

GÖRÜNTÜ EŞLEŞTİRME VE LİDAR KAYNAKLI NOKTA BULUTUNDAN ORMAN METRİKLERİNİN OTOMATİK BELİRLENMESİ

Murat BAHADIR¹, Feride Seçil YILDIRIM², Fevzi KARSLI³

¹Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar, Trabzon, muratbahadiir@gmail.com

²Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar, Trabzon, sclyldrm01@gmail.com

³Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar, Trabzon, fkarlsli@ktu.edu.tr

ÖZET

Yeryüzünde bulunan doğal ve beşerî unsurların konumsal bilgisi ve hacmi, ekonomik, ekolojik ve sosyokültürel açıdan ülkelerin yönetim politikası için büyük önem arz etmektedir. Bu unsurların kontrolü ve analizi için üç boyutlu konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde üç boyutlu bilgiye ulaşmanın en popüler yollarından biri olan nokta bulutları, LiDAR veya bindirmeli hava fotoğrafları ile yoğun görüntü eşleme tekniği kullanılarak üretilmektedir. LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutları kentsel modelleme, ormanlık alanların kontrolü, afet yönetimi, şehir ve kırsal alanların planlanması gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle ormanlık veya yoğun kapalılık seviyesindeki ağaçlık alanlarda GPS, sürekli sinyal alamadığından bu bölgelerde klasik yersel ölçüm teknikleri ile arazi çalışması gerçekleştirmek zaman alıcı ve pahalı bir uğraştır. Ülkelerin benimsedikleri ormancılık politikası sebebiyle ağaçlık alanların insan gücüne ihtiyaç duyulmadan otomatik olarak tespiti ve kontrolü ekonomik, sosyal ve sürdürülebilir kalkınma açısından büyük önem arz etmektedir. Zaman içindeki ağaç değişikliklerinin izlenmesi ve yönetimi, ekosistem hizmetleri, şehir ve çevre planlaması için ağaç envanter bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, LiDAR teknolojisi ve fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutlarından ağaç taç sınırlarının çıkarılması, sayısının tespit edilmesi, ağaç boy ve hacimlerinin belirlenmesi ve orman disiplini içerisindeki çeşitli orman metriklerinin çıkarılması amaçlanmıştır. Çalışmada önerilen akış şeması, Trabzon İli, Maçka İlçesi'nde yer alan üç kapalı seviyesine sahip ağaçlık (Ladin) alanın LiDAR nokta bulutu ve Akdeniz Üniversitesi'nde bulunan ağaçla kaplı çalışma alanında ise fotogrametrik nokta bulutu kullanılarak test edilmiştir. Girdi verisi olarak kullanılan nokta bulutu, SMRF (Simple Morphological Filter) yöntemiyle zemin ve zemin üstü olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. MATLAB yazılımında geliştirilen algoritma ile zemin üstü noktalar için Kanopi Yükseklik Modeli (CHM) uygulanarak orman metriklerinin çıkarılması sağlanmış ve ardından bireysel ağaç kümeleri tespit edilmiştir. Belirlenen ağaç kümeleri ve sayılarının doğruluğunu artırmak üzere, bireysel ağaç kümeleri içinde birden fazla ağaç kümesi oluşabileceği ihtimaline karşın Octree (sekiz dal) veri organizasyon metodu ile ağaçların düşey yönde segmentasyonu gerçekleştirilerek mevcut algoritma iyileştirilmiştir. Doğruluk analizi için test alanlarında ağaç konumu, göğüs çapı, ağaç taç genişliği ve ağaç boyu parametreleri yersel olarak ölçülmüş ve iyileştirilen algoritma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonucuna göre, Octree yöntemi ile nokta bulutu içerisinde ağaç sayısı ve diğer orman metriklerinin yüksek doğrulukta üretilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: LiDAR, Görüntü Eşleştirme, Nokta Bulutu, Ağaç, Sekizdal

ABSTRACT

AUTOMATIC DETERMINATION OF FOREST METRICS FROM IMAGE MATCHING AND LiDAR-BASED POINT CLOUD

The spatial knowledge and volume of natural and human elements on earth are of great importance for the management policy of countries in terms of economic, ecological and socio-cultural aspects. 3D spatial information is needed for control and analysis of these elements. Point clouds, which are one of the most popular ways of accessing three-dimensional information today, are produced using LiDAR or overlay aerial photographs using intensive image matching technique. LiDAR and photogrammetric point clouds are used in many applications such as urban modelling, forestland control, disaster management, urban and rural planning. Especially in forested or densely covered wooded areas, since GPS cannot receive a continuous signal, it is time-consuming and expensive to carry out field studies with classical terrestrial measurement techniques in these regions. Due to the forestry policy adopted by the countries, automatic detection and control of wooded areas without need for manpower is of great importance in terms of economic, social and sustainable development. Tree inventory information is needed for monitoring and management of tree changes over time, ecosystem services, and urban and environmental planning. In this study, it is aimed to extract tree crown boundaries from point clouds produced by LiDAR technology and photogrammetric images, to determine their number, to determine tree heights and volumes, and to extract various forest metrics within forest discipline. The proposed flowchart in study was tested by using LiDAR point cloud of wooded (Spruce) area with three closed levels in Maçka District, and photogrammetric point cloud in tree covered study area in Akdeniz University. The point cloud used as input data is divided into two classes as ground and above ground by SMRF. With the algorithm developed in the MATLAB, the CHM was applied for above-ground points, resulting in the extraction of forest metrics and then individual tree clusters were determined. In order to increase the accuracy of determined tree clusters and numbers, the existing algorithm has been improved by performing vertical segmentation of trees with Octree data organization method, in case of the possibility that more than one tree cluster may occur within individual tree clusters. For accuracy analysis, tree position, chest diameter, tree crown width and tree height parameters were locally measured in test areas and compared with improved algorithm results. According to the evaluation result, it has been revealed that number of trees and other forest metrics in point cloud can be produced with high accuracy with Octree method.

Keywords: LiDAR, Image Matching, Point Cloud, Tree, Octree

1. GİRİŞ

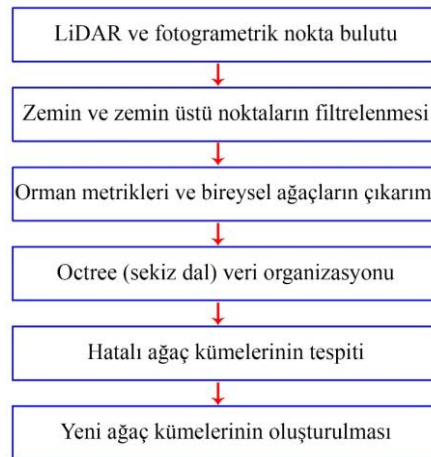
Ülkelerin benimsedikleri ormancılık politikası sebebiyle ağaçlık alanların insan gücüne ihtiyaç duyulmadan otomatik olarak tespiti ve kontrolü ekonomik, sosyal ve sürdürülebilir kalkınma açısından büyük önem arz etmektedir. Zaman içindeki ağaç değişikliklerinin izlenmesi ve yönetimi, ekosistem hizmetleri, şehir ve çevre planlaması için ağaç envanter bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır (Nicholls, 1980). Bu yüzden günümüzde gelişen uzaktan algılama ve fotogrametri teknolojileri ile birlikte üretilen LiDAR (Light Detection and Ranging) ve fotogrametrik nokta bulutlarının orman araştırmalarındaki kullanımı hız kazanmıştır.

LiDAR teknolojisi, yer yüzeyine ait üç boyutlu konum bilgisini hızlı ve hassas bir biçimde üretebilen ve kullanıcıya yoğun bir nokta bulutu şeklinde sunabilen aktif bir uzaktan algılama teknolojisidir. Lazer teknoloji düşük irtifada detay alımı (Cao vd., 2016; Kukkonen vd., 2019) yapabildiği için orman envanter parametrelerinin çıkarılmasında daha çok tercih edilmektedir. Araştırmacılar bireysel ağaç kümelerini belirlemek için genellikle veri seti olarak hava LiDAR (Chen vd., 2021), yersel LiDAR (Chen vd., 2021) ve mobil LiDAR (Herrero-Huerta vd., 2018) kullanmaktadır. Üretilen LiDAR veya fotogrametrik nokta bulutundaki gürültülü noktaların başlangıçtaki veri kümesinden filtrelenmesi gerekir (Chen vd., 2021; Herrero-Huerta vd., 2018). İlave olarak bazı çalışmalarda dijital hava fotoğrafları (Fensham ve Fairfax, 2002) ve hiperbantlı görüntüler LiDAR nokta bulutları ile entegre biçimde kullanılmaktadır (Zhang ve Qiu, 2012). Nokta bulutlarından bireysel ağaç kümelerinin çıkarımı için genellikle derin öğrenme tabanlı algoritmalar (Chen vd., 2021; Liu vd., 2021; Seidel vd., 2021) veya 3B voksel yapısı (Herrero-Huerta vd., 2018) tercih edilmektedir. Literatürdeki çalışmalardan anlaşılabileceği üzere ele alınan veri setinin türü, ağaç çıkarımı sonucunu doğrudan etkilemektedir. Ayrıca bitişik ağaç kümelerinden bireysel ağaçların çıkarımı üzerine yoğun bir çalışma gerektiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, LiDAR ve fotogrametrik eşleştirme tabanlı nokta bulutundan, ağaç sayısının doğru bir şekilde belirlenmesi için MATLAB yazılımında mevcut çıkarım fonksiyonunu iyileştiren yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşım, MATLAB yazılımında uygulanan beş adımdan oluşmaktadır. İlk adımda nokta bulutlarına SMRF (Simple Morphological Filter) algoritması uygulanarak zemin ve zemin dışı noktalar filtrelenmiştir. İkinci adımda MATLAB yazılımında var olan orman metrik çıkarımı ve bireysel ağaçların tespiti için geliştirilen fonksiyon kullanılarak ağaçlar kümelendirilmiştir. Fakat kümelenen ağaçlar arasında hatalı kümeler mevcuttur. Üçüncü adımda her ağaç kümesi için Octree (sekiz dal) veri organizasyonu uygulanır ve en üst basamakta kalan noktalardan (ağaç tepeleri) eğri geçirme işlemi yapılır. Dördüncü adımda MATLAB 'da ki fonksiyonun hatalı olarak ürettiği kümeler otomatik olarak tespit edilir. Son aşamada ise önerilen algoritma ile iki aşamalı düzleştirme yapılarak nihai ağaç sınırları ve sayısı elde edilmiştir.

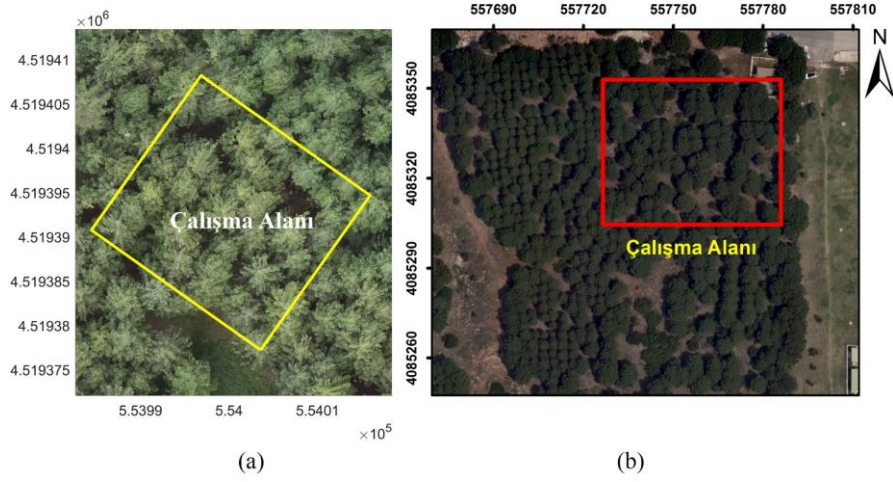
2. ÇALIŞMA ALANI VE YÖNTEM

LiDAR ve fotogrametrik eşleştirme tabanlı nokta bulutlarından bireysel ağaç kümelerinin çıkarılması için MATLAB yazılımındaki mevcut fonksiyonu iyileştirmek üzere beş aşama uygulanmıştır. Geliştirilen yöntemin genel akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin genel iş akışı

Bu çalışmada veri seti olarak Trabzon İli, Maçka İlçesi'nde yer alan üç kapalı seviyesine sahip (Ladin) ve Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi kuzey batı bölümünde bulunan mevcut ağaçlık (Çam) alan kullanılmıştır. Maçka İlçesi'nde seçilen bölge 496.01 m², Akdeniz Üniversitesi'nde seçilen bölge ise 3.348,25 m²'lik alanda çevrelenmektedir. Test alanı içinde kalan ağaçlar hem bitişik ağaç kümelerini hem de bireysel ağaç kümelerini iyi şekilde temsil etmektedir. Çalışma alanlara ait görüntüler Şekil 2'de gösterilmektedir.



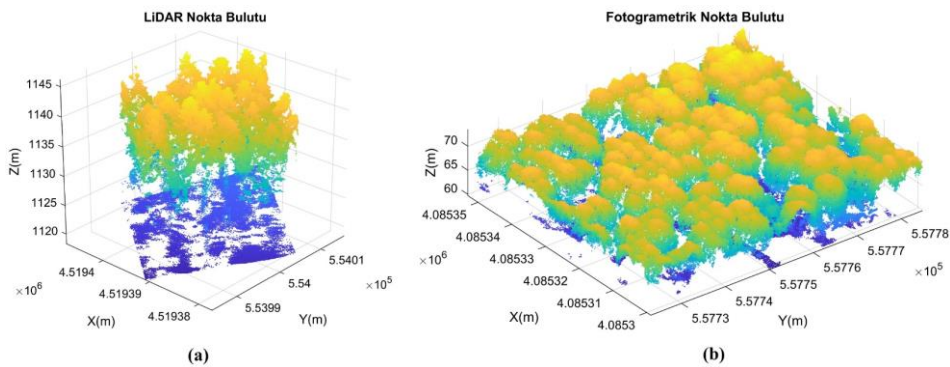
Şekil 2. Çalışma alanları: a) Maçka (Pilav Dağı), b) Akdeniz Üniversitesi.

2.1. LiDAR ve Fotogrametrik Nokta Bulutu

Bu çalışmada Trabzon İli, Maçka İlçesi'nde yer alan ağaçlık alanın LiDAR nokta bulutu, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinin kuzey batı tarafında bulunan ağaçlık alanın ise fotogrametrik nokta bulutu kullanılmıştır. Maçka İlçesi'ndeki test bölgesinin 16 Ağustos 2022 tarihinde DJI M300 RTK ile araziden yaklaşık 100 m irtifadan alımı gerçekleştirilmiştir. Akdeniz Üniversitesi test bölgesinin ise 24 Aralık 2021 tarihinde DJI M300 RTK ile yaklaşık 80 m irtifadan alımı gerçekleştirilmiştir. LiDAR nokta bulutunu oluşturmak için Zenmuse L1 LiDAR kamerası; fotogrametrik nokta bulutu için Zenmuse P1 kamerası kullanılmıştır. Kamera bilgileri detaylı bir şekilde Çizelge 1'de sunulmaktadır. Zenmuse P1 LiDAR kamerası RGB haritalama kamerasına sahip olduğu için doğru renkte nokta bulutu üretebilmektedir. Seçilen test alanları içinde LiDAR nokta bulutunda 447.785 nokta; fotogrametrik nokta bulutunda ise 1.193.240 nokta yer almaktadır. Veri setlerinin ortalama yoğunlukları LiDAR nokta bulutu için 902,774 nokta/m²; fotogrametrik nokta bulutu için 356,38 nokta/m² olarak hesaplanmıştır. Üretilen LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutları Şekil 3'te gösterilmektedir.

Çizelge 1. Zenmuse L1 ve P1 kamera özellikleri

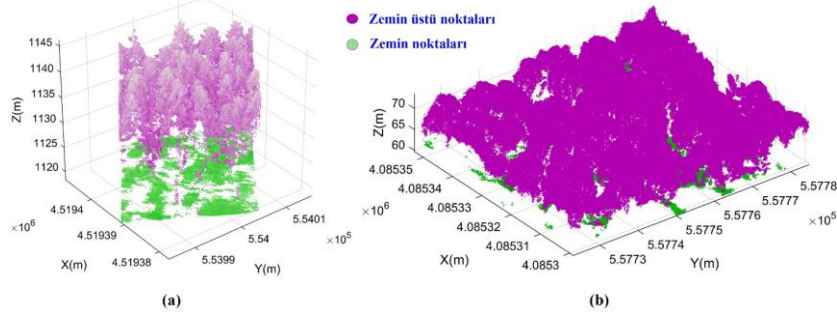
Zenmuse L1		Zenmuse P1	
Algılama aralığı	450 nm	Piksel boyutu	4.4 μm
Etkin nokta hızı (tek dönüş)	240.000 pts/sn	Mutlak doğruluk (yatay)	3 cm
Çoklu dönüş	480.000 pts/sn	Mutlak doğruluk (dikey)	5 cm
Yatay hassasiyet	10 cm (irtifa: 50 m)	Sensör boyutu	35,9 × 24 mm
Dikey hassasiyet	5 cm (irtifa: 50 m)	Çözünürlük	45 MP
FOV (Görüş alanı)	95 °	Minimum fotoğraf aralığı	0,7 saniye
IMU Güncelleme Sıklığı	200 Hz	Lens boyutu	35 mm
Açısal Hız Ölçer Aralığı	± 2000 dps		
RGB Haritalama Kamerası			
Sensör boyutu	1 inch		
Çözünürlük	20 MP		
Odak uzaklığı	8,8 mm		



Şekil 3. LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutları: a) Maçka, b) Akdeniz Üniversitesi.

2.2. Nokta Bulutunun Filtrelenmesi

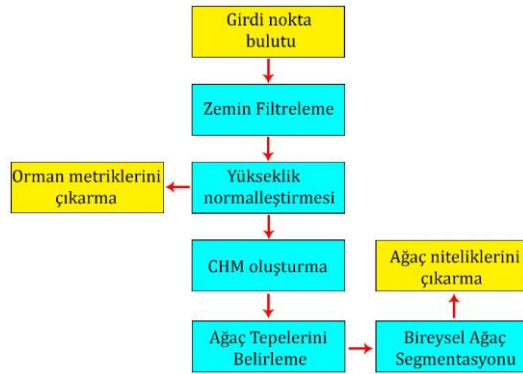
Nokta bulutlarından herhangi bir detayı çıkarmak için geliştirilen algoritmalarda başlangıç olarak gürültülü noktaların veri setinden temizlenmesi istenmektedir (Chen vd., 2021; Herrero-Huerta vd., 2018). Çünkü gürültülü noktalar geliştirilen matematiksel modeli tam anlamıyla temsil edemeyebilir. Bu çalışmada asıl amaç bireysel ağaçları çıkarmak olduğu için kullanılan iki farklı nokta bulutunda da SMRF algoritması ile zemin ve zemin üstü olmak üzere iki ayrı sınıf oluşturulmuştur (Pingel vd., 2013). SMRF algoritmasının uygulamadaki sonuç görüntüsü Şekil 4'te gösterilmektedir.



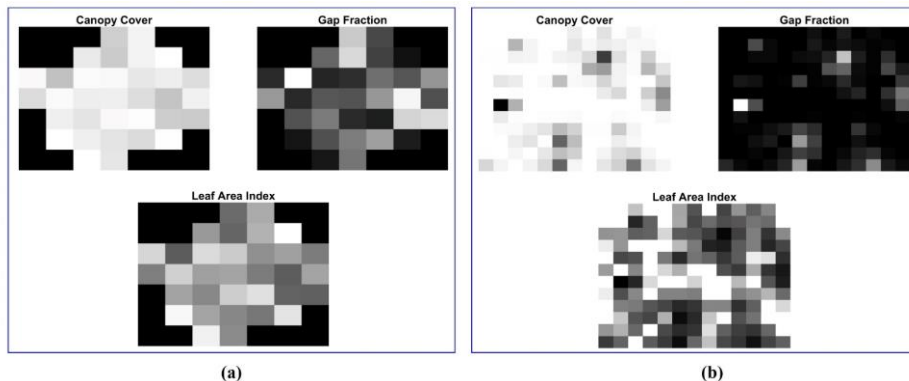
Şekil 4. LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutlarında SMRF algoritma sonuçları: a) Maçka, b) Akdeniz Üniversitesi.

2.3. Orman Metrikleri ve Bireysel Ağaçların Çıkarılması

Ağaç detayının çıkarılması için MATLAB yazılımının LiDAR araç kutusundan faydalanılmıştır. Mevcut algoritmanın genel akışı Şekil 5'de gösterilmiştir. MATLAB'da hazır olarak bulunan bu uygulama öncelikle girdi olarak kullandığı nokta bulutuna SMRF uygulamaktadır. Daha sonra arazinin bitki örtüsü üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak için zemin üstü noktalara yükseklik normalleştirme yapılmakta ve Kanopi Örtüsü (Canopy Cover-CC), Boşluk fraksiyonu (Gap fraction-GF) ve yaprak alan indeksi (Leaf area index-LAI) orman metriklerini oluşturur. Kanopi örtüsü, ağaç taçlarının dikey izdüşümüne göre ormanlık alanları belirleyen metriktir (Ma vd., 2017). Boşluk fraksiyonu, ışık huzmesinin ağaçlık alan ile karşılaşmadan kanopiden geçme olasılığıdır (Richardson vd., 2009). Yaprak alan indeksi, birim zemin alanı başına tek taraflı yaprak alanı miktarıdır (Richardson vd., 2009). Orman metriklerinin çıkarılması için çalışma alanı gridlere bölünmesi gerekmektedir. Uygulamada grid boyutu 10 m olarak seçilmiştir. Çıkarılan orman metrikleri Şekil 6'da gösterilmektedir.

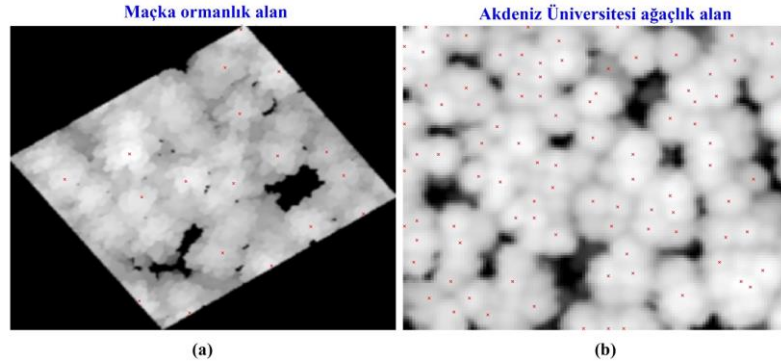


Şekil 5. Mevcut algoritmanın genel iş akışı



Şekil 6. Orman metriklerinin çıkarımı: a) LiDAR nokta bulutu, b) Fotogrametrik nokta bulutu.

Kanopi yükseklik modeli (CHM) kullanılarak test alanı içerisinde bulunan ağaçlık alanların yüksekliklerine göre raster görüntüsü oluşturulmuştur (Şekil 7). Kanopi yükseklik modeli ile kullanılan veri seti üzerinde ağaç tepeleri işaretlenerek ağaç merkezleri tespit edilmiştir. Fakat mevcut algoritma bitişik ağaç kümelerinin ayrımını tam olarak ifade edemediği için bulunan ağaç tepe sayısı, çalışma alanındaki mevcut (gerçek) ağaç sayısını verememektedir.



Şekil 7. Ağaç tepelerini belirleme: a) LiDAR nokta bulutu, b) fotogrametrik nokta bulutu

CHM raster görüntüsü üzerinden MATLAB yazılımındaki “*helperDetectTreeTops*” fonksiyonu ile değişken pencere boyutlarındaki yerel maksimum noktalar belirlenerek ağaç tepe noktaları bulunur (Şekil 7). Uygulama da minimum ağaç yüksekliği 5 m olarak seçilmiştir. Son olarak “*helperSegmentTrees*” fonksiyonu ile bireysel ağaç segmentasyonu yapılır. Bu aşama ile birlikte mevcut algoritma bireysel ağaç kümelerini çıkarabilmektedir. Mevcut algoritma yardımıyla nokta bulutu için oluşturulan bireysel ağaç kümeleri Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Bireysel ağaç çıkarımı; a) LiDAR nokta bulutu, b) fotogrametrik nokta bulutu.

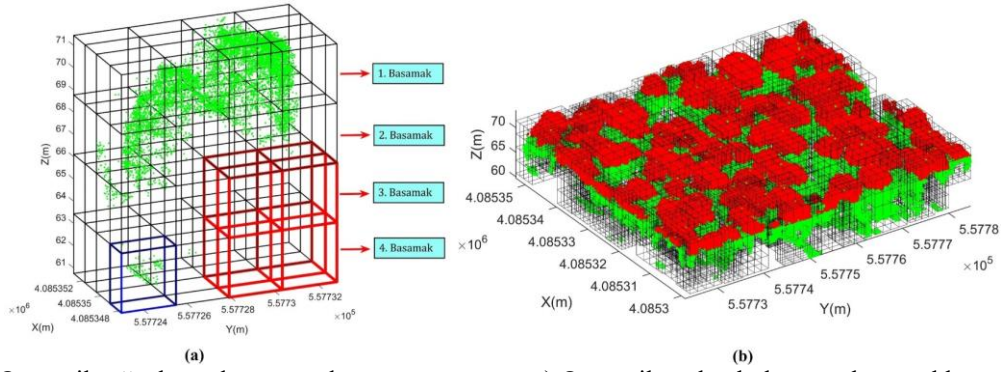
Bu aşamaya kadar mevcut algoritmanın ilgili test alanı için hem LiDAR hem de fotogrametrik nokta bulutu üzerinde nasıl çalıştığı anlatılmıştır. Bundan sonraki bölümlerde bitişik ağaç kümelerinden bireysel ağaçların daha iyi bir şekilde çıkarabilmesi için mevcut algoritmanın iyileştirilmesine yönelik detaylar anlatılacaktır.

2.4. Octree (Sekiz Dal) Veri Organizasyonu

Mevcut algoritmanın oluşturduğu bireysel ağaç kümeleri incelendiğinde bitişik ağaç kümeleri için tam anlamıyla doğru bir sonuç üretmediği görülmüştür. Bu yüzden üretilen her bir ağaç kümesi tek tek incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ağaç kümelerinin detaylı bir şekilde incelenmesi için Octree (sekiz dal) veri organizasyonu kullanılmıştır. Octree yöntemi, girdi olarak kullanılan verilerin sekize bölünerek indeksli düzende oluşmasını sağlayan bir vokselleme yöntemidir ve 3B nokta bulutlarının uzamsal bölünmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlangıçta bütün veri kümesini kapsayacak şekilde kök hücre adı verilen bir voksel oluşturur. Belirlenen derinlik (depth) sayısına göre kök hücre sekize bölünerek oktanları oluşturur. Bölünmenin son aşamasında ortaya çıkan en küçük yapıdaki prizma/küp şekilleri de voksel olarak adlandırılmaktadır (Dybedal vd., 2019). Ayrıca içerisinde nokta bulunan vokseller Octree yapısındaki yaprakları temsil etmektedir.

Çalışmada Octree yönteminin uygulanması için derinlik (depth) sayısı değişkeni 3 olarak seçilmiştir. Oluşturulan Octree yapısı 4 basamaklı ve her bir basamağında 16 eşit hücre (voksel) bulunan toplam 64 eşit prizmaya sahiptir. Tek bir ağaç kümesine uygulanan Octree yapısı Şekil 9a’da detaylı bir biçimde gösterilmektedir. Mavi renkli hücre, voksel yapısını; kırmızı renkli 8 adet vokselin birleşimi ise bir adet oktanı oluşturmaktadır. Octree yapısındaki tüm hücrelerin ve basamakların MATLAB yazılımında otomatik bir şekilde kümelenmesi için kod geliştirildi. Bu sayede herhangi bir vokselin veya basamağın (16 adet voksel) içindeki noktalara erişim

sağlanabilmektedir. Basamak numaraları Şekil 9a'da gösterilmektedir. Bütün ağaç kümelerine bu işlem tam otomatik bir biçimde uygulanmıştır (Şekil 9b). Bundan sonraki aşamalarda yalnızca birinci basamak üzerinden işlemler uygulanacaktır. Tüm ağaç kümeleri için ilk basamağın otomatik olarak belirlenmesi Şekil 9b'de gösterilmektedir. Kırmızı renkli noktalar 1 numaralı basamağın içindeki noktaları; yeşil renkli noktalar ise 2, 3 ve 4 numaralı basamakların içindeki noktaları temsil etmektedir.



Şekil 9. Octree ile ağaçların düşey yönde segmentasyonu: a) Octree ile nokta bulutunun basamaklara ayrılması, b) tüm ağaç kümelerine Octree yönteminin uygulanması.

2.5. Hatalı Ağaç Kümelerinin Tespiti

Octree yapısında elde edilen birinci basamaktaki noktalar daha hızlı bir analiz imkânı sunmaktadır. Birinci basamaktaki noktalar incelendiğinde ağaç tepelerinin geometrisi daha kolay bir şekilde anlaşılmaktadır. Fakat birinci basamaktaki noktalara X-Z ve Y-Z düzlemi olmak üzere iki farklı perspektiften iki boyutlu bir analiz yapıldığı zaman ağaç tepelerinin farklı geometrilere sahip olması beklenilir. Bu yüzden çalışmanın geri kalan kısmında bütün işlemler iki farklı düzlem üzerinden gerçekleştirilecektir.

2.5.1. DBSCAN kümelemesi

Analiz için ilk basamakta yer alan gürültülü noktaların temizlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada gürültülü noktaların uzaklaştırılması için DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) algoritması (Ester vd., 1996) kullanılmıştır (Şekil 10a). DBSCAN algoritması veri kümesinde mevcut gruplar hakkında ön bilgi gereksizdir bir noktanın hangi kümeye ait olduğunu belirleyebilmektedir. Fakat bitişik kümelerin sınır nesneleri algılandığında algoritma kararsız hale gelebilmektedir (Tran vd., 2013). DBSCAN algoritmasının *Epsilon* (ϵ) ve *MinPts* isimli iki temel parametresi bulunmaktadır. Bu iki parametre ve komşuluk bölgesindeki nesnelerin sayısını göz önünde bulundurarak çekirdek (core), sınır (border) ve gürültü (aykırı değer) nokta olarak üç tür nesne ayırt etmektedir. *Epsilon* (ϵ), bir veri nesnesinin komşularını belirlemek için gerekli olan yakınlık mesafesidir. Kısacası kümeleri belirten yarıçap mesafesidir. Aralarındaki mesafe epsilon'dan küçük iki nokta komşu olarak kabul edilir. *MinPts*, bir bölgenin yoğun olarak adlandırılabilmesi için *epsilon* komşuluğunda bulunması gereken en az komşu nokta sayısıdır. Diğer bir tanımla bir kümeyi tanımlamak için gereken minimum nokta sayısıdır.

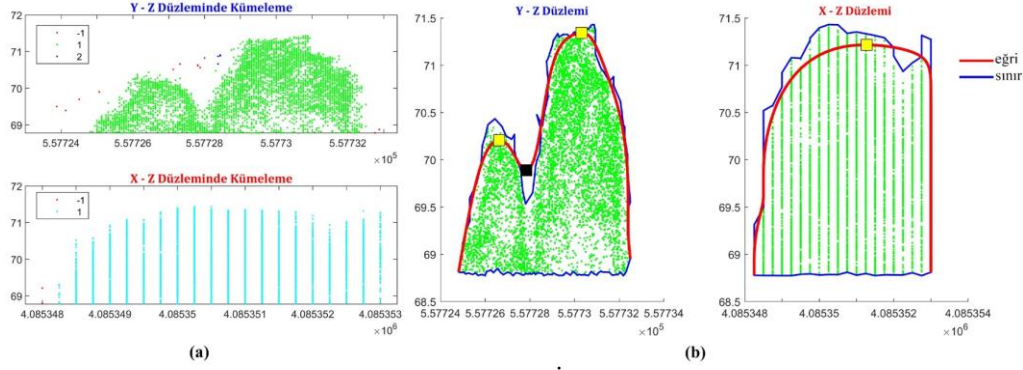
2.5.2. Sınır çizdirme

DBSCAN algoritması sonucu en yüksek nokta sayısına sahip olan kümeden MATLAB yazılımındaki “boundary” fonksiyonu ile sınır geçirilmiştir (Şekil 10b). Sınır fonksiyonu “alphashape” algoritmasına dayanmaktadır. Kullanılan fonksiyon için küçültme faktörü (shrink factor) [0-1] aralığında değişkenlik gösterebilmektedir. Küçültme faktörü 0 olursa küçültme yoktur ve maksimum alfa yarıçapını verir. Eğer küçültme faktörü 1 olursa küçültme oranı artacağı için en düşük alfa yarıçapını verecektir ve daha sıkı bir sınır çizilebilecektir (Ozdemir vd., 2021). Varsayılan küçültme faktörü 0,5 olarak çalışmaktadır. Bu çalışma için küçültme faktörü 0,75 olarak seçilmiştir.

2.5.3. Eğri geçirme

Mevcut fonksiyon ile kapalı poligon şeklinde sınır geçirilmiştir. Çalışmada yeni ağaç kümelerinin oluşturulabilmesi için sınır noktaları üzerinden yerel minimum ve maksimum noktaların belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada iki temel sorun bulunmaktadır. Birincisi ağacın profilini çıkarmak için en alta bulunan sınır noktalarının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Diğer sorun ise çizdirilen sınırlar, düzensiz bir yapıya sahip

olduğu için çok sayıda yerel minimum ve maksimum nokta üretilebilir. Bu sorunların çözümü için öncelikle her iki düzlemdeki yatay koordinatlara göre minimum ve maksimum sınır koordinatı belirlendi. Eğer birden fazla aynı yatay koordinat değerine sahip nokta varsa ilgili koordinatlar arasından en düşük yükseklik (Z) değerine sahip olan nokta seçilmiştir. Belirlenecek bu iki sınır noktası (min/maks) arasında kalan sınır noktalarından ağaç profilini temsil edebilecek yeni bir sınır oluşturulur. Daha sonra bu noktalardan eğri geçirilerek birden fazla yerel maksimum ve minimum noktaların oluşmasının önüne geçilmiştir. Eğri üzerindeki noktaların konumsal özelliklerinden yararlanılarak geliştirdiğimiz kod ile yerel minimum ve maksimum noktalar otomatik olarak belirlenmiştir. Hesaplanan yerel maksimum ve minimum noktalar **Şekil 10b**'de gösterilmektedir. **Şekil 10b**'de gösterilen sarı renkli kareler yerel (lokal) maksimum noktaları; siyah renkli kare ise yerel minimum noktayı temsil etmektedir.



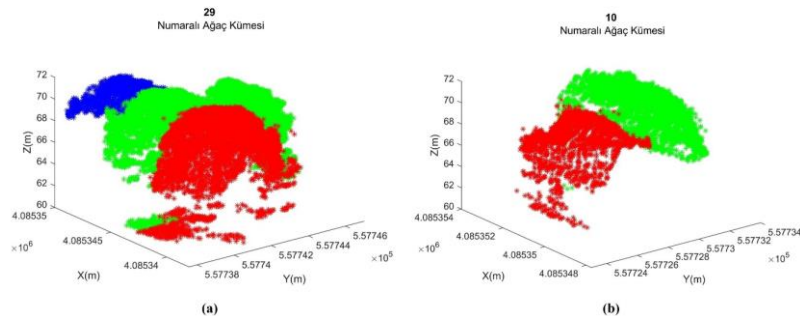
Şekil 10. Farklı düzlemlerden ağaç profillerinin analizi: a) İki tepeli ağaç için DBSCAN kümeleme sonucu, b) eğri üzerinden yerel maksimum ve minimum noktaların belirlenmesi

2.5.4. Kümelerin filtrelmesi

Bu çalışmanın esas amacı, hatalı ağaç kümelerinin tespit edilip düzenlenmesini sağlamaktır. Hatalı kümelerin belirlenmesi için eğri üzerinde hesaplanan yerel maksimum noktalar kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmada hem Y-Z hem de X-Z düzlemindeki yerel maksimum nokta sayısı ayrı ayrı dikkate alınmıştır. İlgili düzlemdeki lokal maksimum nokta sayısı 1 ise geliştirilen algoritma ilgili sütuna 0 olarak işaretleme yapmaktadır. Eğer lokal maksimum nokta sayısı 1'den büyük ise ilgili sütuna 1 olarak işaretleme yapmaktadır. Toplamda ağaç küme sayısı kadar satır, düzlem sayısı (2) kadar sütundan oluşan ve içerisinde 1 ve 0 rakamları bulunan mantıksal bir matris oluşturulmaktadır. Matematiksel olarak “veya” bağlacı tablosu ile mantıksal tablo analiz edilmiştir. Mantık tablosuna göre her iki sütunun 0 olarak işaretlendiği satır hatasız küme olarak belirlenir. Özetle her iki düzlemde de tek bir yerel maksimum değerine sahip bireysel ağaç kümesi olduğu onaylanan kümelerdir. Bunun dışındaki tüm durumlar hatalı küme olarak işaretlenir. Bu durumda ağaç kümesinin hatalı olarak tespit edilebilmesi için en az bir düzlemde birden fazla yerel maksimum noktaya ihtiyacı olduğu anlaşılmaktadır.

2.6. Yeni Ağaç Kümelerinin Tespiti

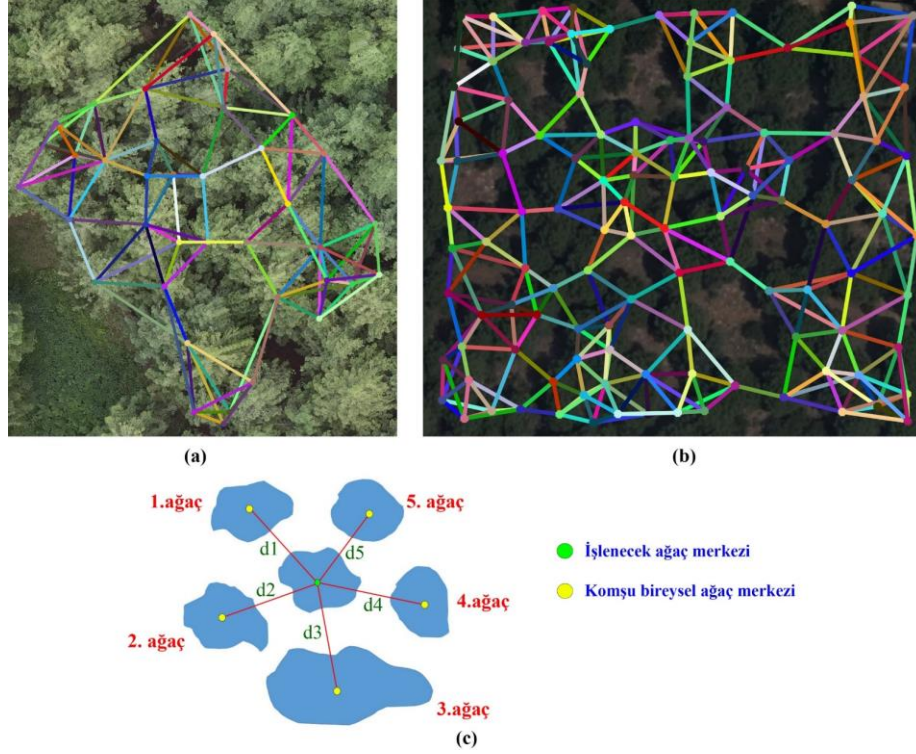
Hatalı ağaç kümelerinin düzenlenmesi için yerel minimum nokta sayısı dikkate alınmıştır. Bu aşamaya kadar iki düzlem üzerinde eş zamanlı işlemler uygulanmıştır. Bundan sonraki aşamada hangi düzlemin doğru ağaç kümesini temsil edebileceğine karar verilmelidir. Düzlem belirlemek için hatalı kümelerin yerel minimum nokta sayısı 0'dan büyük olan düzlemi tespit edilir. Eğer her iki düzlemde de en az 1 yerel minimum nokta mevcut ise yerel minimum nokta sayısı daha fazla olan düzlem seçilir. Düzlem seçiminden sonra yerel minimum noktaların yatay koordinatına göre mevcut ağaç kümelerinin bölütlenmesi yapılarak yeni ağaç kümeleri oluşturulmuştur. Yapılan bölütleme işlemi doğrudan yerel minimum nokta sayısı ile ilişkidir. Hatalı kümelerin düzenlenmesine ilişkin örnek **Şekil 11**'de gösterilmektedir. **Şekil 11a**, ağaç kümesinin X-Z düzleminde, **Şekil 11b** ise ağaç kümesinin Y-Z düzlemi üzerinde bölütlenmesini temsil etmektedir.



Şekil 11. Hatalı kümelerin bölütlenmesi: (a) üç tepeli ağaç, (b) iki tepeli ağaç.

2.6.1. Yeni ağaçların analizi

Önerilen yaklaşım ile bitişik ağaç kümelerindeki tespit edilemeyen birçok ağaç düzeltilmesine rağmen farklı perspektiflerden gerçekleştirilen analiz neticesinde bazı ağaçların bireysel olarak halen doğru bir şekilde kümelenemediği gözlemlenmiştir. Bu durumdan dolayı birinci düzeltmenin bazı durumlarda yeterli olmadığı görülmüştür. Hata içeren ağaç kümelerinin tespit edilebilmesi için en son ortaya çıkarılan bireysel ağaç kümelerinin birbirleri arasındaki geometrik ilişkisi irdelenmiştir. Tüm ağaç kümeleri için en yakınında bulunan 5 komşu ağaç otomatik olarak tespit edildikten sonra ağaç taç sınırları arasında birkaç tanımlayıcı istatistiksel ölçütler kullanılarak ikinci defa hatalı ağaç tespiti otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir bireysel ağacın yakınındaki komşu 5 ağacın otomatik olarak tespit edilmesi **Şekil 12**'de gösterilmektedir.

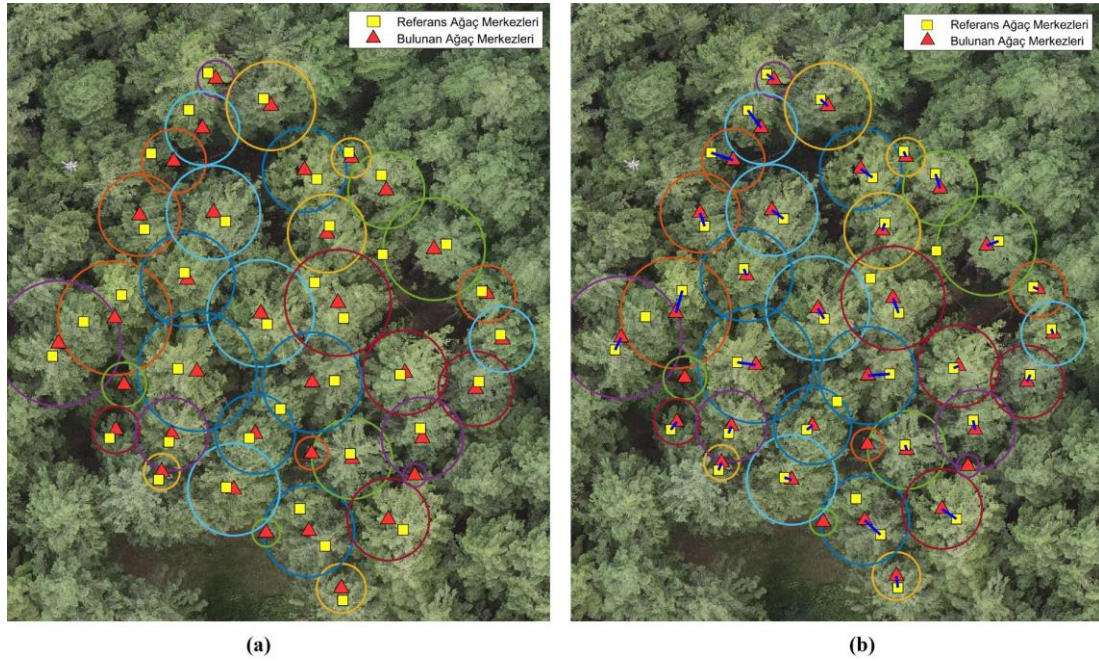


Şekil 12. Hata içeren ağaçları belirleme: a) Maçka bölgesi, b) Akdeniz Üniversitesi, c) komşu ağaçların geometrik ilişkilerinin irdelenecek tasarımının görseli.

Ağaç taç sınırlarının komşulukları arasındaki istatistiksel ilişkiler gözlemlendikten sonra ikinci defa düzeltilmesi gereken ağaç kümeleri otomatik olarak belirlenmiştir. Akdeniz Üniversitesi ağaçlık alan için belirlenen hatalı ağaçlar tekrar Kanopi Yükseklik Modeli'nde girdi olarak kullanılmıştır. İkinci kez uygulanan Kanopi Yükseklik Modelinde grid çözünürlüğü 0,5' den 0,3' e düşürülerek hatalı ağaçlar içerisinde yeni bireysel ağaç kümeleri tespit edilmiştir. Maçka bölgesinde ise kapalılık seviyesi (3) yüksek ve ağaç dalları çok sıkı olduğu için Kanopi yükseklik Modeli hatalı ağaç içerisinde yeni ağaç tepe noktalarını tespit edememiştir. Yoğun ve sıkı bir ağaçlık alanda birinci düzenleme sonucu, kalan hatalı ağaç kümelerinin tepe olarak algılanabilmesini engelleyebilecek birçok ağaçtan arındırılması sağlanmıştır. Bundan dolayı son durumda tespit edilen hatalı ağaç kümeleri tekrar olarak farklı perspektiflerden incelenerek lokal maksimum ve minimum noktaların belirlenmesi sağlanmıştır. Lokal minimum noktaya göre ikinci kez bölütlenme gerçekleştirilerek yeni bireysel ağaç kümeleri oluşturulmuştur.

2.7. Bulgular ve Değerlendirme

Önerilen yöntemin LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutunda tespit edilen hatalı ağaç kümeleri ve sonucunda toplam oluşan ağaç sayısı hakkındaki bilgiler **Çizelge 2**'de sunulmaktadır. Yapılan çalışmanın kalitesini belirlemek için sayı bazlı bir doğruluk analizi yapılmıştır (**Çizelge 2**). Ağaçların planimetrik (taç) sınırları veya sembolik olarak çember şeklindeki referansları bulunmadığı için piksel bazlı doğruluk analizi yapılamamıştır. Bulunan her bir ağaç merkezi tek bir referans ile eşleşecek şekilde yeni bir eşleştirme algoritması geliştirilmiştir (**Şekil 13**). Geliştirilen eşleştirme algoritması, bireysel ağaç kümelerinin oluşturduğu taç sınırlarından geçirilen farklı boyuttaki çemberleri kullanarak doğru bir şekilde ağaç etiketlerini eşleştirebilmiştir.

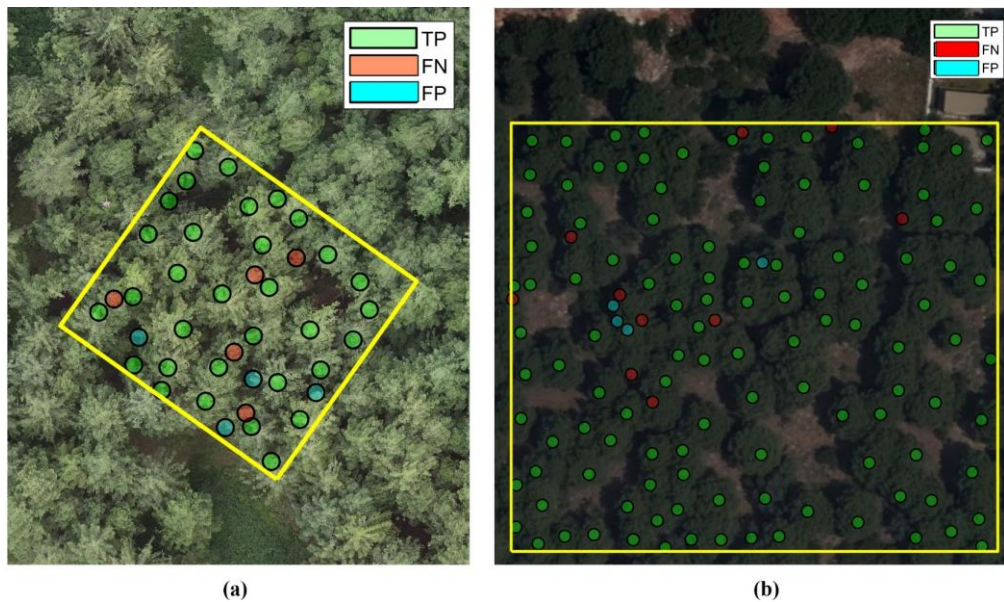


Şekil 13. Ağaç merkezlerinin referans ile eşleştirilmesi: a) son durumdaki ağaç merkezlerinin konumsal durumu (Maçka verisi), b) her bir ağaç merkezinin tek bir referans ile eşleştirilmesi.

Çizelge 2. Doğruluk Değerlendirmesi

Nokta Bulutu	Başlangıç	Birinci Hata	Ağaç Sayısı	İkinci Hata	Son durum
Fotogrametrik	94	20	115	7	120
LiDAR	18	13	32	4	36
Nokta Bulutu	TP	FN	FP	Referans Ağaç	Doğruluk (%)
Fotogrametrik	116	10	4	125	92.80
LiDAR	32	5	4	37	86.48
TP: doğru tespit edilen ağaç tepelerinin sayısı. FP: sahada mevcut olmayan fazladan ağaç tepelerinin sayısı (komisyon hatası). FN: algılanmayan ağaç tepelerinin sayısı (ihmal hatası). Doğruluk : TP/Referans ağaç sayısı					

Gerçek ağaç sayısını yersel ölçüm olmadan kesin bir şekilde belirlemek mümkün değildir. Akdeniz Üniversitesinde ki çalışma alanı için referans olarak kullanılacak ağaç sayısı insan gücü ile manuel olarak ortofoto üzerinden belirlenmiştir. Maçka bölgesindeki denek alanında ise yersel ölçüm ile referans ağaçlar belirlenmiştir. Her iki çalışma alanı için gerçekleştirilen doğruluk analizi ve son durumda oluşan ağaçlar ile ilgili sonuçlar Şekil 14’te gösterilmektedir.



Şekil 14. Doğruluk metrikleri: a) Maçka (Pılav Dağı), b) Akdeniz Üniversitesi

3. SONUÇ

Bu çalışmada, ağaç sınırlarının çıkarılması ve sayısının tespit edilebilmesi için LiDAR nokta bulutu ve görüntü eşleştirme yöntemi ile oluşturulan fotogrametrik nokta bulutu kullanılmıştır. Önerilen yöntem iki aşamalı düzeltme ile MATLAB yazılımındaki hazır uygulamanın belirlediği bireysel ağaçların, kümelerinin ve sayılarının doğruluğunu arttırmayı sağlamıştır. İlave olarak bireysel ağaç bölütlenmesi için farklı düzlemlerden ağaç profillerini analiz ederek literatüre farklı bir bakış açısı kazandırmıştır. Geliştirilen eşleştirme modeli ile bulunan ağaç merkezlerinin ilgili referans noktası ile eşleştirilmesi sağlanmıştır. Değerlendirme sonucuna göre önerilen yöntem bireysel ağaçların sayısını belirlemede Maçka bölgesinde %86, Akdeniz Üniversitesinde ise %93 oranında başarı sağlamaktadır. İlave olarak bu çalışma MATLAB'daki mevcut algoritmanın ağaç tepe noktalarını belirlemek için kullandığı Kanopi Yükseklik Modeli (CHM)'nin bitişik ağaç kümelerinde hatalı sonuç vermesine alternatif bir çözüm olanağı sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu verilerinin sağlanması noktasında GNNS Teknik Firması'na ve DSİ 22. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Cao, L., Coops, N. C., Innes, J. L., Dai, J., Ruan, H., She, G. 2016. "Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform LiDAR data". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49, 39–51.
- Chen, J., Chen, Y., Liu, Z. 2021. "Classification of typical tree species in laser point cloud based on deep learning". *Remote Sensing*, 13(23).
- Dybedal, J., Aalerud, A., Hovland, G. 2019. "Embedded Processing and Compression of 3D Sensor Data for Large Scale Industrial Environments". *Sensors*, 19(3), 636.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. 1996. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise". Retrieved from www.aaai.org
- Fensham, R. J., Fairfax, R. J. 2002. "Aerial photography for assessing vegetation change: a review of applications and the relevance of findings for Australian vegetation history". *Australian Journal of Botany*, 50(4), 415.
- Herrero-Huerta, M., Lindenbergh, R., Rodríguez-González, P. 2018. "Automatic tree parameter extraction by a Mobile LiDAR System in an urban context". *PLoS ONE*, 13(4).
- Kukkonen, M., Maltamo, M., Korhonen, L., Packalen, P. 2019. "Multispectral Airborne LiDAR Data in the Prediction of Boreal Tree Species Composition". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6), 3462–3471.
- Liu, M., Han, Z., Chen, Y., Liu, Z., Han, Y. 2021. "Tree species classification of LiDAR data based on 3D deep learning". *Measurement*, 177, 109301.
- Ma, Q., Su, Y., Guo, Q. 2017. "Comparison of Canopy Cover Estimations From Airborne LiDAR, Aerial Imagery, and Satellite Imagery". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(9), 4225–4236.
- Nicholls, D. C. 1980. "Book Review: Urban Forestry by GENE W. GREY and FREDERICK J. DENEKE. New York: John Wiley and Sons. 1978. pp. xv+279. £10.50". *Urban Studies*, 17(1), 100–101.
- Ozdemir, E., Karsli, F., Kavzoglu, T., Bahadır, M., Yagmahan, A. 2021. "A novel algorithm for regularization of building footprints using raw LiDAR point clouds". *Geocarto International*, 1–23.
- Pingel, T. J., Clarke, K. C., McBride, W. A. 2013. "An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77, 21–30.
- Richardson, J. J., Moskal, L. M., Kim, S.-H. 2009. "Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR". *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6–7), 1152–1160.
- Seidel, D., Annighöfer, P., Thielman, A., Seifert, Q. E., Thauer, J.-H., Glatthorn, J., ... Ammer, C. 2021. "Predicting Tree Species From 3D Laser Scanning Point Clouds Using Deep Learning". *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Tran, T. N., Drab, K., Daszykowski, M. 2013. "Revised DBSCAN algorithm to cluster data with dense adjacent clusters". *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 120, 92–96.
- Zhang, C., Qiu, F. 2012. "Mapping Individual Tree Species in an Urban Forest Using Airborne Lidar Data and Hyperspectral Imagery". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(10), 1079–1087.