım göre çok daha yüksektir. Bu nedenle özellikle rüzgârlı hava koşullarında ya da dış cephelerin maruz kaldığı hızlı hava akımlarında, binalardan olan ısı kaybı önemli ölçüde artmaktadır

(Bergman vd., 2011). Zorlanmış taşınım, bina dış cephelerinin termal analizinde ve özellikle İHA ile gerçekleştirilen ısı ölçümlerinde dikkate alınması gereken kritik bir etkidir. Havanın akış hızı ve yönü, yüzey sıcaklıklarının dağılımını değiştirebilir; bu da termal görüntülerin doğru yorumlanabilmesi için meteorolojik verilerin entegre edilmesini zorunlu kılar (Balaras ve Argiriou, 2002).

Taşınım ısı geçişinde genelde Denklem 3.4. ile ifade edilirken, akışkanın içinde hareket ederek ısı taşıdığı durumlarda yani kütleyle taşınan enerji söz konusu olduğunda Denklem 3.4. kullanılmaktadır.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

Burada:

Q: Taşınan ısı miktarı (W),

m: Kütleli debi (kg/s),

c_p : Akışkanın sabit basınçtaki özgül ısısı (J/kg·K),

ΔT : Akışkanın giriş-çıkış sıcaklık farkı olarak tanımlanır (Çengel ve Ghajar, 2020).

Zorlanmış taşınım yalnızca yüzey ile akışkan arasında gerçekleşen enerji alışverişiyle sınırlı değildir; aynı zamanda hareket eden akışkanın kendi bünyesinde taşıdığı enerji de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu neden kütle akışıyla taşınan enerji, Denklem 3.4. 'deki eşitlikle ifade edilir: Bu denklem, özellikle havalandırma sistemleri, kanal içi hava hareketleri veya dış cepheyi etkileyen rüzgar kaynaklı zorlanmış taşınım analizlerinde kullanılır. Akışkanın belirli bir sıcaklık farkıyla ve debiyle hareket etmesi, yapı yüzeylerinden geçen toplam enerji miktarını anlamada kritik rol oynar. Özellikle bina dış kabuğuna yönelen hava akımlarında, dış ortam sıcaklığına göre buharlaşma ya da soğuma etkileri bu denklem yardımıyla hesaplanabilir (Holman, 2010). Örneğin binalarda açık pencere olması durumunda doğrudan hava değişimi vardır. Yani sadece pencere yüzeyinden geçen iletim veya yüzeysel taşınım değil, içerideki sıcak hava dışarı çıkar, dışarıdaki soğuk hava içeri girer. Bu durumda kütleyle taşınan ısı enerjisi söz konusu olur ve kütle

akışıyla ısı taşınımı denklemi açık pencere için uygundur. Açık pencereden geçen havanın kütleli debisi (kg/s) olan m , genellikle hacimsel debi (V , m³/s) ile hava yoğunluğu (ρ) çarpılarak bulunur. İlgili denklem, Denklem 3.5.'de verilmiştir.

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (3.5)$$

Burada hacimsel debi, pencerenin açıklık alanı, rüzgar hızı veya iç-dış sıcaklık farkına bağlı basınç farkı gibi parametrelerle tahmin edilir. Havanın özgül ısısı olan c_p ise yaklaşık 1005 J/kg·K' dir. Bu parametreler kullanılarak yapılan hesaplamalar, teorik düzeyde ısı kayıplarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Ancak, gerçek yapıların geometrik karmaşıklığı, malzeme çeşitliliği ve çevresel koşulların değişkenliği, yalnızca hesaplama dayalı analizlerin yetersiz kalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, teorik değerlendirmelerin sahada test edilmesi ve yerinde gözlemlerle desteklenmesi gereklidir. Bu bağlamda, çalışma alanı olarak seçilen Şanlıurfa Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasında hem termal görüntüleme hem de fotogrametrik modelleme yöntemleri uygulanarak, yapı kabuğundaki ısı kayıpları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma alanı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışma Alanı

Mühendislik fakültesi binaları, üç katlı olup betonarme taşıyıcı sisteme ve farklı yönlere bakan cephe açıklıklarına sahiptir. Mühendislik fakültesi, toplamda 8 tane birbirine bağlı bina blokları halinde inşa edilmiştir. Her blok, genellikle dikdörtgen formlu olup derslik, laboratuvar, idari ofis gibi farklı işlevlere hizmet vermektedir. Bu bloklar, kapalı geçitler veya başka bir deyişle bağlantı köprüleri ile birbirine bağlanarak bütünlük sağlamaktadır. Bu yapı düzeni, farklı bölümlerin birbirine kolay erişimini ve işlevsel bir kampüs düzenini mümkün kılmaktadır. Mühendislik fakültesinin genel görünümü Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Mühendislik fakültesi genel görünümü

Çalışma alanı olarak Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasının seçilmesinin çeşitli gerekçeleri bulunmaktadır. Bu gerekçelerden en önemlisi, yapının fiziksel özelliklerinin; cephe farklılıkları ve mimari detayların bina termal performansı üzerindeki etkilerinin analizine olanak tanımasıdır. Blokların farklı yönlere bakacak şekilde konumlandırılmış olması, yapıların aynı iklim koşullarına maruz kalmalarına rağmen, cephe yönelimine bağlı termal farklılıkların karşılaştırmalı olarak incelenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca fakülte binasında yer alan düz teras çatılar ve geniş cam cephe açıklıkları hem fotogrametri hem de termal görüntüleme yöntemlerinin eş zamanlı uygulanabilmesine elverişli bir yapı sunmaktadır. Bununla birlikte, çalışma alanının araştırmacı tarafından kolay erişilebilir olması, veri toplama sürecinin kontrollü, sistematik ve sürdürülebilir şekilde yürütülmesine katkı sağlamıştır. Şekil 3.2.'de sunulan görsel, bu tez kapsamında gerçekleştirilen 3B bina modelleme uygulamasının nihai çıktısını temsil

etmektedir.

Bu modellemenin gerçekleştirilmesi için gerekli olan temel fotogrametrik veriler, termal kamera donanımına sahip DJI Mavic 3 Thermal insansız hava aracı kullanılarak toplanmıştır. Belirlenen uçuş planı doğrultusunda yapıların farklı açılardan görüntülenmesi sağlanmış; elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler, fotogrametrik işleme yazılımları aracılığıyla üç boyutlu modele dönüştürülmüştür.

Uçuş planlaması cihaz üzerinden yapılmıştır. Uçuşlar, bina cephelerinin tüm yönlerini kapsayacak şekilde sistematik olarak organize edilmiştir. Görsel ve termal verilerin eş zamanlı toplanabilmesi amacıyla, enine ve boyuna örtüşme oranları %80 ve %70 olarak ayarlanmıştır. Uçuşlar sırasında hem RGB hem de termal kamera aktif halde çalıştırılmıştır. Gerçekleştirilen uçuş sonrası mühendislik fakültesini kapsayan toplam 1540 adet görüntü elde edilmiştir. Elde edilen veriler daha sonra yazılım ortamında 3B model oluşturmak ve termal analiz gerçekleştirmek amacıyla işlenmiştir. Çalışmada kullanılan insansız hava aracı Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan İHA: DJI Mavic 3 Enterprise Thermal

Çalışmada kullanılan insansız hava aracı, 3B modelleme ve termal görüntüleme uygulamalarında ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyetli veri elde etme kapasitesine sahip gelişmiş bir sistemdir.

Kullanılan İHA'nın teknik özellikleri Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan İHA'nın teknik özellikleri

Özellik	DJI Mavic 3 Thermal
Kamera sistemi	Çift kamera (RGB+Termal)
Termal kamera çözünürlüğü	640x512 piksel
RGB Kamera çözünürlüğü	20 MP (4/3 CMOS sensör)
Termal Hassasiyet (NETD)	<50 mK @ f/1.0
Termal kamera yenileme hızı	30 Hz
Termal kamera görüş açısı	61° Yatay
Engel Algılama Sistemi	360° engel algılama (çok yönlü)
RGB kamera	48 MP (1/2" CMOS sensör, geniş açı), 28x hibrit zoom
Maksimum uçuş süresi	Yaklaşık 45 dakika

Fotogrametrik veri toplama sürecinde, görüntülerin elde edilmesi amacıyla yukarıda özellikleri verilen, termal ve RGB kamera sistemleriyle donatılmış DJI Mavic 3 Thermal İHA tercih edilmiştir. Uçuş öncesinde, hava durumu, güneş açısı, çevresel sıcaklık gibi faktörler dikkate alınarak çekim için en uygun zaman dilimi kararlaştırılmıştır. Termal görüntülemeye uçuş için en uygun zaman, güneş kaynaklı yansımaların ve yüzey ısınmalarının en az düzeyde olduğu sabah erken saatleri veya gün batımı sonrasıdır (Lagüela vd., 2013). Bu nedenle uçuş, sabah saat 08.00'de, Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçuş 06 Mart 2024 tarihinde gerçekleştirilmiş ve uçuş esnasında bölgedeki hava sıcaklığı 8 °C olarak ölçülmüştür. Bu meteorolojik veri, aynı tarih ve saat aralığı için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Şanlıurfa iline ait güncel gözlem raporlarından elde edilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024).

Veri toplama süreci otomatik uçuş planlaması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Uçuş güzergâhı, uçuş irtifası, örtüşme oranları ve kamera açıları gibi parametreler, DJI tarafından geliştirilen özel yazılım üzerinden tanımlanmış ve sistem tarafından optimize edilmiştir. Uçuş planı, ilgili uygulama arayüzü kullanılarak önceden oluşturulmuş ve İHA, bu plan doğrultusunda otomatik olarak hareket etmiştir. İHA,

önceden planlanan rota boyunca sabit hız ve yükseklikle otomatik olarak uçurulmuştur. Binanın tüm cephelerine yönelik veriler, tek bir uçuşla bütüncül şekilde toplanmıştır. Uçuş sırasında termal görüntüler belirli aralıklarla alınmış ve tüm bina cephelerinin farklı açılardan görüntülenmesi sağlanmıştır. Veri kalite kontrol amacıyla çekilen görüntülerde bulanıklık, parazit veya yansıma olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Uçuş sonrası yüksek çözünürlüklü olarak elde edilen görüntüler, Agisoft Metashape yazılımı aracılığıyla fotogrametrik işleme tabi tutulmuştur. Bu yazılım, görüntüler arasındaki örtüşmeleri kullanarak üç boyutlu nokta bulutu, yüzey modeli ve ortofoto üretimi gibi işlemleri gerçekleştirebilmektedir (Agisoft LLC, 2023). Termal görüntülerin analizinde ise DJI Thermal Analysis Tool yazılımı kullanılmıştır.

3.2. Kullanılan Yöntemler ve Teknolojiler

Çalışmada, bina cephelerindeki ısı yalıtımının değerlendirilmesine yönelik olarak gelişmiş görüntüleme ve modelleme teknolojilerinden yararlanılmış; İHA termografisi ve fotogrametri yöntemleri bütüncül bir yaklaşımla kullanılmıştır.

3.2.1. Termografi

Termal görüntüleme (termografi), yapı yüzeylerinden yayılan kızılötesi radyasyonun algılanarak, yüzey sıcaklıklarındaki farklılıkların görsel biçimde analiz edilmesine olanak tanıyan bir ölçüm ve değerlendirme yöntemidir (Balaras,2002). Hiperspektral sistemlerin yansıyan güneş ışığını temel almasına karşın, termal görüntüleme, gözlemlenen yüzeyin kendi yaydığı ısıya dayalı radyasyon verilerini toplar. Temel olarak, bir cismin sıcaklığı arttıkça yaydığı kızılötesi enerji miktarı da artar; bu fiziksel prensip, yüzey sıcaklık farklılıklarının hassas biçimde tespit edilmesini mümkün kılar (Resonon, 2024).

Termografi ile elde edilen görüntü ve modellerde, her bir piksel belirli bir sıcaklık değerine karşılık gelmekte olup, bu veriler genellikle sıcaklık gradyanına göre renklendirilmiş bir renk skalası kullanılarak görselleştirilmektedir (Balaras ve Argiriou, 2002). Görüntülerde renklerin sıcaklığı temsil etme biçimi kullanılan renk paletine göre değişmektedir. Bu çalışmada sıcaklığı yüksek bölgeler kırmızı, sarı ve turuncu; daha düşük sıcaklıktaki bölgeler ise yeşil ve mavi tonlarla gösterilmiştir. Bu renk geçişleri, yüzeydeki sıcaklık farklarını hızlıca yorumlamaya imkân tanımaktadır (Sakalp ve Akçay, 2023). Bu avantaj sayesinde kızılötesi

termografi, özellikle enerji verimliliği analizleri, bina ısı yalıtım uygulamaları, çevresel izleme, tarım, yapı denetimi gibi mühendislik ve çevre bilimleri temelli pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yangın tespiti ve takibi, arama-kurtarma operasyonları, elektrik hatları ile ısıtma-soğutma sistemlerinin denetlenmesi ve yapıdaki olası kusurların belirlenmesi gibi kritik uygulamalarda da etkili bir araç konumundadır.

Termografik inceleme yöntemleri; pasif ve aktif sistemler, mobil cihaz temelli uygulamalar, İHA termografisi gibi farklı teknik yaklaşımlar çerçevesinde sınıflandırılmakta ve geliştirilmektedir.

Pasif termografi, yüzeylerde doğal olarak oluşan sıcaklık farklarının kızılötesi radyasyon yoluyla tespit edilmesine dayalı, harici bir ısı kaynağına ihtiyaç duymayan bir tekniktir. Güneş ışıınımı, çevre sıcaklığı gibi dış etkenlerle yüzeylerde meydana gelen ısı dağılımı termal kameralar aracılığıyla görüntülenir. Bu yöntem özellikle yapıların dış cephelerinin analizinde tercih edilmekte olup, optimum sonuçlar genellikle sabah erken saatlerde ya da gün batımı sonrasında elde edilmektedir. Çünkü bu zaman dilimlerinde güneş kaynaklı yansımalar ve çevresel etkiler en azıdır. Bununla birlikte, rüzgâr, nem ve ani sıcaklık değişimleri gibi dış koşullar ölçüm doğruluğunu etkileyebileceğinden, pasif termografi uygulamalarında çevresel faktörlerin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Balaras ve Argiriou, 2002).

Aktif termografi, yüzeye harici bir enerji kaynağı (kızılötesi lamba, sıcak hava üfleiyici vb.) uygulanarak, ısı transferi sürecinde yüzeyin verdiği termal tepkilerin izlenmesini esas alan bir yöntemdir. Bu teknik, yapı yüzeylerinin altında gizli kalmış hasarların, delaminasyonların, boşlukların veya yalıtım eksikliklerinin belirlenmesinde oldukça yüksek hassasiyet sunar. Genellikle laboratuvar ya da kontrollü dış saha koşullarında tercih edilen aktif termografi, yüksek enerji gereksinimi ve ekipman ihtiyacı nedeniyle dış mekân uygulamaları için sınırlı bir kullanım alanına sahiptir (Meola vd., 2012). Buna rağmen, lokal incelemeler için yüksek çözünürlüklü veriler sağlayarak nitel analizlerde önemli katkılar sunar.

Mobil termal görüntüleme, genellikle elde taşınabilir ya da tripod ile sabitlenmiş portatif termal kameralar aracılığıyla yapılır. Bu yöntem, kullanıcı tarafından manuel olarak gerçekleştirildiği için daha esnek uygulama imkânı sunar ve özellikle iç mekânlarda, tavan aralarında ya da erişimi zor bölümlerde detaylı gözlem yapılmasını sağlar. Ancak sistemin tamamen operatör kontrolünde olması, elde edilen verilerin sürekliliğini ve standardizasyonunu sınırlayabilir. Operatörün

teknik bilgisi ve uygulama becerisi sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkiler (Thomas vd., 2000). Düşük bütçeli uygulamalar ve lokal analizler açısından ise oldukça ulaşılabilir ve pratik bir seçenektir.

İHA termografisinde ise termal kamera ile donatılmış İHA'lar, yüksek cepheler, çatılar, dar aralıklar gibi erişilmesi zor yapı alanlarının temassız, hızlı ve detaylı şekilde görüntülenmesine olanak tanır. Geleneksel yöntemlerin zaman alıcı ve riskli yönleri, İHA tabanlı uygulamalarla büyük oranda bertaraf edilebilmektedir. Yüksek çözünürlükte görüntüleme ve geniş alan kapsama kapasitesi sayesinde, enerji performansı analizleri ve ısı yalıtımı sorunlarının belirlenmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Lagüela vd., 2013; Zhang vd., 2025). Ayrıca, zamana bağlı olarak değişen sıcaklık dağılımlarının izlenmesi, kentsel ısı adası etkisi gibi makro ölçekteki sorunların değerlendirilmesine de katkı sunmaktadır (Polat vd., 2025).

Termal görüntülerin 3B yapısal modellerle entegre edilmesi, geleneksel iki boyutlu analizlerin ötesinde daha gelişmiş bir değerlendirme olanağı sunmaktadır. Bu yöntemde, fotogrametrik ya da lazer tarama teknikleriyle oluşturulan geometrik modellerin yüzeylerine termal görüntüler eşlenerek, sıcaklık dağılımları 3B ortamda görselleştirilmektedir. Böylece yalnızca yüzey sıcaklıkları değil, aynı zamanda yüzeyin konumu, eğimi ve yapısal özellikleri de analiz edilebilir hale gelmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, bina bilgi modellemesi, enerji simülasyonları ve yapısal sağlık izleme gibi ileri mühendislik uygulamalarıyla uyumlu çalışmaktadır (Cho ve Wang, 2011; Alba vd., 2011). Ancak başarılı bir entegrasyon için yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesi, doğru geometrik hizalama ve termal kalibrasyon gibi teknik süreçlerin titizlikle yürütülmesi gerekmektedir.

Termal görüntüleme tekniklerinin her biri belirli kullanım senaryoları ve koşullar doğrultusunda avantajlar ve kısıtlamalar taşımaktadır. Geleneksel yöntemler erişim zorlukları, veri sürekliliği ve çevresel etkiler gibi sınırlılıklar içerirken; modern uygulamalar özellikle İHA termografisi ve fotogrametri entegresi kapsamlı, hassas ve sürdürülebilir analiz imkânı sunmaktadır. Harita mühendisliği perspektifinden bakıldığında, bu yöntemlerin coğrafi veri üretimiyle entegre edilmesi; bina ölçeğinde mekânsal çözünürlüğü yüksek, enerji performansını ayrıntılı olarak değerlendirebilen modellerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, gelişmiş termal görüntüleme teknolojileri sadece mühendislik uygulamalarında değil, aynı zamanda sürdürülebilir çevre planlaması ve enerji yönetimi stratejilerinde de önemli rol oynamaktadır.

İHA'lar, belirli görevleri yerine getirmek amacıyla geliştirilen, uzaktan kontrol edilebilen ya da tamamen otonom olarak uçuş gerçekleştirebilen hava sistemleridir (Kahveci ve Can, 2017). Uçuş karakteristiklerine bağlı olarak sabit kanatlı, döner kanatlı ya da zeplin tipi formda tasarlanabilmektedirler (Colomina ve Molina, 2014). Günümüzde İHA'lar, gelişmiş aktif ve pasif sensörlerle donatılarak haritacılık, tarım, madencilik, inşaat, afet yönetimi, meteorolojik gözlem ve arkeolojik araştırmalar gibi pek çok disiplinde veri toplamak amacıyla kullanılmaktadır (Villi ve Yakar, 2022). Modern İHA sistemleri, görev gereksinimlerine göre RGB kamera sensörleri, LiDAR sensörleri veya termal kamera sensörleri gibi çeşitli sensör türleriyle donatılabilmektedir. RGB sensörleri, dijital görüntüleme sistemlerinde temel renk bileşenleri olan kırmızı, yeşil ve mavi ışığın yoğunluklarını algılayarak görüntü oluşturmayı sağlar. Bu sensörler, insan gözünün algılayabildiği görünür ışık spektrumuna karşılık gelen dalga boylarında çalışarak renkli görüntülerin elde edilmesine olanak tanır. RGB renk modeline sahip kameralar, bu üç temel rengin farklı seviyelerini birleştirerek doğal görünümlü dijital görüntüler üretir (Klymenko vd, 2022).

İHA'lar, termal görüntüleme sistemleri, yüksek çözünürlüklü RGB kameralar ve hibrit optik sayısal yakınlaştırma yeteneklerine sahip sensörleri entegre edebilecek donanıma sahiptir. Çoklu sensör konfigürasyonları sayesinde, uzaktan algılama süreçlerinde hem ayrıntılı görsel veri hem de ısıya bağlı bilgiler eşzamanlı olarak elde edilebilmektedir (Zhou vd., 2020). Belirtilen termal sensörlerin İHA'lara entegre edilmesi sayesinde geliştirilen termal görüntüleme sistemleri, uzaktan algılama alanında önemli bir yenilik sunmaktadır. İnsan gözüyle ya da klasik RGB kameralarla algılanamayan ısı farklarını ortaya koyabilmesi, İHA termografisini özellikle yapı denetimi, enerji verimliliği, çevresel izleme ve afet sonrası değerlendirme gibi birçok uygulama alanında vazgeçilmez hale getirmiştir (Maddahi ve Niyogi, 2021).

İHA termografisinin temelinde yatan fiziksel prensip şudur: Tüm cisimler, sıcaklıkları mutlak sıfırın (0 Kelvin veya $-273,15^{\circ}\text{C}$) üzerinde olduğu sürece elektromanyetik spektrumun kızılötesi (infrared) bölgesinde radyasyon yayar. Bu yayılan radyasyonun miktarı ve dalga boyu, cismin sıcaklığına ve yüzey özelliklerine bağlıdır (Jensen, 2007). Termal kameralar, bu kızılötesi radyasyonu algılayarak, yüzey sıcaklıklarını görsel olarak ifade eden termogramlar üretir. İHA'lar ile entegre edildiğinde, bu sistem büyük alanların hızlı, temassız ve güvenli şekilde taranmasını sağlar. Bu durum İHA termografisinin geleneksel yer tabanlı termal görüntüleme yöntemlerine göre daha esnek ve verimli bir çözüm olduğunu göstermektedir (Casula

vd.,2023).

İHA termografisi geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle, otomatik uçuş modları sayesinde İHA'lar, geniş alanları kısa sürede ve yüksek verimlilikle tarayabilmektedir (Feds.group, 2025). Bu sayede, birden fazla binanın yer aldığı sahalarda enerji denetimleri, klasik yöntemlere göre çok daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir (Schmutz vd., 2024). Ayrıca, İHA'ların kullanımı denetim süreçlerinde insan müdahalesi ihtiyacını azaltarak, yüksek yapılar, çatı yüzeyleri ve erişilmesi zor bölgeler gibi potansiyel tehlike barındıran alanlarda güvenliği önemli ölçüde artırmaktadır (Lamarr, 2025).

Bir diğer avantaj ise, yüksek çözünürlüklü termal kameralar ile donatılmış İHA sistemleri, yüzey sıcaklıklarını yüksek doğrulukla algılayarak termal köprüler, yalıtım eksiklikleri ve hava sızıntıları gibi problemleri hassas bir şekilde ortaya koyabilmektedir (Feds.group, 2025). Bu görüntüler, yapay zekâ destekli analiz yazılımları ile işlendiğinde, kusurların teşhisi daha sistematik ve güvenilir hale gelmektedir (Lamarr, 2025). Bunun yanı sıra, İHA'ların sağladığı maliyet avantajı da dikkate değerdir; iş gücü, erişim ekipmanı ve sigorta gibi giderlerin azalması, termal denetimlerin daha ekonomik bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılar (Lamarr, 2025).

İHA'ların önemli bir diğer avantajı ise kapsamlı veri elde etme yeteneğidir. Geleneksel yöntemlerle ulaşılması zor veya gözden kaçan cephe bölgeleri dâhil, tüm bina yüzeylerinden sistematik veri toplayarak eksiksiz analiz yapılmasına olanak tanır (López vd., 2022). Ayrıca, bu verilerden elde edilen termal haritalar, yalnızca bireysel binalar için değil, aynı zamanda mahalle veya kent ölçeğinde enerji kayıplarının mekânsal analizinde de kullanılabilir. Yerel yönetimler bu termal haritaları kullanarak, yüksek enerji kaybı yaşanan bölgeleri tespit edip, bu alanlarda enerji verimliliği odaklı politikalar geliştirebilir. Böylece mikro ölçekte bina bazlı iyileştirmelerden, makro ölçekte sürdürülebilir kentleşmeye geçiş sağlanabilir ve küresel iklim hedefleriyle daha uyumlu stratejiler geliştirilebilir (Feds.group, 2025).

İHA termografisi ile geleneksel yöntemlerin karşılaştırılması Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. İHA termografisi ile geleneksel yöntemlerin karşılaştırması

Kriter	Geleneksel Yöntemler	İHA Tabanlı Yöntemler
Maliyet etkinliği	Yüksek maliyetli (İskele, işçilik)	Düşük maliyetli (İşçilik, ekipman kiralama, sigorta primlerinde azalma)
Hız/Verimlilik	Zaman alıcı, yavaş	Daha hızlı, daha verimli, (Büyük ölçekli, çoklu mülk taraması)
Doğruluk	Düşük (Manuel, tutarsız veri)	Yüksek (YZ destekli analiz, hassas veri)
Güvenlik	Yüksek güvenlik riski (Yükseklik, tehlikeli alanlar)	Gelişmiş güvenlik (Uzaktan denetim, insan riski yok)
Erişilebilirlik	Sınırlı erişim (Yüksek binalar, çatılar, zorlu alanlar)	Yüksek erişim (Zorlu/tehlikeli alanlar dahil tam zarf kapsamı)
Veri kapsamı	Sınırlı (Tek mülkler, kör noktalar)	Kapsamlı (Birden çok mülk/tüm zarflar, termal ısı haritaları)
Gerçek zamanlı bilgiler	Gecikmeli bilgiler	Gerçek zamanlı bilgiler

İHA'lar, yalnızca termal verilerin elde edilmesinde değil, aynı zamanda fotogrametrik verilerin toplanmasında da önemli bir araç haline gelmiştir. İHA sistemlerinin gelişimiyle birlikte, yüksek çözünürlüklü görüntülerin sistematik ve hızlı bir şekilde toplanabilmesi mümkün hâle gelmiş; bu da binaların ve yapıların üç boyutlu modellenmesinde fotogrametrik yaklaşımların daha yaygın kullanılmasını sağlamıştır (Chiabrando vd., 2017; Nex ve Remondino, 2014). İHA'lar tarafından sağlanan yüksek çözünürlüklü görüntülerle desteklenen fotogrametri, harita mühendisliği disiplini içerisinde yapı envanterlerinin oluşturulmasından kentsel alanların dijital ikizlerinin üretilmesine kadar geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.

3.2.2. Fotogrametri

Fotogrametri, görüntülerden ölçüm yapma bilimi olup kökenleri Rönesans dönemi perspektif çizim çalışmalarına kadar uzanmaktadır. Gerçek anlamda fotogrametrik çalışmalar ise, 19. yüzyıl sonlarında Sebastian Finsterwalder'in havadan fotoğraflarla topografik haritalama ilkelerini göstermesiyle başlamıştır (Grussenmeyer, 2021). 20. yüzyılda analitik fotogrametri kavramı geliştirilmiş

ve özellikle bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte Hellmut Schmid, Duane Brown ve diğerlerinin çalışmaları, fotogrametrinin pratik uygulamalara dönüşmesini sağlamıştır (Grussenmeyer, 2021).

Günümüzde dijital fotoğraf makineleri, yüksek çözünürlüklü kameralar ve yapay zekâ tabanlı algoritmalar sayesinde fotogrametri olağanüstü bir hızla ilerlemektedir. Özellikle Structure-from-Motion (SfM) teknikleri ile pek çok konumdan çekilmiş İHA görüntüleri işlenerek ayrıntılı 3B nokta bulutları oluşturulabilmektedir. Bu sayede daha önce zorlu kabul edilen nesne ve yapılar santimetre düzeyinde hassasiyetle modellenebilmektedir (Westoby vd., 2012). Günümüzde İHA'lardan elde edilen binlerce fotoğrafın otomatik işlenmesi; mühendislik, arkeoloji, jeodezi gibi pek çok alanda alan ölçümlerini ekonomik ve etkili hale getirmiştir (Westoby vd., 2012).

Fotogrametrinin tanımı, farklı bakış açılarına göre çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Fotogrametri, kelime olarak incelendiğinde kökenini Yunanca'dan almaktadır. Yunanca kökenli üç bileşenden oluşur bunlar: Işık anlamına gelen "Photos", çizim anlamına gelen "gram" ve ölçme anlamına gelen "metri" dir. Bu üç kelimenin birleşiminin yardımıyla fotogrametrinin kelime tanımı, ışık yardımı ile görüntü üzerinden ölçme işlemi olarak tanımlanabilir (Kıvanç,2019).

Fotogrametrinin teknik uygulama olarak tanımı ise, cisim veya nesnelerin fotoğraflar üzerinden iki veya üç boyutlu olarak ölçülmesi şeklinde yapılabilir (Şenol vd., 2021). Fotogrametri bir veya daha fazla fotoğraf kullanılarak bir cismin şeklinin, boyutunun ve konumunun hassas bir şekilde belirlenmesini amaçlayan bir disiplindir (Külür,2002). Gelişen teknolojiyle birlikte günümüzde fotoğraflar ile video, CCD kameralar veya tarayıcılarla elektronik olarak disklere kaydedilen görüntüler de kullanılabilmektedir (Polat vd., 2021)

Fotogrametri, iki boyutlu görsellerden üç boyutlu konumsal bilgi üretmeyi amaçlayan hem bilimsel hem de teknik bir disiplindir. Teknolojik ilerlemeler sayesinde, bu alan yalnızca geleneksel haritacılıkta değil; mühendislik, mimarlık, arkeoloji ve eğitim gibi birçok sektörde 3 boyutlu modelleme süreçlerinin temelini oluşturmaktadır.

Her teknikte olduğu gibi fotogrametride de çeşitli avantaj, dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin; fotogrametri görüntülerin hizalanması ve örtüşme parametrelerine çok duyarlıdır. Çekilen fotoğraflarda doğru örtüşme sağlanamazsa

düşük kaliteli modeller oluşmaktadır. Güneş ışını, gölgeler veya yansıma gibi çevresel koşullar fotogrametrik işleme zarar vermektedir. Üstelik yüksek çözünürlüklü veri gerektirdiği için işlem süresi uzun olabilir; güçlü hesaplama kaynakları ve depolama ihtiyaçları ortaya çıkar (Dörtbudak vd.,2023). Termal görüntülerle modelleme de zordur: Termal kameralardaki düşük çözünürlük (örneğin 640×512 piksel) ve yüzeylerin emisyon özellikleri, üç boyutlu rekonstrüksiyonu karmaşıktırır bu nedenlerle termal fotogrametri ile elde edilen modeller RGB'ye göre daha az ayrıntılıdır (Fernández Cabanas,2023).

Fotogrametriye dayalı üç boyutlu modelleme uygulamaları, yüksek doğrulukta mekânsal veri üretimi sağlaması açısından büyük potansiyele sahip olsa da, bu süreçler bazı teknik ve operasyonel zorluklar da içermektedir. Uygulama sırasında karşılaşılan temel dezavantajlar arasında, çevresel ışık koşullarındaki değişkenlik, yansıtıcı ve parlak yüzeylerin görüntü kalitesini bozması, yüksek çözünürlüklü görüntülerin işlenmesinde ihtiyaç duyulan yoğun hesaplama gücü ve karmaşık veri işleme adımları yer almaktadır (Remondino vd., 2011). Dış mekân çekimlerinde özellikle güneşin konumu, gölgelenme ve ışık patlaması gibi etkenler, elde edilen görüntülerin fotogrametrik eşleşmesini zorlaştırmakta ve modelin geometrik doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Alba vd., 2011).

Buna karşılık, son yıllarda geliştirilen teknolojik yaklaşımlar bu dezavantajları önemli ölçüde dengelemektedir. Örneğin, çoklu sensör sistemlerinin (RGB, termal, LiDAR gibi) birlikte kullanılması, sadece görsel doğruluğu artırmakla kalmamakta; aynı zamanda farklı spektral bantlardan elde edilen verilerin birleştirilmesiyle model zenginliğini de artırmaktadır. Ayrıca, bulut tabanlı işlem platformlarının yaygınlaşması sayesinde büyük boyutlu veri kümeleri daha kısa sürede analiz edilebilmekte; böylece yüksek işlem gücüne sahip yerel donanımlara olan bağımlılık azalmaktadır (Taha vd., 2023). Yapay zeka ve görüntü işleme algoritmalarının fotogrametrik iş akışlarına entegre edilmesi, eşleme hatalarını azaltarak daha tutarlı ve hızlı model üretimine olanak sağlamaktadır (Remondino ve Menna, 2020). Bu bağlamda, fotogrametri sistemlerinin mevcut dezavantajları, gelişen teknolojiler sayesinde önemli ölçüde giderilebilmekte; veri üretimi süreçleri daha hızlı, esnek ve erişilebilir hale gelmektedir. Ancak, bu avantajların etkin bir şekilde kullanılabilmesi için sensör kalibrasyonu, çekim planlaması ve işlem parametrelerinin uygun biçimde optimize edilmesi gerekmektedir. Fotogrametri süreçlerinin avantaj ve dezavantajlarını gösteren tablo Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Fotogrametrinin Avantaj ve Dezavantajları

Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Veri toplama	Hızlı, temassız ve geniş alanlı veri elde etme imkânı, İHA, mobil cihaz ve tripod destekli esnek uygulama alanı	Aydınlatma koşullarına duyarlılık, Parlak ve yansıtıcı yüzeylerde görüntü bozulması riski
Donanım gereksinimi	Mobil cihazlarla sahada düşük maliyetli veri elde edebilme	Yüksek çözünürlüklü görüntülerin işlenmesi için güçlü işlemci ve grafik kartı
Doğruluk ve Çözünürlük	Gelişmiş sensörler ve yüksek çözünürlüklü kameralarla detaylı model üretimi	Sensör kalibrasyonu yapılmadığında geometrik doğruluk kaybı
İş akışı ve Otomasyon	Yapay zekâ destekli yazılımlarla otomatik eşleme, nokta bulutu üretimi ve mesh oluşturma süreçleri hızlanmıştır	Karmaşık yazılım ara yüzleri ve işlem parametrelerinin uzmanlık gerektirmesi
Erişilebilirlik ve Taşınabilirlik	Mobil cihazlar, İHA'lar ve bulut tabanlı yazılımlar sayesinde veri üretimi daha erişilebilir hale gelmiştir	Yüksek hızlı internet bağlantısı ve bulut altyapısı olmayan bölgelerde işlem süreleri uzayabilir
Uygulama alanı genişliği	Kültürel miras belgelenmesi, mimari analiz, arazi modelleme, termal haritalama gibi geniş disiplinlerde kullanılabilir	Farklı sektörler, farklı veri toplama yöntemleri ve hassasiyet gereksinimleri sunar bu da uygulayıcıların çok sayıda teknik bilgiye hâkim olmasını zorunlu kılar

Fotogrametrinin kullanım alanı oldukça geniştir. Özellikle eğitim ve bilimsel amaçlı uygulamalarda, yüksek doğrulukta ve gerçekçi 3B modellerin öğrenim süreçlerinde kullanılması; öğrencilerin somut nesneleri daha detaylı, etkileşimli ve analitik biçimde incelemesini sağlar (Muehler ve Previtali, 2021)

Biyolojik uygulamalarda kullanılan fotogrametrik modelleme, yüksek maliyetli tıbbi görüntüleme yöntemlerinin yerine düşük bütçeli ama yeterli çözünürlükte sonuçlar sağlayan bir alternatif olarak önerilmektedir; bu yaklaşım, akademik çalışmalarda kaynak sınırlamasını aşmak açısından önem taşımaktadır (Boyd vd., 2015; Ey-Chmielewska vd., 2015).

Kültürel mirasın belgelendirilmesinde yaygın olarak kullanılan fotogrametri, tarihi yapılar ve arkeolojik eserlerin üç boyutlu belgelenmesi, onların korunarak dijital ortamda gelecek kuşaklara aktarılmasına katkı sağlamaktadır. Türkiye’de yapılan saha çalışmalarında bu yaklaşım yaygın olarak tercih edilmektedir (Türkiye Fotogrametri Dergisi, 2020).

Mobil teknolojiler, özellikle akıllı telefonlar ve tabletler gibi taşınabilir cihazların gelişmiş kamera sistemleri sayesinde fotogrametri uygulamalarında önemli bir rol üstlenmektedir. Bu sayede saha ortamında hızlı, kullanıcı dostu ve düşük maliyetli veri toplama süreçleri hayata geçirilmekte; hem uzman hem de teknik bilgi düzeyi sınırlı kullanıcılar tarafından üç boyutlu model üretimi erişilebilir hale gelmektedir. Eğitimden mimarlığa kadar geniş bir kullanım alanı olan bu yaklaşım, mobil cihazlarla elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntülerle desteklenen 3B modellemelerin, geleneksel DSLR tabanlı sistemlere yakın doğruluk ve kalite sunduğunu göstermektedir (Kabadayı, 2024).

Öte yandan, fotogrametri alanındaki teknolojik gelişmelerin başında yapay zekâ destekli algoritmalar yer almaktadır. Derin öğrenme ve görüntü tanıma tekniklerinin entegre edilmesiyle, görüntü eşleştirme, nokta bulutu üretimi ve yüzey modelleme gibi süreçler daha otomatik, hızlı ve hatasız şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Böylece fotogrametrik iş akışları hem zaman açısından verim kazanmakta hem de operatöre bağımlılık azalmaktadır (Taylor ve Francis Online, 2020). Bir diğer önemli gelişme ise İHA'nın fotogrametri ile bütünleşmesidir. İHA'lar aracılığıyla gerçekleştirilen hava çekimleri sayesinde geniş alanların yüksek çözünürlükte ve kısa sürede modellenmesi mümkün hale gelmiştir. Özellikle yüksek yapılar, tehlikeli alanlar ya da erişimi zor bölgelerde bu yöntem, harita üretimi ve mekânsal analizler açısından çığır açıcı bir potansiyele sahiptir (Remondino vd., 2011; Polat vd., 2025).

Fotogrametriye yeni bir soluk getiren İHA'lar, binaların dış yüzeylerini yüksek irtifadan görüntüleyerek fotogrametrik analizler yapmayı mümkün kılmıştır. Özellikle yüksek katlı veya erişilmesi zor cephe elemanlarını incelemek, yerden yapılan termografiyle çoğu zaman mümkün değildir; yerdeki sabit kameralı ölçüm yöntemleri büyük ölçekli ya da şehir çapındaki denetimleri hem zaman alıcı kılmakta hem de bazı bölgeleri gözden kaçırabilmektedir (Krawczyk vd., 2018). İHA'lar bu sınırlamaları ortadan kaldırılmaktadır. İHA ile tüm cephe boyunca yükseklik değiştirerek veya çatı boyunca manevra yaparak termal veya fotografik veri toplanabilmektedir (Krawczyk vd., 2018; Gil-Docampo vd., 2023). İHA destekli fotogrametri, haritalama ve denetim görevlerini; tehlikeli, erişimi güç veya zaman sınırlı işlerde insan eline göre daha hızlı ve güvenli hale getirmektedir (Westoby vd., 2012). Ayrıca, İHA ile yapılan görüntüleme çalışmaları cephenin yanal ve çatısal tüm parçalarına kolayca ulaşabildiğinden ısı köprüsü, yalıtım boşluğu ya da su sızıntısı gibi sorunları tespit etmek için idealdir (Gil-Docampo vd., 2023; Krawczyk vd., 2018).

Termal kızılötesi (Thermal InfraRed-TIR) görüntüleme, bina yüzeylerindeki sıcaklık farklılıklarını ortaya koyarak ısı köprüleri ve izolasyon eksikliklerini belirlemek için etkin bir yöntemdir. Termal kameralar nesnelere ait yüzey sıcaklık haritaları çıkarabildiğinden, yalıtım sorunları uzaktan tespit edilebilir (Biswanath vd., 2023). Özellikle İHA'lara entegre termal sensörler, geniş alanlarda gerçek zamanlı ısı denetimi yapılmasını sağlar (Gil-Docampo vd., 2023; Biswanath vd., 2023).

3B termal fotogrametri ise bina cephesinin tamamına ait kesintisiz bir ısı modeli oluşturma imkânı sunar (Gil-Docampo vd., 2023). Bu kapsamda İHA'larla hem görünür ışık hem de termal bantta yüksek çakışım ile görüntüler toplanmakta, elde edilen nokta bulutları veya texture haritaları kullanılarak termal kaçak haritaları çıkarılmaktadır (Motayyeb vd., 2023; Biswanath vd., 2023).

Termal görüntülerin işlenmesi geleneksel fotogrametriye göre zorluklar içermektedir. Termal kameralarla alınan görüntüler genellikle düşük doku miktarı ve homojen renkler içerir; bu durumda SfM algoritmalarının işaret noktası tespiti zorlaşır (Gil-Docampo vd., 2023). Bu nedenle araştırmacılar, termal görüntü ön işlemleri ve hibrit yöntemlerle (örneğin görünür ışık görüntüleriyle eşleştirerek) daha güvenilir sonuçlar elde etmeye çalışmaktadır (Motayyeb vd., 2023). Tüm bu gelişmeler, binalarda ısı yalıtımı performansının üç boyutlu olarak izlenebilmesini ve sayısal enerji analizlerinin yapılabilmesini sağlamaktadır (Biswanath vd., 2023; Gil-Docampo vd., 2023). Ayrıca yeni nesil termal sensör ve kamera sistemlerinin İHA'lara entegrasyonu ile, binaların ısı davranışını daha hassas ölçümlenerek, yapı tasarımında yenilikçi çözümlere ve sürdürülebilir inşaat yöntemlerine zemin hazırlanmaktadır (Gil-Docampo vd., 2023).

Kent ölçeğinde ele alındığında, İHA'ların çevresel gözlemlerde çok işlevli kullanımı da vurgulanmalıdır. Modern İHA sistemleri sadece termal kameralardan ibaret olmayıp, aynı zamanda hava kalitesi, nem, ısıtım gibi çevresel parametreleri de ölçebilen sensörler taşıyabilir. Bu sayede İHA'lar, binaların ısı yalıtım performansı ile birlikte kentsel ölçekte hava kirliliği ve mikro iklim verilerini eş zamanlı toplayabilir. Mayer vd., (2023), bu kapsamdaki yaklaşımlara atıfta bulunarak, İHA'ların akıllı şehir veri toplama altyapısının bir parçası olarak genel sürdürülebilirliği artırabileceğini belirtmiştir. Sonuç olarak, İHA destekli termal fotogrametri, modern kentsel çevre yönetiminde enerji verimliliği çalışmalarını hızlandıran ve sürdürülebilir kentleşme hedeflerine katkıda bulunan önemli bir araçtır (Krawczyk vd., 2018; Biswanath vd., 2023). Ayrıca, İHA yardımı ile elde

edilen fotogrametrik modeller, termal görüntülerde tespit edilen anomali bölgelerinin belirlenmesine olanak tanımakta ve bu veriler, yüzey sıcaklığı farklarıyla ilişkilendirilerek bina kabuğundan gerçekleşen ısı kayıplarının hesaplanmasında temel bir referans kaynağı olarak kullanılmaktadır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, Şanlıurfa Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasında gerçekleştirilen İHA tabanlı termal görüntüleme çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ve bu verilerin değerlendirmesi sunulmuştur. Yapılan analizlerde, binanın dış cephelerinden alınan termal görüntüler doğrultusunda ısı yalıtımıyla ilişkili termal anomaliler belirlenmiş ve bu bölgelerde meydana gelen ısı kayıpları detaylı olarak incelenmiştir.

Araştırma kapsamında, termal görüntüler fotogrametrik olarak modellenmiş, elde edilen model üzerinden belirli cephe alanlarında oluşan ısı farkları analiz edilmiştir. Bu analizler aracılığıyla hem ısı iletimi kaynaklı kayıpların konumları belirlenmiş hem de mevcut yalıtım performansının etkinliği yorumlanmıştır. Bulgular, özellikle yetersiz yalıtımlı yüzeylerde, pencere birleşim noktalarında ve termal köprülerin bulunduğu alanlarda belirgin ısı kayıplarına işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, yapı kabuğunda meydana gelen ısı kaçaklarının niteliksel ve niceliksel olarak tespit edilmesini sağlamakta; bu durum da gelecekte uygulanabilecek yalıtım iyileştirme stratejileri için veri temeli oluşturmaktadır.

Termal anomaliler, çevrelerine kıyasla belirgin sıcaklık farkı gösteren yüzey bölgelerinde gözlemlenmektedir. Bu anomaliler, yapıların termal davranışlarının değerlendirilmesinde önemli ipuçları sunar. Örneğin; kış aylarında, dış cephe yüzeylerinde çevre alanlara göre daha yüksek sıcaklık değerlerinin ölçülmesi, iç ortamdan dış ortama doğru gerçekleşen ısı kayıplarını ve bu bölgelerdeki yetersiz yalıtımı işaret edebilir (Sakalp ve Akçay, 2023). Yaz mevsiminde ise dış ortam sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda, cephe yüzeylerinde gözlemlenen anormal sıcaklık artışları, dış ortamdan iç ortama yönelen ısı kazançlarına işaret edebilir. Bununla birlikte, termal görüntülemede kullanılan renk skalaları yazılım ayarlarına ve kullanıcı tercihlerine bağlı olarak değişiklik gösterebildiğinden, sıcaklık dağılımları değerlendirilirken yalnızca renk tonlarına değil, bağlamsal sıcaklık farklarına odaklanılması gerekmektedir. Renk dağılımı yardımıyla pencere çerçeveleri, yapı birleşim yerleri ve dış cephe kaplamaları gibi bölgelerde meydana gelen yalıtım zafiyetleri, termal köprüler ya da malzeme geçiş anomalileri detaylı biçimde belirlenebilir (Alba vd., 2011). Görsel verilerin fotogrametrik modelleme ile entegre edilmesi, bu anomalilerin mekânsal olarak da analiz edilmesini mümkün kılar.

Termal görüntüleme ve fotogrametrik modelleme çalışmaları sonucunda,

araştırma alanı olan mühendislik fakültesi yerleşkesindeki bina yapıları bloklara ayrılmış ve her bir blokta gözlemlenen termal anomaliler değerlendirilmiştir. Yerleşkede toplam sekiz blok bulunmasına rağmen, çalışma kapsamında yalnızca üç blok detaylı olarak incelenmiştir. Diğer bloklarda da benzer anomaliler tespit edilmiş olmakla birlikte, analizler; anomalilerin daha belirgin olduğu bloklar üzerinden yürütülmüştür. Bu tercih, çalışmanın detaylı bir ısı yalıtım değerlendirmesinden ziyade, İHA destekli termal görüntüleme ile fotogrametrik modellemenin bu tür analizlerdeki uygulanabilirliğini ve potansiyelini ortaya koyma amacına dayanmaktadır. Görsel incelemelerde, hem İHA ile alınan RGB görüntüler hem de oluşturulan üç boyutlu termal modeller birlikte kullanılarak, yüzey sıcaklık farkları yorumlanmış ve dikkat çeken bölgeler detaylandırılmıştır.

Bina ısı kaybı hesaplamasında kullanılan bloklar Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan bloklar

Çalışma kapsamında incelenen üç farklı bloğa ait termal anomali bulguları aşağıda detaylı biçimde verilmiştir.

4.1. Blok 1 Bulguları

Oluşturulan termal model üzerinde bloklar sırasıyla incelenmiş ve termal anomaliler tespit edilmeye çalışılmıştır. Blok 1' üzerinde yapılan termal inceleme sonucunda, pencere bölgesinde çevresine kıyasla belirgin bir sıcaklık farkı tespit edilmiştir. Blok 1 de tespit edilen pencere anomalisi Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Blok 1 anomali termal model görünümü

Anomali tespit edilen pencere bölgesi, nedeninin daha net anlaşılabilmesi amacıyla hem oluşturulan 3B model hem de İHA ile elde edilen RGB görüntüler üzerinden birlikte analiz edilmiştir. Anomalinin 3B model üzerindeki görüntüsü Şekil 4.3'de, İHA kaynaklı RGB görüntüsü ise Şekil 4.4.'de verilmiştir.

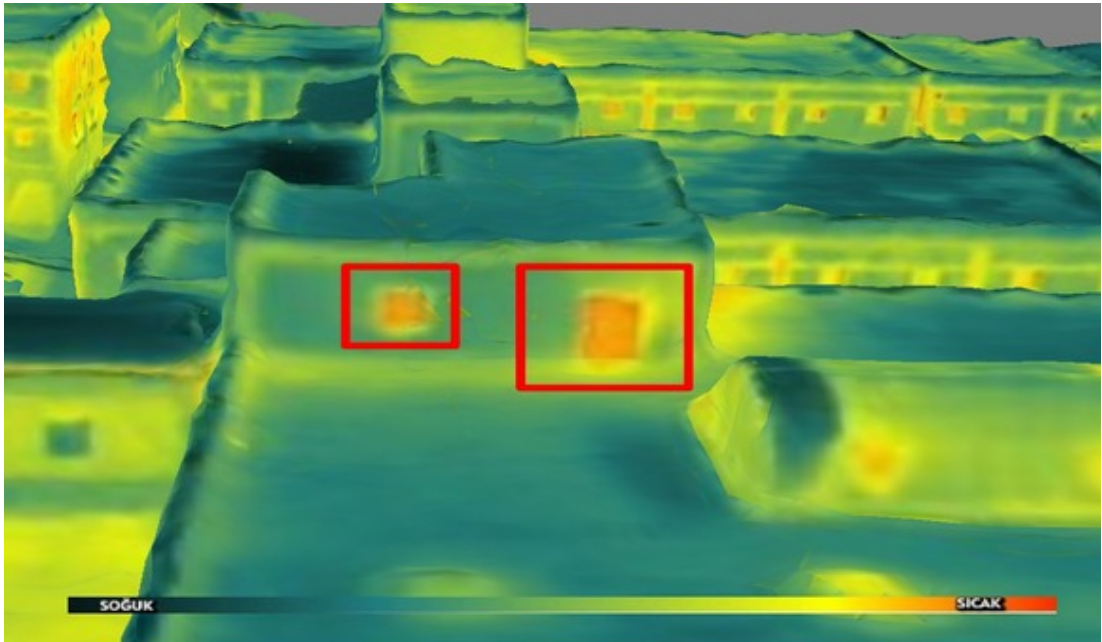


Şekil 4.3. Blok 1 anomali 3B model görünümü



Şekil 4.4. Blok 1 anomalisinin İHA kaynaklı RGB görüntüsü

Blok 1 üzerinde devam eden termal görüntüleme analizlerinde, yapı kabuğunun üst kotlarında yer alan terasa açılan kapı ve pencere bölgesinde dikkat çekici sıcaklık anomalileri tespit edilmiştir. Yapılan RGB ve termal model incelemeleri sonucunda hem kapının hem de pencerenin açık bırakıldığı belirlenmiş ve bu durumun önemli düzeyde ısı kaybına yol açtığı gözlemlenmiştir. Anomalinin termal model üzerindeki görünümü Şekil 4.5.’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Blok 1 kapı ve pencere anomalisi

Anomali tespit edilen bölgenin, nedeninin daha net anlaşılabilmesi amacıyla

hem oluşturulan 3B model hem de İHA ile elde edilen RGB görüntüler üzerinden birlikte analiz edilmiştir. Anomali bölgesinin 3B model üzerindeki görünümü Şekil 4.6.'da , İHA ile elde edilen RGB görüntüsü ise Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Blok 1 kapı ve pencere anomalisinin 3B model görünümü



Şekil 4.7. Blok 1 kapı ve pencere anomalisinin İHA kaynaklı RGB görüntüsü

Şekil 4.2. ve Şekil 4.5'de verilen termal modeller üzerinde anomali bölgeleri, çevresindeki yüzeylere kıyasla daha yüksek sıcaklık değerle tanımlanmıştır. Bu durum, iç ortam sıcaklığının kontrolsüz şekilde dış ortama aktarıldığını ve

açıklıkların bir ısı kaçağı noktası olarak işlev gördüğünü göstermektedir.

Şekil 4.2.'deki açık pencere bölgesindeki ısı kaybı hem iletim hem de taşınım bileşenleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Anomali bölgesinin alanı, termal görüntüden elde edilen ölçümler yardımıyla $0,074 \text{ m}^2$ olarak belirlenmiştir. Pencerenin U-değeri $2,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ olarak kabul edilmiştir. İç sıcaklık değeri 21°C , dış sıcaklık değeri ise 8°C 'dir. İç-dış ortam sıcaklık farkı olan ΔT ise 13°C 'dir. İletim yoluyla ısı kaybı Denklem 3.1.'e göre hesaplanmış ve $Q_{\text{iletim}}=26.94\text{W}$ olarak bulunmuştur.

Taşınım yoluyla ısı kaybı ise Denklem 3.4. ve Denklem 3.5'e göre hesaplanmıştır. İlgili cephedeki hava hızı ($v = 3.3 \text{ m/s}$), termal görüntüleme yapılan gün için geçerli olan meteorolojik veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Hava yoğunluğu ($\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$) ise deniz seviyesinde, yaklaşık 15°C sıcaklık ve 1 atm basınç altında kabul edilen standart atmosfer koşullarına göre alınmıştır. Bu değer, mühendislik hesaplamalarında sıkça kullanılan ortalama bir sabittir (Çengel ve Boles, 2015). Yapılan hesaplama sonucunda açık pencere yüzeyinden 3827W yani yaklaşık 3.8 kW 'lık bir ani ısı kaybı yaşandığı belirlenmiştir.

Bu işlem sonrası duvardaki toplam ısı kaybını belirleyebilmek amacıyla, ilgili yüzeye ait alan, yapı bileşenlerinin ısıl iletkenlik özellikleri ve iç-dış ortam sıcaklık farkı dikkate alınarak Denklem 3.1. yardımıyla iletim temelli ısı kaybı hesaplaması gerçekleştirilmiştir ve $Q_{\text{iletim}} 76.65\text{W}$ olarak hesaplanmıştır.

Bir diğer anomali olan kapı ve pencerenin tamamen açık olduğu görülmektedir. Bu durumda, cam veya kaplama yüzeyi artık iletken bir engel oluşturmadığı için, ısı kaybı sadece taşınım yoluyla değerlendirilir. Yani doğrudan hava sirkülasyonu oluşur. Anomali bu duruma uygun olduğu için Denklem 3.4 ve Denklem 3.5. kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Anomali bulunan pencere alanı 0.10 m^2 , kapı alanı ise 0.24 m^2 'dir. Bu durumda toplam açıklık alanı 0.34 m^2 'dir. Açıklıklardan gerçekleşen hava geçişine bağlı ısı kaybı sonucunda Q değeri 17590.72W (17.6kW) olarak hesaplanmıştır.

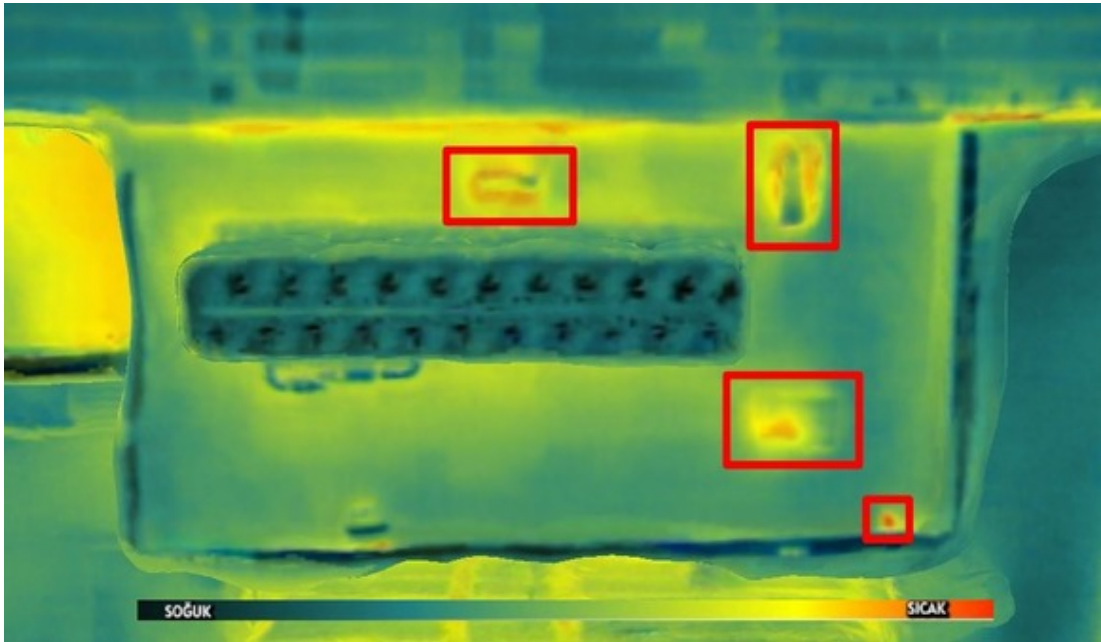
Geriye kalan duvarın (kapalı kısım) iletim yoluyla ısı kaybı Denklem 3.1. yardımıyla hesaplanmıştır. Duvar alanı: 5.41 m^2 , açıklık alanı 0.34 m^2 , geriye kalan duvar alanı 5.07m^2 , duvarın U değeri 1.5 W/m^2 , ΔT değeri ise 13°C 'dir. Yapılan hesaplama sonucunda Q_{duvar} iletim değeri 98.87 W bulunmuştur. Blok 1'e ait toplam ısı kaybı tablosu Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Blok 1 toplam ısı kaybı

Isı kaybı kaynağı	Isı kaybı türü	Isı kaybı (W)
Sağlam duvar	İletim	76.65
Kapalı duvar yüzeyi	İletim	98.87
Anomali pencere	İletim	26.94
Anomali pencere	Taşınım	3827.00
Açık kapı ve pencere	Taşınım	17590.72
TOPLAM ISI KAYBI		21620.18 W

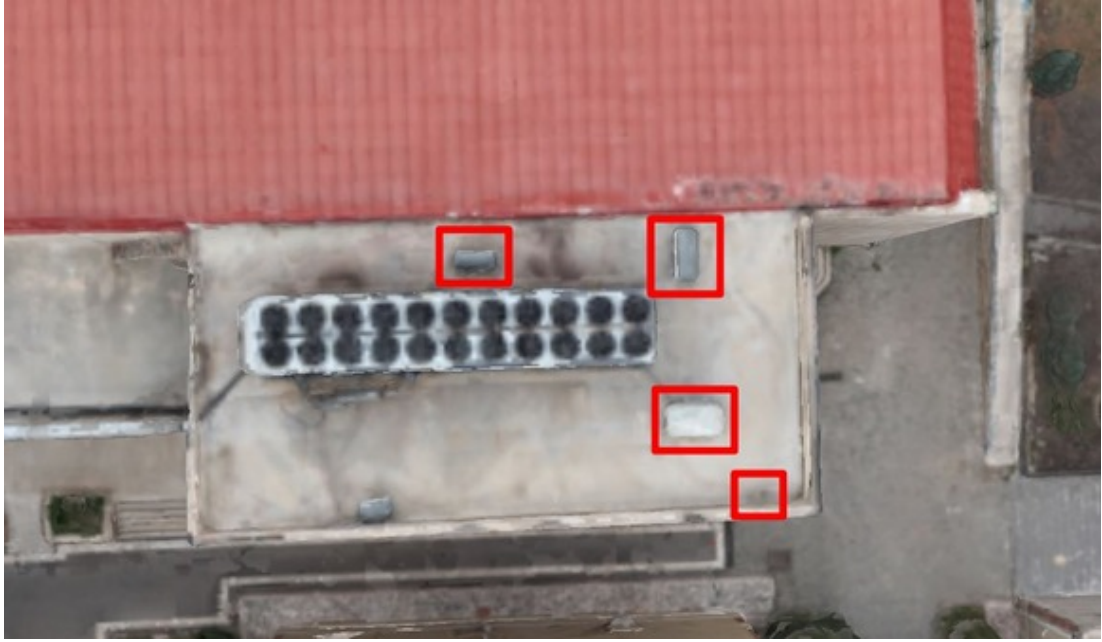
4.2. Blok 2 Bulguları

Blok 2 üzerinde gerçekleştirilen termal inceleme sonucunda, yapının arka cephesinde yer alan havalandırma ve klima motorlarının bulunduğu çıkıntılı bölümde termal anomaliler tespit edilmiştir. Tespit edilen anomalilerin Termal 3B model üzerindeki görünümü Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Blok 2’de bulunan anomalilerin termal 3B modelde görünümü

Anomali tespit edilen bölgede, nedeninin daha net anlaşılabilmesi amacıyla hem oluşturulan 3B model hem de İHA ile elde edilen RGB görüntüler birlikte analiz edilmiştir. Anomalinin 3B model üzerindeki görüntüsü Şekil 4.9.’da, İHA kaynaklı RGB görüntüsü ise Şekil 4.10.’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Blok 2’de bulunan anomalilerin 3B modelde görünümü



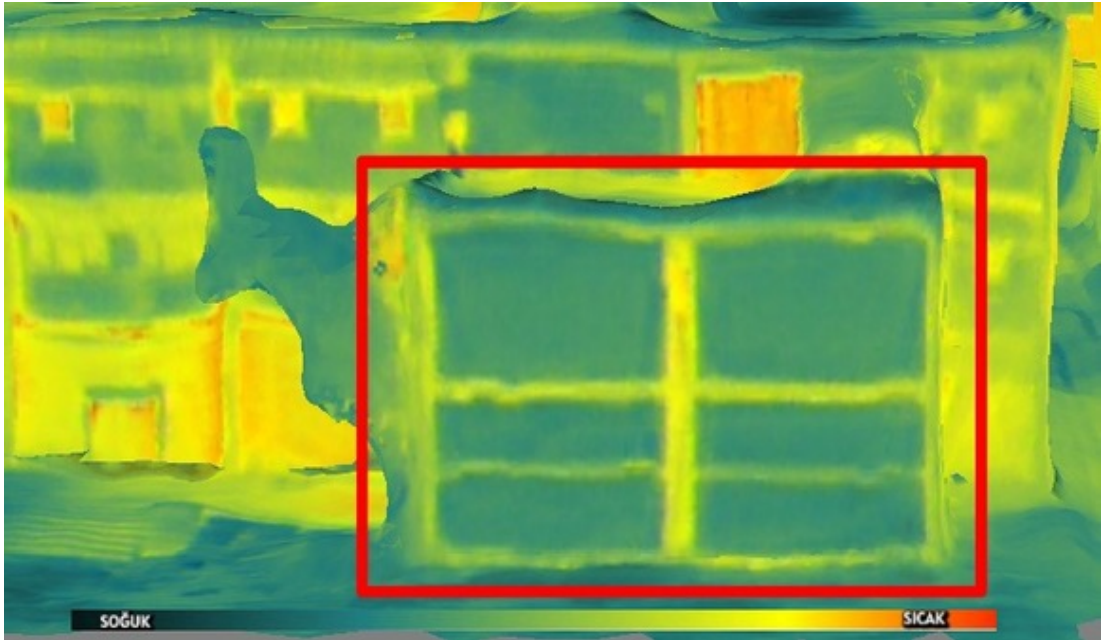
Şekil 4.10. Blok 2’de bulunan anomalilerin İHA ile elde edilen RGB görüntüsü

Şekil 4.9.’da sunulan 3B modelin incelenmesi sonucunda, tespit edilen anomali bölgesinin binada bulunan merkezi ısıtma/soğutma sistemine ait çıkış noktalarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Termal modelde bu çıkışlardan sıcak hava salınımının gerçekleştiği ve bunun da termal görüntüde sıcak iz bıraktığı anlaşılmıştır. Sağ alt köşede anomalinin ise metal drenaj çıkışı (su gideri) olduğu belirlenmiştir. Metal drenaj çıkışında yüzeysel ısı birikim gözlenmiştir. Söz konusu

bölgelere ilişkin ısı kaybı hesabı yapılmamış olup ilgili bulgular tartışma bölümünde detaylı olarak ele alınmıştır.

4.3. Blok 3 Bulguları

Blok 3 yapısı üzerinde yapılan termal analizler sonucunda,yapı yüzeyinde olması gereken homojen sıcaklık dağılımının aksine, belirli bölgelerde sıcaklık farklılıkları gözlemlenmiştir. Duvara ait yüzeyler genel olarak düşük ısı akış, düşey ve yatay giriş/kolon hatlarının gibi yapısal elemanların geçtiği bölgeler ise yüksek ısı akış olarak gözlenmiştir. Bu durum bize bu duvarda ısı köprüsü olabileceği ipucunu vermektedir. Isı köprüsünün termal 3B model üzerinde görünümü Şekil 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Blok 3'te bulunan anomalinin Termal 3B model üzerinde görünümü

Blok 3'de ısı köprüsü anomali bulunan duvarın 3B modeldeki görüntüsü Şekil 4.12.'de verilmiştir.



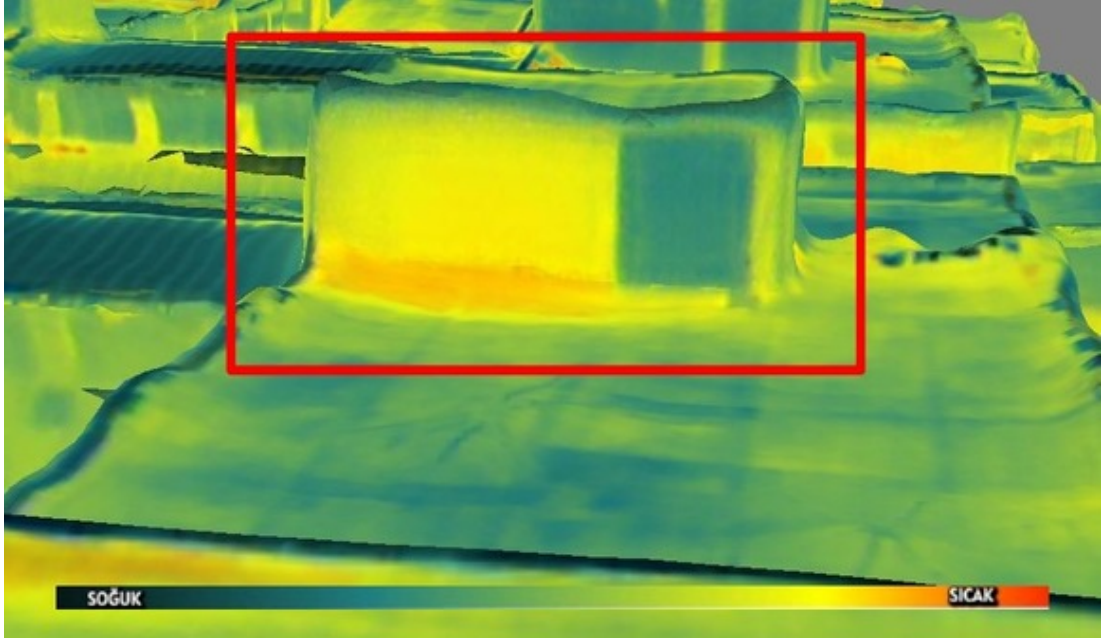
Şekil 4.12. Blok 3'te bulunan anomalinin 3B modeldeki görünümü

Blok 3'de ısı köprüsü anomalisi bulunan duvarın İHA ile elde edilen RGB görüntüsü Şekil 4.13.'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Blok 3'te bulunan anomalinin İHA ile elde edilen RGB görüntüsü

Blok 3 üzerinde devam eden termal analizde, Blok 3 üzerindeki duvarda farklı yüzey sıcaklığı gösteren duvar anomalisi tespit edilmiştir. Anomali bulunan duvarın termal 3B model üzerindeki görüntüsü Şekil 4.14.'de verilmiştir.

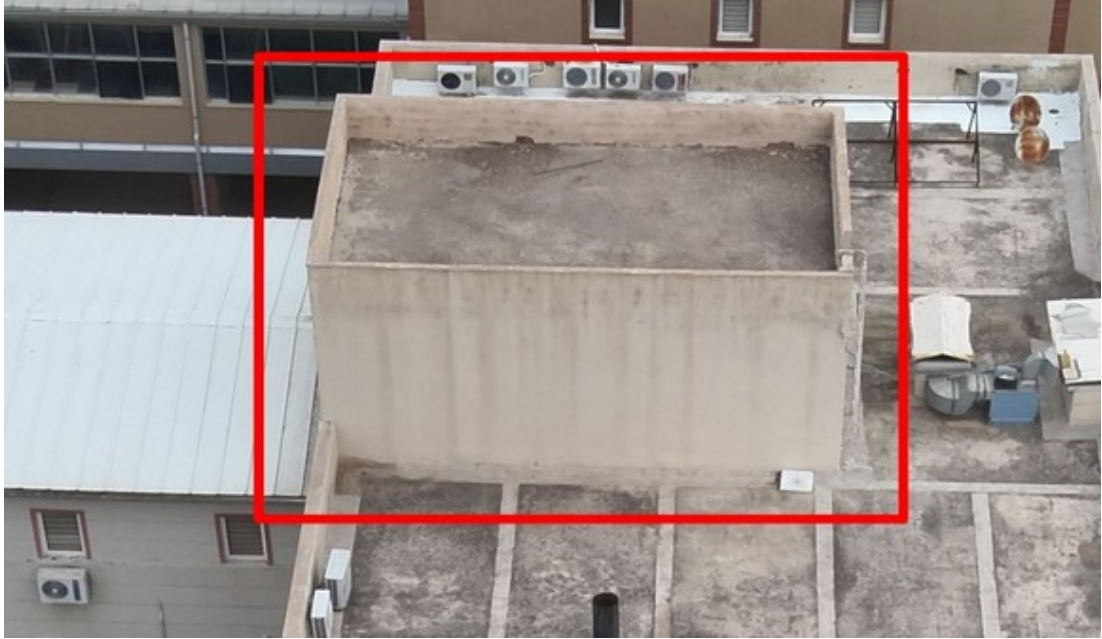


Şekil 4.14. Blok 3 duvar anomali

Duvar üzerindeki termal farklılığın sebebinin daha iyi anlaşılması amacıyla ilgili bölge 3B model ve RGB görüntü ile kontrol edilmiştir. Duvarın 3B model görüntüsü Şekil 4.15.'de RGB görüntüsü ise Şekil 4.16.'da verilmiştir.



Şekil 4.15. Blok 3'deki duvarın 3B model görünümü



Şekil 4.16. Blok 3'te bulunan duvarın İHA ile elde edilen RGB görüntüsü

Şekil 4.11'de anomali bulunan duvar alanı 4.485 m^2 , duvarın U değeri $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Termal köprünün toplam uzunluğu (L) ise 68.93 m 'dir. Bu duvardaki ısı kaybının hesaplaması Denklem 3.1.'e göre yapılmış ve Q duvar değeri 87.46 W olarak hesaplanmıştır. Isı köprüsünün ısı kaybı hesabı ise Denklem 3.2.'ye göre yapılmış ve $Q_{\text{köprü}}$ değeri 627.27 W bulunmuştur.

Şekil 4.14'de yer alan termal anomaliye ait ısı kaybı hesabında Denklem 3.1. kullanılmıştır. Toplam duvar alanı 24.827 m^2 olup, daha düşük yüzey sıcaklığına sahip olan alan 10.705 m^2 olarak belirlenmiştir. Duvarın ısı iletim katsayısı olan U değeri $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$, ΔT ise $13 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda, daha soğuk yüzey sıcaklığına sahip bölgede ısı kaybı 208.7 W ; kalan yüzey alanında ise 275.3 W olarak hesaplanmıştır. Blok 3 binasına ait toplam ısı kaybı Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. BLOK 3 Toplam ısı kaybı

Kaynak	Isı kaybı (W)
Ana duvar yüzeyi	87.46
Isı köprüsü	627.27
Daha düşük yüzey sıcaklığına sahip alan	208.7
Geriye kalan bölge	275.3
BLOK 3 TOPLAM ISI KAYBI	1198.7 W

Elde edilen bulgular, İHA termografisi ve fotogrametrik modelleme yöntemlerinin entegresinin binalarda ısı yalıtım durumunu değerlendirmede önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuş; bu teknolojilerin özellikle yapının dış cephesindeki sıcaklık dağılımını detaylı bir biçimde analiz etme, yalıtım eksikliklerini belirleme ve enerji kayıplarını sayısal olarak hesaplama gibi açılardan mühendislik uygulamalarına ciddi katkılar sunduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, ulaşılan verilerin detaylı analizine dayanarak, yöntemlerin uygulanabilirliğini, doğruluğunu, sınırlılıklarını ve enerji verimliliğine olan etkilerini çok boyutlu olarak değerlendirmek amacıyla aşağıda tartışma bölümünde kapsamlı bir irdeleme yapılmıştır.

5. TARTIŞMA

Termal İHA destekli görüntüleme ve fotogrametrik modelleme yöntemleriyle elde edilen bulgular doğrultusunda, bina cephelerinde tespit edilen termal anomalilerin nedenleri değerlendirilmiş, bu anomalilerin ısı kaybına etkileri analiz edilmiş ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Bulgular, hem yapısal kusurlardan kaynaklanan yalıtım eksikliklerini hem de kullanıcı kaynaklı faktörlerin enerji performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Blok 1'e ait termal 3B model incelendiğinde tespit edilen yüksek sıcaklık anomalisi, fotogrametrik 3B modeldeki açık pencere konumuyla tam olarak örtüşmektedir. Bu bölgedeki yüksek termal imza, 3.8 kW ısı kaybı hesabının doğruluğunu desteklemektedir. Ayrıca açık pencere nedeniyle sıcak iç havanın dışarı çıkışı görüntüde net şekilde anlaşılmaktadır. Anomali bulunan pencerenin alanı, termal 3B harita üzerinden yapılan ölçümler yardımıyla 0,074 m² olarak belirlenmiş ve pencere üzerinden yalnızca iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybı 26,94W olarak bulunmuştur. Ancak bu kayıp yalnızca iletimle sınırlı değildir. Pencerenin açık olması nedeniyle, iç mekândaki sıcak havanın dış ortama kontrolsüz bir şekilde taşınım yoluyla iletildiği bilinmekte ve taşınım kaynaklı enerji kaybı 3827W olarak hesaplanmıştır. Bu değer, yalnızca pencere alanı üzerinden, birkaç dakika içerisinde önemli düzeyde enerji kaybının meydana gelebileceğini ortaya koymaktadır. Aynı cephede bulunan sağlam ve yalıtımlı duvar yüzeyinden iletimle gerçekleşen ısı kaybı ise 76,65 W olarak hesaplanmıştır. Buna göre, açık pencerenin oluşturduğu toplam ısı kaybı, yalıtımlı ve kapalı bir yüzeye göre yaklaşık 50 kat fazla olup, bu fark kullanıcı kaynaklı anomali davranışlarının enerji verimliliği açısından ne denli kritik olduğunu göstermektedir.

Literatürde, kullanıcı kaynaklı açık pencere ve kapı açıklıklarının bina enerji kayıplarında önemli bir paya sahip olduğu gösterilmektedir. Araştırmalar, bu açıklıkların bina toplam ısı kayıplarının yaklaşık %30–60'ından sorumlu olabileceğini ortaya koymaktadır (Marincioni vd., 2016; Lucchi, 2018). Bu tür açıklıklar, bina kabuğunun termal performansını yerel ölçekte zayıflatarak enerji dengesinde düzensizliklere neden olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sayısal veriler de literatür belirtilen oranda ısı kaybına işaret etmektedir.

Blok 1'e ait cephe analizinde, açık pencere ve kapı kaynaklı bir başka anomali daha tespit edilmiştir. Bu bölgedeki duvarın toplam yüzey alanı 5,41 m² olup, bu yüzeyde yaklaşık 0,34 m²'lik pencere ve kapı açıklığı yer almaktadır. Kalan 5,07

m²'lik alanda yalnızca iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybı 98,87 W olarak hesaplanmıştır. Bu, birim yüzey alanı başına yaklaşık 19,5 W/m²'lik bir kayba karşılık gelmektedir. Duvarın U-değerinin 1,5 W/m²·K ve iç-dış ortam sıcaklık farkının 13 °C olduğu koşullar altında bu değer teknik olarak öngörülebilir olmakla birlikte, mevcut enerji verimliliği standartlarına göre yetersiz kabul edilmektedir.

Literatürde iyi yalıtılmış duvar yüzeylerinde iletim kaynaklı enerji kayıplarının 5–10 W/m² seviyelerinde olduğu bildirilmektedir (Asdrubali vd., 2012; Balaras ve Argiriou, 2002). Buna karşılık, yetersiz yalıtım veya yapısal açıklıkların bulunduğu bölgelerde bu değerlerin 20 W/m²'nin üzerine çıkabildiği belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar da bu aralığı doğrulamakta ve söz konusu bölgede yalıtımın yetersiz olduğuna işaret etmektedir. Bu tür açıklıklar, bina kabuğundaki termal dengenin bozulmasına neden olmakta ve termal görüntülerde lokal sıcaklık düşüşleriyle kendini göstermektedir. Literatürde de benzer şekilde, kış aylarında açık kalan açıklıkların iç ortamdan dış ortama taşınım yoluyla gerçekleşen enerji kaybını artırarak toplam enerji tüketimini ciddi şekilde etkilediği belirtilmektedir (Fokaides, 2011).

Blok 1' e ait anomalileri genel olarak değerlendirmek gerekirse; açık bırakılan açıklıkların etkisiyle artan taşınım kaynaklı kayıplar da göz önünde bulundurulduğunda, ilgili yapı elemanlarının yalıtım performansının artırılması ve kullanıcı kaynaklı davranışların kontrol altına alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, İHA destekli termal görüntüleme yönteminin sunduğu mekânsal analiz kapasitesi, bu tür yerel ısı kayıplarının tespiti ve enerji verimliliği açısından iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesi bakımından oldukça etkilidir. Açık pencere anomalisine yönelik çözüm önerileri, yalnızca fiziksel müdahalelerle sınırlı kalmamalı; bina kullanıcılarının davranış biçimlerini düzenlemeye yönelik farkındalık artırıcı stratejileri de içermelidir. Otomatik kapatma mekanizmaları, uyarı sistemleri ve kontrollü doğal havalandırma sistemlerinin entegrasyonu, bu türden kontrolsüz kayıpların önlenmesinde etkin rol oynayabilir. Bu çalışmada açık pencere kaynaklı termal anomali, sadece bir yüzey sıcaklık farkı değil, toplam enerji dengesi üzerinde büyük etkisi olan kritik bir unsur olarak saptanmıştır. Termal İHA verileri ile fotogrametrik modelin birlikte değerlendirilmesi bu sorunu net biçimde görselleştirmiş ve nicel olarak ortaya koymuştur.

Blok 2'deki termal görüntüleme bulgularının değerlendirilmesi sonucunda, yapının teras katında yer alan havalandırma çıkış noktalarında ve metal drenaj elemanında, çevre yapı yüzeylerine kıyasla belirgin sıcaklık farkları tespit edilmiş

ancak ısı kaybı hesabı yapılmamıştır. Bu bölgelerdeki sıcaklık artışı, klasik anlamda bir ısı yalıtım zafiyetinden ziyade, yapısal detayların malzeme özellikleri ve mekanik sistem işleyişi ile ilişkili olarak değerlendirilmiştir.

Havalandırma çıkışlarında gözlemlenen sıcaklık yoğunluğu, iç mekândan dış ortama atılan sıcak havanın termal kamerada görünür hale gelmesiyle açıklanabilir. Havalandırma sistemlerinin çalışma prensibi gereği, bu çıkışlardan sürekli olarak sıcak hava salınımı gerçekleşmekte ve bu durum yüzeyde geçici ancak belirgin bir termal iz bırakmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu sıcaklık farklılıkları kalıcı bir yalıtım kusuru değil, sistem kaynaklı ve geçici nitelikte bir ısıl anomalidir (ISO 6781, Asdrubali, 2012). Bu tür yapı bileşenlerinin değerlendirilmesinde, ısı iletimi yerine hava hareketliliği ve cihaz işleyişi göz önünde bulundurulmalıdır. Benzer şekilde, teras yüzeyinde yer alan metal drenaj çıkışı da termal görüntüde çevresine kıyasla daha yüksek sıcaklık değerleriyle görünmüştür. Ancak bu durumda da yapının içinden geçen sıcak su akışı tespit edilmemiş ve giderin çevresinde homojen bir sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, sıcaklık farkı doğrudan bir ısı köprüsüne veya yalıtım boşluğuna değil; metal malzemenin yüksek ısı iletim katsayısı (λ), düşük ısıl kütlesi ve sabah saatlerinde gelen ilk güneş ışınlamına maruz kalması gibi etkenlere bağlanmaktadır. Ayrıca geceden kalma ısıl birikim de metal yüzeyin çevresine kıyasla daha geç soğumasına yol açabilmektedir (Asdrubali, 2012; ISO 6781).

Bu doğrultuda, her iki durumda da gözlemlenen sıcaklık farklılıklarının: malzemenin fiziksel ve ısıl özellikleri, mekanik sistemlerin çalışma süreçleri, güneş ışınlamının yönü ve saatine bağlı etkiler, geceden kalma ısıl birikim gibi etkenlerle açıklanabilecek geçici termal anormallikler olduğu değerlendirilmiştir. Bu tür termal anomaliler, yapı kabuğunun enerji performansını doğrudan etkileyen bir yalıtım kusurundan çok, yapısal detaylardan kaynaklı yüzeysel sıcaklık farkları olarak yorumlanmıştır.

Blok 3'e ait yapılan hesaplamalar değerlendirildiğinde 714.7W'lık ısı kaybının 627.27W'ının ısı köprüsünden kaynaklandığı görülmektedir. Isı köprüleri, yapı elemanları arasında farklı ısıl iletkenlik değerlerine sahip malzemelerin birleşim noktalarında ortaya çıkan, yüzey sıcaklıklarını düşüren ve bu nedenle ısı kayıplarını artıran yapılardır (Kralj vd., 2014). Söz konusu bölgede tespit edilen yüksek ısı kaybı, doğrusal ısı köprüsünün etkisiyle oluşmuştur. Bu durum, yalnızca enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda iç yüzeylerde yoğunlaşma ve rutubet gibi nem kaynaklı hasarlara da neden olabilecek riskleri beraberinde getirmektedir (Peköz

ve Korkmaz, 2021).

Termal köprünün toplam ısı kaybı içindeki payı yaklaşık %88'e ulaşmakta olup, bu oran söz konusu birleşim detaylarının yalıtım bakımından kritik zayıflıklar taşıdığını ortaya koymaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer bulgulara rastlanmaktadır. Bu fark, yapının mevcut yalıtım detaylarının yetersizliği veya birleşim noktalarının tasarım hatalarından kaynaklanabileceği gibi, sahada yapılan gözlemler ışığında montaj hataları, betonarme kiriş-sütun geçişleri veya yalıtım süreksizlikleri ile açıklanabilir. Özellikle sadece 4,485 m²'lik bir yüzeyde bu denli yüksek toplam kayıp, bu tür birleşim detaylarının enerji performans analizlerinde öncelikli olarak incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca bu durum, sadece iletim değil, konveksiyon ve radyasyon gibi diğer ısı transfer mekanizmalarıyla da birleştiğinde, iç ortam konfor koşullarının sürdürülebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan İHA destekli termal görüntüleme ve fotogrametrik modelleme yönteminin sunduğu mekânsal doğruluk ve hızlı tarama kapasitesi, yüzey sıcaklıklarının ayrıntılı dağılımını ortaya koyarak ısı köprülerinin tespiti açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Blok 3 dış duvarında tespit edilen bu ısı köprüsü, yapı kabuğunda enerji kaybının kritik düzeyde yoğunlaştığı bir bölgeyi temsil etmekte ve yapı fiziki açısından önemli bir yalıtım zafiyetine işaret etmektedir. Bu tür doğrusal ısı köprülerinin etkili bir biçimde tespit edilmesi ve giderilmesi, hem enerji verimliliğinin artırılması hem de bina sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Tez kapsamında uygulanan yöntem, bu tür anomalilerin erken tespiti ve mekânsal olarak modellenmesi açısından oldukça işlevsel bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Blok 3'de gerçekleştirilen termal görüntüleme çalışmaları sonucunda, yapının dış duvar yüzeyinde bölgesel sıcaklık farklarının bulunduğu ve bu farkların mekânsal dağılım açısından belirgin anomalilere işaret ettiği tespit edilmiştir. Termal görüntülemede, aynı duvar üzerinde farklı yüzey sıcaklıklarının gözlemlenmesi, yapı elemanındaki yalıtım farklılıklarına işaret etmektedir. Yalıtımı zayıf olan bölgelerde, iç ortamdan gelen ısı daha hızlı bir şekilde dış yüzeye ulaşarak yüzey sıcaklığının artmasına neden olur. Bu durum, ısı kaybının fazla olduğu bölgelerin termal görüntüde daha sıcak görünmesiyle sonuçlanır. Yüzey sıcaklığı yüksek olan bölgelerde ısı kaybı potansiyelinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

Literatürde, yüzey sıcaklık dağılımlarındaki düzensizliklerin, genellikle ısı

köprüleri, yalıtımın süreksizliği, dış cephe kaplamasındaki bozulmalar veya yapı malzemelerinin birleşim detaylarındaki hatalar gibi nedenlerden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Kralj vd., 2014; Balaras ve Argiriou, 2002). Termal anomalilerin çoğu zaman görsel olarak tespit edilemeyecek düzeyde olduğu, ancak kızılötesi termografi sayesinde detaylı ve yüzeysel olarak ortaya çıkarılabildiği çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır (Fokaides ve Kalogirou, 2011). Bu bağlamda, söz konusu anomali bölgesinde lokal yalıtım bozulmaları bulunduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak, Blok 3'de tespit edilen bu termal anomali, yerel enerji kayıplarının mekânsal haritalanması açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Söz konusu alanlardaki ısı kayıplarının yüksekliği, yapı performansının artırılması adına bölgesel müdahaleleri gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, tez kapsamında uygulanan yöntem, yapı kabuğundaki gizli enerji kaybı alanlarının belirlenmesinde etkili bir mühendislik yaklaşımı olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan analizler ve literatür karşılaştırmaları doğrultusunda elde edilen bulgular, çalışma kapsamında uygulanan yöntemin etkinliğini ve yapı kabuğundaki termal zafiyetlerin belirlenmesindeki katkısını ortaya koymuştur.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, binalarda ısı yalıtım performansının değerlendirilmesine yönelik olarak İHA destekli termal görüntüleme ve fotogrametrik modelleme yöntemlerinin birlikte kullanımı incelenmiş ve bu teknolojilerin, yapı kabuğundaki termal anomalileri tespit etmede etkin bir araç olduğu ortaya konmuştur. Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ne ait bloklar üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, yapı cephelerinde farklı düzeylerde ısı kaybı oluşturan bölgeler detaylı şekilde belirlenmiş; özellikle birleşim noktaları, açıklık alanları ve dış duvar yüzeylerinde yalıtım zafiyetleri saptanmıştır.

Çalışma sonucunda, ısı köprülerinin binalarda meydana gelen ısı kayıplarını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Isı köprülerinin, döşeme birleşim yerleri ve yetersiz yalıtım uygulamaları gibi yapısal zayıflık noktalarında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu bölgelerdeki sıcaklık farklılıkları, termografi ile yapılan analizler sayesinde net biçimde ortaya konmuş ve ısı köprüleri ise enerji verimliliğini düşüren başlıca unsurlardan biri olarak değerlendirilmiştir. Nitekim, Blok 3'te incelenen duvarda toplam ısı kaybının %88'inin ısı köprüsünden kaynaklanması, bu sonucu destekler niteliktedir.

Uygulanan yöntem sayesinde, geleneksel gözlemlerle tespit edilmesi güç olan yüzeysel yalıtım eksiklikleri ve termal köprüler hızlı, güvenli ve detaylı şekilde ortaya çıkarılmıştır. İHA teknolojisinin sunduğu geniş alan tarama kapasitesi, özellikle yüksek ve erişimi zor cephelerde önemli avantajlar sağlamıştır. Fotogrametrik modelleme ile termal verilerin mekânsal bağlamda bütünleştirilmesi, yalnızca sıcaklık dağılımını değil, aynı zamanda enerji kayıplarının yüzeysel yayılımını da analiz etme imkânı sunmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma ile yapı kabuğundaki yalıtım zayıflıklarının yerel ve detaylı bir biçimde haritalanmasının, enerji verimliliğini artırıcı müdahaleler için temel veri sağlayabileceği ortaya konmuştur. Bina ısı yalıtımının izlenmesinde termal İHA ve fotogrametrinin birlikte kullanımı, yapısal anomali noktalarının tespitini kolaylaştırmış; böylece bu yöntemlerin bina ısı kaybında veri sağlayabildiği ortaya konmuştur. Bu bütünlük yaklaşım, bina ısı kayıplarının belirlenmesinde uygulanabilir bir mühendislik yöntemi olduğu düşünülmektedir.

7. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında ulaşılan bulgular doğrultusunda, gerek uygulama düzeyinde gerekse ileriki araştırmalar açısından bazı öneriler sunmaktadır.

Yapı kabuğunda yerel ısı kaybı tespiti, klasik enerji analiz yöntemlerine göre daha detaylı ve gerçek zamanlı sonuçlar sunduğu için, özellikle büyük ölçekli yapılarda termal İHA sistemleri ile periyodik denetimler yapılabilir.

Yapılan uygulama, bina yüzey analizleri sayesinde ısı köprülerinin tespiti sağlamıştır. Bu nedenle özellikle eski ve yalıtımı zayıf binaların taranmasında bu yöntemlerin kullanılması önerilebilir.

Tespit edilen ısı köprüleri ve yalıtım süreksizlikleri, yapı detaylarında düzeltici iyileştirmelerle giderilmeli; özellikle pencere kenarları, kiriş-döşeme birleşimleri ve kapı boşluklarında yüksek iletim kayıplarını engelleyici malzeme ve yöntemler kullanılabilir.

Yüzey sıcaklığı farklılıklarının daha doğru yorumlanabilmesi için, her bölgeye ait U değerlerinin ayrı ayrı hesaplanması ve ısı kaybı analizlerinde bu değerlere göre işlem yapılması önerilmektedir.

İHA destekli termografi ile elde edilen bulgular, enerji kimlik belgesi düzenlemelerinde ve mevcut yapıların enerji sınıflandırmasında referans veri olarak kullanılabilir böylece enerji verimliliği denetimi daha objektif hale getirilebilecektir.

KAYNAKLAR

- Abdelhafiz, A., Balabel, A., Alwetaishi, M., Shamseldin, A., Issa, U., Sharaky, I., ... & Al-Harthi, M. (2022). An innovative approach to check buildings insulation efficiency using thermal cameras. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101740. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.001>
- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape user manual: Professional edition, version 2.0*. <https://www.agisoft.com>
- Alba, M. I., Barazzetti, L., Scaioni, M., Rosina, E., & Previtali, M. (2011). Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings. *Remote Sensing*, 3(9), 1847–1870. <https://doi.org/10.3390/rs3091847>
- Anıl, F. (2015). *Kentsel dönüşümü bir fırsat kabul ederek binalarda ısı yalıtımının faydalarının araştırılması* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı).
- ASHRAE. (2017). *ASHRAE handbook – Fundamentals* (SI ed.). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Aydın, D. (2017). *Yüksek konut yapılarında iç ortam kalitesinin enerji verimliliği ve kullanıcı konforuna etkisi*.
- Bacco, M., Giannecchini, S., Girolami, M., & Mavilia, L. (2020). Drone photogrammetry and infrared thermography for detecting energy waste in buildings. *Sensors*, 20(16), 4570. <https://doi.org/10.3390/s20164570>
- Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34(2), 171–183. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0)
- Bayraktar, D., & Bayraktar, E. A. (2018). Okul binalarında ısı yalıtımı maliyetinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 57–72.
- Bektaş, F., Çerçevik, A., & Kandemir, C. (2017). Türkiye'nin enerji tüketimi ve enerji verimliliği üzerine bir değerlendirme. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 13(3), 624–636.
- Biswanath, M. K., Hoegner, L., & Stilla, U. (2023). Thermal mapping from point clouds to 3D building model facades. *Remote Sensing*, 15(19), 4830. <https://doi.org/10.3390/rs15194830>
- Boyd, D., Clarkson, M., & Mather, P. (2015). Photogrammetry and 3D prototyping: A low cost resource for training in veterinary orthopedics. *Crop Research in Veterinary Orthopedics, SciELO Brazil*.
- Casula, G., Fais, S., & Ligas, P. (2023). Investigating the quality of UAV-based images for the thermographic analysis of buildings. *Remote Sensing*, 15(2), 301. <https://doi.org/10.3390/rs15020301>
- Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2017). UAV photogrammetry for archaeological site survey. *ISPRS Archives, XLII-2/W3*, 171–177.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-171-2017>

- Cho, Y., & Wang, C. (2011). 3D thermal modeling for existing buildings using hybrid LIDAR system. In *Computing in Civil Engineering 2011* (pp. 552–559). American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41182\(416\)69](https://doi.org/10.1061/41182(416)69)
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Çomaklı, K., & Yüksel, B. (2004). Türkiye’de bina sektörü ve enerji tüketimi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 83, 48–57.
- Demircan, H. (2020). Binalarda meydana gelen ısı kayıplarının termal kamera yöntemiyle tespit edilmesi (Adapazarı örneği). *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 3(1), 26–31.
- Erdabak, M. (2011). *Binalarda ısı yalıtımındaki eksikliklerin enerji tasarrufuna olan etkilerinin uygulamalı olarak araştırılması* (Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Ey Chmielewska, H., Chruściel-Nogalska, M., & Frączak, B. (2015). Photogrammetry and its potential application in medical science on the basis of selected literature. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 24(4), 737–741. <https://doi.org/10.17219/acem/29462>
- Feds.group. (2025, April 28). *The role of thermal imaging drones in combating energy loss in urban areas*. <https://feds.group/news/the-role-of-thermal-imaging-drones-in-combating-energy-loss>
- Fokaides, P. A., & Kalogirou, S. A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88(12), 4358–4365. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014>
- Gil-Docampo, M., Ortiz Sanz, J., Cañas Guerrero, I., & Fernández Cabanas, M. (2023). UAS IR-thermograms processing and photogrammetry of thermal images for the inspection of building envelopes. *Applied Sciences*, 13(6), 3948. <https://doi.org/10.3390/app13063948>
- Grussenmeyer, P. (2021). *Photogrammetry: From historical techniques to modern applications* [Lecture notes]. University of Strasbourg.
- Guan, S., Zhu, Z., & Wang, G. (2022). A review on UAV-based remote sensing technologies for construction and civil applications. *Drones*, 6(5), 117. <https://doi.org/10.3390/drones6050117>

- Guedes, J. V. F., Meira, G. D. S., Bias, E. D. S., Pitanga, B., & Lisboa, V. (2025). Performance of sensors embedded in UAVs for the analysis and identification of pathologies in building façades. *Buildings*, 15(6), 875. <https://doi.org/10.3390/buildings15060875>
- Henn, K. A., & Peduzzi, A. (2024). Surface heat monitoring with high-resolution UAV thermal imaging: Assessing accuracy and applications in urban environments. *Remote Sensing*, 16(5), 930. <https://doi.org/10.3390/rs16050930>
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- International Energy Agency. (2021). *Buildings – Energy system*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- International Energy Agency. (2023a). *Buildings – Energy system*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- International Energy Agency. (2023b). *Cement – Analysis*. <https://www.iea.org/reports/cement>
- International Energy Agency. (2023c). *Global status report for buildings and construction 2023*. IEA Publications.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Kabadayı, A. (2024). Mobil cihazların fotogrametri tabanlı 3B modellemedeki potansiyeli. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 71–77.
- Kahveci, M., & Can, N. (2017). İnsansız hava araçları: Tarihçesi, tanımı, dünyada ve Türkiye'deki yasal durumu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4), 511–535.
- Kaya, M. (2019). *Termal görüntüleme yöntemleriyle yapı kabuğunun analiz edilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi).
- Klymenko, V., Kolesnikov, V., Andreev, A., & Ivanov, M. (2022). RGB imaging as a tool for remote sensing of characteristics of terrestrial plants: A review. *Plants*, 13(9), 1262. <https://doi.org/10.3390/plants13091262>
- Kosny, J., & Kossecka, E. (2002). Multi-dimensional heat transfer through complex building envelopes. *ASHRAE Transactions*, 108(1), 395–402.
- KPMG. (2024). *Enerji sektör raporu 2024*. KPMG Türkiye. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/tr/pdf/2024/09/Enerji-Raporu-2024.pdf>
- Lamarr.AI. (2025, February 26). *AI and drone integration for building diagnostics and energy efficiency*. <https://lamarr.ai/blog/ai-and-drone-integration-for-building-diagnostics>.
- López, F. J., Acha, J. C., & Rivas, A. (2022). 3D tools for building and infrastructures inspection from thermal UAS data: First steps. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/366835119>
- Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Roca, D., & Arias, P. (2013). Thermal and geometric

- characterization of buildings' envelopes using UAV and infrared thermography. *Energy and Buildings*, 66, 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.033>
- Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., & Arias, P. (2013). Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes. *Automation in Construction*, 31, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.003>
- Maddahi, S., & Niyogi, S. (2021). Drone-based thermal imaging for building energy performance assessment: A comprehensive review. *Building and Environment*, 196, 107802. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107802>.
- Mayer, Z., Epperlein, A., Vollmer, E., Volk, R., & Schultmann, F. (2023). Investigating the quality of UAV-based images for the thermographic analysis of buildings. *Remote Sensing*, 15(2), 301.
- Meola, C., di Maio, R., Roberti, N., & Carlomagno, G. M. (2005). Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis*, 12(6), 875–892. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.01.004>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). 06.03.2024 tarihli Şanlıurfa ili saatlik meteorolojik verileri. <https://www.mgm.gov.tr>
- Motayyeb, S., Samadzedegan, F., Dadrass Javan, F., & Hosseinpour, H. (2023). Fusion of UAV-based infrared and visible images for thermal leakage map generation of building facades. *Heliyon*, 9(3), e14551. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14551>
- Muehler, D., & Previtali, M. (2021). Photogrammetry as a digital tool for joining heritage documentation in architectural education and professional practice. *Buildings*, 13(2), 319. <https://doi.org/10.3390/buildings13020319>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Paralı, D. (2009). *Bina duvarlarında uygulanan ısı yalıtım sistemlerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi).
- Polat, N., Memduhoğlu, A., & Kaya, Y. (2025). Accurate terrain modeling after dark: Evaluating nighttime thermal UAV-derived DSMs. *Drones*, 9(6), 430. <https://doi.org/10.3390/drones9060430>
- Remondino, F., & Campana, S. (2014). *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage: Theory and best practices*. Archaeopress.
- Remondino, F., & Menna, F. (2020). Geometric and radiometric analysis of photogrammetric 3D models: Best practices and open challenges. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 75–82. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-75-2020>
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV

- photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1/C22), 25–31.
- Resonon. (2024). *Thermal imaging vs. hyperspectral imaging*. <https://resonon.com>
- Sakalp, D., & Akçay, Ö. (2023). Bina zarfının termal görüntüler ile fotogrametrik modellenmesi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 4(1), 1–16.
- Schmutz, C. (2024). Investigating the quality of UAV-based images for the thermographic analysis of buildings. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/366877475>
- Şimşek, Z. (2019). Konut yapılarında kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin incelenmesi. *NWSA Applied Sciences*, 14(4), 147–162.
- Taha, M. R., Gültekin, H., & Alkan, M. (2023). Bulut tabanlı fotogrametrik modelleme sistemleri üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme. *Türkiye Harita Mühendisliği Dergisi*, 65(1), 33–48.
- Taylor & Francis Online. (2020). The role of machine intelligence in photogrammetric 3D modeling – an overview and perspectives. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1805037>
- Thomas, R. A., Jones, N., & Donne, K. E. (2000). Infrared thermography and diagnostic monitoring. *The Imaging Science Journal*, 48(1), 23–32.
- Tian, Z., Li, Z., Zhang, J., & He, Y. (2021). Determination of the building envelope heat transfer coefficient by heat flux measurement and simulation. *Energy and Buildings*, 252, 111387. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111387>
- TÜİK. (2023). Hanehalkı nihai enerji tüketim istatistikleri 2022. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=53805>
- TÜİK. (2023). Konutlarda enerji tüketimi istatistikleri, 2023. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr>
- Türkiye Fotogrametri Dergisi. (2020). Kültürel mirasların İHA ile fotogrametrik üç boyutlu modelleme çalışmalarında karşılaşılan sıkıntılar ve öneriler. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tufod/issue/53476/676160>
- Ülgen, K. (2002). Isı yalıtımı ve enerji ekonomisi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(3), 47–56.
- Ünver, A., & Kalaycıoğlu, E. (2020). Binalarda ısı yalıtımı ve enerji verimliliği. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 16(1), 45–59.
- Ünver, Ü., Adıgüzel, E., Adıgüzel, E., Çivi, S., & Roshanaei, K. (2020). Türkiye'deki iklim bölgelerine göre binalarda ısı yalıtım uygulamaları. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 171–187.
- 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.

- Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ve sensör tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73–100. <https://www.researchgate.net/publication/366245816>
- Wang, Z., Hou, Y., & Soibelman, L. (2024). A new method of pixel level in situ U value measurement for building envelopes based on infrared thermography. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2401.11070>
- Yang, Y., Chen, Z., Wu, T. V., Sempey, A., & Batsale, J. C. (2022). In situ methodology for thermal performance evaluation of building wall: A review. *International Journal of Thermal Sciences*, 181, 107687.
- Yılmaz, A., & Şahin, S. (2019). Türkiye’de enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi: Nedensellik analizi. *Enerji Ekonomisi ve Politikaları Dergisi*, 9(2), 45–61.
- Yılmaz, T. (2021). Bina cephelerinde ısı iletim katsayısının termal görüntüleme ile belirlenmesi (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi).
- Yılmazoğlu, M. Z. (2011). Binalarda ısı yalıtımının örnek iki binada karşılaştırılması ve ekonomik analizleri. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 48–56.
- Yoon, J., Hwang, S., Kim, K., & Lee, S. (2025). Construction and recording method of a three-dimensional model to automatically manage thermal abnormalities in building exteriors. *Buildings*, 15(9), 1558.
- Zhang, D., Zhan, C., Chen, L., Wang, Y., & Li, G. (2025). Review of unmanned aerial vehicle infrared thermography (UAV-IRT) applications in building thermal performance: Towards the thermal performance evaluation of building envelope. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 22(3), 266–296.
- Zhang, D., Zhan, C., Chen, L., Wang, Y., & Li, G. (2024). Review of unmanned aerial vehicle infrared thermography (UAV-IRT) applications in building thermal performance: Towards the thermal performance evaluation of building envelope. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 1–31.
- Zhang, J., Jung, J., Sohn, G., & Cohen, M. (2015). Thermal infrared inspection of roof insulation using unmanned aerial vehicles. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 381–386.
- Zhou, H., Wu, X., Li, B., & Du, S. (2020). Multi-sensor drone system for real-time structural inspection and monitoring. *Remote Sensing*, 12(5), 819. <https://doi.org/10.3390/rs12050819>