



İHA Verileri ile Ağaç Parametrelerinin (Ağaç Boyu ve Tepe Tacı Genişliği) Belirlenmesi

Determination of Tree Parameters (Tree Height and Crown Width) with UAV Data

İnanç Taş^{1*} , Abdullah E. Akay¹ 

¹ Orman Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, 16310 Bursa, Türkiye

MAKALE BİLGİLERİ

Gönderim Tarihi: 23/03/2025

Kabul Tarihi: 25/05/2025

Atıf:

Taş, İ., & Akay, A. E. (2025). İHA Verileri ile Ağaç Parametrelerinin (Ağaç Boyu ve Tepe Tacı Genişliği) Belirlenmesi. *Ağaç ve Orman*. 6(1), 48-59.

*Sorumlu yazar: İnanç TAŞ

E-mail: inanc.tas@btu.edu.tr

Anahtar Kelimeler / Keywords:
Ağaç parametreleri / Tree parameters
Ağaç boyu / Tree height
Tepe tacı genişliği / Crown width
İHA / UAV

© Telif hakkı 2005 Bursa Teknik Üniversitesi'ne aittir. Çevrimiçi olarak ulaşılabilir: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/agacorman>



Ağaç ve Orman'da yayınlanan eserler Creative Commons Atıf - Ticari Olmayan 4.0 Uluslararası Lisansı kapsamında lisanslanmıştır.

ÖZET

İnsansız Hava Araçları (İHA) destekli uzaktan algılama verilerinin doğruluk düzeyindeki iyileşmelere paralel olarak ormancılık çalışmalarındaki kullanımı yaygınlaşmıştır. Son yıllarda İHA tabanlı üç boyutlu (3B) nokta bulutu verileri kullanarak tek ağaç parametreleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, Bursa Teknik Üniversitesi (BTÜ) Mimar Sinan Kampüsü'ndeki fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) alanında, İHA verileri kullanılarak ağaç parametrelerinin (ağaç boyu ve tepe tacı genişliği) belirlenmesi amaçlanmıştır. Örnek sahadan alınan İHA görüntüleri üzerinde 3B nokta bulutu yöntemi kullanılarak ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri elde edilmiştir. İHA tabanlı yöntemin başarısını değerlendirmek için klasik yersel ölçüm cihazları kullanılarak çalışma alanındaki ağaçların boy ve tepe tacı genişliği verileri elde edilmiştir. Çalışmada, yersel ölçümlerle ve İHA verileri ile belirlenen ağaç parametreleri arasındaki ilişkiler istatistiksel analizlerle incelenmiştir. Ayrıca, her iki yöntemle elde edilen ağaç parametreleri Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error-MSE) ve Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error-RMSE) yöntemleri ile karşılaştırılarak İHA tabanlı yöntemin etkinliği değerlendirilmiştir. Ağaç boyu için hata değerleri, MSE ve RMSE, sırasıyla 0,057 ve 0,427 olarak belirlenmiştir. Tepe tacı genişliği için ise hata değerleri sırasıyla 0,239 ve 0,653 bulunmuştur. Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri kendi arasında karşılaştırıldığında ağaç boyunun daha yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür.

ABSTRACT

Parallel to the improvements in the accuracy level of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) supported remote sensing data, their use in forestry studies has become widespread. In recent years, stand parameters can be calculated using UAV-based three-dimensional (3D) point cloud data. In this study, it was aimed to determine tree parameters (tree height and crown width) using UAV data in the stone pine (*Pinus pinea*, L.) stand within the Bursa Technical University (BTU) Mimar Sinan Campus. Tree height and crown width parameters were obtained using the 3D point cloud method on UAV images taken from the study area. In order to evaluate the success of the UAV-based method, tree height and crown width data were obtained in the study area using classical ground measurement devices. In the study, the relationships between stand parameters determined by ground measurements and UAV data were examined by statistical analysis. In addition, the stand parameters obtained with both methods were compared with the Mean Squared Error (MSE) and Root Mean Squared Error (RMSE) methods to evaluate the effectiveness of the UAV-based method. The error values for tree height, MSE and RMSE, were determined as 0.057 and 0.427, respectively. The error values for crown width were found as 0.239 and 0.653, respectively. When the tree height and crown width parameters were compared with each other, it was seen that tree height was determined with higher accuracy.

1. Giriş

Dünyada teknolojik uygulamaların yoğunluğuna bağlı olarak İHA sistemlerinin kullanımı ve amaçları farklılık göstermektedir. Günümüzde, giderek daha karmaşık hale gelen sosyal, politik ve çevresel politikalar nedeniyle İHA'lar farklı uzaktan algılama verilerinin çok işlevli bir üretim aracına dönüşmüştür (Pajares, 2015).

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), teknolojik gelişmelerle birlikte hem askeri hem de sivil alanlarda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Başlangıçta askeri amaçlarla kullanılan bu araçlar, günümüzde çevre izleme, haritalama, afet yönetimi, tarımsal faaliyetlerin izlenmesi, trafik denetimi ve altyapı kontrolleri gibi birçok sivil alanda da etkin çözümler sunmaktadır (Elmeseiry vd., 2020). Özellikle tarımda bitki sağlığı izleme, sulama yönetimi ve verimlilik analizleri gibi uygulamalarda hassas veri sağlayan İHA'lar; ormancılıkta ise orman alanlarının denetimi, kaçak kesimlerin ve yapılaşmaların tespiti, orman yangınlarının erken uyarısı ve takibi gibi alanlarda önemli rol oynamaktadır (Giordan vd., 2020; Mohsan vd., 2022). Ayrıca afet yönetimi kapsamında arama-kurtarma faaliyetlerinde ve ulaşılması zor bölgelerde hızlı ve güvenli veri toplama imkânı sunarak klasik yöntemlere kıyasla daha ekonomik, güvenli ve zaman açısından verimli çözümler sağlamaktadırlar. Gelişmiş sensör sistemleri sayesinde geniş alanların yüksek çözünürlükte taranması ve verilerin gerçek zamanlı analiz edilmesi mümkün hale gelmiştir (Mohsan vd., 2022).

İHA tabanlı veriler kullanılarak yapılan araştırma ve inovasyon çalışmalarının hızı son zamanlarda daha da ivme kazanmıştır. İHA'lar yardımıyla elde edilen uygun maliyetli veriler hassas ormancılık uygulamalarında da etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Ecke vd., 2022). Ayrıca, İHA'larla ilgili teknolojik gelişmeler, bu cihazların 3B verileri düşük maliyetle elde edebilen bir ölçüm aracı olarak araştırmacıların ilgisini çekmesine neden olmuştur (White vd., 2016).

Kabul edilebilir bir doğruluk düzeyinde veri üretimi için farklı tipte İHA platformları (sabit kanatlı veya çok rotorlu) ve lazer tabanlı sensörler (Light Detection and Ranging - LiDAR) gerekmektedir. İHA tabanlı ve SfM (Structure from Motion) destekli yöntemlerin kullanımı, bilimsel araştırma ve saha ölçümlerinde uygun maliyetli bir alternatif olarak hızla artmaktadır (Gülci, 2019).

İHA'ların ormancılıkta kullanımı, sağladığı yüksek mekansal çözünürlük, düşük operasyonel maliyet ve esnek veri toplama kapasitesi nedeniyle son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu teknolojiler, özellikle ulaşılması zor orman alanlarında RGB, multispektral ve LiDAR sensörler ile entegre edilerek hem yapısal hem de spektral verilerin etkin şekilde toplanmasını sağlamaktadır. Örneğin, multispektral kameralar bitki stresinin erken tespitinde kullanılırken, LiDAR sistemleri ağaç boyu ve biyokütle tahminlerinde kritik rol oynar. Ayrıca, İHA'lar geleneksel uydu ve uçak tabanlı yöntemlere kıyasla bulut örtüsü altında bile veri toplayabilme ve yüksek frekanslı izleme yapabilme avantajı sunar. Bu özellikler, orman sağlığı izleme, yangın sonrası hasar değerlendirme ve biyolojik çeşitlilik analizleri gibi çeşitli uygulamalarda İHA'ları vazgeçilmez kılmaktadır (Ecke vd., 2022).

İHA teknolojisindeki son ilerlemeler ve gelişmeler sonucunda İHA'ların özellikle fotogrametri amaçlı kullanımı ormancılıkta daha da yaygınlaşmıştır. İHA fotogrametrisinin kullanılması ormancılıkta çözülmesi gereken sorunlara farklı açılardan bakılmasını sağlayarak çok sayıda yöntem, uygulama, araştırma ve stratejinin geliştirilmesinin önünü açmıştır. İHA fotogrametrisi (gözlem, haritacılık ve 3 boyutlu modelleme) kullanılarak yapılan bilimsel çalışmalardan elde edilen verilerin çeşitliliği, ormancılık araştırmalarını yeni boyutlara taşımıştır (Gülci vd., 2022).

Teknolojik gelişmeler sayesinde kullanıcı dostu fotoğraf işleme algoritmalarının geliştirilmesi ve uygun maliyetli sensörlerin üretilmesi ile de İHA'lar, ormancılıkla ilgili çeşitli verileri elde edebilen uygun maliyetli ölçüm aracı olarak araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Ormancılık alanında yürütülen İHA tabanlı çalışmalar beş ana grupta toplanabilir; Meşcere veya tek ağaç ölçümleri ve tahminleri (Yurtseven vd., 2019), Orman ağacı türlerinin sınıflandırılması ve haritalanması (Tomašůk vd., 2019), böcek zararı, orman yangını, çığ ve heyelan gibi biyotik veya abiyotik faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi (Eker vd., 2018), Ekolojik çalışmalar (yaban hayatı, ormanlardaki boşluk oluşumları ve nehir kıyısı ekosistemleri) (Zhang vd., 2016) ve Orman yolu tasarımı ve kazı-dolduru hesaplamaları gibi yol inşaatı ile ilgili çalışmalar (Akgul vd., 2018; Ciritcioğlu ve Buğday, 2022; Kınalı ve Çalışkan, 2022; Hasegawa vd., 2023; Siafali ve Tsioras, 2024; Türk ve Canyurt, 2024). Kamera ve görüntü işleme programlarının maliyetinin düşmesiyle birlikte ormancılıkta İHA tabanlı ve SfM (Structure from Motion) destekli

yöntemler özellikle meşcere parametrelerinin belirlenmesinde yaygın hale gelmiştir (Dainelli vd., 2021).

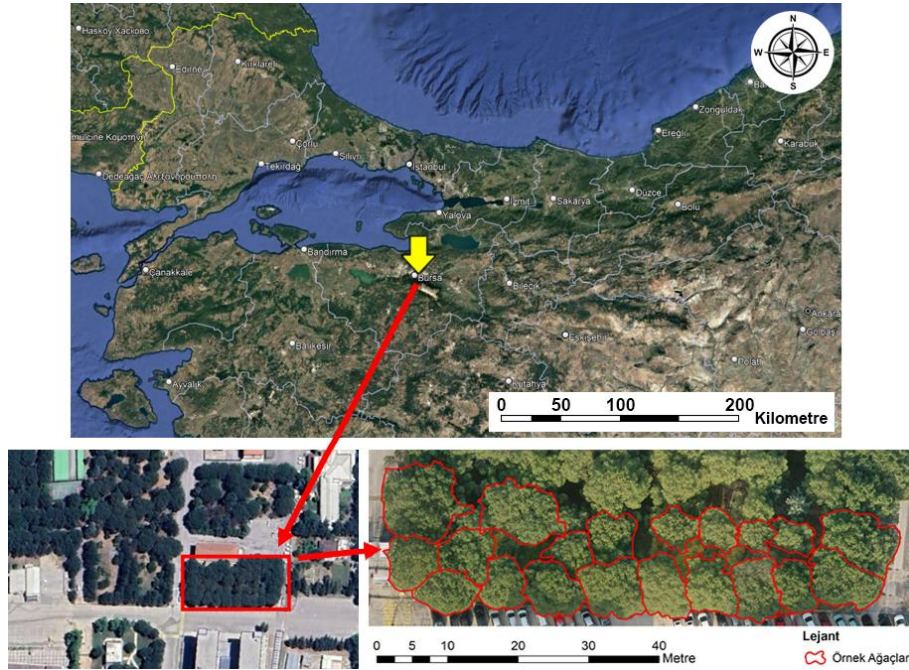
SfM yöntemi kullanılarak İHA ile alınan stereo çiftleri bir nokta bulutuna dönüştürülebilmektedir. İHA'ya monte edilen RGB kameralar ile alınan görüntüler SfM tabanlı algoritma ile çalışan çeşitli yazılımlarla (Photoscan, Pix4D, MicMac, CloudCompare) işlenerek, 2B veya 3B modellerin oluşturulmasında kullanılmaktadır (Lisein vd., 2013). Bu modelleri üretmek için İHA-SfM yöntemi dört aşamadan oluşmaktadır; Görüntü elde etme, yoğun bulut üretme, coğrafi referanslama ve üç boyutlu yoğun nokta bulutu üretme. Daha sonra, 3B yoğun nokta bulutları kullanılarak yüksek çözünürlüklü modeller (ortofoto, ağ, doku ve sayısal yükseklik modelleri) elde edilmektedir (Smith vd. 2015). Bu çalışmada, BTÜ Mimar Sinan Kampüsü'ndeki fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) alanında, İHA verilerine dayalı 3B nokta bulutu oluşturma yöntemi ile ağaç boyu ve tepe tacı genişliği belirlenmesi amaçlanmıştır.

Sonuçlar daha sonra geleneksel yersel ölçüm yöntemlerinden elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma alanı

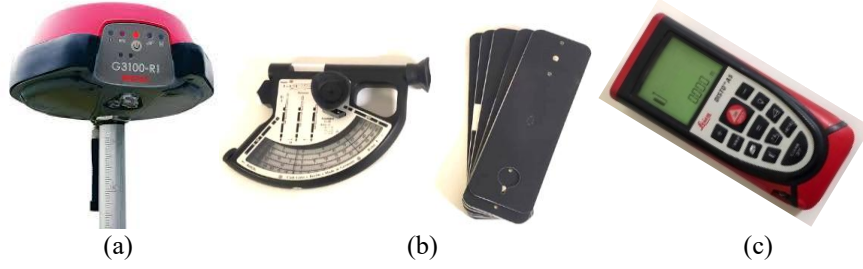
Çalışma, Bursa Teknik Üniversitesi Mimar Sinan Kampüsü yakınında fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) meşceresinde ($40^{\circ}11'24''$ Kuzey ve $29^{\circ} 7'47.30''$ Doğu) yürütülmüştür. Çalışma alanında toplam 20 adet ağaç dikkate alınmıştır (Şekil 1). Çalışmada 3B veriler, DJI Mavic 2 Pro model İHA kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2). Yer kontrol noktalarının coğrafi konum bilgilerini belirlemek için Pentax G3100-R1 model GNSS-GPS cihazı kullanılmıştır (Şekil 3). Ağaç parametrelerinin yersel ölçümlerle belirlenmesi aşamasında, Blume-Carl Leiss model hipsometre kullanılarak ağaç boyları ölçülmüştür. Uzunluk ve mesafe ölçümleri için ise Leica Disto A5 model lazer mesafe ölçer kullanılmıştır.



Şekil 1: Çalışma alanı.
Figure1: Study area.



Şekil 2: DJI Mavic 2 Pro model İHA.
Figure 2: DJI Mavic 2 Pro UAV.



Şekil 3: Ölçümlerde kullanılan cihazlar; a) Pentax G3100-R1 GNSS GPS, b) Blume-Carl Leiss model hipsometre, c) Leica Disto A5 lazer mesafe ölçer.

Figure 3: Devices used in the measurements: a) Pentax G3100-R1 GNSS GPS, b) Blume-Carl Leiss hypsometer, c) Leica Disto A5 laser distance meter.

2.2. Yöntem

2.2.1. Yersel ölçümler

Çalışmada, örnek alandan seçilen 20 ağacın, ağaç boyu ve tepe tacı genişliği geleneksel ölçüm teknikleri kullanılarak ölçülmüştür. Ağaç boyu ölçümleri için Blume-Leiss, çap ölçümleri için kumpas, uzunluk ve mesafe ölçümleri için ise lazer mesafe ölçer kullanılmıştır (Şekil 4). Sahada toplanan boy ve taç genişliği verileri veri kaydı formlarına kaydedilmiştir. Örnek ağaçlara numara verilmiş ve her ağaca ait ölçümleri (boy ve taç genişliği) ve koordinat bilgileri (WGS84 UTM Zone 35N) MsExcel sayfasına kaydedilmiştir.



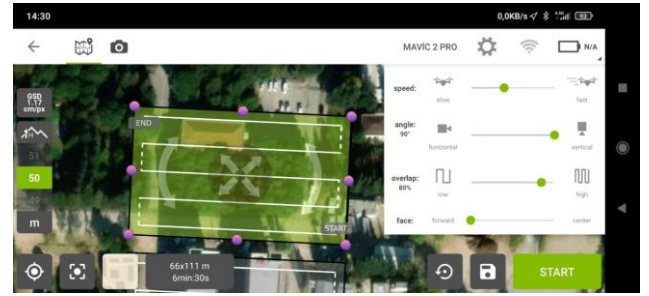
Şekil 4: Yersel ölçümlerden görüntüler.

Figure 4: Images from terrestrial measurements.

2.2.2. İHA görüntülerinin alınması

DJI Mavic 2 Pro model İHA ile fotogrametrik uçuşlar gerçekleştirilmiştir. İHA'da taşıyıcı platform üzerine gimbal ile monte edilen dijital kamera (CMOS sensörlü) 20 megapiksel çözünürlüğe sahiptir (DJI, 2024). Fotogrametrik uçuş planlaması ve görevi için Android tabanlı Pix4D Capture kullanılmıştır (Pix4D, 2024). Uçuş planında; yer üstü uçuş yüksekliği 50 m, uçuş alanı 66 m x 111 m, fotoğrafın ileri ve yan

bindirme oranları %80 ve lokal çözünürlük ise 1,17 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Uçuş tek ızgara uçuş planına göre gerçekleştirilmiştir. İHA ile elde edilen görüntülerden yüksek doğrulukta veri üretimi amacıyla uçuştan önce çalışma alanında toplam beş yer kontrol noktası (YKN) kurulmuştur. YKN'nın coğrafi konum bilgileri Pentax G3100-R1 model GNSS-GPS cihazı ile 50 cm hassasiyetle ölçülmüştür (Şekil 6).



Şekil 5: Uçuş planı arayüzü.

Figure 5: Flight mission interface.



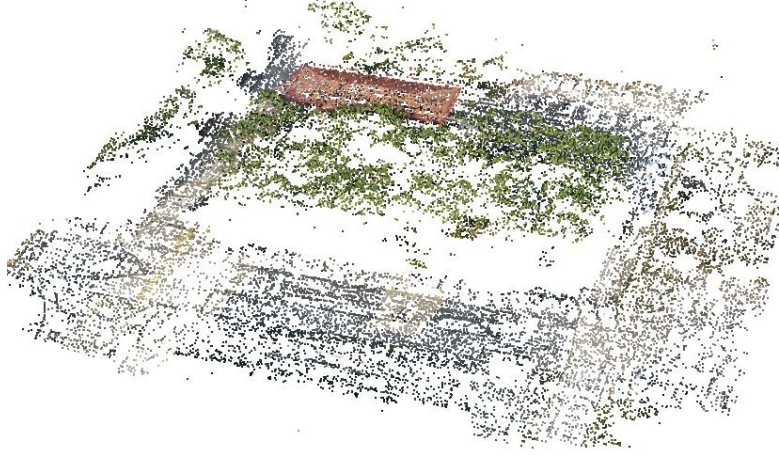
Şekil 6: Yer kontrol noktalarının koordinatlarının ölçülmesi.

Figure 6: Measurement of ground control point coordinates.

2.2.3. İHA ile sayısal modellerin üretilmesi

Çalışma alanından çekilen fotoğraflar (toplam 49 adet) Agisoft Metashape 1.8.3 (Petersburg, Rusya) yazılımı ile SfM yöntemine göre işlenmiştir. İlk olarak, çalışma alanının koordinat ve projeksiyon bilgileri (WGS84 UTM Zone 35N ve EPSG: 32635) girilmiştir. Çekilen fotoğraflar “Add Photos” aracılığıyla programa yüklenmiştir. “Convert”

butonu ile açılan “Convert Reference” penceresinde fotoğraflar üzerinde gerekli koordinat dönüşümü (WGS84 UTM Zone 35N) yapılmıştır. Daha sonra, “Workflow” menüsü altında “Align Photos” kullanılarak fotoğrafların hizalama işlemi yapılmıştır (Şekil 7). Fotoğrafların koordinatlarının dengelenmesi amacıyla YKN’nın koordinat bilgileri programa yüklenmiştir.



Şekil 7: Bağlantı noktaları görüntüsü.

Figure 7: Image of tie points.

Yer kontrol noktalarına göre kamera optimizasyonu gerçekleştirildikten sonra “Workflow” menüsü altında yer alan “Build Dense Cloud” aracılığıyla yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu işlem sırasında, kalite (quality) seviyesi olarak en yüksek seviye (ultra high) ve derinlik filtrelemesi (depth filtering) seviyesi olarak ise yine en yüksek seviye (aggressive) seçilmiştir. Nokta bulutunun oluşturulmasında bilgisayar performansı 38,5 dakika sürmüştür. En yüksek kalite seviyesi seçilerek gerçekleştirilen bu aşamada, 63574 m² çalışma alanı içerisinde toplam 598340338 adet 3B nokta oluşturulmuştur.

Yoğun nokta bulutu oluşturulduktan sonra yer yüzeyi, vejetasyon, binalar, yollar, araçlar vb. nesnelerin ayırt edilebilmesi için otomatik sınıflandırma işlemi uygulanmıştır. Sınıflandırma işlemi yaklaşık 23 dakika sürmüştür. Bu işlemin ardından SYM ve SAM üretimi için nokta bulutu hazır hale gelmiştir. SYM ve SAM üretildikten sonra ortomozaik üretilmiştir (Şekil 8). Bu işlem yaklaşık 7 dakika sürmüştür. Agisoft Metashape 1.8.3 programında son olarak nokta bulutu metin veri formatında kaydedilmiştir. Bir sonraki aşamada kullanılan CloudCompare 2.13.1 programına uygun veri formatı olması açısından “.las” (Lidar LASer) formatı tercih edilmiştir.



Şekil 8: Ortomozaik.

Figure 8: Orthomosaic.

2.2.4. Tepe tacı görüntüsünün üretilmesi

Bu aşamada tepe çatısı altında kalan orman diri örtüsünün nokta bulutundan elimine edilmesi için “Classification threshold” fonksiyonunda bir metre eşik yükseklik değeri kullanılmıştır. Böylece, eşik değerinin altındaki vejetasyon nokta bulutundan çıkarılmıştır. Tepe taçlarını bireysel olarak birbirlerinden ayırmak için CloudCompare 2.13.1 kullanılarak otomatik tepe tacı segmentasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, “Plugins” menüsü altında “TreeIso” sekmesi seçilerek “Individual Tree Isolator” aracı kullanılmıştır. Böylece, çalışma alanındaki ağaçların tepe taçları bireysel olarak ayrıştırılmış ve tepe taçlarının daha net bir görüntüye sahip olduğu segmentasyon görüntüsü üretilmiştir.

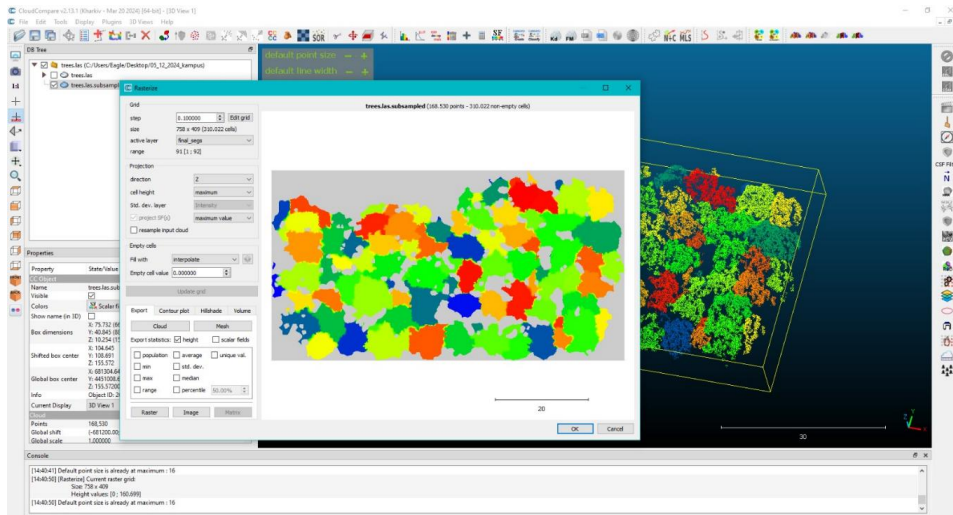
Son olarak, tepe tacı segmentasyonu görüntüsü, “Tools” menüsünde bulunan “Projection” sekmesindeki “Rasterize” aracı kullanılarak raster veri formatına (“tif”) dönüştürülmüştür. Bu işlem sırasında, “Active Layer” sekmesinde bir önceki

aşamada üretilen tepe tacı segmentasyon görüntüsü kullanılmıştır (Şekil 9).

2.2.5. Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği

CloudCompare kullanılarak üretilen tepe tacı raster görüntüsündeki gürültü etkisini düşürmek ve yüksek frekans bileşenlerini azaltmak amacıyla, ilk olarak ArcGIS 10.8 ortamında “Low pass” (alçak geçiren) filtresi kullanılarak tepe tacı görüntüleri yumuşatılmıştır. Daha sonra, “Reclass” altında “Slice” aracı kullanılarak yumuşatılan görüntü sınıflandırılmıştır.

Sınıflandırılan tepe tacı raster görüntüsü vektör formatına dönüştürülerek tepe tacı poligonları üretilmiştir. “Coverage” ve “Editor” araçları kullanılarak bu hatalar giderilmiştir. Daha sonra, arazi çalışmaları sırasında ağaç parametreleri ölçülen toplam 20 örnek ağacın görüntüsü üzerinde çalışmak amacıyla, görüntüdeki diğer tepe tacı poligonları çıkarılmıştır (Şekil 10).



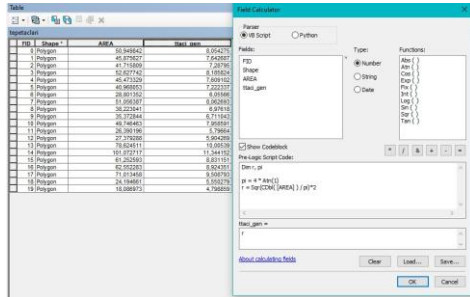
Şekil 9: CloudCompare’de nokta bulutundan üretilen tepe tacı raster görüntüsü.
Figure 9: Tree crowns raster image generated from the point cloud in CloudCompare.



Şekil 10: Örnek ağaçların tepe tacı poligonlarının seçilmesi.
Figure 10: Selection of tree crown polygons for sample trees.

Bu aşamada öncelikle “Raster Calculator (RC)” kullanılarak daha önce üretilen çalışma alanına ait SYM’den SAM çıkarılarak Kanopi Yükseklik Modeli (KYM) üretilmiştir. Daha sonra, tepe tacı poligonlarını ve KYM kesiştirilerek, örnek ağaçlar için tepe tacı yüksekliklerini gösteren KYM katmanı üretilmiştir. Her bir ağacın en yüksek noktasının belirlenebilmesi için Ters Havza Segmentasyonu (Inverse Watershed Segmentation - IWS) kullanılmıştır. Sonraki aşamada, her bir tepe tacı için lokal minimum yüksekliği belirlemek amacıyla öncelikle “Neighborhood” altında “Focal Flow” aracı kullanılmıştır. Son aşamada, en yüksek tepe noktalarının yükseklik verileri kullanılarak her bir ağaç için ağaç boyu belirlenmiştir.

Tepe tacı segmentasyonu veri katmanında tepe tacı alanı sütunu oluşturularak “Calculate Geometry” aracı ile her bir ağaç için tepe tacı alanı (m²) hesaplanmıştır. Daha sonra, ölçülen tepe tacı alanı daire olarak kabul edilerek, dairenin alanına bağlı olarak “Pre-Logic Script Code” penceresinde yazılan kodla tepe tacı genişliği (çapı) hesaplanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11: Tepe tacı genişliği hesabı.

Figure 11: Calculation of tree crown width.

Tablo 1: Yersel ölçümlerle elde edilen ağaç parametreleri.

Table 1: Stand parameters obtained from terrestrial measurements.

Ağaç No	Boy (m)	Tepe Tacı Genişliği (m)
1	13,50	11,24
2	13,70	7,11
3	13,10	7,36
4	13,10	6,12
5	12,40	10,24
6	12,80	8,40
7	12,10	7,10
8	12,60	8,22
9	11,90	6,62
10	12,50	9,25
11	11,30	5,92
12	12,70	8,15
13	12,50	6,35
14	12,60	7,89
15	11,80	5,30
16	13,00	6,42
17	12,50	8,60
18	12,40	6,43
19	14,10	9,22
20	13,60	8,12

2.2.6. İstatistiksel analizler ve doğruluk analizi

Örnek alan için arazide ölçülen ve İHA verileri ile belirlenen ağaç parametreleri (ağaç boyu, tepe tacı genişliği) arasındaki ilişkiler istatistiksel analizlerle incelenmiştir. İstatistiksel analizler SPSS 20 ve MsExcel programları kullanılmıştır. Analizlerde doğrusal ilişkilerin doğruluğunun analiz etmek için R² değeri hesaplanmıştır. Arazide ölçülen ve İHA verileri ile belirlenen ağaç parametreleri arasındaki ölçüm hatasını incelemek için MSE ve RMSE hesaplanmıştır (Denklem 1-2). Bu hesaplamalarda N örnek ağaç sayısını, y_i arazi ölçümlerini ve $\hat{y}_i$ ise İHA verileri ile belirlenen değerleri ifade etmektedir.

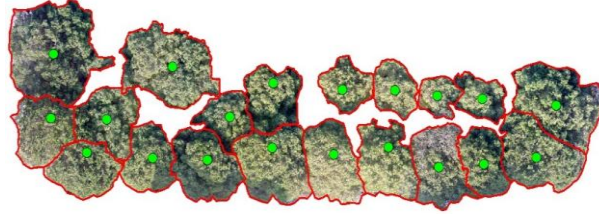
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yersel ölçüm bulguları

Çalışma alanındaki örnek ağaçların konumları Şekil 12’de verilmiştir. Örnek ağaçların ağaç parametreleri Tablo 1’de sunulmuştur. Ağaç parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistik bulgular Tablo 2’de yer almaktadır. Sonuçlara göre, örnek alanda ortalama ağaç boyu ve tepe tacı genişliği sırasıyla 12,71 m ve 7,70 m olarak belirlenmiştir.



Şekil 12: Çalışma alanındaki örnek ağaçların konumları.
Figure 12: Locations of sample trees in the study area.

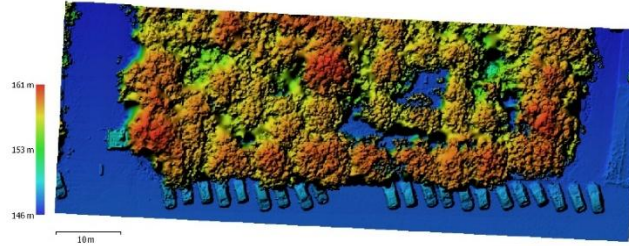
Tablo 2: Yersel ölçümlere dayalı ağaç parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler.
Table 2: Descriptive statistics of stand parameters based on terrestrial measurements.

	N	Aralık	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Basıklık
Ağaç boyu	20	2,8	12,71	0,6851	0,46937	0,10774	0,06633
Tepe tacı	20	5,94	7,703	1,52471	2,32474	0,61436	0,07045

3.2. İHA görüntü analizi bulguları

Agisoft Metashape 1.8.3 programında İHA görüntüleri işlenerek oluşturulan nokta bulutu kullanılarak çalışma alanına ait SYM ve SAM üretilmiştir (Şekil 13 ve Şekil 14). SAM verilerine göre çalışma alanında ortalama yükseklik 146 m olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, nokta bulutu veri

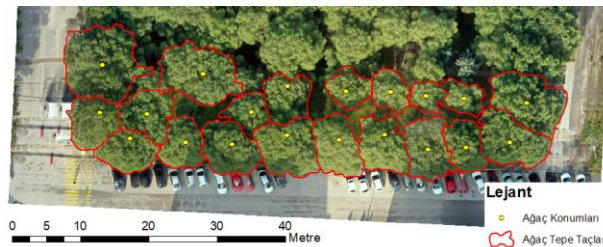
katmanı “.las” (Lidar LASer) formatında kaydedilmiştir. Daha sonra, “.las” formatında nokta bulutu CloudCompare 2.13.1 programında işlenerek çalışma alanındaki ağaçların tepe tacı görüntüsü üretilmiş ve ardında ArcGIS 10.8 ortamında gerekli işlemler yapılarak tepe tacı veri katmanı elde edilmiştir (Şekil 15). Bir sonraki aşamada SYM’den SAM çıkarılarak oluşturulan ve örnek ağaçların tepe tacını gösteren KYM Şekil 16’da verilmiştir.



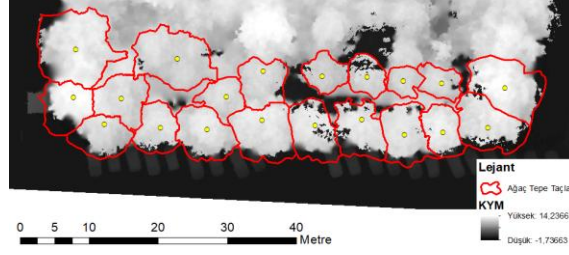
Şekil 13: Çalışma alanına ait SYM.
Figure 13: DSM of the study area.



Şekil 14: Çalışma alanına ait SAM.
Figure 14: DTM of the study area.



Şekil 15: Çalışma alanında ölçülen örnek ağaçların tepe tacı poligonları.
Figure 15: Tree crown polygons of the sample trees measured in the study area.



Şekil 16: Örnek ağaçların tepe tacını gösteren KYM.

Figure 16: CHM showing the tree crowns of the sample trees.

3.3. Tek ağaç parametreleri bulguları

İHA verilerine dayalı belirlenen ağaç parametreleri Tablo 3'te ve tanımlayıcı istatistik bulgular ise Tablo 4'te yer almaktadır. Sonuçlara göre, örnek alanda ortalama ağaç boyu ve tepe tacı genişliği sırasıyla 12,75 m ve 7,62 m olarak belirlenmiştir. Yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri ile İHA verileri ile tespit edilen değerler

arasında iyi düzeyde doğrusal bir ilişki olduğu (R^2) belirlenmiştir (Ağaç boyu: 0,88, Tepe tacı genişliği: 0,83) (Şekil 17 ve Şekil 18). Benzer bir çalışmada Görnaz (2025), düşük diri örtü yoğunluğuna sahip bir fıstık çamı meşceresinde, yersel ölçümlerle ve İHA verileri ile belirlenen ağaç parametreleri karşılaştırıldığında, ağaç boyu ve tepe tacı genişliği için R^2 değerleri sırasıyla 0,84 ve 0,81 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3: İHA verileri ile elde edilen ağaç parametreleri.

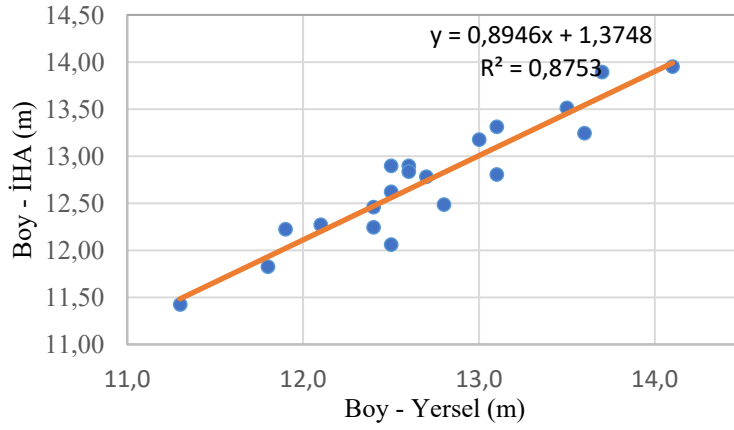
Table 3: Stand parameters obtained from UAV data.

Ağaç No	Boy (m)	Tepe Tacı Genişliği (m)
1	13,51	11,344
2	13,89	7,609
3	12,81	7,288
4	13,31	7,643
5	12,46	10,005
6	12,49	6,976
7	12,27	6,056
8	12,90	8,186
9	12,22	7,222
10	12,90	8,924
11	11,42	5,904
12	12,78	8,054
13	12,06	5,797
14	12,84	7,959
15	11,82	4,799
16	13,17	6,711
17	12,62	8,063
18	12,24	5,550
19	13,95	9,509
20	13,25	8,831

Tablo 4: İHA verilerine dayalı ağaç parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler.

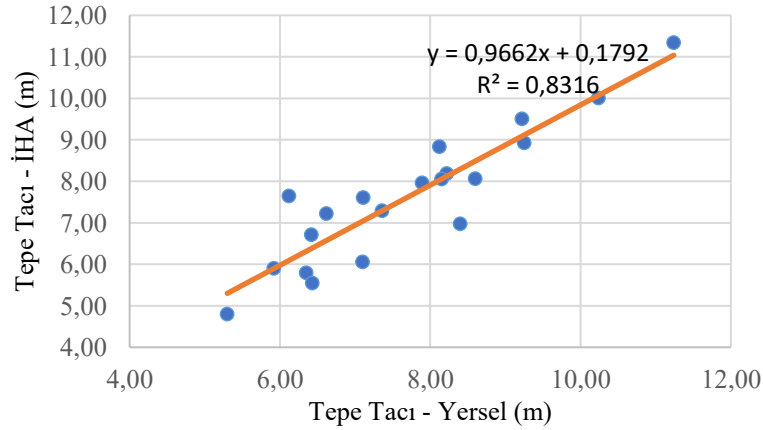
Table 4: Descriptive statistics of stand parameters based on UAV data.

	N	Aralık	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Basıklık
Ağaç boyu	20	2,53	12,7455	0,65551	0,4297	0,04555	-0,1716
Tepe tacı	20	6,545	7,6215	1,61537	2,60941	0,39868	0,18208



Şekil 17: İki yöntemle elde edilen ağaç boyları arasındaki doğrusal ilişki.

Figure 17: Linear regression between tree heights obtained by the two methods.



Şekil 18: İki yöntemle elde edilen tepe tacı genişlikleri arasındaki doğrusal ilişki.

Figure 18: Linear regression between tree crown widths obtained by the two methods.

3.4. Doğruluk analizi bulguları

Yersel ölçümlerle ve İHA verileri ile belirlenen ağaç parametreleri arasındaki ölçüm hatası MSE ve RMSE hesaplanarak belirlenmiştir. Sonuçlar, İHA verileri ile belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametrelerinin, yersel ölçümlerle karşılaştırıldığında, genel olarak kabul edilebilir doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir (Tablo 5). Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri kendi arasında karşılaştırıldığında ise ağaç boyunun daha yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Gülci vd. (2021) tarafından yürütülen ve meşcere parametrelerinin İHA verileriyle tahmin edildiği bir çalışmada ağaç boyu tahmininde doğruluğun daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Vacca ve Vecchi (2024), benzer bir çalışmada İHA kullanarak ağaç boyu tahmini gerçekleştirmiş ve iki

farklı alanda ölçüm yapmışlardır. Birinci alanda, ortalama 5 m boya sahip zeytin ağaçlarında tahmin edilen boyların RMSE 0,37 m, ikinci alanda ise yaklaşık 0,7 m boyundaki fidanlar için RMSE değeri 0,67 m olarak bulunmuştur. Farklı bir çalışmada ise Nasiri vd. (2021), ortalama 31,1 m boyunda ve 11,53 m tepe tacı genişliğinde ağaçlardan elde ettikleri İHA verileriyle yaptıkları tahminlerde, ağaç boyu için 3,22 m ve tepe tacı genişliği için 0,81 m RMSE değerlerine ulaşmışlardır. Önceki çalışmalarla kıyaslandığında, bu çalışmada elde edilen RMSE değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, Nasiri vd. (2021) çalışmasından farklı olarak, bu çalışmada ağaç boyu için RMSE değeri daha düşük, ancak tepe tacı genişliği için daha yüksek bulunmuştur.

Tablo 5: Yersel ölçümler ve İHA ile belirlenen parametreler arasındaki ölçüm hatası.

Table 5: Measurement error between parameters determined by terrestrial measurements and UAV.

	Ortalama Kare Hatası	Kök Ortalama Kare Hatası
Ağaç boyu	0,057	0,239
Tepe tacı genişliği	0,427	0,653

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, fıstık çamı sahasında yersel ölçümlere dayalı geleneksel yöntemler ve İHA tabanlı 3B nokta bulutu verileri kullanılarak ağaç parametreleri (ağaç boyu ve tepe tacı genişliği) belirlenmiştir. Elde edilen ağaç parametreleri MSE ve RMSE yöntemleri ile karşılaştırılarak İHA tabanlı yöntemin etkinliği değerlendirilmiştir.

Yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri ile İHA verileri ile tespit edilen değerler arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Ağaç tepe tacı genişliğine ilişkin geliştirilen regresyon modellerinin %99 güven düzeyinde anlamlı ($p < 0,000$) olduğu belirlenmiştir. İHA verileri ile elde edilen boy değerlerinin yersel ölçümlerden daha yüksek, tepe tacında ise daha düşük olduğu görülmüştür.

Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği için MSE örnek alanda sırasıyla 0,057 ve 0,427 olarak belirlenmiştir. Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği için RMSE sırasıyla 0,239 ve 0,653 olarak belirlenmiştir. Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri kendi arasında karşılaştırıldığında her iki örnek alanda da ağaç boyunun daha yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Öte yandan daha önceki çalışmalar ile yapılan kıyaslamalara bakılarak ağaç boyu ve tepe tacı şeklinin tahmin sonuçlarını etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

İki yöntemden elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucunda, İHA verilerine dayalı yöntemin ağaç parametrelerinin ölçümünde etkili bir alternatif olacağı anlaşılmıştır. Ayrıca, ağaç parametrelerinin İHA verileri ile tahmin edilmesi zaman ve maliyet açısından avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, yersel ölçümlerde insan faktöründen kaynaklanan büyük hatalar İHA tabanlı ölçümlerde ortadan kaldırılacaktır.

Makale Bilgileri

Finansal Açıklama: Yazar(lar) bu çalışmanın araştırılması, yazarlığı veya yayınlanması için herhangi bir finansal destek almamıştır.

Yazarların Katkıları: Konsept: İ.T., A.E.A.; Tasarım: İ.T., A.E.A.; Danışmanlık: A.E.A., İ.T.; Kaynaklar: A.E.A., İ.T.; Veri Toplama: İ.T., A.E.A.; Analiz: İ.T., A.E.A.; Literatür Taraması: A.E.A., İ.T.; Makale Yazımı: İ.T., A.E.A.; Eleştirel İnceleme: A.E.A., İ.T.

Çıkar Çatışması/Ortak Çıkar: Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması veya ortak çıkar beyan edilmemiştir.

Etik Komite Onayı: Bu çalışma etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

Kaynaklar

Akgul, M., Yurtseven, H., Gulci, S., & Akay, A. E. (2018). Evaluation of UAV-and GNSS-based DEMs for earthwork volume. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 43(4), 1893–1909.

Ciritcioğlu, M. G., & Buğday, E. (2022). Assessment of unmanned aerial vehicle use opportunities in forest road project (Düzce sample). *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2), 247–257.

Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., & Matese, A. (2021). Recent advances in unmanned aerial vehicle forest remote sensing—A systematic review. Part I: A general framework. *Forests*, 12, 327.

DJI. (2024, Nisan 5). Mavic 2 Pro specifications. <https://www.dji.com/global/support/product/mavic-2>

Ecke, S., Dempewolf, J., Frey, J., Schwaller, A., Endres, E., Klemmt, H.-J., Tiede, D., & Seifert, T. (2022). UAV-based forest health monitoring: A systematic review. *Remote Sensing*, 14(13), 3205.

Eker, R., Aydın, A., & Hübl, J. (2018). Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(1), 28.

Elmeseiry, N., Alshaer, N., & Ismail, T. (2021). A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (UAVs) with potential applications. *Aerospace*, 8(12), 363.

Giordan, D., Adams, M. S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3437–3481.

Görnaz, G. (2025). İHA verileri kullanılarak meşçere parametrelerinin belirlenmesi [Yüksek lisans tezi], Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.

- Gülci, S., Akay, A. E., Gülci, N., & Taş, İ. (2021). An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation. *Ecological Informatics*, 63, 101303.
- Gülci, S. (2019). The determination of some stand parameters using SfM-based spatial 3D point cloud in forestry studies: an analysis of data production in pure coniferous young forest stands. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 495. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7628-4>
- Gülci, S., Akay, A. E., Aricak, B., & Sariyildiz, T. (2022). Recent advances in UAV-based structure-from-motion photogrammetry for aboveground biomass and carbon storage estimations in forestry. In M. N. Suratman (Ed.), *Concepts and applications of remote sensing in forestry* (pp. 395–409). Springer Singapore.
- Hasegawa, H., Sujaswara, A. A., Kanemoto, T., & Tsubota, K. (2023). Possibilities of using UAV for estimating earthwork volumes during process of repairing a small-scale forest road, case study from Kyoto Prefecture, Japan. *Forests*, 14(4), 677.
- Kınalı, M., & Çalışkan, E. (2022). Use of unmanned aerial vehicles in forest road projects. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(3), 530–541.
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4, 922–944.
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): a comprehensive review. *Drones*, 6(6), 147.
- Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Arefi, H., Pierrot-Deseilligny, M., Namiranian, M., & Le Bris, A. (2021). Unmanned aerial vehicles (UAV)-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: hyrcanian mixed forest). *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 962–971.
- Pajares, G. (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(4), 281–329.
- Pix4D. (2024, Nisan 5). Pix4D capture – drone mapping software. <https://pix4d.com>
- Siafali, E., & Tsioras, P. A. (2024). An innovative approach to surface deformation estimation in forest road and trail networks using unmanned aerial vehicle real-time kinematic-derived data for monitoring and maintenance. *Forests*, 15(1), 212.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40, 247–275.
- Tomašík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sensing*, 11, 721. <https://doi.org/10.3390/rs11060721>
- Türk, Y., & Canyurt, H. (2024). Capabilities of using UAVs to determine forest road excavation volumes in mountainous areas. *Şumarski List*, 148(3–4), 137–150.
- Vacca, G., & Vecchi, E. (2024). UAV photogrammetric surveys for tree height estimation. *Drones*, 8(3), 106.
- White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. (2016). Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619–641. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>
- Yurtseven, H., Akgul, M., Coban, S., & Gulci, S. (2019). Determination and accuracy analysis of individual tree crown parameters using UAV-based imagery and OBIA techniques. *Measurement*, 145, 651–664. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.092>
- Zhang, J., Hu, J., Lian, J., Fan, Z., Ouyang, X., & Ye, W. (2016). Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.03.027>