T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İHA VERİLERİ KULLANILARAK MEŞCERE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem GÖRNAZ

Orman Ürünleri Anabilim Dalı

Orman Ürünleri Tezli Yüksek Lisans Programı

OCAK 2025

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İHA VERİLERİ KULLANILARAK MEŞCERE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem GÖRNAZ
(22434970601)
ORCID: 0009-0008-7869-917X

Orman Ürünleri Anabilim Dalı
Orman Ürünleri Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah Emin AKAY
ORCID: 0000-0001-6558-9029

OCAK 2025

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Gizem GÖRNAZ

İmzası:

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) sahasında farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip iki örnek alanda, İHA verileri kullanılarak ağaç parametrelerinin (ağaç boyu, tepe tacı genişliği ve ağaç çapı) belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonuçlara göre yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri ile İHA verileri ile tespit edilen değerler arasında doğrusal bir ilişki olduğu (R^2) belirlenmiştir. Diri örtü yoğunluğundaki artışın İHA verilerine dayalı yöntemin meşcere parametrelerinin tahminini olumsuz yönde etkilediği ve bu nedenle ilişki oranının nispeten daha düşük olduğu görülmüştür. Sonuçlar, İHA verileri ile belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametrelerinin, yersel ölçümlerle karşılaştırıldığında, genel olarak kabul edilebilir doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir.

Çalışmalarımın her aşamasında bana yardımcı olan ve katkılarını esirgemeyen, çok değerli hocam ve tez danışmanım sayın Prof. Dr. Abdullah Emin AKAY'a teşekkürlerimi sunarım. Yine tez ile ilgili bana katkılarından dolayı sayın Dr. Öğr. Üyesi İnanç TAŞ'a, tez ile ilgili değerli görüşlerinden yararlandığım sayın Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç YÜKSEL'e ve tezin arazi çalışmalarında verilerin elde edilmesi ile ilgili katkı sağlayan Yalçın SEFER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve tez çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, bana inanan ve desteklerini esirgemeyen değerli aileme teşekkür ederim.

Ocak 2025

Gizem GÖRNAZ
(Orman Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **x**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 İHA Teknolojisi 2
1.1.1 Meşcere parametrelerinin belirlenmesinde İHA kullanımı 3
1.1.2 Allometrik denklemler yöntemi 5
1.1.3 Çalışmanın amacı ve kapsamı 5
1.2 Literatür Araştırması 6
2. MATERYAL VE YÖNTEM **9**
2.1 Çalışma Alanı 9
2.2 Kullanılan Araçlar 10
2.3 Yöntem 11
2.3.1 Yersel ölçümler 12
2.3.2 İHA fotoğraflarının alınması 13
2.3.3 İHA görüntülerinin analizi 15
2.3.3.1 3B nokta bulutunun üretilmesi 15
2.3.3.2 Sayısal modellerin üretilmesi 18
2.3.3.3 Tepe tacı görüntüsünün üretilmesi 21
2.3.3.4 Tepe tacı poligonlarının üretilmesi 24
2.3.3.5 Ağaçların tepe noktalarının belirlenmesi 26
2.3.4 İHA tabanlı meşcere parametreleri tahmini 28
2.3.5 İstatistiksel Analizler ve Doğruluk Analizi 29
3. BULGULAR VE TARTIŞMA **30**
3.1 Yersel Ölçüm Bulguları 30
3.2 İHA Görüntü Analizi Bulguları 32
3.3 Meşcere Parametreleri Bulguları 35
3.4 Meşcere Parametrelerinin Değerlendirilmesi 38
3.4.1 Düşük diri örtü yoğunluğu 38
3.4.2 Yüksek diri örtü yoğunluğu 41
3.5 Doğruluk Analizi Bulguları 44
4. SONUÇ VE ÖNERİLER **46**
KAYNAKLAR **48**
ÖZGEÇMİŞ **54**

KISALTMALAR

AGB **:** Above ground biomass
CSF **:** Cloth Simulator Filter
DEM **:** Digital elevation Model
GPS **:** Global Positioning System
IDW **:** Inverse Distance Weight
İHA **:** İnsansız Hava Aracı
KYM **:** Kanopi Yükseklik Modeli
LiDAR **:** Light Detection and Ranging System
MAE **:** Mean Absolute Error
MSE **:** Mean Squared Error
PCS **:** Point cloud segmentation
RC **:** Raster Caluculator
RGB **:** Red-Green-Blue
RMSE **:** Root Mean Squared Error
SAM **:** Sayısal Arazi Modeli
SfM **:** Structure from Motion
SYM **:** Sayısal Yüzey Modeli
UTM **:** Universal Transverse Mercator
YKN **:** Yer Kontrol Noktası

SEMBOLLER

β_0	**:** Denklemde kesişme değeri
β_1, β_2	**:** Denklemde bağımsız değişkenlerin katsayıları
d	**:** Göğüs yüksekliği çapı
d'	**:** İHA verilerine dayalı göğüs yüksekliği ağaç çapı
h	**:** Ağaç boyu
h_{SfM}	: İHA verilerine dayalı ağaç boyu
N	**:** Örnek sayısı
p	**:** Odunun özgül ağırlığına
V	**:** Toprak üstü biyokütle
w	**:** Tepe tacı genişliği
w_{SfM}	**:** İHA verilerine dayalı tepe tacı genişliği
y_i	**:** Arazi ölçümleri değeri
$\hat{y}_i$	**:** İHA verilerine dayalı ölçüm değeri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : YKN'nın kalibrasyon katsayıları ve korelasyon matrisi. 17
Çizelge 2.2 : YKN'nın koordinat hataları..... 18
Çizelge 3.1 : Yersel ölçümlerle elde edilen meşcere parametreleri..... 31
Çizelge 3.2 : Yersel ölçümlere dayalı meşcere parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler. 32
Çizelge 3.3 : Meşcere parametrelerine ilişkin geliştirilen regresyon modeli (1. Alan). 35
Çizelge 3.4 : Meşcere parametrelerine ilişkin geliştirilen regresyon modeli (2. Alan). 36
Çizelge 3.5 : İHA verilerine dayalı meşcere parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler. 36
Çizelge 3.6 : İHA verileri ile elde edilen meşcere parametreleri. 37
Çizelge 3.7 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin paired-sample t-testi sonuçları (1. Alan). 38
Çizelge 3.8 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin korelasyon sonuçları (1. Alan)..... 39
Çizelge 3.9 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin paired-sample t-testi sonuçları (2. Alan). 41
Çizelge 3.10 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin korelasyon sonuçları (2. Alan)..... 42
Çizelge 3.11 : Yersel ölçümler ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri arasındaki ölçüm hatası. 44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Ormancılık çalışmalarında İHA uçuşları (Gülci ve diğ, 2022). 3
Şekil 2.1 : Çalışma alanı. 9
Şekil 2.2 : DJI Mavic 2 Pro model İHA. 10
Şekil 2.3 : Ölçümlerde kullanılan cihazlar; a) Pentax G3100-R1 GNSS GPS, b) Blume-Carl Leiss model hipsometre, c) Leica Disto A5 model lazer mesafe ölçer, d) Haglöf model kumpas. 10
Şekil 2.4 : Akış diyagramı. 11
Şekil 2.5 : Yersel ölçümlerden görüntüler. 12
Şekil 2.6 : Tepe tacı ölçümünü gösteren diyagram. 13
Şekil 2.7 : Uçuş planı ekran görüntüsü. 14
Şekil 2.8 : Yer kontrol noktası. 14
Şekil 2.9 : Yer kontrol noktalarının koordinatlarının ölçülmesi. 14
Şekil 2.10 : Bağlantı noktaları (Tie point) görüntüsü. 15
Şekil 2.11 : YKN verilerini içeren metin dosyası ve "Import CSV" penceresi. 16
Şekil 2.12 : YKN'nın fotoğraflar üzerinde işaretlenmesi. 16
Şekil 2.13 : YKN için "Optimize Cameras" ile kamera optimizasyonu. 17
Şekil 2.14 : Nokta bulutu oluşturma ayarları. 18
Şekil 2.15 : Yoğun nokta bulutu görseli. 19
Şekil 2.16 : Yoğun nokta bulutunun sınıflandırılması. 19
Şekil 2.17 : SYM ve SAM üretim aşaması. 20
Şekil 2.18 : Ortomozaik. 20
Şekil 2.19 : Nokta bulutunun kaydedilmesi. 21
Şekil 2.20 : "Cloth Simulator Filter" işlem aşaması. 22
Şekil 2.21 : "Initial Segmentation" aracı ile tepe taçlarının küçük kümelere ayrılması. 23
Şekil 2.22 : "Interim Segmentation" aracı ile bu kümelerin en yakın tepe tacına atanması. 23
Şekil 2.23 : "Refined segmentation" aracı ile tepe tacı görüntülerinde iyileştirmelerin yapılması. 24
Şekil 2.24 : CloudCompare'de nokta bulutundan üretilen tepe tacı raster görüntüsü. 24
Şekil 2.25 : Tepe tacı raster görüntüsünün filtrelenmesi. 25
Şekil 2.26 : Tepe tacı raster görüntüsünün sınıflandırılması. 25
Şekil 2.27 : Tepe tacı poligonlarında görülen hatalar. 26
Şekil 2.28 : Örnek ağaçların tepe tacı poligonlarının seçilmesi. 26
Şekil 2.29 : İki örnek ağacın "Focal Flow" sonrası tepe tacı görüntüsü. 27
Şekil 2.30 : Ağaç tepe noktalarını ve en yüksek noktayı gösteren nokta veri katmanı. 28
Şekil 2.31 : Tepe tacı genişliği hesabı. 28
Şekil 3.1 : Çalışma alanındaki örnek ağaçların konumları. 30

Şekil 3.2 : Çalışma alanına ait SYM. 32
Şekil 3.3 : Çalışma alanına ait SAM. 33
Şekil 3.4 : Çalışma alanına ait ".las" formatında nokta bulutu. 33
Şekil 3.5 : Çalışma alanında ölçülen örnek ağaçların tepe tacı poligonları. 34
Şekil 3.6 : Örnek ağaçların tepe tacını gösteren KYM. 34
Şekil 3.7 : Örnek ağaçların tepe tacı için en yüksek tepe noktaları. 35
Şekil 3.8 : İki yöntemle elde edilen ağaç boyları arasındaki doğrusal ilişki (1. Alan). 40
Şekil 3.9 : İki yöntemle elde edilen tepe tacı genişlikleri arasındaki doğrusal ilişki (1. Alan). 40
Şekil 3.10 : İki yöntemle elde edilen ağaç boyları arasındaki doğrusal ilişki (2. Alan). 43
Şekil 3.11: İki yöntemle elde edilen tepe tacı genişlikleri arasındaki doğrusal ilişki (2. Alan). 43

İHA VERİLERİ KULLANILARAK MEŞCERE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

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 kullanılarak meşcere parametreleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, fıstık çamı (*Pinus pinea,* L.) sahasında farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip iki örnek alanda, İHA verileri kullanılarak ağaç parametrelerinin (ağaç boyu, tepe tacı genişliği ve ağaç çapı) belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, örnek sahalardan alınan İHA görüntüleri üzerinde Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (Structure for Motion-SfM) ile 3B nokta bulutu oluşturma ve işleme 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, tepe tacı genişliği ve çap verileri elde edilmiştir. Daha sonra, yersel ölçümlerle elde edilen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği verileri (bağımsız değişkenler) kullanılarak örnek ağaçların çap tahminini veren regresyon modelleri geliştirilmiştir. Son olarak, bu modellere İHA tabanlı yöntemle elde edilen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri girilerek çap değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada, yersel ölçümlerle ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri arasındaki ilişkiler istatistiksel analizlerle incelenmiştir. Ayrıca, her iki yöntemle elde edilen meşcere parametreleri Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE), 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. Sonuçlara göre yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri ile İHA verileri ile tespit edilen değerler arasında doğrusal bir ilişki olduğu (R^2) belirlenmiştir. Diri örtü yoğunluğundaki artışın İHA verilerine dayalı yöntemin meşcere parametrelerinin tahminini olumsuz yönde etkilediği ve bu nedenle ilişki oranının nispeten daha düşük olduğu görülmüştür. Sonuçlar, İHA verileri ile belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametrelerinin, yersel ölçümlerle karşılaştırıldığında, genel olarak kabul edilebilir doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir. Ağaç boyu için hata değerleri (RMSE) birinci ve ikinci örnek alanda sırasıyla 0,408 ve 0,377 olarak belirlenmiştir. Tepe tacı genişliği için ise hata değerleri sırasıyla 0,446 ve 0,497 bulunmuştur. Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri kendi arasında karşılaştırıldığında her iki örnek alanda da ağaç boyunun daha yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Örnek alanlar karşılaştırıldığında, diri örtü yoğunluğunun düşük olduğu örnek alanda tepe tacı genişliğinin doğruluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Meşcere parametreleri, Ağaç boyu, Tepe tacı genişliği, Ağaç çapı, İHA, SfM.

DETERMINATION OF STAND PARAMETERS BY USING UAV DATA

SUMMARY

In accordance with the improvements in the accuracy of Unmanned Aerial Vehicles (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, crown width and tree diameter) using UAV data in two sample areas with different vegetation understory density (low and high) in a stone pine (*Pinus pinea*, L.) stand. First, tree height and crown width parameters were obtained by using 3D point cloud generation and processing method with Structure for Motion (SfM) on UAV images taken from sample sites. To evaluate the success of the UAV-based method, height, crown width and diameter data of the trees in the study area were obtained using classical terrestrial measurement devices. Then, regression models that estimate the diameter of sample trees were developed using tree height and crown width data (independent variables) obtained from ground measurements. Finally, diameter values were calculated by entering the tree height and crown width values obtained by the UAV-based method into these models. In the study, the relationships between stand parameters determined by ground measurements and UAV data were examined with statistical analysis. In addition, the effectiveness of the UAV-based method was evaluated by comparing the stand parameters obtained with both methods with the Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE) and Root Mean Squared Error (RMSE) methods. According to the results, it was determined that there was a linear relationship (R^2) between the tree height and crown width values determined by ground measurements and the values determined by UAV data. It was observed that the increase in understory density negatively affects the estimation of stand parameters of the method based on UAV data and therefore the relationship ratio was relatively lower. The results showed that the tree height and crown width parameters determined by UAV data generally had acceptable accuracy when compared to ground measurements. Error values (RMSE) for tree height were determined as 0.408 and 0.377 in the first and second sample area, respectively. For crown width, error values were found to be 0.446 and 0.497, respectively. When tree height and crown width parameters were compared, it was seen that tree height was determined with higher accuracy in both sample areas. When the sample areas were compared, it was determined that the crown width accuracy was higher in the sample area where the density of understory density was low.

Key words: Stand parameters, Tree height, Crown width, Tree diameter, UAV, SfM.

1. GİRİŞ

Farklı ekosistemleri bünyesinde barındıran ormanlar, kuşkusuz en önemli doğal kaynaklardan biridir. Son yıllarda ormanların ekosistem hizmetleri dikkate alındığında, odun üretimine dayalı ormancılık faaliyetlerinin konvansiyonel ormancılık faaliyetlerini etkilediği görülmektedir (Ferranti, 2014). Bu nedenle, dünyada sürdürülebilir ormancılık kavramını desteklemek amacıyla hassas ormancılık yaklaşımına (planlama, üretim ve yönetim kapsamında) artan bir ilgi vardır. Bu yaklaşım, hassas ölçme gerektiren çok sayıda değişken ve parametrenin değerlendirilmesi için mekânsal ve zamansal esneklik sunan yeni araç ve tekniklerin kullanılmasına imkân sağlamaktadır (Gülci ve diğ, 2015; Nordström ve diğ, 2019).

Dünyada teknolojik uygulamaların yoğunluğuna bağlı olarak İHA (İnsansız Hava Aracı) sistemlerinin kullanımı ve amaçları farklılık göstermektedir. Günümüzde İHA'lar hobi kullanımı dışında birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ormancılık çalışmalarında, daha önceki dönemlerde İHA'lar ağırlıklı olarak orman kaynaklarının yönetiminde izleme ve değerlendirme amaçlı kullanılmıştır (Shahbazi ve diğ, 2014; Torresan ve diğ, 2017). 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).

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 (Colomina ve Molina, 2014; Goodbody ve diğ, 2017; Puliti ve diğ, 2020). Ayrıca, İHA'larla ilgili teknolojik gelişmeler, bu cihazların 3B verileri düşük maliyetle elde edebilen bir ölçüm aracı olarak araştırmacıların ilgisini çekmesine neden olmuştur (Tang ve Shao, 2015; White ve diğ, 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 (Lindberg ve Holmgren, 2017; Liang ve diğ, 2019;

Guimarães ve diğ, 2020). İHA tabanlı ve SfM destekli yöntemlerin kullanımı, bilimsel araştırma ve saha ölçümlerinde uygun maliyetli bir alternatif olarak hızla artmaktadır (Gülci, 2019). Bu çalışmada, fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) ormanında seçilen farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip iki örnek alanda, İHA verilerine dayalı SfM tabanlı 3B nokta oluşturma ve işleme yöntemi ile ağaç boyu, tepe tacı genişliği ve ağaç çapının belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar daha sonra geleneksel yersel ölçüm yöntemlerinden elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

1.1 İHA Teknolojisi

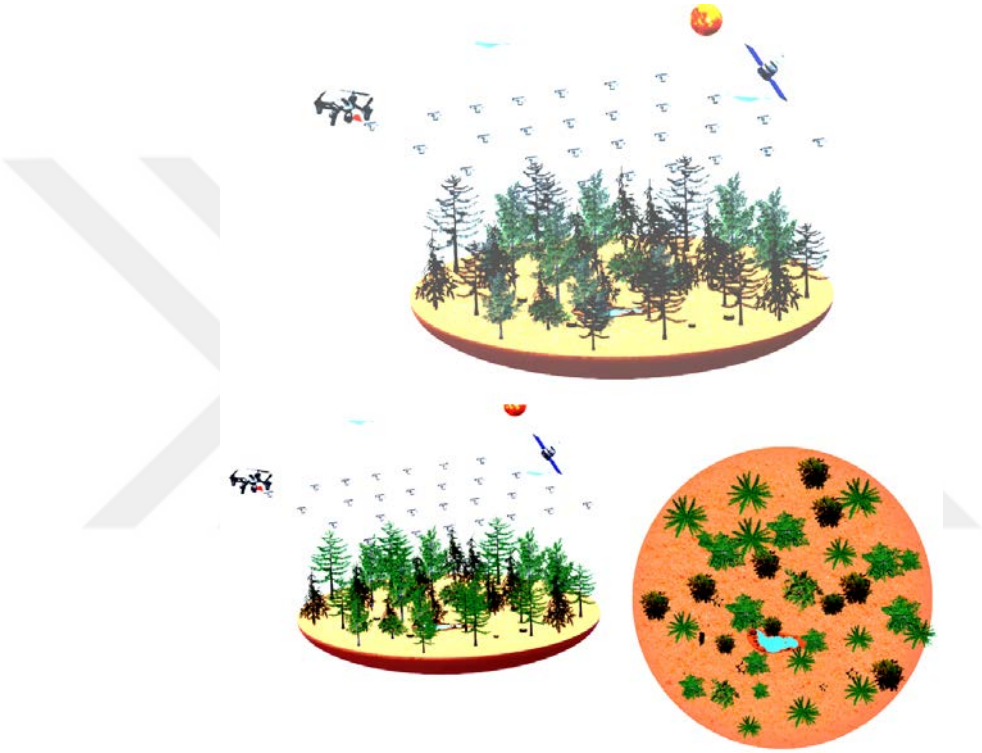
İHA'lar bilimsel ve teknik araştırmalarda sağladığı esneklik, güvenlik, yüksek hareket kabiliyeti ve istenilen şekilde programlanabilme olanaklarının yanı sıra uygun maliyetli uzaktan algılama aracı olarak tercih edilmektedir (Wing ve diğ, 2014). Farklı tipteki İHA'lar ve faydalı yüklerin (sensör, silah, vb.) temel teknolojik gelişim kavramları, 1900'lü yılların başlarından itibaren askeri ve sivil amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. Tam otomatik veya yarı otomatik hobi amaçlı üretilen, pek çok farklı özelliğe sahip uzaktan kumandalı İHA'lar yaygınlaşmıştır (Newcom, 2004).

İHA üzerine monte edilebilen ve uyarlanabilen sistemler sayesinde birçok sivil uygulama kısa sürede ve düşük maliyette gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalardan bazıları ormancılık faaliyetlerinde ve hassas tarım çalışmalarında, meteorolojide, arama-kurtarma faaliyetlerinde, yaban hayatı araştırmalarında, yapı denetiminde, trafik kontrolü ve gözlemlerinde, doğal afetler ve peyzaj planlamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Shahbazi ve diğ, 2014). Farklı model ve boyutlarda araştırma konusunun gerektirdiği donanıma sahip hafif İHA araçlarının tek veya çok rotorlu helikopter, uçak ve jet tipi tasarıma sahip çeşitleri kullanılmaktadır.

Ekolojik araştırmalarda yavaş hareket kabiliyetine sahip 20 kg'dan hafif küçük, mini, mikro ve nano İHA sınıfları tercih edilmektedir (Hardin ve Jensen, 2011). Askeri standartlarda farklı tipte ve kategoride büyük İHA sınıfları kullanılırken uçuş zamanları daha kısa olan ekonomik ve düşük kapasiteli sivil kişilerin üretebileceği ekolojik amaçlı kullanılan araç sınıfları bulunmaktadır (Wing ve diğ, 2014; Akgül ve diğ, 2016). Ülkemizde de kullanımı artan İHA türleri ticari olarak birçok marka ve modelde kullanıcıların isteklerine göre uyarlanmış veya kullanıcıların uyarlamasına izin verdiği programlanabilir sistemler üretmektedir.

1.1.1 Meşcere parametrelerinin belirlenmesinde İHA kullanımı

İHA'ların ormancılıkta kullanımı, sağladığı maliyet ve zaman tasarrufu nedeniyle hızla artmaktadır (Banu ve diğ, 2016). Ormancılıkta kullanım yoğunluğuna göre görünür menzil (RGB), multispektral ve LiDAR sensörler kullanılmaktadır (Dainelli ve diğ, 2021). İHA tabanlı ormancılık çalışmaları, yalnızca ulaşılması zor orman alanlarından veri toplamak amacıyla değil, aynı zamanda her türlü arazi koşulunda uzaktan algılama tekniklerinin kullanılması amacıyla da yürütülmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Ormancılık çalışmalarında İHA uçuşları (Gülci ve diğ, 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 ve diğ, 2022).

Ormancılık alanında yürütülen İHA tabanlı çalışmalar beş ana grupta toplanabilir; 1) meşcere veya tek ağaç ölçümleri ve tahminleri (Gülci, 2019; Yurtseven ve diğ, 2019), 2) orman ağacı türlerinin sınıflandırılması ve haritalanması (Tomaštík ve diğ, 2019),

3) böcek zararı, orman yangını, çığ ve heyelan gibi biyotik veya abiyotik faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi (Dash ve diğ, 2017; Eker ve diğ, 2018), 4) ekolojik çalışmalar (yaban hayatı, ormanlardaki boşluk oluşumları ve nehir kıyısı ekosistemleri) (Jones ve diğ, 2006; Michez ve diğ, 2016; Zhang ve diğ, 2016) ve 5) orman yolu tasarımı ve kazı-dolduru işleri gibi inşaatla ilgili çalışmalar (Akgül ve diğ, 2018).

Teknolojik gelişmeler sayesinde kullanıcı dostu fotoğraf işleme algoritmalarının geliştirilmesi ve uygun maliyetli sensörlerin üretilmesi ile İHA'lar, ormancılıkla ilgili çeşitli verileri elde edebilen uygun maliyetli ölçüm aracı olarak araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Ormancılıkta İHA fotogrametrisi kullanımı, kamera ve görüntü işleme programlarının maliyetinin düşmesiyle birlikte özellikle meşcere parametrelerinin belirlenmesinde yaygın hale gelmiştir (Dainelli ve diğ, 2021).

SfM (Structure from Motion) yöntemi kullanılarak İHA ile alınan stereo çiftleri 2B bir düzlemden 3B 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 ve diğ, 2013). Bu modelleri üretmek için İHA-SfM yöntemi dört aşamadan oluşur; 1) görüntü elde etme, 2) yoğun bulut üretme, 3) coğrafi referanslama ve 4) 3 boyutlu yoğun nokta bulutu üretme. Daha sonra, 3 boyutlu yoğun nokta bulutları kullanılarak yüksek çözünürlüklü modeller (ortofoto, ağ, doku ve sayısal yükseklik modelleri) elde edilmektedir (Smith ve diğ, 2015).

SfM yönteminin ormancılıkta etkin olarak kullanıldığı alanlar; 1) bireysel ağaç tespiti ve envanter parametreleri, 2) toprak üstü hacim tahminleri, 3) böcek zararı ve hastalık tespiti, 4) türlerin tanınması ve istilacı bitki tespiti, 5) koruma, restorasyon ve yangın izleme, 6) görüntülerin doğruluğunun yapılması (Dainelli ve diğ, 2021). Bu konular arasında en yaygın araştırma konuları bireysel ağaç tespiti ile göğüs yüzeyi alanı, ağaç sayısı, çap, hacim gibi meşcere parametrelerinin tespitidir (Gülci ve diğ, 2022). Önceki çalışmalar, İHA görüntülerinin meşcere parametrelerinin tahmin edilmesi amaçlı olarak ormancılıkta başarıyla kullanım potansiyeli olduğunu göstermektedir (Yurtseven ve diğ, 2019). Uzaktan algılama verileri kullanılarak meşcere parametrelerinin tahmininde en yaygın olarak tercih edilen yöntem, saha ve ofis çalışmaları tabanlı verilere dayanarak geliştirilen allometrik denklemlerin kullanıldığı yöntemdir (Gülci ve diğ, 2022).

1.1.2 Allometrik denklemler yöntemi

Birçok çalışmada meşcere parametrelerinin belirlenmesi için standart metodoloji çoğunlukla allometrik denklemler olmuştur (Dandois and Ellis, 2010; Linger ve diğ, 2018). Türe özgü allometrik denklemler, tek ağaç düzeyinde hedef parametrenin belirlenmesi amacıyla ağaç yüksekliği, göğüs yüksekliği çapı ve tepe tacı genişliği gibi parametrelerin ilişkilendirildiği regresyon modelleridir (Djomo ve diğ, 2017; Sullivan ve diğ, 2017; Maimaitijiang ve diğ, 2019). Bu yöntemin en önemli avantajı, yalnızca birkaç parametreye ihtiyaç duymasıdır (Pilli ve diğ, 2006). Bununla birlikte, allometrik denklem yöntemi emek yoğun, zaman alıcı ve küçük ölçekli saha ölçümleri gerektirmektedir (Lue, 2006).

Allometrik denklemlerin oluşturulması, güvenilirliğin sağlanması için arazi uygulamalarında yeterli sayıda örnek ağaç alınmasını gerektirmektedir (Roxburgh ve diğ, 2015). Örnek ağaçların sayısının arttırılması, ağaç parametrelerinin tahmin edilmesi için uygun allometrik denklemlerin doğruluğunu arttırmaktadır (Duncanson ve diğ, 2015, Dutcă ve diğ, 2020). Örnek büyüklüğünün 10-20 ağaçla sınırlı olduğu durumlarda, türetilmiş denklemler ve değerlendirmeler, ağaç büyüme formlarının gerçek değişkenliğini yetersiz şekilde temsil edebilir (Vorster ve diğ, 2020). Ancak örneklem büyüklüğü yerel koşulları ve değişkenliği yeterince sağladığında, örnek sayısını daha fazla attırmak allometrik denklem performansını da olumsuz etkileyebilmektedir (Strunk ve diğ, 2012; Nowak ve diğ, 2008). Bu nedenle, allometrik denklemler için en uygun örnek sayısının belirlenmesi, yapılan tahminlerin doğruluğunu sağlarken bir taraftan da ölçüm maliyetini makul seviyede tutmaktadır (Qin ve diğ, 2021).

1.1.3 Çalışmanın amacı ve kapsamı

Önemli bir biyokütle ve karbon depolama havuzu olan ormanlarımız vazgeçilmez doğal kaynakların başında gelmekte olup, bu değerli kaynağın doğru yönetimi ve ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği için periyodik olarak izlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, İHA görüntülerinin meşcere parametrelerinin belirlenmesinde ormancılıkta farklı meşcere koşullarında kullanım potansiyelinin ortaya konulması ve başarısının test edilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, İHA verileri kullanılarak meşcere parametrelerinin belirlenmesi ve sonuçların doğruluğunun geleneksel yersel yöntemle elde edilen meşcere

parametreleri verileri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Bursa Orman Bölge Müdürlüğü, Bursa Orman İşletme Müdürlüğü, Kayapa İşletme Şefliği sınırlarında, farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip bir fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) sahasının İHA görüntüleri alınmıştır. İHA görüntüleri analiz edildikten sonra meşcere parametreleri olarak ağaç boyu ve tepe tacı genişliği belirlenmiş ve yersel ölçümlerle elde edilen regresyon modelleri (allometrik denklemler) yardımıyla ağaç çapı hesaplanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Mustonen ve diğ. (2008), orman meşcerelerinin otomatik segmentasyonunda Kanopi Yükseklik Modelinin (KYM) uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. KYM ile üretilen mozaik, hava fotoğrafı (RGB) kullanılarak üretilen mozaikle karşılaştırılmıştır. Otomatik segmentasyon işleminde KYM ile hava fotoğrafını entegre etmenin katkısı da incelenmiştir. Sonuçlar, belirlenen meşcerelerin homojenliği hedeflendiğinde, KYM'ye dayalı yöntemin hava fotoğraflarına kıyasla iyi bir seçenek olduğunu göstermiştir. KYM mozaiği dikkate alındığında ortalama çapın tüm değişkenliğinin açıklanan oranının %74 ve ortalama yüksekliğin oranının %83 olduğu, RGB mozaiğinde ise bu oranların sırasıyla %65 ve %73 olduğu bulunmuştur.

İHA görüntüleri ile meşcere parametrelerinin belirlendiği başka bir çalışmada Qiu ve diğ. (2018), Çin'in Beijing şehrinde eski dönemlerden kalan yaşlı bir meşcerede 1484 adet ağacın göğüs yüksekliği çaplarını, ağaç boyu ve tepe tacı genişliğinin bir fonksiyonu olarak hesaplamıştır. Çalışmada geliştirilen modelde, $d_{1.3}=g_1 \cdot H^{q1}+g_2 \cdot D^{q2}$, $d_{1.3}$ göğüs yüksekliği çapını, H ağacın boyunu ve D tepe tacı genişliğini temsil etmektedir. g_1 ve q_1 ağaç boyu ile göğüs yüksekliği çapı arasındaki ilişkiyi ve g_2 ve q_2 tepe tacı genişliği ile göğüs yüksekliği çapı arasındaki ilişkiyi kuran faktörlerdir. Çalışmada model yardımıyla belirlenen çap değerleri ile yersel ölçümlerle elde edilen çap değerleri karşılaştırıldığında, Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error - RMSE) 3.0039 bulunmuş olup, bu sonuç İHA görüntüleri ile meşcere parametrelerinin başarıyla tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Otera ve diğ. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, İHA görüntüleri ve SfM yöntemi ile üretilen nokta bulutundan örnek meşcereler için KYM elde edilmiş ve ardından biyokütle tahminleri yapılmıştır. Daha sonra, Photoscan yazılımı ile ortomozaik ve Sayısal Yüzey Modeli (SYM) üretilerek, ağaç boyu bilgisi tahmin edilmiştir.

KYM'nin işlenmesi sırasında R'deki "rLidar" paket programı kullanılmıştır. Biyokütle (V) hesaplamalarında, ağaç boyu ile biyokütle arasındaki ilişkiden yararlanan allometrik denklem (R^2=0,75) kullanılmıştır; $AGB = 23,5 - 6,5H + 0.8H^2$.

Diğer bir çalışmada Zhou ve Zhang (2020), farklı çam türü meşcerelerinden İHA ile alınan yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanılarak, SfM yöntemi ile uçuş alanı için ortofoto görüntüler ve 3B nokta bulutları oluşturulmuştur. Ters mesafe ağırlıklandırması (Inverse Distance Weight-IDW) enterpolasyonuyla üretilen SYM ve Sayısal Arazi Modeli (SAM) ile KYM elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, havza (WATERSHED) segmentasyonu, nokta bulutu segmentasyonu (point cloud segmentation-PCS) ve nesne tabanlı çoklu-çözünürlük segmentasyonu (object-oriented multiresolution segmentation-MRS) yöntemleri kullanılarak 188 yaşlı karaçam, 139 genç karaçam, 64 yaşlı Çin çamı ve 117 genç Çin çamı için ağaç parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, regresyon modelleri kullanılarak her bir örnek ağaç için biyokütle modelleri oluşturulmuş ve modellerin doğruluğu değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, segmentasyon yöntemlerine ait belirleme katsayılarının (R^2) tümü 0,8'den büyük bulunmuştur. Bu durum, İHA görüntülerinin bireysel ağaç parametrelerinin yüksek doğrulukta belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Castellanos-Galindo ve diğ. (2021) meşcere özelliklerinin tahmininde yersel ölçümlerle İHA tabanlı ölçümlerin karşılaştırılmasını incelemiştir. DJI Phantom Mavic Pro kullanarak 100 metreden alınan görüntüler kullanılarak Agisoft Metashape programında nokta bulutu ve ortomozaik üretilmiştir. Yersel ölçümler sırasında örnek ağaçların göğüs yüksekliği çapı ve boy ölçümleri yapılmıştır. İHA görüntüleri ile üretilen sayısal yüzey modeli kullanılarak ağaç boyları tahmin edilmiştir. Daha sonra, toprak üstü biyokütle (*V*) hesaplamaları için ağaç boyu (*H*), ağaç çapı (*D*) ve odunun özgül ağırlığına (*p*) bağlı geliştirilen allometrik denklem kullanmıştır; $V = 0,0673(pD^2H)^{0,976}$.

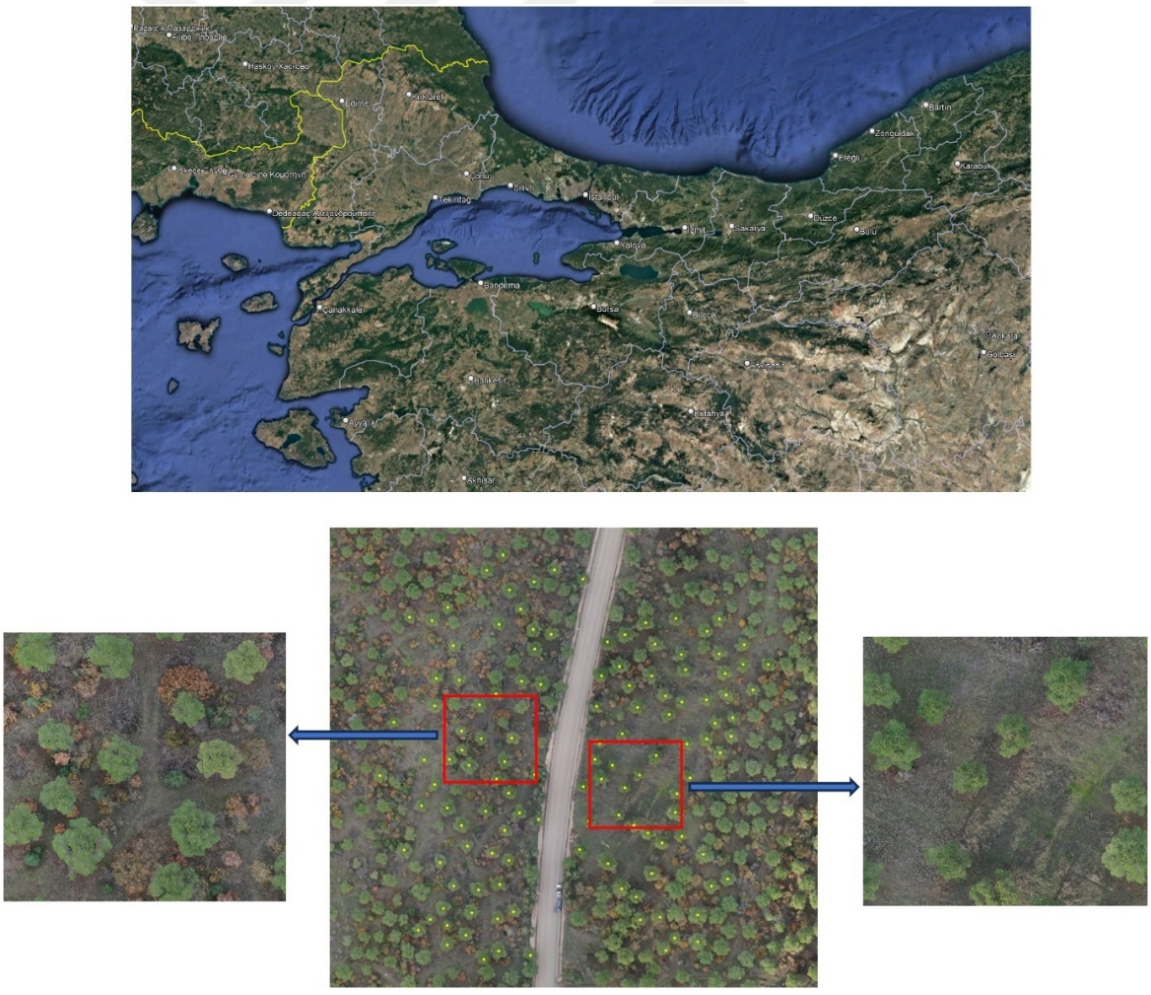
Yan ve diğ. (2023) tarafından Çin'in Yan Nehri Havzasındaki *Robinia pseudoacacia* ormanının İHA görüntüleri elde edilerek, sinir ağı kümeleme algoritması, görsel yorumlama ve mekansal ölçüm yoluyla tepe tacı genişliği ve ağaç yüksekliği parametreleri belirlenmiştir. Tepe tacı genişliğinin belirlenen değeri ile ölçülen değeri arasındaki bağıl hata %5,98, ağaç yüksekliğinin bağıl hatası ise %7,53 bulunmuştur. Tekli regresyon modelleri, üstel fonksiyon modelleri, logaritmik fonksiyon modelleri,

güç fonksiyonu modelleri ve ikili regresyon modelleri oluşturmak için tepe tacı genişliği, ağaç yüksekliği ve göğüs yüksekliği çapının belirlenmesi amacıyla verilerin %80'i kullanılmıştır. Kurulan ağaç çapı çözüm modelleri arasında en yüksek uyum doğruluğuna sahip modelde belirleme katsayısı 0,85 (R^2) ve ortalama bağıl hata %4,3 bulunmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma, Bursa Orman Bölge Müdürlüğü, Bursa Orman İşletme Müdürlüğü, Kayapa İşletme Şefliği sınırlarında yer alan farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip fıstık çamı (*Pinus pinea*, L.) meşceresinde (Çfb3) yürütülmüştür. Toplam alanı 197.547,6 hektar olan Bursa Orman İşletme Müdürlüğünün %40'ını (79.889,6 hektar) ormanlık alan, %60'ını (117.658,0 hektar) açıklık alan oluşturmaktadır. Ormanlık alanın %77'i (61.659,1 hektar) normal koru, %23'ü (18.230,5 hektar) bozuk koru niteliğindedir.



Şekil 2.1 : Çalışma alanı.

2.2 Kullanılan Araçlar

Çalışmada 3B veriler, DJI Mavic 2 Pro model İHA kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.2). Yer kontrol noktalarının coğrafi konum bilgilerini belirlemek için Pentax G3100-R1 model GNSS-GPS cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.3). Meşcere parametrelerinin yersel ölçümlerle belirlenmesi aşamasında, Blume-Carl Leiss model hipsometre kullanılarak ağaç boyları ölçülmüştür. Çap ölçümleri için Haglöf model kumpas, uzunluk ve mesafe ölçümleri için ise Leica Disto A5 model lazer mesafe ölçer kullanılmıştır.



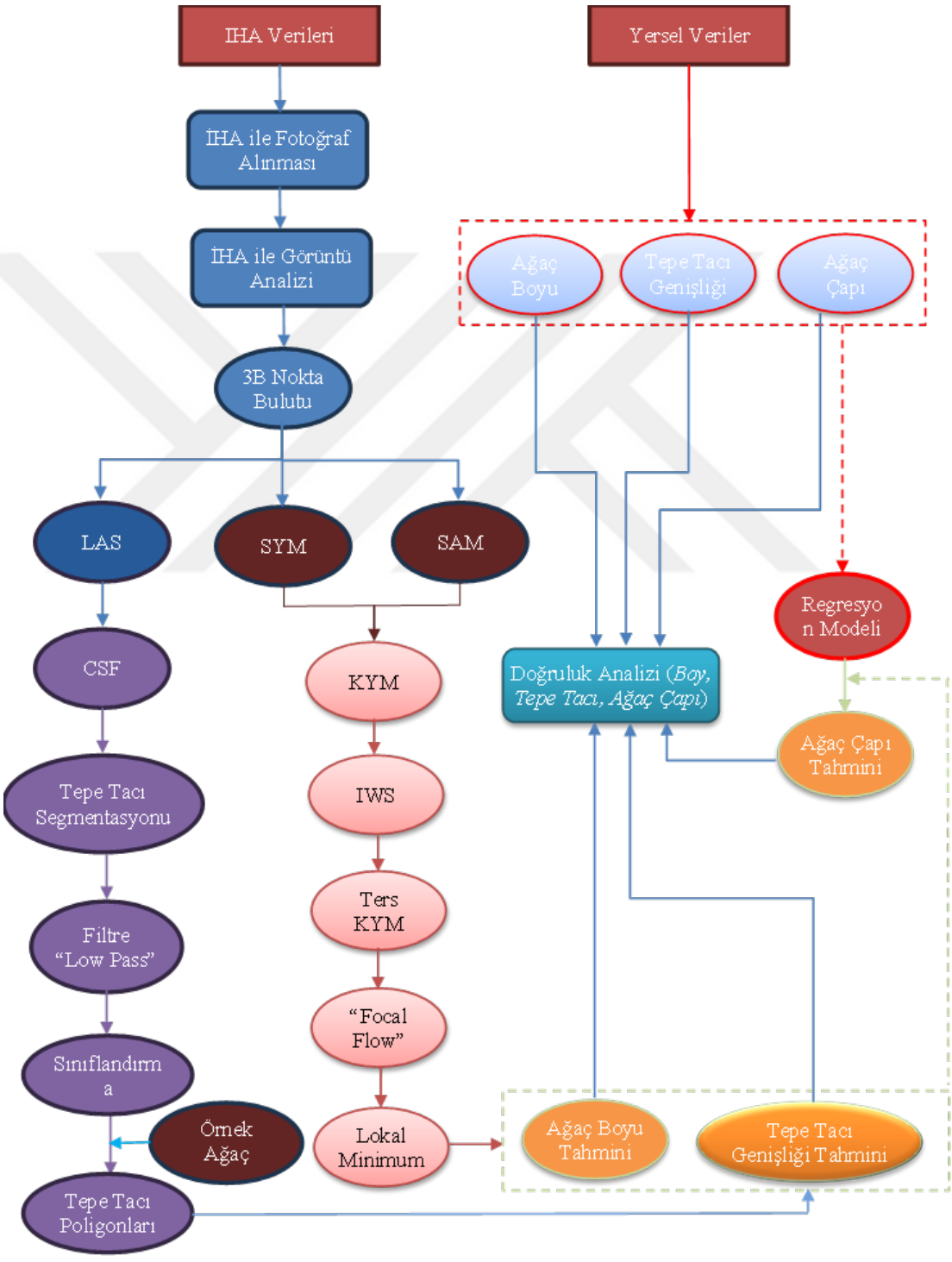
Şekil 2.2 : DJI Mavic 2 Pro model İHA.



Şekil 2.3 : Ölçümlerde kullanılan cihazlar; a) Pentax G3100-R1 GNSS GPS, b) Blume-Carl Leiss model hipsometre, c) Leica Disto A5 model lazer mesafe ölçer, d) Haglöf model kumpas.

2.3 Yöntem

Yöntem bölümü dört aşamadan oluşmaktadır; 1) yersel ölçümler, 2) İHA fotoğraflarının alınması, 3) İHA görüntülerinin analizi, 4) İHA-tabanlı meşcere parametreleri tahmini ve 5) istatistiksel analizler ve doğruluk analizi. Metodolojiye ait akış diyagramı Şekil 2.4'de verilmiştir.

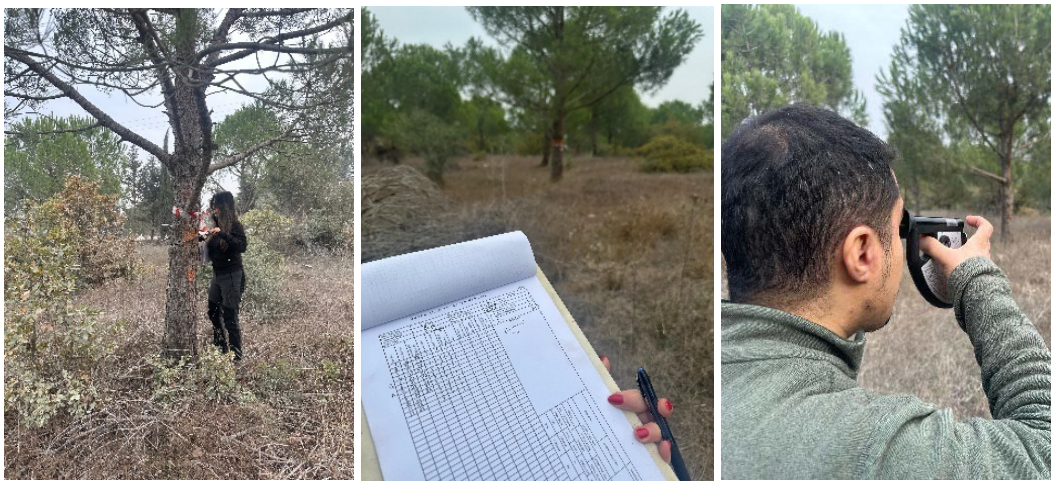


Şekil 2.4 : Akış diyagramı.

2.3.1 Yersel ölçümler

Bu çalışmada, farklı diri örtü yoğunluğu koşullarında meşcere parametrelerinin belirlenmesinde İHA görüntüleri tabanlı yöntemin etkinliği araştırmak amacıyla Kayapa İşletme Şefliği sınırlarından seçilen farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip iki örnek alanda, 40'ar ağaç olmak üzere, toplam 80 ağaçta ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her örnek alandan seçilen 40 ağacın, ağaç boyu, ağaç çapı (göğüs yüksekliği çapı - yerden 1,3 m yukarıda) 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 (Van Laar ve Akça, 2007). Sahada toplanan boy, ağaç çapı ve taç genişliği verilerini veri kaydı formlarına kaydedilmiştir (Şekil 2.5).

Ağaçların kök boğazı ile en üstteki sürgün ucu arasındaki uzunlukları, ağaçtan en az 15-20 m mesafedeki alt ve üst okumalara dayalı olarak Blume-Leiss ile ölçülmüştür. Ağaçların çapı ve tepe tacı genişliği için ikişer ölçüm yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması dikkate alınmıştır (Şekil 2.6). Örnek ağaçlara numara verilmiş ve her ağaca ait ölçümleri (boy, ağaç çapı ve taç genişliği) ve koordinat bilgileri (WGS84 UTM Zone 35N) MsExcel sayfasına kaydedilmiştir. Daha sonra, ArcGIS 10.8 ortamında örnek ağaçların konumlarını ve ölçüm değerlerini içeren ".shape" dosyası üretilmiştir.



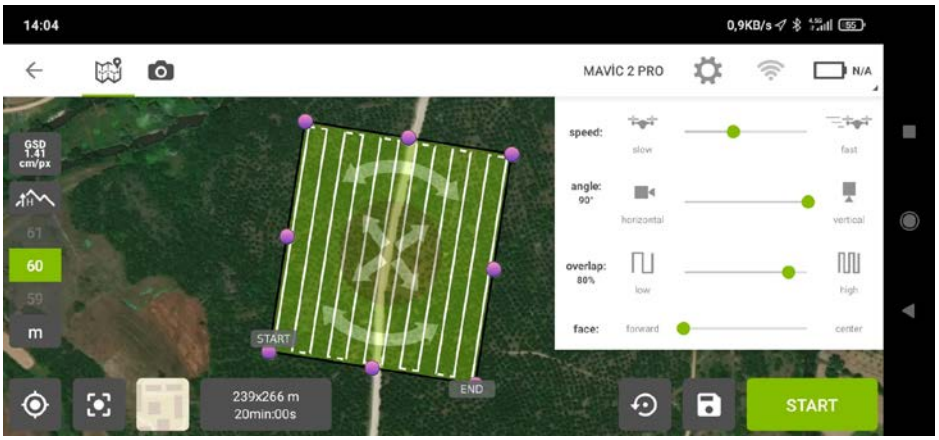
Şekil 2.5 : Yersel ölçümlerden görüntüler.



Şekil 2.6 : Tepe tacı ölçümünü gösteren diyagram.

2.3.2 İHA fotoğraflarının 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 60 m, uçuş alanı 239 m x 266 m, fotoğrafın ileri ve yan bindirme oranları %80 ve lokal çözünürlük ise 1,41 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 7). Uçuş tek ızgara uçuş planına göre gerçekleştirilmiştir. İHA ile elde edilen görüntülerden yüksek doğrulukla veri üretimi amacıyla uçuştan önce çalışma alanında toplam altı yer kontrol noktası (YKN) kurulmuştur (Zimmerman ve diğ, 2020). Noktaların yerleştirildiği konumlarda görüşün açık olmasına, yansıtıcı etkiye sebep olabilecek bir obje olmamasına ve noktaların çalışma alanında homojen bir dağılım göstermesine dikkat edilmiştir. YKN, fotogrametrik değerlendirme aşamasında net görüntülenebilmesi için 50 cm x 50 cm boyutlarında tasarlanmıştır. YKN'nın coğrafi konum bilgileri Pentax G3100-R1 model GNSS-GPS cihazı ile 50 cm hassasiyetle ölçülmüştür (Şekil 2.8, 2.9). Coğrafi referans sistemi olarak WGS84 UTM Zone 35N kullanılmıştır. Uçuş, Ekim ayında öğle saatlerinde, bulutlu bir havada ve ortalama rüzgar hızının 4 m/s olduğu bir ortamda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7 : Uçuş planı ekran görüntüsü.



Şekil 2.8 : Yer kontrol noktası.

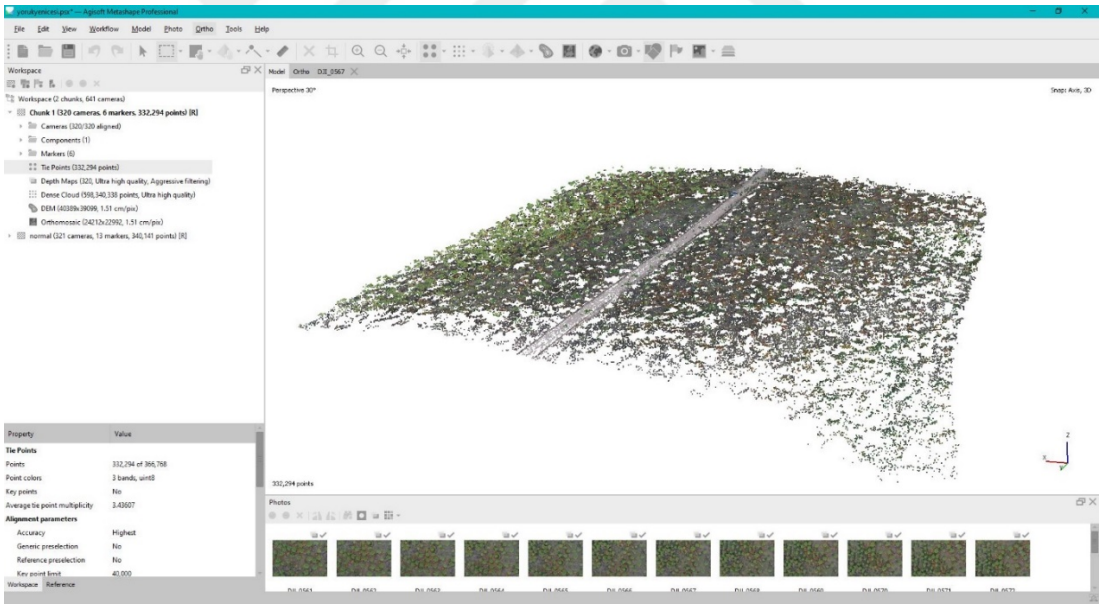


Şekil 2.9 : Yer kontrol noktalarının koordinatlarının ölçülmesi.

2.3.3 İHA görüntülerinin analizi

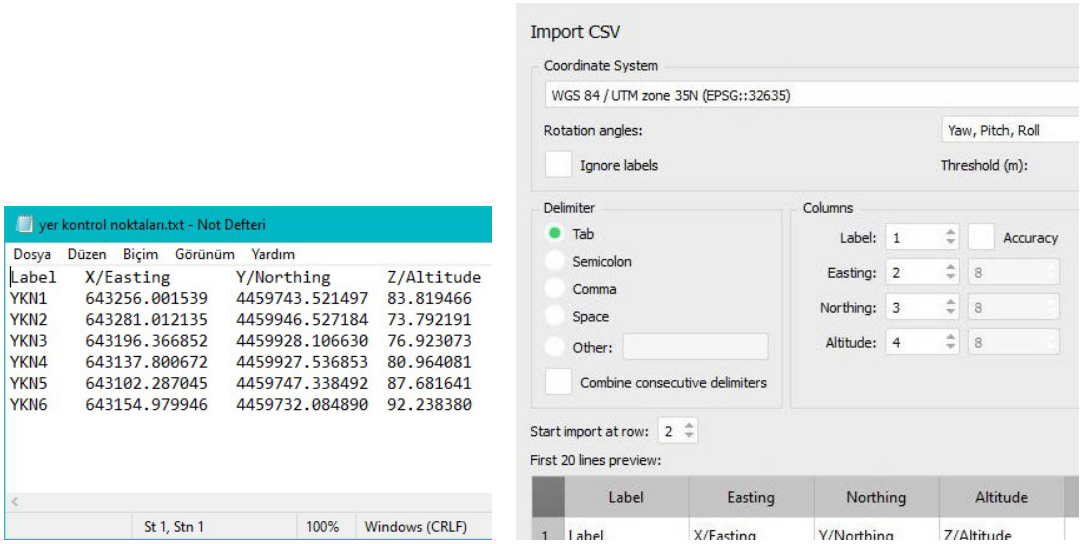
2.3.3.1 3B nokta bulutunun üretilmesi

Çalışma alanından çekilen fotoğraflar (toplam 320 adet) Agisoft Metashape 1.8.3 (Petersburg, Rusya) yazılımı ile SfM yöntemine göre işlenmiştir (Agisoft LLC, 2022) (Kaiser ve Damarany, 2017). İlk olarak, "Reference" sekmesi ile açılan "Settings" penceresinde çalışma alanının koordinat ve projeksiyon bilgileri (WGS84 UTM Zone 35N ve EPGS: 32635) girilmiştir. Çekilen fotoğraflar "Workflow" menüsü altında yer alan "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 Protos" kullanılarak fotoğrafların hizalama işlemi yapılmış ve böylece anahtar noktaları (Key point) ve bağlantı noktaları (Tie point) oluşturulmuştur (Şekil 2.10). Bu işlemde, doğruluk (accuracy) seviyesi olarak en yüksek (highest) seçilmiş, anahtar noktası (4000) ve bağlantı noktası (4000) için önerilen standart değerler kullanılmıştır.



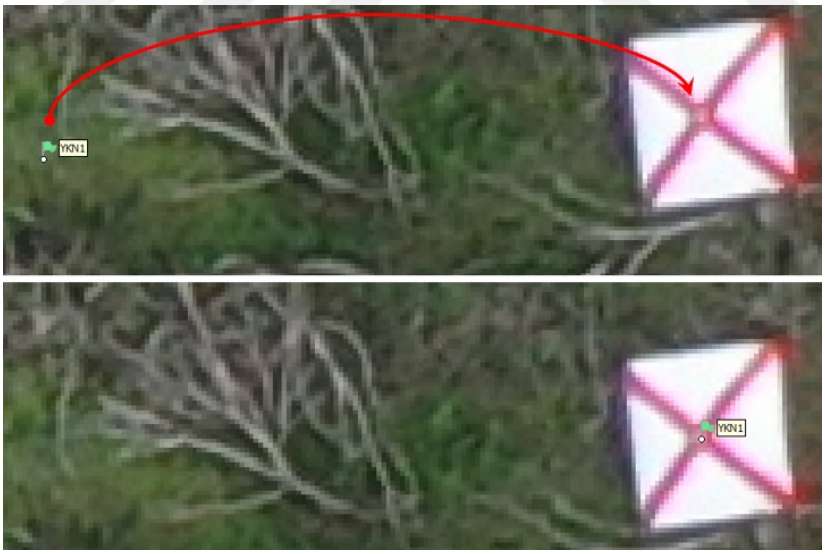
Şekil 2.10 : Bağlantı noktaları (Tie point) görüntüsü.

Fotoğrafların koordinatlarının dengelenmesi amacıyla YKN'nın koordinat bilgileri programa yüklenmiştir. Bu işlem için YKN'nın koordinat bilgilerini içeren bir metin dosyası üretilmiş ve "Reference" sekmesi altında "Import Reference" aracıyla bu dosya programa yüklenmiştir (Şekil 2.11). Bu aşamada gerekli ayarlar ve düzenlemeler "Import CSV" penceresinde yapılmaktadır.

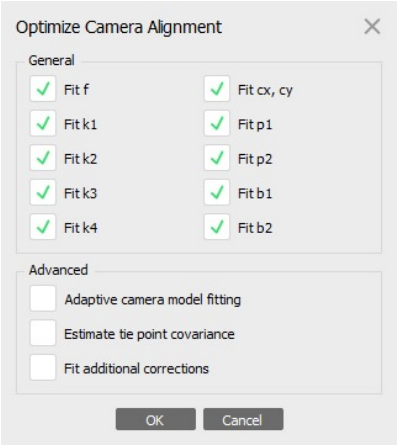


Şekil 2.11 : YKN verilerini içeren metin dosyası ve "Import CSV" penceresi.

Daha sonra, YKN için "Filter Photos by Markers" aracı kullanılarak fotoğrafların koordinatları dengelenmiştir. Bu amaçla, YKN'nın yer aldığı fotoğraflardan bazıları açılarak (en az üç fotoğraf), her birindeki YKN olması gerektiği konuma taşınmıştır (Agisoft LLC, 2022) (Şekil 2.12). Son olarak, YKN'nın fotoğraflar üzerinde işaretlenmesinden sonra "Reference" sekmesi ile açılan "Optimize Cameras" aracıyla bütün YKN için kamera optimizasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12 : YKN'nın fotoğraflar üzerinde işaretlenmesi.



Şekil 2.13 : YKN için "Optimize Cameras" ile kamera optimizasyonu.

Agisoft Metashape 1.8.3 ile yapılan işlemlere ait raporu üretmek için "File" menüsü altında "Export" sekmesinde yer alan "Generate "Report" aracı kullanılmıştır. Fotogrametrik değerlendirme sırasında kullanılan YKN'nın kalibrasyon katsayıları ve korelasyon matrisi sırasıyla Çizelge 2.1'de verilmiştir. YKN'nın koordinat hataları ise Çizelge 2.2'de sayısal olarak verilmiştir. Kontrol noktalarına göre konum hataları, $RMSE_{XY}$ ve $RMSE_{Z}$ için sırasıyla 0,928 mm ve 1.618 mm ve $RMSE_{TOTAL}$ için ise 1,865 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2.1 : YKN'nın kalibrasyon katsayıları ve korelasyon matrisi.

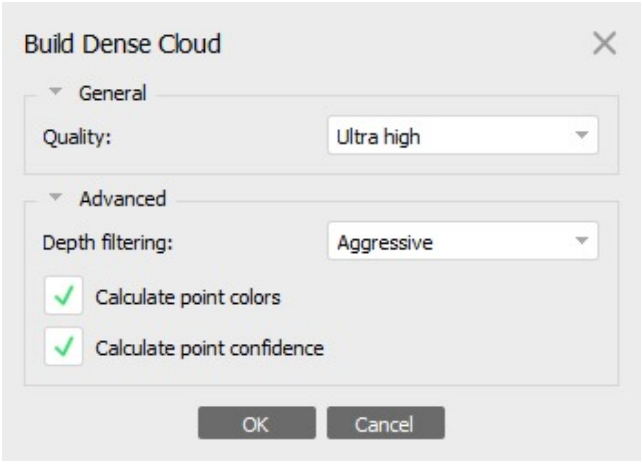
	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4214,5	2,5	1,00	0,95	0,44	0,31	0,20	-0,32	0,06	-0,69
Cx	4,39942	0,091		1,00	0,42	0,30	0,18	-0,31	0,18	-0,66
Cy	-35,2463	0,027			1,00	0,14	0,09	-0,14	0,04	-0,05
K1	0,00894945	4,8e-05				1,00	-0,31	0,25	0,43	-0,22
K2	0,00657897	8,5e-05					1,00	-0,97	-0,01	-0,13
K3	-0,00926599	0,00011						1,00	0,00	0,22
P1	-0,000403471	1,5e-06							1,00	-0,07
P2	-0,00206454	1,7e-06								1,00

Çizelge 2.2 : YKN'nın koordinat hataları.

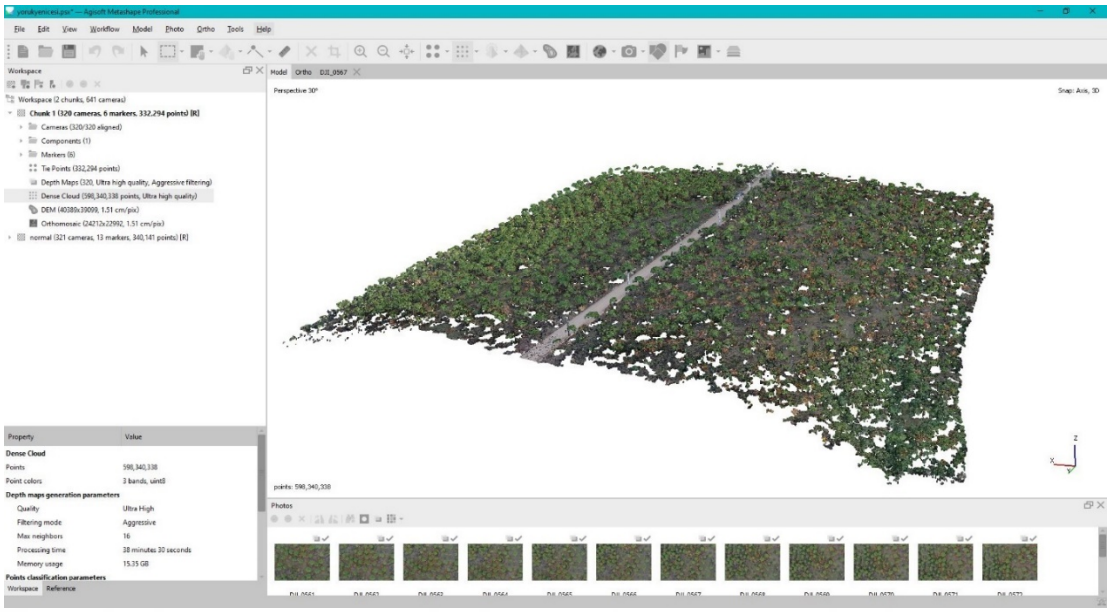
Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
YKN1	0,0447752	-0,0183619	2,25787	2,25839	46,126 (17)
YKN2	-0,0990748	-0,144803	-3,61451	3,61877	67,050 (20)
YKN3	-0,0332213	0,0290998	-2,18763	2,18807	25,722 (29)
YKN4	-0,044639	0,00710713	0,607467	0,609147	9,685 (23)
YKN5	0,0990222	-0,0140772	5,24514	5,24609	79,575 (21)
YKN6	0,264101	-0,330199	5,03669	5,05441	184,573 (12)
Total	0,12548	0,148005	3,56364	3,56892	75,161

2.3.3.2 Sayısal modellerin üretilmesi

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 (Şekil 2.14). Nokta bulutunun oluşturulmasında bilgisayar performansı 38,5 dakika sürmüştür. En yüksek kalite seviyesi seçilerek gerçekleştirilen bu aşamada, 63574 m^2 çalışma alanı içerisinde toplam 598340338 adet 3B nokta oluşturulmuştur. Verilerin ortalama yoğunluğu ise birim alanda (m^2) 9411 noktadır (Şekil 2.15).

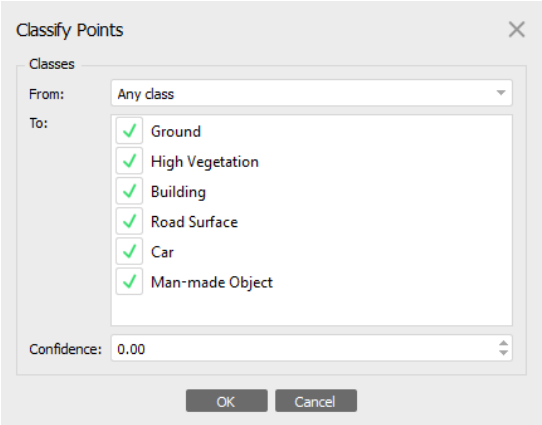


Şekil 2.14 : Nokta bulutu oluşturma ayarları.

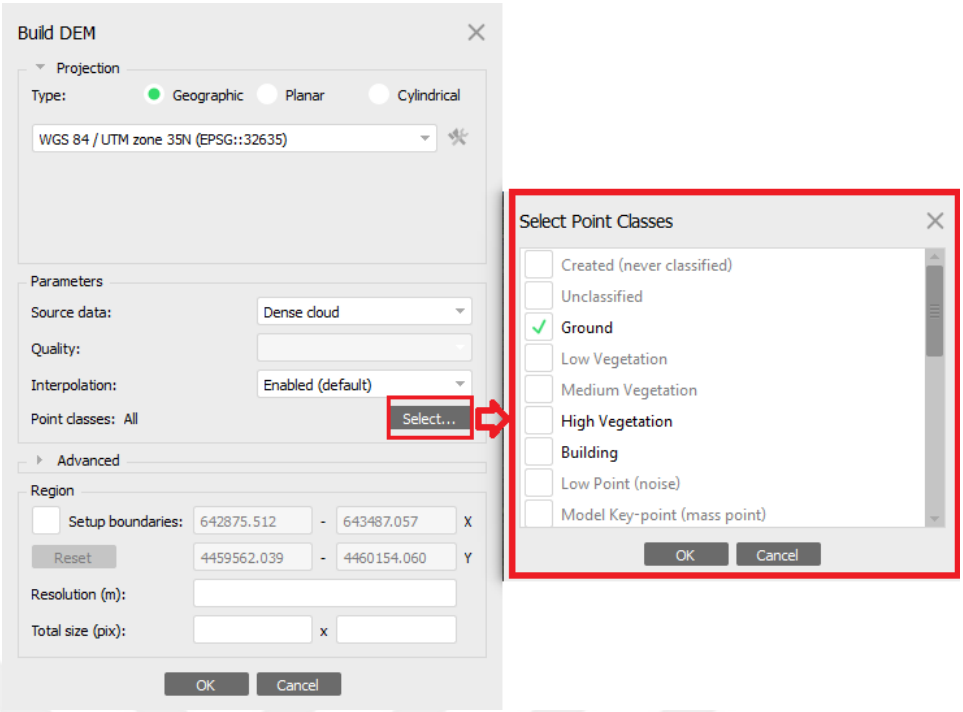


Şekil 2.15 : Yoğun nokta bulutu görseli.

Yoğun nokta bulutu oluşturulduktan sonra yer yüzeyi, vejetasyon, binalar, yollar, araçlar vb. nesnelerin ayırt edilebilmesi için otomatik sınıflandırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem "Tools" menüsünde yer alan "Dense Cloud" sekmesinin altındaki "Classify Points" aracı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.16). Sınıflandırma işlemi yaklaşık 23 dakika sürmüştür. Bu işlemin ardından SYM ve SAM üretimi için nokta bulutu hazır hale gelmiştir. SYM üretimi için "Workflow" altında yer alan "Build DEM" aracı kullanılmıştır. Bu aşamada "Build Dem" penceresinde varsayılan değerlerde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır (Şekil 2.17). SAM üretiminde ise farklı olarak sınıflandırılmış nokta bulutu üzerinden yalnızca "Ground" seçilerek işleme devam edilmiştir. Burada yalnızca yer yüzeyine ait kısımlardan model üretimi söz konusu olduğu için "Ground" dışındaki diğer sınıflar seçilmemiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2.16 : Yoğun nokta bulutunun sınıflandırılması.



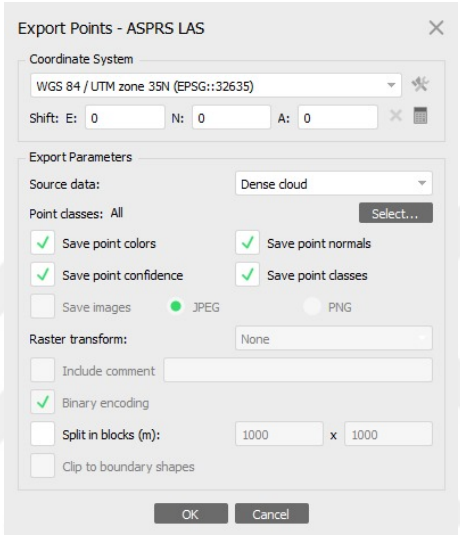
Şekil 2.17 : SYM ve SAM üretim aşaması.

SYM ve SAM üretildikten sonra diğer aşamalarda kontrol katmanı olarak kullanılması için ortomozaik üretilmiştir (Şekil 2.18). Ortomozaik üretimi için "Workflow" altında yer alan "Build Orthomosaic" aracı kullanılmıştır. Bu işlem yaklaşık 7 dakika sürmüştür.



Şekil 2.18 : Ortomozaik.

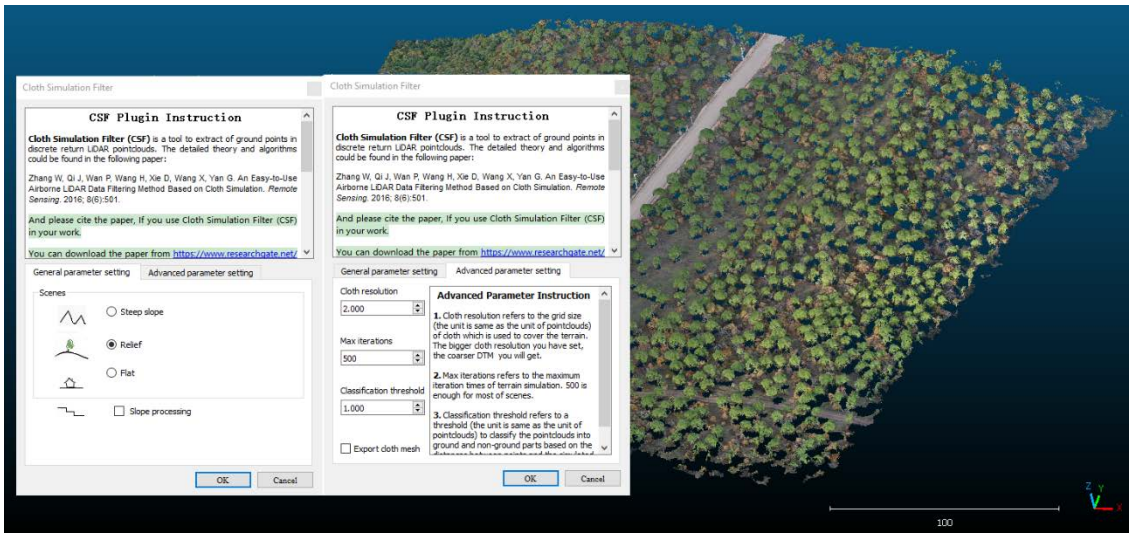
Agisoft Metashape 1.8.3 programında son olarak nokta bulutu metin veri formatında kaydedilmiştir. Bir sonraki aşamada kullanılan CloudCompare 2.13.1 programına uygun veri formatı olması açısından ".las" (Lidar LASer) formatı tercih edilmiştir. Bu işlem için "Dense Cloud" katmanına sağ tıklanarak menüden "Export Dense Cloud" aracı seçildikten sonra açılan pencerede dosyanın kaydedileceği konum belirlenmiş ve dosya tipi olarak ".las" seçilmiştir. Sonraki aşamada ise "Export Points" penceresi açılmış ve burada varsayılan ayarlar kullanılarak nokta bulutu kaydedilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : Nokta bulutunun kaydedilmesi.

2.3.3.3 Tepe tacı görüntüsünün üretilmesi

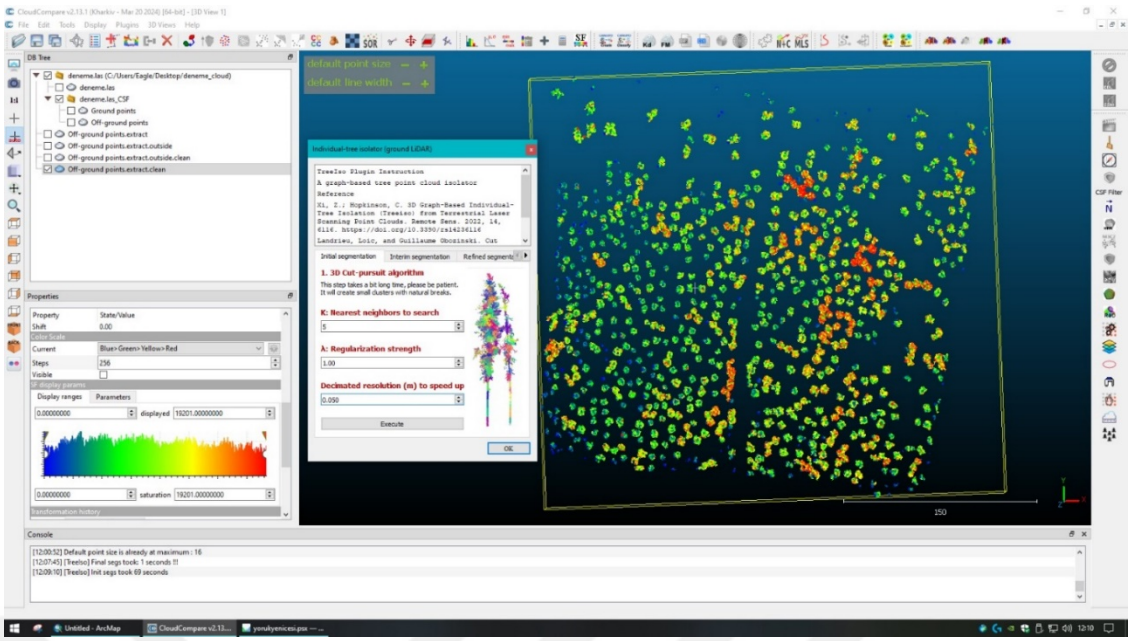
CloudCompare 2.13.1 programı kullanılarak çalışma alanındaki ağaçların tepe tacı görüntüsü elde edilmiştir. Bu işlem için ilk olarak nokta bulutu dosyası (".las") programda açılmış ve "Plugins" menüsü altında yer alan "CSF Filter" (Cloth Simulator Filter) aracı kullanılmıştır. Eğimli bir arazide uçuş yapıldığı için açılan pencerede "Relief" seçeneği işaretlenmiş ve parametre kısmında varsayılan değerler kullanılmıştır. Bu aşamada özellikle tepe çatısı altında kalan orman diri örtüsünün nokta bulutundan elimine edilmesi için "Classification threshold" fonksiyonu kullanılarak bir eşik yükseklik değeri tayin edilmelidir. Böylece, bu eşik değerinin altında kalan vejetasyon nokta bulutundan çıkarılmış olacaktır. Bu çalışmada, arazi gözlemleri sırasında çalışma alanı bitki örtüsü durumuna göre eşik değeri bir metre olarak alınmıştır (Şekil 2.20).



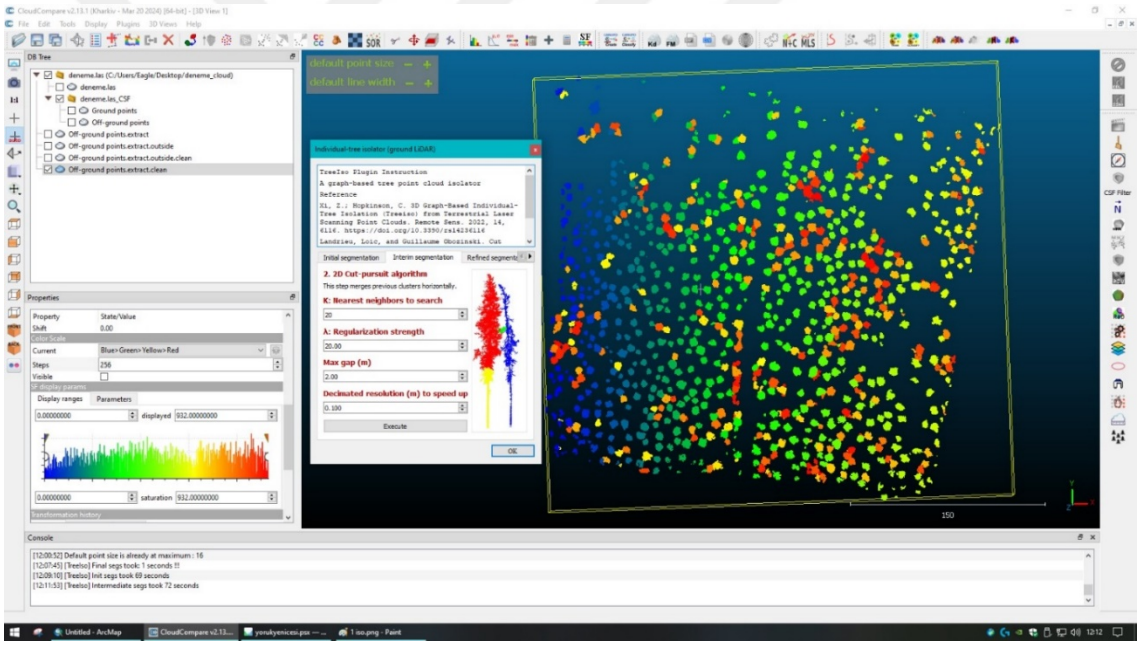
Şekil 2.20 : "Cloth Simulator Filter" işlem aşaması.

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. Bu aşamada, ilk olarak "Initial Segmentation" aracı ile tepe taçları komşuluk ilişkilerine göre küçük kümelere ayrılmıştır (Şekil 2.21). Daha sonra, "Interim Segmentation" aracı ile bu kümeler en yakın ilgili tepe tacına atanmıştır (Şekil 2.22). Son olarak, "Refined segmentation" aracı ile tepe tacı görüntüsünde oluşan boşluklara ve örtüşme oranına dayalı olarak nihai görüntü iyileştirmeleri yapılmıştır. Böylece, çalışma alanındaki ağaçların tepe taçları bireysel olarak ayrıştırılmış ve tepe taçlarının daha net bir görüntüye sahip olduğu segmentasyon görüntüsü üretilmiştir (Şekil 2.23).

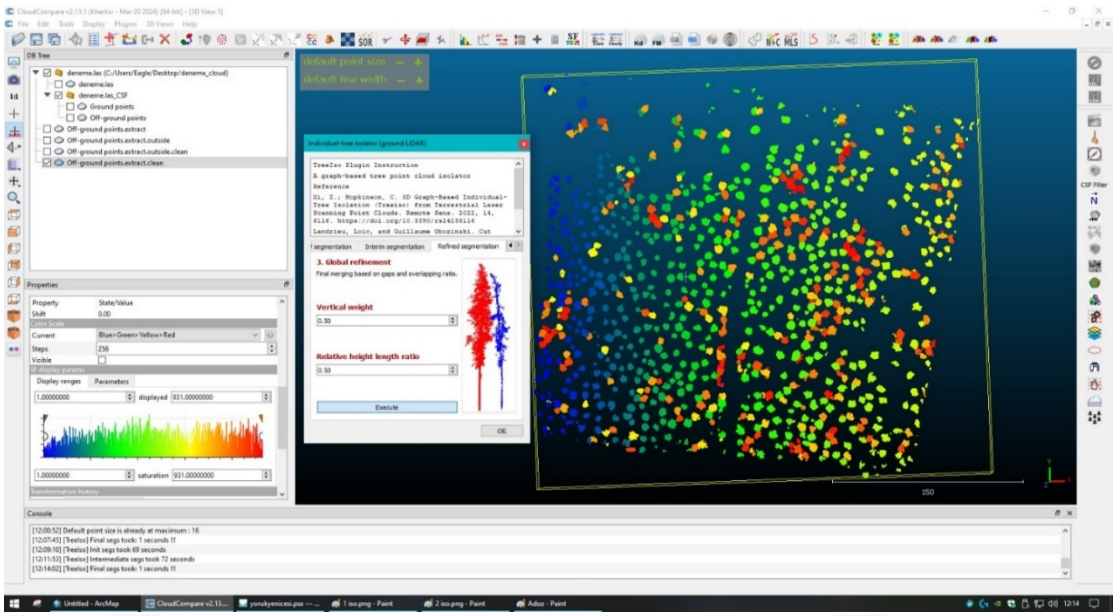
Son olarak, tepe tacı segmentasyonu görüntüsü, "Tools" menüsünde bulunan "Projection" sekmesindeki "Rasterize" aracı kullanılarak raster veri formatına (".tif") dönüştürülmüştür. Bu işlem sırasında, "Active Layer" sekmesinde bir önceki aşamada üretilen tepe tacı segmentasyon görüntüsü kullanılmıştır. Ayrıca, tepe taçları arasında mevcut boşlukları enterpolasyon yöntemiyle doldurmak için "Fill with" sekmesinde "Interpolate" seçilmiş ve üçgenlerin maksimum kenar uzunluğu (Triangles max edge length) için en iyi sonucu veren 0,8 değeri kullanılmıştır. "Step" bölümünde piksel boyutu olarak 0,01 (1 cm) belirlenmiş ve tepe taçlarının tepeden görüntüsünü üretmek için "Direction" bölümünde Z ekseni seçilmiştir (Şekil 2.24).



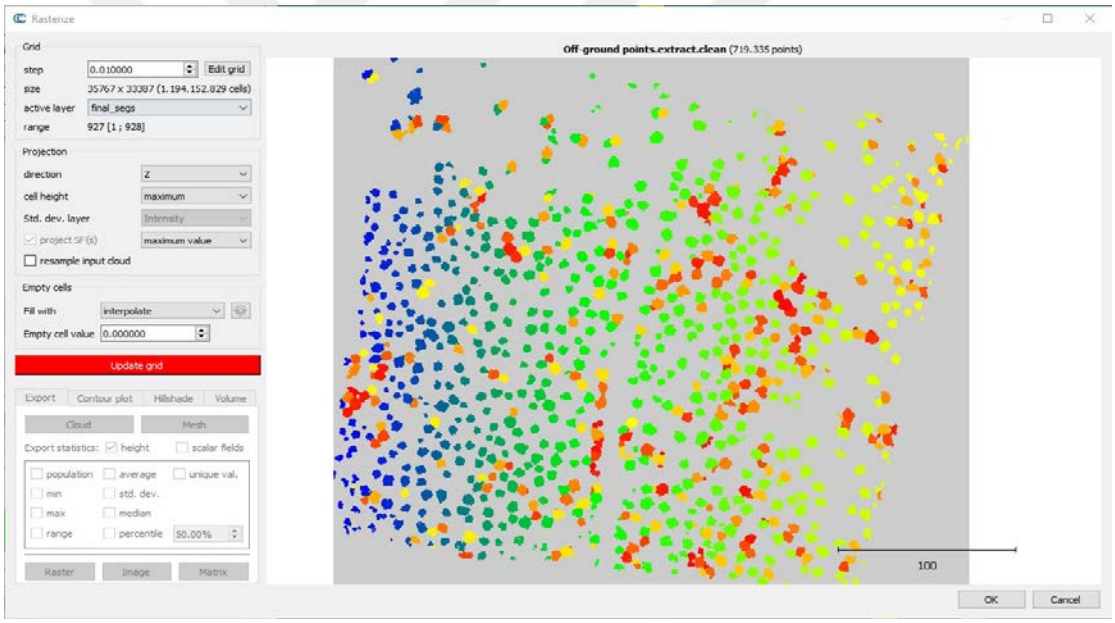
Şekil 2.21 : "Initial Segmentation" aracı ile tepe taçlarının küçük kümelere ayrılması.



Şekil 2.22 : "Interim Segmentation" aracı ile bu kümelerin en yakın tepe tacına atanması.



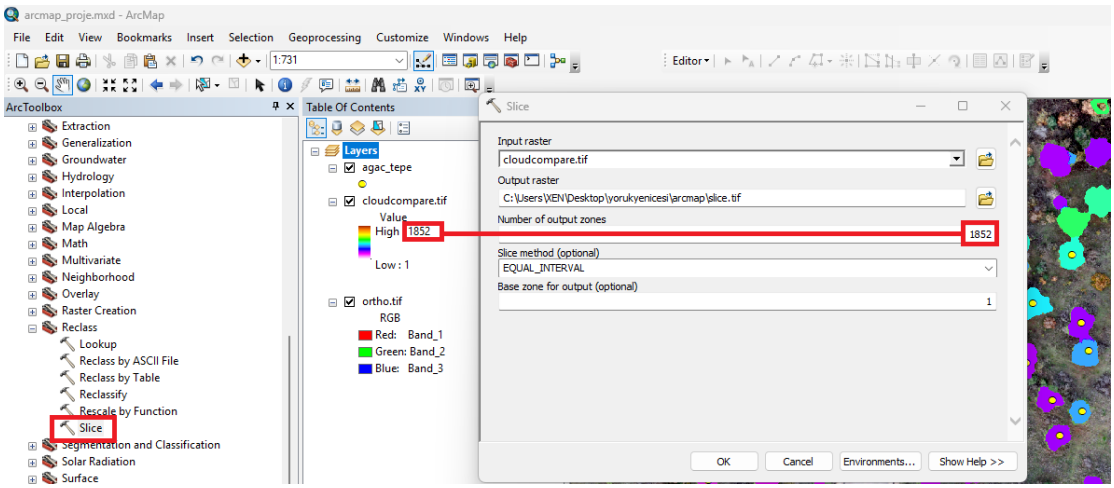
Şekil 2.23 : "Refined segmentation" aracı ile tepe tacı görüntülerinde iyileştirmelerin yapılması.



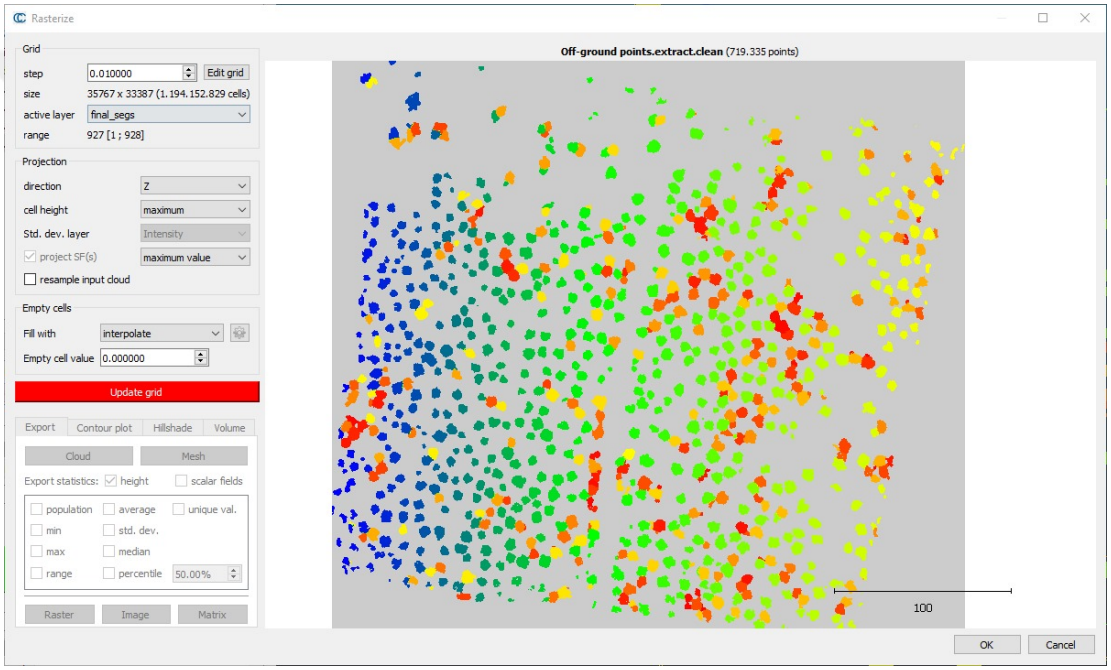
Şekil 2.24 : CloudCompare'de nokta bulutundan üretilen tepe tacı raster görüntüsü.

2.3.3.4 Tepe tacı poligonlarının üretilmesi

CloudConpare kullanılarak üretilen tepe tacı raster görüntüsündeki gürültü etkisini düşürmek ve yüksek frekans bileşenlerini azaltmak amacıyla, ilk olarak ArcGIS 10.8 ortamında "Neighborhood" altındaki "Filter" aracında "Low pass" (alçak geçirgen) filtresi kullanılarak tepe tacı görüntüleri yumuşatılmıştır. Daha sonra, "Reclass" altında "Slice" aracı kullanılarak yumuşatılan görüntü sınıflandırılmıştır (Şekil 2.25 ve Şekil 2.26). İşlem sırasında "Number of output zones" satırına toplam piksel değeri (1852) girilmiştir.

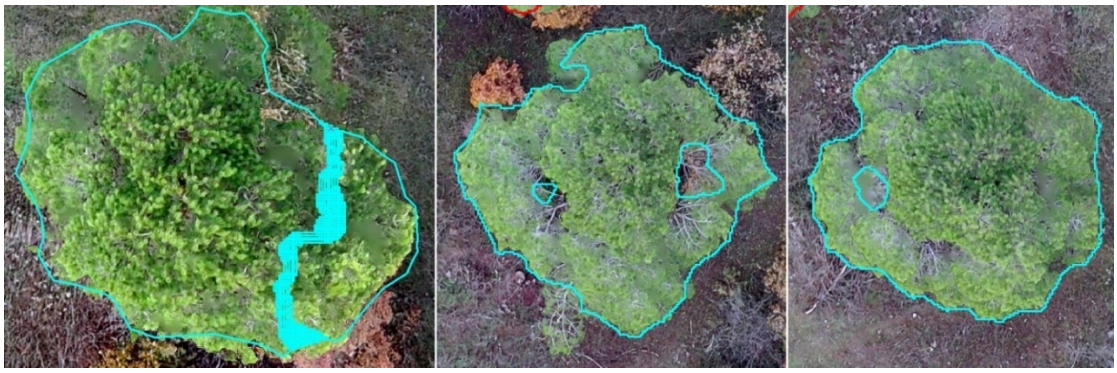


Şekil 2.25 : Tepe tacı raster görüntüsünün filtrelenmesi.

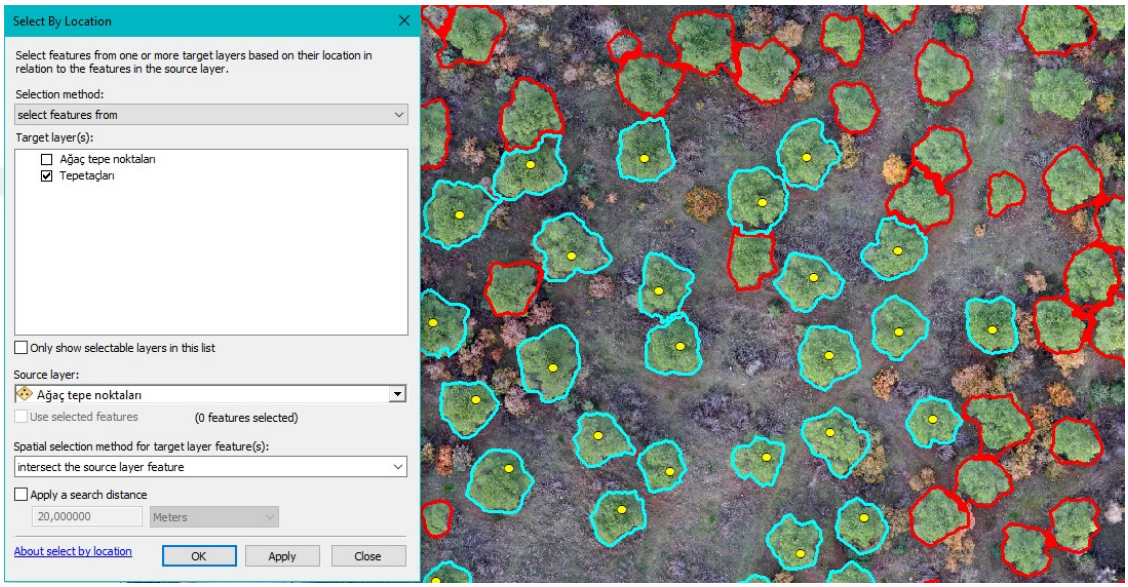


Şekil 2.26 : Tepe tacı raster görüntüsünün sınıflandırılması.

Sınıflandırılan tepe tacı raster görüntüsü vektör formatına dönüştürülerek tepe tacı poligonları üretilmiştir. Oluşturulan tepe taçları incelendiğinde, bir tepe tacında hatalı bölümleme ve iki tepe tacında boşluk oluştuğu görülmüştür (Şekil 2.27). "Coverage" ve "Editor" araçları kullanılarak bu hatalar giderilmiştir. Daha sonra, arazi çalışmaları sırasında meşcere parametreleri ölçülen toplam 80 örnek ağacın görüntüsü üzerinde çalışmak amacıyla, görüntüdeki diğer tepe tacı poligonları silinmiştir. Bu amaçla, örnek ağaçların konumlarını gösteren nokta veri katmanı referans alınarak "Select by location" aracıyla bu noktalarla kesişen tepe tacı poligonları seçilmiş ve "Export" aracıyla yeni bir veri katmanı üretilmiştir (Şekil 2.28).



Şekil 2.27 : Tepe tacı poligonlarında görülen hatalar.



Şekil 2.28 : Örnek ağaçların tepe tacı poligonlarının seçilmesi.

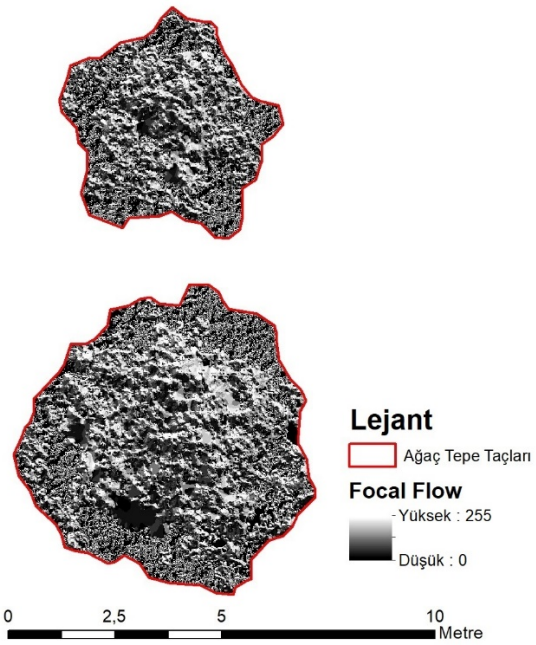
2.3.3.5 Ağaçların tepe noktalarının belirlenmesi

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. Bu yöntem tek bir tepe tacı alanında birden fazla lokal maksimum olma olasılığını ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır (Panagiotidis ve diğ, 2016). Bu yaklaşımda ters KYM'deki her içbükey ağaç tacı bir su toplama havzası olarak kabul edilir. İşlem sırasında, lokal maksimum ve en yakın minimum değerleri tanımlanarak KYM katmanı bireysel drenaj havzalarından oluşan segmentlere bölünür (Edson ve Wing, 2011). Ters Havza Segmentasyonu uygulamasında ilk olarak "RC" kullanılarak tepe tacı yüksekliklerini gösteren

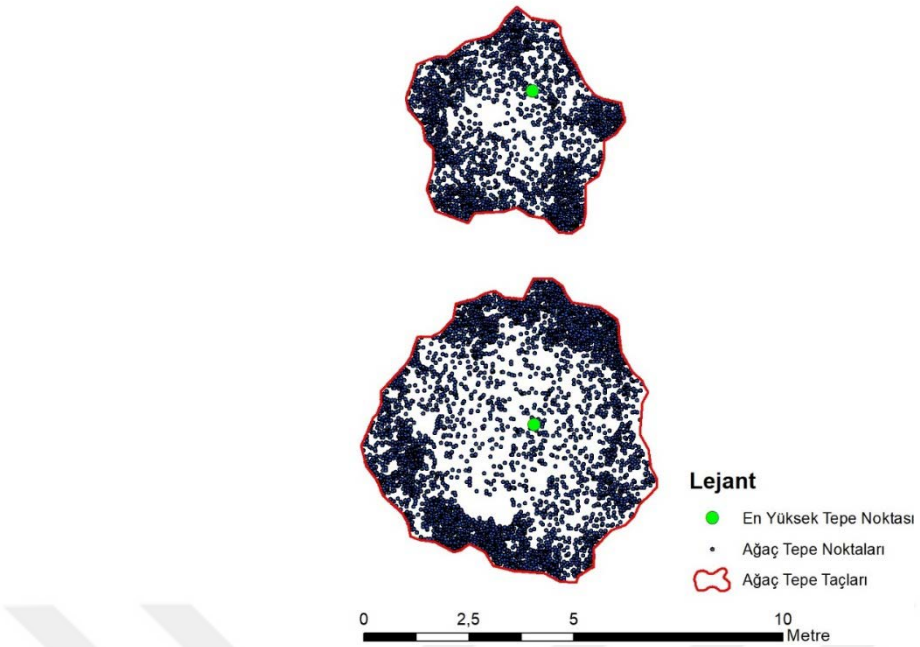
KYM'deki negatif değerler sıfırlanmıştır. Daha sonra, yine "RC" ile bu raster veri katmanı -1 ile çarpılarak ters KYM üretilmiştir. Üretilen bu raster görüntüsünde ağaç tepeleri bir çukur ve ağaç dalları/taçları su havzaları haline gelmiştir.

Sonraki aşamada, her bir tepe tacı için lokal minimum yüksekliği belirlemek amacıyla öncelikle "Neighborhood" altında "Focal Flow" aracı kullanılmıştır. "Focal Flow" aracı, her hücrenin etrafındaki 3 x 3'lük komşuluğu kullanarak, hücrenin sekiz komşusundan hangisinin içine aktığını belirler. Akış, 8 komşu içindeki en yüksek değere sahip herhangi bir hücre tarafından tanımlanmaktadır. "Focal Flow" ile üretilen görüntüde pikseller 0 ile 255 arasında değer almıştır (Şekil 2.29). Daha sonra, 255 ile temsil edilen hücrelere ters KYM veri katmanındaki ağaç yüksekliği değerleri atanmıştır. Bu amaçla "RC" altında yer alan "Con" şartlı önerme fonksiyonu kullanılmıştır (Denklem 2.1). Bu işlem sonucunda her bir ağaç için tepe noktalarını (lokal minimum yükseklikler) gösteren raster veri katmanı elde edilmiştir. Tepe noktaları dışında kalan pikseller ise veri atanmadığından silinmiştir. "RC" ile bu raster veri katmanı -1 ile çarpılarak yükseklik değerleri pozitif hale dönüştürülmüş ve ardından "Coversion" aracıyla nokta veri katmanı olarak kaydedilmiştir. Son olarak, ağaç yüksekliğini belirlemek amacıyla her bir ağaç için tepe noktaları arasından en yüksek tepe noktası seçilmiştir (Şekil 2.30).

$$Con("Focal_Flow.tif" == 255, "ters_KYM.tif") \quad (2.1)$$



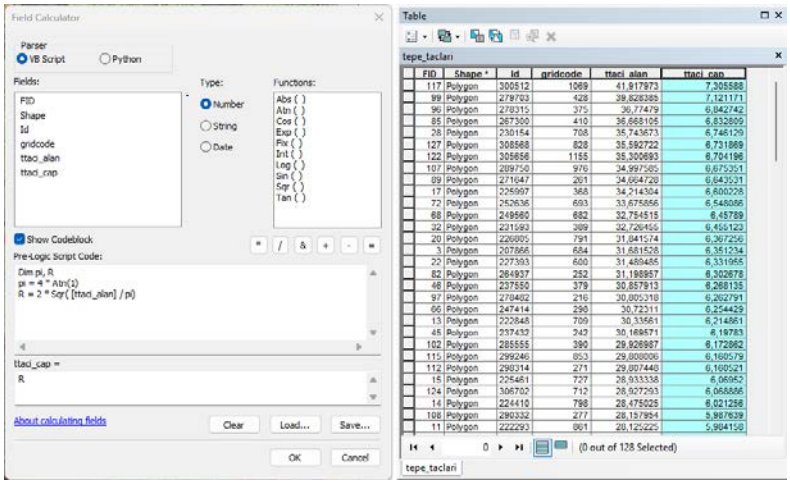
Şekil 2.29 : İki örnek ağacın "Focal Flow" sonrası tepe tacı görüntüsü.



Şekil 2.30 : Ağaç tepe noktalarını ve en yüksek noktayı gösteren nokta veri katmanı.

2.3.4 İHA tabanlı meşcere parametreleri tahmini

Bir önceki bölümde belirlenen 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 (m^2) 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 2.31).



Şekil 2.31 : Tepe tacı genişliği hesabı.

İHA verilerine dayalı ağaç çaplarını belirlemek için KYM kullanılarak tahmin edilen ağaç parametreleri (boy ve tepe tacı genişliği) ile saha ölçüm verileri arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanılmıştır. Bu amaçla meşcere parametrelerinin sahada

ölçülen değerleri kullanılarak, çapın (*d*) bağımsız değişken, boy (*h*) ve tepe tacı genişliğinin (*w*) ise bağımsız değişken olarak kabul edildiği bir regresyon modeli geliştirilmiştir (Denklem 2.2). Daha sonra, bu modele İHA verileri ile hesaplanan ağaç boyu (h_{SfM}) ve tepe tacı genişliği (w_{SfM}) girilerek her bir ağaç için İHA verilerine dayalı ağaç çapı (*d'*) hesaplanmıştır. Denklemde β_0 kesişmeyi, β_1 ve β_2 ise modelin katsayısını temsil etmektedir.

$$d = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 w \tag{2.2}$$

2.3.5 İstatistiksel Analizler ve Doğruluk Analizi

Her bir örnek alan için arazide ölçülen ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri (ağaç boyu, tepe tacı genişliği, ağaç çapı) arasındaki ilişkiler istatistiksel analizlerle incelenmiştir. İstatistiksel analizler SPSS 20 ve MsExcel programları kullanılarak %95 güven düzeyinde ($p<0.05$) gerçekleştirilmiştir. Analizlerde doğrusal ilişkilerin doğruluğunu analiz etmek için R^2 değeri hesaplanmıştır. İHA verileri ile belirlenen meşcere parametrelerinin arazide ölçülen değerlerden farklı olup olmadığını belirlemek için Paired-sample t-testi ve aralarındaki ilişki durumunu belirlemek için korelasyon analizi kullanılmıştır.

Arazide ölçülen ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri arasındaki ölçüm hatasını incelemek için Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE), Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error - MSE) ve Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error - RMSE) hesaplanmıştır (Denklem 2.3-2.5). Bu hesaplamalarda *N* örnek ağaç sayısını, y_i arazi ölçümlerini ve $\hat{y}_i$ ise İHA verileri ile belirlenen değerleri ifade etmektedir.

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|y_i - \hat{y}_i| \tag{2.3}$$

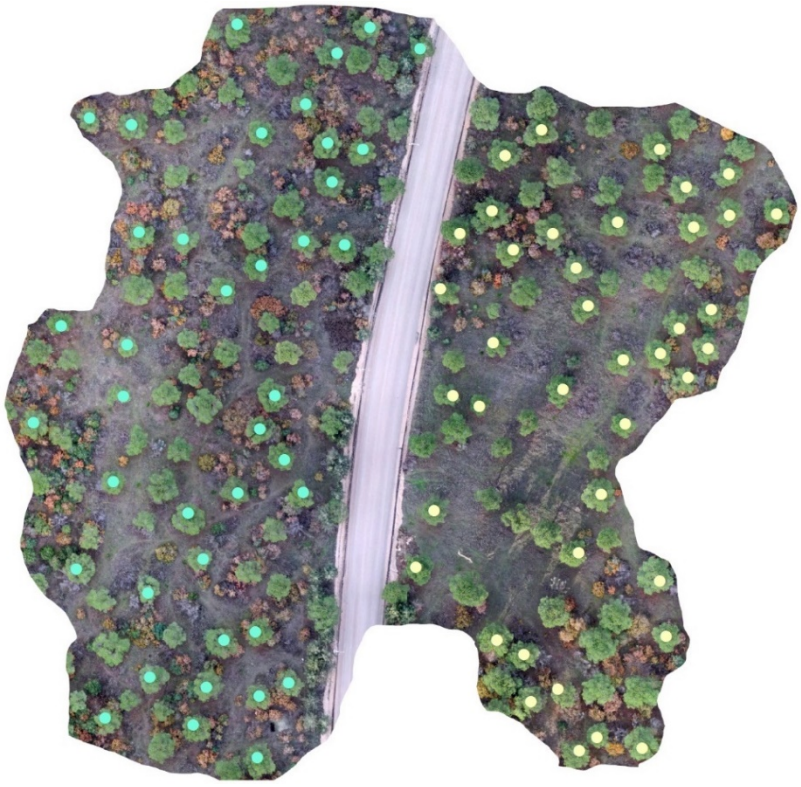
$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_{i)})^2 \tag{2.4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_{i)})^2} \tag{2.5}$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Yersel Ölçüm Bulguları

Farklı diri örtü yoğunluğuna (düşük ve yüksek) sahip iki örnek alanda ölçülen örnek ağaçlara ait koordinat bilgileri (WGS84 UTM Zone 35N) ve meşcere parametreleri yersel ölçümlerle kaydedilmiştir. Şekil 3.1'de örnek ağaçların lokasyonlarını gösteren sayısal veri katmanı verilmiştir. Örnek ağaçların meşcere parametreleri ise Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, düşük diri örtü yoğunluğuna sahip birinci örnek alanda ortalama ağaç boyu, tepe tacı genişliği ve ağaç çapı sırasıyla 6,41 m, 6,02 m ve 27,7 cm olarak belirlenmiştir. Diri örtü yoğunluğunun yüksek olduğu ikinci örnek alanda ise bu değerler sırasıyla 6,27 m, 5,76 m ve 26,2 cm olarak tespit edilmiştir. Her iki örnek alanda meşcere parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistik bulgular Çizelge 3.2'de yer almaktadır. Çizelgedeki çarpıklık ve basıklık değerlerine göre örnek ağaçlara ait meşcere parametreleri normal dağılım göstermiştir.



Şekil 3.1 : Çalışma alanındaki örnek ağaçların konumları.

Çizelge 3.1 : Yersel ölçümlerle elde edilen meşcere parametreleri.

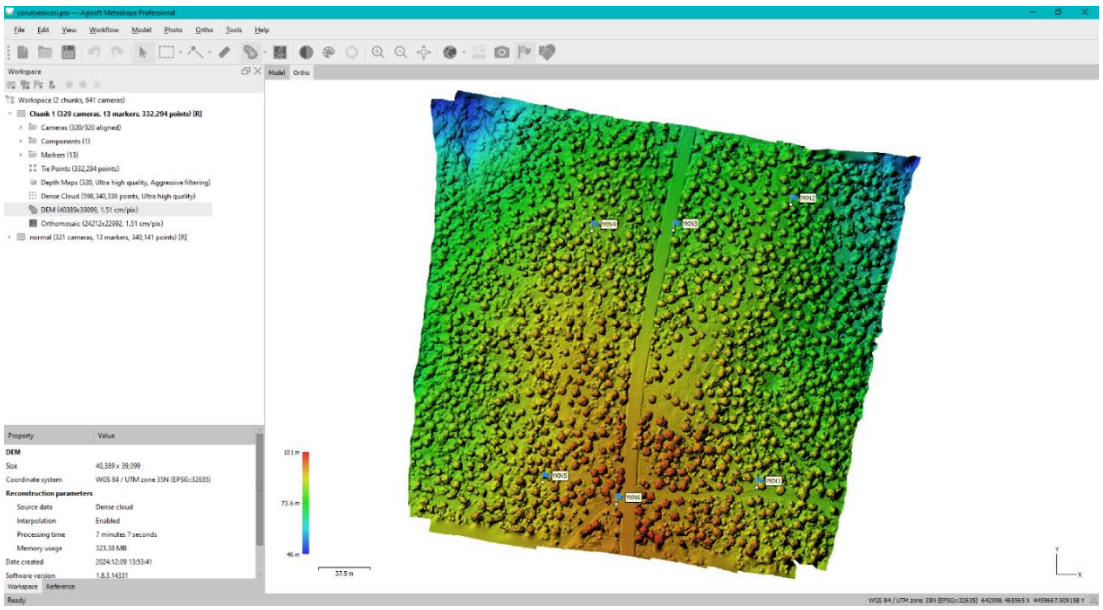
Ağaç No	1. Örnek Alan			2. Örnek Alan		
	Boy (m)	Tepe Tacı Genişliği (m)	Ağaç Çapı (cm)	Boy (m)	Tepe Tacı Genişliği (m)	Ağaç Çapı (cm)
1	6,8	5,84	29	6,5	6,12	26
2	7,0	6,63	27	6,4	5,85	25
3	5,2	6,43	28	7,2	5,47	32
4	5,0	4,43	24	7,1	6,62	30
5	4,6	4,90	23	6,9	5,26	24
6	4,4	4,85	27	7,0	6,17	29
7	6,1	6,00	30	6,5	5,10	25
8	4,9	4,98	28	6,6	6,27	29
9	6,9	6,71	28	6,4	5,15	27
10	8,5	7,20	32	5,6	4,71	23
11	7,2	6,86	27	6,7	6,03	26
12	8,5	6,61	31	7,0	5,90	25
13	6,1	4,68	22	5,6	5,78	24
14	5,8	4,80	23	6,5	5,90	23
15	6,3	5,91	31	4,6	4,31	21
16	8,1	6,68	33	5,5	4,83	22
17	5,5	5,78	29	6,1	5,36	25
18	6,3	5,96	28	6,3	5,44	26
19	6,8	5,90	26	5,7	5,96	28
20	6,3	5,06	25	5,9	6,28	27
21	5,4	5,52	27	5,1	4,79	25
22	6,1	5,78	27	6,5	6,33	28
23	5,9	5,93	26	6,5	6,25	31
24	7,4	5,06	28	5,8	6,35	27
25	6,6	5,99	26	6,1	6,42	28
26	6,5	5,98	29	6,6	6,25	27
27	6,2	6,42	27	7,4	6,37	30
28	6,8	6,62	28	6,9	4,83	27
29	6,4	7,43	31	6,1	4,97	22
30	6,2	6,28	28	6,0	5,48	27
31	7,2	6,88	30	6,7	6,77	29
32	6,7	6,97	29	5,8	5,63	22
33	6,0	6,20	27	5,5	4,94	22
34	7,1	5,82	29	6,8	7,02	32
35	6,4	5,98	28	6,1	5,47	27
36	6,3	5,59	28	6,6	6,03	25
37	6,4	6,61	27	6,3	5,39	26
38	6,2	6,16	27	6,0	6,00	24
39	6,6	6,42	26	5,6	5,53	24
40	7,7	6,79	29	6,1	6,90	28

Çizelge 3.2 : Yersel ölçümlere dayalı meşcere parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler.

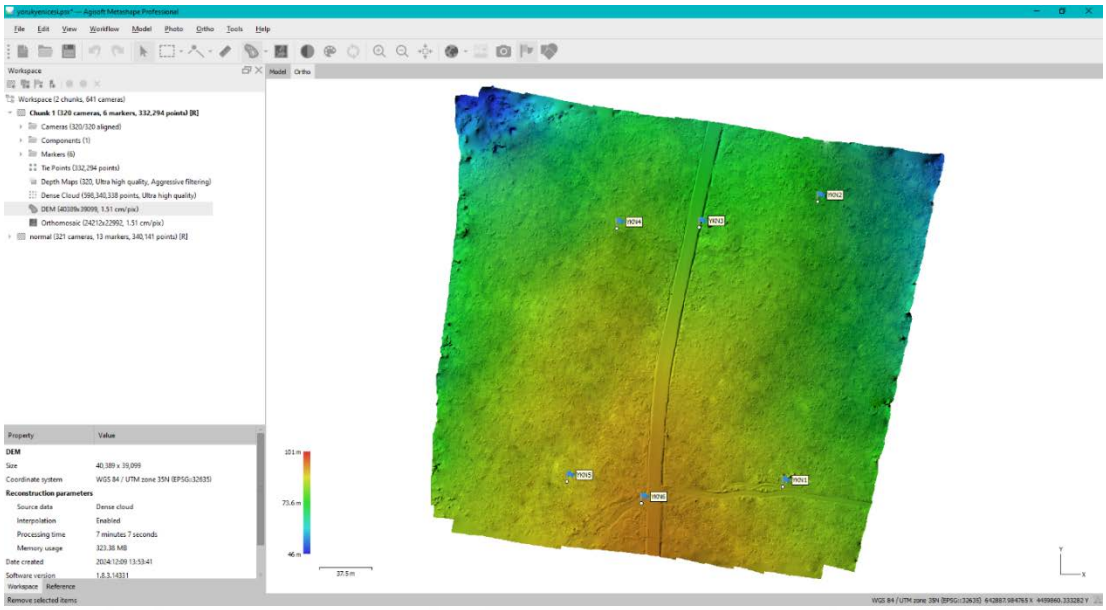
		N	Aralık	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Basıklık
1. Alan	Ağaç boyu	40	4,100	6,410	0,925	0,855	0,125	0,507
	Tepe tacı	40	3,009	6,016	0,739	0,547	-0,367	-0,505
	Ağaç çapı	40	11,000	27,710	2,335	5,453	-0,228	0,588
2. Alan	Ağaç boyu	40	2,800	6,265	0,596	0,355	-0,484	0,324
	Tepe tacı	40	2,706	5,756	0,653	0,427	-0,166	-0,637
	Ağaç çapı	40	11,000	26,200	2,803	7,856	0,181	-0,468

3.2 İHA Görüntü Analizi Bulguları

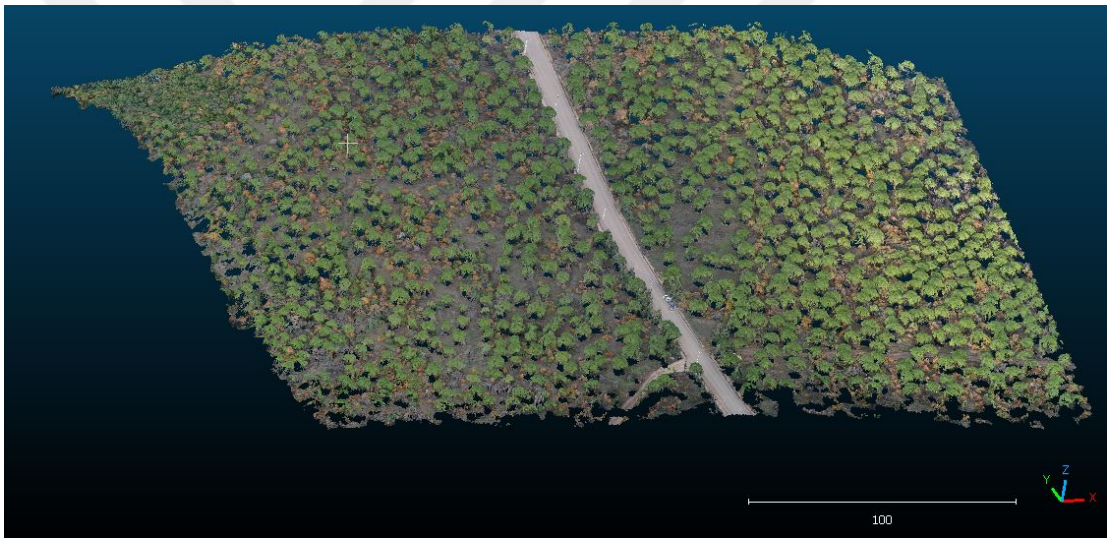
Agisoft Metashape 1.8.3 programında İHA görüntüleri işlenerek oluşturulan nokta bulutu kullanılarak çalışma alanına ait SYM ve SAM üretilmiştir (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3). SAM verilerine göre çalışma alanında ortalama yükseklik 80,7 m olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, nokta bulutu veri katmanı ".las" (Lidar LASer) formatında kaydedilmiştir (Şekil 3.4). Daha sonra, ".las" (Lidar LASer) formatında nokta bulutu CloudCompare 2.13.1 programında işlenerek çalışma alanındaki ağaçların tepe tacı görüntüsü üretilmiş ve ardından ArcGIS 10.8 ortamında gerekli işlemler yapılarak tepe tacı veri katmanı elde edilmiştir (Şekil 3.5).



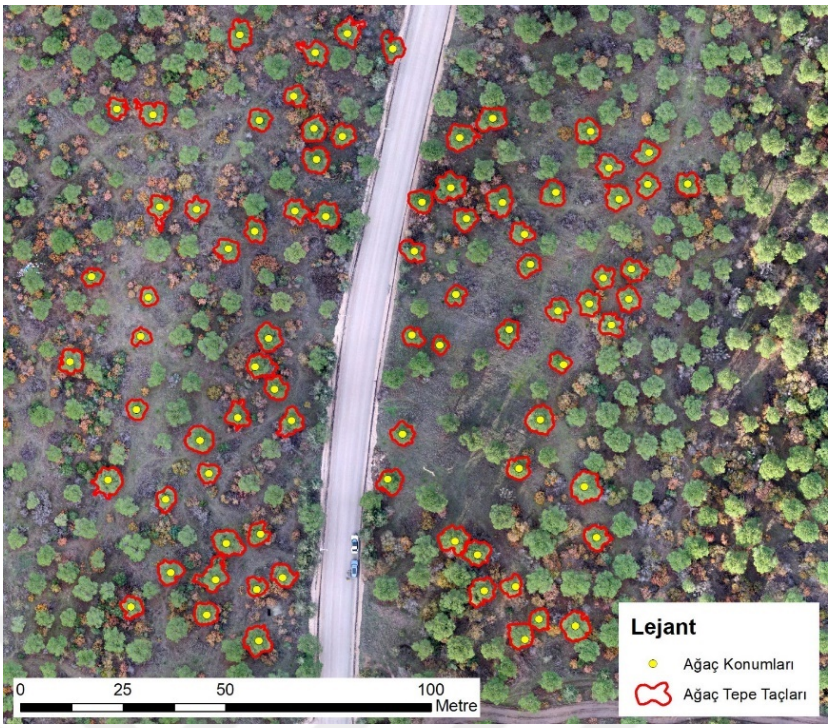
Şekil 3.2 : Çalışma alanına ait SYM.



Şekil 3.3 : Çalışma alanına ait SAM.

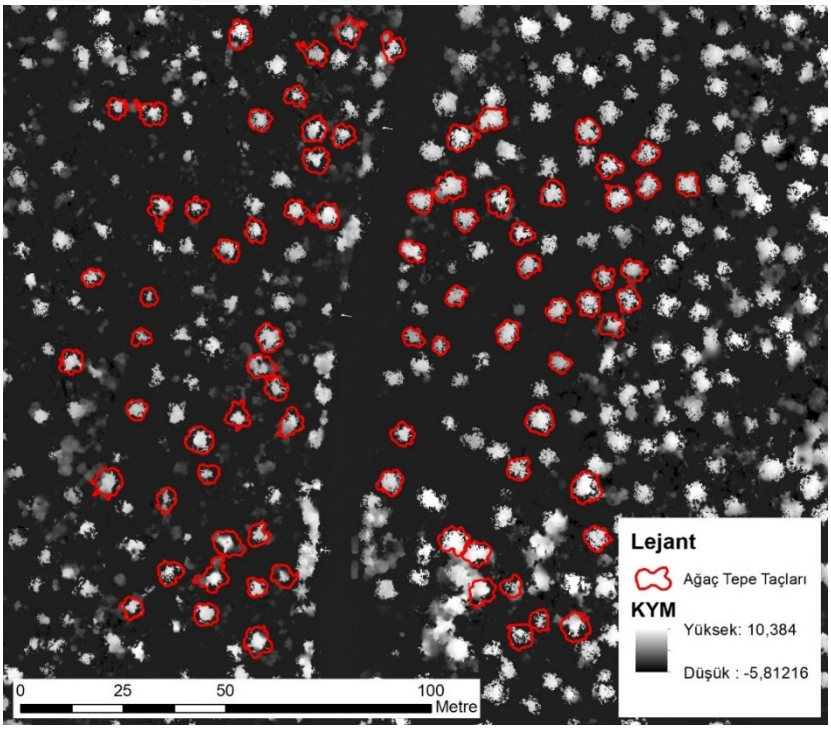


Şekil 3.4 : Çalışma alanına ait ".las" formatında nokta bulutu.

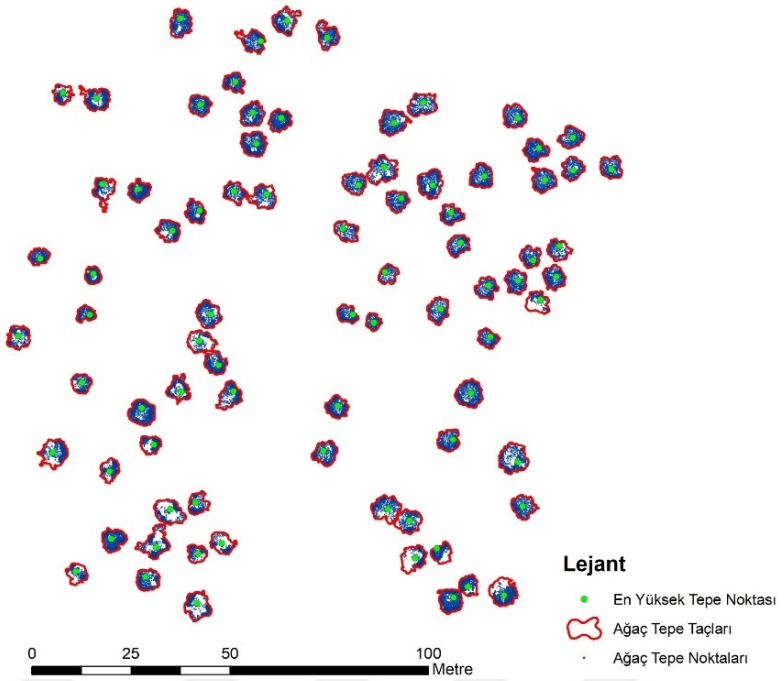


Şekil 3.5 : Çalışma alanında ölçülen örnek ağaçların tepe tacı poligonları.

Bir sonraki aşamada SYM'den SAM çıkarılarak oluşturulan ve örnek ağaçların tepe tacını gösteren KYM Şekil 3.6'da verilmiştir. Son olarak, "Focal Flow" ile her bir tepe tacı için en yüksek tepe noktasını gösteren veri katmanı üretilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6 : Örnek ağaçların tepe tacını gösteren KYM.



Şekil 3.7 : Örnek ağaçların tepe tacı için en yüksek tepe noktaları.

3.3 Meşcere Parametreleri Bulguları

Örnek ağaçların tepe tacına ait en yüksek tepe noktasının yükseklik değeri ağaç yüksekliği olarak kaydedilmiştir. Tepe tacı genişliği ise tepe tacı segmentasyonu veri katmanından hesaplanmıştır. İHA verilerine (h_{SfM}: ağaç boyu ve w_{SfM}: tepe tacı genişliği) dayalı ağaç çapının belirlenmesi amacıyla yersel ölçülen meşcere parametreleri kullanılarak geliştirilen regresyon modelleri (1. Örnek alan: Denklem 3.1 ve 2. Örnek alan: Denklem 3.2) aşağıda verilmiştir. Meşcere parametrelerine ilişkin geliştirilen bu regresyon modellerinin %99 güven düzeyinde anlamlı ($p <$ 0,000) olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4).

$$d' = 14{,}335044 + 0{,}625115h_{SfM} + 1{,}557196w_{SfM} \quad (3.1)$$

$$d' = 2{,}943108 + 1{,}850899h_{SfM} + 2{,}026020w_{SfM} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.3 : Meşcere parametrelerine ilişkin geliştirilen regresyon modeli (1. Alan).

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	97,504	2	48,752	15,662	0,000
	Residual	115,172	37	3,113		
	Total	212,676	39			

Çizelge 3.4 : Meşcere parametrelerine ilişkin geliştirilen regresyon modeli (2. Alan).

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	172,580	2	86,290	23,858	0,000
	Residual	133,820	37	3,617		
	Total	306,400	39			

Her iki örnek alanda İHA verilerine dayalı meşcere parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistiksel bulgular Çizelge 3.5'de yer almaktadır. Çizelgedeki çarpıklık ve basıklık değerlerine bakıldığında örnek ağaçlara ait meşcere parametreleri normal dağılım göstermiştir. Sonuçlara göre, düşük diri örtü yoğunluğuna sahip birinci örnek alanda ortalama ağaç boyu, tepe tacı genişliği ve ağaç çapı sırasıyla 6,31 m, 5,70 m ve 27,16 cm olarak belirlenmiştir. Diri örtü yoğunluğunun yüksek olduğu ikinci örnek alanda ise bu değerler sırasıyla 6,18 m, 5,52 m ve 25,55 cm olarak tespit edilmiştir. İHA verilerine dayalı örnek ağaçların meşcere parametreleri Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

İHA verileri ile elde edilen meşcere parametrelerinin değerlerinin yersel ölçümlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Önceki çalışmalarda İHA tabanlı nokta bulutundan elde edilen KYM ile tahmin edilen meşcere parametrelerinin genellikle olması gerektiğinden daha düşük olduğu belirtilmiştir (Tu ve diğ, 2019; Wang ve diğ, 2021).

Çizelge 3.5 : İHA verilerine dayalı meşcere parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler.

		N	Aralık	Ortalama	Standart Sapma	Varyans	Çarpıklık	Basıklık
1. Alan	Ağaç boyu	40	3,17	6,31	0,69	0,48	-0,36	0,41
	Tepe tacı	40	3,35	5,70	0,70	0,48	0,05	0,25
	Ağaç çapı	40	6,70	27,16	1,45	2,11	-0,01	0,13
2. Alan	Ağaç boyu	40	2,47	6,18	0,56	0,32	-0,14	-0,20
	Tepe tacı	40	2,66	5,52	0,69	0,48	0,19	-0,61
	Ağaç çapı	40	9,45	25,55	2,20	4,83	-0,06	-0,31

Çizelge 3.6 : İHA verileri ile elde edilen meşcere parametreleri.

Ağaç No	1. Örnek Alan			2. Örnek Alan		
	Boy (m)	Tepe Tacı Genişliği (m)	Ağaç Çapı (cm)	Boy (m)	Tepe Tacı Genişliği (m)	Ağaç Çapı (cm)
1	6,33	5,46	26,79	6,36	6,12	27,11
2	6,61	5,84	27,55	6,56	4,91	25,04
3	5,23	5,66	26,42	7,43	6,10	29,05
4	5,20	3,93	23,71	6,86	5,88	27,55
5	4,54	4,68	24,46	6,36	4,96	24,76
6	4,99	4,72	24,80	6,58	5,96	27,19
7	6,29	5,73	27,18	6,39	5,45	25,82
8	5,17	4,74	24,95	6,47	6,29	27,67
9	7,00	6,71	29,17	5,99	5,29	24,74
10	7,58	7,28	30,41	5,79	4,66	23,09
11	7,09	6,05	28,18	6,55	5,69	26,59
12	7,44	6,82	29,60	6,67	5,22	25,87
13	6,11	4,92	25,82	6,32	5,26	25,30
14	5,92	4,93	25,71	6,02	5,19	24,59
15	7,21	6,08	28,31	4,96	4,25	20,73
16	7,71	6,68	29,56	5,79	4,58	22,94
17	6,07	5,34	26,44	6,16	5,17	24,83
18	6,55	5,60	27,16	6,13	5,59	25,62
19	6,32	5,61	27,03	5,98	6,24	26,66
20	5,91	5,06	25,91	5,90	5,15	24,29
21	5,68	5,29	26,11	5,23	4,22	21,18
22	6,23	5,62	26,98	6,15	5,70	25,88
23	5,70	5,37	26,26	6,87	6,64	29,11
24	6,57	5,15	26,46	6,56	5,67	26,57
25	6,53	5,02	26,23	6,89	5,74	27,31
26	6,58	5,95	27,72	6,75	5,80	27,19
27	6,42	5,92	27,56	7,18	6,88	30,17
28	6,77	6,54	28,75	6,30	4,64	24,00
29	6,54	6,95	29,25	5,94	5,50	25,10
30	6,30	5,63	27,05	5,71	5,13	23,90
31	7,02	6,53	28,90	6,72	6,74	29,04
32	6,54	6,30	28,24	5,48	4,79	22,80
33	5,80	5,57	26,64	5,06	5,05	22,54
34	6,84	5,62	27,37	6,55	6,53	28,30
35	6,17	5,49	26,74	5,54	4,83	22,99
36	6,21	5,52	26,81	5,91	5,45	24,92
37	6,21	5,86	27,34	6,08	5,62	25,59
38	6,08	5,90	27,32	5,40	6,14	25,38
39	6,33	5,72	27,19	5,53	4,87	23,04
40	6,83	6,26	28,35	5,93	6,75	27,59

3.4 Meşcere Parametrelerinin Değerlendirilmesi

3.4.1 Düşük diri örtü yoğunluğu

Paired-sample t-testi sonuçlarına göre İHA verileri ve yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu değerlerinin ortalaması arasında anlamlı bir fark olmadığı belirlenmiştir (p = 0,141). Ağaç çapı değerlerinin ortalaması karşılaştırıldığında ise istatistiki açıdan anlamlı olmasa da belirgin bir fark olmadığı görülmüştür (p = 0,034). İHA verileri ve yersel ölçümlerle belirlenen tepe tacı genişliği değerlerinin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir (p = 0,000) (Çizelge 3.7). Diğer taraftan, korelasyon analizi sonuçlarına göre iki yöntemle elde edilen meşcere parametreleri arasında pozitif yönde anlamlı ilişki olduğu bulunmuştur (Çizelge 3.8).

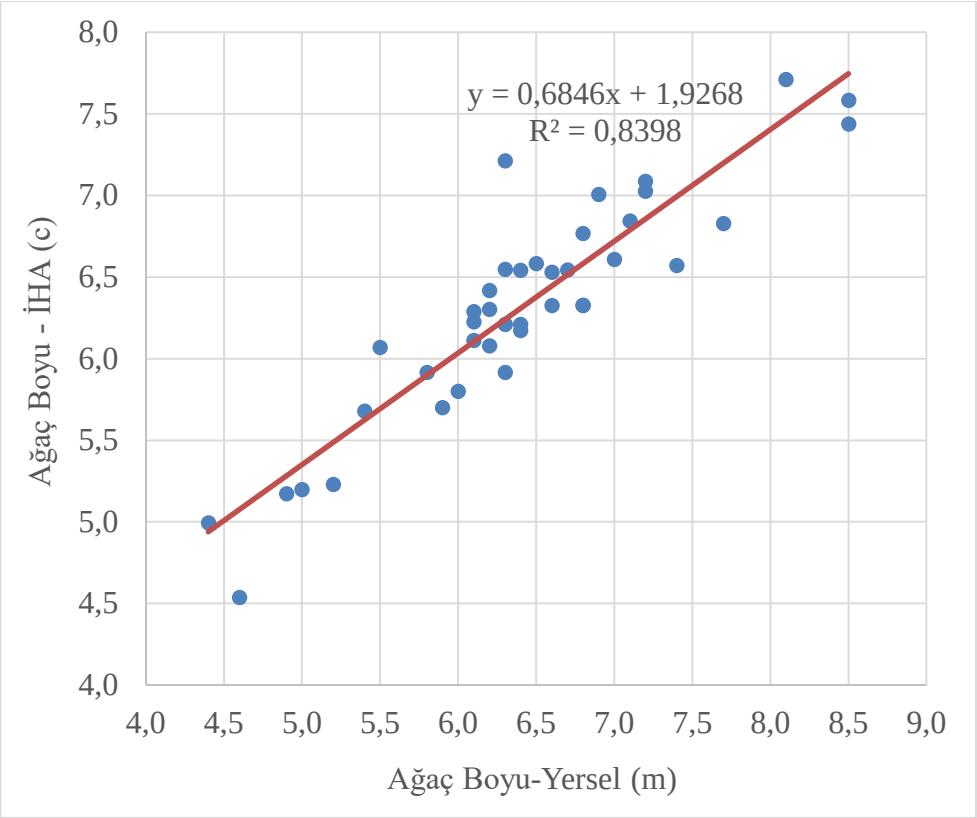
Yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri ile İHA verileri ile tespit edilen değerler arasında iyi düzeyde doğrusal bir ilişki olduğu (R^2) belirlenmiştir (Ağaç boyu: 0,84, Tepe tacı genişliği: 0,81) (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9). Meşcere parametrelerinin İHA verileri ile tahmin edildiği benzer çalışmalarda, yersel ölçümler ve tahmin edilen parametreler arasında anlamlı bir doğrusal ilişkinin varlığı tespit edilmiştir. Panagiotidis ve diğ. (2016), yersel ölçümlerle ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri karşılaştırıldığında, ağaç boyu için doğrusal ilişkinin R^2 değeri 0.72-0.75 ve tepe tacı genişliği (çapı) için ise 0.63-0.85 bulunmuştur.

Çizelge 3.7 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin paired-sample t-testi sonuçları (1. Alan).

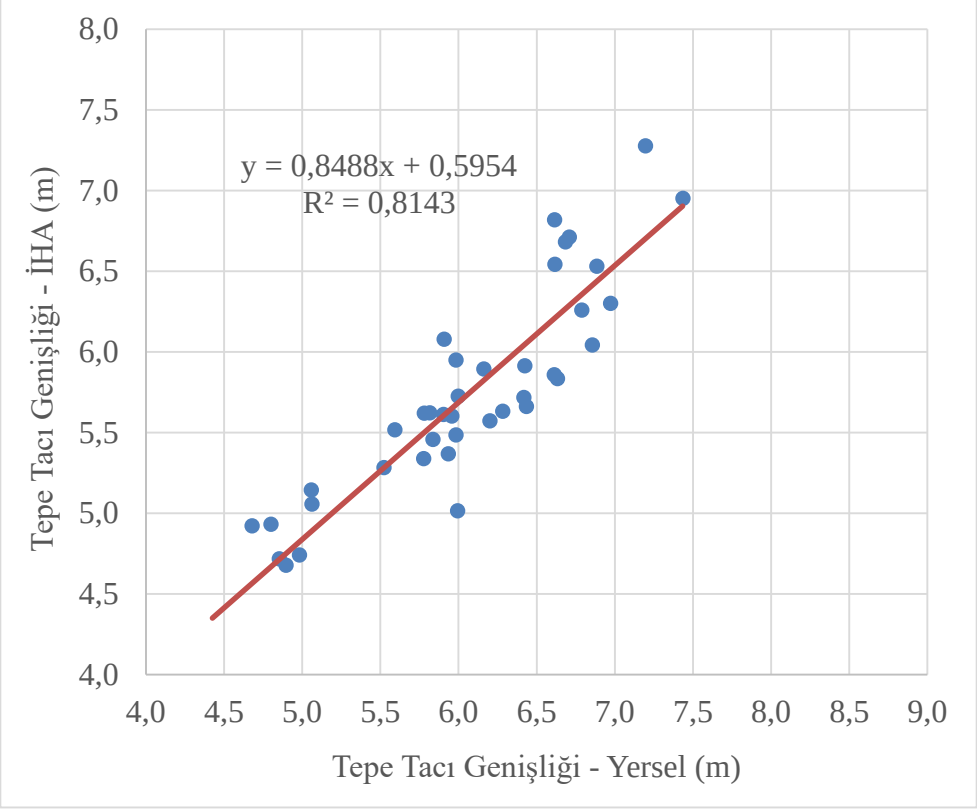
	Ortalama	Standard Sapma	Standard Hata	t	df	Sig. (2-tailed)
Ağaç boyu	0,095	0,402	0,064	1,501	39	0,141
Tepe tacı genişliği	0,315	0,320	0,051	6,215	39	0,000
Ağaç çapı	0,549	1,582	0,250	2,196	39	0,034

Çizelge 3.8 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin korelasyon sonuçları (1. Alan).

		Boy Yersel	Boy İHA	Tepe Tacı Yersel	Tepe Tacı İHA	Çap Yersel	Çap İHA
Boy Yersel	Korelasyon	1	0,92	0,63	0,74	0,56	0,83
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Boy İHA	Korelasyon	0,92	1	0,67	0,80	0,66	0,89
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Tepe Tacı Yersel	Korelasyon	0,63	0,67	1	0,90	0,65	0,87
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Tepe Tacı İHA	Korelasyon	0,74	0,80	0,90	1	0,74	0,98
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Çap Yersel	Korelasyon	0,56	0,66	0,65	0,74	1	0,75
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Çap İHA	Korelasyon	0,83	0,89	0,87	0,98	0,75	1
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	N	40	40	40	40	40	40



Şekil 3.8 : İki yöntemle elde edilen ağaç boyları arasındaki doğrusal ilişki (1. Alan).



Şekil 3.9 : İki yöntemle elde edilen tepe tacı genişlikleri arasındaki doğrusal ilişki (1. Alan).

3.4.2 Yüksek diri örtü yoğunluğu

Diri örtünün yoğun olduğu ikinci örnek alanda İHA verileri ve yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu değerlerinin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olmadığı belirlenmiştir (p = 0,135). Ağaç çapı değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında ise belirgin bir fark olmadığı görülmüştür (p = 0,020). İHA verileri ve yersel ölçümlerle belirlenen tepe tacı genişliği değerlerinin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir (p = 0,001) (Çizelge 3.9). Panagiotidis ve diğ. (2016) tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada, ağaç boyu ve tepe tacı genişliği (çapı) için ortalamalar arasındaki farkın anlamlı bulunduğu ancak doğruluk analizinde hesaplanan hataların düşük olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 3.9 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin paired-sample t-testi sonuçları (2. Alan).

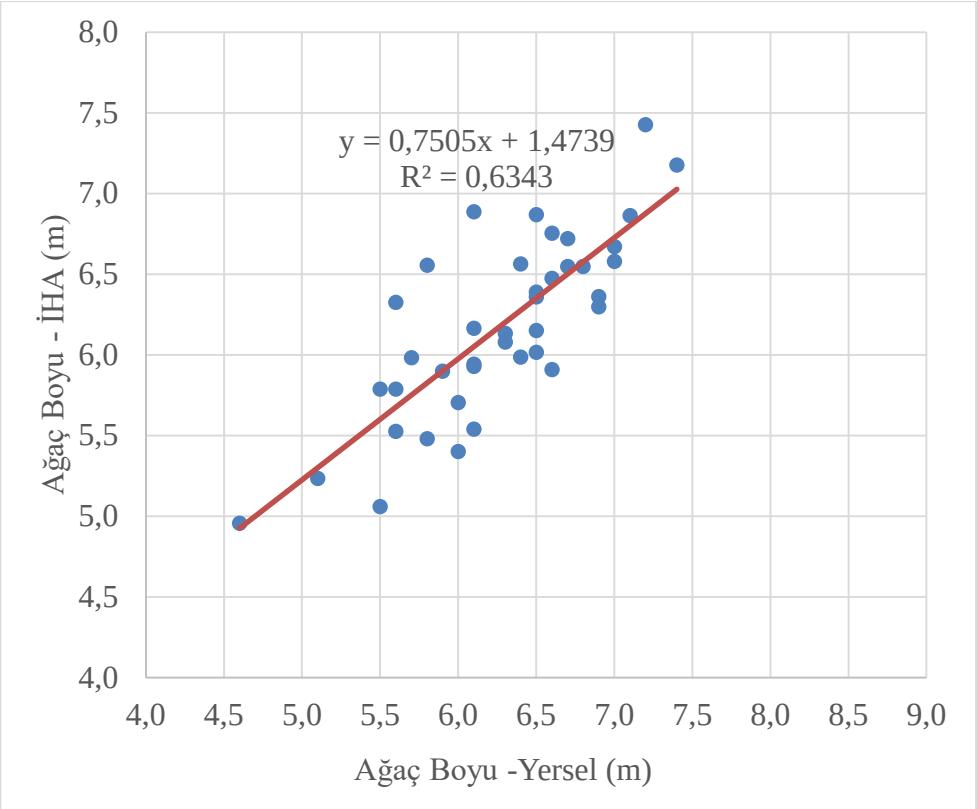
	Ortalama	Standard Sapma	Standard Hata	t	df	Sig. (2-tailed)
Ağaç boyu	0,089	0,371	0,059	1,525	39	0,135
Tepe tacı genişliği	0,239	0,442	0,070	3,419	39	0,001
Ağaç çapı	0,649	1,691	0,267	2,428	39	0,020

Korelasyon analizi sonuçlarına göre ikinci örnek alanda da iki yöntemle elde edilen meşcere parametreleri arasında pozitif yönde anlamlı ilişki olduğu bulunmuştur (Çizelge 3.10). Diğer taraftan iki örnek alan için korelasyon karşılaştırıldığında, diri örtü yoğunluğunun düşük olduğu örnek alanda meşcere parametreleri arasındaki korelasyonun daha yüksek olduğu görülmüştür.

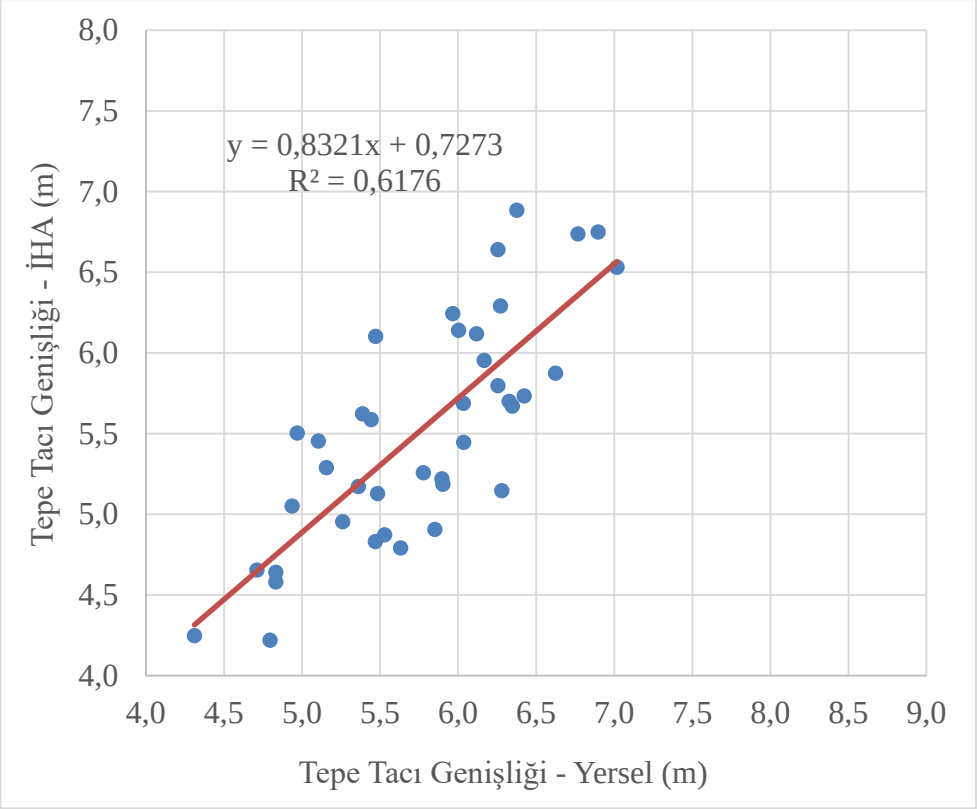
Yersel ölçümlerle belirlenen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri ile İHA verileri ile tespit edilen değerler arasında orta düzeyde doğrusal bir ilişki olduğu (R^2) belirlenmiştir (Ağaç boyu: %63,43 Tepe tacı genişliği: %61,76) (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11). Diri örtü yoğunluğunun düşük olduğu örnek alanla karşılaştırıldığında, diri örtü yoğunluğundaki artışın İHA verilerine dayalı yöntemin meşcere parametrelerinin tahminini olumsuz yönde etkilediği ve bu nedenle ilişki oranının nispeten daha düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.10 : Ölçümlere ait değerlere ilişkin korelasyon sonuçları (2. Alan).

		Boy Yersel	Boy İHA	Tepe Tacı Yersel	Tepe Tacı İHA	Çap Yersel	Çap İHA
Boy Yersel	Korelasyon	1	0,80	0,50	0,56	0,63	0,74
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Boy İHA	Korelasyon	0,80	1	0,56	0,61	0,71	0,86
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Tepe Tacı Yersel	Korelasyon	0,50	0,56	1	0,79	0,67	0,76
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Tepe Tacı İHA	Korelasyon	0,56	0,61	0,79	1	0,73	0,93
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Çap Yersel	Korelasyon	0,63	0,71	0,67	0,73	1	0,80
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
	N	40	40	40	40	40	40
Çap İHA	Korelasyon	0,74	0,86	0,76	0,93	0,80	1
	Güven Düzeyi (2 Yönlü)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	N	40	40	40	40	40	40



Şekil 3.10 : İki yöntemle elde edilen ağaç boyları arasındaki doğrusal ilişki (2. Alan).



Şekil 3.11: İki yöntemle elde edilen tepe tacı genişlikleri arasındaki doğrusal ilişki (2. Alan).

3.5 Doğruluk Analizi Bulguları

Yersel ölçümlerle ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri arasındaki ölçüm hatası; Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Kare Hatası (MSE) ve Kök Ortalama Kare Hatası (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 (Çizelge 3.11). Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri kendi arasında karşılaştırıldığında her iki örnek alanda da ağaç boyunun daha yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Gülci ve diğ. (2021) tarafından yürütülen ve meşcere parametrelerinin İHA verileriyle tahmin edildiği bir çalışmada ağaç boyu tahmininde doğruluğun daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Örnek alanlar karşılaştırıldığında, diri örtü yoğunluğunun düşük olduğu örnek alanda tepe tacı genişliğinin doğruluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, tepe tacı genişliği tahmininde İHA verilerine dayalı yöntemin başarısının diri örtü yoğunluğunun fazla olduğu meşcerelerde düşük olduğunu göstermiştir. Bunun temel nedeni, tepe çatısı altında kalan orman diri örtüsünün nokta bulutundan elimine edilmesi için kullanılan eşik yükseklik değerinden daha uzun boylu diri örtünün yoğun olmasının tepe tacı tahminini olumsuz yönde etkilemesidir. Önceki çalışmalarda da bu eşik yüksekliğinin tepe tacı tahminlerinin doğruluğunu etkilediği bildirilmiştir (Luo ve diğ, 2016; Landry ve diğ, 2018). En uygun eşik yüksekliğinin, çalışmaya konu meşcere durumuna ve ağaç türüne göre değişebileceği belirtilmiştir (McLane ve diğ, 2009; Sumnall ve diğ, 2016). Örnek olarak, karışık meşcerelerde bu eşik değerin 1-2 metre arasında seçilmesi önerilmektedir (Smith ve diğ, 2009).

Çizelge 3.11 : Yersel ölçümler ve İHA verileri ile belirlenen meşcere parametreleri arasındaki ölçüm hatası.

		Ortalama Mutlak Hata	Ortalama Kare Hatası	Kök Ortalama Kare Hatası
1. Alan	Ağaç boyu	0,304	0,166	0,408
	Tepe tacı genişliği	0,361	0,199	0,446
2. Alan	Ağaç boyu	0,315	0,142	0,377
	Tepe tacı genişliği	0,414	0,247	0,497

Kök Ortalama Kare Hatası dikkate alındığında, ağaç boyu için hata değeri birinci ve ikinci örnek alan için RMSE değeri sırasıyla 0,408 ve 0,377 olarak belirlenmiştir. Tepe tacı genişliği için ise RMSE değerleri sırasıyla 0,446 ve 0,497 bulunmuştur. İHA verileri ile ağaç boyunun belirlendiği benzer bir çalışmada, hata değeri (RMSE = 0,30) yaklaşık aynı aralıklarda tespit edilmiştir (Krause ve diğ, 2019). Panagiotidis ve diğ. (2016) farklı ağaç türlerinin yer aldığı bir meşcerede yüksek çözünürlüklü İHA verileri ile meşcere parametrelerini tahmin etmiş ve sonuçlar tepe tacı genişliği (çapı) için RMSE değerinin 0,82 olduğunu göstermiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fıstık çamı sahasında yer alan farklı diri örtü yoğunluğuna sahip iki örnek alanda yersel ölçümlere dayalı geleneksel yöntemler ve İHA tabanlı 3B nokta bulutu verileri kullanılarak meşcere parametreleri (ağaç boyu, tepe tacı genişliği ve ağaç çapı) belirlenmiştir. Yersel ölçümlerle elde edilen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği verileri (bağımsız değişkenler) kullanılarak örnek ağaçların çap tahminini veren regresyon modelleri geliştirilmiştir. Daha sonra, bu modellere İHA tabanlı yöntemle elde edilen ağaç boyu ve tepe tacı genişliği değerleri girilerek çap değerleri hesaplanmıştır. Her iki yöntemle elde edilen meşcere parametreleri Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Kare Hatası (MSE) ve Kök Ortalama Kare Hatası (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 meşcere parametrelerinin değerlerinin yersel ölçümlerden daha düşük olduğu görülmüştür.

Diri örtü yoğunluğundaki artış, İHA verilerine dayalı yöntemin tahmin başarısını olumsuz yönde etkilemiştir. Bunun temel nedeninin tepe çatısı altında kalan diri örtünün nokta bulutundan elimine edilmesi için kullanılan eşik yükseklik değerinden daha uzun boylu diri örtünün varlığının etkisi olduğu düşünülmüştür.

Ağaç boyu için hata değerleri (MAE) birinci ve ikinci örnek alanda sırasıyla 0,304 ve 0,315 olarak belirlenmiştir. Tepe tacı genişliği için ise hata değerleri sırasıyla 0,361 ve 0,414 bulunmuştur. Ağaç boyu için hata değerleri (MSE) birinci ve ikinci örnek alanda sırasıyla 0,166 ve 0,142 olarak belirlenmiştir. Tepe tacı genişliği için ise hata değerleri sırasıyla 0,199 ve 0,247 bulunmuştur. Ağaç boyu için hata değerleri (RMSE) birinci ve ikinci örnek alanda sırasıyla 0,408 ve 0,377 olarak belirlenmiştir. Tepe tacı genişliği için ise hata değerleri sırasıyla 0,446 ve 0,497 bulunmuştur. Ağaç boyu ve tepe tacı genişliği parametreleri kendi arasında karşılaştırıldığında her iki örnek alanda da ağaç

boyunun daha yüksek doğrulukla belirlendiği görülmüştür. Örnek alanlar karşılaştırıldığında, diri örtü yoğunluğunun düşük olduğu örnek alanda tepe tacı genişliğinin doğruluğunun daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

İki yöntemden elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucunda, İHA verilerine dayalı yöntemin meşcere parametrelerinin ölçümünde etkili bir alternatif olacağı anlaşılmıştır. Ayrıca, meşcere 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.

Bu çalışmada uygulanan metodolojiyi geliştirmek amacıyla, devam niteliğinde yürütülecek potansiyel araştırmalar bulunmaktadır. Mevcut çalışma düz ve düze yakın arazi koşullarında uygulanmıştır. İlerideki çalışmalarda, farklı arazi koşulları için İHA tabanlı yöntemin meşcere parametresi tahminlerindeki etkinliği araştırılmalıdır. Bunun yanı sıra, farklı meşcere özelliklerine sahip ormanlarda (farklı kapalılık, çağ sınıfı, vb.) yöntemin başarısının incelenmesi yöntemin yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, meşcere parametresi tahminlerinin farklı iğne yapraklı ve geniş yapraklı meşcerelerde test edilmesi diğer bir devam niteliği taşıyan araştırma olacaktır. İHA ile fotoğrafların alındığı zaman diliminde hava koşulları (rüzgar) ve günün saati (güneş ışınlarının açısı) gibi faktörlerin etkisinin de dikkate alınarak incelenmesi metodolojinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, uçuş planında seçilen parametrelerin (uçuş yüksekliği, uçuş hızı, bindirme oranı vb.) değerlerindeki varyasyonun meşcere parametresi tahminine etkisi de ilerideki çalışmalarda incelenmelidir.

KAYNAKLAR

Agisoft LLC. (2022). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8. 212.

Akgül, M., Yurtseven, H., Demir, M., Akay, A. E., Gülci, S., & Öztürk, T. (2016). Usage opportunities of generating digital elevation model with unmanned aerial vehicles on forestry. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, *66* (1), 104-118.

Akgul, M., Yurtseven, H., Gulci, S., & Akay, A. E. (2018). Evaluation of UAV-and GNSS-based DEMs for earthwork volume. *Arab. J. Sci. Eng. 43* (4), 1893-1909.

Banu, T. P., Borlea, G. F., & Banu, C. (2016). The use of drones in forestry. *J Environ Sci Eng B, 5*, 557-562.

Castellanos-Galindo, G. A., Casella, E., Tavera, H., Zapata Padilla, L. A., & Simard, M. (2021). Structural characteristics of the tallest mangrove forests of the American continent: A comparison of ground-based, drone and radar measurements. *Front For Glob Change 4*, 732468.

CloudCompare (2024). 3D point cloud and mesh processing software, Open Source Project, Version 2.13.1.

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS J. Photogramm. 92*, 79-97.

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.

Dandois, J.P., & Ellis, E. C. (2010). Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sens 2*, 1157-1176.

Dash, J. P., Watt, M. S., Pearse, G. D., Heaphy, M., & Dungey, H. S. (2017). Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS J. Photogramm. 131*, 1-14.

Djomo, A. N., Cédric D., & Chimi, C. D. (2017). Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing, *Forest Ecology and Management, 391*, 184-193.

DJI, (2024). Mavic 2 Pro specifications. Erişim: 10 Aralık 2024. https://www.dji.com/global/support/ product/mavic-2.

Duncanson, L., Rourke, O., & Dubayah, R. (2015). Small Sample Sizes Yield Biased Allometric Equations in Temperate Forests. *Sci Rep 5*, 17153.

Dutcă, I., Mather, R., & Ioraş, F. (2020). Sampling trees to develop allometric biomass models: How does tree selection affect model prediction accuracy and precision?, *Ecological Indicators, 117*, 106553.

Edson, C., & Wing, M. G. (2011). Airborne Light Detection and Ranging (Lidar) for Individual Tree Stem Location, Height, and Biomass Measurements. *Remote Sensing 3*, 2494-2528.

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

Ferranti, F. (2014). Energy wood: a challenge for European forests. Potentials, environmental implications, policy integration and related conflicts. EFI technical report 95, European Forest Institute.

Goodbody, T. R., Coops, N. C., Marshall, P. L., Tompalski, P., & Crawford, P. (2017). Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: a review and case study. *Forest Chron. 93* (1), 71-81.

Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Forestry remote sensing from unmanned aerial vehicles: a review focusing on the data, processing and potentialities. *Remote Sens. 12* (6), 1046.

Gülci, N., Akay, A.E., Erdaş, O., Wing, M., & Sessions, J. (2015). Planning optimum logging operations through precision forestry approaches. *Eur. J. Forest Eng. 1* (2), 56-60.

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. *Environ. Monit. Assess. 191*, 495.

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* (2021), 101303.

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, *Concepts and Applications of Remote Sensing in Forestry*. Edited by Mohd Nazip Suratman. Springer Singapore. 395–409.

Hardin, P. J., Jensen, R. R. (2011). Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities. *GIScience and Remote Sensing, 48* (1), 99-111.

Jones, G. P., Pearlstine, L. G., & Percival, H. F. (2006). An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research. *Wildl. Soc. Bull. 34*, 750-758.

Kaiser, J. E., & Damarany, A. M. (2017). 3D Modeling of Skeletal Remains Using Agisoft Photoscan: Best practices for Field Data Collection. In Proceedings of the 86th Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists, 21 April, Hoboken, NJ, USA. 236.

Krause, S., Sanders, T. G., Mund, J-P., & Greve, K. (2019). UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sens. 11* (7), 758. https://doi.org/10.3390/rs11070758.

Landry, S., St-Laurent, M. H., Nelson, P. R., Pelletier, G., & Villard, M. A. (2018). Canopy Cover Estimation from Landsat Images: Understory Impact onTop-of-canopy Reflectance in a Northern Hardwood Forest. *Canadian Journal of Remote Sensing, 44* (5), 435-446.

Liang, X., Wang, Y., Pyörälä, J., Lehtomäki, M., Yu, X., Kaartinen, H., Vaaja, M. (2019). Forest in situ observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements. *For. Ecosyst. 6*, 20.

Lindberg, E., & Holmgren, J. (2017). Individual tree crown methods for 3D data from remote sensing. *Curr. Forestry Rep. 3* (1), 19-31.

Lingner, S., Thiessen, E., Müller, K., & Hartung, E. 2018. Dry biomass estimation of hedge banks: allometric equation vs. structure from motion via unmanned aerial vehicle. *J For Sci*, *64*, 149–156.

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.

Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing, 27* (7), 1297-1328.

Luo, S., Chen, J. M., Wang, C., Xi, X., Zeng, H., Peng, D., & Li, D. (2016). Effects of LiDAR point density, sampling size and height threshold on estimation accuracy of crop biophysical parameters. *Optics Express, 24* (11), 11578–11593.

McLane, A. J., McDermid, G. J., & Wulder, M. A. (2009). Processing discrete-return profiling lidar data to estimate canopy closure for large-area forest mapping and management. *Canadian Journal of Remote Sensing, 35* (3), 217–229.

Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Maimaitiyiming, M., Hartling, S., Peterson, K .T., Maw, M. J. W., Shakoor, N., Mockler, T., & Fritschi, F. B. (2019). Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model (CVMVI) for soybean biomass estimation from Unmanned Aerial System-based RGB imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 27-41.

Michez, A., Piégay, H., & Lisein, J. (2016). Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. *Environ. Monit. Assess. 188*, 146.

Mustonen, J., Packalén, P., & Kangas, A. 2008. Automatic segmentation of forest stands using a canopy height model and aerial photography. *Scandinavian Journal of Forest Research, 23* (6), 534–545.

Newcome, L. R. (2004). Unmanned Aviation: A brief history of unmanned aerial vehicles; American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc.: Reston, VA, USA, 45-50.

Nordström, E., Nieuwenhuis, M., & Başkent, E. Z. (2019). Forest decision support systems for the analysis of ecosystem services provisioning at the landscape scale under global climate and market change scenarios. *Eur. J. Forest Res. 138*, 561–581.

Nowak, D. J., Walton, J. T., Stevens, J. C., Crane, D. E., Robert E. Hoehn, R. E. (2008). Effect of plot and sample size on timing and precision of urban forest assessments. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF), 34* (6), 386-390.

Otero, V., Van De Kerchove, R., Satyanarayana, B., Martinez-Espinosa, C., Bin Fisol, M. A., Bin Ibrahim, M. R., Sulong, I., Mohd-Lokman, H., Lucas, R., & Dahdouh-Guebas, F. (2018). Managing mangrove forests from the sky: Forest inventory using field data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, peninsular Malaysia. *For Ecol Manag 411*, 35–45.

Pajares, G. (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogramm. Eng. Remote. Sens. 81* (4), 281-329.

Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., & Chiteculo, V. (2016). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing, 38* (8–10), 2392–2410.

Pilli, R., Anfodillo, T., & Carrer, M. (2006). Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass, *Forest Ecology and Management, 237* (1-3), 583-593.

Pix4D, (2024). Pix4D Capture - Drone Mapping Software, <https://pix4d.com.>, erişim tarihi 10.12.2024.

Puliti, S., Dash, J.P., Watt, M. S., Breidenbach, J., & Pearse, G. D. (2020). A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *For. Int. J. For. Res. 93* (1), 150-162.

Qin, L., Meng, S., Zhou, G., Liu, Q., & Xu, Z. (2021). Uncertainties in above ground tree biomass estimation. *J. For. Res. 32*, 1989–2000.

Qiu, Z., Feng, Z., Wang, M., Li, Z., & Lu, C. (2018). Application of UAV Photogrammetric System for Monitoring Ancient Tree Communities in Beijing. *Forests. 9* (12), 735.

Roxburgh, S. H., Paul, K. I., Clifford, D., England, J. R., & Raison, R. J. (2015). Guidelines for constructingallometric models for the prediction of woody biomass: how many individuals to harvest? *Ecosphere, 6* (3), 38.

Shahbazi, M., Théau, J., & Ménard, P. (2014). Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. GISci. *Remote Sens. 51* (4), 339-365.

Smith, A. M., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Evans, J. S., Robinson, A. P., & Steele, C. M. (2009). A cross-comparison of field, spectral, and lidar estimates of forest canopy cover. *Canadian Journal of Remote Sensing, 35* (5), 447–459.

Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Prog Phys Geogr 40,* 247–275.

Strunk, J., Temesgen, H., Andersen, H. E., Flewelling, J. P., & Madsen, L. (2012). Effects of lidar pulse density and sample size on a model-assisted approach to estimate forest inventory variables. *Canadian Journal of Remote Sensing, 38* (5), 644–654.

Sullivan, F. B., Ducey, M. J., Orwig, D. A., Cook, B., & Palace, M. W. (2017). Comparison of lidar- and allometry-derived canopy height models in an eastern deciduous forest, *Forest Ecology and Management, 406,* 83-94.

Sumnall, M., Peduzzi, A., Fox, T. R., Wynne, R. H., Thomas, V. A., & Cook, B. (2016). "Assessing the transferability of statistical predictive models for leaf area index between two airborne discrete return LiDAR sensor designs within multiple intensely managed Loblolly pine forest locations in the south-eastern USA." *Remote Sensing of Environment, 176,* 308-319.

Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *J. For. Res. 26,* 791-797.

Tomaštík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK Method-An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sens. 11,* 721.

Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *Int. J. Remote Sens. 38* (8-10), 2427-2447.

Tu, Y.-H., Johansen, K., Phinn, S., & Robson, A. (2019). Measuring Canopy Structure and Condition Using Multi-Spectral UAS Imagery in a Horticultural Environment. *Remote Sens. 11* (3)*:* 269.

Van Laar, A., & Akça, A. (2007). Instruments. In: Forest Mensuration. Managing Forest Ecosystems, vol 13. Springer, Dordrecht, 33-62.

Vorster, A.G., Evangelista, P.H., Stovall, A.E.L., & Ex, S. (2020). Variability and uncertainty in forest biomass estimates from the tree to landscape scale: the role of allometric equations. *Carbon Balance Manage 15*, 8.

Wang, X., Zhao, Q., Han, F., Zhang, J., & Jiang, P. (2021). Canopy Extraction and Height Estimation of Trees in a Shelter Forest Based on Fusion of an Airborne Multispectral Image and Photogrammetric Point Cloud. *J. Sens. 2021* (1), 5519629.

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. *Can. J. Remote. Sens. 42* (5), 619-641.

Wing, M. G., Burnett, S., Johnson, S., Akay, A. E., Sessions, J. (2014). A Low-cost unmanned aerial system for remote sensing of forested landscapes. *International Journal of Remote Sensing Applications 4* (3), 113-120.

Yan, C. C., Shi, H. J., Zeng, J., Jiang, Y. M., & Yi, W. Y. (2023). Information Extraction Method of DBH of Individual Trees in Artificial Forest Based on UAV Image. *Journal of Computers, 34* (2), 161-174.

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.

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. *Biol. Conserv. 198,* 60-69.

Zhang, Y., Wu, H., & Yang, W. (2019). Forests Growth Monitoring Based on Tree Canopy 3D Reconstruction Using UAV Aerial Photogrammetry. *Forests, 10* (12), 1052.

Zhou, X., & Zhang, X. (2020). Individual Tree Parameters Estimation for Plantation Forests Based on UAV Oblique Photography, *IEEE Access, 8,* 96184-96198.

Zimmerman, T., Jansen, K., & Miller, J. (2020). Analysis of UAS flight altitude and ground control point parameters on DEM accuracy along a complex, developed coastline. *Remote Sens. 12* (14), 2305.