

Mobil LiDAR ile sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde tek ağaç düzeyinde toprak üstü biyokütle tahmini

Tufan Demirel^{a,*}, Ahmet Salih Değermenci^b

Öz: Orman ekosistemleri, karasal organik karbon stoklarının büyük bölümünü barındırarak küresel karbon döngüsünün dengelenmesinde önemli bir rol oynar; bu nedenle toprak üstü biyokütle ölçümleri iklim politikaları ve sürdürülebilir orman yönetimi için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, Bolu yöresindeki saf sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde GeoSLAM ZEB-Horizon mobil LiDAR (Light Detection and Ranging) sistemi verilerinin toprak üstü biyokütle tahminlerindeki doğruluğunu yersel envanterle karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. 23 adet örnek alanda toplam 443 ağaç ölçülmüş; yersel göğüs çapı verileri Çömez (2010) ve Muukkonen (2007) allometrik modellerine uygulanarak referans toprak üstü biyokütle değerleri elde edilmiştir. Mobil LiDAR nokta bulutları ön işlemden geçirilmiş, zemin sınıflaması, yüksekliğe göre normalizasyon ve CSP (Comparative Shortest Path) tabanlı segmentasyon uygulanarak bireysel ağaç gövdeleri ayrıştırılmıştır. Mobil LiDAR taraması sırasında ağaç numaralandırma sırasına dayalı zamansal rota bilgisinden yararlanılarak tek ağaç eşleştirilmesi yapılmış ve böylece arazide ölçülen ağaçlar ile nokta bulutu üzerindeki ağaçlar başarıyla eşleştirilmiştir. Her ağaca ilişkin 1.30 m yükseklikte daire uydurma (circle-fitting) işlemi ile LiDAR-tabanlı göğüs çapları çıkarılmış ve aynı allometrik denklemler kullanılarak toprak üstü biyokütle tahminleri oluşturulmuştur. Mobil LiDAR tabanlı tahminlerin performans göstergeleri oldukça yüksek olup (Çömez: Ortalama Mutlak Hata: 4.20 kg, Kök Ortalama Kare Hatası: 48.72 kg, R²: 0.9930; Muukkonen: Ortalama Mutlak Hata: 2.79 kg, Kök Ortalama Kare Hatası: 31.75 kg, R²: 0.9931), homojen sarıçam meşcerelerinde mobil LiDAR'ın yersel envantere eşdeğer doğruluk ve belirgin zaman-verimliliği sağladığı sonucuna varılmıştır. Çalışma, mobil LiDAR uygulamalarının operasyonelleştirilmesi için ulusal protokol standartlarının oluşturulmasını, çoklu sensör füzyonunu, farklı orman tiplerinde kapsamlı doğrulama çalışmalarını ve operatör eğitiminin güçlendirilmesini önermektedir.

Anahtar kelimeler: LiDAR, Nokta bulutu, Orman envanteri, SLAM, TUB

Single tree-level aboveground biomass estimation using mobile LiDAR in scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands

Abstract: Forest ecosystems play a pivotal role in balancing the global carbon cycle by storing a substantial proportion of terrestrial organic carbon stocks; therefore, aboveground biomass (AGB) measurements are of critical importance for climate policy development and sustainable forest management. This study assesses the accuracy of AGB estimates derived from GeoSLAM ZEB-Horizon mobile LiDAR (Light Detection and Ranging) system data in pure Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the Bolu region, through a comparative evaluation with terrestrial inventory measurements. Across 23 sample plots, a total of 443 trees were measured. Terrestrial diameter at breast height data were applied to the allometric models of Çömez (2010) and Muukkonen (2007) to obtain reference AGB values. Mobile LiDAR point clouds underwent pre-processing, including ground classification, height normalization, and CSP (Comparative Shortest Path) based segmentation, to isolate individual tree stems. During the mobile LiDAR survey, individual tree matching was performed by utilizing the temporal trajectory information based on the tree numbering sequence, enabling successful matching between field-measured trees and trees in the point cloud. For each tree, LiDAR-based DBH was extracted through a circle-fitting procedure at 1.30 m height, and AGB were generated using the same allometric equations. The performance indicators of the mobile LiDAR-based estimates were notably high (Çömez: MAE: 4.20 kg, RMSE: 48.72 kg, R²: 0.9930; Muukkonen: MAE: 2.79 kg, RMSE: 31.75 kg, R²: 0.9931), indicating that in homogeneous Scots pine stands, mobile LiDAR achieves accuracy comparable to that of terrestrial inventory while providing significant time efficiency. The study recommends the development of national protocol standards for operationalizing mobile LiDAR applications, integration of multi-sensor fusion approaches, comprehensive validation across diverse forest types, and enhanced operator training.

Keywords: LiDAR, Point cloud, Forest inventory, SLAM, AGB

1. Giriş

Orman ekosistemleri, karasal organik karbon stoklarının en büyük belirleyicisi olarak, küresel karbon döngüsünün dengelenmesinde merkezi bir role sahiptir. Karasal organik

karbonun yaklaşık %75'i ormanlarda muhafaza edilmekte; bu da toprak üstündeki karbonun %80'ini ve toprak altındaki karbonun %40'ını oluşturmaktadır (Houghton vd., 2009; Pan vd., 2011). Ağaçların fotosentez aracılığıyla atmosferden çektiği karbonu biyokütleyle dönüştürmesi, iklim

^a Orman Amenajmanı Anabilim Dalı, Orman Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

^b Orman Amenajmanı Anabilim Dalı, Orman Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

* **Corresponding author** (İletişim yazarı): tufan.demirel@iuc.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 11.08.2025, **Accepted** (Kabul tarihi): 24.09.2025



Citation (Atıf): Demirel, T., Değermenci, A.S., 2025. Mobil LiDAR ile sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde tek ağaç düzeyinde toprak üstü biyokütle tahmini. Turkish Journal of Forestry, 26(4): 497-509.
DOI: [10.18182/tjf.1762167](https://doi.org/10.18182/tjf.1762167)

değişikliğiyle mücadelede önde gelen stratejiler arasında yer alır. Bu bağlamda orman biyokütlesi, Küresel İklim Gözlem Sistemi (GCOS) tarafından Temel İklim Değişkeni (ECV) olarak tanımlanmış olup, REDD+ Programı kapsamında sera gazı emisyonlarının azaltılması çalışmalarında kritik bir girdi sağlamaktadır (Corbera ve Schroeder, 2011; Herold vd., 2019). Dolayısıyla, sürdürülebilir orman yönetimi uygulamalarının planlanması ve iklim politikalarının etkinliğinin değerlendirilmesinde biyokütle verilerinin doğruluğu ve güvenilirliği vazgeçilmezdir.

Toprak üstü biyokütle (TÜB), bitkilerin gövde odunu, kabuk, yaprak/ibre, dallar ve tohumlar gibi toprak yüzeyinin üzerinde kalan tüm organik bileşenlerinin kuru ağırlığının toplamını ifade eder (Durkaya vd., 2013; Dou vd., 2019). TÜB, orman ekosistemlerinin karbon bağlama kapasitesini yansıtan temel göstergelerden biridir. Diğer taraftan TÜB'ün uzaktan algılama yöntemleriyle belirlenmesi, küresel ölçekte karbon depolama kapasitesinin tahmin edilmesinde önemli rol oynamaktadır (Duncanson vd., 2020). Ayrıca habitat kalitesinin değerlendirilmesi (Frolking vd., 2009), yangın davranışlarının öngörülmesi (Riaño vd., 2003), arazi yönetim politikalarının geliştirilmesi (Herold vd., 2019) gibi ormancılık çalışmalarında karar vericilere veri desteği sunma bağlamında da TÜB haritaları kullanılabilir.

TÜB tahminine yönelik farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden doğrudan arazi ölçümlerine dayanan teknikler en yüksek doğruluğu sunsa da geniş ölçeklerde uygulanmaları hem zaman hem de iş gücü maliyeti nedeniyle sınırlıdır. Diğer yandan, orman envanteri verileriyle göğüs çapı ($D_{1.30}$) veya ağaç boyu gibi temel parametrelere dayanarak geliştirilmiş basit allometrik modeller (Muukkonen, 2007; Çömez, 2010); yükselti ve çevresel faktörleri de içeren karma modeller (Alvarez vd., 2012) ile biyokütle genişletme faktörleri kullanan yöntemler (Petersson vd., 2012) yaygın olarak tercih edilmektedir.

Geleneksel orman envanteri, ormancılık uzmanlarının deneyim ve sezgilerine dayanarak manuel biçimde yürütülmekte, dolayısıyla hem emek yoğun hem de zaman alıcı olmaktadır. Bu durum, envanter verilerinin güncelliğini ve mekânsal kapsamını kısıtlayarak etkin orman yönetimi ve koruma stratejilerinin hayata geçirilmesini güçleştirmektedir. İklim değişikliği, ormansızlaşma ve diğer antropojen baskılar altındaki günümüz orman ekosistemleri, yüksek doğrulukta ve geniş alanları kuşatan envanter bilgilerine her zamankinden daha fazla ihtiyaç duymaktadır. Bu anlamda özellikle son dönemlerde hızlı bir gelişme gösteren LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, orman yapısının üç boyutlu (3B) nokta bulutlarını hızlı, tahribatsız ve yüksek çözünürlükte elde etme imkânı sunarak klasik envanter yöntemlerine göre önemli avantajlar sağlamaktadır (Newnham vd., 2015; Liang vd., 2016). Tripodlu/Sabit yersel lazer tarama (Terrestrial Laser Scanning, TLS) yaklaşımları, orman ekosistemlerinin ayrıntılı 3B modellemesini mümkün kılarak, ağaç gövdelerinin haritalanmasını ve $D_{1.30}$ ölçümünü son derece hassas bir şekilde belirleyebilme imkânı sunmaktadır (Seidel vd., 2011; Akgül vd., 2016; Calders vd., 2020). Ancak TLS, geniş arazilerde birden çok sabit noktadan tarama gerektirmesi ve farklı tarama pozisyonlarının manuel olarak kaynaştırılmasını (registrasyon) zorunlu kılması nedeniyle kısıtlamalar barındırır (Wilkes vd., 2017; Guan vd., 2020; Hasheminasab vd., 2023).

Son on yılda, mobil (el tipi-sırt çantalı) LiDAR sistemleri orman envanteri araştırmalarında önemli ilerlemeler

kaydetmiş ve maliyet-etkinlik, zaman verimliliği ile geniş alanları kapsama kapasitesi gibi avantajları dolayısıyla dikkat çekmiştir. Mobil LiDAR, geleneksel TLS'nin yüksek doğruluğunu korurken, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) teknikleri aracılığıyla GNSS sinyali bulunmayan kapalı örtülerde bile sürekli ve otomatik nokta bulutu kaydı yapabilme olanağı sunar (Su vd., 2020). Böylece, manuel hizalama gereksinimi ortadan kalkmakta ve orman altı ile açık alan verileri yekpare bir veri seti olarak elde edilmektedir.

Mobile Laser Scanning (MLS) sistemlerinin yaygınlaşması, farklı mekânsal ölçeklerde orman yapısal özelliklerinin ağaç boyu, göğüs çapı ($D_{1.30}$), gövde hacmi ve TÜB tahminine imkân tanımaktadır (Heo vd., 2019; Hyypä vd., 2020a; Lu vd., 2020; Su vd., 2020; Xie vd., 2020; Ko vd., 2021; Hartley vd., 2022; Vandendaele vd., 2022; Ruhan vd., 2023). Türkiye'de mobil LiDAR teknolojisinin ormancılık envanterlerinde kullanımı üzerine yapılan ilk uygulamalar, Artvin ve Trabzon yörelerinde gerçekleştirilmiş olup, geleneksel ölçümlerle yüksek korelasyon (>0.95) elde edilmiştir (Vatandaşlar ve Zeybek, 2020; 2021). Daha kapsamlı çalışmalarda ise farklı meşcere tiplerinde göğüs çapı, ağaç sayısı ve meşcere boyu gibi parametrelerin düşük hata oranlarıyla tahmin edilebildiği, arazi süresinin ise birkaç kat kısaldığı rapor edilmiştir (Vatandaşlar vd., 2022a; 2022b). Benzer doğruluk sonuçları farklı bölgelerde de teyit edilmiş, mobil LiDAR'ın özellikle erişimi zor alanlarda zaman ve iş gücü verimliliği sağladığı vurgulanmıştır (Çakmak vd., 2022; Bahadır vd., 2022). Ancak, farklı orman tiplerindeki performansını ortaya koyan çalışmalar hâlâ sınırlıdır. Ayrıca, mobil LiDAR destekli TÜB tahminleri, sahada geçirilen süreyi dört kata kadar kısaltarak yüksek zaman verimliliği ortaya koymaktadır (Ko vd., 2021; Ruhan vd., 2023). Arazi süresi, aynı alan için yaklaşık 2–5 kat, veri işleme ve analiz süreleri ise yaklaşık 2–3 kat kısalabilmektedir; bu durum özellikle yoğun ve erişimi zor alanlarda büyük avantaj sunmaktadır. Küçük örnek alanlarda kesilmiş veri ile çalışmak, doğruluğu önemli ölçüde korurken iş verimliliğini artırmakta ve pratik uygulamayı kolaylaştırmaktadır. Bu bulgular, mobil LiDAR'ın orman envanteri ve ekosistem ölçümlerinde hem zaman hem de iş gücü açısından etkin bir araç olduğunu göstermekte ve literatürde benzer çalışmalarda (Vatandaşlar vd., 2022b) önerilen hızlı veri toplama ve analiz avantajlarıyla uyum göstermektedir.

Bu çerçevede, bu çalışma kapsamında, Bolu yöresinde saf sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde, tek ağaç düzeyinde elde edilen mobil LiDAR verileriyle hesaplanan TÜB değerlerinin, geleneksel yersel yöntemlerle elde edilen TÜB değerleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. İlk aşamada, klasik envanter yöntemleriyle toplanan veriler kullanılarak her bir ağacın TÜB değeri hesaplanmış; ardından aynı örneklem alanlarında mobil LiDAR tarayıcıdan elde edilen 3B yapısal parametreler üzerinden yeniden TÜB tahminleri yapılmıştır. Son olarak, her iki yöntemden elde edilen TÜB değerleri eşleştirilmiş örneklem t-testi ile karşılaştırılarak mobil LiDAR teknolojisine doğruluk, tutarlılık ve uygulanabilirlik açısından potansiyeli ortaya konmuştur.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Çalışma alanı

Çalışma, Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Bolu Orman Bölge Müdürlüğü sınırları içindeki saf sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde yürütülmüştür (Şekil 1). Çalışma alanı nemli Karadeniz iklimi ile geçiş iklimi özelliklerini taşımakta olup, sarıçamın özellikle yoğun yayılış yaptığı Bolu ili için ortalama yıllık yağış 554.8 mm ve ortalama sıcaklık 10.5 °C civarındadır. Çalışma alanı olarak seçilen doğal sarıçam meşcereleri, 700-1600 m rakımları arasında yer almakta, genellikle %20-35 eğime sahip arazilerde dağılım göstermektedir. Sarıçam, Batı Karadeniz Bölgesi'nde hem odun üretimi hem de karbon depolama kapasitesiyle önemli bir ekonomik potansiyele sahip olup, toprak üstü biyokütle (TÜB) açısından detaylı olarak incelenmesi gereken bir türdür.

2.2. Arazi çalışması ve mobil LiDAR tarama

Çalışma alanı içerisinde yer alan saf sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcereleri, mevcut orman amenajman planları doğrultusunda belirlenmiş ve meşcere tipleri haritası kullanılarak konumları tespit edilmiştir. Örneklem sürecinde, farklı gelişim çağlarını kapsayan geniş bir çap aralığının temsil edilmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda meşcereler seçilmiştir. Belirlenen her bir meşcere tipinde, 400 m² ($r = 11.28$ m) büyüklüğünde dairesel örnek alanlar tesis edilmiştir. Ülkemiz ormanlarında plan yapım çalışmalarında karbon depolama kapasitesi ve dolayısıyla TÜB hesaplamaları sadece tek parametre (göğüs çapı) odaklıdır. Dolayısıyla çalışmamız kapsamında da örnek alanlarda yer alan tüm ağaçların göğüs çapları, toprak

seviyesinden 1.30 metre ($D_{1.30}$) yükseklikte çap ölçer kullanılarak ölçülmüştür.

Geleneksel envanter yöntemleriyle ölçümleri tamamlanan örnek alanlar, ardından mobil LiDAR sistemi olan ZEB-Horizon cihazı kullanılarak taranmıştır (Şekil 2). Tarama işlemi sırasında operatör, her bir örnek alanın merkezinden başlayarak serbest yürüyüş yöntemiyle hareket etmiş ve tüm ağaçları farklı açılardan kapsayacak şekilde alanı gezmiştir. Taramaya, geleneksel ölçüm sırasında 1 numara olarak belirlenen ağaçtan başlanmış ve numaralandırma sırasına uygun biçimde son ağaca kadar ilerlenmiştir. Mobil LiDAR taraması sırasında, ağaç numaralandırma sırasına dayalı zamansal rota bilgisinden yararlanılarak bireysel ağaç eşleştirilmesi gerçekleştirilmiş ve böylece arazide ölçülen ağaçlar ile nokta bulutu üzerindeki karşılıkları başarıyla ilişkilendirilmiştir. Geleneksel yöntemlerde ise aynı amaç için her bir ağacın konumu GNSS ile ölçülmekte, çeşitli hedef objeler kullanılmakta ve bu objelerden yararlanılarak co-registration gerçekleştirilmektedir. Söz konusu yöntem, özellikle zaman alıcı GNSS tabanlı konumlandırma yaklaşımlarına yenilikçi bir alternatif sunmaktadır.

ZEB-Horizon cihazı, tarama süresince SLAM algoritması ile çalışarak, her bir tarama pozisyonunu önceki noktalarla ilişkilendirerek üç boyutlu veri üretimini gerçekleştirmiştir. Cihaz, her adımda 360° yatay ve $\pm 60^\circ$ dikey açılarda yayılan lazer ışınlarının nesnelerden yansıyan verilerini kaydederek nokta bulutu verisini oluşturmuştur. Ağaç gövdelerinin tam ve sürekli bir şekilde taranmasını sağlamak amacıyla, son ağaçtan sonra örnek alanın çevresi bir kez daha dolaşarak tarama işlemi tamamlanmıştır. 400 m²'lik bir örnek alanın taraması yaklaşık 5 dakika sürmüştür; bu süre topografya ve alt örtü yoğunluğuna bağlı olarak değişebilmektedir. Çalışmada kullanılan ZEB-Horizon cihazına ait detaylı bilgi Çizelge 1'de verilmiştir (FARO, 2025).



Şekil 1. Çalışma alanı coğrafi konumu ve örnek alanların dağılımı
Figure 1. Geographical location of the study area and distribution of sample plots

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan ZEB-Horizon cihazına ait bilgiler

Table 1. Information about the ZEB-Horizon device used in the study

Özellik	Değer
Tarama menzili (maks.)	100 m
Tarama hızı	300.000 nokta/sn
Lazer sensör	Class 1 / λ 903nm
Görüş alanı (FoV)	$360^\circ \times 270^\circ$
Doğruluk (noktalar arası)	$\pm 1-3$ cm
Haritalama hızı	~ 20.000 m ² / saat
Çalışma süresi (batarya)	1.5 saat (değiştirilebilir batarya)
Ağırlık	1.4+1.45 kg
Veri kaydı	SLAM tabanlı, GNSS gerekmez
Çıkış verisi	3D nokta bulutu (LAS, LAZ, PLY, E57 vb.)

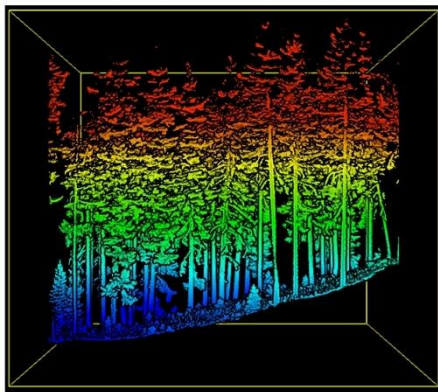
2.3. Mobil LiDAR verilerinin işlenmesi

Tarama işlemi tamamlandıktan sonra, cihazın hafıza kartından elde edilen ham nokta bulutu verisi (raw LiDAR data), GeoSLAM Hub (Connect Desktop) yazılımına aktarılmıştır. Bu yazılımın varsayılan filtreleri kullanılarak parazit (noise) içeren noktalar temizlenmiş, ardından veri

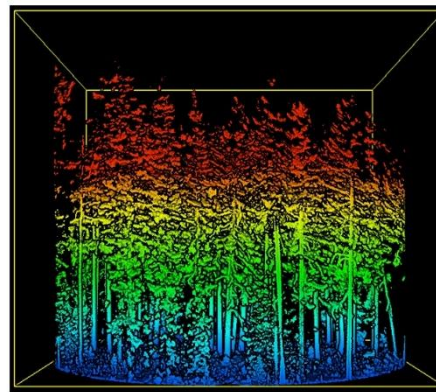
yoğunluğunu optimize etmek ve gereksiz tekrarları önlemek amacıyla seyreltme (thinning) işlemi uygulanmıştır. Temizlenen nokta bulutu verileri, LiDAR verilerinin işlenmesi ve analizine yönelik gelişmiş yerleşik işlevler sunan grafik kullanıcı arayüzüne (GUI) sahip LiDAR360 yazılımı (Green Valley International, 2023) ile analiz edilmiştir. Zemin noktaları, en düşük kot değerine sahip olan noktalar olarak tanımlanmış ve bu kritere göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılmamış nokta bulutu, 0.5 m grid boyutu ve 0.3 m zemin kalınlığı parametreleri esas alınarak zemin ve zemin olmayan noktalar şeklinde ayrıştırılmıştır. Ardından, topografik farklılıkların yükseklik verisi üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak amacıyla normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Bu kapsamda, her bir noktanın yüksekliği, en yakın zemin noktasının yüksekliği referans alınarak düzeltilmiş ve zemine göre normalize edilmiş yükseklik değerleri elde edilmiştir. Bireysel ağaçların belirlenmesi ve segmentasyonu için, yazılım içerisinde karşılaştırmalı en kısa yol algoritmasına (CSP - Comparative Shortest Path) dayanan bir segmentasyon yöntemi kullanılmıştır (Tao vd., 2015; Green Valley International, 2023).



Şekil 2. ZEB-Horizon cihazı ile LiDAR veri alımı
Figure 2. LiDAR data acquisition with the ZEB-Horizon device



A



B

Şekil 3. LiDAR360 yazılımında normalizasyon öncesi (A) ve sonrası (B) nokta bulutu.
Figure 3. Point cloud before (A) and after (B) normalization in LiDAR360 software

Ağaç segmentasyonu, Tao vd. (2015) tarafından geliştirilen ve doğrudan üç boyutlu nokta bulutu üzerinden çalışan CSP tabanlı alt-yönelimli segmentasyon algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu algoritma için LiDAR360 yazılımı içerisindeki *TLS Forest* araç takımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, geleneksel tepe yüksekliği modellerinden (CHM) farklı olarak doğrudan 3B veri üzerinden gövde tespitine olanak tanır. Tao vd. (2015) tarafından geliştirilen algoritma, ilk olarak DBSCAN (Ester vd., 1996) ile gövde tabanını tespit edip 1,3 m seviyesindeki 10 cm'lik dilimi tohum noktası olarak seçer, sonra gövdeden tacın tamamına kadar en kısa yol yapıları kurarak kümeleme yapar. Segmentasyon doğruluğunu artırmak amacıyla, mobil LiDAR sistemiyle elde edilen gövde koordinatları başlangıç (seed) noktaları olarak kullanılmıştır (Lu vd., 2020).

Başlangıç noktaları, yer örtüsünden kaynaklı hataları en aza indirmek için, göğüs yüksekliği seviyesinde (1.3 m) alınan yatay kesitler üzerinden tanımlanmıştır. Gövde tespiti yoğunluk tabanlı kümeleme algoritması olan DBSCAN yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, bireysel ağaç gövdelerine karşılık gelen noktaları otomatik olarak gruplayarak kümeler oluşturmuştur. Segmentasyon işlemi sırasında 0.2 m küme toleransı ve minimum 500 nokta sayısı kriteri esas alınmıştır. Yer örtüsü etkilerini azaltmak amacıyla sadece zeminden 0.3 m üzerindeki noktalar analiz kapsamına alınmış; ayrıca, eğik ağaçlara uyum sağlamak için maksimum 30° eğim açısı sınırı belirlenmiştir. Bu şekilde, her bir ağaca karşılık gelen noktalar başarılı bir şekilde ayrıştırılmış ve sınıflandırma işlemi tamamlanmıştır. Böylece her bir ağaç LiDAR görüntüsü üzerinde farklı renkle gösterilebilir hale getirilmiştir. Çalışmamızda, örnek alandaki tekil ağaçların ayrılmasına ve göğüs çaplarının otomatik olarak elde edilmesi ihtiyacı bulunmadığı için, DBSCAN algoritmasının parametreleri varsayılan değerler olarak kullanılmıştır. Ancak, örnek alandan tek bir ağacın çıkarılarak ayrı bir dosya halinde analiz edilmesi veya göğüs çaplarının otomatik olarak elde edilmesi gereken durumlarda, algoritmanın iki temel parametresi olan küme toleransı ve

minimum nokta sayısı değiştirildiğinde sonuçların nasıl etkilendiğinin gözlemlenmesi ve duyarlılık analizinin yapılması gerekmektedir (Chen vd., 2024).

Son olarak, yatay düzlemde 1.3 m yükseklikte ve 4 cm kalınlığındaki bir kesit üzerinden daire uydurma algoritması kullanılarak her bireysel ağaç için $D_{1.30}$ hesaplanmıştır. Bu amaçla ilgili yazılım bu işlemde, LiDAR360 yazılımında yer alan TLS Forest modülü içerisinde bulunan Fit DBH fonksiyonu kullanılmıştır (Green Valley International, 2023). Bu araç takımı, nokta bulutu verisi üzerinden ağaçların taban kesitlerinde daireler uydurarak $D_{1.30}$ değerlerini yüksek doğrulukla hesaplamaya olanak tanımaktadır. Ölçümler yapılırken yersel çalışmalar sırasında verilen ağaç numaralarına bağlı kalınmış ve her bir ağaca ait $D_{1.30}$ doğru sıra ile ölçülmüştür (Şekil 4).

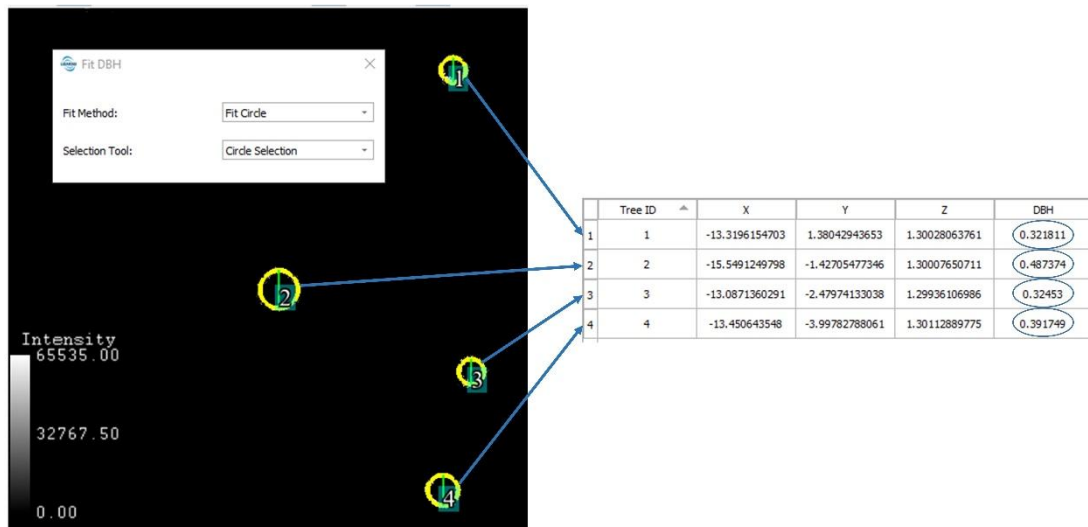
2.4. Toprak üstü biyokütleinin hesaplanması

Bu çalışmada, saf sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde toprak üstü biyokütle (TÜB) miktarlarının tahmini amacıyla yersel envanter verileri kullanılmıştır. Farklı alanlarda her biri 400 m² büyüklüğünde daire şeklinde örnek alanlar alınmış ve her örnek alandaki tüm ağaçlar numaralandırılarak her bir ağacın $D_{1.30}$ çapları çapölçerle ölçülmüştür. Ölçülen çap değerleri, sarıçam ağaç türüne özgü olarak geliştirilmiş iki farklı allometrik denklemde kullanılarak ağaç bazında TÜB miktarları hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan denklemlerden birincisi, Bolu yöresindeki sarıçam meşcerelerine özgü olarak Çömez (2010) tarafından geliştirilmiştir (Denklem 1). İkincisi ise ılıman kuşak sarıçam meşcereleri için Muukkonen (2007) tarafından önerilen allometrik denklemdir (Denklem 2).

$$TÜB = 0.045 \times DBH^{2.641} \quad (\text{Çömez (2010)} \quad R^2 = 0.978) \quad (1)$$

$$TÜB = 0.158 \times DBH^{2.237} \quad (\text{Muukkonen (2007)} \quad R^2 = 0.995) \quad (2)$$

Burada, TÜB toprak üstü biyokütleyi, DBH $D_{1.30}$ çapını ifade etmektedir.



Şekil 4. LiDAR360 yazılımı ile $D_{1.30}$ ölçümü.
Figure 4. LiDAR360 software with $D_{1.30}$ measurement

2.5. İstatistiksel analiz

Çalışmada, yersel ölçümlerle elde edilen $D_{1.30}$ verileri kullanılarak daha önce belirtilen Çömez (2010) ve Muukkonen (2007), allometrik denklemleri aracılığıyla hesaplanan TUB değerleri ile mobil LiDAR ölçümleriyle tahmin edilen TUB değerleri istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, üç farklı yöntemle (Denklem 1, Denklem 2 ve LiDAR) elde edilen TUB tahminleri arasındaki farkların anlamlılığı değerlendirilmiştir.

İstatistiksel analizlere başlamadan önce, veri setlerinin parametrik test koşullarını sağlayıp sağlamadığını belirlemek amacıyla normallik testleri uygulanmıştır. Her bir gruba ait toprak üstü biyokütle (TUB) verilerinin dağılımı, hem Shapiro-Wilk hem de Kolmogorov-Smirnov testleri kullanılarak değerlendirilmiş ve her iki test sonucuna göre de veri setlerinin normal dağılım göstermediği belirlenmiştir. Bu durum, parametrik testlerin doğrudan uygulanmasının uygun olmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, veri analizinde parametrik olmayan test yöntemlerinden biri olan Wilcoxon işaretli sıra testi (Wilcoxon Signed-Rank Test) tercih edilmiştir. Bu test, iki ilişkili (eşleştirilmiş) örneklem arasında medyan farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Verilerin normal dağılmadığı durumlarda, bağımlı örneklem t-testine güçlü bir alternatif olarak öne çıkar. Özellikle öncesi-sonrası karşılaştırmaları ya da aynı örneklem grubuna ait iki farklı ölçüm yöntemiyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması gibi durumlarda yaygın olarak uygulanmaktadır.

Bu bağlamda, çalışmada mobil LiDAR verileri ile yersel ölçüm verilerine dayalı biyokütle tahminlerinin karşılaştırılmasında Wilcoxon işaretli sıra testi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Tüm istatistiksel analizler R 4.3.2 yazılımları kullanılarak yürütülmüş; analizlerde %95 güven aralığı ve $p < 0.05$ anlamlılık düzeyi esas alınmıştır.

Bununla birlikte, yer ölçümleriyle elde edilen TUB değerleri ile mobil LiDAR verileri kullanılarak tahmin edilen TUB değerlerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla çeşitli istatistiksel performans ölçütlerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda, Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE), Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve belirtme katsayısı (R^2) hesaplanmıştır.

Söz konusu hata metrikleri, tahmin edilen ve gözlenen değerler arasındaki sapmaları nicel olarak ortaya koymakta ve modelin tahmin gücüne ilişkin kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. RMSE (Denklem 3) ve MAE (Denklem 4), tahmin hatalarının mutlak büyüklüğünü yansıtarak modelin genel doğruluğunu ortaya koyarken; MAPE (Denklem 5), tahmin performansını yüzdesel düzeyde değerlendirerek özellikle saha uygulamalarındaki pratik geçerliliği açısından önemli bir ölçüt sağlamaktadır. Buna ek olarak, belirtme katsayısı (R^2) (Denklem 6), mobil LiDAR verilerine dayalı biyokütle tahminlerinin ne derecede güvenilir ve açıklayıcı olduğunu ortaya koymaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TUB_{Gerçek} - TUB_{LiDAR})^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TUB_{Gerçek} - TUB_{LiDAR} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{TUB_{Gerçek} - TUB_{LiDAR}}{TUB_{Gerçek}} \times 100 \quad (5)$$

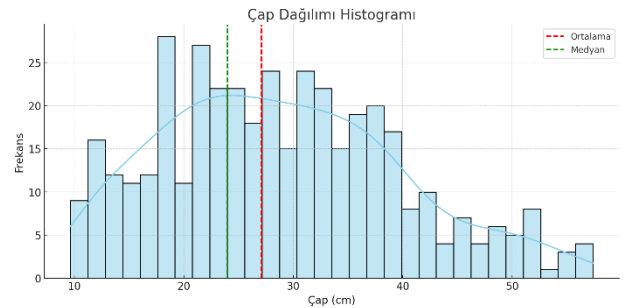
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (TUB_{Gerçek} - TUB_{Gerçek,ort})^2}{\sum_{i=1}^n (TUB_{Gerçek} - TUB_{Gerçek,ort})^2} \quad (6)$$

Burada, n gözlem sayısını, $TUB_{Gerçek}$ yersel verilerden elde edilen toprak üstü biyokütleyi, TUB_{LiDAR} LiDAR verilerden elde edilen toprak üstü biyokütleyi, $TUB_{Gerçek,ort}$ yersel verilerden elde edilen toprak üstü biyokütle ortalamasını ifade etmektedir.

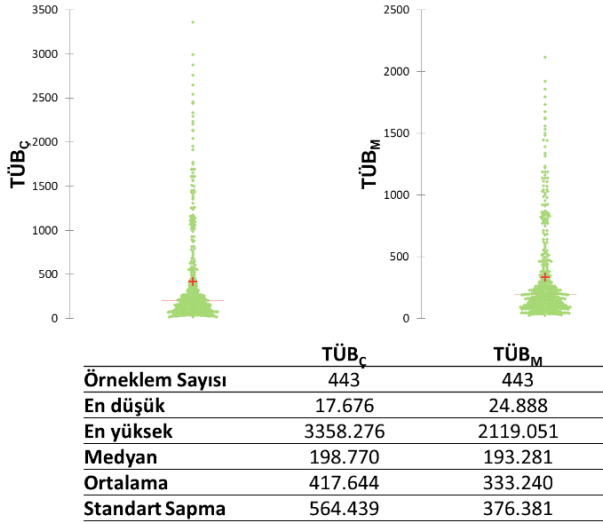
3. Bulgular

Arazi çalışmaları 23 farklı örnek alanda toplam 443 ağaç üzerinde yapılmıştır. Arazi çalışmaları sonucu elde edilen envanter verisine ait $D_{1.30}$ çap dağılımları Şekil 5'de verilmiştir. Veri setinde çap değerleri en düşük 9.6 cm, en yüksek ise 70 cm'dir. Ortalama çap 27.1 cm, medyan ise 24 cm olarak bulunmuştur. Bu fark, çap verisinin normal dağılmadığını ve sağa çarpık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum istatistiksel test seçimini doğrudan etkilemiştir ve parametrik testler yerine parametrik olmayan yöntemlere yönelme gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu durum, az sayıda büyük çaplı ağacın, ortalama değeri yukarı doğru çektiğine işaret eder. Standart sapma değeri 12.701 cm olup verinin ortalamadan ne derece saptığını yansıtırken, yüksek varyans, çap değerlerinin geniş bir aralıkta değiştiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmamız kapsamında iki farklı biyokütle denklemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerle her bir ağacın $D_{1.30}$ değerleri kullanılarak ilgili biyokütle denklemlerine uygulanarak TUB_c ve TUB_m elde edilmiştir. Aşağıda tek ağaç bazında yapılan hesaplamalara ait özet tanımlayıcı istatistik değerler sunulmaktadır (Şekil 6).



Şekil 5. Envanter verisine ait $D_{1.30}$ çap dağılımları
Figure 5. Inventory data $D_{1.30}$ diameter distributions



Şekil 6. Yersel envanter ile elde edilen TÜB verisine ait özet tanımlayıcı istatistik değerleri

Figure 6. Summary descriptive statistics for the AGB data obtained from the terrestrial inventory

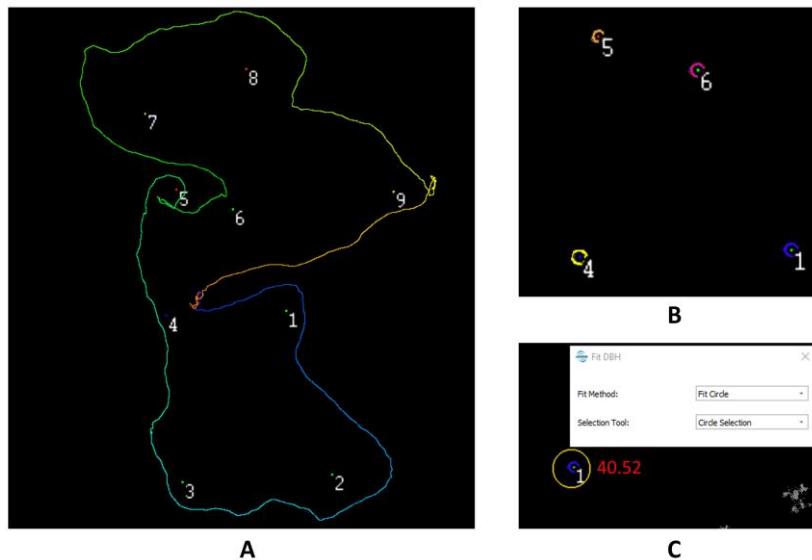
Mobil LiDAR ile orman biyokütlesinin hesaplanabilmesi için öncelikle $D_{1.30}$ çap ölçümlerinin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, mobil LiDAR ile veri toplama sürecinde cihaz tarafından kaydedilen güzergâh dosyası kullanılarak, ağaçlar otomatik olarak numaralandırılmıştır (Şekil 7A). Saha çalışmaları sırasında her ağaca verilen numaraların sıralamasına sadık kalınarak yapılan bu işlem, görüntü üzerindeki ağaçların da aynı numaralarla eşleşmesini sağlamış ve analiz sürecini

kolaylaştırmıştır (Şekil 7B). Numaralandırmanın ardından, her bir ağaç için sırasıyla daire uydurma (circle fitting) algoritması uygulanarak $D_{1.30}$ çapları belirlenmiştir (Şekil 7C).

Elde edilen $D_{1.30}$ çap değerleri kullanılarak, biyokütle hesaplamaları Denklem 1 ve Denklem 2'ye göre ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen biyokütle değerlerine ilişkin özet tanımlayıcı istatistik değerler Şekil 8'de sunulmuştur.

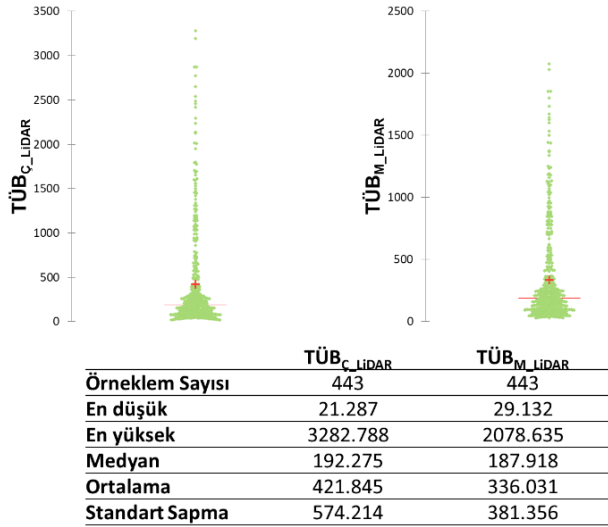
Parametrik testlerin uygulanabilmesi için öncelikle veri setinin normal dağılım gösterip göstermediğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında hem yersel ölçümlerden hem de LiDAR nokta bulutu verilerinden elde edilen toplam 443 ağaca ait toprak üstü biyokütle değerleri (TÜB_C ve TÜB_M) için %95 güven düzeyinde ($p < 0.05$) normallik testi uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen p değerinin eşik değer olan 0.05'in altında olduğu belirlenmiş ve bu durum, veri setinin normal dağılım göstermediğini ortaya koymuştur. Normallikten sapma gözlemlendiği için analizlerde parametrik olmayan test yöntemlerine başvurulmuştur. Bu kapsamda, Wilcoxon işaretli sıra testi kullanılarak LiDAR verilerine dayalı hesaplamalar ile yersel ölçümlere dayalı sonuçlar karşılaştırılmıştır (Çizelge 2).

Uygulanan test sonucunda, iki ölçüm grubu arasında %95 güven düzeyinde anlamlı bir farkın bulunmadığı saptanmıştır ($p > 0.05$). Bu bulgu, mobil LiDAR sistemleriyle elde edilen toprak üstü biyokütle değerlerinin yersel ölçümlerle istatistiksel olarak tutarlı olduğunu göstermekte ve LiDAR tabanlı toprak üstü biyokütle değerlerinin doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 7. Mobil LiDAR veri alım güzergâhı(A), görüntü üzerinde ağaçların numaralandırılması (B), her bir ağaç için daire uydurma (circle fitting) algoritması ile $D_{1.30}$ çap ölçümü (C).

Figure 7. Mobile LiDAR data acquisition route (A), numbering of trees on the image (B), $D_{1.30}$ diameter measurement for each tree using the circle fitting algorithm (C).



Şekil 8. Mobil LiDAR ile elde edilen TÜB verisine ait özet tanımlayıcı istatistik değerleri

Figure 8. Summary descriptive statistics for the AGB data obtained with mobile LiDAR

Çizelge 2. Mobil LiDAR ve Gerçek ölçümler için Wilcoxon testi sonuçları

Table 2. Wilcoxon test results for mobile LiDAR and actual measurements

Wilcoxon	TÜB _C _TÜB _C _LiDAR	TÜB _M _TÜB _M _LiDAR
V	40107.5	47832.5
V (standardized)	-1.488	1.637
Expected value	43785.5	43785.5
Variance (V)	6108075	6108075
p-value (Two-tailed)	0.137	0.102
alpha	0.05	0.05

*p<0.05

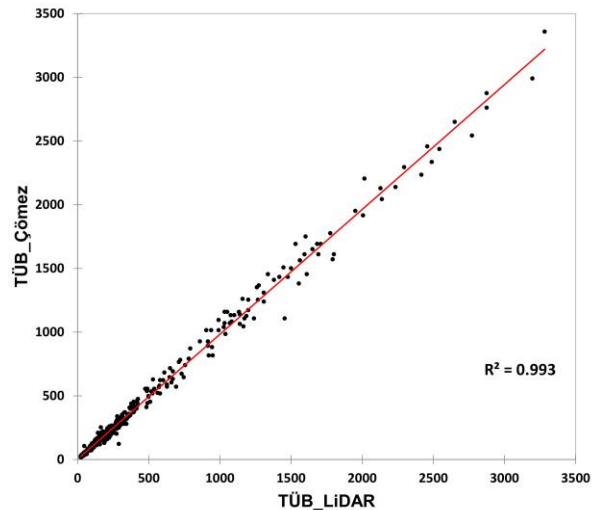
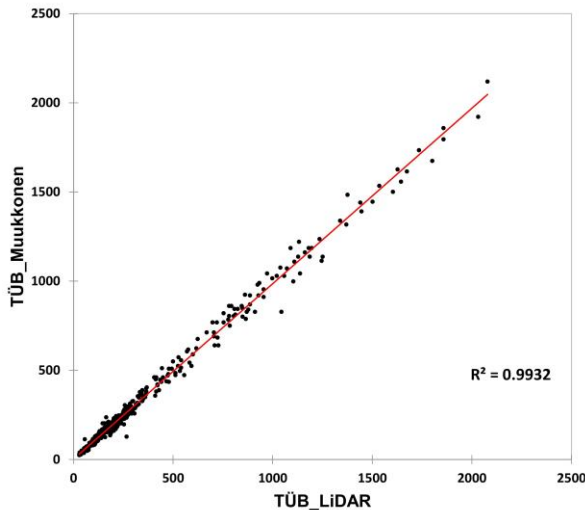
Mobil LiDAR verilerine dayalı TÜB tahminlerinin doğruluğunu ve geçerliliğini nicel olarak değerlendirmek amacıyla çeşitli istatistiksel performans ölçütlerinden yararlanılmıştır. Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE), Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve belirtme katsayısı (R^2) gibi yaygın olarak kabul gören ölçütler, tahmin gücünü kapsamlı bir şekilde analiz etmek için tercih edilmiştir. Söz konusu metrikler aracılığıyla, mobil LiDAR teknolojinin biyokütle tahminindeki potansiyelinin nesnel olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, elde edilen bulgular ve ilgili performans göstergeleri, Çizelge 3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3'te sunulan performans ölçütleri, mobil LiDAR verileriyle elde edilen TÜB tahminlerinin yersel ölçümlere kıyasla yüksek düzeyde doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu ortaya koymaktadır. MAE ve RMSE değerleri, TÜB_M yönteminin TÜB_C'ye göre daha düşük sapmalarla çalıştığını göstermekte olup, sırasıyla 2.79 kg ve 31.75 kg olarak hesaplanmıştır. Bu durum, TÜB_M'nin hem küçük hem de büyük hatalara karşı daha hassas ve istikrarlı bir tahmin sunduğunu göstermektedir. MAPE açısından her iki modelin de %3'ün altında değer vermesi, özellikle %2.04 oranıyla TÜB_M'nin, saha uygulamaları açısından pratik geçerliliği yüksek bir model olduğunu göstermektedir. Ayrıca, R^2 her iki yöntem için de 0.99'un üzerinde hesaplanarak, mobil LiDAR destekli tahminlerin gerçek değerleri yaklaşık %99 oranında açıkladığını ortaya koymuştur (Şekil 9).

Çizelge 3. Mobil LiDAR ve Gerçek ölçümler için performans ölçütleri

Table 3. Performance metrics for mobile LiDAR and real measurements

	MAE (kg)	MAPE (%)	RMSE (kg)	R^2
TÜB _C	4.20	2.55	48.72	0.9930
TÜB _M	2.79	2.04	31.75	0.9931



Şekil 9. Mobil LiDAR ile elde edilen TÜB değerlerinin gerçek değerlerle karşılaştırılması

Figure 9. Comparison of AGB values obtained with mobile LiDAR with actual values

Bland-Altman analizi, Mobil LiDAR ile elde edilen T B değerleri ile gerçek değerler arasındaki uyumu değerlendirmek için uygulanmıştır (şekil 10). Analiz sonucunda, ölçümler arasındaki ortalama farklar (bias) T B  için -4.2, T B  için -2.79 birim olarak bulunmuş ve bu değer, yöntemler arasında sistematik bir sapmanın minimal olduğunu göstermektedir. T B  için Limits of Agreement (LoA)  st ve alt sınırları sırasıyla 91.05 ve -99.45 birim olarak hesaplanmışken, T B  için sırasıyla 59.27 ve -64.85 olarak hesaplanmıştır. Bu durum farkların büyük çoğunluğunun bu sınırlar içinde yer aldığını göstermektedir. Grafikte, hem T B , hem de T B  için farkların ortalamalar etrafında rastgele dağıldığını ve herhangi bir belirgin trend gözlenmediği görülmektedir. Bu bulgular, mobil LiDAR teknolojisinin yersel ölçüm yöntemlerine güçlü bir alternatif oluşturduğunu, hem zaman hem de iş gücü açısından ciddi avantajlar sunduğunu ve özellikle Muukkonen (2007), denklemine dayalı biyokütle tahminlerinde daha başarılı sonuçlar verdiğini açıkça göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

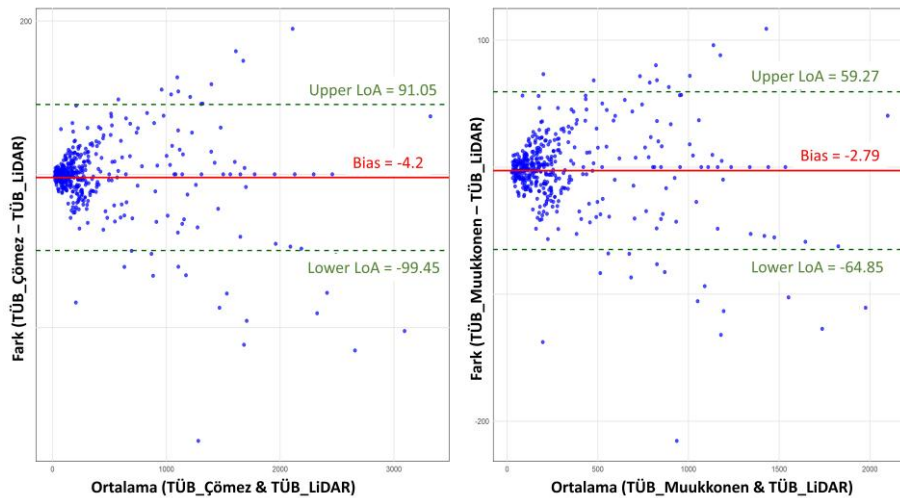
Mobil LiDAR teknolojisi, son yıllarda ormancılık alanında geleneksel yersel ölçüm yöntemlerine alternatif olarak öne çıkan, yüksek doğruluk ve zaman- verimliliği bir arada sunan yenilikçi bir veri toplama yöntemidir. Bu çalışmada, mobil LiDAR sistemlerinin toprak üstü biyokütle (T B) tahmininde sağladığını performans, klasik yersel yöntemlerle karşılaştırılarak kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Sahada gerçekleştirilen 443 ağaçlık ölçümler,  mez (2010) ve Muukkonen (2007) tarafından geliştirilen ve literatürde yaygın şekilde kabul gören allometrik denklemler kullanılarak biyokütleye dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sayesinde, $D_{1.30}$ apı verilerinden T B hesaplamalarının doğruluğu sistematik olarak test edilmiştir.

İstatistiksel analizler, mobil LiDAR ile  l len $D_{1.30}$ verileriyle hesaplanan T B değerlerinin, yersel ölçümlere dayalı sonuçlardan anlamlı farklılık göstermediğini ortaya koymuştur ($p > 0.05$). Performans metriği olarak değerlendirilen hata  l tleri, özellikle T B  yaklaşımında üstünlük sağlamıştır. MAE = 2.79 kg, RMSE = 31.75 kg ve MAPE = %2.04 gibi düşük hata oranları, bu yöntemin saha

uygulamalarında yüksek güvenilirlik ve hassasiyet sunduğunu göstermektedir. Bunun yanında, her iki model için R^2 değerlerinin 0.993 seviyesinde olması, mobil LiDAR verilerinin T B tahminlerinde yüksek uyum ve açıklayıcılık sağladığını güçlü bir göstergesidir. Literatürde, MAPE'nin %5'in altında olması, modelin operasyonel kullanım için yüksek uygunlukta olduğunu vurgulamaktadır (Zolkos vd., 2013; Yang vd., 2020; Leboeuf vd., 2022). Bu durum, mobil LiDAR teknolojisinin sadece akademik araştırmalarda değil, aynı zamanda ormancılık sektöründe geniş çaplı saha uygulamalarında da etkin biçimde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Uzaktan algılama teknolojilerindeki gelişmeler, mobil LiDAR sistemlerinin ormancılıkta kullanımını önemli ölçüde yaygınlaştırmıştır. Geleneksel olarak sabit pozisyonlu TLS (Terrestrial Laser Scanning) sistemleri (Kankare vd., 2013; Calders vd., 2015) veya uçak platformlu ALS (Airborne Laser Scanning) sistemleri (Lefsky vd., 2002; Asner vd., 2010) tercih edilirken, mobil LiDAR sistemleri alan tarama hızı, GNSS bağımsızlığı, düşük maliyet ve kullanım kolaylığı gibi avantajlarıyla  ne çıkmaktadır (Aijazi vd., 2017; Hyyp  vd., 2020b; Tian vd., 2023).

Özellikle yoğun kapalılığa sahip ormanlık alanlarda GPS sinyalinin zayıf olduğu durumlarda, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritmaları, ağaçlar ve diğer objelerin birbirlerine göre nispi konumlarını hassas bir şekilde belirlemeye olanak tanımaktadır. Ancak, bu algoritmaların sağladığını konum verisi doğrudan dünya koordinat sistemi (X, Y, Z) ile ilişkilendirilmez; elde edilen bilgiler yalnızca lokal koordinat sisteminde geçerlidir. Dolayısıyla, SLAM kullanımı, GPS sinyalinin yetersiz olduğu ortamlarda hassas göreli konum belirleme imkânı sunarken, gerçek dünya koordinatları için ek düzeltme veya referans noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alışma kapsamında kullanılan ZEB-Horizon sistemi, SLAM algoritması ile entegre çalışarak yüksek kaliteli 3B nokta bulutları üretmiş, CSP segmentasyon algoritmasıyla bireysel ağaç tespiti ve ayrıştırılmasında yüksek başarı göstermiştir (Tao vd., 2015; Brede vd., 2017; Green Valley International, 2023). Mobil LiDAR sistemleri SLAM algoritması ile, özellikle heterojen ve karmaşık orman yapılarında bile doğru veri üretme kapasitesiyle  ne çıkmaktadır (Zengin, 2024).



şekil 10. Mobil LiDAR ile elde edilen T B değerleri ile gerçek değerler arasındaki Bland-Altman analizi
Figure 10. Bland-Altman analysis between AGB values obtained with mobile LiDAR and actual values

Mobil LiDAR'ın $D_{1.30}$ ölçüm doğruluğu konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Vatandaşlar vd. (2022a) tarafından yapılan çalışmada ortalama çap sapması 0.68 cm olarak rapor edilmiştir. Zengin (2024) tarafından yapılan bir çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmış ve mobil LiDAR ile yersel ölçümlerle elde edilen göğüs çapı arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olmadığı vurgulanmıştır. Ayrıca, Gollob vd. (2021) tarafından iPad Pro entegre LiDAR sistemleriyle yapılan ölçümlerde klasik yersel yöntemlerle anlamlı bir fark bulunmamıştır. Prasetyo vd. (2024), ise sırt çantalı düşük maliyetli LiDAR sistemlerinde $R^2 = 0.998$ ve $RMSE = 0.53$ cm gibi üstün performans sağlamıştır. Bu çalışmaların ortak noktası, mobil LiDAR sistemlerinin geniş bir uygulama skalasında yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu ortaya koymasındır (Guenther vd., 2024; Oikawa vd., 2025). Bizim çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar da bahsedilen bulguları desteklemektedir. Yüksek doğruluk oranlarının sağlanmasında saha koşullarının önemi büyüktür. Bu çalışma, homojen ve saf sarıçam meşcerelerinde gerçekleştirilmiş olup, alt tabakanın açık olması ve nokta bulutu yoğunluğunun yeterli seviyede (Xie vd., 2020) olması tahmin doğruluğunu artırmıştır. Buna karşın heterojen orman yapılarında, farklı türlerin ve yaş/çap sınıflarının karışık olduğu alanlarda, alt ve orta katman yoğunluğu ile gövde örtüşmeleri ölçüm doğruluğunu sınırlayabilir. Nokta bulutu yoğunluğu heterojenlik nedeniyle yerel olarak düşebilir ve gövde örtüşmeleri veya farklı çaplı ağaçların sıkışık dizilişi $D_{1.30}$ tahminlerindeki hata artabilir. Bu nedenle heterojen meşcerelerde, çok açılı tarama geçişleri, ek tarama rotaları ve algoritmik düzeltmeler gibi stratejilerin uygulanması, ölçüm güvenilirliğini artırmak için önemlidir.

Ülkemiz ormanlarında plan yapım çalışmalarında karbon depolama kapasitesi ve dolayısıyla TÜB hesaplamaları ağırlıklı olarak tek bir parametreye, yani göğüs çapına dayandırılmaktadır. Bu yaklaşım, TÜB tahminlerinde belirli bir basitlik sağlasa da, modelin doğruluk düzeyini sınırlamaktadır. Çalışmamız bu bağlamda, geleneksel envanter yöntemlerine alternatif bir bilgi kaynağı arayışına yanıt niteliği taşımaktadır. Bununla birlikte çap ve boy ölçümlerine dayalı çift girişli denklemler, tek değişkenli modellere kıyasla daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Geleneksel envanter yöntemleri belirli bir hata payını göze alarak gerçekleştirildiğinden, karbon ve biyokütle hesaplamaları da bu hata düzeyinden doğrudan etkilenmektedir. Oysa LiDAR teknolojisinin envanter süreçlerine alternatif bir yöntem olarak entegre edilmesi, söz konusu hata paylarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla gelecekte LiDAR aracılığıyla hem çap hem de boy bilgilerinin elde edilmesi ve modellemelere entegre edilmesi durumunda, daha doğru ve güvenilir biyokütle tahminlerinin yapılabileceği öngörülmektedir. Her ne kadar bu çalışmamızda ulaşılan sonuçlar mevcut orman envanteri ve planlaması açısından kabul edilebilir düzeyde olsa da, ilerleyen araştırmaların çok değişkenli ve LiDAR tabanlı yaklaşımlar üzerine yoğunlaşması, karbon stoklarının ve biyokütle tahminlerinin daha gerçekçi ve hassas bir şekilde belirlenmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Mobil LiDAR'ın sunduğu avantajlar yalnızca doğrulukla sınırlı değildir; düşük maliyet, yüksek alan tarama hızı, GNSS sinyalinin bağımsız çalışma yeteneği ve kullanımı kolaylığı da bu teknolojiyi ormancılık için cazip kılmaktadır (Beland vd., 2019). SLAM tabanlı mobil LiDAR sistemleri,

hem karmaşık hem de kapalı orman ortamlarında esnek veri toplama olanağı sağlamasıyla, geleneksel yöntemlerin ulaşamadığı performans düzeylerine ulaşmaktadır (Vandendaele vd., 2022). Bu sayede, ulusal orman envanterlerinin güncellenmesinde ve sürdürülebilir orman yönetiminde önemli katkılar sunmaktadır.

Mobil LiDAR teknolojisinin bazı önemli sınırlamaları da bulunmaktadır. En belirgin zorluklardan biri tür tanıma kabiliyetinin olmayışıdır. Bu durum, farklı ağaç türlerine özgü biyokütle katsayılarının uygulanmasını güçleştirmektedir (Shao vd., 2022). Ayrıca, yoğun diri örtü, dik eğim, IMU (Inertial Measurement Unit) kaynaklı sapmalar ve operatör dengesizliği gibi çevresel ve teknik faktörler verilerin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla, hiperspektral görüntüleme sistemleriyle sensör füzyonu, UAV (İnsansız Hava Aracı) destekli veri toplama, yer tabanlı sabit ve mobil sistemlerin entegre kullanımı ile yapay zekâ destekli dinamik allometrik modelleme gibi yenilikçi yöntemler önerilmektedir. Bu çoklu teknoloji entegrasyonları, hem verilerin kalitesini artırmakta hem de tür bazında biyokütle tahminlerinde doğruluğu yükseltmektedir.

Geleceğe yönelik olarak, mobil LiDAR sistemlerinin çoklu sensör füzyonu ve otonom platformlarla entegrasyonu ormancılık uygulamalarında çığır açıcı değişikliklere yol açacaktır. Yapay zekâ algoritmaları ile desteklenen veri işleme ve dinamik modelleme teknikleri, saha ölçümlerinin doğruluğunu artırırken, veri toplama süresini de kısaltacaktır (Maltamo vd., 2018; Alon, 2020). Bu teknolojik gelişmeler, sürdürülebilir orman yönetimi ve iklim değişikliği ile mücadele politikalarının temel bileşenlerinden biri olma yolunda ilerlemektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma mobil LiDAR teknolojisinin ormancılıkta klasik yersel ölçüm yöntemlerine yüksek doğrulukta, güvenilir ve zaman-verimli bir alternatif sunduğunu, özellikle homojen orman yapılarında etkili sonuçlar verdiğini ve gelecekte ormancılık uygulamalarının vazgeçilmez bir aracı haline geleceğini güçlü biçimde ortaya koymuştur. SLAM tabanlı mobil sistemlerin esnek ve dinamik yapısı, bu teknolojinin akademik araştırmaların ötesinde, ulusal ve uluslararası ormancılık envanterleri ve yönetim stratejilerinde kritik rol oynamasını mümkün kılmaktadır.

Mobil LiDAR teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen $D_{1.30}$ çapı ve biyokütle tahminlerinin, yersel ölçümlerle karşılaştırıldığında yüksek doğruluk düzeyi sergilemesi, bu teknolojinin orman envanter çalışmalarında etkin ve güvenilir bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen yüksek başarı, orman karbon stoklarının hassas izlenmesi, sürdürülebilir orman yönetiminin desteklenmesi ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik politika ve planlamaların geliştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, mobil LiDAR verilerinin farklı orman tiplerinde ve mevsimsel değişimler dikkate alınarak, çeşitli ağaç türleri üzerinde kapsamlı biçimde test edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, mobil LiDAR verilerinin uydu verileri veya havadan LiDAR (ALS) gibi diğer uzaktan algılama teknikleriyle entegrasyonunun incelenmesi, biyokütle tahminlerinin doğruluğunu ve farklı coğrafi alanlara genellenebilirliğini artıracak kritik bir adım olacaktır. Çoklu sensör yaklaşımlarının benimsenmesi, veri

çeşitliliği ve bütünselliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Mobil/sırt çantalı LiDAR sistemleri, orman biyokütlesi tahmininde yeni bir paradigmayı temsil etmektedir. Bu çalışmada da görüldüğü üzere, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) destekli yöntemler, son derece yüksek bir doğruluk düzeyi ($R^2 = 0.99$) ile başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, bu teknolojinin potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirebilmesi için üç temel eksenle ilerlenmesi gerekmektedir:

Standardizasyon ve Entegrasyon: Uluslararası standartların ve ulusal orman envanter protokollerinin geliştirilmesi; mobil LiDAR teknolojisinin bu standartlarla uyumlu hale getirilerek envanter süreçlerine entegre edilmesi.

Kapasite Geliştirme: Orman mühendisleri ve teknik personel için CloudCompare, LiDAR360 gibi ileri düzey yazılımlar aracılığıyla üç boyutlu (3B) veri işleme teknikleri ile LiDAR sensörleri kullanımı konusunda kapsamlı ve uygulamalı eğitim programlarının düzenlenmesi.

Veri Paylaşım Altyapısı: Anonimleştirilmiş nokta bulutları ve biyokütle haritalarını barındıracak, ulusal düzeyde erişime açık, güvenilir ve merkezi bir "Ulusal Orman LiDAR Arşivi" gibi veri paylaşım platformlarının kurulması ve işletilmesi.

Bu adımların hayata geçirilmesi, mobil LiDAR teknolojisinin orman envanterlerinde yaygınlaşmasını ve sürdürülebilir orman yönetimi hedeflerine ulaşılmasını hızlandıracaktır.

Açıklama

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 2220034 numaralı proje ile desteklenmiştir. Proje kapsamında elde edilen verilerin bir kısmı kullanılmıştır.

Kaynaklar

Aijazi, A., Checchin, P., Malaterre, L., Trassoudaine, L., 2017. Automatic detection and parameter estimation of trees for forest inventory applications using 3D Terrestrial LIDAR. Remote Sensing, 9(9): 946. <https://doi.org/10.3390/rs9090946>

Akgül, M., Yurtseven, H., Akburak, S., Çoban, S., 2016. Yersel lazer tarayıcı sistemler ile kentsel yeşil alanlarda bazı ağaç parametrelerinin belirlenmesi. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 66(2): 445-458. <https://doi.org/10.17099/jffiu.96359>

Alon, A.S., 2020. Tree extraction of airborne LiDAR data based on coordinates of deep learning object detection from orthophoto over complex mangrove forest. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(5): 2107–2111. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/103852020>

Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., De Las Salas, G., Del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S., Rodríguez, L., 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. Forest Ecology and Management, 267: 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>

Asner, G.P., Powell, G.V.N., Mascaro, J., Knapp, D.E., Clark, J.K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., Hughes, R.F., 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(38): 16738–16742. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004875107>

Bahadır, M., Yıldırım, F.S., Karşı, F., 2022. Görüntü eşleştirme ve lidar kaynaklı nokta bulutundan orman metriklerinin otomatik belirlenmesi. UZALCBS 2022 Sempozyumu. 17-19 Kasım, Ankara, s. 12831. <https://doi.org/10.15659/uzalcbs2022.12831>

Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A., Strahler, A., 2019. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. Forest Ecology and Management, 450: 117484. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117484>

Brede, B., Lau, A., Bartholomeus, H., Kooistra, L., 2017. Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR derived canopy height and DBH with terrestrial LiDAR. Sensors, 17(10): 2371. <https://doi.org/10.3390/s17102371>

Calders, K., Adams, J., Armston, J., Bartholomeus, H., Bauwens, S., Bentley, L.P., Chave, J., Danson, F.M., Demol, M., Disney, M., Gaulton, R., Moorthy, S.M.K., Levick, S.R., Saarinen, N., Schaaf, C., Stovall, A., Terry, L., Wilkes, P., Verbeeck, H., 2020. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. Remote Sensing of Environment, 251: 112102. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>

Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., Culvenor, D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J., Kaasalainen, M., 2015. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. Methods in Ecology and Evolution, 6(2): 198–208. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12301>

Chen, Q., Luo, H., Cheng, Y., Xie, M., Nan, D., 2024. An individual tree detection and segmentation method from TLS and MLS point clouds based on improved seed points. Forests, 15(7): 1083. <https://doi.org/10.3390/f15071083>

Corbera, E., Schroeder, H., 2011. Governing and implementing REDD+. Environmental Science & Policy, 14(2): 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.11.002>

Çakmak, Z., Akpınar, B., Selbesoğlu, M., 2022. Accuracy assessment of mobile lidar system in different environments. Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, 22(5): 1075-1086. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1139569>

Çömez, A., 2010. Sündiken Dağlarında sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde karbon birikiminin belirlenmesi. Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dou, Y., Yang, Y., An, S., 2019. Above-ground biomass models of *Caragana korshinskii* and *Sophora viciifolia* in the Loess Plateau, China. Sustainability, 11(6): 1674. <https://doi.org/10.3390/su11061674>

Duncanson, L., Neuenschwander, A., Hancock, S., Thomas, N., Fatoyinbo, T., Simard, M., Silva, C.A., Armston, J., Luthcke, S. B., Hofton, M., Kellner, J.R., Dubayah, R., 2020. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California. Remote Sensing of Environment, 242: 111779. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111779>

Durkaya, B., Durkaya, A., Makineci, E., Ülküdür, M., 2013. Estimation of above-ground biomass and sequestered carbon of Taurus Cedar (*Cedrus libani* L.) in Antalya, Turkey. iForest - Biogeosciences and Forestry, 6(5): 278–284. <https://doi.org/10.3832/ifor0899-006>

Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., Xu, X., 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2-4 August, Portland, s. 226-231.

FARO, 2025. Technical specifications sheet for ZEB Horizon, https://knowledge.faro.com/Hardware/GeoSlam/ZEB_Horizon_and_Horizon_RT/Technical_Specifications_Sheet_for_ZEB_Horizon, Erişim: 16.09.2025.

- Frolking, S., Palace, M.W., Clark, D.B., Chambers, J.Q., Shugart, H.H., Hurtt, G.C., 2009. Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114 G00E02. <https://doi.org/10.1029/2008jg000911>
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., Nothdurft, A., 2021. Measurement of forest inventory parameters with apple iPad pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, 13(16): 3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- Green Valley International, 2023. LiDAR360 User Guide, GreenValley International Ltd., <https://www.greenvalleyintl.com/gvi/web/us/file/EN-User-Guide-LiDAR360.pdf>, Erişim: 27.06.2025.
- Guan, H., Su, Y., Sun, X., Xu, G., Li, W., Ma, Q., Wu, X., Wu, J., Liu, L., Guo, Q., 2020. A marker-free method for registering multi-scan terrestrial laser scanning data in forest environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166: 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.002>
- Guenther, M., Heenkenda, M.K., Morris, D., Leblon, B., 2024. Tree diameter at breast Height (DBH) estimation using an iPad Pro LiDAR Scanner: A case study in Boreal Forests, Ontario, Canada. *Forests*, 15(1): 214. <https://doi.org/10.3390/f15010214>
- Hartley, R.J.L., Jayathunga, S., Massam, P.D., De Silva, D., Estarija, H.J., Davidson, S.J., Wuraola, A., Pearse, G.D., 2022. Assessing the potential of backpack-mounted mobile laser scanning systems for tree phenotyping. *Remote Sensing*, 14(14): 3344. <https://doi.org/10.3390/rs14143344>
- Hasheminasab, S.M., Zhou, T., Habib, A., 2023. Linear feature-based image/LiDAR integration for a stockpile monitoring and reporting technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 2605–2623. <https://doi.org/10.1109/jstars.2023.3250392>
- Heo, H.K., Lee, D.K., Park, J.H., Thorne, J.H., 2019. Estimating the heights and diameters at breast height of trees in an urban park and along a street using mobile LiDAR. *Landscape and Ecological Engineering*, 15(3): 253–263. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00379-6>
- Hernández-Moreno, J.A., Velázquez-Martínez, A., Pérez-Saliciup, D.R., Bravo, F., MacFarlane, D.W., Reyes-Hernández, V.J., 2025. Terrestrial laser scanning for estimating the volume and biomass of coniferous stems in the Mariposa Monarca Biosphere Reserve, Mexico. *Forests*, 16(2): 334. <https://doi.org/10.3390/f16020334>
- Herold, M., Carter, S., Avitabile, V., Espejo, A.B., Jonckheere, I., Lucas, R., McRoberts, R.E., Næsset, E., Nightingale, J., Petersen, R., Reiche, J., Romijn, E., Rosenqvist, A., Rozendaal, D.M.A., Seifert, F.M., Sanz, M.J., De Sy, V., 2019. The role and need for space-based forest biomass-related measurements in environmental management and policy. *Surveys in Geophysics*, 40(4): 757–778. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09510-6>
- Houghton, R.A., Hall, F., Goetz, S.J., 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114,G00E03. <https://doi.org/10.1029/2009jg000935>
- Hyypä, E., Kukko, A., Kaijaluoto, R., White, J. C., Wulder, M.A., Pyörälä, J., Liang, X., Yu, X., Wang, Y., Kaartinen, H., Virtanen, J., Hyypä, J., 2020a. Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 161: 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.018>
- Hyypä, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hakala, T., Kukko, A., Vastaranta, M., Hyypä, J., 2020b. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV Laser scanning for field reference data collection in boreal forests. *Remote Sensing*, 12(20): 3327. <https://doi.org/10.3390/rs12203327>
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H., Alho, P., 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75: 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003>
- Ko, C., Lee, S., Yim, J., Kim, D., Kang, J., 2021. Comparison of forest inventory methods at plot-level between a backpack personal laser scanning (BPLS) and conventional equipment in Jeju Island, South Korea. *Forests*, 12(3): 308. <https://doi.org/10.3390/f12030308>
- Leboeuf, A., Riopel, M., Munger, D., Fradette, M., Bégin, J., 2022. Modeling merchantable wood volume using airborne LIDAR metrics and historical forest inventory plots at a provincial scale. *Forests*, 13(7): 985. <https://doi.org/10.3390/f13070985>
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D.J., Parker, G.G., Acker, S.A., Gower, S.T., 2002. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 11(5): 393–399. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.2002.00303.x>
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., Vastaranta, M., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- Lu, J., Wang, H., Qin, S., Cao, L., Pu, R., Li, G., Sun, J., 2020. Estimation of aboveground biomass of *Robinia pseudoacacia* forest in the Yellow River Delta based on UAV and backpack LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86: 102014. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102014>
- Maltamo, M., Karjalainen, T., Repola, J., Vauhkonen, J., 2018. Incorporating tree- and stand-level information on crown base height into multivariate forest management inventories based on airborne laser scanning. *Silva Fennica*, 52(3) article id 10006. <https://doi.org/10.14214/sf.10006>
- Muukkonen, P., 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 126(2): 157–166. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0168-4>
- Newnham, G.J., Armston, J.D., Calders, K., Disney, M.I., Lovell, J.L., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Danson, F.M., 2015. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*, 1(4): 239–251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- Oikawa, N., Nakagawa, Y., Owari, T., Tatsumi, S., Suzuki, S.N., 2025. Utilising LiDAR-equipped iPhone in forestry: Constructing 3D models and measuring tree sizes in a planting site. *Ecological Solutions and Evidence*, 6(1), e12399. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12399>
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045): 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., Lundström, A., Mäkipää, R., 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management*, 270: 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.004>
- Prasetyo, W.E., Handayani, H.H., Raharjo, A.B., Saptarini, D., 2024. Advancing carbon stock estimation and 3D tree modeling: harnessing the potential of low-cost backpack LIDAR technology. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1406(1): 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1406/1/012013>

- Riano, D., Meier, E., Allgöwer, B., Chuvieco, E., Ustin, S. L., 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote sensing of Environment*, 86(2), 177-186. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00098-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00098-1)
- Ruhan, A., Du, W., Ying, H., Wei, B., Shan, Y., Dai, H., 2023. Estimation of aboveground biomass of individual trees by backpack LIDAR based on parameter-optimized quantitative structural models (ADQSM). *Forests*, 14(3): 475. <https://doi.org/10.3390/f14030475>
- Seidel, D., Beyer, F., Hertel, D., Fleck, S., Leuschner, C., 2011. 3D-laser scanning: A non-destructive method for studying above-ground biomass and growth of juvenile trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10): 1305–1311. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.013>
- Shao, H., Cao, Z., Li, W., Chen, Y., Jiang, C., Hyypä, J., Chen, J., Sun, L., 2022. Feasibility study of wood-leaf separation based on hyperspectral LiDAR technology in indoor circumstances. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 729–738. <https://doi.org/10.1109/jstars.2021.3134651>
- Su, Y., Guo, Q., Jin, S., Guan, H., Sun, X., Ma, Q., Hu, T., Wang, R., Li, Y., 2020. The development and evaluation of a backpack LiDAR system for accurate and efficient forest inventory. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(9): 1660–1664. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2020.3005166>
- Tao, S., Wu, F., Guo, Q., Wang, Y., Li, W., Xue, B., Hu, X., Li, P., Tian, D., Li, C., Yao, H., Li, Y., Xu, G., Fang, J., 2015. Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 110: 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.007>
- Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., Fu, W., 2023. Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation: Progress, challenges, and prospects. *Forests*, 14(6): 1086. <https://doi.org/10.3390/f14061086>
- Vandendaele, B., Martin-Ducup, O., Fournier, R.A., Pelletier, G., Lejeune, P., 2022. Mobile laser scanning for estimating tree structural attributes in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing*, 14(18): 4522. <https://doi.org/10.3390/rs14184522>
- Vatandaşlar, C., Zeybek, M., 2020. Application of handheld laser scanning technology for forest inventory purposes in the NE Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 44(3): 229-242.
- Vatandaşlar, C., Zeybek, M., 2021. Extraction of forest inventory parameters using handheld mobile laser scanning: A case study from Trabzon, Turkey. *Measurement*, 177: 109328. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109328>
- Vatandaşlar, C., Zeybek, M., Çankaya, E.Ç., Demiraslan, T., Şahin, C., Gündüz, Y., Korkmaz, Ü., Avcı, M.L., 2022a. El tipi mobil LiDAR teknolojisinin orman envanterlerinde kullanımı: Artvin-Şavşat örneği. *Ormançılık Araştırma Dergisi*, 9(1): 81–96. <https://doi.org/10.17568/ogmoad.1016879>
- Vatandaşlar, C., Zeybek, Borucu, S. 2022b. Mobil LiDAR ile orman envanterlerinde farklı örnekleme tasarımlarının veri hassasiyeti ve iş verimliliğine etkisi: Rize Şenyuva örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2): 258–271. <https://doi.org/10.24011/barofd.1070484>
- Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., De Tanago, J. G., Bartholomeus, H., Brede, B., Herold, M., 2017. Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment*, 196: 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.030>
- Xie, Y., Zhang, J., Chen, X., Pang, S., Zeng, H., Shen, Z., 2020. Accuracy assessment and error analysis for diameter at breast height measurement of trees obtained using a novel backpack LiDAR system. *Forest Ecosystems*, 7 (33), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00237-0>
- Yang, Z., Liu, Q., Luo, P., Ye, Q., Duan, G., Sharma, R.P., Zhang, H., Wang, G., Fu, L., 2020. Prediction of individual tree diameter and height to crown base using nonlinear simultaneous regression and airborne LIDAR data. *Remote Sensing*, 12(14): 2238. <https://doi.org/10.3390/rs12142238>
- Zengin, H., 2024. Yersel lidar verisinden 3DFin yazılımı ile ağaçların göğüs çapının belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormançılık Dergisi*, 20(2): 395-407. <https://doi.org/10.58816/duzceod.1593528>
- Zolkos, S., Goetz, S., Dubayah, R., 2013. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 128: 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017>