

## **İnsansız Hava Araçlarıyla Bina Çatılarının Fotovoltaik Sistemlere Uygunluğunun İncelenmesi: Iğdır Üniversitesi Örneği**

**\*Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 05.02.2025

Kabul/Accepted: 02.05.2025

Yayımlandı/Published: 01.10.2025

### **Investigation of the Suitability of Building Roofs for Photovoltaic Systems Using Unmanned Aerial Vehicles: The Case of Iğdır University**

**Yemen GÜREL , Rüştü ÇALLI , Emirhan ÖZDEMİR\* ***Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama, Iğdır, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

#### **Öz**

Dünya nüfusunun hızla artması ve sanayileşmenin yaygınlaşması, enerjiye olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Geleneksel fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel etkileri, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, güneş enerjisi (GES), temiz, yenilenebilir ve uzun vadede maliyet etkin bir çözüm sunarak enerji arz güvenliğine katkı sağlamaktadır. Fotovoltaik panellerin bina çatılarına entegre edilmesi, özellikle şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde ek alan gerektirmeden enerji üretimini artıran önemli bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında, Iğdır ili, Merkez İlçesi, Suveren Beldesi'nde yer alan Iğdır Üniversitesi Şehit Bülent Yurtseven Kampüsü içerisinde bulunan toplamda 26.497 m<sup>2</sup> alana sahip altı bina çatısının güneş enerjisi panelleri için uygunluk analizi yapılmıştır. İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak bina çatılarının farklı açılardan görüntüleri alınmış, ardından bu görüntüler fotogrametrik yöntemlerle işlenerek 3B modeller oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, bina çatı alanlarının ne kadarının güneş enerjisi panellerine uygun olduğunu belirlemek ve bu doğrultuda sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmaktır. Yapılan analizler sonucunda, çatıların yapısal özellikleri ve yönelimi dikkate alındığında, toplamda 2.982 m<sup>2</sup> alanda fotovoltaik panellerin yerleştirilebileceği tespit edilmiştir. Bu durumda, bina çatılarına ait alanların %11,25'lik kısmının güneş enerjisi üretimi için değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

#### **Abstract**

The rapid growth of the global population and the widespread expansion of industrialization have led to an ever-increasing demand for energy. The limited availability and environmental impact of conventional fossil fuels have necessitated the transition to sustainable and renewable energy sources. In this context, solar energy (photovoltaic systems) represents a clean, renewable, and cost-effective long-term solution that contributes to energy security. Integrating photovoltaic panels into building rooftops is a particularly effective method for enhancing energy production without requiring additional land, especially in densely urbanized areas. In this study, a suitability analysis was conducted for the installation of solar energy panels on the rooftops of six buildings within the Şehit Bülent Yurtseven Campus of Iğdır University, located in Suveren Town, Central District, Iğdır Province. To achieve this, images of the rooftops were captured from multiple angles using an unmanned aerial vehicle (UAV), and these images were subsequently processed using photogrammetric techniques to generate 3D models. The primary objective of this study is to determine the extent to which rooftop areas are suitable for photovoltaic panel installation and to contribute to the development of sustainable energy solutions. The analysis revealed that, considering the structural characteristics and orientation of the rooftops, a total area of 2,982 m<sup>2</sup> is suitable for photovoltaic panel installation. This corresponds to 11.25% of the total available rooftop area.

**Anahtar Kelimeler:** İHA; 3B Model; SYM; Fotovoltaik Enerji Sistemleri; KABEV**Keywords:** UAV; 3B Model; SYM; Photovoltaic Energy Systems; KABEV

#### **1. Giriş**

Dünya genelinde nüfus artışı ve hızlı kentleşmenin etkisiyle şehirleşme alanları ve bu alanların içerikleri dinamik bir şekilde değişim göstermektedir. 2018 yılı itibarıyla, küresel kentsel nüfus oranı 1960 yılına kıyasla iki kat artış göstererek %55 seviyesine ulaşmıştır. Nüfus artış hızının doğrusal bir eğilimle ilerlediği varsayıldığında, kentsel nüfus oranının 2050 yılında %68'e, 2100 yılında ise %85'e ulaşacağı öngörülmektedir (Schlosser vd. 2020). Dünya nüfusunun artış göstermesi, enerji talebini de

paralel bir şekilde artırmaktadır (Wongwan vd. 2023; Xu vd. 2024). Bu durum, enerji üretimi ve tüketimi üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır; özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarının çevresel etkilerini daha belirgin hale getirmektedir (Xu vd. 2024). Bu bağlamda, fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji kaynakları, sınırlı rezervleri ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından yetersiz kalmaktadır (Han vd. 2021). Küresel nüfus ve enerji talebindeki hızlı artış, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini giderek artırmaktadır (Zhong vd.

2022). Yenilenebilir enerji kaynakları, iklim değişikliği ile mücadelede ve fosil yakıtların çevresel etkilerinin azaltılmasında kilit bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, çevre dostu ve sınırsız potansiyeliyle güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında kritik bir öneme sahiptir. Güneş enerjisi sistemleri (GES), yenilenebilir enerjiye yönelik artan ilginin bir sonucu olarak öne çıkmakta; düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilir yapılarıyla umut vaat eden bir enerji çözümü sunmaktadır (Moudrý vd. 2019). Özellikle, çatıya monte edilen fotovoltaik (PV) sistemler, kentsel alanlarda yenilenebilir enerji potansiyelini artırmak adına önemli bir fırsat sunmaktadır (Devabhaktuni vd. 2013; Gagnon vd. 2016).

Binalar, kentsel çevrenin en önemli unsurlarından biri olarak enerji üretiminde alternatif yapı elemanları olarak değerlendirilmektedir. Günümüzdeki binaların sayısal çokluğu ve yenilenebilir enerji ihtiyacı dikkate alındığında, binaların çatılarına kurulacak Fotovoltaik Enerji Sistemleri, etkili bir yöntem olarak görülmektedir. Ancak, binaların çatılarının güneş enerjisi üretimi için değerli bir kaynak olmasına rağmen çevredeki diğer binalar, ağaçlar, bina yönelimi ve bina çatı üzerindeki yapılar gibi faktörler GES kurulum potansiyelini sınırlayabilmektedir (Boccalatte vd. 2022; Han vd. 2019). GES projeleri, yerel iklim koşulları ve coğrafi özelliklere dayalı detaylı analizler gerektirmekte olup bu analizlerin doğruluğu, PV sistemlerin verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır (Xu vd. 2024).

GES imalatlarının başarılı bir şekilde uygulanması, doğru planlama ve kurulum süreçlerini zorunlu kılmaktadır (Moudrý vd. 2019). Bu süreçlerde geleneksel yöntemlerin yerini yenilikçi teknolojiler almakta; özellikle uzaktan algılama ve fotogrametri teknolojileri, güneş ışığı analizi ve fotovoltaik sistemlerin yerleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Orhun vd. 2012; Gençgönül vd. 2024). Fotogrametri, arazi şekillerinin detaylı şekilde modellenmesi ve güneş panellerinin en uygun şekilde yerleştirilmesi için kritik bir çerçeve sunmaktadır (Hafez vd. 2017; Hachem vd. 2011). Bu teknoloji, bina ve çevresindeki yapıları yüksek çözünürlüklü görsellerle analiz ederek 3B modellerin oluşturulmasını mümkün kılmakta ve bu modeller güneş ışığı analizine entegre edilerek PV panellerin verimli şekilde yerleştirilmesine yardımcı olmaktadır (Zhang vd. 2020; Esposito vd. 2014). İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı fotogrametrik yöntemler, özellikle küçük alanlarda düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli Sayısal Yüzey Modelleri (SYM) oluşturulması açısından yaygın olarak kullanılmaktadır (Bilasco vd. 2022; Yalcin, 2018). Yüksek çözünürlüklü SYM'lerin oluşturulması ve bu modellerin enerji üretimi tahminlerinde kullanılması, planlama süreçlerinin

doğruluğunu artırmıştır. Bununla birlikte, çatı yüzeylerinin karmaşık yapıları ve düzensiz şekilli alanlarının PV panel tasarımı açısından yeterince değerlendirilmediği ifade edilmektedir (Kucuksari vd. 2014; Zhong ve Tong 2020).

PV sistemlerin kurulumu için en uygun alanın belirlenmesinde, öncelikli olarak dikkate alınması gereken kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kriterlerin alan seçimi üzerindeki etkisi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda dünya genelinde yenilenebilir enerji tesisleri için en uygun bölgeleri belirlemeye yönelik çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmış olsa da Türkiye'de bu alandaki çalışmalar sınırlı kalmıştır (Polat & Memduhoğlu, 2024; Çolak vd. 2020).

Çolak vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Türkiye'nin Malatya ilinde güneş PV enerji santrali kurulumu için uygun alanlar, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi kullanılarak belirlenmiştir. Bu süreçte, güneş enerjisi potansiyeli, yollar, enerji iletim hatları, trafo merkezleri, eğim, yön, baraj ve nehirlerin konumu, doğalgaz boru hatları, fay hatları, arazi örtüsü ve yerleşim alanları gibi birçok faktör değerlendirilmiştir. Faktör ağırlıkları, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen veriler doğrultusunda, güneş enerjisi santralleri için en uygun bölgeleri gösteren bir harita oluşturulmuştur.

Polat ve Memduhoğlu (2024) tarafından yapılan çalışmada ise, Şanlıurfa'daki Harran Üniversitesi kampüs alanında binaların çatılarına güneş panellerinin montajı için uygun alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, CBS ve İHA tabanlı bir yöntem benimsenmiştir. İlk olarak, İHA tabanlı SYM kullanılarak Güneş Radyasyonu Potansiyeli hesaplanmış, ardından beş yıllık GES verileriyle doğrulama yapılmıştır. Çatı üzerindeki objeler, panel montaj alanlarının belirlenmesi amacıyla dokusal analiz yöntemiyle segmentlere ayrılmış ve dört farklı sınıf oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar, hesaplanan elektrik potansiyelinin kampüs binalarının yıllık enerji tüketiminin yaklaşık %65'ini karşılayabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Güneş Radyasyonu Potansiyeli hesaplamalarının daha doğru yapılabilmesi için çatı üzerindeki objelerin tespit edilmesi ve teorik değerlerin gerçek verilerle düzeltilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Güneş enerjisi santrallerinin kurulumunda etkili olan kriterleri değerlendiren güncel uluslararası çalışmalar da mevcuttur (Zhong vd. 2022; Jaczewska vd. 2025; Li vd. 2025; Kim vd. 2019). Zhong vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çatı üstü PV sistemlerin enerji potansiyelinin daha doğru tahmin edilmesini sağlayan yeni bir mekânsal optimizasyon modeli önerilmektedir. Geleneksel yöntemler genellikle yalnızca çatı yüzeyindeki

kullanılabilir alanı esas alarak enerji üretimini tahmin ederken, bu model çatı yapısını, panel boyutlarını ve yönelimlerini de göz önünde bulundurarak daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Üç farklı çatı tipine uygulanan analizler, geleneksel yaklaşımların enerji potansiyelini %60'a kadar fazla tahmin edebildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, çatı üstü güneş enerjisi sistemlerinin daha verimli tasarlanmasına ve optimize edilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Jaczevska vd. (2025), İHA görüntüleri ve hava kaynaklı LiDAR nokta bulutları kullanılarak binaların güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik bir metodoloji sunmaktadır. Yöntem; SYM oluşturulması, çatı parametrelerinin belirlenmesi, güneş enerjisi üretiminin haritalandırılması ve uygun olmayan alanların çıkarılması gibi aşamaları içermektedir. Ayrıca, PV panellerin verimliliğini değerlendirmek ve optimizasyon gerektiren alanları belirlemek için derin öğrenme tabanlı bir algılama algoritması geliştirilmiştir. Üniversite kampüsü ve bir köyde yapılan testler, İHA verilerinin güneş potansiyeli haritalarını LiDAR verilerine kıyasla daha yüksek doğrulukla (MAE = 8,5 MWh) ürettiğini göstermiştir.

Li vd. (2025), Bina Entegre Fotovoltaik (BIPV) sistemlerinin tasarımı ve uygulanması için otonom bir karar destek çerçevesi geliştirmiştir. Açık kaynaklı İHA platformu kullanılarak veri toplanmış, derin öğrenme tabanlı modellerle binaların 3B yüzey modelleri oluşturulmuş ve farklı BIPV düzenlerinin ekonomik performansı analiz edilmiştir. Hong Kong'daki bir endüstriyel binada test edilen sistem, güneş ışıını tahmininde %7,6'lık bir fark göstermiştir. Çalışma, sürdürülebilir şehirler için etkili BIPV yerleşim stratejileri sunarak düşük karbonlu yapıların gelişimine katkı sağlamaktadır.

Kim vd. (2019) çalışmada, Kore'nin farklı şehirlerinde yüzer PV sistemlerin potansiyeli değerlendirmiş ve 3401 rezervuar için enerji üretimi tahmin edilmiştir. Yüzer PV sistemlerinin kurulumu için uygun rezervuarların belirlenmesi amacıyla, OpenAPI kullanılarak su derinliği veri tabanı oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Meteorolojik veriler ve topografik bilgiler kullanılarak ışıını dağılımı hesaplanmış, böylece güneş panellerinin optimal yönü ve eğim açısı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, Kore'de güneş panellerinin en uygun yönelimi güney olup, optimal eğim açısı çoğu şehir için yaklaşık 30° olarak tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bilgilerin, yüzer PV kurulumu için ön analiz olarak öncelikler ve potansiyel tahminlerinde kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, PV panellerin kurulumu için en uygun çatı alanlarının

belirlenmesinde çeşitli kriterlerin dikkate alındığı görülmektedir. Bu kriterler arasında, PV panellerin kurulacağı bölgenin Solar Radyasyon Potansiyeli, bina çatılarının kullanılabilir alan büyüklüğü, çatı yüzeylerinin eğimi ve yönelimi ile gölgelenme durumları gibi önemli faktörler öne çıkmaktadır.

Bina çatılarının kullanılabilir alan büyüklüğüne ilişkin literatürde farklı eşik değerler belirlenmiş olup, çalışmalar genellikle 8 ila 30 m<sup>2</sup> arasındaki değerleri temel almaktadır (Palmer vd. 2018; Huang vd. 2015). Bir diğer kritik kriter olan çatı eğimi, PV panellerin verimli bir şekilde konumlandırılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, panel kurulumu için uygun eğim aralığının 20 ila 45 derece arasında değiştiği belirtilmektedir (Kim vd. 2019; Wongwan vd. 2023; Adjiski vd. 2023). Çatı yönelimi de güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanabilmek için dikkate alınması gereken temel parametrelerden biridir. Kuzey yarımkürede gerçekleştirilen çalışmalarda, güneye bakan çatı yüzeylerinin en uygun yönelim olduğu genel kabul görmüştür (Choi ve Suh, 2023; Kim vd. 2019; Moudrý vd. 2019). Bununla birlikte, bazı araştırmalarda yalnızca güney yönü değil, aynı zamanda güneybatı ve güneydoğu yönelimleri de analiz kapsamına alınmıştır (Li vd. 2025; Zhong vd. 2022; Polat ve Memduhoğlu 2024; Adjiski vd. 2023). Ancak, bu çalışmaların sonuçları incelendiğinde, en yüksek verimliliğin yine güney yönelimli çatı yüzeylerinde elde edildiği görülmektedir.

Bu çalışmada, İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü hava görüntüleri kullanılarak, fotogrametrik teknikler yardımıyla Iğdır Üniversitesi yerleşkesindeki bina çatıları 3B olarak modellenmiş ve bu modeller üzerinden çatıların PV Enerji Sistemlerine uygunluğu kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle, araştırma alanındaki binaların en doğru ve detaylı şekilde modellenmesi amacıyla titizlikle bir İHA uçuş planı oluşturulmuş ve belirlenen uçuş parametreleri doğrultusunda veri toplama süreci gerçekleştirilmiştir. İHA tarafından elde edilen hava görüntüleri bilgisayar ortamına aktarılarak fotogrametrik yazılımlar aracılığıyla nokta bulutu, yüzey modeli ve doku kaplamalı 3B bina modelleri oluşturulmuştur.

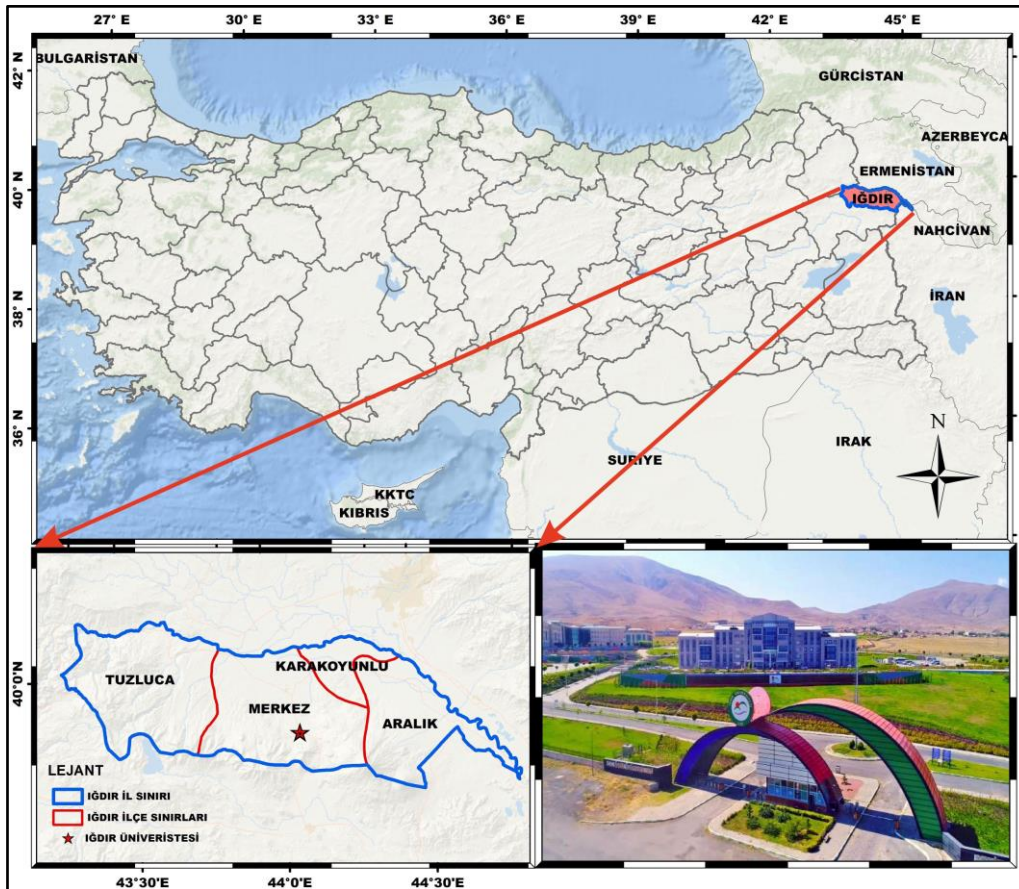
Gerçekleştirilen analizlerde, çatıların Solar Radyasyon Potansiyeli, kullanılabilir yüzey alanı, eğim ve yönelim gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra yapısal engeller de dikkate alınmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, çalışma alanındaki bina çatıları yalnızca 3B nokta bulutu verileri kullanılarak değerlendirilebilmiş ve herhangi bir ek harici veri kaynağına ihtiyaç duyulmadan PV sistemlerine uygunlukları etkin ve doğrulukla tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, Iğdır Üniversitesi yerleşkesindeki kamu binalarında güneş enerjisi sistemlerinin uygulanabilirliğini değerlendirmek adına önemli bir bilimsel temel sunmaktadır. Çalışmanın, Iğdır Üniversitesi'nin Kamu Binalarındaki Enerji Verimliliği Uygulamaları Projesi (KABEV) (URL-1) kapsamında desteklenmesi halinde, elde edilen verilerin detaylı bir fizibilite çalışmasına dönüştürülebileceği öngörülmektedir. Bu doğrultuda, bina çatılarına entegre edilebilecek olası PV sistemleri ile üniversitenin enerji ihtiyacının belirli bir bölümünün güneş enerjisi ile karşılanması mümkün olacak ve böylece sürdürülebilir enerji yönetimi açısından önemli bir katkı sağlanabilecektir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Çalışma Alanı

Iğdır ili, coğrafi konumu ve iklimsel özellikleri bakımından Türkiye'nin diğer bölgelerine kıyasla daha avantajlı bir konumda yer almaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nin en doğusunda bulunan Iğdır, Ermenistan, Azerbaycan (Nahçıvan) ve İran ile sınır komşusudur (Şekil 1). Türkiye'nin en alçak platosu olan Iğdır Ovası'nda yer alması nedeniyle deniz seviyesinden ortalama yüksekliği 850 metre civarındadır. Bu düşük rakım, bölgenin iklimini çevresindeki illere göre daha ılıman hale getirmektedir.



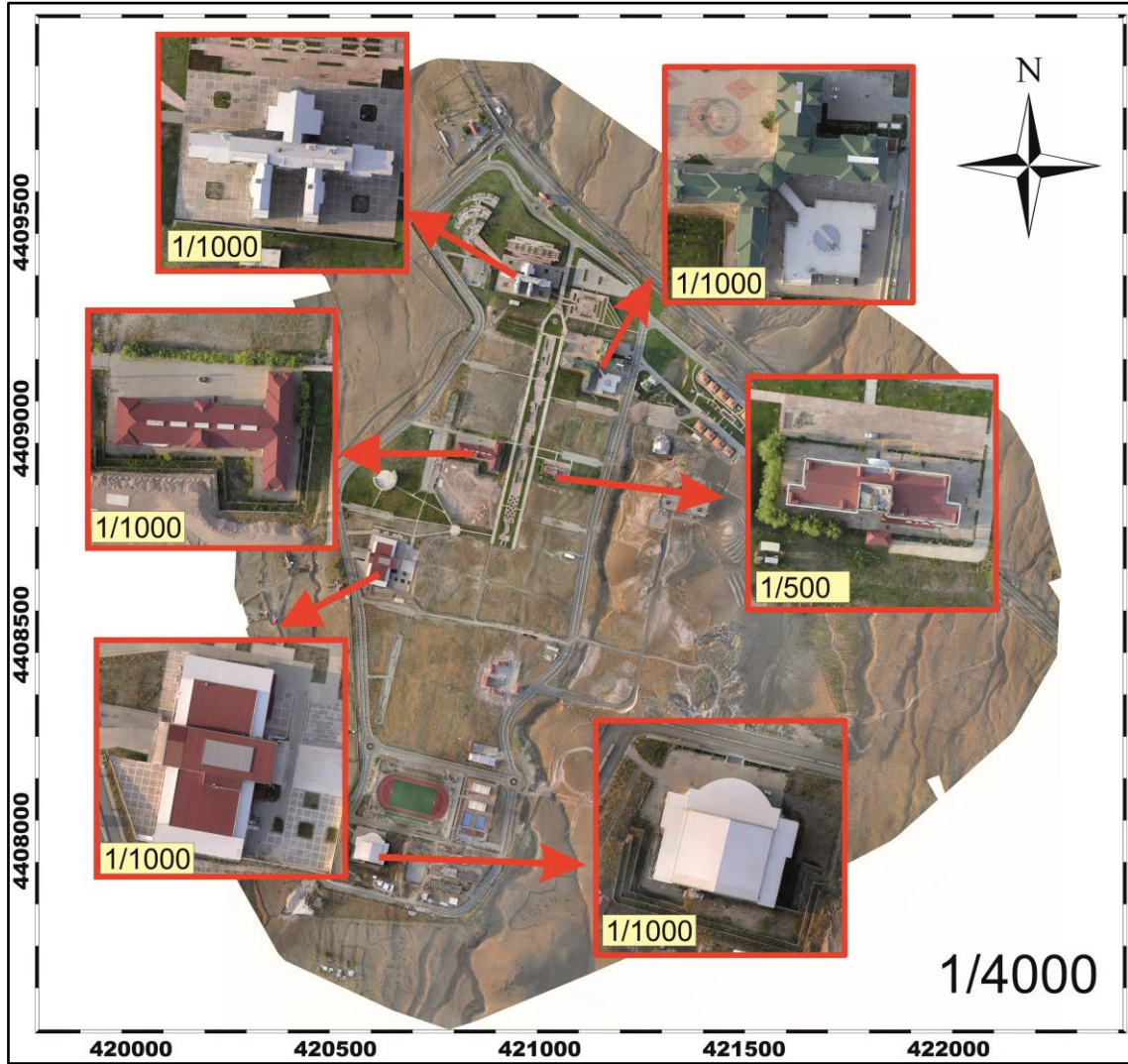
Şekil 1. Iğdır Üniversitesi lokasyon haritası

Iğdır, karasal iklimin etkisinde olmasına rağmen, mikroklima özellikleri gösteren bir bölge olup, çevresindeki yüksek rakımlı illere kıyasla daha uzun güneşlenme süresine ve daha düşük kış şiddetine sahiptir (URL-2). Özellikle Doğu Anadolu Bölgesi'nin büyük bir kısmında uzun süre kalıcı kar örtüsü gözlemlenirken, Iğdır'da bu süre oldukça kısa olup, kar kalıcı sınırı düşük seviyelerdedir. Bu durum, PV sistemler için önemli bir avantaj sağlamakta, kış aylarında dahi güneş enerjisi üretiminin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Mevsimsel değişkenlik açısından değerlendirildiğinde, Iğdır'da yıllık ortalama güneşlenme süresi Türkiye

ortalamasının üzerinde olup, 2.800 saatin üzerindedir. Bu durum, bölgenin güneş enerjisi potansiyelini artırarak, yıl boyunca yüksek verimlilikle elektrik üretimine imkân tanımaktadır. Ayrıca, Iğdır'daki düşük bulutluluk oranı ve nispeten düşük nem seviyeleri, güneş ışınımının PV paneller üzerine daha doğrudan ve etkili bir şekilde ulaşmasını sağlamaktadır. Çalışma alanı olarak, Iğdır Üniversitesi Şehit Bülent Yurtseven Kampüsü sınırları içerisinde yer alan ve farklı mimari özelliklere sahip toplam altı bina seçilmiştir (Şekil 2). Binaların belirlenmesinde, kampüs içerisindeki konumları, yapısal çeşitlilikleri ve PV enerji sistemleri açısından

uygunluklarını etkileyebilecek faktörler dikkate alınmıştır. Özellikle bu binaların seçiminde literatürdeki çalışmalar

doğrultusunda çatı büyüklüklerinin 30 m<sup>2</sup> den büyük olması göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 2. Çalışma alanı içerisindeki mevcut binalar

Arazi yapısı açısından değerlendirildiğinde, Iğdır Üniversitesi kampüsü yaklaşık 300 hektarlık bir alanı kapsamakta olup, kuzey-güney doğrultusunda %10'luk bir eğimle yükselmektedir. Kampüs içerisindeki binaların büyük çoğunluğu, birbirinden belirli mesafelerde konumlandırılmış olup, bu durum gölgelenme etkisinin minimum seviyede olduğunu göstermektedir. Ayrıca kampüs alanında, güneş ışınım potansiyelini olumsuz yönde etkileyebilecek yüksek yapılar veya doğal engellerin bulunmaması, güneş enerjisi uygulamaları açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen binaların büyük ölçüde kuzey-güney ekseninde hizalanmış olması ve çatı eğimlerinin 45 dereceden düşük olması, güneş ışığından maksimum verimlilikle yararlanacak şekilde optimize edildiğini göstermektedir. Bu durum, binaların çatılarına entegre edilecek PV sistemlerin enerji üretim

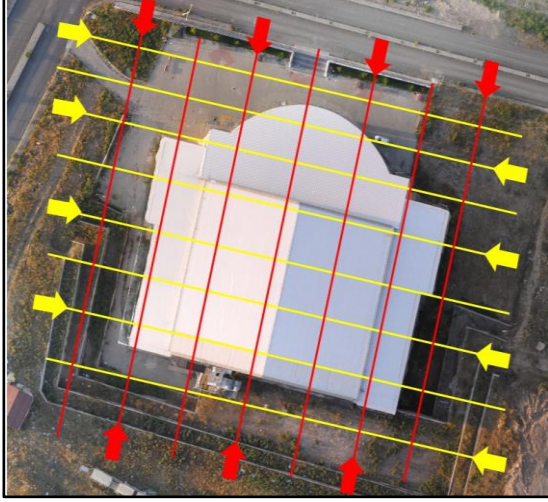
potansiyelini artırma noktasında olumlu bir etken olarak değerlendirilmektedir.

## 2.2 Uçuş Planı

Çalışma kapsamında belirlenen altı binanın 3B modellerinin oluşturulabilmesi amacıyla, her bir bina için özel olarak tasarlanmış uçuş planları hazırlanmıştır. Veri toplama sürecinde, yüksek hassasiyetli konum verisi sağlayabilen DJI Phantom 4 RTK (Real-Time Kinematic) İHA kullanılmıştır.

Uçuş planları, binaların yapısal özellikleri dikkate alınarak tasarlanmış ve ortalama 40 metre irtifada, çok yönlü (multi-oriented) bir uçuş stratejisi benimsenerek uygulanmıştır (Şekil 3). Bu strateji doğrultusunda, öncelikle İHA'nın ortogonal kamera açısında (90°) gerçekleştirdiği çekimler ile bina çatılarının genel görünüşleri elde edilmiştir. Daha sonra, kameranın eğim açısı 60° olacak şekilde ayarlanarak, binaların farklı

yönlerinden ek görüntüler toplanmıştır. Uygulanan bu çok yönlü uçuş tekniği, yapısal detayların daha hassas bir biçimde yakalanmasına ve modelleme doğruluğunun artırılmasına olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, özellikle çatı yüzeyleri ve diğer mimari detayların yüksek doğrulukla modellenmesini sağlamaktadır.



Şekil 3. Çok yönlü uçuş (multi-oriented) örneği

İHA'nın RTK özelliği bulunmakla birlikte, TUSAGA ağına bağlı olarak yaşanabilecek olası bağlantı kopmalarının veri

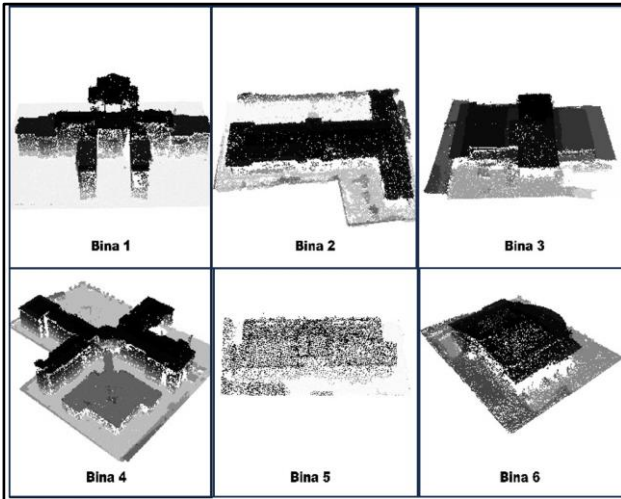
doğruluğu üzerindeki etkilerini minimize etmek amacıyla GNSS cihazı ile PPK (Post-Process Kinematic) yöntemi de uygulanmıştır. Ancak, gerçekleştirilen uçuşlar sonucunda elde edilen görüntülerin konumsal doğruluğu incelendiğinde herhangi bir bağlantı kopması sonucunda oluşan hataya rastlanmamış, bu nedenle PPK süreci görüntülerin dengeleme işlemine dâhil edilmemiştir. Çizelge 1'de, her bir bina için gerçekleştirilen uçuşlara ait detaylı bilgiler ve çekilen görüntülerin bilgileri sunulmaktadır.

### 2.3 Nokta Bulutu Üretimi ve Sınıflandırılması

Gerçekleştirilen uçuşların ardından elde edilen görüntüler, Agisoft Metashape yazılımı kullanılarak işlenmiş ve her bir bina için 3B nokta bulutları üretilmiştir (Şekil 4). Şekil 4'te, her bir binaya ait 3B nokta bulutları, ölçekten bağımsız olarak en iyi şekilde görselleştirilerek sunulmuştur. Görselleştirme sürecinde, binaların yapısal detaylarının en net biçimde algılanmasını sağlamak amacıyla en uygun bakış açıları tercih edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, oluşturulan 3B nokta bulutlarının yalnızca bina yüzeylerini değil, aynı zamanda zemin ve zemin üzerindeki unsurları (bitki örtüsü ve yapılar) da içerdiği gözlemlenmektedir. Bu doğrultuda, analiz sürecinin kritik bir aşamasını, nokta bulutu verileri içerisinde bina detaylarının ayrıştırılması oluşturmaktadır.

Çizelge 1. Uçuş ve görüntü bilgileri

| Bina No | Uçuş Yüksekliği | Yer Örnekleme Aralığı (YÖA) (cm) | Kamera Açısı (°) (Ortogonal/Eğik) | Bindirme Oranları (Enine/Boyuna) | Çekilen Görüntü (Adet) | RMSE (m) |
|---------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------|
| Bina 1  | 40              | 1-1.5                            | 90/60                             | 70/80                            | 972                    | 0.060    |
| Bina 2  | 40              | 1-1.5                            | 90/60                             | 70/80                            | 518                    | 0.024    |
| Bina 3  | 40              | 1-1.5                            | 90/60                             | 70/80                            | 754                    | 0.041    |
| Bina 4  | 40              | 1-1.5                            | 90/60                             | 70/80                            | 1036                   | 0.064    |
| Bina 5  | 35              | 0.9-1.3                          | 90/60                             | 70/80                            | 279                    | 0.051    |
| Bina 6  | 40              | 1-1.5                            | 90/60                             | 70/80                            | 856                    | 0.037    |

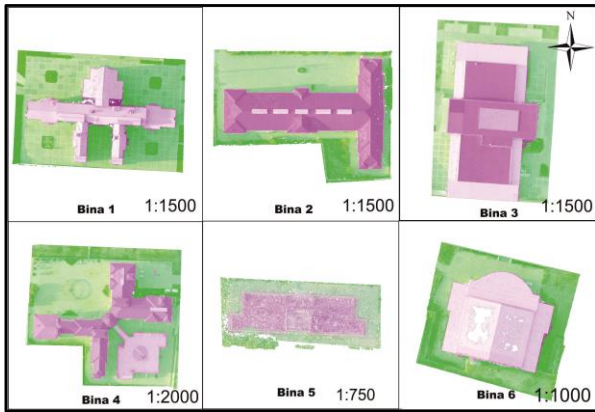


Şekil 4. Binalara ait 3B nokta bulutu verisi

Bu ayrıştırma işlemini gerçekleştirmek amacıyla, yer ve yer üstü nesnelerinin belirlenmesine yönelik Simple Morphological Filter (SMRF) algoritması uygulanmıştır. SMRF algoritması dört temel aşamadan oluşmaktadır (Chen vd. 2021). İlk aşamada, nokta bulutu içerisindeki minimum yüzey tanımlanarak temel bir referans düzlemi oluşturulmuştur. İkinci aşamada, raster veri formatında elde edilen grid hücrelerinin çıplak arazi ya da nesneler içerip içermediği bilgisi, minimum yüzey modeline işlenmiştir. Bu süreçte, minimum yüzeye görüntü açma işlemi uygulanmış; böylece, erozyon ve genişleme işlemleri aracılığıyla yüzeyin daha gerçekçi bir temsili sağlanmıştır. Üçüncü aşamada, gridlenmiş noktalar kullanılarak bir SYM üretilmiştir. Son aşamada ise, orijinal 3B noktalar ile enterpolasyon yöntemiyle elde edilen SYM

verisi ilişkilendirilerek nihai ayrıştırma işlemi tamamlanmıştır. SMRF algoritması, girdiler olarak dört temel parametre kullanmaktadır: MaxWindowRadius, SlopeThreshold, ElevationThreshold ve ElevationScale. Bu çalışmada, ilgili parametreler sırasıyla “20”, “0.005”, “4” ve “1.25” olarak belirlenmiştir.

SMRF algoritmasının uygulanması sonucunda, nokta bulutu verileri temel olarak iki ana sınıfa ayrılmıştır: zemin ve yer üstü (bitki örtüsü ve yapılar). Ancak, yer üstü noktalarının bina ve bitki örtüsü olarak daha ayrıntılı şekilde sınıflandırılabilmesi için, SMRF algoritmasına ek olarak MATLAB ortamında helperClassify fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, nokta bulutu sınıflandırmasında eğrilik (curveThresh) ve yüzey normali (normalThresh) eşik değerlerine dayalı bir yöntem benimsemektedir. Bu yöntemle göre, bir noktanın eğrilik değeri belirlenen eşik değerinin altında ve komşu noktaların yüzey normaleri arasındaki kosinüs benzerliği belirlenen normal eşiğin üzerinde ise, ilgili nokta bina olarak etiketlenmiştir. Belirlenen kriterleri sağlamayan diğer yer üstü noktaları ise bitki örtüsü olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma kapsamında, curveThresh değeri “0.85”, normalThresh değeri ise “0.08” olarak belirlenmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda, nihai nokta bulutu verisi zemin, bina ve bitki örtüsü olmak üzere üç temel sınıfa ayrılmıştır (Şekil 5).



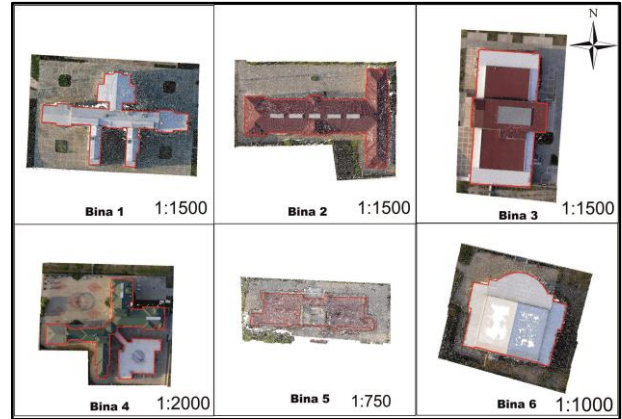
Şekil 5. Sınıflandırılmış 3B nokta bulutu verileri

#### 2.4 Bina Çatı Sınırı Düzgünleştirilmesi

Nokta bulutu verisi, sınıflandırma adımı sonrasında zemin, bina ve bitki örtüsü noktaları olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflandırma sonrasında, bina çatılarına ait detayların daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla yalnızca bina noktaları kullanılarak çatı sınırlarının daha düzenli hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu doğrultuda, Özdemir vd. (2021) tarafından geliştirilen ABORE yöntemi uygulanmıştır.

ABORE yöntemi, belirli açı koşulları ve MATLAB’de yer alan uygun fonksiyonları kullanarak, ortogonal bina çatı

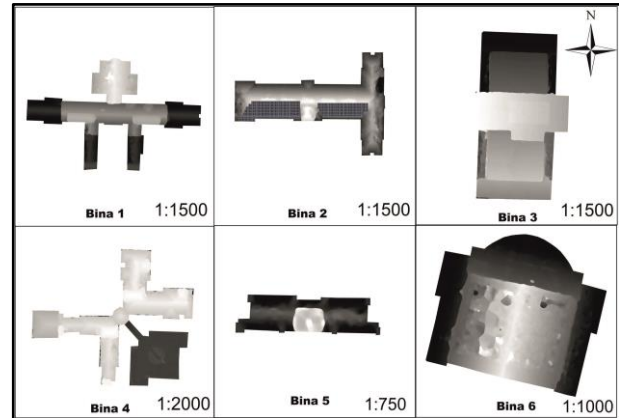
sınırlarını otomatik olarak düzgünleştiren bir algoritma sunmaktadır. Bu sayede, her bir binaya ait çatı sınırları sistematik ve otomatik bir şekilde elde edilerek, geometrik doğruluğu artırılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Düzgünleştirilmiş bina çatı sınırları

#### 2.5 Bakı Analizi

Çalışma kapsamında, bina çatı sınırlarının düzgünleştirilmesinin ardından, bakı analizi gerçekleştirilmiş ve Fotovoltaik Enerji Sistemlerinin en uygun yönelimle konumlandırılabilmesi amacıyla SYM üretilmiştir. Bu süreçte, Agisoft Metashape yazılımı kullanılarak bina çatılarına ait SYM verileri elde edilmiş (Şekil 7) ve QGIS yazılımı aracılığıyla bakı analizi yapılarak her bir çatı yüzeyinin yönelimi belirlenmiştir (Şekil 8).

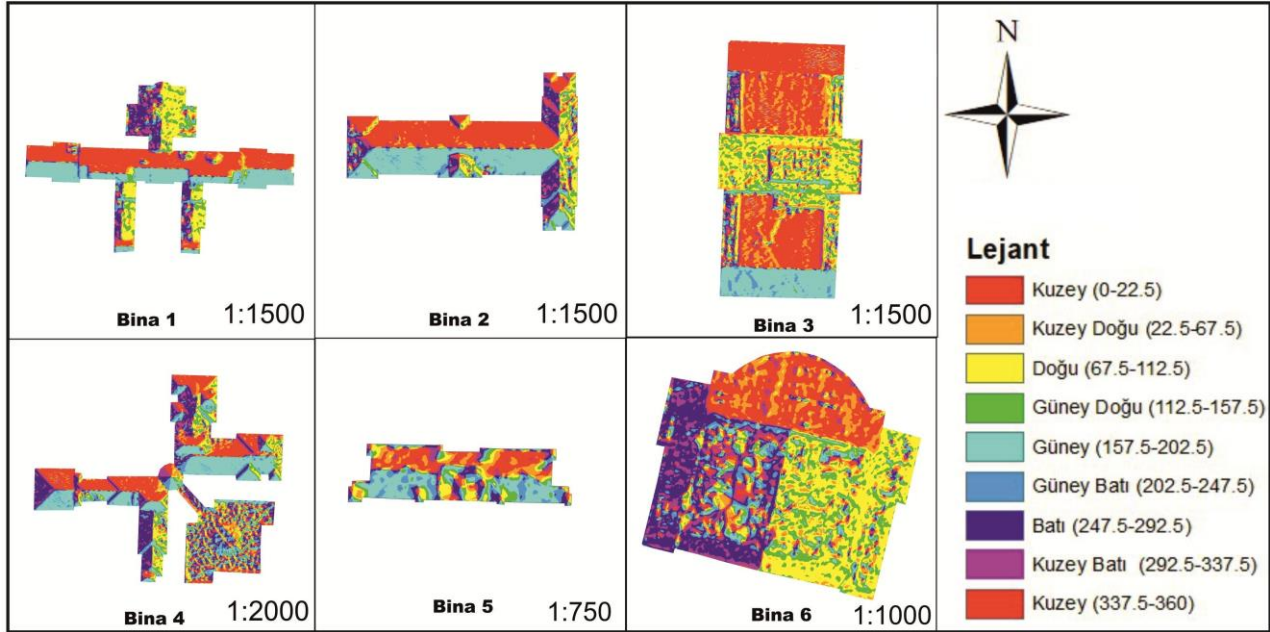


Şekil 7. Bina çatılarına ait SYM verileri

Şekil 8 incelendiğinde, Bina 1-3’ün çatı yüzeylerindeki yönelimlerin belirgin bir şekilde tespit edildiği gözlemlenmektedir. Ancak, Bina 4’ün ek bölümü, Bina 5’in orta kısmı ve Bina 6’nın belirli bölgelerinde yönelimlerin tam olarak belirlenemediği görülmüştür. Yapılan detaylı analizler sonucunda, Bina 4’ün ek kısmının düz bir yüzeye sahip olması nedeniyle eğimin bulunmadığı ve bu durumun bakı analizi aşamasında yönelim tespitinin yapılamamasına neden olduğu belirlenmiştir. Bina 5’in çatı yüzeyinin orta bölümünde yer alan cam malzeme, veri doğruluğunu olumsuz etkileyerek bozulmalara yol açmıştır. Benzer şekilde, Bina 6’nın çatı yüzeyinde

kullanılan beyaz renkli malzeme, güneş ışınlarının yoğun bir şekilde yansımaya neden olmuş ve bu durum, 3B nokta bulutu üretimi sırasında çatı yüzeyinde veri eksikliklerine sebebiyet vermiştir. Söz konusu veri eksiklikleri, SYM üretimini doğrudan etkileyerek bakı

analizinde problemlere yol açmıştır. Bu nedenlerle, Bina 4-6 için PV panellerin yerleştirilme sürecinde ek değerlendirmeler yapılmasının gerekli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Bina çatılarına ait bakı analizi ve yön tespiti

### 3. Bulgular

Bu çalışmada, Iğdır Üniversitesi Şehit Bülent Yurtseven Kampüsü sınırları içerisinde belirlenen altı bina için, İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü hava görüntüleri kullanılarak fotogrametrik teknikler yardımıyla bina çatıları 3B olarak modellenmiş ve bu modeller üzerinden çatıların PV Enerji Sistemlerine uygunluğu analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen analizlerde, çatıların solar radyasyon potansiyeli, kullanılabilir yüzey alanı, eğim ve yönelim gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra yapısal engeller de dikkate alınmıştır. Iğdır'ın coğrafi konumu, arazi yapısı gibi çevresel faktörlere ek olarak, yıllık ortalama güneşlenme süresinin 2.800 saat ile Türkiye ortalamasının üzerinde olması, bölgenin yüksek Solar Radyasyon Potansiyeline sahip olduğu sonucunu desteklemektedir. Çalışma kapsamında her bina için kullanılabilir çatı yüzey alanı belirlenmiş ve bu alanların 30 m<sup>2</sup>'den büyük olduğu, eğimlerinin ise 45 dereceden az olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar doğrultusunda ve çalışma alanındaki binaların genel olarak kuzey-güney ekseninde inşa edilmiş olması nedeniyle, panel kurulumunda en uygun yönelim olarak güney cephe kabul edilmiştir.

Çalışma sürecinde öncelikle İHA ile uçuş gerçekleştirilmiş ve elde edilen görüntüler kullanılarak çalışma alanına ait nokta bulutu ile SYM verileri üretilmiştir. Ardından,

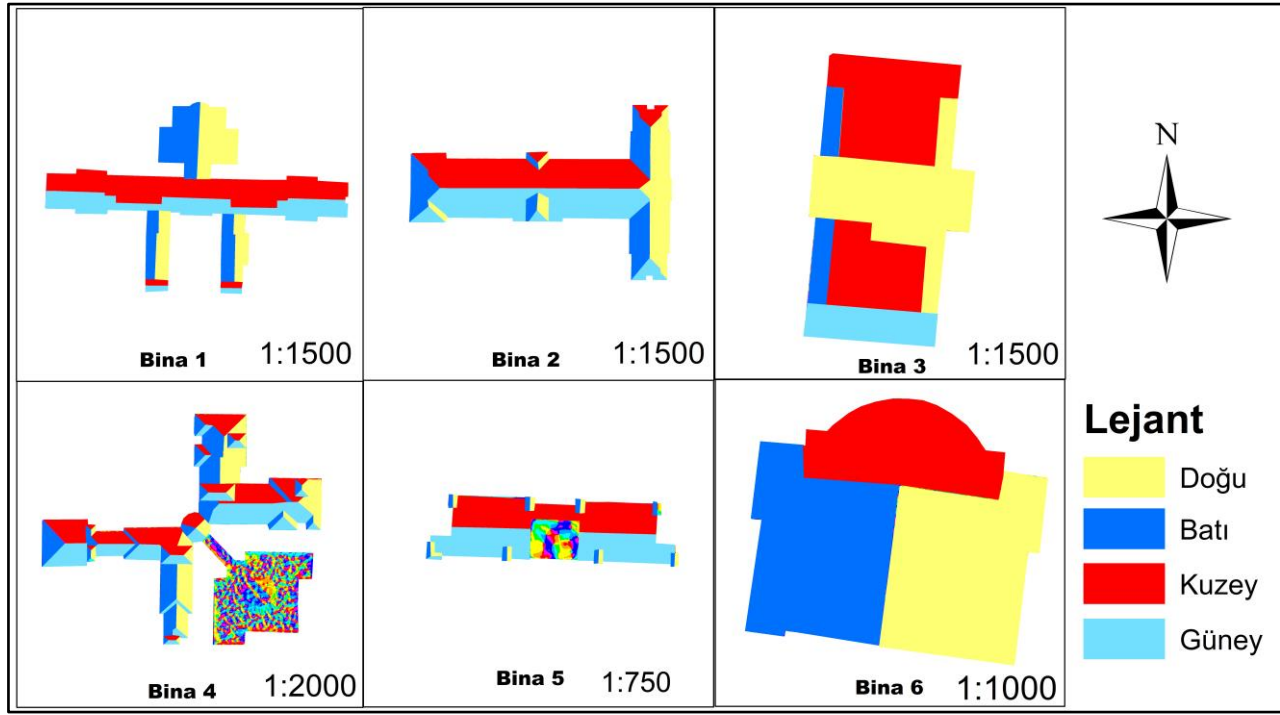
ABORE yöntemi uygulanarak bina çatı sınırları belirlenmiş, bakı analizi gerçekleştirilmiş ve her bir binanın çatı yüzeylerine ait yönelimler tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 2'de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Bakı analizi çatı yönelim alanları

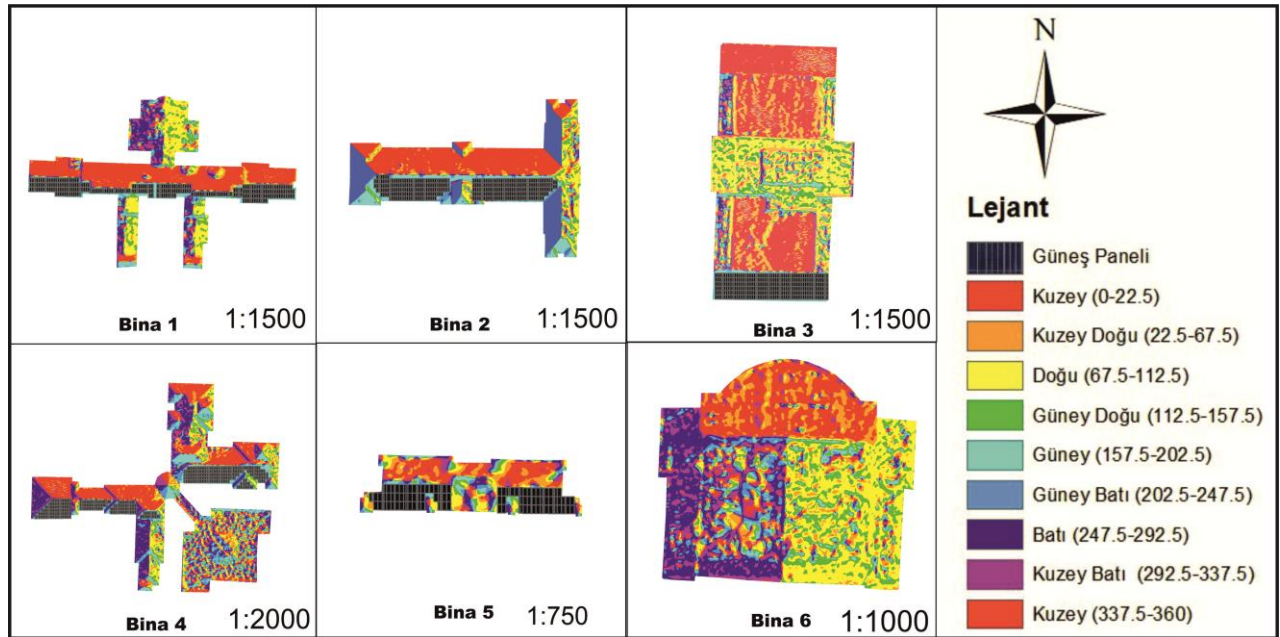
| Bina No | Doğu (m <sup>2</sup> ) | Batı (m <sup>2</sup> ) | Kuzey (m <sup>2</sup> ) | Güney (m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Bina 1  | 707                    | 693                    | 1270                    | 843                     |
| Bina 2  | 575                    | 607                    | 1232                    | 1283                    |
| Bina 3  | 2485                   | 519                    | 3275                    | 792                     |
| Bina 4  | 1069                   | 1321                   | 1535                    | 1517                    |
| Bina 5  | 21                     | 23                     | 236                     | 230                     |
| Bina 6  | 1916                   | 1851                   | 1122                    | ----                    |

Bakı analizi sonrasında, çatı yüzeylerinin yönelimlerini daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla, her yön belirli segmentlere ayrılmış ve bu segmentler görselleştirilerek analiz edilmiştir (Şekil 9). Bu yaklaşım, yönelimlerin daha net bir şekilde anlaşılmasını sağlamakla birlikte, farklı çatı yüzeylerinin güneş ışınımına olan potansiyel etkilerinin detaylı bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Son olarak, güney cephe çatı alanlarının büyüklükleri hesaplanarak, 200×100 cm boyutlarındaki PV panellerin bu alanlara uygunluğu değerlendirilmiş ve her bir çatıya yerleştirilebilecek panel sayıları yapısal engellerde göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Şekil 10). Elde edilen sonuçlar, Çizelge 3'te detaylı şekilde verilmiştir.



Şekil 9. Bakı analizi sonrası çatı yönelim segmentleri



Şekil 10. Fotovoltaik panellerin bina çatılarına yerleştirilmesi

Çizelge 3. Bina çatılarına yerleştirilebilecek Fotovoltaik panel sayıları

| Bina No  | PV Panel Sayısı (200cm*100 cm) | PV Panel Kurulum Alanı (m <sup>2</sup> ) | Bina Çatı Alanı (m <sup>2</sup> ) | PV Panel Kurulum Yüzdesi (%) |
|----------|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Bina 1   | 279                            | 558                                      | 3354.8                            | 16.63                        |
| Bina 2   | 344                            | 688                                      | 3529.7                            | 19.49                        |
| Bina 3   | 318                            | 636                                      | 6705.6                            | 9.48                         |
| Bina 4   | 457                            | 914                                      | 7513.0                            | 12.17                        |
| Bina 5   | 93                             | 186                                      | 564.2                             | 32.97                        |
| Bina 6   | -                              | -                                        | 4829.7                            | 0                            |
| <b>Σ</b> | <b>1491</b>                    | <b>2982</b>                              | <b>26497</b>                      | <b>11.25</b>                 |

Çizelge 3'te, çalışma alanında yer alan altı binanın çatılarına yerleştirilebilecek PV panellerin sayıları ve kapladıkları alanlar detaylı olarak sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, en fazla panel yerleşiminin %32,97'lük oran ile Bina 5'in çatısına gerçekleştirilebildiği belirlenmiştir.

Ancak, Bina 4'ün ek kısmında, yan duvarların yüksek olması nedeniyle gölgelenme etkisinin oluşacağı ve bu durumun panel verimini düşüreceği tespit edilmiştir. Ayrıca, ilgili çatı alanının aktif olarak teras olarak kullanılması, panel yerleşimini fiziksel olarak kısıtlayan bir faktör olmuştur.

Öte yandan, Bina 6'nın baki haritası incelendiğinde, güney yönüne sahip çatı yüzeylerinin bulunmadığı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen kriterler doğrultusunda, güney yöneliminin bulunmaması nedeniyle Bina 6'nın çatısının PV panel kurulumuna uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, Bina 4'ün ek kısmına panellerin yerleştirilmesi veya Bina 6'nın çatısında güney yönü dışında kalan uygun yüzeylere panel kurulumu yapılması yönündeki kararların ilgili otoriteler tarafından değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Genel olarak, Iğdır Üniversitesi Şehit Bülent Yurtseven Kampüsü sınırları içerisinde toplam 26.497 m<sup>2</sup> büyüklüğündeki altı bina çatısı analiz edilmiştir. Yönelim açısından uygun olmasına rağmen çatı yapısından kaynaklanan sınırlamalar nedeniyle kullanılamayan alanlar da göz önünde bulundurulduğunda, toplamda 2.982 m<sup>2</sup>'lik bir alanın PV panel kurulumuna uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda, incelenen toplam çatı alanının %11,25'lik bir kısmının fotovoltaik panel yerleşimi için kullanılabileceği belirlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

İHA kullanılarak elde edilen yüksek çözünürlüklü hava görüntüleri ve fotogrametrik teknikler yardımıyla, Iğdır Üniversitesi kampüsü sınırları içerisindeki bina çatıları 3B olarak modellenmiş ve bu modeller üzerinden çatıların PV Enerji Sistemlerine uygunluğu detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, bina çatı yüzeylerinin eksiksiz bir şekilde modellenmesini sağlamak amacıyla, 40 metre irtifada çok yönlü uçuş planları tasarlanmış ve veri toplama süreci titizlikle yürütülmüştür.

Veri işleme aşamasında, yüksek konumsal doğruluk sağlayan DJI Phantom 4 RTK ile elde edilen görüntüler Agisoft Metashape yazılımında işlenmiş, ardından MATLAB ortamında SMRF algoritması ve yardımcı fonksiyonlar kullanılarak nokta bulutu üç temel sınıfa ayrılmıştır: bina, zemin ve bitki örtüsü. Bina çatı sınırlarının daha düzenli bir şekilde belirlenmesi amacıyla ABORE yöntemi uygulanmış ve böylece çatı yüzeylerinin ortogonal özellikleri korunarak sınırlar otomatik olarak oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen baki analizi sonucunda, bina çatı yüzeylerinin yönelimleri belirlenmiş ve PV panellerin yerleştirilmesi açısından uygun alanlar tespit edilmiştir. Toplam 26.497 m<sup>2</sup> büyüklüğe sahip altı bina çatısında yapılan değerlendirmeler sonucunda, %11,25'ine denk gelen 2.982 m<sup>2</sup>'lik bir alanın PV panel kurulumuna uygun olduğu belirlenmiştir. Bu oran, çatıların güney yönüne uygunluğu ve fiziksel özellikleri

(çıkıntılar, ek yapılar ve gölgeleme faktörleri) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Özellikle güney cephesi bulunmayan veya yapısal engeller içeren çatı yüzeylerinin, PV panel kurulumu için kısıtlı bir uygunluğa sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile kampüs alanındaki binaların Fotovoltaik Enerji Sistemleri entegrasyon potansiyeli ortaya konmuş ve güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanılabilmesi için kapsamlı bir ön analiz sunulmuştur. Elde edilen bulguların, kampüs yapılarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik karar süreçlerine katkı sağlaması ve sürdürülebilir enerji uygulamalarına yönelik önemli bir rehber oluşturması beklenmektedir.

Çalışmanın çıktıları arasında üretilen 3B modeller, nokta bulutları ve ortofotolar gibi çeşitli veri ürünleri yer almakta olup, bu sonuçların Iğdır Üniversitesi'nin gelecekteki projelerinde ve T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Kamu Binalarındaki Enerji Verimliliği Uygulamaları Projesi kapsamında değerlendirilmesi öngörülmektedir. Böylece hem maddi hem de zamansal verimlilik sağlanarak, enerji verimliliği hedeflerine yönelik somut ve uygulanabilir bir adım atılmış olacaktır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir Sahibi, Kaynaklar, Araştırma

Yazar 2: Biçimsel analiz, Yazma, Görselleştirme,

Yazar 3: Proje Yöneticisi, Araştırma, Kaynaklar, Yazma –orijinal taslak

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışmada, 2209-A "Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı" projesindeki veriler kullanılmıştır (Proje Başvuru No: 1919B012308242).

#### 5. Kaynaklar

Adjiski, V., Kaplan, G., & Mijalkovski, S. 2023. Assessment of the solar energy potential of rooftops using LiDAR datasets and GIS based approach. International Journal of Engineering and Geosciences, **8(2)**, 188-199.  
<https://doi.org/10.26833/ijeg.1112274>

- Bilaşco, Ş., Hognogi, G. G., Roşca, S., Pop, A. M., Iuliu, V., Fodorean, I., ... & Sestras, P. 2022. Flash flood risk assessment and mitigation in digital-era governance using unmanned aerial vehicle and GIS spatial analyses case study: Small river basins. *Remote Sensing*, **14**(10), 2481.  
<https://doi.org/10.3390/rs14102481>
- Boccalatte, A., Thebault, M., Ménézo, C., Ramousse, J., & Fossa, M. 2022. Evaluating the impact of urban morphology on rooftop solar radiation: A new city-scale approach based on Geneva GIS data. *Energy and Buildings*, **260**, 111919.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111919>
- Chen, C., Guo, J., Wu, H., Li, Y., & Shi, B. 2021. Performance comparison of filtering algorithms for high-density airborne LiDAR point clouds over complex LandScapes. *Remote Sensing*, **13**(14), 2663.  
<https://doi.org/10.3390/rs13142663>
- Choi, K., & Suh, J. 2023. Fault detection and power loss assessment for rooftop photovoltaics installed in a university campus, by use of UAV-based infrared thermography. *Energies*, **16**(11), 4513.  
<https://doi.org/10.3390/en16114513>
- Colak, H. E., Memisoglu, T., & Gercek, Y. 2020. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable energy*, **149**, 565-576.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>
- Devabhaktuni, V., Alam, M., Depuru, S. S. S. R., Green II, R. C., Nims, D., & Near, C. 2013. Solar energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**, 555-564.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.024>
- Espositoa, S., Fallavollitaa, P., Wahbehb, W., Nardinocchic, C., & Balsia, M. 2014. Performance evaluation of UAV photogrammetric 3D reconstruction. In 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 4788-4791).  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947565>
- Gagnon, P., Margolis, R., Melius, J., Phillips, C., & Elmore, R. 2016. Rooftop solar photovoltaic technical potential in the United States. A detailed assessment (No. NREL/TP-6A20-65298). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).  
<https://doi.org/10.2172/1236153>
- Gençgönül, B. Z., Gençgönül, A. S., & Selbaş, R. 2024. Üniversite Kampüsünde Solar Panel Kullanımının Teknik ve Ekonomik Analizi: ISUBU Örneği. *Afyon Kocatepe University Journal of Science & Engineering/Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **24**(6).  
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.1496446>
- Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. 2011. Investigation of solar potential of housing units in different neighborhood designs. *Energy and Buildings*, **43**(9), 2262-2273.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.008>
- Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. 2017. Tilt and azimuth angles in solar energy applications—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, **77**, 147-168.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.131>
- Han, J., Zhang, L., & Li, Y. 2021. Hotspots, flaws and deficiencies of research on rural energy upgrading: A review. *Energy Strategy Reviews*, **38**, 100766.  
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100766>
- Han, Y., Pan, Y., Zhao, T., Wang, C., & Sun, C. 2019. Use of UAV Photogrammetry to Estimate the Solar Energy Potential of Residential Buildings in Severe Cold Region. In 24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Intelligent and Informed, CAADRIA 2019 (pp. 613-622).  
<https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2019.2.613>
- Huang, Y., Chen, Z., Wu, B., Chen, L., Mao, W., Zhao, F., ... & Yu, B. 2015. Estimating roof solar energy potential in the downtown area using a GPU -accelerated solar radiation model and airborne LiDAR data. *Remote Sensing*, **7**(12), 17212-17233.  
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.10.010>
- Jaczevska, P., Sybilski, H., & Tywonek, M. 2025. Assessment of the Solar Potential of Buildings Based on Photogrammetric Data. *Energies*, **18**(4), 868.  
<https://doi.org/10.3390/en18040868>
- Kim, S. M., Oh, M., & Park, H. D. 2019. Analysis and prioritization of the floating photovoltaic system potential for reservoirs in Korea. *Applied Sciences*, **9**(3), 395.  
<https://doi.org/10.3390/app9030395>
- Kucuksari, S., Khaleghi, A. M., Hamidi, M., Zhang, Y., Szidarovszky, F., Bayraksan, G., & Son, Y. J. 2014. An Integrated GIS, optimization and simulation framework for optimal PV size and location in campus area environments. *Applied Energy*, **113**, 1601-1613.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.002>
- Li, Q., Yang, G., Bian, C., Long, L., Wang, X., Gao, C., ... & Chen, B. M. 2025. Autonomous design framework for deploying building integrated photovoltaics. *Applied Energy*, **377**, 124760.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124760>
- Moudrý, V., Beková, A., & Lagner, O. 2019. Evaluation of a high resolution UAV imagery model for rooftop solar irradiation estimates. *Remote Sensing Letters*, **10**(11), 1077-1085.  
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1649735>
- Orhun, M., Koca, Y. B., Hocaoglu, F. O., & Çınar, S. M. 2012. Farklı Yüzey Açılarındaki Işınım Şiddetlerinin Afyonkarahisar Bölgesi İçin Karşılaştırılması ve Güneş

- Panellerinden Elde Edilebilecek En Yüksek Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Uygun Açıların Tespiti. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **12(2)**, 1-5.
- Ozdemir, E., Karsli, F., Kavzoglu, T., Bahadır, M., & Yagmahan, A. 2022. A novel algorithm for regularization of building footprints using raw LiDAR point clouds. Geocarto International, **37(25)**, 7358-7380.  
<https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1974104>
- Palmer, D., Koumpli, E., Cole, I., Gottschalg, R., & Betts, T. 2018. A GIS-based method for identification of wide area rooftop suitability for minimum size PV systems using LiDAR data and photogrammetry. Energies, **11(12)**, 3506.  
<https://doi.org/10.3390/en11123506>
- Polat, N., & Memduhoğlu, A. 2024. An unmanned aerial vehicle based investigation of roof patch suitability for solar panel installation. International Journal of Engineering and Geosciences, **9 (2)**, 281-291.  
<https://doi.org/10.26833/ijeg.1424400>
- Schlosser, A. D., Szabó, G., Bertalan, L., Varga, Z., Enyedi, P., Szabó, S. 2020. Building Extraction Using Orthophotos and Dense Point Cloud Derived from Visual Band Aerial Imagery Based on Machine Learning and Segmentation. Remote Sensing, **12(15)**, 2397.  
<https://doi.org/10.3390/rs12152397>
- Wongwan, W., Pleerux, N., Thanomsat, N., & Moukomla, S. 2023. Assessment of Solar Rooftop Potential Using a Digital Surface Model Based on a Photogrammetric Survey by an Unmanned Aerial Vehicle. EnvironmentAsia, **16(3)**.  
<https://doi.org/10.14456/ea.2023.36>
- Xu, J., Qi, M., Jing, H., Hancock, C., Qiao, P., & Shen, N. 2024. A real scene 3D Model-Driven sunlight analysis method for complex building roofs. Energy and Buildings, **325**, 115051.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115051>
- Yalcin, E. 2018. Generation of high-resolution digital surface models for urban flood modelling using UAV imagery. WIT transactions on ecology and the environment, WIT Press. Lightning Source, UK, Great Britain, 357-366.  
<https://dx.doi.org/10.2495/EID180321>
- Zhang, X., Zhao, P., Hu, Q., Ai, M., Hu, D., & Li, J. 2020. A UAV-based panoramic oblique photogrammetry (POP) approach using spherical projection. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **159**, 198-219.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.016>
- Zhong, Q., & Tong, D. 2020. Spatial layout optimization for solar photovoltaic (PV) panel installation. Renewable energy, **150**, 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.099>
- Zhong, Q., Nelson, J. R., Tong, D., & Grubestic, T. H. 2022. A spatial optimization approach to increase the accuracy of rooftop solar energy assessments. Applied Energy, **316**, 119128.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119128>

#### İnternet Kaynakları

- URL- 1 Kamu Binalarındaki Enerji Verimliliği Uygulamaları Projesi (KABEV), <https://www.kabev.org/> (12.01.2025)
- URL- 2 Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmi İklim İstatistikleri, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H&m=IGDIR> (12.03.2025)