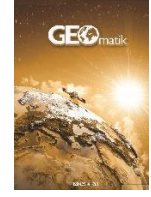




Geomatik

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/geomatik>

e-ISSN 2564-6761



Kentsel alanlarda ağaç yükseklik bilgilerinin ICESat-2/ATLAS ve İHA verilerinden elde edilmesi

Müge Ağca ¹, Efdal Kaya ², Ali İhsan Daloğlu ³, Aslıhan Yücel ⁴, Sercan Yalçinkaya ⁵

^{1,4,5} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, mugekaan@gmail.com; aslihanhannucel@gmail.com; sercan@geocode.com.tr

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Hatay, Türkiye, kayaefdal@gmail.com

³ PVI Elektrik Otomasyon Sanayi Ticaret Ltd. Şti., Ankara, Türkiye, alihsan.daloglu35@gmail.com

Kaynak Göster: Ağca, M., Kaya, E., Daloğlu, A. İ., Yücel, A., & Yalçinkaya, S. (2024). Kentsel alanlarda ağaç yükseklik bilgilerinin ICESat-2/ATLAS ve İHA verilerinden elde edilmesi. *Geomatik*, 9 (1), 86-96

<https://doi.org/10.29128/geomatik.1384320>

Anahtar Kelimeler

İHA
ICESat-2/ATLAS
Ağaç Yükseklik
Lazer
Foton

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.11.2023
Revize: 27.11.2023
Kabul: 30.11.2023
Yayınlanma: 05.02.2024



Öz

Günümüzde nüfusun artması ile birlikte kentsel alanlar hızlı bir şekilde büyümektedir. Kentsel alanlardaki ağaçların belirlenmesi ve yükseklik bilgilerinin elde edilmesi karbon salınımlarının belirlenmesi, gölge, hava kirliliği gibi birçok disiplin tarafından önemsenen çalışmalar için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmanın genel amacı İnsansız Hava Aracı ve uzaysal ICESat-2/ATLAS sistemlerinden elde edilen veriler kullanılarak kentsel alanlarda ağaç yüksekliklerinin belirlenmesidir. Çalışma alanı olarak İzmir ilinin Balçova ilçesi seçilmiştir. Çalışmada ileri teknolojilerden elde edilen veriler arazide yerinde toplanan veriler ile karşılaştırılmıştır. Kentsel alanda ICESat-2 sisteminden elde edilen yükseklik bilgilerinin doğruluğu RMSE, MSE, MAE, ME, R², Pearson korelasyon katsayısı, Spearman korelasyon katsayısı ve Kendall korelasyon katsayıları hesaplanarak nicel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışma alanına ait yüksek kalite ve doğrulukta topografik veriler ve ortofoto oluşturulmuştur. Sonuç olarak, yapılan tüm istatistiksel analizler değerlendirildiğinde hem ICESat-2/ATLAS verilerinin (R²: 0.97) hem de İHA verilerinin (R²: 0.98) kentsel alanlarda ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada ülkemizde henüz çok yeni bir veri seti olan ICESat-2/ATLAS verilerinin ağaç yükseklik bilgilerinin çıkarılmasındaki performansı analiz edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ileride yapılacak olan benzer çalışmalara altlık olacak niteliktedir.

Obtaining tree height information in urban areas from ICESat-2/ATLAS and UAV data

Keywords

UAV
ICESat-2/ATLAS
Tree Height
Laser
Photon

Research Article

Received: 01.11.2023
Revised: 27.11.2023
Accepted: 30.11.2023
Published: 05.02.2024

Abstract

Nowadays, urban areas are growing rapidly with the increase in population. Identifying trees and obtaining height information in urban areas is of great importance for studies that are important in many disciplines, such as determining carbon emissions, shadow and air pollution. The general purpose of this study is to determine tree heights in urban areas using data obtained from Unmanned Aerial Vehicle and spaceborne ICESat-2/ATLAS systems. Balçova district of İzmir province was chosen as the study area. In the study, data obtained from advanced technologies were compared with data collected on-site in the field. The accuracy of the elevation information obtained from the ICESat-2 system in the urban area was evaluated quantitatively by calculating RMSE, MSE, MAE, ME, R², Pearson correlation coefficient, Spearman correlation coefficient and Kendall correlation coefficients. In addition, high quality and accurate topographic data and orthophotos of the study area were created. As a result, when all statistical analyzes were evaluated, it was seen that both ICESat-2/ATLAS data (R²: 0.97) and UAV data (R²: 0.98) gave successful results in determining tree heights in urban areas. In this study, the performance of ICESat-2/ATLAS data, which is a very new data set in our country, in extracting tree height information was analyzed. The results obtained from the study will serve as a basis for similar studies to be conducted in the future.

1. Giriş

Günümüzde şehir alanlarının büyümesi ve gelişmesi ile birlikte, kentsel alanlar dünyada önemli bir küresel etkiye sahip olmuştur. Şehir alanlarının büyümesi insanlığa yararlı koşulları sağlamanın yanında zararlı birçok etkiye de neden olmaktadır. Yerleşim yerlerindeki ağaçların belirlenmesi ve yükseklik bilgilerinin elde edilmesi yerleşim yerlerindeki planlama, gürültü ve çevre kirliliğinin filtrelenmesi, gölge, iklim düzenlemesi ve yönetim faaliyetlerinin takip edilmesi bakımından oldukça önemlidir (Dirik ve ark., 2014; Qin ve ark., 2022).

Günümüzde ağaç tespiti ve yükseklik bilgilerinin elde edilmesi için hava fotoğrafları, uydu görüntüleri, havasal (Hao ve ark., 2023; Mielcarek ve ark., 2018; Alexander ve ark., 2018) ve yersel lazer sistemleri (Montoya ve ark., 2023; Anderson ve ark., 2021) gibi farklı uzaktan algılama ve fotogrametrik yöntemler kullanılmaktadır. Özellikle son dönemlerde kullanım alanı gittikçe artan İnsansız Hava Araçları (İHA) birçok disiplin tarafından kullanılmaktadır. Bu sistemlerden elde edilen hava fotoğrafları değerlendirilerek bölge ile ilgili detaylı yüzey ve yükseklik modeli bilgileri elde edilebilmektedir. İHA sistemleri, düşük maliyetli, hızlı, hassas ve tekrarlı ölçü elde etme özelliklerinden dolayı birçok yersel ölçüm çalışmalarında kullanılmaktadır (Ağca ve ark., 2020). Bu sistemlerin bilimsel çalışmalara olan katkısı kendini kanıtlamış durumdadır. Bu sistemler ile 2B ve 3B modeller (Barazzetti ve ark., 2010; Fiorillo ve ark., 2015; Kohoutek ve Eisenbeiss 2012; Yılmaz ve ark., 2022; Neitzel ve Klonowski 2012), bina yükseklik tayinleri (Abdullah ve ark., 2021; Noor ve ark., 2019; Gruen ve ark., 2013) ve topografik haritalama (Manyoky ve ark., 2012; Konolige ve Agrawal 2008; Remondino ve ark., 2012) gibi çalışmalar yapılmıştır. Daha spesifik olarak İHA sistemleri tarım (Grenzdörffer ve ark., 2008; Kaya ve Polat, 2023; Zarco-Tejada ve ark., 2013), afet sonrası değerlendirme (Bendea ve ark., 2008; Najatishendi ve ark., 2022; Chou ve ark., 2010), arama kurtarma çalışmaları (Molina ve ark., 2012), arkeolojik araştırmalar (Chiabrando ve ark., 2011; Fiorillo ve ark., 2015; Oczipka ve ark., 2009; Rinaudo ve ark., 2012), bitki örtüsü analizleri ve ağaç yüksekliklerinin belirlenmesi (Berni ve ark., 2009a; Nofrizal ve ark., 2022; Berni ve ark., 2009b; Durgun ve ark., 2022; Saliu ve ark., 2021) gibi çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

ICESat-2/ATLAS (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite/Geoscience Laser Altimeter System/Advanced Topographic Laser Altimeter System) uydusu NASA tarafından geliştirilerek 15 Eylül 2018'de yörüngeye fırlatılmıştır. Bu sistem dünya üzerinde yoğun bir gözlem ağına ve çoklu foton sayma teknolojisine sahip ilk uzay tabanlı lidar cihazıdır (Narine ve ark., 2019a; Neuenschwander ve Magruder, 2019). ICESat-2/ATLAS sistemi dağ buzulu ve buz tabakalarındaki yükseklik değişimlerinin izlenmesi, arazi ve bitki örtüsü yükseklikleri, deniz yüzeyi yükseklikleri ve bulut katmanları hakkında bilgi sağlamaktadır. ICESat-2/ATLAS sisteminden elde edilen veriler, ormanlık alanlarda (Neuenschwander and Magruder, 2019; Narine ve ark., 2019a; Narine ve ark., 2019b; Narine ve ark., 2020) geoid yüksekliklerinin belirlenmesinde (Agca ve Daloglu, 2023), göllerde (Zhang ve ark., 2019),

denizlerde (Ma ve ark., 2020; Pang ve ark., 2022), volkanik faaliyetlerin incelenmesi (Simurda ve ark., 2022) ve zemin tespiti (Xing ve ark., 2020) gibi çeşitli çalışma alanlarında kullanılmıştır. ICESat-2/ATLAS verisinin yeni olması nedeniyle ağaç yüksekliği ile ilgili literatürde oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır. Qin ve ark., 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada nesne tabanlı bir model geliştirerek ICESat-2 verilerini ve GF-2 görüntülerini entegre etmişler ve geliştirdikleri modeli kullanarak şehir ağaçlarının karbon stoğunu ve ağaç yüksekliklerini tahmin etmişlerdir. Zang ve ark., 2023 yılında yapmış oldukları çalışmada Malakka Yarımadası'ndaki yıllık palmiye yüksekliklerini belirlemek için ICESat-2 ve meşcere yaşı verilerini birleştiren mekansal olarak açıklayıcı haritalama yöntemlerini incelemişlerdir. Da Cunha Neto ve ark., 2021 yılında yaptıkları çalışmada UAV-LiDAR sisteminin Araucaria angustifolia ağaçlarının bireysel ağaç yüksekliklerini türetme potansiyeli değerlendirmişler ve ağaç yüksekliklerini türetirken nokta yoğunluğunun etkisini değerlendirmişlerdir. Yapılan analizler incelendiğinde literatürdeki bu tür çalışmalarda ICESat-2/ATLAS ve İHA verilerinin performanslarının karşılaştırılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada ICESat-2/ATLAS verilerinin ağaç yükseklik bilgilerinin elde edilmesindeki performansı değerlendirilmiştir. ICESat-2/ATLAS sisteminden elde edilen veriler yükseklik tayininde sıkça kullanılan İHA sistemlerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Fotogrametrik lazer sistemlerinden ve hava fotoğraflarından elde edilen yükseklik bilgilerinin doğruluğu yersel ölçümler ile test edilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda ICESat-2/ATLAS verilerinin ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde yersel LİDAR, havasal LİDAR ve uydu görüntülerine alternatif veri olma potansiyeline sahip olduğu saptanmıştır.

2. Çalışma alanı

İzmir ili, Balçova ilçesi çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). Çalışma alanı İzmir Körfezi'nin güneyinde, 38°23'32" kuzey enlemi ve 27°2'47" doğu boylamında yer almaktadır. Deniz seviyesine göre yüksekliği ise 27 metredir. Yaklaşık 30 hektarlık bu alanda yoğun bir kentsel yapılaşma gözlemlenmektedir. Bu alan içerisinde yüksek katlı binalar belirgin bir yoğunluğa sahipken, ağaç popülasyonunun yoğunluğu ise daha düşüktür. Ayrıca, alan içerisinde park alanları ve kapsamlı yol ağları gibi çeşitli kullanım alanları da bulunmaktadır.

3. Yöntem

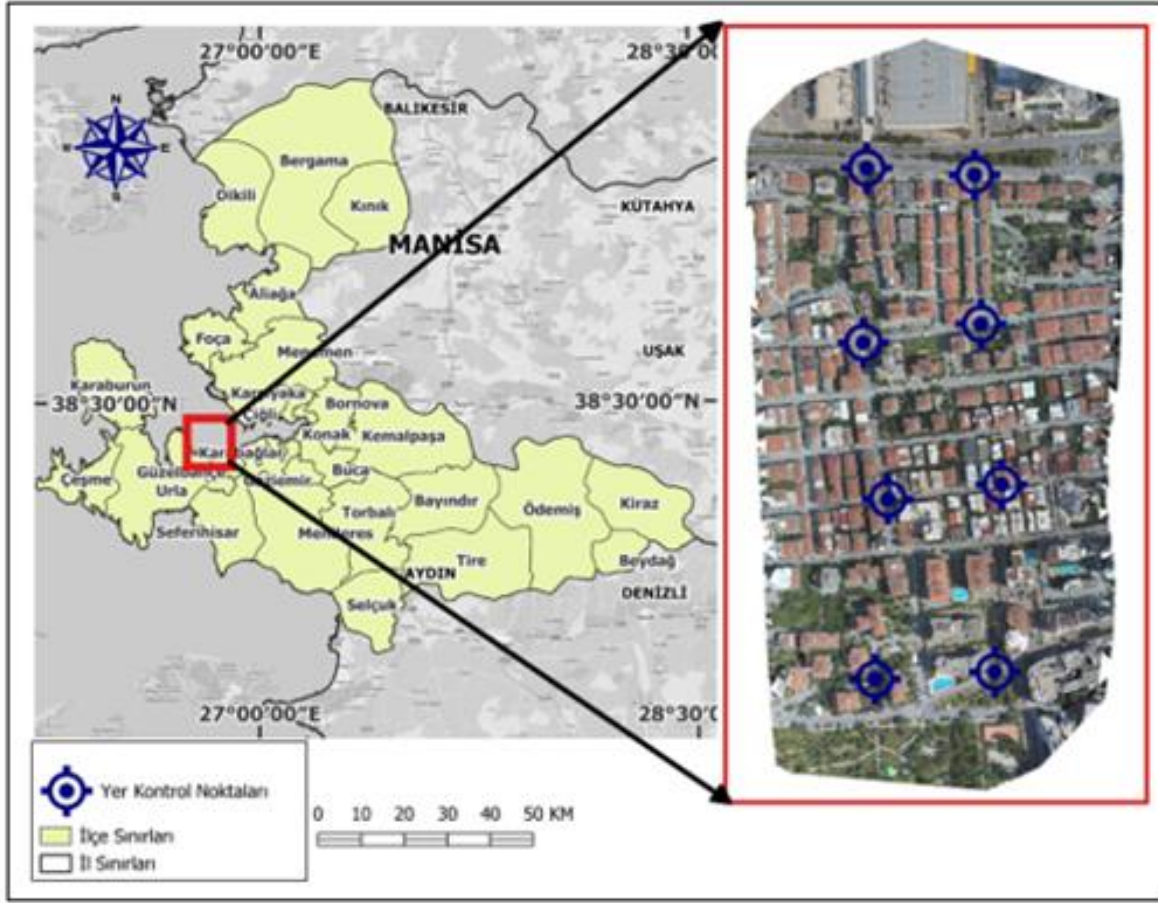
Bu çalışmada yersel, İHA ve ICESat-2/ATLAS verileri olmak üzere toplam üç farklı veri seti kullanılmıştır.

3.1. Arazi verileri ve veri analizi

Çalışma alanımız oldukça yoğun kentleşmenin olduğu bir alanı içermektedir. Üretilen ortofoto sayısallaştırılmış ve alanda toplam yaklaşık 150 adet binanın 50 adet ağacın olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanında olgunlaşmış kızılçam, karaçam, selvi ve palmiye ağaçları bulunmaktadır. Analizlerde toplam 22 adet ağaç

kullanılmıştır. Bunun nedeni ICESat-2 sistemlerinden elde edilen veriler ile sayısallaştırma sonucunda elde edilen ağaç verileri içerisinde çakışan tekil ağaç sayısı 22

adettir. Ağaç yüksekliklerinin elde edilmesinde Bosch DLE 50 dijital lazer ölçme aleti kullanılmıştır. Kullanılan cihazın teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı ve yer kontrol noktalarının dağılımı.

Tablo 1. Bosch DLE 50 dijital lazer ölçme aleti teknik özellikleri.

Ölçüm Aralığı	0.05-50 m
Ölçüm Hassasiyeti	
— Tipik	±1.5 mm
— Maksimum	±3 mm
Ölçüm Süresi	
— Tipik	<0.5 s
— Maksimum	4 s
Lazer Sınıfı	2
Lazer Tipi	635 nm, <1mW
Lazer Işın Çapı (25 C°'de), yaklaşık	
— 10 m mesafede	6 mm
— 50 m mesafede	30 mm

Arazi çalışmalarında her bir ağacın bulunduğu noktanın TOPCON GR5 marka Global Positioning System (GPS) aleti ile X, Y ve Z koordinat bilgileri elde edilmiştir. Konumları belirlenen her bir ağacın yükseklik ölçümü dijital lazer metre ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler ağacın iz düşüm noktasından alınmış olup havanın çok aydınlık olmadığı vakitlerde yapılmasına özen gösterilmiştir. Araziye elde edilen yükseklik ölçümleri İHA ve ICESat-2 sistemlerinden elde edilen ağaç yükseklik bilgilerinin test edilmesinde kullanılmıştır.

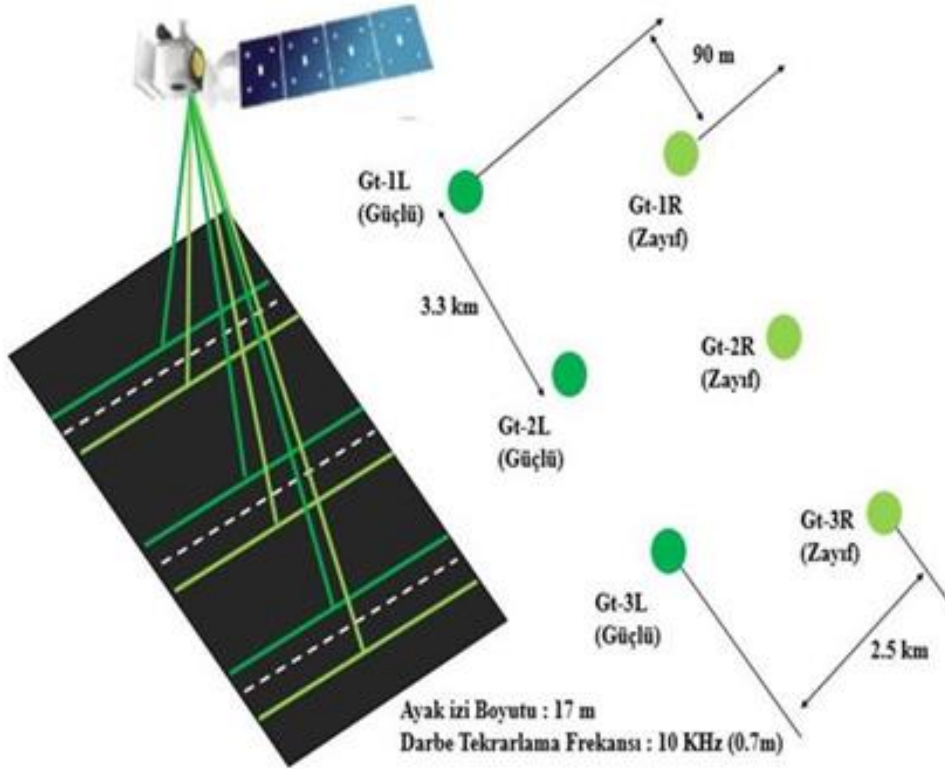
3.2. ICESat-2/ATLAS verileri ve veri analizi

ICESat-2, Dünya üzerindeki buzulları, ormanları, gölleri, kentsel alanları ve daha fazlasını kapsayan tüm yüzeylerden yükseklik bilgisi toplamak için üretilen uzay tabanlı bir lidar sistemidir (Nie ve ark., 2018; Narine ve ark., 2009). ICESat-2 uydusuna monte edilmiş olan ATLAS sistemi, 532 nm dalga boyunda 10 kHz lazer tekrarlama hızı ile çalışan bir foton sayma sistemidir. ATLAS cihazının sahip olduğu tekli foton sayma

teknolojisi, mekânsal çözünürlüklerin daha iyi, örnekleme sıklığının daha fazla olmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla yeryüzüne ait bilgiler daha detaylı olarak toplanmaktadır (Markus ve ark., 2017; Ağca, 2020).

ICESAT-2/ATLAS sistemi yeryüzüne saniyede 10,000 foton darbesi göndermektedir (<https://nsidc.org/data/icesat-2>). ICESat-2/ATLAS sisteminden yeryüzüne gönderilen lazer ışınları birbirine 3.3 km uzaklıkta olup üç çift ışın hattından oluşmaktadır. Her bir çift lazer ışını, kendi içinde 90 m mesafedir (Şekil 2). Ayrıca her ışın 17m çapında bir ayak izine ve 0.7m örnekleme aralığına sahiptir (Narine

ve ark., 2019a; Neuenschwander ve Magruder, 2019; Narine ve ark., 2020). Saniyede yeryüzüne gönderilen lazer ışın sayısı ve örnekleme aralığı dikkate alındığı zaman çalışma alanımıza ait yoğun bir veri seti bulunmaktadır. Güçlü ışın hattı üzerinde arka arkaya gönderilen güçlü ışınlar arasındaki mesafe 70 santimetredir. Sonuç olarak, o hat üzerinde detaylı bir profil verisi elde edilebilmektedir. Çalışma alanı üzerine düşen tüm ICESat-2/ATLAS veri setleri irdelenmiş, her bir hattın profili çıkarılmış ve o hat üzerindeki ağaçlar tespit edilmiştir. Tespit edilen ağaçlar üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. ICESat-2/ATLAS foton verileri ve ayak izlerinden bir görünüm.

Güçlü ışın hatları zayıf ışın hatlarına göre 4 kat daha fazla etki sağlamaktadır (Neuenschwander ve Magruder, 2019; Markus ve ark., 2017; Narine ve ark., 2020). ATLAS cihazı tarafından gönderilen her bir fotonun seyahat süresi, uydunun durumu ve çarpıp yansıdığı yüzeyin bilgisi ile birleştiğinde yeryüzü ile ilgili konum (X, Y, Z) ve zaman (t) bilgisi sunmaktadır. Toplanan tüm veriler, tek bir kaynak olan Global Coğrafi Konumlu Foton Veri (ATL03) setinde toplanacak şekilde tasarlanmıştır. ATL03 veri seti uzay aracı ile ilgili bilgiler, sistem parametreleri ile ilgili bilgiler, yardımcı veriler ve arazi konum bilgilerini içeren foton verilerini içerisinde bulundurmaktadır. ICESat-2/ATLAS sistemi veri üretimine başladığı ilk günden bu zamana kadar kullanıcılara farklı sürümlerde veri setleri sunmuştur. Mevcut sistem hala gelişim sürecinde olduğu için elde edilen verilerin sürümleri de bu gelişim süreci içerisinde. İndirilen ATL03 veri seti "Global Coğrafi Konumlu Foton verileri" olarak adlandırılmıştır. Bu veri seti uzay aracı ile ilgili bilgiler, sistem parametreleri ile

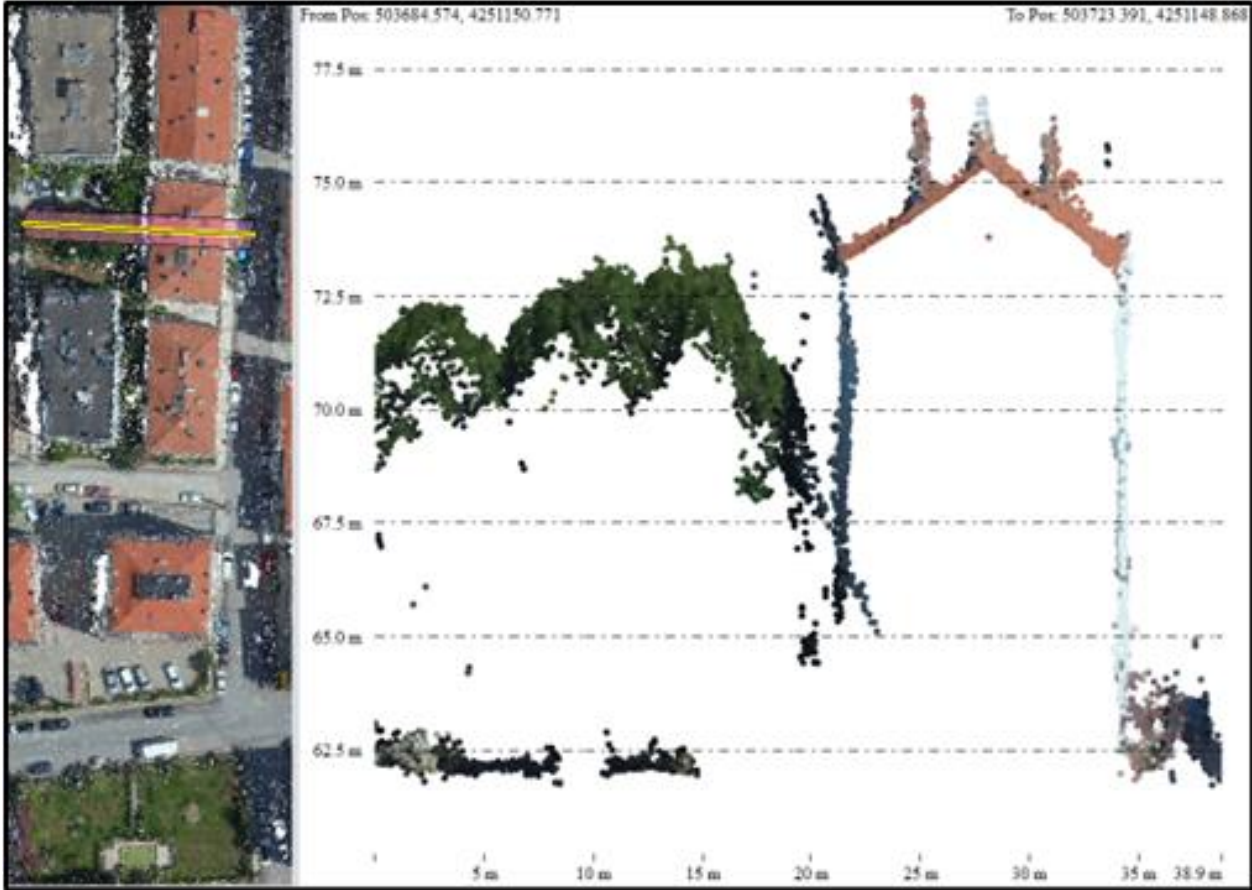
ilgili bilgiler, yardımcı veriler ve arazi konum bilgilerini içermektedir.

Çalışma kapsamında ICESat-2/ATLAS sistemi tarafından kullanıma sunulan 21 adet veri seti içinden çalışmamızın amacına uygun olan ATL03 ve ATL08 ICESat-2/ATLAS veri setleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setlerinin tümü filtrelenmiş, temizlenmiş, sadece sinyal fotonları seçilmiş ve çalışma alanımıza uygun olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setleri OPENALTIMETRY (Advanced Discovery, Processing, and Visualization Services for ICESat and ICESat-2 Altimeter Data) websitesinden (.csv) ve (.hdf5, H5) formatlarında indirilmiştir. İndirilen ATL03 ve ATL08 veri setlerinin kullanılabilmesi için tek bir veri setinin oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle ATL03 ve ATL08 veri setleri Python v3.8 yazılımı kullanılarak birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Bu işlem her bir ATL08 fotonuna ait kentsel alan bilgilerinin, ATL03 foton sınıflandırma parametreleri içerisindeki karşılıkları bulunarak yapılmıştır. Sonuç olarak çalışma alanındaki

her bir fotona ait yatay ve düşey konum (enlem, boylam, elipsoid yükseklik), zaman, sinyal güvenilirliği (0=Gürültü, 1=Arka plan, 2=Düşük, 3= Orta, 4= Yüksek) ve foton sınıf (zemin=1, kanopi= 2, kanopi tepesi=3) bilgileri elde edilmiştir. Çalışmanın amacı doğrultusunda kullanılacak olan veri setindeki fotonların sınıflarının zemin ve kanopi tepesinden olmasına, güvenilirlik seviyelerinin ise yüksek olmasına dikkat edilmiştir. Bunun için ilişkilendirilmiş veri setine PhoReal yazılımı yardımıyla filtreleme işlemi uygulanmıştır. Tüm bu

işlemler, ICESat-2 sisteminin güçlü (gt-2r) ve zayıf (gt-2l) lazer ışınları için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

PhoReal yazılımında ICESat-2 verileri analiz edildikten sonra .csv uzantılı olarak kaydedilmiştir. Noktalara ait konumsal bilgiler kullanılarak QGIS içerisinde .csv verileri aktarılmıştır. İHA sistemlerinden elde edilen nokta bulutu üzerine ICESat-2'den elde edilen nokta dosyaları eklenmiştir. ICESat-2/ATLAS'ın çalışma alanı içerisinde düştüğü yerdeki zemin ve tepe yükseklik bilgileri nokta dosyaları ile nokta bulutu üzerinden profil çizilerek ağaç yükseklik bilgileri elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışma alanımız içerisinde yer alan veriler üzerinde profil çizilerek yükseklik bilgilerinin toplanması.

3.3. İHA verileri ve veri analizi

Bu çalışmada Yuneec H520 model İHA sistemi ile 100 m irtifada 90° kamera açısı ile %80 ileri ve %60 yan bindirme oranları kullanılarak toplam 82 adet hava fotoğrafı çekilmiştir. İHA sistemine entegre E90 kameradan 20 megapiksel çözünürlükte yüksek kalitede veriler elde edilebilmektedir. Veriler yaklaşık 30 hektarlık bir alanda toplanmıştır. Toplamda sekiz adet yer kontrol noktası (YKN) kullanılmıştır. Pix4D yazılımı kullanılarak 8 adet YKN, fotoğraflar ile eşleştirilmiş ve konumlandırılmıştır. YKN'lerin çalışma alanı üzerindeki dağılımları Şekil 1'de gösterilmiştir. Noktaların program tarafından hesaplanan değerleri ile girilen değer arasındaki farklar kullanılarak elde edilen toplam hata miktarları hesaplanmıştır. Üretilen verinin kök ortalama kare hataları (RMSE) Tablo 2'de verilmiştir. İHA ile elde edilen görüntüler ve YKN'ler fotogrametrik dengelemede kullanılarak oluşturulan model arazi koordinat sistemine dönüştürülmüştür.

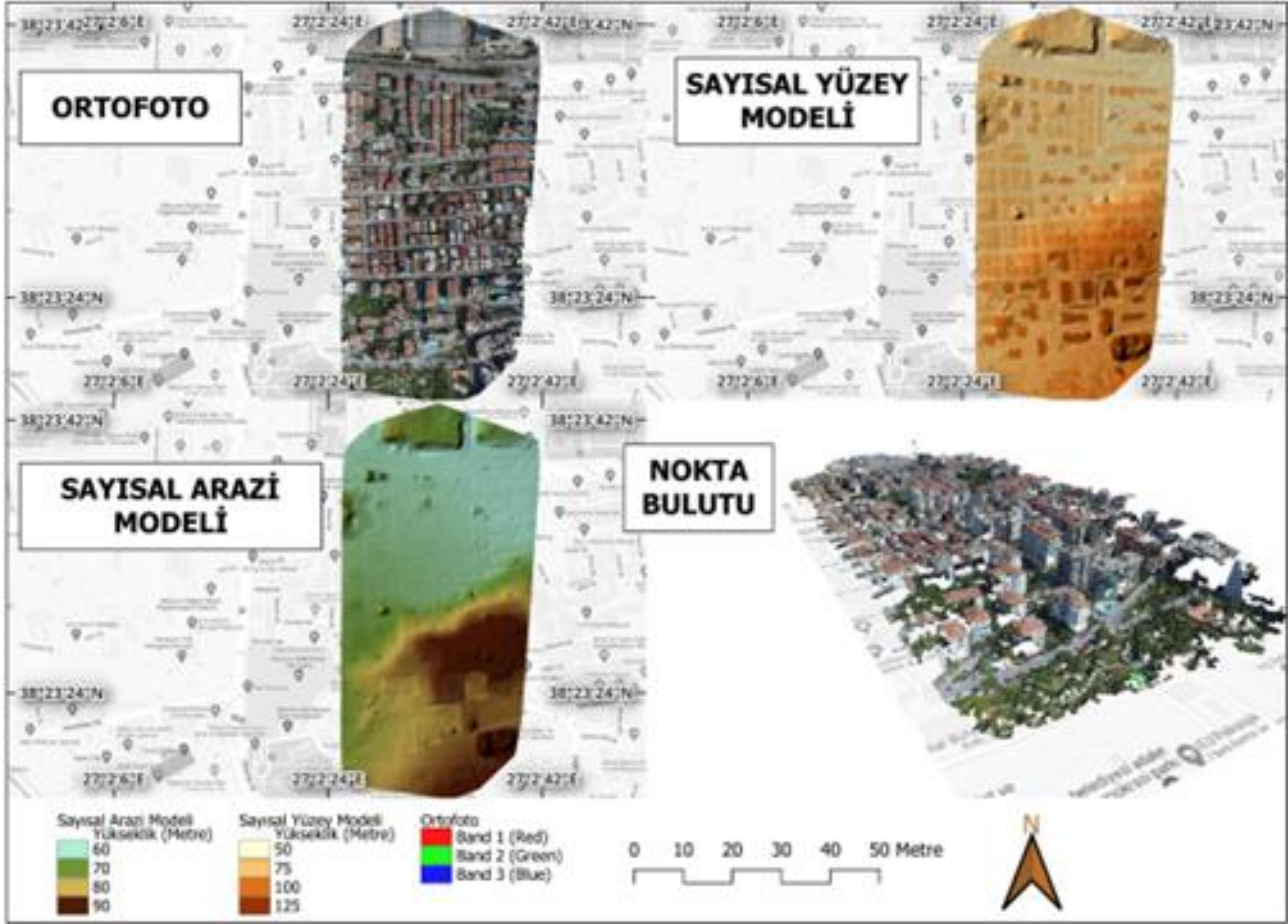
Tablo 2. Üretilen veriden elde edilen RMSE değerleri

	RMSEX (m)	RMSEY (m)	RMSEZ (m)
Kök Ortalama Kare Hata Değerleri	0.027	0.057	0.099

Çalışmada fotogrametrik analizler için Pix4D Mapper yazılımı kullanılmıştır. Pix4D Mapper yazılımı üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada fotoğraflar analiz edilerek fotoğrafların içerisindeki ortak noktalar görüntü eşleme teknikleriyle eşleştirilmiştir. Daha sonra çalışma alanına ait yoğun nokta bulutu verileri oluşturulmuştur. Araziyi tam olarak yansıtmak ve yüksek kalitede veri elde etmek amacı ile topografik veriler elde edilirken filtreleme ve gürültü noktaları azaltımı gibi ön işlemler gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemler sonucunda çalışma alanının raster formatında sayısal yüzey modeli (SYM), sayısal arazi modeli (SAM) ve ortofotosu üretilmiştir. İHA sisteminden elde edilen fotoğraflar kullanılarak oluşturulan ortofoto, SYM, ve

SAM verileri Şekil 4’te gösterilmiştir. Oluşturulan ortofotonun yer örneklem aralığı 4.01 cm/piksel’dir. Her m² başına düşen ortalama nokta yoğunluğu yaklaşık 31,52’dir. Çalışma kapsamında SYM verisinin yaklaşık 20

cm çözünürlüğünde olması arazideki detayların ayırt edilebilmesi bakımından yeterli görülmüştür. Bu nedenle SYM verisinin çözünürlüğü 5 x GSD olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4. İHA sistemlerinden elde edilen sayısal veriler.

İHA sistemlerinden elde edilen veriler analiz edildikten sonra hedef objelere ait yükseklik bilgisini çıkarmak için çeşitli yollar kullanılabilir. Yapılan analizlerde QGIS 3.32 yazılımının içerisinde yer alan yükseklik profili çizdirme özelliği kullanılarak her bir ağacın yüksekliği belirlenmiştir.

Çalışmada hem İHA hem de İCESat-2/ATLAS verilerinden elde edilen zemin yükseklik bilgilerinin doğruluğunun nicel olarak değerlendirilebilmesi için kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama kare hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama hata (ME), belirleme katsayısı (R²), Pearson korelasyon katsayısı, Spearman korelasyon katsayısı ve Kendall korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan istatistiksel analizlerde RMSE için Eşitlik 1, MSE için Eşitlik 2, MAE için Eşitlik 3, ME için Eşitlik 4, R² için Eşitlik 5, Pearson korelasyon katsayısı için Eşitlik 6, Spearman korelasyon katsayısı için Eşitlik 7 ve Kendall korelasyon katsayıları için Eşitlik 8 kullanılmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2}{n}} \quad (1)$$

e : Hesaplanan değer ile kesin değer farkları
 n : Ölçü sayısı

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \quad (2)$$

n : Gözlem sayısı
 Y_i : Gerçek değer
 \hat{Y}_i : Tahmin edilen değer

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (3)$$

n : Gözlem sayısı
 Y_i : Gerçek değer
 \hat{Y}_i : Tahmin edilen değer

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (4)$$

n : Gözlem sayısı
 Y_i : Gerçek değer
 \hat{Y}_i : Tahmin edilen değer

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (5)$$

Y_i : Gerçek değer
 \hat{Y}_i : Tahmin edilen değer
 \bar{Y}_i : Gerçek değerlerin ortalaması

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (6)$$

r: Pearson korelasyon katsayısı
n = gözlem sayısı

$$r_s = 1 - 6 \frac{\sum D^2}{n(n^2 - 1)} \quad (7)$$

r_s: Sıra korelasyon katsayısı
D: Sıra numaraları arasındaki fark

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (8)$$

S: Kendall korelasyon katsayısı
n: Veri sayısı
x_j ve x_k: (j>k) zamanlarındaki veri noktası
sgn(x_j - x_k): İşaret işlevi

4. Bulgular

Bu çalışmada ağaç tespiti ve yükseklik tayinleri ICESat-2/ATLAS ve İHA verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistemlerden elde edilen veriler arazide yerinde yapılan ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Verilerin nicel olarak değerlendirilebilmesi için hesaplanan RMSE, MSE, MAE ve ME hata değerleri Tablo 3'te verilmiştir. R², Pearson korelasyon katsayısı, Spearman korelasyon katsayısı ve Kendall korelasyon katsayılarının değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda yersel-İHA ikilisine ait hata değerlerinin, yersel-ICESat-2 ikilisine ait hata değerlerinden daha düşük, hesaplanan korelasyon değerlerinin ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yersel-İHA ve yersel-ICESat-2 ikililerine ait hata değerleri arasındaki farkın minimum 8 cm, maksimum ise 13 cm olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Yersel-İHA ve Yersel-ICESat-2 arasındaki istatistiksel analiz sonuçları- 1.

	ME (m)	MAE (m)	MSE (m)	RMSE (m)
Yersel-İHA	0.019	0.274	0.100	0.316
Yersel-ICESat-2	0.146	0.387	0.183	0.427

Tablo 4. Yersel-İHA ve Yersel-ICESat-2 arasındaki istatistiksel analiz sonuçları- 2.

	R ²	Pearson	Spearman	Kendall
Yersel-İHA	0.98	0.99	0.97	0.91
Yersel-ICESat-2	0.97	0.99	0.94	0.84

Şekil 5 incelendiğinde yersel ölçüm sonucunda elde edilen ağaç yükseklikleri ile ICESat-2 sistemlerinden elde edilen ağaç yükseklikleri arasında yapılan regresyon analizi sonucunda R² değeri 0.97 çıkmıştır. Bu değer 1'e yakın olması sonucunda iki değişken arasında yüksek derecede aynı yönlü doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca, regresyon analizi sonucunda minimum değer -0.5166, birinci dilim değeri -0.3819, medyan değerinin 0.1152, üçüncü dilim değerinin 0.3258 ve maksimum fark değerinin 0.666 çıktığı

görülmüştür. Regresyon analizinin diğer önemli çıktılarında birisi de p değeridir. Bu değer herhangi bir değişken için 0.05'ten büyük çıkarsa o değişkenin anlamsız olduğu anlaşılır. Kısaca bağımlı değişken üzerinde etki yaratmadığı düşünülür. Model sonucunda p değeri 2.2e-16 değerinden daha küçük çıkmıştır.

Şekil 6 incelendiğinde yersel ölçüm sonucunda elde edilen ağaç yükseklikleri ile İHA sistemlerinden elde edilen ağaç yükseklikleri arasında yapılan regresyon analizi sonucunda R² değeri 0.98 çıkmıştır. Bu değer 1'e yakın olması sonucunda iki değişken arasında yüksek derecede aynı yönlü doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Yapılan istatistiksel regresyon modelinin özelliklerine bakıldığında minimum değer -0.49029, birinci dilim değeri -0.26657, medyan değerinin -0.03838, üçüncü dilim değerinin 0.27144 ve maksimum fark değerinin 0.58748 çıktığı görülmüştür. Model sonucunda p değeri 2.2e-16 değerinden daha küçük saptanmıştır. Yapılan tüm istatistiksel analizler için R programı kullanılmıştır.

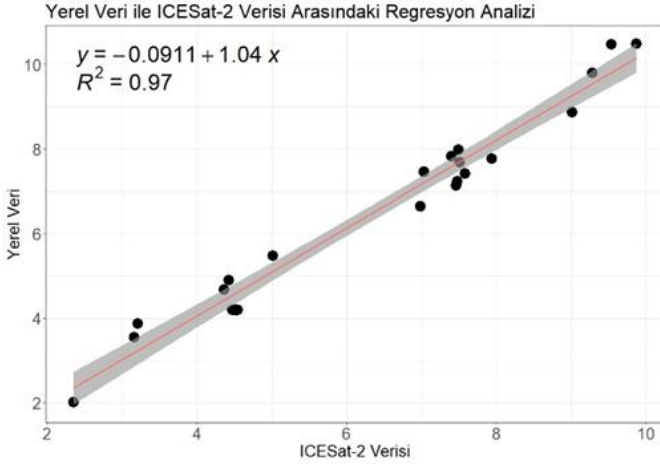
Sonuç olarak, tüm istatistiksel analizler değerlendirildiğinde hem ICESat-2/ATLAS verilerinin hem de İHA verilerinin kentsel alanlarda ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Regresyon analizi sonucunda ICESat-2 verilerinden elde edilen R² değerinin İHA sistemlerinden elde edilene göre düşük çıktığı görülmüştür. Şekil 7 ICESat-2/ATLAS sisteminden elde edilen veriler ile İHA sisteminden elde edilen verilerin üst üste çakıştırılmış halini göstermektedir. Şekil 7'de hava fotoğrafı üstünde görülen yeşil renkli üçgenler ICESat-2/ATLAS verilerinden elde edilen tepe noktalarının düştüğü fotonları gösterirken, kırmızı daireler ise zemin sınıfına ait fotonların düştüğü noktaları göstermektedir. Şekil 7a tepe ve zemin fotonlarının binalar üzerinden geçen hattını, Şekil 7b is zemin ve tepe fotonlarının ağaçlar üstünden geçen hattını yakından göstermektedir. Yersel ölçümler ile İHA ve ICESat-2/ATLAS sistemlerinden elde edilen veriler arasındaki farklar incelendiğinde bazı ağaç verilerinin binalara yakın olduğu görülmektedir. İHA sistemlerinden elde edilen verilerde görüntü işleme tekniklerinden kaynaklı eşleme problemlerinde farklılıklar çıkabilir. ICESat-2 sistemlerinden elde edilen veriler incelendiğinde fotonların bazı durumlarda ağacın tam tepe noktasından geçmediği ve ağacın tepeye yakın noktalardan geçtiği saptanmıştır. Bu tür durumlar sonuçlarda farklılık yaratabilmektedir.

5. Sonuçlar

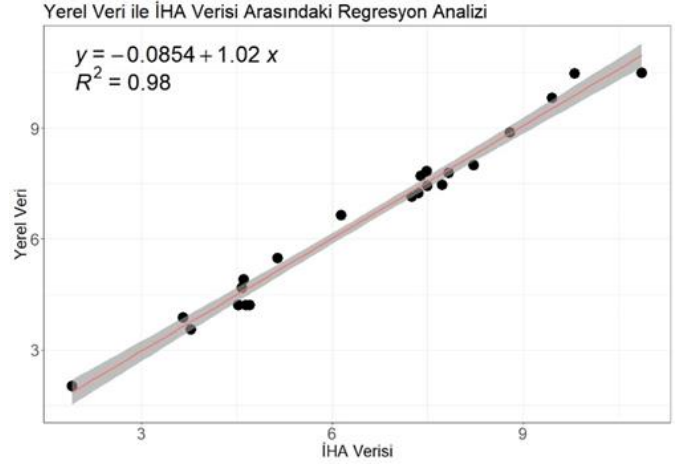
Bu çalışmada kentsel alanlarda yer alan ağaç yükseklikleri İHA ve uzaysal lazer sistemlerinden elde edilen veriler ile belirlenmiştir. ICESat-2/ATLAS ve İHA verilerinin performansları yersel ölçümler yardımıyla test edilmiştir. Ağaç yüksekliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalarda ağaçların türü, yaşı ve sıklığı büyük rol oynamaktadır. Ağaçların yaprağını dökmüş hali ile yapraklı hali arasında da yükseklik farkı ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda büyüme evresindeki genç ağaçların yüksekliği, gövde kalınlığı ve taç genişliği de çok hızlı değişim göstermektedir. Gelişimini tamamlamış ve olgunlaşmış ağaçlarda uzama yok denecek kadar

azdır. Yapılan bu çalışmada bahsedilen hususlara dikkat edilmiştir. Çalışma alanı olarak seçtiğimiz Balçova ilçesi, İzmir'in en eski yerleşim yerlerinden biri olup

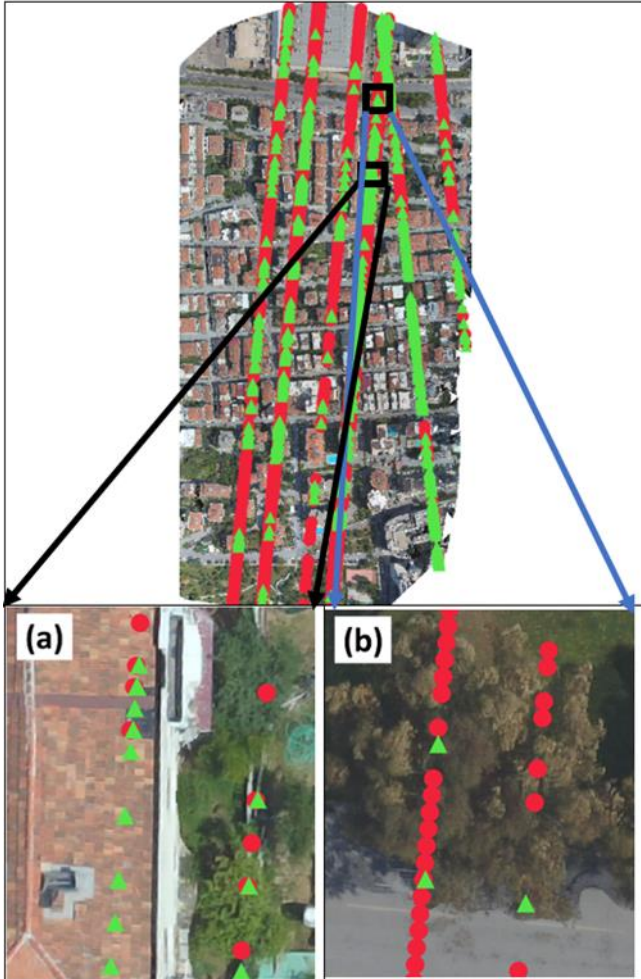
şehirleşmenin tamamlandığı bir bölgedir. Ayrıca, çalışma alanımızda her daim yeşil ve olgunlaşmış kızılçam, karaçam, selvi ve palmye ağaçları bulunmaktadır.



Şekil 5. Yersel veri ile ICESat-2 verisi arasındaki regresyon analizi sonucu.



Şekil 6. Yersel veri ile İHA verisi arasındaki regresyon analizi sonucu.



Şekil 7. Ortofoto üzerinde ICESat-2/ATLAS verilerinin tepe (yeşil üçgen) ve zemin (kırmızı daire) fotonlarının binalar üzerinden (7a) ve ağaçlar üstünden geçen hatlarının (7b) görünümü.

İHA sistemleri son yıllarda bu tür çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Fakat, ICESat-2/ATLAS verilerinin bu tür çalışmalarda kullanımı yok denecek

kadar azdır (Qin ve diğ. 2022). ATLAS cihazının sahip olduğu tekli foton sayma teknolojisi, mekânsal çözünürlüklerin daha iyi, örnekleme sıklığının daha fazla olmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla yeryüzüne ait bilgiler daha detaylı olarak toplanmaktadır. Bu çalışmada her iki ışın demeti kullanılmış ve hem güçlü hem zayıf sinyallerin ağaç yükseklik belirlenmesinde başarılı olduğu görülmüştür.

Literatüre bakıldığında Qin ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada 1642.41 km²'lik oldukça büyük bir alan seçilmiştir. Çalışmalarında ağaç yükseklik bilgilerini de içeren ağaç parametrelerinin toplanmasında kullandıkları Geofen-2 uydusu CAST (Çin Uzay Teknolojileri Akademisi) tarafından geliştirilmiştir. Bu uydu 45 km²'lik alanda 0.8 m pankromatik, 3.2 m multispektral yer örnekleme mesafesine sahip görüntüler toplayabilmektedir. Ancak uydu görüntüleri ile ağaçların dikey yapısına ait bilgiler elde edilememektedir. Ayrıca ağaç yüksekliklerinin fazla olduğu bölgelerde spektral sinyaller zayıflamakta, hassasiyetini kaybetmekte ve çalışmanın doğruluğunu düşürmektedir. Bizim çalışmamız da ise çalışma alanı olarak 30 hektarlık bir bölge seçilmiştir. Çalışmamızda ICESat-2/ATLAS verilerine ek olarak İHA görüntüleri de kullanılmıştır. İHA görüntülerinden oluşturulan ortofotonun yer örnekleme aralığına (4.01 cm/piksel) bakıldığında, GF2 görüntülerine ait yer örnekleme aralığından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum İHA sistemleri yardımıyla toplanacak olan ağaç parametrelerinin uydu görüntüsünden elde edilecek olan parametrelerden daha iyi olacağını göstermektedir. Sonuç olarak çalışmamızda ICESat-2/ATLAS verilerinin ağaç yükseklik tahminleri uydu görüntülerine kıyasla çok daha doğru sonuçların alındığı İHA sistemi ile karşılaştırılmıştır. Ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde havasal ve yersel LİDAR verileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı yüksek maliyette olmasıdır. Bu çalışmada ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde kullanılan İHA verilerinin elde edilmesi havasal ve yersel LİDAR

sistemlerine göre çok daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, çalışmada kullanılan diğer bir sistem olan İCESat-2/ATLAS verileri ise ücretsiz olarak temin edilmektedir. Çalışmamız bu yönüyle İCESat-2/ATLAS sisteminin bu tür çalışmalarda kullanımının yaygınlaşmasını sağlayacak ve hem yerli hem de yabancı literatüre katkıda bulunacaktır.

Bu çalışmada kullanılan İCESat-2/ATLAS verileri ülkemizde çok bilinmeyen ve dolayısı ile araştırmacılar tarafından çok kullanılmayan bir veri türüdür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar mühendislik alanında bilimsel çalışmalar yapan araştırmacılar için büyük önem arz etmektedir.

Bilgilendirme/Teşekkür

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü ve İskenderun Teknik Üniversitesi Mimarlık ve Şehir Planlama bölümüne bu çalışmadaki verileri analiz etmemiz için gerekli olan bilgisayar donanımlarını bizlere sunduğu için teşekkür ederiz.

Araştırmacıların katkı oranı

Müge Ağca: Arazi çalışması, Veri analizi, Makale yazımı, Düzenleme; **Efdal Kaya:** Arazi çalışması, Veri analizi, Makale yazımı; **Ali İhsan Daloğlu:** Veri analizi, Literatür taraması, Makale yazımı; **Aslıhan Yücel:** Veri analizi, Literatür taraması, Makale yazımı; **Sercan Yalçınkaya:** İHA verilerinin toplanması

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Abdullah, S., Rashid, M. F. A., Tahar, K. N., & Osoman, M. A. (2021). Tree Crown Mapping based on unmanned aerial vehicle (UAV) towards a green-sustainable residential. *Planning Malaysia Journal*, 19(2), 97-107. <https://doi.org/10.21837/pm.v19i16.955>

Agca, M., & Daloglu, A. I. (2023). Local Geoid height calculations with GNSS, airborne, and spaceborne Lidar data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.12.009>

Ağca, M. (2020). PALS, İCESat/GLAS ve İCESat-2 Lazer Sistemleri ve Kullanım Alanları. *Geomatik*, 5(1), 27-35. <https://doi.org/10.29128/geomatik.560344>

Ağca, M., Gültekin, N., & Kaya, E. (2020). İnsansız hava aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin. *Geomatik*, 5(2), 134-145. <https://doi.org/10.29128/geomatik.595574>

Alexander, C., Korstjens, A. H., & Hill, R. A. (2018). Influence of micro-topography and crown characteristics on tree height estimations in tropical forests based on LiDAR canopy height models. *International Journal of Applied Earth*

Observation and Geoinformation, 65, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.10.009>

Anderson, C. T., Dietz, S. L., Pokswinski, S. M., Jenkins, A. M., Kaeser, M. J., Hiers, J. K., & Pelc, B. D. (2021). Traditional field metrics and terrestrial LiDAR predict plant richness in southern pine forests. *Forest Ecology and Management*, 491, 119118. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119118>

Barazzetti, L., Scaioni, M., & Remondino, F. (2010). Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132), 356-381. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00599.x>

Bendea, H., Boccardo, P., Dequal, S., Giulio Tonolo, F., Marenchino, D., & Piras, M. (2008). Low cost UAV for post-disaster assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B8), 1373-1379.

Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2009b). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(6), 6.

Berni, J. A., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009a). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722-738. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>

Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, 38(3), 697-710. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.022>

Chou, T. Y., Yeh, M. L., Chen, Y. C., & Chen, Y. H. (2010). Disaster monitoring and management by the unmanned aerial vehicle technology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(7B), 137-142.

Da Cunha Neto, E. M., Rex, F. E., Veras, H. F. P., Moura, M. M., Sanquetta, C. R., Käfer, P. S., ... & Dalla Corte, A. P. (2021). Using high-density UAV-Lidar for deriving tree height of *Araucaria Angustifolia* in an Urban Atlantic Rain Forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 63, 127197. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127197>

Dirik, H., Erdoğan, R., Altınçekiç, H. S., & Altınçekiç, H. (2014). Kent Ağaçlarının İşlevleri, Koruma Önemi ve Değer Belirleme Yaklaşımları. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 15(2), 161-174. <http://dx.doi.org/10.17474/acuofd.74718>

Durgun, H., Çoban, H. O., & Eker, M. (2022). İnsansız hava aracıyla elde edilen hava fotoğraflarından kızılçam ağaçlarının çap ve boylarının ölçümü ve gövde hacminin tahmini. *Turkish Journal of Forestry*, 23(4), 255-267. <https://doi.org/10.18182/tjf.1199567>

Fiorillo, F., Jiménez Fernández-Palacios, B., Remondino, F., & Barba, S. (2015). 3D Surveying and modelling of

- the Archaeological Area of Paestum, Italy. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 55-60. <https://doi.org/10.4995/var.2013.4306>
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207-1213.
- Gruen, A., Huang, X., Qin, R., Du, T., Fang, W., Boavida, J., & Oliveira, A. (2013). Joint processing of UAV imagery and terrestrial mobile mapping system data for very high resolution city modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 175-182. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-175-2013>
- Hao, J., Li, X., Wu, H., Yang, K., Zeng, Y., Wang, Y., & Pan, Y. (2023). Extraction and analysis of tree canopy height information in high-voltage transmission-line corridors by using integrated optical remote sensing and LiDAR. *Geodesy and Geodynamics*, 14(3), 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.008>
- Kaya, Y., & Polat, N. (2023). A linear approach for wheat yield prediction by using different spectral vegetation indices. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(1), 52-62. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1035037>
- Kohoutek, T. K., & Eisenbeiss, H. (2012). Processing of UAV based range imaging data to generate detailed elevation models of complex natural structures. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 405-410. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-405-2012>
- Konolige, K., & Agrawal, M. (2008). FrameSLAM: From bundle adjustment to real-time visual mapping. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(5), 1066-1077. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2004832>
- Ma, Y., Xu, N., Liu, Z., Yang, B., Yang, F., Wang, X. H., & Li, S. (2020). Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets. *Remote Sensing of Environment*, 250, 112047. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112047>
- Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., & Eisenbeiss, H. (2012). Unmanned aerial vehicle in cadastral applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 57-62. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011>
- Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., ... & Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>
- Mielcarek, M., Stereńczak, K., & Khosravipour, A. (2018). Testing and evaluating different LiDAR-derived canopy height model generation methods for tree height estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.002>
- Molina, P., Colomina, I., Vitoria, T., Silva, P. F., Skaloud, J., Kornus, W., ... & Aguilera, C. (2012). Searching lost people with UAVs: the system and results of the close-search project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 441-446. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-441-2012>
- Montoya, R. C., D'Amato, A. W., Messier, C., & Nolet, P. (2023). Mapping temperate forest stands using mobile terrestrial LiDAR shows the influence of forest management regimes on tree mortality. *Forest Ecology and Management*, 544, 121194. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121194>
- Najatishendi, E., Ergene, E. M., Uzar, M., & Şanlı, F. B. (2022). Production of flood risk maps: Ayancık Stream Example. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(1), 14-23. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1123378>
- Narine, L. L., Popescu, S. C., & Malambo, L. (2019a). Synergy of ICESat-2 and Landsat for mapping forest aboveground biomass with deep learning. *Remote Sensing*, 11(12), 1503. <https://doi.org/10.3390/rs11121503>
- Narine, L. L., Popescu, S. C., & Malambo, L. (2020). Using ICESat-2 to estimate and map forest aboveground biomass: A first example. *Remote Sensing*, 12(11), 1824. <https://doi.org/10.3390/rs12111824>
- Narine, L. L., Popescu, S., Neuenschwander, A., Zhou, T., Srinivasan, S., & Harbeck, K. (2019b). Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 224, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.037>
- Narine, L. L., Popescu, S., Zhou, T., Srinivasan, S., & Harbeck, K. (2009). Mapping forest aboveground biomass with a simulated ICESat-2 vegetation canopy product and Landsat data. *Annals of Forest Research*, 62(1), 69-86.
- Neitzel, F., & Klonowski, J. (2012). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 39-44. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-39-2011>
- Neuenschwander, A. L., & Magruder, L. A. (2019). Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look. *Remote Sensing*, 11(14), 1721. <https://doi.org/10.3390/rs11141721>
- Nie, S., Wang, C., Xi, X., Luo, S., Li, G., Tian, J., & Wang, H. (2018). Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data. *Optics Express*, 26(10), A520-A540. <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A520>
- Nofrizal, A. Y., Sonobe, R., Hiroto, Y., Morita, A., & Ikka, T. (2022). Estimating chlorophyll content of *Zizania latifolia* with hyperspectral data and random forest. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 221-228. <https://doi.org/10.26833/ijeg.953188>
- Noor, N. M., Abdullah, A. A. A., Abdullah, A., Ibrahim, I., & Sabeek, S. (2019). 3D city modeling using Multrotor drone for city heritage conservation. *Planning*

- Malaysia Journal, 17(1), 338–349. <https://doi.org/10.21837/pm.v17i9.610>
- Oczipka, M., Bemmann, J., Piezonka, H., Munkabayar, J., Ahrens, B., Achtehik, M., & Lehmann, F. (2009). Small drones for geo-archaeology in the steppes: locating and documenting the archaeological heritage of the Orkhon Valley in Mongolia. In *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology* IX, 7478, 53-63. <https://doi.org/10.1117/12.830404>
- Pang, X., Chen, Y., Ji, Q., Li, G., Shi, L., Lan, M., & Liang, Z. (2022). An Improved Algorithm for the Retrieval of the Antarctic Sea Ice Freeboard and Thickness from ICESat-2 Altimeter Data. *Remote Sensing*, 14(5), 1069. <https://doi.org/10.3390/rs14051069>
- Qin, H., Zhou, W., Qian, Y., Zhang, H., & Yao, Y. (2022). Estimating aboveground carbon stocks of urban trees by synergizing ICESat-2 LiDAR with GF-2 data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 76, 127728. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127728>
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2012). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling—current status and future perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 25-31. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011>
- Rinaudo, F., Chiabrande, F., Lingua, A., & Spano, A. (2012). Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. *The International archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 583-588.
- Saliu, I. S., Satyanarayana, B., Fisol, M. A. B., Wolswijk, G., Decannière, C., Lucas, R., ... & Dahdouh-Guebas, F. (2021). An accuracy analysis of mangrove tree height mensuration using forestry techniques, hypsometers and UAVs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 248, 106971. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106971>
- Simurda, C., Magruder, L. A., Markel, J., Garvin, J. B., & Slayback, D. A. (2022). ICESat-2 applications for investigating emerging volcanoes. *Geosciences*, 12(1), 40. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010040>
- Xing, Y., Huang, J., Gruen, A., & Qin, L. (2020). Assessing the performance of ICESat-2/ATLAS multi-channel photon data for estimating ground topography in forested terrain. *Remote Sensing*, 12(13), 2084. <https://doi.org/10.3390/rs12132084>
- Yilmaz, H. M., Aktan, N., Çolak, A., & Alptekin, A. (2022). The use of unmanned aerial vehicle (UAV) data in village development plans: A case study of Aksaray Yaylak Village. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 68-72. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1202261>
- Zang, J., Ni, W., & Zhang, Y. (2023). Spatially-explicit mapping annual oil palm heights in peninsular Malaysia combining ICESat-2 and stand age data. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113693. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113693>
- Zarco-Tejada, P. J., Guillén-Climent, M. L., Hernández-Clemente, R., Catalina, A., González, M. R., & Martín, P. (2013). Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and Forest Meteorology*, 171, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.12.013>
- Zhang, G., Chen, W., & Xie, H. (2019). Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat Missions. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13107-13118. <https://doi.org/10.1029/2019GL085032>

