T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAM DALGA LiDAR VERİLERİ İLE BİTKİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

AYŞE BUŞRA KURTAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
UZAKTAN ALGILAMA VE CBS PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. NACİ YASTIKLI

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAM DALGA FORMU LİDAR VERİLERİ İLE BİTKİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Ayşe Buşra KURTAK tarafından hazırlanan tez çalışması 17.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Naci YASTIKLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Naci YASTIKLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Füsun BALIK ŞANLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Naci YASTIKLI hocama teşekkürlerimi arz ederim.

Bu tez çalışmasında kullanılan ham LiDAR verilerini sağladıkları için 2015 yılından bu yana Harita Mühendisi olarak görev yapmakta olduğum BiMTAŞ A.Ş. Üç Boyutlu Harita ve CBS Müdürlüğü'ne, çalışmam boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer yöneticilerim ve sevgili mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emek ve fedakarlık göstermiş olan başta annem Ayten KURTAK ve babam Mehmet Emin KURTAK olmak üzere çok kıymetli aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2019

Ayşe Buşra KURTAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 4
1.2 Tezin Amacı 8
1.3 Hipotez 8

BÖLÜM 2

LiDAR 10

2.1 Lazer Tarama Sistem Bileşenleri 11
2.2 Hava LiDAR Sisteminin Çalışma Prensibi ve Ölçüm Yöntemleri 13
2.2.1 Puls ile Mesafe Ölçümü 14
2.2.2 Faz Farkı ile Mesafe Ölçümü 15
2.3 LiDAR Sensörünün Farklı Formları 17
2.3.1 Doğrusal Mod LiDAR 17
2.3.2 Ayrık Dönüşlü LiDAR 17
2.3.3 Tam Dalga Formu Kaydeden Sistemler 19
2.3.4 Multi-Spektral LiDAR 21
2.3.5 Geiger-Modu LiDAR 22
2.3.6 Tek Foton LiDAR 23
2.3.7 Mikro Sinyal LiDAR 24

BÖLÜM 3

TAM DALGA FORMU ANALİZİ 25

3.1 Tam Dalga Formu Öznitelikleri 26
3.1.1 Eğik Mesafe 27
3.1.2 Genlik 28
3.1.3 Genişlik 28
3.1.4 Geri Saçılımın Enine Kesiti 30
3.2 Tam Dalga Formu Veri İşleme Yaklaşımları 30
3.3 Gauss Ayrıştırması 31
3.3.1 Radar Denklemi 31
3.3.2 Dalga Formu 34
3.3.3 Sistem Dalga Formu 36
3.3.4 Gauss Saçılmaları 37
3.3.5 Radyometrik Kalibrasyon 40

BÖLÜM 4

SINIFLANDIRMA 43

4.1 Tam Dalga Formu LiDAR Nokta Bulutunun Sınıflandırılması 44
4.1.1 Nokta Bulutu Segmentasyonu 45
4.1.2 Nokta Bulutunun Sınıflandırılması 46
4.1.2.1 Karar Ağacı Sınıflandırıcısı 46
4.1.2.2 Rastgele Orman Sınıflandırıcısı 49
4.1.2.3 Destek Vektör Makineleri 51
4.1.2.4 Yapay Sinir Ağları 53
4.2 Tam Dalga Formu LiDAR Verilerinin Ormancılık Uygulamalarında Kullanımı 55
4.2.1 Tam Dalga Formu LiDAR Sensörünün Ormancılık Uygulamalarına Olan Katkısı 56
4.2.2 Meşçere Parametrelerinin LiDAR ile Elde Edinimi 57
4.2.2.1 Doğrudan Elde Edilen Meşçere Parametreleri 57
4.2.2.2 Modelleme ile Elde Edilen Meşçere Parametreleri 59

BÖLÜM 5

TAM DALGA LiDAR VERİLERİ İLE BİTKİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI 63

5.1 Çalışma Alanı 64
5.2 Tam Dalga Formu LiDAR Verisinin Elde Edilmesi 66
5.3 Ham Tam Dalga Formu LiDAR Veri Ön-İşleme 68
5.4 Sınıflandırma 71
5.4.1 Test Alanlarının Seçimi 74
5.4.2 Test Alanlarından Elde Edilen Sonuçlara Göre Sınır Değerlerin Belirlenmesi 75
5.4.3 Karar Ağacı Tasarımı 83
5.4.4 Çalışma Alanına Ait Nokta Bulutunun Sınıflandırılması 85

5.4.5 Sınıflandırmanın Doğruluğu 89
5.5 Bitki Örtüsü Olan ve Bitki Örtüsü Olmayan Nokta Bulutları ile Elde Edilen Ürünler 93
5.5.1 Sayısal Arazi Modeli Üretimi 93
5.5.2 Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli Üretimi 98

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 100

KAYNAKLAR 104

ÖZGEÇMİŞ 115

SİMGE LİSTESİ

A_i	i yaprağının tek tarafının alanı
A_{LAI}	LAI'nın hesaplanacağı yerin alanı
A_L	Lazer tarayıcının tarama izi
b	Hiperdüzlemin orijine olan uzaklığını ifade eden eğilim değeri
β_r	Dönüş sinyalinin ışın genişliği
β_t	Yayılan sinyalin ışın genişliği
C_{cal}	Kalibrasyon sabiti
D_r	Alıcının diyafram çapı
D_t	Vericinin diyafram çapı
ΔR	Mesafe çözünürlüğü
ΔV	Hız çözünürlüğü
Δt	Zaman çözünürlüğü
$\Delta\lambda$	Tam formdaki dalga boyunun yarısını ifade etmekte olan dalga boyunun kesiri
λ	Dalga boyu
λ_m	Modülasyon sinyalinin dalga boyu
M	Tam formdaki toplam dalga boyu
N	Lazer sinyalinin seyahat yolu üzerinde geri dönüş sağlayan hedef sayısı
N_{RO}	Rastgele orman sınıflandırıcısını oluşturan ağaç sayısı
η_{ATM}	Atmosferin iletim faktörü
η_{SYS}	Sistemin iletim faktörü
P_t	Sensörden yayılan sinyalin gücü/enerjisi
$P_t(t)$	Sensörden t seyahat süresinde yayılan sinyalin gücü/enerjisi
P_r	Yeryüzü objesinden yansıyan dönüşün gücü/enerjisi
$P_r(t)$	Yeryüzü objesinden t seyahat süresinde yansıyan dönüşün gücü/enerjisi
$P_{r,i}(t)$	Yeryüzü objesinden t seyahat süresinde i saçılımının dönüş gücü/ enerjisi
$\widehat{P}_i$	i saçılım kümesinin dönüş genliği
R	Lazer tarayıcı ile yeryüzü objesi arasındaki eğik mesafe
R_i	Lazer tarayıcı ile i saçılımı arasındaki eğik mesafe
r_R	Sistemin mesafe çözünürlüğü
$\Gamma(t)$	Alıcı sensörün yanıt fonksiyonu
ρ	Yeryüzü objesinin yansıtıcılığı
S_r	Yeryüzü objesinden geri dönen dönüşün enerji yoğunluğu
S_t	Sensörden yayılan sinyalin enerji yoğunluğu
S(t)	Lazer tarama sisteminin dalga formu

$\hat{S}$	Sistem dalga formunun genliği (amplitude)
$s_{p,i}$	Lazer sinyalinin i saçılım kümesinde geri dönen dönüşün standart sapması
s_s	Lazer tarama sisteminin standart sapması
s_i	i saçılım kümesine ait standart sapma
t	Lazer sinyalinin gidiş-dönüş (seyahat) süresi
t_i	i saçılım kümesinin gidiş-dönüş (seyahat) süresi
t’	Zaman gecikmesi
T_m	Modülasyon sinyalinin (zamansal) periyodu
τ	Sistemin sinyal süresi
W	Hiperdüzlemin normali
V	Elektromanyetik ışınımın hızı
v_g	Lazer sinyalinin atmosferdeki grup hızı
φ	Lazer tarayıcıdan iletilen ve yeryüzü objesinden geri dönen sinyal arasındaki faz farkının ölçüsü
σ	Geri saçılmanın enine kesiti
σ_i	i saçılım kümesinin geri saçılım enine kesiti
$\sigma_i(R)$	i saçılım kümesinin R mesafesinde geri saçılımın diferansiyel enine kesiti
$\sigma_i'(R)$	i saçılım kümesinin R mesafesinde enine kesitinin türevi
$\sigma_i'(t)$	i saçılım kümesinin t seyahat süresinde enine kesitinin türevi
$\hat{\sigma}_i$	i saçılım kümesine ait dönüşün genliği
X_i	Hiperdüzlem üzerindeki i noktası
X_i, Y_i, Z_i	Lazer tarayıcıdan iletilen ve yeryüzü objesinden geri dönen lazer sinyaline ait i dönüşünün konumu
ɣ	Geri saçılım katsayısı
$ɣ_i$	Her bir i saçılımı için geri saçılım katsayısı
θ	İnsidans açısı
Ω	Koni üzerinde solid açı

KISALTMA LİSTESİ

ALS	Airborne Laser Scanning
ASDF	Average Sqaure Difference Function
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
BİMTAŞ	Boğaziçi İnşaat Müşavirlik Anonim Şirketi
CAD	Computer Aided Design
CALIPSO	The Cloud-Aerosol LiDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation
CHM	Canopy Height Model
CPU	Central Processing Unit
CW	Continuous Wave
DBH	Diameter at Breast Height
DGPS	Differantial Global Positioning System
DR	Discrete Return (Ayrık Dönüşlü)
DVM	Destek Vektör Makinesi
EM	Expectation-Maximation
FOV	Field of View
FWF	Full-Waveform (Tam Dalga Formu Kaydeden)
FWHM	Full-Width at Half Maximum
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GML	Geiger-mode LiDAR
GPS	Global Positioning System (Global Konumlama Sistemi)
GSFC	Goddard Space Flight Center
HRQLS	High-Resolution Quantum LiDAR System
ICESat	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite
IFOV	Instanstaneous Field of View
IIP	Instrument Incubator Program
IMU	Inertial Measurement Unit (İnersiyal Ölçme Sistemi)
INS	Inertial Navigation System (İnersiyal Konumlama Sistemi)
ITRF-96	International Terrestrial Reference Frame
LaRC	Langley Research Center
LAI	Leaf Area Index (Yaprak Yüzey Alanı İndeksi)
LAS	LASer File Format
LiDAR	Light Detection and Ranging
LITE	LiDAR In-Space Technology Experiment

LML	Linear Mode LiDAR
LMS	Laser Measurement Systems
LRU	Laser Ranging Unit (Lazer Ölçüm Ünitesi)
LSM	Nonlinear Least Squares Method
LVIS	Laser Vegetation Imaging Sensor
MÇYM	Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli
MGS	Mars Global Surveyor
MPL	Micro Pulse LiDAR
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter
MSL	Multi-Spectral LiDAR
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEAR	Near Earth Astreoid Rendezvous
NLR	NEAR Laser Rangefinder
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
nSYM	Normalize Edilmiş Sayısal Yükseklik Modeli
OMSD	Opto-Mechanical Scanning Device (Opto-Mekanik Tarayıcı)
PRF	Pulse Repetition Frequency (Sinyal Tekrarlama Frekansı)
RO	Rastgele Orman
POF	Position and Orientation File
RADAR	Radio Detection and Ranging
SAM	Sayısal Arazi Modeli
ScaLARS	Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor
SDC	Sample Data Coordinate
SDF	Sample Data File
SDW	Scan Data World
SLA	Shuttle Laser Altimeter
SLICER	Scanning LiDAR Imager of Canopies by Echo Recovery
SPL	Single Photon LiDAR
STS	Space Transportation Systems
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TM	Transversal merkator
TOF	Time-of-flight
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UTM	Universal Transversal Mercator
UZAL	Uzaktan Algılama
WDP	Waveform Data Packet
WGS 84	World Geodetic System 1984
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Lazer tarama sistem bileşenleri 11
Şekil 2. 2 Hava LiDAR sisteminin yeryüzünü tarama operasyonu 13
Şekil 2. 3 Puls ile mesafe ölçümü prensibi 14
Şekil 2. 4 Taşıyıcı dalganın genliğini değiştirmek için kullanılan ölçüm dalgası ile genlik modülasyonu..... 15
Şekil 2. 5 İletilen ve alınan sinyaller arasında faz karşılaştırması (a), A noktasında bulunan iki sinyal arasındaki faz karşılaştırması (b)..... 16
Şekil 2. 6 Ayrık dönüşlü LiDAR sistemlerinde kaydedilen dönüş seviyeleri 18
Şekil 2. 7 Çoklu dönüş seviyelerine göre LiDAR nokta bulutu örneği 19
Şekil 2. 8 Küçük tarama izine sahip LiDAR ile bitki örtüsü örneği (a), büyük tarama izine sahip LiDAR ile bitki örtüsü örneği (b) 21
Şekil 2. 9 TiTAN MSL'ın çalıştığı üç farklı dalga boyu ve bu dalga boylarında elde edilen yoğunluk (intensity) görüntüleri 22
Şekil 3. 1 Bitki örtüsü üzerinde yansıyan sinyalin ham tam dalga formu (a), zamanın bir fonksiyonu olarak sayısallaştırılan dalga formu (b), her bir tepenin mesafe, genlik ve genişliğe göre dalga formu modeli (c) 27
Şekil 3. 2 Lazer sinyalinin kırınım konisi içerisinde yer alan hedef veya hedeflerin geometrisinin dönüş genişliği üzerine etkisi. 29
Şekil 3. 3 Dönüş sinyaline ait tam dalga formu özniteliklerinin ve anlamlarının Gauss Modeli üzerinde gösterimi 30
Şekil 3. 4 Radar denkleminde yer alan parametreler ve geometrisi 32
Şekil 3. 5 A_L alanına ait hedefin kesitini etkileyen parametreler 33
Şekil 3. 6 Sistem dalga formu (sol), kaydedilen dönüşlerin dalga formu (sağ 37
Şekil 3. 7 Gauss ayrıştırmasıyla elde edilen dalga formu örneği; sistem dalga formu (sol), kaydedilen dönüş dalga formu (sağ)..... 38
Şekil 3. 8 Riegl LMS Q560 lazer tarama cihazıyla kaydedilen dalga formunun Gauss ayrışımı 39
Şekil 4. 1 Dört sınıflı basit bir karar ağacı 47
Şekil 4. 2 Farklı yeryüzü objeleri için dönüş genişliği (a) ve dönüş genliği (b) değerlerinin histogramları 48
Şekil 4. 3 Nokta tabanlı sınıflandırma örneği; karar ağacı..... 49
Şekil 4. 4 N_{RO} adet karar ağacı ile oluşturulan rastgele orman 50
Şekil 4. 5 Hiperdüzlemin belirlenmesi (a) ve doğrusal destek vektör makinesi (b) 52

Şekil 4. 6 Çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı 54
Şekil 4. 7 Bir ağacın ölçülebilir özellikleri 55
Şekil 4. 8 Ormanın farklı katmanlarına iletilen yedi adet LiDAR sinyali 56
Şekil 4. 9 Kaydedilen bir dalga formunun düşey profili 59
Şekil 4. 10 Meşçere çatısı yükseklik modeli üretimi 61
Şekil 5. 1 Çalışma alanı 65
Şekil 5. 2 Test alanları 66
Şekil 5. 3 Riegl LMS-Q680i lazer tarama cihazı 67
Şekil 5. 4 Yörünge verisinin içeriği 68
Şekil 5. 5 Tam Dalga Formu LiDAR verisi ön-işleme iş akışı 70
Şekil 5. 6 Nokta bulutuna ait seçilen parametreler (a) ve TerraScan ana penceresinde görünümü (b) 72
Şekil 5. 7 Nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen işlem adımlarının iş akış şeması 74
Şekil 5. 8 Bina çatısını temsil eden Test Alanı 1'in konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c) 77
Şekil 5. 9 Asfalt yolu temsil eden Test Alanı 2'nin konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c) 78
Şekil 5. 10 Seyrek bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 3'ün konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c) 80
Şekil 5. 11 Orta yoğunluktaki bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 4'ün konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c) 81
Şekil 5. 12 Yoğun bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 5'in konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c) 82
Şekil 5. 13 Son dönüşlerin zeminden gelmeme durumu örneği; dalga formu grafiği (a), çoklu dönüşlerin nokta bulutu üzerinde gösterimi (b) 84
Şekil 5. 14 Karar ağacı 85
Şekil 5. 15 Çalışma alanına ait nokta bulutunun yüksekliğe göre renklendirilmesi (a), çoklu dönüş seviyelerine göre renklendirilmesi (b), dönüş genişliği değerlerine göre gruplandırılması (c) 87
Şekil 5. 16 Çalışma alanına ait nokta bulutunun nokta tabanlı karar ağacı sınıflandırma sonucu 89
Şekil 5. 17 Sınıflandırma doğruluğu; (a) Test Alanı 1, (b) Test Alanı 2, (c) Test Alanı 3, (d) Test Alanı 4, (e) Test Alanı 5 91
Şekil 5. 18 Çalışma alanının farklı bölgelerinde incelenen 2 m'lik kesit doğrultuları 92
Şekil 5. 19 'Ground' eylemi ve yineleme parametrelerinin gösterimi 95
Şekil 5. 20 'Zemin' nokta sınıfı; nokta bulutu (a), kabartı haritası (b) ve SAM (c) 97
Şekil 5. 21 Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli 99

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Şekil 3.8’ de gösterilen dalga formunun Gauss ayrıştırma ile elde edilen tam dalga formu öznitelikleri. 40
Çizelge 4. 1 Meşçere parametrelerinin LiDAR ölçümleriyle olan ilişkisi..... 57
Çizelge 5. 1 Uçuş parametreleri ve lazer tarama sistemi teknik özellikleri..... 67
Çizelge 5. 2 Dönüş genişliğinin 0.005m aralıklı gruplandırılması 76
Çizelge 5. 3 Test Alanı 1 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları 77
Çizelge 5. 4 Test Alanı 3 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları 80
Çizelge 5. 5 Test Alanı 4 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları 81
Çizelge 5. 6 Test Alanı 5 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları 82
Çizelge 5. 7 Yinelemeli sınıflandırma eylemi 96

ÖZET

TAM DALGA LiDAR VERİLERİ İLE BİTKİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Ayşe Buşra KURTAK

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Naci YASTIKLI

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte 3-boyutlu veri elde etme amacıyla hava LiDAR sistemlerinin kullanımı oldukça popüler bir hale gelmektedir. Bunun yanı sıra ormancılık uygulamalarında sağladığı avantajlarla da hava LiDAR sistemleri etkili bir kullanım alanı bulmuştur. Tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemleri yeryüzü objesinden geri yansıyan LiDAR sinyalinin çoklu dönüş seviyeleriyle birlikte geri dönen sinyalin enerjisini de kaydedebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun bitki örtüsü sınıflandırma olanakları araştırılmıştır. Öncelikle, tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun dalga formu analiz yöntemleri incelenmiştir. Bunlardan en popüler olan 'Gauss Ayrıştırması' yöntemi tercih edilerek dalga formu analizi gerçekleştirilmiştir. Dalga formu analizi ile elde edilen dönüş genişliği ve dönüş genliği başta olmak üzere dalga formu özniteliklerinin bitki örtüsü sınıflandırmasında kullanımına ilişkin sınıflandırma yöntemleri özetlenmiştir. Bu çalışmada, standart sınıflandırma yaklaşımlarında yaşanan sorunların ortadan kaldırılması amacıyla arazinin karakteristiğine göre sınıflandırma parametrelerinin belirlenmesi önerilmiştir.

Önerilen karar ağacı yaklaşımına ilişkin sınır değerlerin kestirimi için çalışma alanında yeryüzü topoğrafyasının farklı objelerini temsil etmeleri bakımından beş farklı test alanı oluşturulmuştur. Her bir test alanında elde edilen sonuçların ışığında bitki örtüsünü diğer

yeryüzü objelerinden ayırt eden sınır değerler belirlenmiştir. Çalışma alanına uygulanan karar ağacı sınıflandıcısı sonucunda 3-boyutlu nokta bulutu iki temel sınıfa (bitki örtüsü olan ve bitki örtüsü olmayan) başarılı bir şekilde ayrılmıştır. Bu tez çalışmasında nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi olarak önerilen karar ağacı yaklaşımının doğruluğu 1m ve 2m kesit doğrultusunda görsel analize dayalı olarak ortaya konmuştur.

Ormancılık uygulamalarında ağaç boyu, gövde çapı, hacim, biyokütle vb. gibi orman parametrelerinin hesaplanmasında sınıflandırılmış nokta bulutunun kullanılabilirliğini test etmek amacıyla SAM ve MÇYM üretilmiştir. Bitki örtüsü haricindeki nokta bulutu ile doğru bir SAM üretimi gerçekleştirebilmek için yüksekliğe bağlı bir filtreleme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem ile bitki örtüsü olmayan nokta sınıfındaki zemine ait noktalar tespit edilerek olası problemler elimine edilmiştir. Son olarak, elde edilen MÇYM'nin ormancılık uygulamalarında temel veri olarak kullanımının oldukça faydalı olacağı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: tam dalga formu LiDAR, bitki örtüsü, sınıflandırma, karar ağacı, Gauss Ayrıştırması

ABSTRACT

RESEARCH ON POSSIBILITIES OF VEGETATION CLASSIFICATION BY USING FULL WAVEFORM LIDAR DATA

Ayşe Buşra KURTAK

Department of Geomatic Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Naci YASTIKLI

The use of airborne lidar systems to obtain 3-dimensional data is becoming popular with the development of technology. In addition, airborne lidar systems (ALS) have been considered an effective technique for using forestry application. Full waveform LiDAR systems record, from the earth object, the backscattered LiDAR signal multi echo levels and backscattered signal's energy.

In this thesis, possibilities of vegetation classification were researched by using full waveform LiDAR point cloud. First of all, waveform analysis methods of full waveform LiDAR point cloud were investigated. The 'Gaussian Decomposition' method was preferred among the researched method for waveform analysis. The methods for vegetation classification using of waveform characteristics such as echo width and echo amplitude obtained by waveform analysis, are summarized. In this study, the determination of the classification parameters according to the landcover characteristics was proposed in order to eliminate the problems in the standard classification approaches.

The five different test areas have been established representing the different objects of the earth topography in the study area for the estimation of the limits of the proposed decision tree approach. In the light of the results obtained in each test area, the limits that discriminate the vegetation from other landcover objects were determined. As a

result of the decision tree classifier applied to the study area, the 3-dimensional point cloud has been successfully divided into two basic classes (vegetation and non-vegetation). In this thesis, the accuracy of decision tree approach proposed as point based classification method was based on visual analysis using 1m and 2m sections.

In forestry applications, DEM and CHM were produced in order to test usage of classified point cloud for the calculation of forest parameters, such as tree height, trunk diameter, volume, biomass etc. A height based filtering method has been proposed in order to produce an accurate DEM with the point cloud other than vegetation point cloud. With this method, ground points in the non-vegetation point cloud were identified and possible problems were eliminated. Finally, it has been shown that the use of the obtained CHM as the main data source in forestry applications will be very useful.

Keywords: full-waveform LiDAR, vegetation, classification, decision tree, Gaussian Decomposition

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği son yıllarda en çok tartışılan konulardan biridir. Küresel iklim değişikliğinin yeryüzü topoğrafyasına olan etkisini izlemek ve tahmin etmek için meşçere parametrelerinin ölçümü oldukça gereklidir. Bir ormanda yer alan ağaçları tek tek ölçmek hem insan gücü hem zaman hem de maliyet açısından mümkün olmamaktadır. Ormanın hızlı ve pratik ölçümü için LiDAR teknolojilerinin kullanımı oldukça popüler bir hale gelmiştir [1]. Meşçere yüksekliği ve bazal alan gibi ormana ait parametrelerin tahmin edilmesinde LiDAR'ın kullanımı hızla ön plana çıkmıştır [2].

Entegre edildiği platforma göre yersel, uydu ve hava LiDAR teknolojileri ile yeryüzü topoğrafyasının ölçümü gerçekleştirilmektedir. Uydu ve hava platformlarına yerleştirilen sensörler ile yıl boyunca düzenli olarak ölçümler yapılabilmektedir. Böylelikle yeryüzü topoğrafyasında meydana gelen zamana bağlı değişimler izlenebilmektedir. Dünya çapında veri alımı gerçekleştirilmesi söz konusu olduğunda uçak veya helikopter gibi hava araçlarına yerleştirilen sensörler ile veri alımı uydu sistemlerine göre daha maliyetli olsa da hava platformundan yapılan ölçümlerde atmosferik zayıflama daha azdır [1]. Bununla birlikte havadan LiDAR ölçümleri ile ormanlık alanlarda hem yatay hem de dikey yapılar karakterize edilebilmektedir [3].

Amerika Birleşik Devletleri tarafından 1971 yılında Ay'a gönderilen Apollo 15, uzaydaki ilk LiDAR'dır. Bu LiDAR cihazı, foton kaynağı (pompa) flaş lamba olan yakut lazer kullanarak dakikada 3.75 sinyal yaymaktadır. 1980'li yılların sonlarına doğru diyot pompalı lazerlerin geliştirilmesiyle birlikte lazerlerin uzaydaki varlığı önemli ölçüde artmıştır [4]. Diyot (yarı iletken) pompalı Nd:YAG (kristal) lazeri kullanan ilk uzay tabanlı LiDAR, 1992 yılında NASA'nın "National Aeronautics and Space Administration" Goddard

Uzay Uçuşları Görüntüleme Merkezi “Goddard Space Flight Center” (GSFC) tarafından geliştirilen MOLA-I “Mars Orbiter Laser Altimeter” dir. Mars’a gönderilmek üzere yola çıkan MOLA-I, Mars’ın yörüngesine ulaşamamıştır. John Hopkins Üniversitesi Uygulamalı Fizik Laboratuvarı tarafından geliştirilerek 1996’da NEAR “Near Earth Astreoid Rendezvous” projesinde kullanılan NLR “NEAR Laser Rangefinder” Dünya ile Mars arasında yer alan 433 EROS küçük gezegeninin topoğrafyasının lazer ölçümünü başarıyla gerçekleştirmiştir. NASA GSFC tarafından geliştirilen MOLA-II’nin faaliyeti Mars Küresel Araştırmacısı “Mars Global Surveyor” (MGS) tarafından 1997’de başlatılmıştır. MOLA-II, lazer sinyalinin gidiş-dönüş süresini ölçmenin yanında geri dönen sinyalin dönüş genişliğini ve enerjisini de ölçmektedir. Bu özelliği sebebiyle MOLA-II hem lazer mesafe ölçer hem de lazer radyometredir [4]. MOLA-II 10 Hz PRF, 40 mj/pulse sinyal enerjisi, 8 ns dönüş genişliği ve 1064 ± 2nm dalga boyuna sahiptir. Görev süresi olan bir tam Mars yılı boyunca (iki Dünya yılı) yaklaşık 0.25 metre hassasiyetle 650 milyon çekim gerçekleştirerek Mars’ın yüzey topoğrafyasını ölçmüştür [4], [5]. NASA LaRC “Langley Research Center” tarafından geliştirilen LITE “LiDAR In-Space Technology Experiment” 1994’te STS-64 “Space Transportation Systems” uzay gemisi ile göreve başlamıştır [4]. LITE, 1064nm, 532nm ve 355nm dalga boylarında diyot pompalı Q-anahtarlı Nd:YAG lazeri kullanarak obje yüzeyinden geri dönen dönüşleri kaydetmenin yanında bulutların ve aerosollerin de geri saçılım özelliklerini kaydetmiştir [4]. LITE, Dünya yüzeyinin LiDAR profillerini ölçen ilk uzay platformudur [5]. NASA GSFC tarafından geliştirilen SLA “Shuttle Laser Altimeter” 1996’da STS-72 ve 1997’de STS-85 ile birlikte uzaya gönderilen diğer LiDAR enstrümanlarıdır [4]. Uzay mekiği üzerine yerleştirilen LiDAR ile dünya yörüngesinde iki adet LiDAR enstrümanı bulunmaktadır [4]. Bunlardan ilki NASA GSFC tarafından geliştirilerek 12 Ocak 2003’te göreve başlayan ICESat-I “Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite” uydusu üzerindeki GLAS “Geoscience Laser Altimeter System” dir. GLAS, bulut ve aerosollerin dikey dağılımları için 532 nm ve topoğrafik ölçüm için 1064 nm dalga boylarındaki kısa sinyaller (4 ns) iletmiştir [6]. ICESat-I GLAS, Antartika ve Grönland’da eşi görülmemiş veri kümesi sağlamıştır [4]. ICESat-I verileri NSIDC “National Snow and Ice Data Center” tarafından dağıtılmaktadır.

2003-2009 yılları arasında misyonunu tamamlayan ICESat-I Ağustos 2010’da hizmet dışı bırakılmıştır. ICESat-I, 3 cm hassasiyetle yaklaşık 2 milyar lazer çekimi ile 2009 yılında

görevini tamamlamıştır [4], [5]. 15 Eylül 2018'de ICESat-II göreve başlamıştır. ICESat-II yeryüzüne saniyede 10000 lazer sinyali iletmektedir. Buz, bulut ve yeryüzü yüksekliklerini ölçmek üzere tasarlanan ICESat-II üzerinde foton-sayıcı lazer tarayıcı bulunmaktadır [7]. Dünya yörüngesinde olan ikinci LiDAR enstrümanı ise NASA'nın "LaRC and Ball Aerospace & Technology Corporation" kuruluşu tarafından geliştirilen CALIPSO "The Cloud-Aerosol LiDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation" uydusudur. CALIPSO, Haziran 2006'da göreve başlamıştır [4], [5]. 1064 nm ve 532 nm dalga boylarında çalışan CALIPSO, 2 milyardan fazla lazer ölçümü yapmıştır. Dünya'da meydana gelen iklim değişikliği üzerinde bulutların ve atmosferik aerosollerin oynadığı rollere yeni bir bakış açısı kazandırmıştır [4].

Hava platformundan lazer tarama ve profilleme 1970'li yılların başlarında özellikle Kuzey Amerika'da batimetrik ve hidroğrafik uygulamalar için deneysel amaçlı geliştirilmiştir [8]. Ormancılık uygulamalarında kullanılması ise 1980'li yılları bulmuştur [9], [10], [11], [12]. İlk çalışmalar; meşçere yüksekliğinin belirlenmesi, bitki örtüsü yoğunluğunun hesaplanması, ağaç türlerinin tespiti ve biokütle tahmininin yapılabilmesi amacıyla lazer profilleme sistemi üzerine yoğunlaşarak ormancılık uygulamalarında lazer kullanmanın temellerini kurmuştur [8], [13]. 1980'li yılların sonlarında daha geniş çapta ölçümler yapabilmek amacıyla geliştirilen GPS'in "Global Positioning System" kullanımı ve INS "Inertial Navigation System" entegrasyonu ile yüksek hassasiyette konum doğruluğu sağlanmıştır [8]. 1990'ların başlarında lazer tarayıcıların yerini almaya başlayan lazer profilleri ile birlikte kullanılan GPS-INS entegrasyonu doğrudan geo-referanslamaya olanak sağlamıştır. Böylece hava platformundaki lazer tarama cihazı çalışma alanına ait 3-Boyutlu geo-referanslandırılmış nokta bulutu elde etmektedir [8], [14].

İlk hava LiDAR sistemi, yeryüzü objesinden geri dönen ilk ve son dönüşü kaydetmek üzere tasarlanmıştır [8], [13]. Günümüzde ise ilk ve son dönüşü kaydedebilme yeteneğine sahip lazer tarayıcıların yanı sıra aynı anda birden çok geri dönüş sinyalini, geri dönen sinyalin dalga formunu, lazer taramayla paralel olarak hava fotoğraflarını kaydedebilen vs. sistemler mevcuttur. Literatürde, hava LiDAR sistemleri "Airborne LiDAR System (ALS)" olarak adlandırılmaktadır. ALS'nin ormancılık çalışmalarında ilk kullanımı yeryüzü topoğrafyasının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir [15], [16], [17]. Bunun akabinde, ormanın geneli için ortalama meşçere yüksekliğinin ve hacmin

hesaplanması [18], [19], tek tek ağaçların tespiti ile yükseklik ve hacmin hesaplanması [20], [21], ağaç türlerinin sınıflandırılması [22], [23] ve ormanın gelişiminin ölçülmesiyle hasat edilen ağaçların [24] tespiti gerçekleştirilmiştir.

Teknolojide yaşanan gelişmeler, elektronik cihazlarda işletim sistemi ve veri depolama hacminin artmasıyla yeryüzü objesine iletilen lazer sinyallerinin her bir dönüşünü zamanın bir fonksiyonu (sayısal) olarak kaydederek ticari LiDAR teknolojilerini bir adım ileriye taşımıştır. Kaydedilen her bir dönüşün genlik (amplitude) profili ise genellikle "dalga formu" olarak adlandırılmaktadır. Dalga formu analizi ile birlikte kaydedilebilir dönüş sayısı artmış ve saçılma yüzeyi hakkında ek bilgi sağlanmıştır [25]. Tam dalga formu kaydedebilen hava LiDAR sistemleri 1990'lu yıllarda SLICER "Scanning LiDAR Imager of Canopies by Echo Recovery" [16] ve LVIS "Laser Vegetation Imaging Sensor"[17] sistemleri ile deneysel amaçlı kullanılmıştır [25]. Büyük tarama izine sahip bu sistemler ile meşçere parametrelerinin tahminini başarıyla gerçekleştirilmiştir [25], [26].

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş, literatür özeti, tezin amacı ve hipotezden oluşmaktadır. İkinci bölümde LiDAR'ın çalışma prensibi ve çeşitli LiDAR teknolojilerinin kullanımı anlatılmaktadır. Tam dalga formu analizi ile elde edilen öznitelikler ve veri işleme yaklaşımlarından üçüncü bölümde, nokta bulutunun sınıflandırılması ve ormancılık uygulamalarında kullanımından dördüncü bölümde bahsedilmektedir. Beşinci bölüm, çalışma alanı ve kullanılan verisetinin açıklanmasının akabinde deneylerden oluşmaktadır. Son bölümde ise yapılan deneylerin sonuçları özetlenmiş ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

LiDAR, ormancılık uygulamaları için çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Lazer ışınının orman yapısına nüfuz etmesi ve belirli bir dalga boyunun bitki örtüsü ile etkileşimi sayesinde yüksek nokta yoğunluğuna sahip 3-Boyutlu bilgi elde edilebilmektedir.

Tam dalga formlu LiDAR [27], multispektral LiDAR [28] ve tek foton LiDAR [29] gibi hava platformundaki LiDAR teknolojileri ile veri toplama teknikleri Uzaktan Algılama'da (UZAL) önemli atılımlar olarak kabul edilmektedir [30].

Türkiye'de ilk hava LiDAR kullanımı 2009-2011 yılları arasında "NABUCCO Doğal Gaz Boru Hattı Projesi" kapsamında arazinin modellenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir [31]. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi tarafından 2011 yılında imzalanan "Deniz ve Kıyı Suları Kalite Durumlarının Belirlenmesi ve Sınıflandırma" projesi kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi için 140 km^2 lik bir alanda LiDAR verileri toplanmış ve yüksek çözünürlüklü SYM oluşturulmuştur [32]. Türkiye'deki diğer hava LiDAR projeleri; BiMTAŞ A.Ş tarafından 2012 ile 2015 yılları arasında "İstanbul İl Sınırları İçinde Hava LiDAR Teknolojisiyle Elde Edilecek LiDAR Verilerinden Sayısal Yüzey Modelleri ve 3 Boyutlu Kent Modelinin Üretilmesi İşi" ve 2015 ile 2017 yılları arasında "Melen Havzası'nda Hava LiDAR Verilerinden Sayısal Yüzey ve Havza Modeli Üretimi İşi" projeleri kapsamında ve 2014 yılında İzmir ili Bergama ilçesinde Harita Genel Komutanlığı tarafından gerçekleştirilen projelerdir.

Lazer sinyalinin seyahat yolunda bulunan yeryüzü objelerinden geri dönen sinyaller ile ilgili ek bilgi çıkarılması ve tek bir dalga formunun ayrıştırılması hakkında literatürde farklı yaklaşımlar yer almaktadır [33], [34]. Hofton vd. tarafından [35] de doğrusal olmayan en küçük kareler methodu "nonlinear least squares method (LSM)" ile dalga formlarını ayrıştıran bir yaklaşım sunulmuştur [33]. Jutzi ve Stilla tarafından [36] da dalga formu Gauss-Newton yöntemiyle iteratif parametreler kullanarak modellenmiştir. Persson vd. [34], beklenti maksimizasyonu "Expectation-Maximization (EM)" algoritması kullanarak geliştirdiği yaklaşımda dalga formlarının Gauss dağılımlarını incelemiş, dalga formlarını ayrıştırmış ve tepe noktalarını tespit etmiştir. Bu yaklaşımla bitki örtüsü olan ve olmayan alanların ayrımını dönüş genişliğinin kullanımıyla değerlendirmiştir.

Wagner vd. tarafından [37] de çoklu dönüş seviyelerinin sayısının ve konumunun tespit edilmesi amacıyla 2 yöntem kullanılmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Bu yöntemlerden ilki Gauss ayrıştırmasında sinyal algılama tekniği olarak kullanımı bir standart haline gelen Maksimum Algılama "Maximum Detection", ikincisi ise Average Sqaure Difference Function (ASDF)" dir. Deneylerin sonucunda her iki yöntemle benzer sonuçların elde edilmesinin yanı sıra 3 ve daha fazla çoklu dönüşün tespitinin Maksimum Algılama yöntemine göre ASDF yöntemi ile daha yüksek olduğu görülmüştür.

Literatürde, hem yerleşim alanlarında hem de bitki örtüsüne sahip ormanlık alanlarda sınıflandırma yapmak için dalga formu özniteliklerini kullanmanın faydaları üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Çalışma alanlarının karmaşık yapısı nedeniyle bitki örtüsü olan alanları temsil eden ve bitki örtüsü olmayan alanları temsil eden noktaların birbirlerinden ayrılmasını temel alan sınıflandırma çalışmaları ön plana çıkmıştır [38], [39], [40], [41], [42], [43].

Wagner vd. [38] de Avusturya'da yer alan bakımlı ve genç ağaçlara sahip bir Fransız bahçesi ile bakımsız ve yaşlı ağaçlara sahip bir İngiliz bahçesinde yapılan LiDAR ölçümlerinin tam dalga formu analizini gerçekleştirmiştir. Kaydedilen her bir dönüş sinyalinin mesafe, dönüş genişliği, dönüş genliği ve geri saçılımın enine kesitinden oluşan dalga formu özniteliklerinin tam dalga formu analizi ile hesaplanabileceğini göstermiştir. Çoklu dönüş seviyelerine ayrılan LiDAR sinyaline ait her bir dönüşün enerjisinin kendinden öncekine bağlı olduğunu ve son dönüşün orta seviyeden, orta seviyenin ise ilk dönüşten daha zayıf olduğunu ortaya koymuştur. Bitki örtüsünden geri dönen sinyallerin enine kesitininin zeminden geri dönen sinyallerden daha küçük olduğunu tespit ederek arazi ile bitki örtüsünün birbirinden ayırt edilmesi için bir karar ağacı (decision tree) tasarlamıştır. Karar ağacı sınıflandırıcısı sonucunda bitki örtüsü olan ve olmayan nokta bulutu sınıflandırılmıştır. Bitki örtüsü olmayan nokta sınıfı ile oluşturulan SAM "Sayısal Arazi Modeli" ile standart sınıflandırma yöntemleriyle yapılan geometrik sınıflandırma sonucunda oluşturulan SAM karşılaştırılmıştır. Bitki örtüsü olan ve olmayan nokta bulutu sınıflandırması %93.1 doğrulukla gerçekleştirilmiştir.

Ducic vd. tarafından [39] da herhangi bir geometrik bilgi olmaksızın tam dalga formu analizi ile elde edilen dönüş genişliği, dönüş genliği ve toplam dönüş sayısı bilgilerini kullanarak bitki örtüsünü sınıflandırmıştır. Bu değişkenlere bağlı olarak bitki örtüsünü diğer yeryüzü objelerinden otomatik bir biçimde ayırabilmek için bir karar ağacı tasarlamıştır. Öncelikle dönüş sayısı 2 veya daha fazla olan sinyaller ile tek dönüşleri ayırmıştır. Tek dönüşleri kendi içinde dönüş genliği 75'den büyük olanlar ve küçük olanlar olarak ayırarak 75'den büyük olan dönüş sinyallerinin çatı vb. gibi bitki örtüsü haricindeki yeryüzü objesine ait olacağını ileri sürmüştür. Dönüş genliği değeri 75'den küçük olanları incelediğinde ise hem bitki örtüsünden hem de asfalt yoldan geri dönen sinyallere ait olduğunu görmüştür. Birbirinden ayırt edilip doğru bir sınıflandırma

yapılması için dönüş genişliği değerine bakmıştır. Dönüş genişliği 1.9 ns' den küçük olanların zeminden, büyük olanların ise bitki örtüsünden geri döndüğünü söylemiştir. Dönüş sayısı 2 veya daha fazla olan sinyaller için ise incelenmekte olan sinyalin son dönüş olması ve olmaması durumuna göre kategorize etmiştir. İncelenen dönüş sinyali son dönüş ise zemin sınıfına, orta seviye dönüş ise bitki örtüsü sınıfına atanmıştır. Bu sonuçlar ışığında ön sınıflandırma yapılırken dönüş genliği değerinin tek başına kullanılmasının yetersiz olacağını ve bitki örtüsünden geri dönen sinyallerin dönüş genişliğinin zeminden geri dönen sinyalin dönüş genişliğinden daha büyük olacağını tespit etmiştir. Bitki örtüsü, çimen, çatı ve asfalt yoldan oluşan 4 kentsel sınıfa ait özelliklerin örtüşmesi sebebiyle %88.6 doğrulukla bitki örtüsü olan ve olmayan alanları sınıflandırmıştır.

Ağaç türlerinin tek tek tanımlanmasına olanak sağlayan meşçere parametelerinin LiDAR verileri ile hesaplanması ağaç türleri sınıflandırmasında önemlidir. Ormancılık uygulamalarında geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaçların birbirinden ayrılması tür sınıflandırması adına yapılmaktadır [25], [44], [45], [46], [47], [48]. Litkey vd. [46] ve Reitberger vd. [47], ağaç türlerinin sınıflandırılması amacıyla yapılan ilk çalışmalardandır. Her iki çalışmada da yalnızca nokta bulutundaki nokta yoğunluklarının dağılımları göz önünde bulundurulmuştur. Geniş yapraklı ağaçların en üst tabakasında iğne yapraklı ağaçlara göre daha fazla nokta yoğunluğu olacağı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar ışığında geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaçları temsil eden nokta bulutu sınıflandırılmıştır.

Reitberger vd. tarafından [25] de geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaç türlerinin birbirinden ayırt edilebilmesi için ağaç türleri ile dönüş genişliği bilgisi arasındaki korelasyonu tanımlayan bir çalışma yapmıştır. Öncelikle oluşturduğu Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli (MÇYM) "Canopy Height Model (CHM)"'ni segmente ederek ağaçların konumlarını tespit etmiştir. Belirlediği bu bireysel ağaçların karakteristik özelliklerini çıkarmak için dönüş genişliği ve yoğunluk (intensity) değerlerini, her bir dalga formundaki dönüş sayılarını, ağaçların iç ve dış şeklini ve ağaçların içindeki nokta dağılımını kullanmıştır. Ağaç türlerinin sınıflandırması sonucunda ağaçların yapraklı olma koşulları altında %85 genel doğrulukla geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaç türlerini

sınıflandırmıştır. Ağaçların yapraklarını döktüğü koşullar altında ise sınıflandırmada %95 genel doğruluk elde etmiştir.

Holmgren ve Persson tarafından [23] de iğne yapraklı ağaç türlerinden olan Norveç ladini ve İskoç çamının birbirinden ayırt edilmesi için yüksek nokta yoğunluğuna sahip LiDAR verisi kullanmıştır. Sınıflandırma sonucunda %95 doğruluk elde etmiştir. Heurich [49] ise Norveç ladini ve Avrupa kayınının sınıflandırılması için nokta yoğunluğu 10 nokta/m^2 olan LiDAR verisi kullanmıştır. LiDAR ile ağaç türü sınıflandırmasının %97'lik bir genel doğrulukla mümkün olduğunu göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, tam dalga formu LiDAR verileri kullanarak bitki örtüsünün sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tam dalga formu ham LiDAR nokta bulutunun dalga formu analizinin yapılması ve bu analiz sonucunda tam dalga formu öznitelik verilerinin üretilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen tam dalga formu öznitelikleri ve lazer sinyalinin çoklu dönüş seviyeleri birlikte kullanılarak, hiçbir geometrik bilgi kullanmadan bitki örtüsü sınıflandırma olanaklarının araştırılması bu tezin temel amacını oluşturmaktadır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasında hipotez şu şekilde kurulmuştur;

- Tam dalga formu LiDAR tarayıcı ile elde edilen ham nokta bulutunun dalga formu analizi literatürde bir standart haline gelen Gauss Ayrıştırması kullanılarak gerçekleştirilebilir.
- Gauss Ayrıştırması ile elde edilen dalga formu özniteliklerinin yeryüzü topoğrafyasında yer alan farklı objelerde (ağaç, bina, asfalt yol vb.) aldığı değerler izlenebilir.
- LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için yaygın olarak kullanılan geometrik özelliklere dayalı sınıflandırma yöntemleri yerine Gauss Ayrıştırması ile elde edilen dalga formu öznitelikleri kullanılarak sınıflandırılması gerçekleştirilebilir.

- Tam dalga formu LiDAR nokta bulutundan bitki örtüsü sınıfı elde edilebilir ve diğer objeler bitki örtüsü olmayan sınıfı altında toplanabilir.
- Sınıflandırılmış nokta bulutu kullanılarak SAM ve MÇYM üretilebilir. Tam dalga formu LiDAR nokta bulutundan elde edilen bu ürünler ormancılık uygulamalarında kullanılabilir.

BÖLÜM 2

LiDAR

LiDAR, yer yüzeyini yüksek hassasiyetli ve yoğun bir şekilde ölçerek konumsal veri üretilmesini sağlayan aktif bir uzaktan algılama tekniğidir [50].

Lazerin icadı 1960'lı yılların başlarında gerçekleşmiş olsada, çeşitli destekleyici teknolojilerin eksikliğinden dolayı harita üretimi amaçlı ticari LiDAR sistemlerinin yaygın bir şekilde kullanımı 1990'lı yılları bulmuştur [51].

Lazer tarama sistemleri;

- Yersel lazer tarama sistemleri,
- Uydudan lazer tarama sistemleri,
- Hava lazer tarama sistemleri

olmak üzere algılayıcı platformuna göre 3'e ayrılmaktadır.

Yersel lazer tarama sistemleri yoğunlukla tarihi eserlerin belgelenmesi amacıyla 3-boyutlu çalışmalarda kullanılmaktadır.

Havadan lazer tarama "Airborne Laser Scanning" (ALS) sistemleri LiDAR teknolojisi ile lazer tarayıcı ve yeryüzü arasındaki mesafeyi ölçerek 3-Boyutlu nokta bulutunu oluşturmaktadır [27].

Hava LiDAR sistemleri; yeryüzü topoğrafyasının çok hızlı ve ayrıntılı bir şekilde belirlenmesi, 3-Boyutlu şehir modellerinin oluşturulması, kentsel alanlarda değişimlerin izlenmesi, ormanlık alanların sınıflandırılması, ağaç yüksekliklerinin belirlenmesi, enerji nakil hatlarının modellenmesi, kıyı kenar çizgisinin belirlenmesi, yersel yöntemlerle

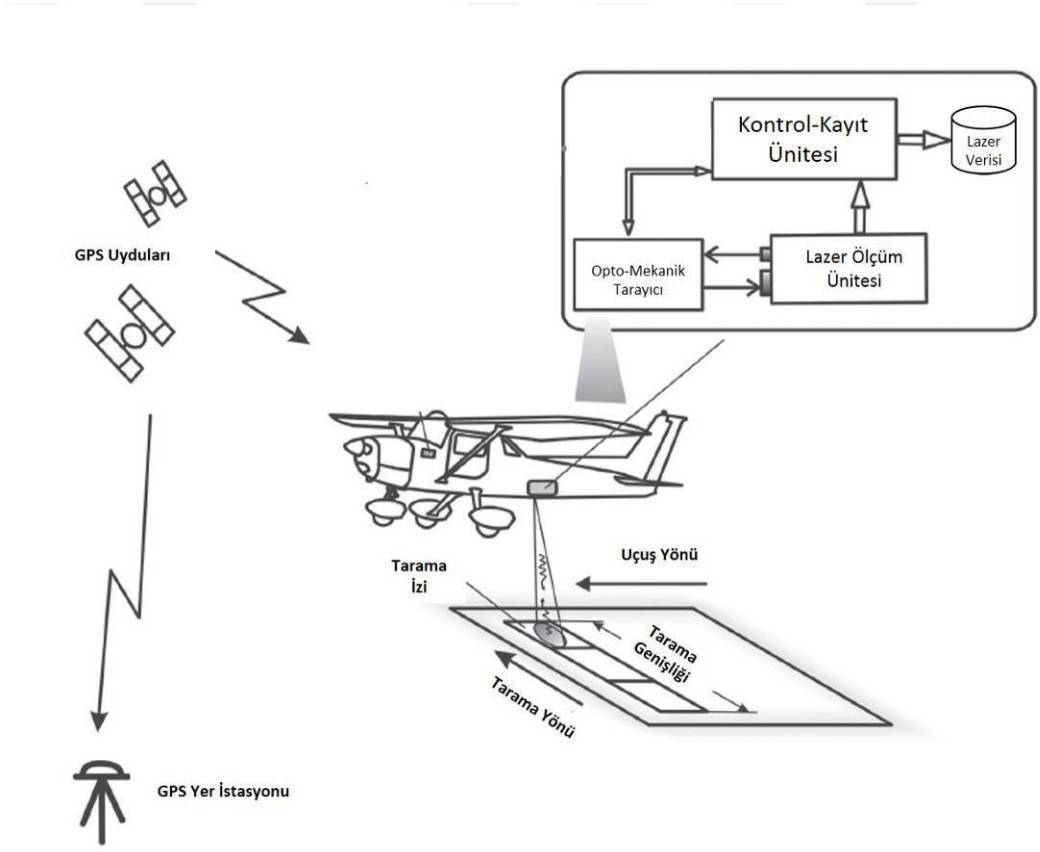
ölçülmesi zor alanların (örn; bataklık vb.) ölçülmesi, görünürlük analizleri vb. birçok çalışmada başarı ile kullanılmaktadır.

2.1 Lazer Tarama Sistem Bileşenleri

Lazer tarama sistemleri;

- Lazer ölçüm ünitesi “Laser Ranging Unit” (LRU),
- Opto-mekanik tarayıcı “Opto-Mechanical Scanning Device” (OMSD),
- Kontrol-Kayıt ünitesi

olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır ve Şekil 2.1’de verilmiştir [52].



Şekil 2. 1 Lazer tarama sistem bileşenleri [53]

Lazer ölçüm ünitesi (LRU); sensör ile yeryüzü objesi arasındaki eğik mesafeyi ölçen birimi ifade etmektedir. Bu ünite, lazer verici ve elektro-optik alıcı optikleri ile gerekli diğer elektronik bileşenleri içeren ölçüm kutusundan oluşmaktadır. Aynı konumda olan lazer verici ile elektro-optik alıcı optiklerinin açıklık çapı genellikle 8-15 cm olmakla birlikte lazer vericinin açıklığı alıcı açıklığından daha küçük olmaktadır [53]. Verici ve alıcı aynı

optik yolu paylaşacak şekilde monte edildiği için lazer tarayıcı tarafından lazer ışığı iletilen yeryüzü objesi daima alıcı optiklerinin görüş alanı “field of view” (FOV) içerisine girmektedir [52]. Lazer sinyalinin ıraksaması anlık görüş alanını “instanstaneous field of View” (IFOV) tanımlamaktadır. IFOV genellikle 0.3-2.5 mrad arasında bir değer almaktadır. Yeryüzeyine ait lazer verisinin elde edilebilmesi için uçuş esnasında lazer sinyalinin seyahat yolu boyunca alıcı optiğinin IFOV’unun hareket etmesi gerekmektedir. Bu, genellikle hareketli ayna kullanan opto-mekanik tarayıcı (OMSD) tarafından gerçekleştirilmektedir [53].

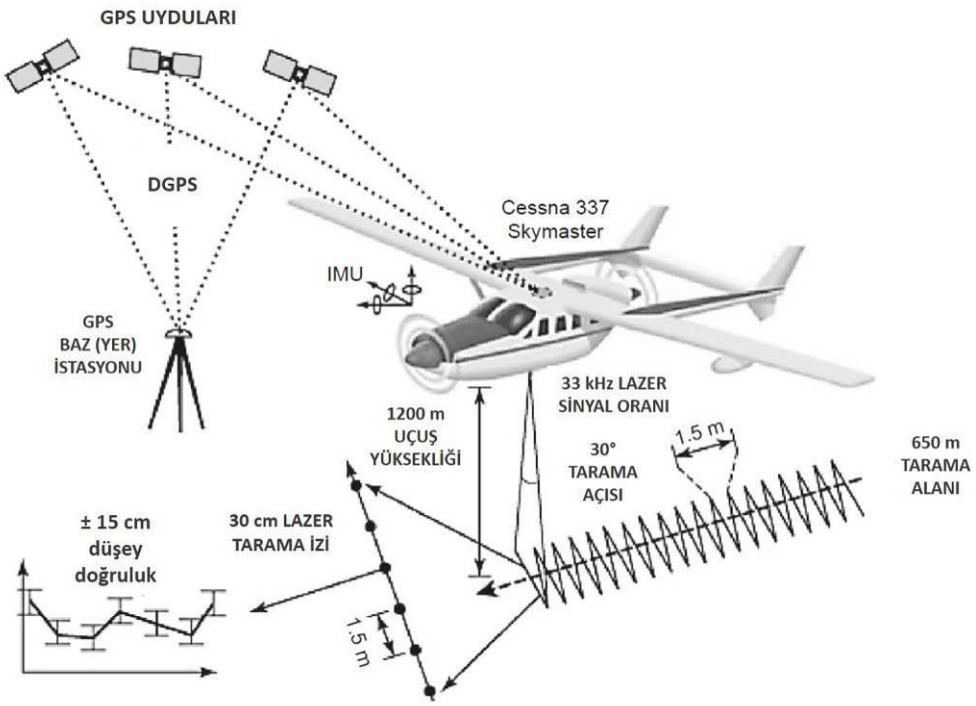
Kontrol-kayıt ünitesi; veri alımının gerçek zamanlı kontrolü için bilgisayar, işletim sistemi ve yazılımı ile GPS, IMU ve olası görüntü verileri için kayıt biriminden oluşmaktadır [54], [55], [56].

Lazer tarama sistemlerinin fiziksel özelliklerini karakterize etmek için kullanılan önemli teknik parametreler; lazerin dalga boyu (nm), sinyal süresi (ns), sinyal enerjisi (µJ), sinyal oranı (kHz), ışın genişliği (mrad), tarama açısı (°), uçuş yüksekliği (m) ve lazerin yeryüzündeki tarama izinden (m) oluşmaktadır [54].

Lazer tarayıcının dalga boyu elektromanyetik spektrumun görünür ışık, kızılötesi veya morötesi gibi çeşitli dalga boylarında yer almaktadır [57]. Görünür ışık dalga boyunda yayımlanan lazer sinyali insanın gözüne zarar verebileceğinden topoğrafik harita üretimi amaçlı lazer sistemlerinin çoğu başka bir dalga boyunda çalışmaktadır [58]. Batimetrik harita üretimi amaçlı lazerin dalga boyu 532 nm’dir. Topoğrafik harita üretimi amaçlı lazerin dalga boyu genellikle 1040-1060 nm aralığındadır (birkaç sistemde 900 nm veya 1550 nm dalga boyu mevcut). Kızılötesi dalga boyuna sahip lazer sistemleri bitki örtüsünü tespit etme amacıyla kullanılmaktadır [59]. Tek istisna, 810 nm dalga boyunu ve sürekli dalga “Continuous Wave” (CW) lazeri kullanan ScaLARS “Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor” sistemidir [54]. Bir lazer tarayıcıdan her bir saniyede gönderilen sinyal sayısı sinyal tekrarlama frekansı “Pulse Repetition Frequency” (PRF) olarak adlandırılmaktadır. Uçuş yüksekliği ve geri dönen ışının ıraksamasına (beam divergence) bağlı olarak lazer sinyalinin yeryüzü topoğrafyasında kapladığı alan genellikle 0.2-3 m çapına sahip ise küçük tarama izi ve 10-70 m çapına sahip ise büyük tarama izi LiDAR sistemleri olarak isimlendirilmektedir [27].

2.2 Hava LiDAR Sisteminin Çalışma Prensibi ve Ölçüm Yöntemleri

Hava LiDAR Sistemi, algılayıcı platformu helikopter veya uçak olan hava aracına yerleştirilen lazer tarama cihazı, İnersiyal Ölçme Sistemi "Inertial Measurement Unit" (IMU), Global Konumlama Sistemi "Global Positioning System" (GPS) ve çalışmanın amacına göre hava kamerasından oluşmaktadır [60], [61], [62], [63], [64]. Hava LiDAR sisteminin yeryüzünü tarama operasyonu Şekil 2.2' de görülmektedir.



Şekil 2. 2 Hava LiDAR sisteminin yeryüzünü tarama operasyonu [65]

Hava LiDAR ile 3-boyutlu nokta bulutunun elde edilebilmesi için, lazer tarayıcı uçuş doğrultusu yönünde yeryüzeyine genellikle elektromanyetik spektrumun yakın kızıl ötesi (near infrared) dalga boyunda lazer sinyali yaymaktadır [54]. Sensörden yayılan lazer sinyali ile obje yüzeyinden geri dönen sinyal arasındaki gidiş-dönüş süresinden lazer tarayıcı ile yeryüzü objesi arasındaki eğik mesafe (range) hesaplanmaktadır [27]. Ölçülen bu eğik mesafeler ve GPS-IMU sistemi ile kaydedilen konum ve dönüklük verileri yardımıyla objeye ait 3-Boyutlu nokta bulutu oluşturulmaktadır [27]. Bu nedenle LiDAR verisinin doğruluğu, GPS ve IMU verilerinin doğruluğuyla doğrudan ilişkilidir.

Uygulamaya bağlı olarak lazer tarama sistemleri farklı modülasyon, ölçüm veya algılama tekniklerine göre tasarlanabilmektedir [66], [67].

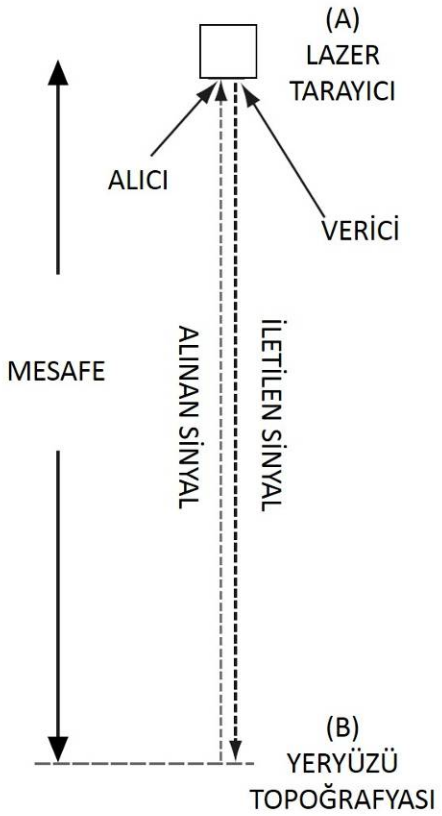
Topoğrafik uygulamalarda modülasyon teknikleri bakımından lazer ile eğik mesafe ölçümü için kullanılan ana ölçüm yöntemleri;

- Puls ile mesafe ölçümü “Pulsed Laser”,
- Faz farkı ile mesafe ölçümü

dür [36], [51], [52].

2.2.1 Puls ile Mesafe Ölçümü

Puls ile mesafe ölçümünde; lazer tarayıcıdan hedefe, hedeften lazer tarayıcıya olan lazer sinyalinin gidiş-dönüş “Time-of-flight” (TOF) süresinden eğik mesafe ölçülmektedir. Şekil 2.3 ’de A noktasındaki lazer tarayıcıdan B noktasındaki yeryüzü objesine gönderilen ve alınan lazer sinyalinin TOF ölçüm yöntemi gösterilmektedir [51].



Şekil 2. 3 Puls ile mesafe ölçümü prensibi ([51]’den uyarlanmıştır)

Lazer tarayıcı ile yeryüzü objesi arasındaki eğik mesafe (R), eşitlik (2.1)’ deki gibi hesaplanmaktadır. Elektromanyetik ışınımın hızı V (pratikte bilinen ışık hızı), gidiş-dönüş

süresi t olarak ifade edilmektedir. Mesafe çözünürlüğü (ΔR) ise eşitlik (2.2)' deki gibi hız çözünürlüğü (ΔV) ve zaman çözünürlüğü (Δt) kullanılarak hesaplanmaktadır [51].

$$R = \frac{V}{2}.t \tag{2.1}$$

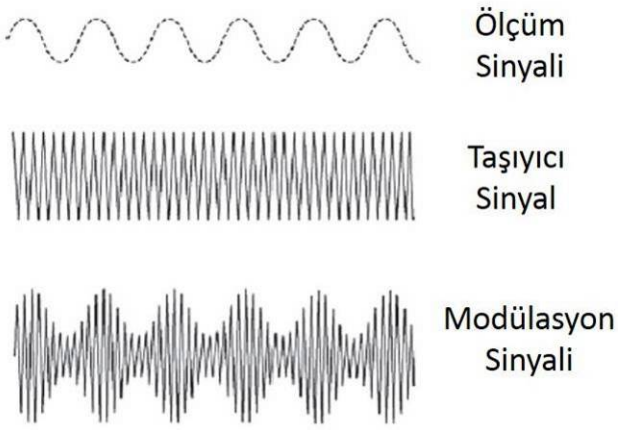
$$\Delta R = \frac{\Delta V.t}{2} + \frac{V.\Delta t}{2} \tag{2.2}$$

TOF ile mesafe ölçümü yöntemini kullanan LiDAR sistemleri ayrık dönüşlü "Discrete Return LiDAR" (DR) ve tam dalga formu kaydeden "Full-Waveform" (FWF) LiDAR olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır [68].

2.2.2 Faz Farkı ile Mesafe Ölçümü

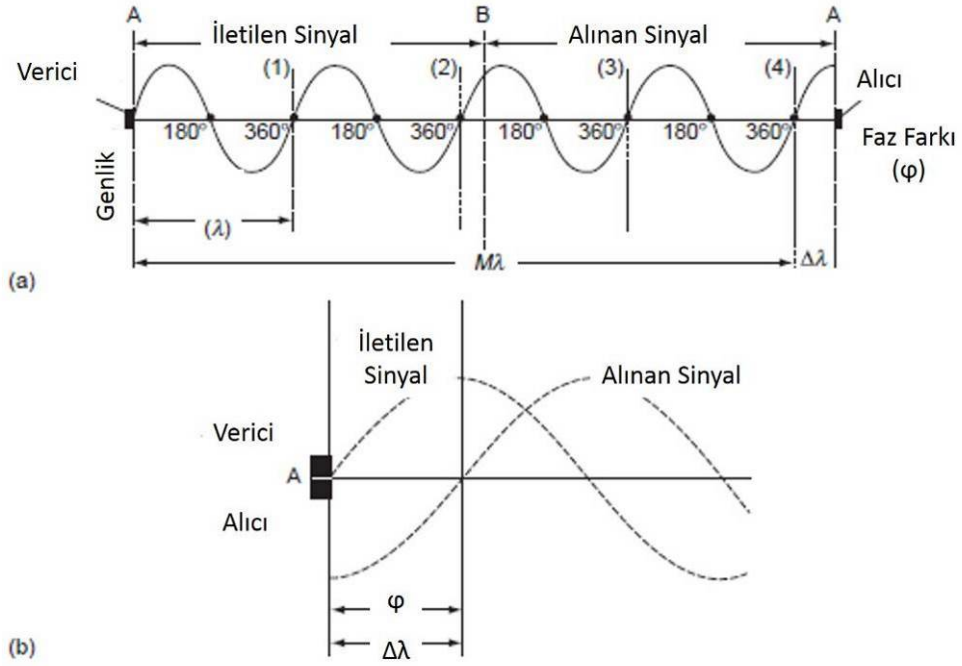
Faz farkı ile mesafe belirleme yönteminde lazer tarayıcı sürekli lazer ışını yaymaktadır. Bu lazerler sürekli dalga lazerleri "Continuous Wave" (CW) olarak adlandırılmaktadır [51], [52]. CW sistemlerinde iletilen ve alınan sinyaller arasındaki faz farkından yararlanılarak mesafe ölçülmektedir [27].

Faz farkı ile mesafe ölçme methodu kullanan lazer tarayıcılarda iletilen sinyal, ölçüm sinyali formundaki modülasyon sinyali taşıyıcı sinyale eklenmektedir. Bu modülasyon sinyali, sabit frekanslı bir osilatör kullanılarak sabit bir değerden türetilmektedir. Bu nedenle, ölçüm sinyali taşıyıcı sinyalin genliğini değiştirmek için kullanılmaktadır. Bu süreç genlik modülasyonu olarak bilinmekte ve Şekil 2.4' de gösterilmektedir [51].



Şekil 2. 4 Taşıyıcı dalganın genliğini değiştirmek için kullanılan ölçüm dalgası ile genlik modülasyonu [51]

Lazer ışınımının genliği (amplitude), modülasyon sinyalinin periyodu T_m ve modülasyon sinyalinin dalga boyu λ_m olan bir sinüzoidal sinyal ile modüle edilmektedir. Şekil 2.5' deki gibi A noktasından iletilen sinyal ile B noktasında bulunan objeden yansıyarak A noktasına dönen sinyal arasındaki faz farkının (φ) ölçümü ile eğik mesafe (R) elde edilmektedir [51].



Şekil 2. 5 İletilen ve alınan sinyaller arasında faz karşılaştırması (a), A noktasında bulunan iki sinyal arasındaki faz karşılaştırması (b) [51]

Bir tam formdaki dalga boyunun yarısını ifade etmekte olan dalga boyunun kesiri (Δλ) eşitlik (2.3) kullanılarak hesaplanmaktadır [51].

$$\Delta\lambda = \frac{\varphi}{2\pi}\,\lambda \tag{2.3}$$

M, tam formdaki toplam dalga boyunu ifade etmek üzere eğik mesafenin (R) hesabı eşitlik (2.4)'te verilmektedir.

$$R = \frac{M\lambda+\Delta\lambda}{2} \tag{2.4}$$

Petrie ve Toth'a göre [51] de yayılan lazer ışın demetinin taşıyıcı sinyalinin bilinen dalga boyu (λ) oldukça kısa olduğundan (genellikle 1 µm civarındadır) topoğrafik harita üretimi

amaçlı uygulamalarda böyle bir ölçüm doğruluğuna gerek duyulmamaktadır. Faz farkı ile mesafe ölçme yöntemi kullanan sistemlerde lazer sinyalinin gücü sınırlı olduğu için ölçülmesi gereken mesafelerin kısa (genellikle 100 metrelik kısa mesafelerde) olması gerekmektedir. Sürekli dalga lazere kıyasla, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan puls lazer sistemlerinin UZAL uygulamaları için yersel veya hava lazer tarayıcılarda kullanılması avantajlıdır [69]. Puls ile mesafe belirleme yöntemi kullanan lazer tarayıcılarla karşılaştırıldığında piyasada çok az sayıda faz farkı ile mesafe ölçme yöntemi kullanan lazer tarama sistemleri bulunmaktadır [51].

2.3 LiDAR Sensörünün Farklı Formları

Ticari olarak piyasaya sürülen LiDAR sensörleri;

- Doğrusal Mod LiDAR sistemleri
- Ayrık dönüşlü LiDAR sistemleri
- Tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemleri
- Multi-Spektral LiDAR sistemleri
- Geiger-modu LiDAR sistemleri
- Tek Foton LiDAR sistemleri
- Mikro Sinyal LiDAR sistemleri

şeklinde sınıflandırılmaktadır.

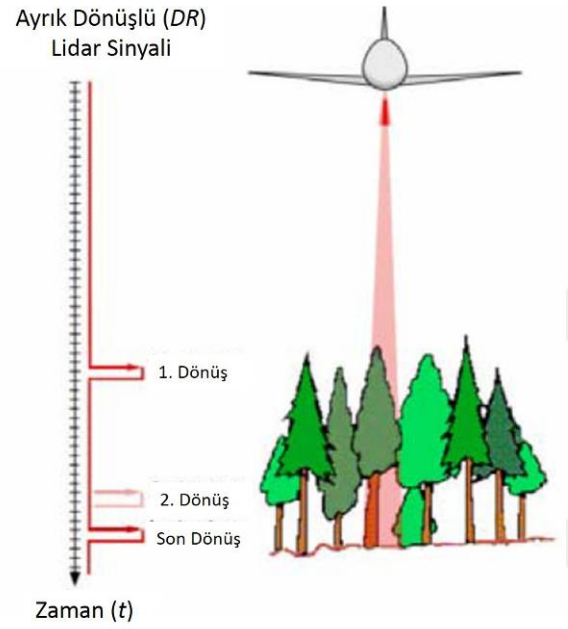
2.3.1 Doğrusal Mod LiDAR

Ticari olarak piyasaya sürülen ilk havadan lazer tarayıcılar, hedefe gönderilen lazer sinyali başına yalnızca bir adet geri dönüş (backscattered echo) sağlamaktaydı [27]. Bu sistemler Tek Mod “Single Mode” veya Doğrusal Mod LiDAR “Linear Mode LiDAR” (LML) olarak adlandırılmaktadır [70].

2.3.2 Ayrık Dönüşlü LiDAR

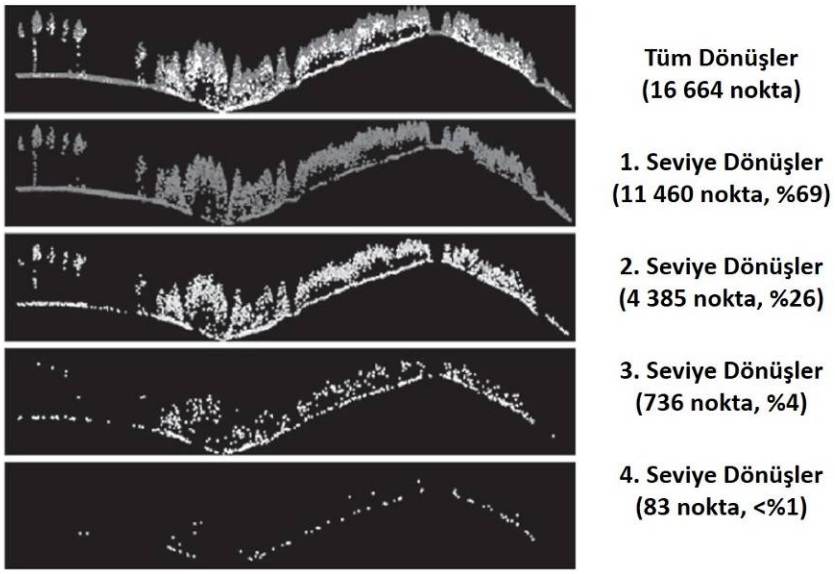
Tek bir dönüş (echo) kaydı, lazer sinyalinin kırınım konisi içerisinde yalnızca bir hedef varsa yeterli olmaktadır. Bu nedenle çoklu dönüş veya çoklu lazer tarama sistemleri,

birden fazla dönüşü kaydetmek üzere tasarlanmıştır. Bu özelliği sebebiyle, iletilen tek bir lazer sinyali Şekil 2.6' da görüldüğü üzere çoklu geri dönüş yapabilmektedir [27]. Bu sistemler ayrık dönüşlü LiDAR olarak adlandırılmakadır. Ayrık dönüşlü LiDAR sistemlerinin çalışma prensibi LML'e benzemektedir. Bu sensörler, LML'de mümkün olandan daha yüksek sinyal hızlarına izin vermektedir [29].



Şekil 2. 6 Ayrık dönüşlü LiDAR sistemlerinde kaydedilen dönüş seviyeleri [71]

Algılayıcı platformundan yeryüzüne gönderilen lazer sinyalleri, yeryüzü objelerinin farklı katmanlarına çarpıp geri dönmektedir. Hedeften geri saçılan dönüşün özelliği; hedefin büyüklüğüne, tarayıcı ile hedef arasındaki eğik mesafeye, hedefin pürüzlülüğüne ve iletilen sinyalin saçılma yönüne bağlı olarak farklılık göstermektedir [50]. Çoklu dönüş kaydedebilen ticari LiDAR sistemleri ile elde edilen 3-Boyutlu nokta bulutunda dönüşler; seviyesine göre tekli dönüş (single return), ilk dönüş (first return), orta dönüş (intermediate) ve son dönüş (last return) olarak tanımlanmaktadır [56]. Şekil 2.7' de bir ormanda dört dönüş saptanan LiDAR verisinin bir kesitine ait dönüş seviyeleri ve her bir dönüş seviyesinde yer alan nokta sayıları görülmektedir [72].



Şekil 2. 7 Çoklu dönüş seviyelerine göre LiDAR nokta bulutu örneği [72]

2.3.3 Tam Dalga Formu Kaydeden Sistemler

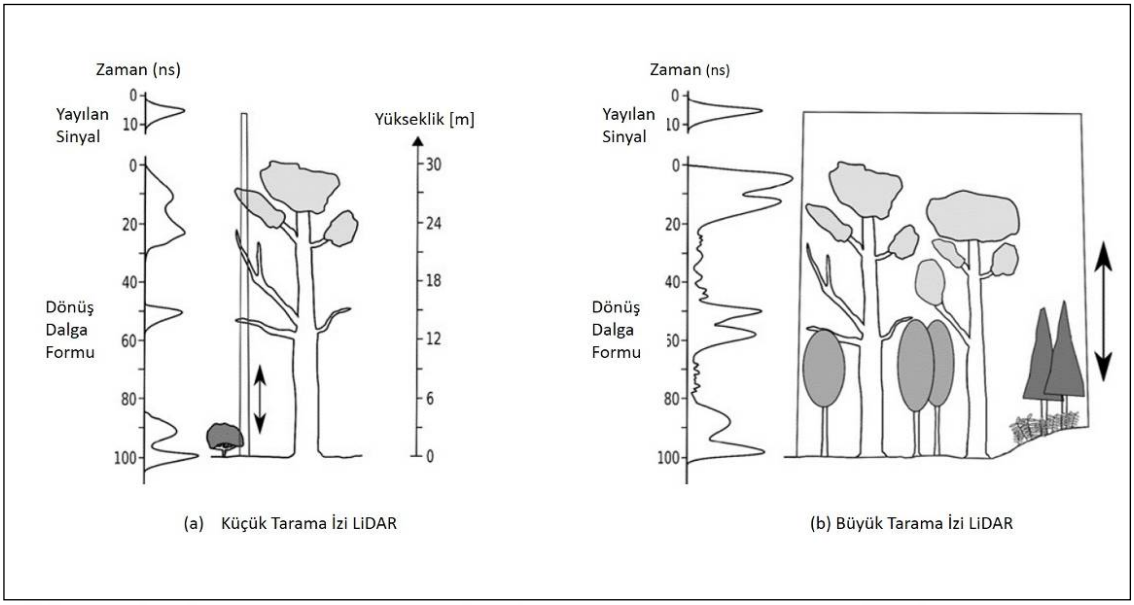
Yeryüzü objesinin yüzeyinden geri dönen her bir dönüş sinyalinin tam dalga formunun sayısal ortama aktarılmasına izin veren sistemler tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler, sensörden yeryüzüne doğru yayılan her bir sinyalin enerji profilini zamanın bir fonksiyonu olarak kaydetmektedir [73].

İlk tam dalga formu kaydeden sistemler 1980'lerde batimetrik harita üretimi amaçlı tasarlanmıştır [37], [74]. Bu sistemlerde lazer sinyali elektromanyetik spektrumun görünür bölge yeşil ışık (532 nm) ve kızılötesi ışık (1064 nm) dalga boylarında birlikte kullanılmaktadır [27]. Bu sistemlerde yeşil dalga boyuna ait lazer sinyali deniz yüzeyinden geri dönerken kızılötesi dalga boyuna sahip sinyal deniz tabanından geri dönmektedir. Doğru deniz derinliğinin tespit edilebilmesi için tasarlanan bu sistemlerde lazer sinyali, suyun netlik-bulanıklığına göre suya nüfuz etmektedir [37]. Wozencraft ve Millar'a göre [75] de tespit edilebilir derinlik en fazla 60 m'dir.

İlk ticari tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemi 2004'te piyasaya sunulmuştur [76]. Sektörün önde gelen üretici firmaları olan Riegl (Avusturya), Toposys (Almanya), TopEye (İsveç), Optech (Kanada) ve Leica (İsviçre/Almanya) tam dalga formu kaydeden lazer tarama sistemleri üretmektedir.

Geleneksel LiDAR sistemleri geri dönen lazer sinyallerinin sayısını sınırlayarak kaydederken, tam dalga formu lazer tarayıcılar bu dezavantajın üstesinden gelmektedir, çünkü tüm lazer sinyallerini zamanın bir fonksiyonu olarak kaydetmektedir. Bu nedenle bitki örtüsünün geometrik ve fiziksel özellikleri hakkında daha ayrıntılı bilgi elde edinilebilmektedir [33], [77].

Tam dalga formu kaydeden sistemlerde kaydedilen dalga formu; tarama izine, hedefteki objenin geometrisine ve objenin yansıtıcılığına bağlı olarak farklılık göstermektedir [73]. Şekil 2.8' de ormanlık bir alanda küçük tarama izi ve büyük tarama izi LiDAR sistemlerinin yayılan sinyalleri ve kaydedilen dalga formu karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.8 (a)'da ağacın farklı katmanlarına nüfuz ederek yeryüzü topoğrafyasına ulaşabilen küçük tarama izi lazer sinyalinin bir örneği verilmektedir. Küçük tarama izi LiDAR sistemlerinde Şekil 2.8 (a)' da görüldüğü üzere lazer sinyalinin kırınım konisi içerisinde yer alan tüm hedeflerden geri dönen sinyallerin dalga formu oldukça belirgindir. Bunun yanında, yoğun bitki örtüsüne sahip ormanlık alanlarda küçük tarama izi lazer sinyalleri her zaman zemine ulaşamayabilir [27]. Şekil 2.8 (b)'de görüldüğü üzere büyük tarama izine sahip LiDAR sistemlerinde sinyalin hem yeryüzü topoğrafyasından hem de ağaç tepelerinden dönme olasılığının daha fazla olduğu görülmektedir. Bitki örtüsünden geri dönen lazer sinyaline ait her bir dönüş farklı konumlara ve farklı özelliklere sahip birkaç hedefin birleşiminden oluşmaktadır. Bu nedenle geri dönen sinyallerin dönüş dalga formu oldukça karmaşıktır [78]. Bu nedenle, çoğu ticari LiDAR sistemi yüksek PRF ile küçük tarama izi lazer tarayıcı tasarlamaktadır [27].

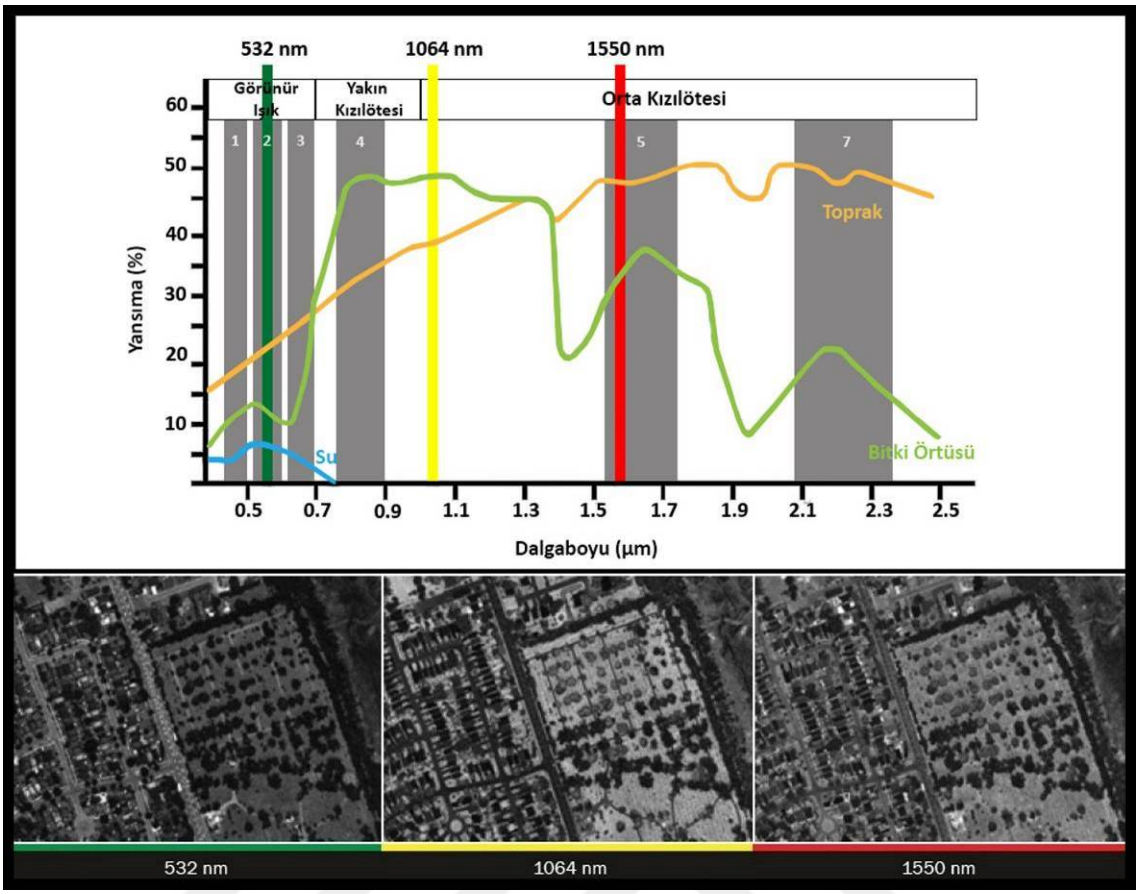


Şekil 2. 8 Küçük tarama izine sahip LiDAR ile bitki örtüsü örneği (a), büyük tarama izine sahip LiDAR ile bitki örtüsü örneği (b) [27], [77]

2.3.4 Multi-Spektral LiDAR

Hava LiDAR'ın batimetrik uygulamalarında belirli bir derinliğe nüfuz edebilmek ve su yüzeyini tespit edebilmek amacıyla 1064 nm kızılötesi ve 532 nm yeşil dalga boylarında çalışan lazer sensörü kullanılmaktadır. Farklı dalga boylarının birlikte kullanıldığı bu sistemler multi-spektral LiDAR "Multi-Spectral LiDAR" (MSL) olarak adlandırılmaktadır [70].

Teledyne Optech Inc. 24 Kasım 2014 tarihinde Dünya'daki ilk ticari multi-spektral hava kaynaklı LiDAR olan TiTAN'ı piyasaya sürmüştür [70]. TiTAN, her biri 300 kHz PRF'ye sahip 532 nm, 1064 nm ve 1550 nm olmak üzere (Şekil 2.9) üç farklı dalga boyunda birbirlerinden bağımsız lazer sinyali yaymakta ve dönüş sinyallerinin tam dalga formunu kaydetmektedir [79]. Bu sistem yüksek nokta yoğunluğunda topoğrafik ölçüm, kesintisiz bir şekilde sığ su batimetresi ve bitki örtüsünün sınıflandırılması uygulamalarında kullanılmaktadır [80]. Leica AHAB HawkEye LiDAR-III MSL sistemi, 2 farklı dalga boyunda 3 kanal ile çalışmaktadır [80]. Bunlar; 2 adet batimetrik kanal (532 nm dalga boyunda 10kHz ve 35kHz) ve bir adet topoğrafik kanal (1064 nm dalga boyunda 500kHz)'dır [81].



Şekil 2. 9 TiTAN MSL'ın çalıştığı üç farklı dalga boyu ve bu dalga boylarında elde edilen yoğunluk (intensity) görüntüleri [79]

2.3.5 Geiger Modu LiDAR

Geiger-modu LiDAR "Geiger-mode LiDAR" (GML), geri dönüş sinyalini LML sistemlerde olduğu gibi tek bir alıcı yerine bir alıcı dizisi kullanılarak kaydetmektedir. Bu sistemlerde iletilen lazer sinyalinin enerjisi düşüktür. Düşük enerjiye sahip GML sinyalleri birbirinden farklı fotonlara duyarlı alıcılar tarafından tespit edilmektedir [29].

GML'in kullanımı yüksek irtifalarda metrekare başına 100 noktaya kadar nokta yoğunluğuna sahip veri toplamaya olanak sağlamaktadır [82]. Bu teknolojinin altyapı ve afet yönetiminin izlenmesi vb. uygulamalarda kullanılmasının yararları olmasına rağmen savunma amaçlı harita üretimiyle sınırlı kalmıştır [29].

Harris Corporation tarafından IntelliEarth™ sistemi ile 2015'te ilk ticari GML piyasaya sürülmüştür [29], [70].

2.3.6 Tek Foton LiDAR

Tek foton LiDAR "Single Photon LiDAR" (SPL) sistemler çalışma prensibi bakımından GML'e benzemektedir. Piyasada bulunan ilk LML sistemlerin faaliyete geçmesinden kısa bir süre sonra SPL sistemler geliştirilmeye başlanmıştır [29], [70]. GML ile her bir ölçüm için yüzlerce veya binlerce foton tespit edilirken, SPL'de ölçüm başına tespit edilen foton sayısı 1'dir. Bu nedenle SPL, hızlı ve yüksek çözünürlüklü 3-Boyutlu harita üretimi için en verimli yaklaşım olarak tanımlanmaktadır [83]. Günümüzde piyasada bulunan tek SPL, Sigma Space Corporation tarafından geliştirilen High-Resolution Quantum LiDAR System (HRQLS)'dir [29].

NASA'nın Instrument Incubator Program (IIP)'ı tarafından 2001'de yapılan çalışma başarılı olan ilk SPL uygulamasıdır. Bu çalışma 532 nm dalga boyunda ve yeryüzeyinden 6700 m yükseklikte, Virjinya sahillerindeki Assawoman Körfezi ve Atlantik Okyanusu üzerinde birkaç metre derinliğe kadar sığ su batimetresi ve karasal alanın görüntülenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir [29].

LML sistemlerde olduğu gibi GML ve SPL sistemler de hava aracının altına yerleştirilmektedir. Sensör, hava aracının hareketi boyunca yeryüzünü dairesel bir şekilde taramaktadır. Dairesel tarama yöntemi ile yüksek binaların etrafında tam kapsama sağlayarak gölge etkisi en aza inmektedir. GML ve SPL sensörlerin en büyük avantajı, LML sistemlerde mümkün olmayan yüksekliklerde (2000 m ile 10000 m arası) yüksek yoğunluklu nokta bulutu üretmesidir [70].

GML ve SPL sistemlerde sinyalin enerjisi düşüktür. Düşük sinyal enerjisi alıcıya dönen foton sayısının az olmasına sebep olmaktadır. LML teknolojisi ise geri dönen sinyali kaydetmek için bir foton akışı (500 ile 1000 foton) kullanmaktadır. Bu tür büyük enerji akışları sinyalin tam dalga formunu kaydetmeyi ve belirli bir radyometrik çözünürlüğe sahip yoğunluk görüntüsü oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Bahsi geçen enerji büyüklüğü GML ve SPL teknolojileri için ihtiyaç duyulandan çok daha fazladır. Bu nedenle sinyal enerjisi düşük olan GML ve SPL sistemler tam dalga formu kaydetme kapasitesine sahip değildir [29].

2.3.7 Mikro Sinyal LiDAR

Bulutların ve aerosollerin atmosferdeki profillerinin ve optik özelliklerinin sürekli izlenebilmesi hava kalitesi tahminleri için oldukça önemlidir. Mikro Sinyal LiDAR "Micro Pulse LiDAR" (MPL), herhangi bir yol boyunca gerçek zamanlı olarak bulut ve aerosollerin ölçümünü sağlayan lazer tarama sistemleridir [83].

RADAR ile aynı çalışma prensibine dayanan MPL sistemlerinde sensörden iletilen sinyaller atmosferdeki parçacıklardan geri saçılım yapmaktadır. MPL, foton-sayıcı dedektörler kullanılarak bu saçılan sinyallerin yoğunluğunu ölçmektedir. Bu yoğunluk bilgisi ile dönüş sinyalini gerçek zamanlı olarak atmosferik bilgiye dönüştürmektedir [83]. Meteorolojik çalışmalar, atmosferik ve çevresel araştırmalar, hava trafiğinin kontrolü ve takibi için MPL teknolojisinden yararlanılmaktadır. Bu amaçla Sigma Space 2014'te MPL sistemini tasarlamıştır.

BÖLÜM 3

TAM DALGA FORMU ANALİZİ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, bazı ticari ALS sistemleri obje yüzeyinden geri dönen sinyalin çoklu dönüş seviyelerini kaydetmenin yanında dönüş sinyalinin enerjisini sayısallaştırmakta ve kaydetmektedir. Bu işlem tam dalga formu analizi "full-waveform analysis" olarak adlandırılmaktadır [58]. Dalga formu analizi, sinyal algılama güvenirliğini, doğruluğunu ve sinyal çözünürlüğünü artıran gelişmiş veri işleme yöntemleri sunmaktadır.

Tam dalga formu LiDAR'ın kullanımı ile;

- Zayıf dönüşler sinyallerini bile kaydedilebilmekte olduğundan dolayı dönüş sinyali sayısı artmaktadır [84]. Dönüş sayısının artmasıyla doğru orantılı olarak 3-boyutlu nokta bulutundaki nokta sayıları da artmaktadır. Nokta sayısının artması, ormancılık uygulamaları ve kentsel alanlarda bina kenarlarının elde edilebilmesi için oldukça avantajlıdır [85].
- Genlik, genişlik ve geri saçılımın enine kesiti gibi dalga formuna ait öznitelikler çıkarılmakta ve bu öznitelikler sınıflandırma çalışmalarında kullanılmaktadır.
- Fiziksel ölçüm işleminin yorumlanmasında son kullanıcıya daha fazla denetim sağlamaktadır [27].

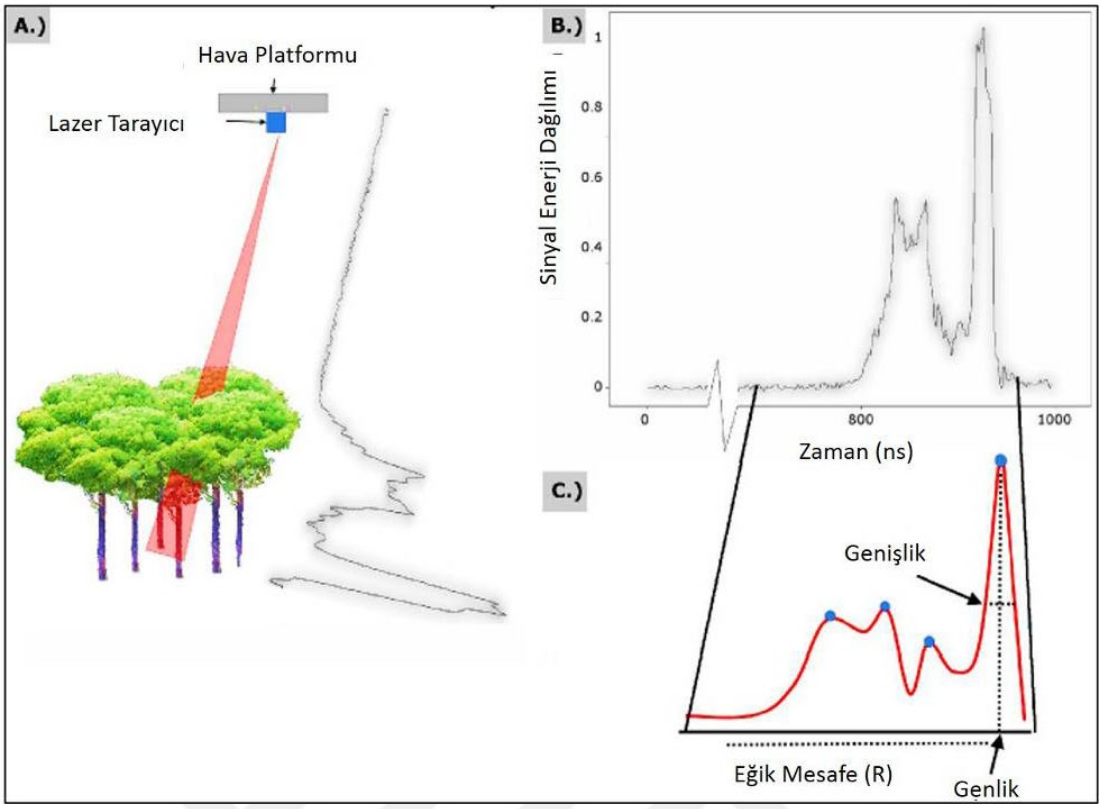
Bu sistemlerin en büyük dezavantajı ise verilerin bilgisayar ortamında depolanması için oldukça fazla bellek gereksinimi ve verilerin işlenebilmesi için yüksek performanslı işlemci (CPU) gerekmesidir [86].

Kaydedilen dalga formu, yayılan lazer sinyalinin dalga formuna, ışının mekansal enerji dağılımına (atmosfer etkisi), lazer sinyalinin kırınım konisi içerisinde yer alan yeryüzü objesinin geometrisine ve objenin yansıtıcılığına (reflectivity) bağlı olarak değişiklik göstermektedir [58], [87].

3.1 Tam Dalga Formu Öznitelikleri

Lazer sinyalinin zamansal ve mekansal özelliklerini tanımlayabilmek için, algılayıcı platformundan iletilen ve yeryüzü topoğrafyasından geri dönen lazer sinyallerinin (toplam N adet geri dönüş) her bir i dönüşünün konumu X_i, Y_i, Z_i olmak üzere geri dönüş sinyaline ait öznitelikleri belirleyebilmek için uygun modellerin sunulması gerekmektedir [36], [88], [89]. Geri dönüş sinyalinin kaydedilen dalga formuna göre özniteliklerini çıkarabilmek için tam dalga formu analizi kullanılmaktadır [58].

Modelleme: Lazerin konumsal enerji dağılımı, ışın profili "beam profile" olarak da bilinmektedir. Işın profili, silindirik dağılım veya 2-Boyutlu simetrik Gauss Dağılımı ile modellenmektedir [58], [67]. Şekil 3.1' de TOF sisteme ait 1 ns örnekleme aralığında bir dalga formunun öznitelikleriyle birlikte ışın profilinin Gauss Dağılımı ile modellenen dalga formu gösterilmektedir [90].



Şekil 3. 1 Bitki örtüsü üzerinde dönüş sinyalinin ham tam dalga formu (a), zamanın bir fonksiyonu olarak sayısallaştırılan dalga formu (b), her bir tepenin mesafe, genlik ve genişliğe göre dalga formu modeli (c) [90]

3.1.1 Eğik Mesafe

Lazer tarama cihazından yeryüzü objesine olan mesafe “range”, dalga formunun tepe “peak” noktasının konumu ile belirlenmektedir. Tepe noktasının konumu genellikle yeryüzü objesinin konumu olarak kabul edilmektedir [91]. Tepe noktası tespiti için en yaygın kullanılan yöntem Levenberg-Marquardt algoritmasına göre genelleştirilmiş Gauss fonksiyonu olan “Gauss Ayrıştırması” dır [90]. Chauve vd. [92] de dalga formuna ait tepe noktalarını tespit etmek için çeşitli Gauss fonksiyonlarını test etmiştir. Geleneksel Gauss fonksiyonunu log-normal Gauss ve genelleştirilmiş Gauss fonksiyonları ile karşılaştırmıştır. Belirli koşulları iyileştirmek için yöntemler bulmuştur [90]. Geleneksel Gauss fonksiyonunun her türlü arazi türünde iyi sonuçlar vermesinin yanı sıra genelleştirilmiş Gauss fonksiyonu yerine log-normal Gauss fonksiyonlarını kullanarak bazı durumlarda tepe noktası algılamanın iyileştirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir [92].

3.1.2 Genlik

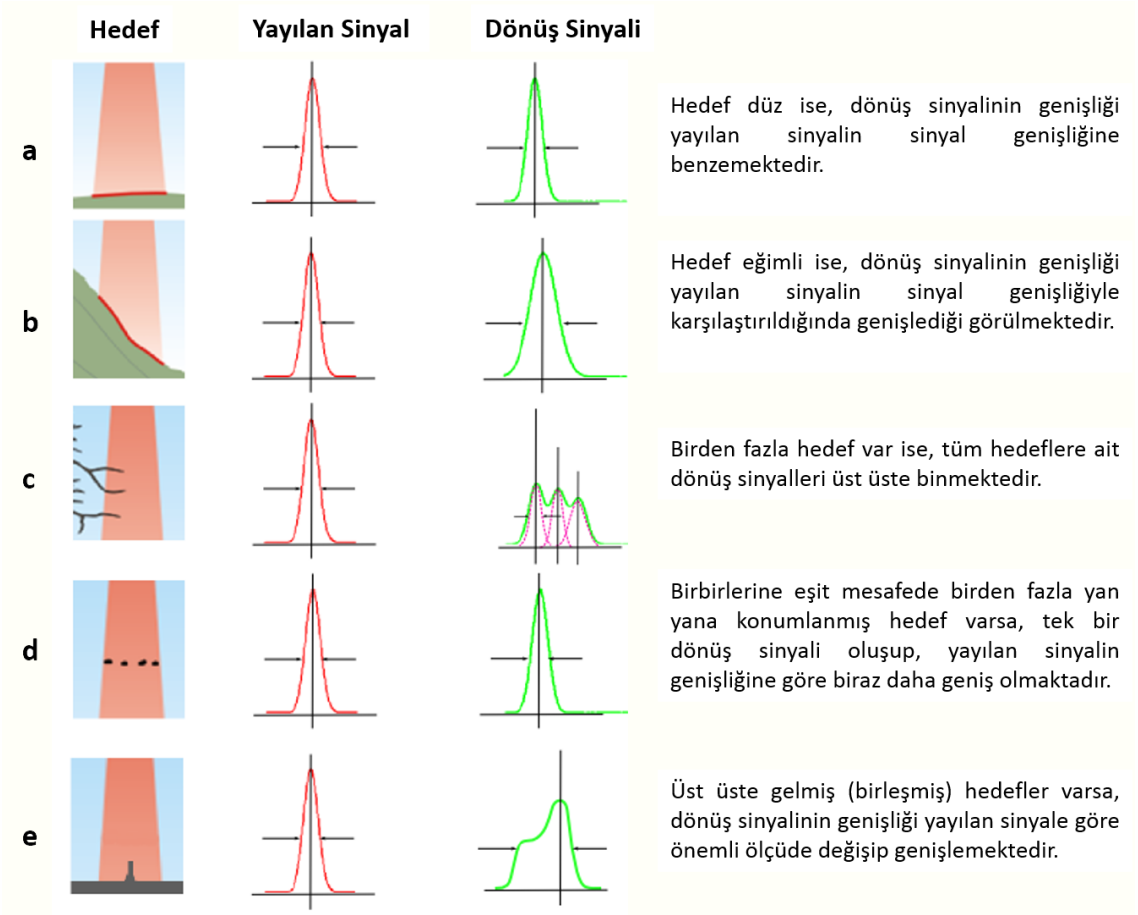
Genlik “echo amplitude” değeri genellikle yoğunluk “intesity” olarak kabul edilmektedir [91]. Lazer tarayıcıya ulaşan her bir dönüş sinyalinin genliği, yayılan lazer sinyalinin gücü ve alıcının diyafram çapı gibi lazer tarama sistemine ait özelliklere bağlıdır. Bunun yanında hedefin yansıtıcılığı ve mesafe de genliği etkilemektedir [93].

3.1.3 Genişlik

Obje yüzeyinden geri dönen sinyalin dönüş genişliği “pulse with ya da echo width”, bilinen en yüksek genliğin “maximum amplitude” yarısı olarak tanımlanmaktadır [58], [86]. Genişlik kavramı literatürde “full width at half maximum” (FWHM) olarak da adlandırılmaktadır. FWHM’un birimi nanosaniye (ns) dir [93].

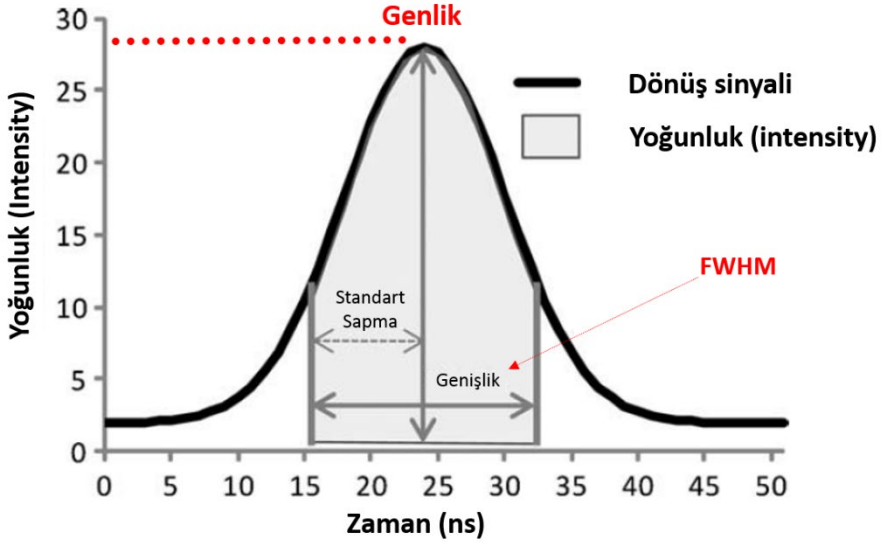
Genişlik, arazinin eğimi ve hedefin geometrisiyle doğrudan ilişkilidir [91]. Lazer sinyalinin kırınım konisi içerisindeki hedefin veya hedeflerin geometrisinin, dönüş genişliği üzerine etkisi Şekil 3.2’de gösterilmektedir [93]. Şekil 3.2(a) ve Şekil 3.2(b) karşılaştırıldığında sinyal genişliğinin eğimle birlikte arttığı görülmektedir [77]. Yayılan lazer sinyalinin penetrasyonu[1] ve sinyal zayıflaması sebebiyle Şekil 3.2(c)’de lazerin kırınım konisi içerisinde yer alan ağaç dallarından geri dönen lazer sinyalinin dönüş genişliği diğerlerinden daha farklı bir form almaktadır [77]. Şekil 3.2(d)’de birbirlerine yaklaşık olarak eşit mesafede bulunan birden fazla hedefin dönüş sinyalleri tek bir dönüş sinyalinde üst üste gelmekte ve yayılan sinyalin genişliğine göre biraz daha geniş bir form almaktadır. Lazer sinyalinin ulaştığı hedef Şekil 3.2(e)’deki gibi üst üste gelmiş birden fazla objeden oluşuyorsa geri dönen sinyalin dönüş genişliği ile yayılan sinyalin genişliği karşılaştırıldığında birbirlerinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir.

[1] Penetrasyon, radyoaktif ışınların maddeleri delip geçmesi, nüfuz etmesi anlamına gelmektedir (TDK).



Şekil 3. 2 Lazer sinyalinin kırınım konisi içerisinde yer alan hedef veya hedeflerin geometrisinin dönüş genişliği üzerine etkisi [93]

Eğik mesafe, Şekil 3.3' deki histogramda görüldüğü üzere tepe noktasının yatay eksendeki konumunu ifade etmektedir. Genlik değeri ise tepe noktasının düşey eksendeki karşılığından eşik değerin çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır [38]. Standart sapmanın iki katının genişlik değerine eşit olduğu düşünüldüğünde, yoğunluk "intensity" değerinin, genlik ve genişlikten bağımsız bir parametre olduğu (Şekil 3.3) söylenebilmektedir [44].



Şekil 3. 3 Dönüş sinyaline ait tam dalga formu özniteliklerinin ve anlamlarının Gauss Modeli üzerinde gösterimi [44]

3.1.4 Geri Saçılımın Enine Kesiti

Geri saçılmanın enine kesiti "backscattering cross-section", yeryüzü objelerinden algılayıcıya doğru geri dönen ve yeniden iletilen elektromanyetik enerjinin bir ölçüsüdür. Geri saçılmanın enine kesiti literatürde "σ" sembolü ile ifade edilir ve birimi m^2 dir [38]. Saçılmanın yönü ve gücü dikkate alınarak, lazer ışını ile yeryüzü objesinin çarpıştığı etki alanını ifade etmektedir [38].

Geri saçılımın enine kesiti, Uzaktan Algılama'da RADAR ve LiDAR teknolojilerinde Maxwell denklemi çözülerek ve lazer ölçümleri kalibre edilerek analitik olarak belirlenebilen temel bir parametredir [57], [94].

3.2 Tam Dalga Formu Veri İşleme Yaklaşımları

Yeryüzü objesinin özelliklerini geri dönüş sinyaline ait dalga formundan çıkarabilme işlemi;

- Tepe Algılama (Peak Detection),
- Ana Kenar Algılama (Leading Edge Detection),
- Sabit Kesir Algılama (Constant Fraction Detection),
- Yerçekimi Merkezi Algılama (Center of Gravity Detection),

- Gauss Ayrıştırması (Gaussian Decomposition)
- Ters Evrişim (Deconvolution)

olmak üzere farklı yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir [36], [58], [95].

Gauss Ayrıştırma yaklaşımı, hedefe ait fiziksel parametreleri belirleyen dönüşlerin dalga formu özniteliklerinin ayrıntılı bir şekilde türetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknik tam dalga formu veri işlemede bir standart haline gelmiştir. Gauss Ayrıştırma yaklaşımı bitki örtüsü ve ormancılık çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [25], [38], [42], [92], [96]. Bu tez çalışmasında, ham nokta bulutunun tam dalga formu analizi için Gauss Ayrıştırması yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yaklaşıma ilişkin detaylı açıklamalar '3.3 Gauss Ayrıştırması' başlığı altında açıklanmıştır.

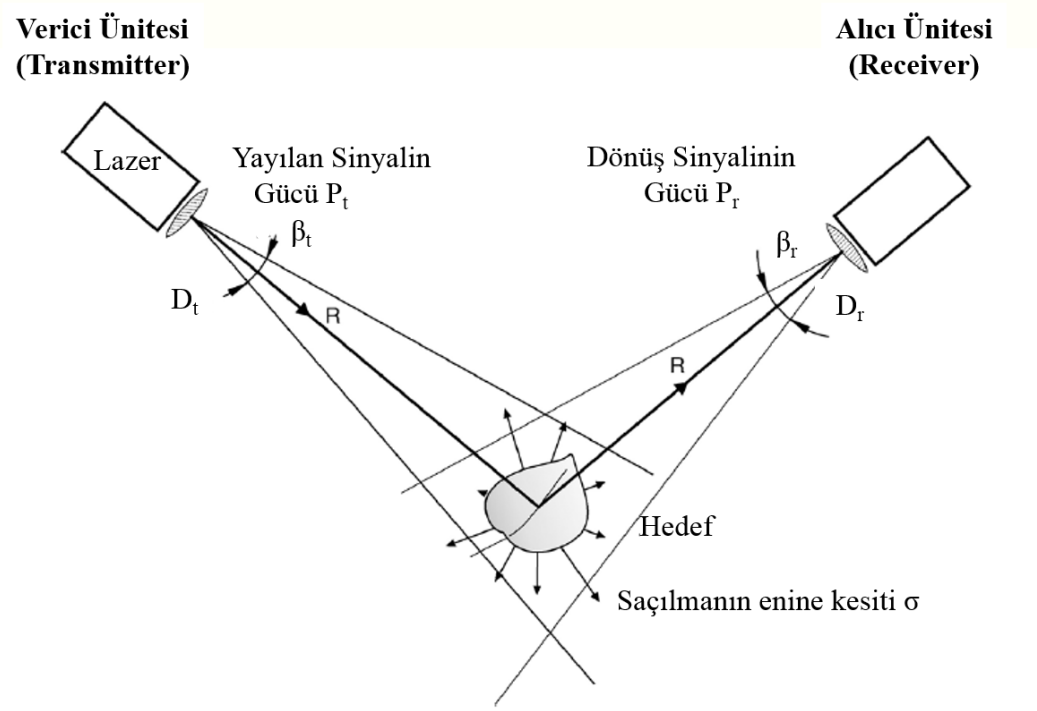
3.3 Gauss Ayrıştırması

Tam dalga formu veri işlemede kullanılan Gauss Ayrıştırma yaklaşımı ile ilgili açıklamalar öncesinde bu yaklaşımın dayandığı temel yaklaşım radar ölçüm prensibi hakkında bilgi verilecektir.

3.3.1 Radar Denklemi

Havadan lazer tarama, RADAR ölçüm prensibine dayanmaktadır [44], [57], [96]. Lazer sensöründen yayılan sinyalin enerjisi/gücü ve yeryüzü objesinden geri dönen dönüş sinyalinin enerjisinin/gücünün ilişkisi RADAR denklemi ile ifade edilmektedir [66]. Sistemin tasarımı ve kalibrasyonu için kullanılan RADAR denkleminde yer alan ana parametreler Şekil 3.4' de gösterilmiştir [57][1].

[1] Lazer tarayıcılar monostatiktir, yani verici ve alıcı aynı yerde yan yanadır. Şekilde açıklayıcı olması amacıyla farklı konumlarda çizilmiştir.



Şekil 3. 4 Radar denkleminde yer alan parametreler ve geometrisi [57]

Lazer tarayıcının tarama izini ifade eden A_L, eşitlik (3.1) kullanılarak m^2 biriminde hesaplanmaktadır [57], [97]. A_L, X_i,Y_i,Z_i konumunda yer alan hedef çarpışmanın etki alanını ifade etmektedir [38].

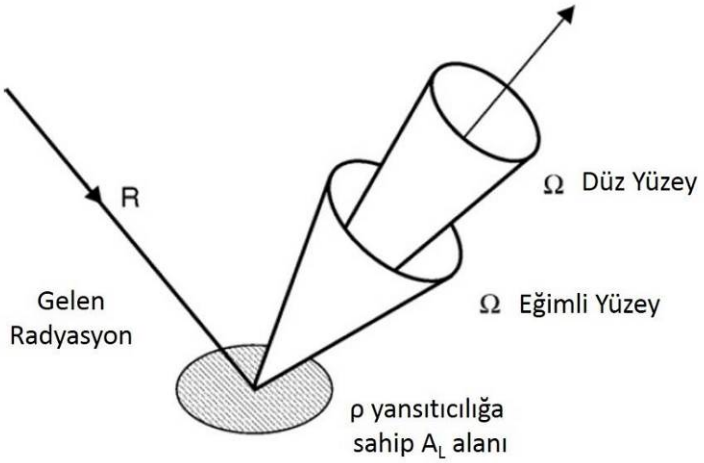
$$A_L = \frac{\pi R^2 \beta_t^2}{4} \tag{3.1}$$

R, sensör ile obje arasındaki eğik mesafeyi ve β_t yayılan sinyalin ışın genişliğini ifade etmektedir. Dönüş sinyalinin Şekil 3.5' de görülen koninin içinde saçıldığı varsayılmaktadır. Lazer sinyalinin kırınım konisi üzerindeki solid açı diğer bir deyişle hedefin saçılma açısı Ω ile ifade edilmektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere; koni ile alıcı optiklerinin görüş alanı örtüşmüyorsa geri dönüş sinyali kaydedilememektedir[1]. Çünkü lazer sinyali, sensörden uzağa saçılmaktadır [57]. Örneğin; cam, cilalanmış yüzeyler ve berrak su vb. gibi yüzeylere doğru iletilen LiDAR'ın kızılötesi dalga boyundaki sinyal, obje tarafından emilerek sensöre geri dönmemektedir. Bunun aksine çakışma durumunda, lazer sinyali sensöre geri dönmekte ve dönüş sinyali kaydedilmektedir. Örneğin; bitki

[1] Ω, koni üzerindeki solid açıyı ifade etmektedir. Birimi steradyan "sr" dır. Yarıçapı r olan bir kürede 1 metrelik düzlemi gören cismin değeri 1 streradyandır.

örtüsü, toprak ve diğer doğal yeryüzü objeleri LiDAR'ın kızılötesi dalga boyunda iletilen sinyalin enerjisinin bir kısmını emerek bir kısmını sensöre geri göndermektedir. Bu işlem 'saçılım' olarak ve hedefte yer alan objeler ise 'saçıcı' olarak adlandırılmaktadır [57]. Bu nedenle, bu bölümde geri dönüş sinyali "obje yüzeyinden geri saçılan lazer sinyali" olarak adlandırılmıştır.

ALS'de tarayıcının lazer dalga boyu, hedefteki saçılma elemanlarının boyutundan (örnek yaprak, çatı vb.) her zaman çok daha küçük olduğu için, A_L sadece öngörülen saçılmanın alanını vermektedir. Saçıcı yeryüzü objesi tarafından alınan gücün bir kısmı emilmekte, geri kalanı ise farklı yönlere dağılmaktadır.



Şekil 3. 5 A_L alanına ait hedefin kesitini etkileyen parametreler [57]

Eşitlik (3.2)' de sensörden yeryüzüne doğru yayılan lazer sinyalinin enerji yoğunluğu (S_t) hesaplanmaktadır [57]. Bu eşitlikte yer alan P_t değeri, sensörden yayılan sinyalin gücünü ifade etmektedir. Sensörden yeryüzü topoğrafyasına doğru yayılan lazer sinyalinin ışın genişliği (β_t) büyüdükçe, enerji yoğunluğunun (S_t) azalacağı bu eşitlik ile ortaya konmaktadır.

$$S_t = \frac{4P_t}{\pi R^2 \beta_t^2} \tag{3.2}$$

Alınan toplam enerjiyi hesaplayabilmek için yayılan sinyalin enerji yoğunluğu (S_t), A_L ve ρ ile çarpılmaktadır. ρ, hedefteki yeryüzü objesinin yansıtıcılığını ifade etmektedir. Yeryüzü objesinden geri saçılan sinyalin enerjisi (P_r), eşitlik (3.3)' de hesaplanmaktadır [57].

$$P_r = S_t \rho A_L = \frac{4P_t}{\pi R^2 \beta_t^2} \rho A_L \quad (3.3)$$

Yeryüzü objesinden geri saçılan sinyalin enerji yoğunluğunu ifade eden S_r eşitlik (3.4)' de verilmektedir.

$$S_r = \frac{P_t}{\Omega R^2} = \frac{4P_t}{\pi R^2 \beta_t^2} \rho A_L \frac{1}{\Omega R^2} \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.5)'te görüldüğü üzere geri saçılan sinyalin enerjisinin hesabı S_r'ye göre yeniden düzenlenmiştir. D_r, alıcı optiklerinin diyafram çapını ifade etmektedir [57].

$$P_r = S_r \frac{\pi D_r^2}{4} = \frac{4P_t}{\pi R^2 \beta_t^2} \rho A_L \frac{1}{\Omega R^2} \frac{\pi D_r^2}{4} \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5)'te yer alan sensöre ait parametreler ile hedefte yer alan yeryüzü objesine ait parametreler birbirlerinden ayrıldığında eşitlik (3.6)'da görülen RADAR denklemi elde edilmektedir [57].

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \sigma \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'da hedefe ait tüm parametrelerin birleşimi olarak tanımlanan σ ile geri saçılmanın enine kesiti (eşitlik 3.7) oluşturulmaktadır [66].

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho A_L \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7)' de de görüldüğü üzere geri saçılmayı etkileyen faktörler;

- Hedefin boyutu,
- Hedefin yansıtıcılığı,
- Saçılmanın yönüdür.

3.3.2 Dalga Formu

ALS'de saçılmalar, sistemin mesafe çözünürlüğünden "range resolution" (r_R) daha büyük mesafelere ayrılırsa çoklu saçılmalar oluşup, farklı dönüşler kaydedilebilmektedir. Ancak saçılmalar, r_R'den daha küçük mesafelere ayrılırsa tek bir dönüş kaydedilmektedir. Sistemin sinyal süresi "pulse duration" (τ) kullanılarak sistemin mesafe çözünürlüğü

$r_R=v_g\tau/2$ denklemi ile hesaplanmaktadır [57]. Burada v_g, lazer sinyalinin atmosferdeki grup hızını ifade etmektedir [57].

Eğimli olmayan diğer bir deyişle düz yüzeylerden geri saçılan sinyalin, sensörden yayılan lazer sinyalinin zaman bakımından gecikmiş ve enerji bakımından zayıflamış bir kopyası olduğu düşünülmektedir. Konumsal olarak düzensiz hedeflere doğru (örn; bitki örtüsünün farklı katmanları) sensörden yayılan lazer sinyalinin seyahat yolu boyunca farklı zamanlarda (t_i) veya farklı mesafelerde (R_i) saçılan her bir tekil/ayrık dönüşlerinin süperpoziyonu dönüş sinyalini oluşturmaktadır[1]. Aynı lazer sinyaline ait hedeften geri saçılan dönüşlerin zamansal gecikmeleri t' ile ifade edilmektedir. t', $2R_i/v_g$ değerine eşit olmakla birlikte zaman ve mesafe birbirinin yerine kullanılabilmektedir [38], [96]. Bu düşünceden yola çıkarak lazer sinyalinin t seyahat süresi boyunca kaydedilen dönüşlerin (toplam) enerjisi $P_r(t)$ eşitlik (3.8)' deki şekilde hesaplanmaktadır [57].

$$P_r(t) = \frac{D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} P_t\,(t - t')\,\sigma \tag{3.8}$$

Sensörden iletilen lazer sinyalinin çoklu dönüş yapmasına neden olan her bir i saçılımı ile sensör arasındaki mesafe R_i olarak tanımlanmaktadır. Saçılım kümesi R_i-ΔR ve R_i+ΔR mesafeleri arasında yer almaktadır. Her bir dR mesafesindeki geri saçılımın diferansiyel enine kesiti $\sigma_i(R)$ olmak üzere söz konusu i saçılımının dönüş enerjisi $P_{r,i}(t)$ eşitlik (3.9)'daki şekilde hesaplanmaktadır [57].

$$P_{r,i}(t) = \frac{D_r^2}{4\pi\beta_t^2} \int_{R_i-\Delta R}^{R_i+\Delta R} \frac{1}{R^4} P_t\left(t - \frac{2R}{v_g}\right) \sigma_i(R)\,dR \tag{3.9}$$

Eşitlik (3.10)' da görüldüğü üzere dönüş sinyali, yayılan sinyal ve diferansiyel enine kesitin R^{-4} ile çarpılan bir konvolüsyonunun sonucu ile elde edilmektedir[2]. Burada konvolüsyon operatörü (*) ile ifade edilmektedir [98]. ΔR«R olduğu durumlarda eşitlik (3.10)'da görülen sıfır mertebesinde yaklaşımlar varsayılabilmektedir. Enine kesitin türevi olan $\sigma_i'(R)= d\sigma/dR$ eşitlik (3.10)'da $\sigma_i'(t)$ olarak ifade edilmektedir [96].

[1] Süperpoziyon, bir lazer sinyalinin farklı mesafelerinde (R_i) saçılan dönüşlerinin üst üste binmesidir.

[2] Konvolüsyon gelişmiş bir sinyal işleme tekniğidir. Basitçe, bükülme (kıvrılma) anlamına gelmektedir.

$$P_{r,i}(t) \approx \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2} \int_{R_i-\Delta R}^{R_i+\Delta R} P_t\left(t - \frac{2R}{v_g}\right) \sigma_i(R) dR = \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2} P_t(t) * \sigma_i'(t) \quad (3.10)$$

Lazer sinyalinin seyahat yolu üzerinde geri dönüş sağlayan N adet farklı hedef için kaydedilen dalga formu eşitlik (3.11)'de görüldüğü üzere tüm dönüş sinyallerinin toplamına eşit olmaktadır [38].

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^{N} \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2} P_t(t) * \sigma_i'(t) \quad (3.11)$$

3.3.3 Sistem Dalga Formu

Bu kısıma kadar alıcı optiklerinin dalga formu üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Bu etki eşitlik (3.12)'de görüldüğü üzere alıcının yanıt fonksiyonu Γ(t) kullanılarak tanımlanmaktadır [57].

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^{N} \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2} P_t(t) * \sigma_i'(t) * \Gamma(t) \quad (3.12)$$

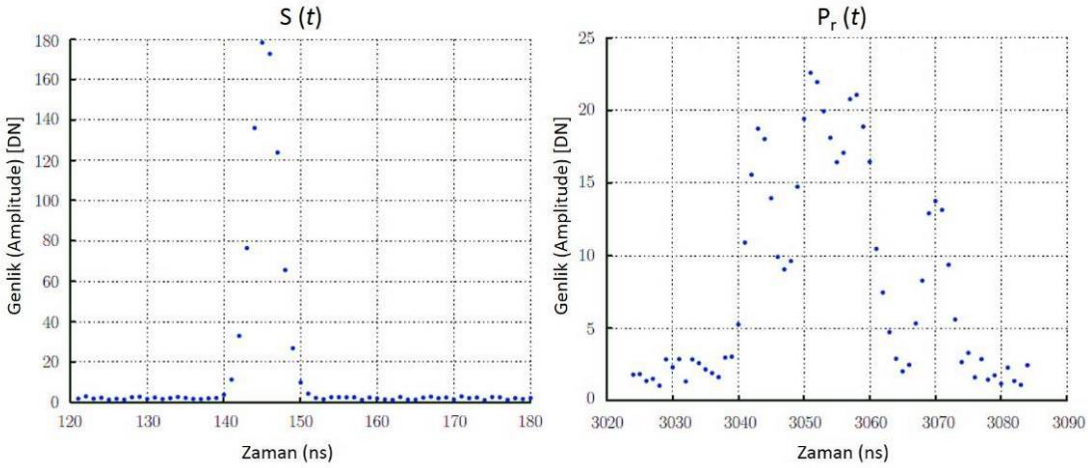
Pratikte, $P_t(t)$ ve Γ(t) doğrudan kaydedilememektedir. Eşitlik (3.12), konvolüsyon operatörünün değişim özelliğinden faydalanılarak eşitlik (3.13)'de yeniden yazılmaktadır [57], [96].

$$P_t(t) * \sigma_i'(t) * \Gamma(t) = P_t(t) * \Gamma(t) * \sigma_i'(t) = S(t) * \sigma_i'(t) \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.13)'te de görüldüğü üzere lazer tarayıcının sistem dalga formu S(t), yayılan sinyal ile sensörün yanıt fonksiyonunun konvolüsyonunun sonucunda elde edilmektedir. Deneysel olarak ölçülebilen S(t), eşitlik (3.14)' deki şekilde hesaplanmaktadır. Burada bir Gauss fonksiyonu tarafından iyi tanımlandığı görülen $\hat{S}$, sistem dalga formunun genliğini ve s_s ise sistem dalga formunun standart sapmasını temsil etmektedir [57].

$$S(t) = \hat{S}\, e^{-\frac{t^2}{2s_s^2}} \quad (3.14)$$

Şekil 3.6' da tam dalga formu kaydedebilme yeteneğine sahip olan Riegl LMS-Q560 lazer tarama cihazı ile sensörden hedefe iletilen bir lazer sinyalinin sistem dalga formu ve 1 ns örnekleme aralığında kaydedilen dönüşlerin ham dalga formunun bir örneği verilmektedir [96].



Şekil 3. 6 Sistem dalga formu (sol), kaydedilen dönüşlerin dalga formu (sağ) [96]

3.3.4 Gauss Saçılmaları

Dalga formunun analitik çözümü için i saçılım kümesinin saçılma özelliklerinin bir Gauss fonksiyonu ile açıklanabileceği eşitlik (3.15)'deki şekilde varsayılmaktadır [57].

$$\sigma_i'(t) = \widehat{\sigma_i} e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2s_i^2}} \tag{3.15}$$

Bu eşitlikte; $\widehat{\sigma}_i$ sembolü i saçılım kümesine ait dönüş genliğini ve s_i ise i saçılım kümesinin standart sapmasını ifade etmektedir. Söz konusu saçılma objesinin toplam enine kesiti eşitlik (3.16)' da verilmektedir [57].

$$\sigma_i'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{\sigma}_i e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2s_i^2}} dt = \sqrt{2\pi} s_i \widehat{\sigma}_i \tag{3.16}$$

İki adet Gauss eğrisinin konvolüsyonu eşitlik (3.17)'deki Gauss fonksiyonunu vermektedir [57].

$$S(t) * \sigma_i'(t) = \sqrt{2\pi}\hat{S}\widehat{\sigma_i} \frac{s_S s_i}{\sqrt{s_S^2+s_i^2}} e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2(s_S^2+s_i^2)}} = \hat{S}\sigma_i \frac{s_S}{\sqrt{s_S^2+s_i^2}} e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2(s_S^2+s_i^2)}} \tag{3.17}$$

Eşitlik (3.17)'nin sağ tarafı, eşitlik (3.12)'de uygun yere yerleştirildiğinde elde edilen sonuç ile dönüş sinyalinin enerjisi $P_r(t)$ eşitlik (3.18)' da şekilde hesaplanmaktadır. Saçılım kümesi i'nin dönüş genliği $\widehat{P}_i$ ile ifade edilmektedir [24], [38], [57].

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^{N} \hat{P}_i \, e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2s_{p,i}^2}} \tag{3.18}$$

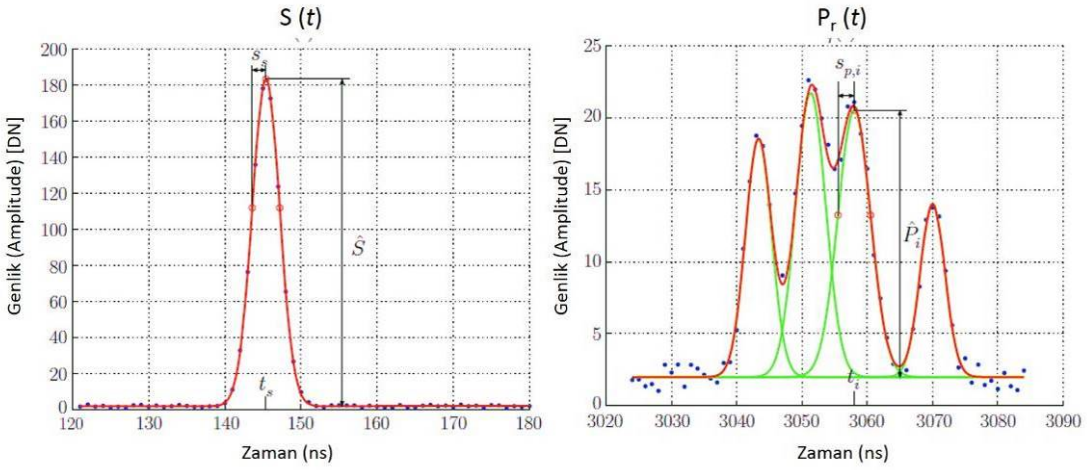
Saçılım kümsesi i'ye ait dönüş sinyalinin standart sapması $s_{p,i}$ eşitlik (3.19)' de hesaplanmaktadır [44], [57].

$$s_{p,i} = \sqrt{s_s^2 + s_i^2} \tag{3.19}$$

Eşitlik (3.20)'de i saçılım kümesinin dönüş genliği $\hat{P}_i$'nin hesabı RADAR denkleminin formunun korunduğunu göstermektedir [38], [44].

$$\hat{P}_i = \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2} \hat{S}\sigma_i \frac{s_s}{s_{p,i}} \tag{3.20}$$

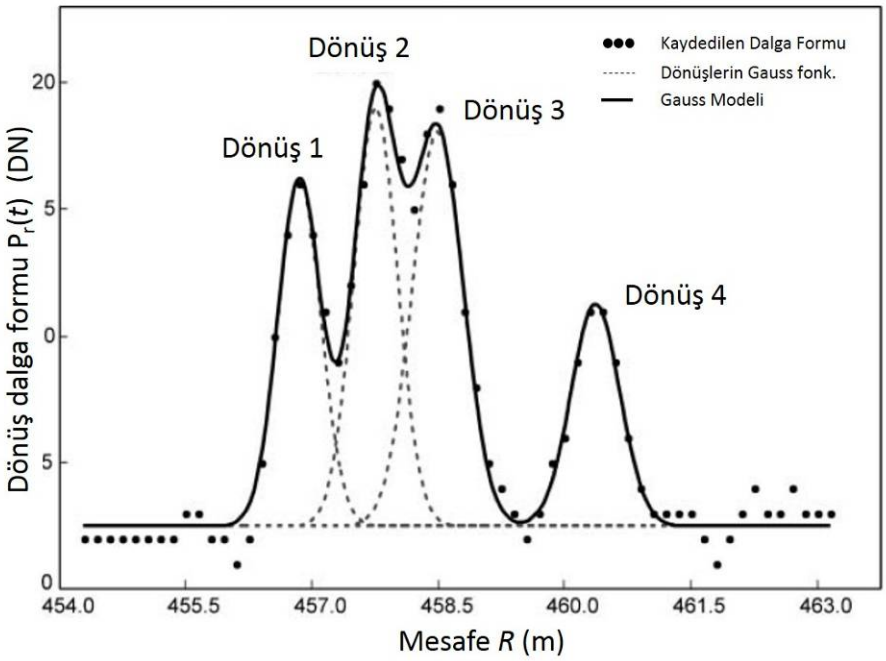
Eşitlik (3.6) ve eşitlik (3.20) karşılaştırıldığında, Gauss saçılımları için RADAR denkleminin korunduğu söylenebilmektedir. Eşitlik (3.6)'da hesaplanan P_r'nin eşitlik (3.20)'de $\hat{P}_i$ ile $s_{p,i}$ değerlerinin çarpımına eşit olduğu ve eşitlik (3.6)'da hesaplanan P_t'nin eşitlik (3.20)'de $\hat{S}$ ile s_s değerlerinin çarpımına eşit olduğu görülmektedir [45], [57]. Şekil 3.6'da görülen ham dalga formunun Gauss ayrıştırmasıyla elde edilen sonucu Şekil 3.7' de verilmektedir [96].



Şekil 3. 7 Gauss ayrıştırmasıyla elde edilen dalga formu örneği; sistem dalga formu (sol), kaydedilen dönüş dalga formu (sağ) [96]

Lazer sinyalinin seyahat yolu üzerinde birkaç farklı geri saçılma objesinin olması durumunda dalga formu Şekil 3.7' de görüldüğü üzere karmaşık bir yapı almaktadır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de Riegl LMS-Q560 ile dört dönüş olarak kaydedilen örnek bir tam dalga

formu LiDAR verisi verilmektedir. Şekil 3.8’ de dönüş dalga formunun, kaydedilen dönüş başına bireysel Gauss fonksiyonları ve dalga formu öznitelikleri gösterilmektedir. Şekilde, farklı mesafelerdeki dört dönüşten ilk üç dönüş arasındaki mesafenin oldukça kısa olduğu görülmektedir. Bu ilk üç dönüşün bitki örtüsünün farklı katmanlarından ve son dönüşün ise ormanaltı topoğrafyasından saçıldığı düşünülmektedir [38].



Şekil 3. 8 Riegl LMS Q560 lazer tarama cihazıyla kaydedilen dalga formunun Gauss ayrışımı [38]

Tam dalga formu kaydeden ALS sistemlerde dönüşlerin dalga formunun, sistem dalga formu ve hedefteki objeye ait geri saçılımın enine kesitinin bir konvolüsyonunun sonucu olduğu bölüm 3.2.3’te görülmüştür [99]. Şekil 3.8’ deki sinyalin dalga formuna ait tüm dalga formu özniteliklerinin her bir dönüş için aldığı değerler (eşik değerden çıkarılarak) Çizelge 3.1’ de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 Şekil 3.8' de gösterilen dalga formunun Gauss ayrıştırma ile elde edilen tam dalga formu öznitelikleri [38]

Dönüş No	Mesafe (m)	Dönüş Genliği (DN)	Dönüş Genişliği (ns)	Geri Saçılımın Enine Kesiti (m^2)
1	456.91	13.73	1.70	0.01456
2	457.82	16.52	1.74	0.01807
3	458.55	15.60	2.02	0.01994
4	460.42	8.78	1.94	0.01096

3.3.5 Radyometrik Kalibrasyon

Tam dalga formu lazer tarayıcılar ile yeryüzü objelerinin saçılma özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlanmaktadır. Bu özellikleri tamamen keşfedebilmek için her bir lazer sinyaline ait geri saçılımın enine kesiti hesaplanmaktadır. Geri saçılımın enine kesitinin hesaplanması için ise nokta bulutunun radyometrik kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir [97], [100]. Radyometrik kalibrasyon için farklı günlerde, farklı lazer tarayıcılarla ya da farklı koşullarda gerçekleştirilen lazer ölçümlerinin kullanılması ve karşılaştırılması önemlidir [45], [101].

Kalibrasyon işlemi LiDAR ile veri alımı gerçekleştirilmeden hemen önce çalışma alanına yerleştirilen geri saçılım özellikleri bilinen yapay hedefler (örneğin; asfalt yol, araba, bina çatısı, trafik ışıkları vb.) veya yansıma değeri bilinen veya ölçülebilen bir doğal yüzey (örneğin; çimen, çıplak arazi yüzeyi, kum vb.) kullanılarak gerçekleştirilebilir [101]. Kullanılan bu yüzeyler 'referans yüzey' olarak adlandırılmaktadır. Wagner vd. tarafından [57] de kalibrasyon sabitini belirleyebilmek için referans yüzey olarak ρ=0.2 yansıtıcılık ile ideal bir Lambertian dağıtıcı gibi yansıma gösterdiğini ifade ettikleri asfalt yoldan geri saçılan LiDAR nokta bulutu kullanılarak radyometrik kalibrasyon gerçekleştirilmiştir.

Gauss sistem dalga formuna sahip lazer tarama sistemlerinde kaydedilen güç/enerji; genlik ($\widehat{P}_i$) ve genişlik ($S_{p,i}$) ile orantılıdır [45], [100]. Eğik mesafe, genlik ve genişlik değerleri "Gauss Ayrıştırması" ile elde edilmektedir. η_{ATM} atmosferin iletim faktörü ve η_{SYS} sistemin iletim faktörü hesaba katılarak RADAR denklemi eşitlik (3.21)'deki şekilde yeniden yazılmaktadır.

$$\widehat{P}_i = \eta_{sys}\eta_{atm}\frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_t^2}\hat{S}\sigma_i\frac{s_s}{s_{p,i}} \quad (3.21)$$

C_{cal} ile ifade edilen kalibrasyon sabiti ve sensör ile hedef arasındaki mesafe (R_i) kullanılarak her bir dönüş sinyali için hesaplanan geri saçılımın enine kesiti eşitlik (3.22)' deki şekilde sunulmaktadır.

$$\sigma_i = C_{cal}R_i^4\widehat{P}_i s_{p,i} \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.22)' de verilen geri saçılımın enine kesitinin hesaplanabilmesi için gerekli olan kalibrasyon sabiti eşitlik (3.23)'de hesaplanmaktadır [97].

$$C_{cal} = \frac{4\pi\beta_t^2}{\eta_{sys}\,\eta_{atm}\,D_r^2\,\hat{S}\,s_s} \quad (3.23)$$

Wagner [101] de geri saçılmanın enine kesitinin lazer sinyali ile yeryüzü objesi arasındaki insidans (θ) açısından etkilendiğini ifade etmektedir. Bu nedenle geri saçılımın enine kesitinin uçuş yüksekliği etkisinden arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla geri saçılımın enine kesitini lazer tarama izi ile normalize ederek geri saçılım katsayısı (ɣ) elde edilmiştir. Eşitlik (3.24)'de verilen geri saçılım katsayısı m^2/m^2 veya dB cinsinden ifade edilmektedir [100].

$$\gamma = \frac{\sigma}{A_l} = \frac{4\,\sigma}{\pi\,R^2\,\beta_t^2} \quad (3.24)$$

Kalibrasyon sabiti belirlendikten sonra yeryüzü objesine iletilen sinyalin dalga formu içerisindeki her bir i saçılımı için tarama izine göre normalize edilmiş geri saçılım katsayısı (γ_i) eşitlik (3.25)'de hesaplanmaktadır [100].

$$\gamma_i = C_{cal}\frac{4\,R_i^2\,\hat{P}_i\,S_{p,i}}{\pi\,\hat{S}_i\,\beta_t^2} \quad (3.25)$$

Geri saçılım katsayısı, eşitlik (3.26)'da görüldüğü üzere hedefte yer alan yeryüzü objesinin yansıtıcılığı (ρ) ile doğrudan ilişkilidir [101].

$$\rho = \frac{\gamma}{4\cos\theta} \quad (3.26)$$

Sonuç olarak tam dalga formu LiDAR nokta bulutunda yer alan her bir lazer noktası için geri saçılımın enine kesiti ve geri saçılma katsayısı hesaplanabilmektedir [100]. Hesaplanan bu öznitelikler tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırmasında

kullanılabilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun veri alımı öncesinde referans yüzeyler tesis edilmemiştir. Bu nedenle radyometrik kalibrasyon yapılamamıştır.

BÖLÜM 4

SINIFLANDIRMA

Sınıflandırma temel olarak, bir veri bütününün belirli objeleri veya objelerin özelliklerini temsil eden gruplara ayrılması işlemidir. Sınıflandırma işlemi için birçok farklı yöntem mevcuttur. Sınıflandırılmak istenilen veri türüne bağlı olarak sınıflandırma yöntemleri; piksel tabanlı sınıflandırma, obje tabanlı sınıflandırma ve nokta tabanlı sınıflandırma olmak üzere üç temel gruba ayrılabilmektedir [102]. Bu bölümde öncelikle sınıflandırma yöntemlerine özet olarak değinilmektedir. Ardından tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırması için kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin açıklamaları ile birlikte literatürde yer alan çalışmalardan örnekler verilmektedir.

Piksel tabanlı sınıflandırma; görüntü verisinin (örn; uydu görüntüleri) sınıflandırılması amacıyla kullanılan yöntemdir. Yeryüzü topoğrafyasında yer alan her obje farklı spektral yansıma özelliklerine sahiptir. Piksel tabanlı sınıflandırma yönteminde görüntü içerisindeki pikseller spektral yansıma değerlerine ve birbirleriyle olan komşuluk ilişkilerine göre gruplara ayrılmaktadır. Piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi iki yaklaşıma sahiptir. Görüntüye dahil olan çalışma alanında yeterli sayıda bilinen örnekleme bölgesi kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma yaklaşımı kontrollü sınıflandırma olarak adlandırılmaktadır. En küçük mesafe “minimum distance-to-means”, paralelyüz “parallelopiped” ve en çok benzerlik “maximum likelihood classifier” piksel tabanlı sınıflandırmada en sık kullanılan kontrollü sınıflandırma yöntemleridir. Herhangi bir örnekleme bölgesi kullanılmadan, görüntüdeki piksellerin otomatik bir şekilde gruplandırılmasıyla yapılan sınıflandırma ise kontrolsüz sınıflandırma yaklaşımıdır.

ISODATA “iterative self-organizing data analysis technique algorithm” ve K-Means teknikleri ise piksel tabanlı kontrolsüz sınıflandırmada en sık kullanılan yöntemlerdir.

Obje tabanlı sınıflandırma yönteminin ilk aşaması segmentasyondur. Segmentasyon işlemi görüntüyü ortak özelliklerine göre segmentlere (bölütlere) ayırma işlemidir. Görüntü; ölçek parametresi, bütünlük, şekil, eğim, parlaklık vb gibi özelliklere göre segmentlere ayrılmaktadır. Oluşturulan segmentlerin birbirleri ile ilişkisi bulunmamaktadır. Segment, belirli bir gri değerine sahip grubu temsil eden alanlardan oluşmaktadır. Segmentlere ayrılmış objeleri sınıflandırmak için kullanıcı tarafından tanımlanmış bir hiyerarşik yapı gerekmektedir [14]. En sık kullanılan segmentasyon yöntemleri; satranç tahtası, kontrast ayırma, dörtlü ağaç ve çoklu çözünürlüklü segmentasyondur.

Nokta tabanlı sınıflandırma yönteminde ise 3-boyutlu nokta bulutu içerisinde farklı yeryüzü objelerini (bina, ağaç, zemin vb.) niteleyen noktalar birbirlerinden ayrılarak farklı sınıflar altında toplanmaktadır. Bu yöntem LiDAR ve hava fotoğraflarından elde edilen nokta bulutu verilerinin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [56]. LiDAR verisinin geometrik özelliklerine göre nokta tabanlı sınıflandırılması ve segmentasyonu ile alakalı detaylı açıklamalar Erişir [56]’da bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun dalga formu öznitelikleri temel alınarak sınıflandırılması hedeflenmektedir. Tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması hakkında detaylı bilgiler ‘4.1 Tam Dalga Formu LiDAR Nokta Bulutunun Sınıflandırılması’ başlığı altında yer almaktadır.

4.1 Tam Dalga Formu LiDAR Nokta Bulutunun Sınıflandırılması

Tam dalga formu analizi ile elde edilen 3-boyutlu nokta bulutunda her bir lazer sinyalinin yeryüzü topoğrafyasındaki nokta konum bilgisi ve dönüş seviyeleri ile birlikte her bir lazer noktasının tam dalga formu öznitelikleri de elde edilmektedir. Genlik, genişlik, geri saçılımın enine kesiti ve eğik mesafeden oluşan bu öznitelikler yeryüzü objesinin saçılma özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır [85]. Dolayısıyla nokta bulutu sınıflandırmasında lazer nokta bulutunun çoklu dönüş seviyeleriyle birlikte bu özniteliklerde kullanılabilmektedir.

Tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için kullanılan çeşitli sınıflandırma algoritmalarının yanı sıra nokta bulutunun segmentasyonu yöntemi de kullanılmaktadır. Segmentasyon ve sınıflandırma aşamalarına sırasıyla '4.1.1 Nokta Bulutu Segmentasyonu' ve '4.1.2 Nokta Bulutunun Sınıflandırılması' başlıkları altında değinilmiştir.

4.1.1 Nokta Bulutu Segmentasyonu

Tam dalga formu LiDAR verileri sınıflandırılmadan önce segmentlere ayrılmaktadır [25], [41], [42], [43], [45]. Nokta bulutunun segmentasyonu ile noktalardan daha yüksek düzeyde bilgi elde edilebilmektedir. Nokta bulutunun segmentasyonu için kümeleme "cluster analysis ya da pattern based" tekniği, kenar tabanlı "edge based"segmentasyon, yakınlık grafiğine bağlı "proximity graph based" segmentasyon ve 'Region Growing' segmentasyonu başta olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [103]. Rutzinger vd. [43] de yeryüzü objesinden geri saçılan lazer sinyallerinin dönüş genişliklerini inceleyerek bu dönüşlerin nokta yoğunluk dağılımlarına göre 'Region Growing' segmentasyon yöntemi ile bitki örtüsünü segmentlere ayırmış ve sınıflandırma işlemini gerçekleştirmiştir. Höfle ve Hollaus [41], Höfle vd. [42] ve Höfle vd. [45] nokta bulutundan Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli'ni ürettikten sonra bu modele kenar tabanlı segmentasyon yöntemini uygulayarak bitki örtüsünü segmentlere ayırmıştır. Reitberger vd. [25] de farklı bir segmentasyon yaklaşımı geliştirmiştir. Ormanlık alanda bitki örtüsünün Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli'ni ürettikten sonra bu modeli düzleştirerek "smooted" dönüm noktası "watershed" algoritması ile segmentlere ayırmıştır. Segmentasyonun ardından piksel tabanlı kontrolsüz sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Daha sonra Reitberger vd. tarafından [88] de ağaç gövdelerinin saptanması amacıyla özel bir yöntem geliştirilmiş ve 'Normalize Cut' yöntemini kullanılarak dönüm noktası segmentasyon algoritması geliştirilmiştir. Ormanın alt tabakalarındaki küçük ağaçları bile tespit ederek tekil ağaç tespitinde dönüm noktası segmentasyonuna göre %12 oranında artış sağlanmıştır.

Bu çalışmada tam dalga formu ham LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi kullanılmaktadır. Bu nedenle nokta bulutunun

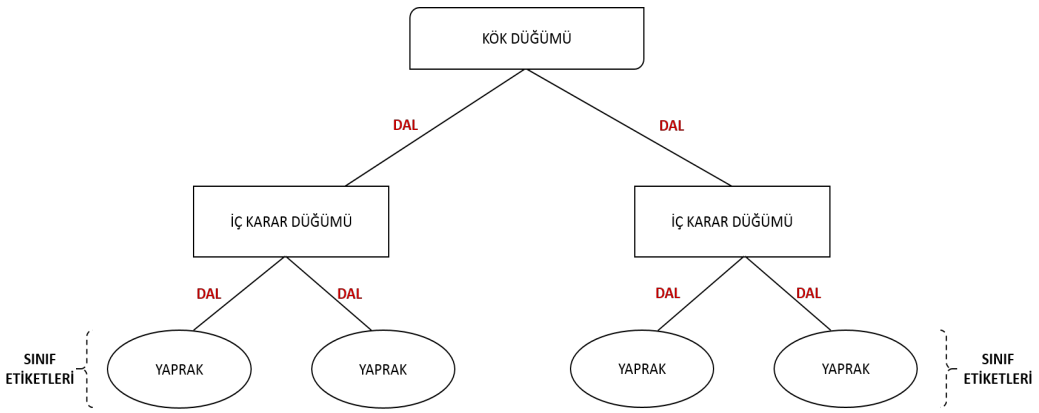
segmentasyonuna çok detaylı değinilmemiştir. Segmentasyon hakkında daha detaylı bilgi Sithole [103]'de bulunmaktadır.

4.1.2 Nokta Bulutunun Sınıflandırılması

Her bir lazer noktası çeşitli özellikler ile ilişkilendirilerek tam dalga formu LiDAR verilerinin sınıflandırılması gerçekleştirilebilmektedir [38], [39], [73], [104], [105], [115]. Literatürde yer alan çalışmalarda, tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun nokta tabanlı sınıflandırılması için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Karar ağacı "decision tree", destek vektör makineleri "support vector machines", rastgele orman "random forest", yapay sinir ağları "artificial neural networks" vb. gibi kontrollü sınıflandırma yöntemleri mevcuttur. İlerleyen kısımlarda bu sınıflandırma yöntemlerinin dayandığı temellerle birlikte tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla literatürde yer alan çeşitli uygulamalar anlatılmaktadır.

4.1.2.1 Karar Ağacı Sınıflandırıcısı

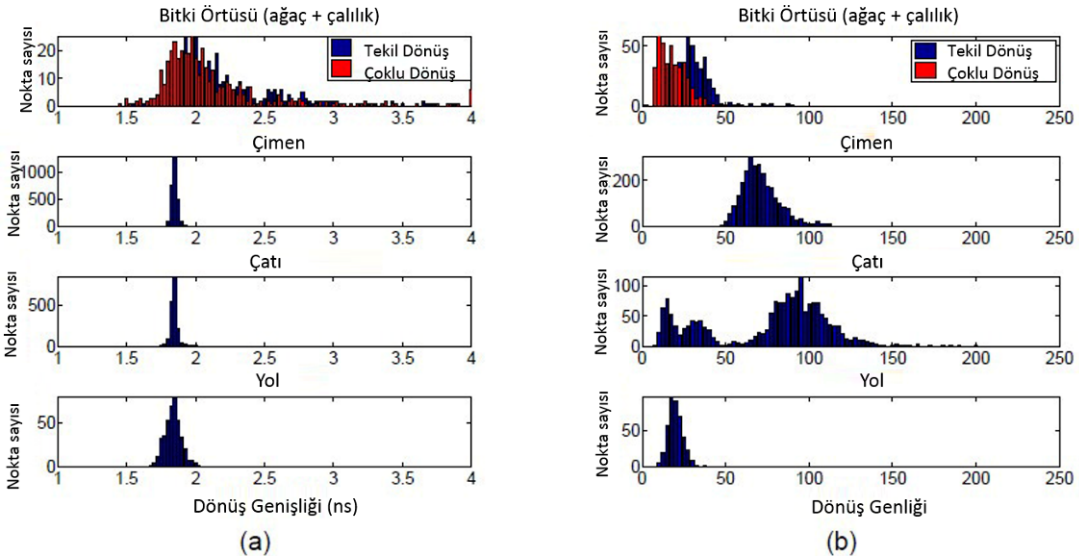
Karar ağacı sınıflandırma yöntemi, literatürde basit eşik değer belirleme "simple threshold" olarak da adlandırılmaktadır [100]. Karar ağacı yapısı itibari ile en üstten aşağıya doğru inen bir hiyeraşiye sahiptir. Karar ağacı; düğüm, dal ve yaprak şeklinde adlandırılan üç temel elemandan oluşmaktadır. Girdi verisinin sınıflandırılması için sorular sorulmaya kök düğümden başlanılmaktadır [106]. İç karar düğümleri sorulan sorulara alınan cevaplara göre yönelimleri göstermektedir. İç karar düğümleri ile veri seti belirli eşik değerlere göre sürekli olarak bölünmektedir. Bu bölünmeler ile karar ağacı dallanmaktadır. Karar ağacının dalları, iç karar düğümlerinde sorulan soruların yanıtlarını temsil etmektedir. Sorular bittiğinde dallanma da son bularak yaprağa ulaşılmaktadır. Karar ağacının yaprakları sınıflandırma sonucunda elde edilen değerleri diğer bir deyişle sınıf etiketlerini ifade etmektedir. Tüm elemanlarıyla birlikte 4 sınıf için oluşturulan basit bir karar ağacı yapısı Şekil 4.1'de verilmiştir. Karar ağacının iç karar düğümleri dikdörtgenlerle, yaprakları ise dairelerle ifade edilmektedir.



Şekil 4. 1 Dört sınıflı basit bir karar ağacı

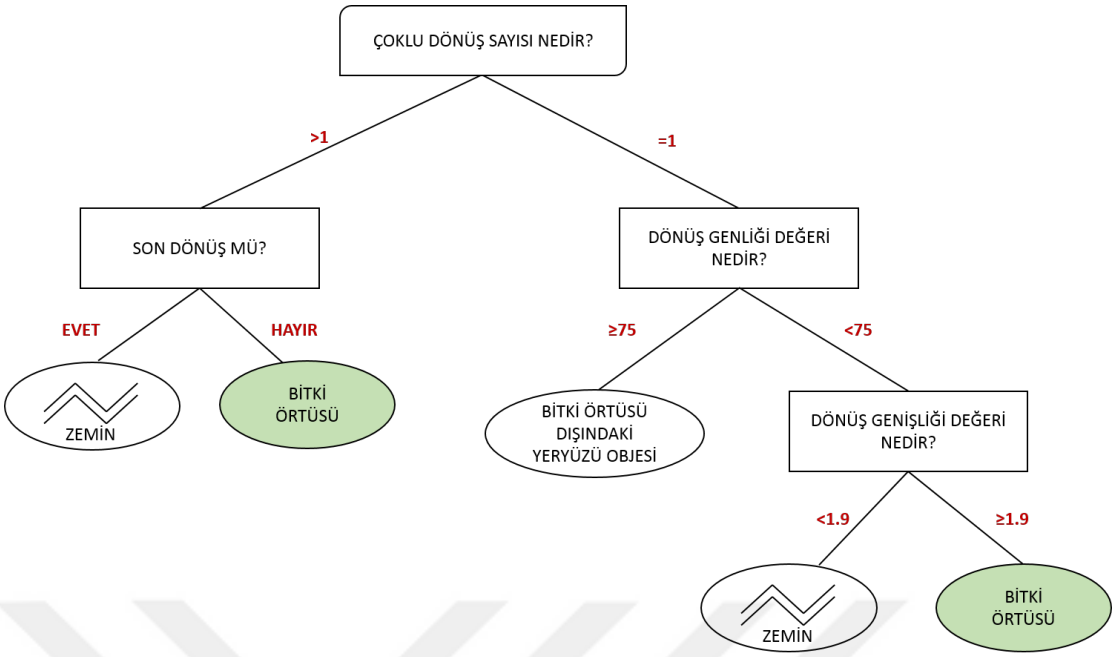
Karar ağacı**,** kullanıcı tarafından belirlenen kurallar ile sürekli (iteratif) olarak gerçekleştirilen bir sınıflandırma işlemidir. Bu nedenle kontrollü sınıflandırma yöntemidir. Bu sınıflandırma işlemi literatürde tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun yaygın olarak bitki örtüsü olan ve bitki örtüsü olmayan nokta sınıfı şeklinde sınıflandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaçlara ait nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla da kullanılarak ağaç türlerinin sınıflandırılmasına olanak sağlamaktadır. Nokta bulutunun belirlenen sınıflara göre doğrudan birbirinden ayrılması için tam dalga formu analizi ile elde edilen genlik, genişlik, geri saçılımın enine kesiti, geri saçılım katsayısı ve eğik mesafe vb. gibi dalga formu öznitelikleri ile birlikte lazer sinyalinin çoklu dönüş seviyeleri birlikte incelenerek bir hiyerarşik yapı oluşturulmaktadır. Karar verme işlemini gerçekleştiren eşik değerler manuel (el ile) [38], [39], [40], [41] veya otomatik [42], [43], [104] olarak belirlenebilmektedir.

Tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için literatürde yer alan karar ağacı sınıflandırıcısı uygulamalarına bir örnek Ducic vd. tarafından [39] da gerçekleştirilmiştir. Ducic vd. [39] da farklı yeryüzü objelerinin dönüş genişliği (Şekil 4.2(a)) ve dönüş genliğinin (Şekil 4.2(b)) alacağı değerleri histogramlar üzerinde incelenmiştir.



Şekil 4. 2 Farklı yeryüzü objeleri için dönüş genişliği (a) ve dönüş genliği (b) değerlerinin histogramları [39]

Ducic vd. [39] 'da histogramlar ile ortaya konulan sonuçlar ışığında Şekil 4.3' de verilen karar ağacını oluşturmuştur. Çoklu dönüş seviyelerinden ilk dönüşler haricindeki diğer dönüşlerin çoğunlukla bitki örtüsünden geldiğini tespit ederek bu noktaları kendi içlerinde son dönüş olma ve olmama durumuna göre ayırmıştır. Son dönüşleri zemin sınıfına geri kalanları ise bitki örtüsü sınıfına atamıştır. Çoklu dönüş seviyelerinden ilk dönüşleri sınıflandırdıktan sonra kalan tüm nokta bulutu için öncelikle dönüş genliği değerini göz önünde bulundurmuştur. Genlik değeri 75'ten büyük olan noktaların çoğunlukla bina çatıları ve çimenlerden geri döndüğünü ve 75'ten küçük olanların ise dönüş genişliğine göre değerlendirmeye alınması gerektiğini düşünmüştür. 1.9 ns'den büyük olan dönüş genişliği değerinin bitki örtüsünden, küçük olanları ise zeminden döneceğini histogramlar ile ortaya koyarak elde ettiği sonuçlara göre karar ağacının hiyerarşik yapısını (Şekil 4.3) kurarak nokta bulutunun sınıflandırma işlemini tamamlamıştır.



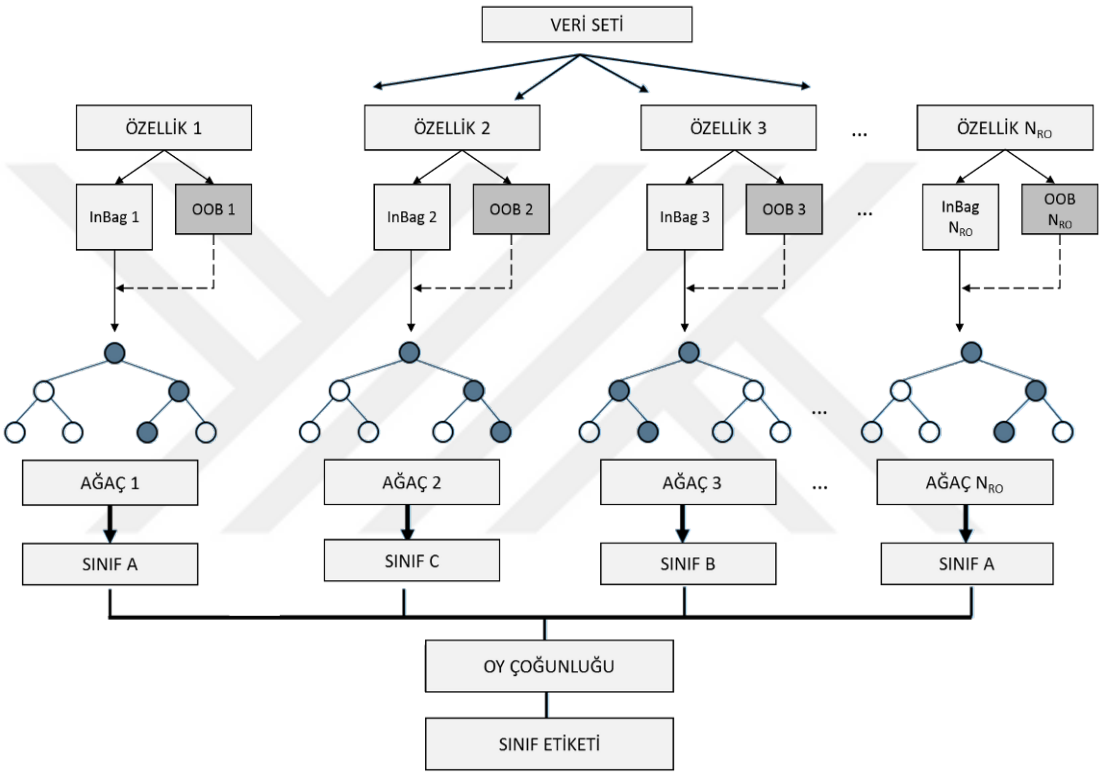
Şekil 4. 3 Nokta tabanlı sınıflandırma örneği; karar ağacı [39]

Karar ağacı sınıflandırma yaklaşımı ile 3-boyutlu nokta bulutu içerisinde yer alan farklı objelerin nokta dağılımları hakkında varsayım yapılmasına gerek duyulmamaktadır. İlerleyen kısımlarda da görüleceği üzere diğer sınıflandırma yöntemleri istatiksel sonuçlara dayalı sınıflandırıcılar kullanabilmektedir. Bununla birlikte karar ağacı sınıflandırma yaklaşımında doğrusal akış diyagramı ile kurulan kural yapısının kullanıcı tarafından yorumlanması oldukça kolaydır. Bu nedenle diğer yöntemlerdekisınıflandırma algoritmalarının yorumlanması karar ağacı yaklaşımına göre daha zor olabilmektedir [100].

4.1.2.2 Rastgele Orman Sınıflandırıcısı

Breiman tarafından [107] de önerilen rastgele orman (RO) sınıflandırmasının temeli birden fazla karar ağacının birlikte kullanılmasına dayanmaktadır [77]. Kontrollü sınıflandırma yöntemi olan rastgele orman sınıflandırıcısında ağaç sayısı arttıkça doğruluk da artmaktadır. Karar ağacı sınıflandırıcısının yapısında bulunan düğüm, dal ve yapraklardan oluşan elemanlar rastgele orman sınıflandırıcısı için de geçerlidir. Rastgele orman ile karar ağacı arasındaki temel fark ise iç karar düğümlerinin ve dallanmaların rastgele gerçekleşmesidir. Diğer sınıflandırma yöntemlerinde olduğu gibi rastgele orman sınıflandırmasında da kullanıcı tarafından önceden belirlenmesi gereken değerler

bulunmaktadır. Bu değerler; rastgele orman sınıflandırıcısı içerisinde oluşturulacak olan ağaç sayısı ve her bir ağacın oluşturulması için her bir düğümde kullanılacak örneklerin sayısıdır [106]. Kullanıcı tarafından belirlenen N_{RO} adet karar ağacının bir araya gelmesi ile rastgele orman algoritması oluşturulur. Rastgele orman sınıflandırıcısında verisetinin genellikle 2/3'ü eğitim verisi "inBag" ve 1/3'ü test verisi "out of bag (OOB)" olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [106]. Şekil 4.4'te N_{RO} adet ağacın bir araya gelmesiyle oluşan bir rastgele orman algoritması verilmiştir.



Şekil 4. 4 N_{RO} adet karar ağacı ile oluşturulan rastgele orman ([108]'den uyarlanmıştır)

Rastgele orman algoritması tıp, bankacılık ve mühendislik uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla da literatürde yer alan bazı çalışmalarda rastgele orman sınıflandırıcısının kullanıldığına rastlanılmıştır. Guo vd. [77], Koma vd. [109] ve Shi vd. [110] da tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırması rastgele orman sınıflandırıcısı ile gerçekleştirmiştir. Guo vd. tarafından [77] de kentsel alanda yapılan çalışmada %95 doğrulukla nokta bulutu bina, bitki örtüsü, doğal ve yapay zemin olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır. Bu dört adet sınıfın sınıflandırılması için LiDAR'ın tam dalga formu

öznitelikleri (genlik ve geri saçılmanın enine kesiti) ile multispektral (kırmızı, yeşil ve mavi band) ortogörüntüyü birlikte değerlendirmiştir. Guo vd. tarafından [77] de gerçekleştirilen bu çalışma rastgele orman sınıflandırıcısının birden fazla veri kaynağı ile sınıflandırma yapmayı mümkün kıldığını göstermektedir.

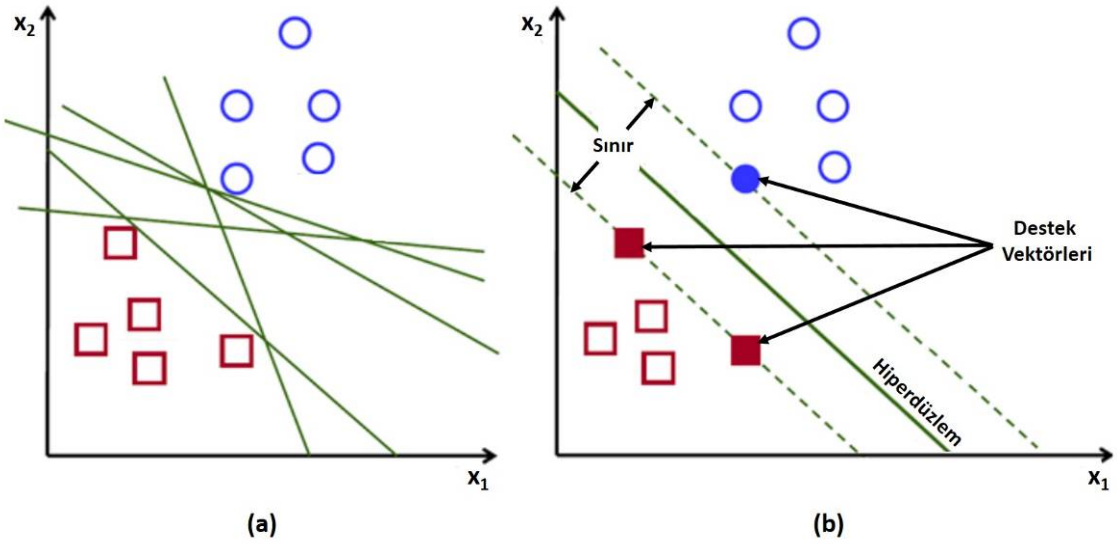
Koma vd. tarafından [109] da geniş yapraklı ve iğne yapraklı ağaç türlerine sahip Viyana kentindeki bir alanda gerçekleştirilen LiDAR ölçümleri ile öncelikle ağaç yüksekliklerini hesaplamıştır. Ağaç yüksekliği her bir ağaca ait nokta bulutunun kesitindeki en yüksek nokta olarak tanımlanmıştır. 2 m olarak belirlenen eşik değerin altındaki noktalar manuel (el ile) olarak silinerek ilk veri seti, hiçbir müdahale yapılmadan kullanılan nokta bulutu ile ikinci veri seti oluşturulmuştur. Rastgele orman sınıflandırmasında kullanılmak üzere her iki veri seti için nokta bulutundan 7 adet özellik türetilmiştir. Bu 7 özellik F1 ile F7 arasında isimlendirilmiştir. Nokta bulutunun yalnızca geometrik özellikleri yani nokta konum bilgisi kullanılarak türetilen F1 tüm nokta bulutu ile F2 ise nokta bulutunda tespit edilen yalnızca ağaç taçlarına ait tüm noktalar ile alakalıdır. F3 ise radyometrik özellikler olarak tanımlanan tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun dönüş genişliği, geri saçılım katsayısı ve geri saçılımın enine kesiti vb. gibi dalga formu öznitelikleri ile ilişkilidir. Diğer özellikler (F4, F5, F6, F7) ise F1, F2 ve F3 ile yapılan çeşitli kombinasyonlarla oluşturulmuştur. Rastgele orman sınıflandırmasında veri setlerinin %70'i eğitim verisi ve %30'u test verisi olarak kullanılmıştır. Rastgele orman içerisindeki karar ağacı sayısı 20 olarak belirlenmiştir. Karar ağacı içerisindeki her bir iç düğümü bölmek için gerekli olan minimum örnek sayısı 5'e ve yeni oluşturulan grup içerisindeki minimum örnek sayısı 2'ye ayrılmıştır. Sınıflandırma sonuçları her iki veri seti için ayrı ayrı incelenmiştir. İlk veri seti için %87.5 genel doğruluk ile en iyi sonuç geometrik ve radyometrik özelliklerin kombinasyonu olan F4 ile gerçekleştirilmiştir. İkinci veri setinin sınıflandırılması sonucunda elde edilen bulgulara göre ise tüm ağaçlar için genel bir yükseklik eşiği kullanmanın yeterli olmadığına ve gelişmiş ağaç algılama yöntemlerine ihtiyaç duyulacağına karar verilmiştir.

4.1.2.3 Destek Vektör Makineleri

Rus Bilim adamı Vladimir N. Vapnik ve çalışma arkadaşları tarafından 1970'li yılların sonlarına doğru geliştirilen destek vektör makineleri (DVM) UZAL uygulamalarında

1990'lı yılların sonlarına doğru hiperspektral uydu görüntülerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılmıştır [111]. Destek vektör makineleri kontrollü sınıflandırma yöntemleri arasında yer almaktadır [91].

Destek vektör makineleri, farklı sınıflara ait veri setinin kendi içinde doğrusal olarak ayrılma ve ayrılmama durumlarına göre temelde ikiye ayrılmaktadır. Doğrusal destek vektör makineleri için veri setini ayıran doğru karar doğrusu ya da hiperdüzlem olarak adlandırılmaktadır. Bu hiperdüzlem $W.X_i+b=0$ ile tanımlanmaktadır. Burada X_i hiperdüzlemdeki i noktası, W hiperdüzlemin normali ve b ise hiperdüzlemin orijine olan uzaklığını ifade eden eğilim değeridir [111]. Şekil 4.5(a)'da görüldüğü üzere veri setini ayıran birçok karar doğrusu bulunmaktadır. Ancak karar doğrusunun her bir sınıfa ait veri setinin sınır çizgisine en yakın mesafede olması önemlidir. Her bir veri setinin sınır çizgisine en yakın olan nokta veya noktalar 'destek vektörü/vektörleri' olarak adlandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada genellikle (-1,+1) şeklinde sınıf etiketleri kullanılmaktadır. $W.X_i+b<0$ negatif hiperdüzlemi ve $W.X_i+b>0$ pozitif hiperdüzlemi göstermektedir. Doğrusal olarak ayrılabilen veri setinin 2 sınıflı destek vektör makinesi Şekil 4.5(b)'de verilmektedir.



Şekil 4. 5 Hiperdüzlemin belirlenmesi (a) ve doğrusal destek vektör makinesi (b) ([112]'den uyarlanmıştır)

Doğrusal olarak iki farklı sınıfa ayrılabilen veri setinin sınıflandırılması amacıyla kullanılan destek vektör makinelerinin geliştirilmesiyle birlikte daha fazla sınıflı ve doğrusal

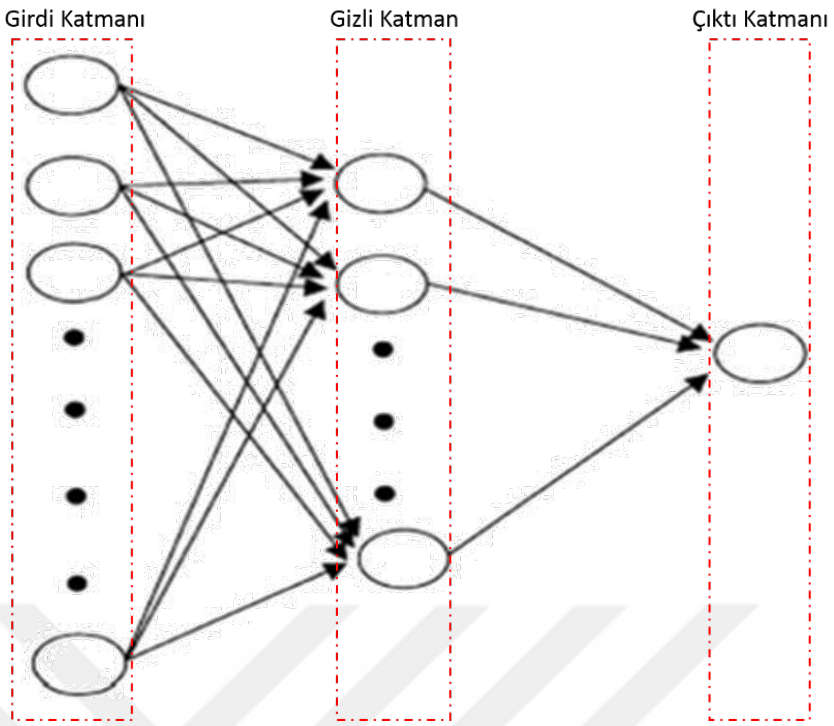
olmayan veri setlerinin sınıflandırılması da mümkün olmuştur. Destek vektör makineleri hakkında daha fazla bilgi Üstüner [111]'de bulunmaktadır.

Uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kullanımıyla [113] bilinmekte olan destek vektör makineleri Bretar vd. [73], Mallet [85], Zhou vd. [91], Mallet vd. [105], Samadzadegan vd. [114] ve Mallet vd. [115] tarafından tam dalga formu LiDAR verilerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılmıştır. Zhou vd. tarafından [91] de tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun DVM yöntemi ile sınıflandırma işleminde eğitim verisi olarak nokta bulutunun nokta konumları, nokta yoğunluğu, dönüş genişliği değerleri ve geri saçılmaların enine kesiti kullanılmıştır. Sınıflandırma sonucunda nokta bulutunu yer, ağaç, bina ve tarım arazisi olmak üzere 4 sınıfa ayırmıştır.

4.1.2.4 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA) sınıflandırma yönteminin temelleri, nörobiyolog W.S. McCullogh ve matematikçi W.A. Pitts tarafından 1943 yılında gerçekleştirilen çalışmaya dayanmaktadır. Bu yöntemin çalışma prensibi insan beyninin işleyişini taklit etmektedir. YSA algoritmalarının nöronları arasındaki ilişki karmaşık olduğundan anlaması oldukça zordur.

Yapay sinir ağ modelleri katman sayılarına göre tek katmanlı ve çok katmanlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek katmanlı modeller yalnızca girdi ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Çok katmanlı modellerde tek katmanlı modellere ek olarak gizli katman bulunmaktadır. Girdi katmanında bulunan her bir veri gizli katmanda bulunan elemanların hepsine bağlı olmak zorundadır. Bunun yanı sıra nöronlar arasındaki ilişkiye göre YSA modelleri ileri beslemeli ve geri beslemeli olarak iki gruba ayrılmaktadır. İleri beslemeli YSA'nda iş akışının yönü tektir. Girdi katmanından alınan bilgi gizli katmana, gizli katmandan alınan bilgiler ise çıktı katmanına iletilmektedir. Geri beslemeli YSA'nın iş akışı ise hem ileri yönde hem de geri yönde gerçekleşmektedir. Şekil 4.6'da çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA modeli verilmektedir.

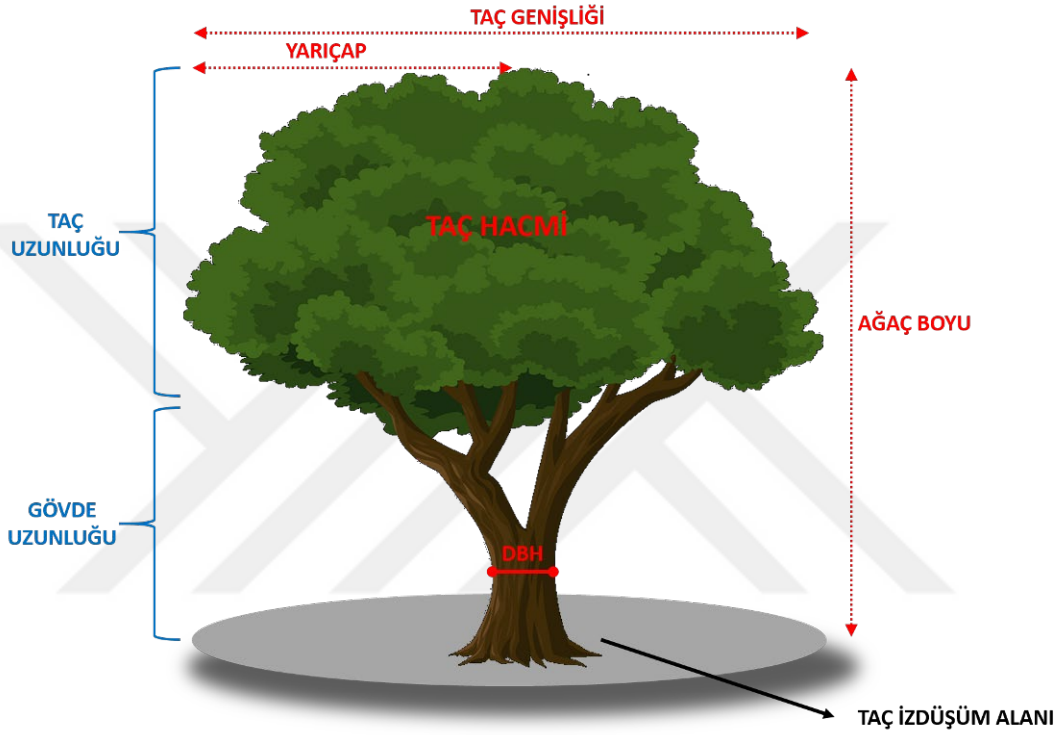


Şekil 4. 6 Çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı

Kentsel alanda bitki örtüsünün tespit edilebilmesi için Avusturya'nın Viyana kentinde Höfle vd. tarafından [45] de ağaç türlerinin segment tabanlı sınıflandırma potansiyeli araştırılmıştır. Sınıflandırma için nSYM (Normalize Edilmiş Sayısal Yükseklik Modeli) 'ne uygulanan kenar tabanlı segmentasyon ile elde edilen poligonlar kullanılmaktadır. Veri setini segmentlere ayırdıktan sonra yüksek nokta yoğunluğuna sahip (50 nokta/m^2) tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun dalga formu analizi ile elde edilen öznitelikleri kullanılarak her bir segmente bir dizi özellik tanımlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre Höfle vd. [42]'de kentsel alanda bitki örtüsü olan ve bitki örtüsü olmayan olmak üzere 2'li sınıflandırmayı karar ağacı ve yapay sinir ağları sınıflandırma yöntemleri ile gerçekleştirimiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Zengin özelliklere sahip segmentler her iki sınıflandırma yönteminde de girdi olarak kullanılmıştır. Tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun yanlızca radyometrik özellikleri yani tam dalga formu öznitelikleri kullanılarak gerçekleştirilen karar ağacı sınıflandırıcısı ≤%72 ve yapay sinir ağları sınıflandırıcısı ≤%95 doğruluk göstermiştir. Bu nedenle yalnızca radyometrik özellikler kullanmanın yeterli olmayacağı düşünülmüştür.

4.2 Tam Dalga Formu LiDAR Verilerinin Ormancılık Uygulamalarında Kullanımı

Orman sağlığının ve ormanın verimliliğinin belirlenebilmesi için orman özelliklerinin ölçülmesi oldukça önemlidir [116]. Ağacın konumu, yüksekliği, taç genişliği, taç hacmi, taç uzunluğu, gövde çapı "diameter-at-breast-height" (DBH) ve gövde uzunluğu vb. özellikler ağacın ölçülebilir özellikleri arasında yer almaktadır. Bu özelliklerin bir ağaç üzerinde gösterimi Şekil 4.7'de verilmektedir.



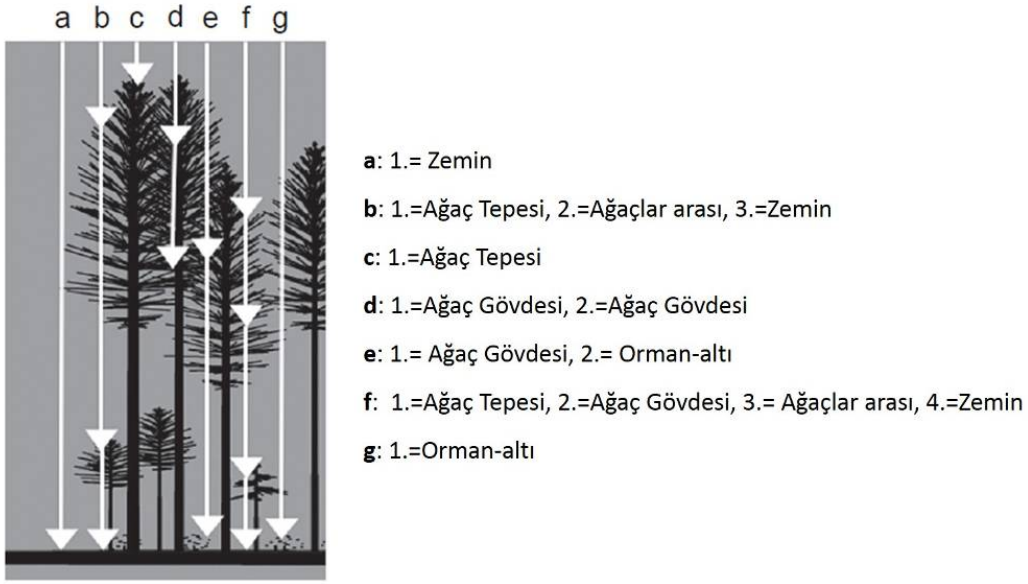
Şekil 4. 7 Bir ağacın ölçülebilir özellikleri

Klasik haritacılık yöntemleri kullanılarak ormanda yer alan her bir ağaca ait bu özelliklerin ölçülmesi hem insan gücü hem zaman hem de maliyet açısından mümkün değildir. Hava araçları veya uydu platformlarına monte edilen LiDAR sensörlerinin kullanımı ile orman özelliklerinin ölçümünün gerçekleştirilmesi bu probleme bir çözüm getirmektedir. Hava araçları ve uydu platformlarına monte edilen LiDAR sensörleri ile belirli bir zaman aralığında yeryüzüne ait düzenli ölçümler yapılabilmektedir. Bu ölçümler ile yeryüzünde meydana gelen değişimler izlenebilmektedir. Uçak veya helikopter gibi hava araçları ile gerçekleştirilen LiDAR ölçümleri, uydu platformlarına göre daha maliyetli olsa da daha az atmosferik zayıflama söz konusudur [1]. Bu nedenle hava LiDAR teknolojileri ormancılık uygulamalarında oldukça popüler bir kullanım alanı bulmuştur.

4.2.1 Tam Dalga Formu LiDAR Sensörünün Ormancılık Uygulamalarına Olan Katkısı

Ayrık dönüşlü LiDAR sistemleri ile ormanaltı topoğrafyasının ölçülebilmesi için ağaçlar arasında büyük boşlukların olması gerekmektedir. Çok yoğun ormanlarda ağaçlar arasında büyük boşluklar bulunmuyorsa, ayrık dönüşlü LiDAR sistemlerinin kullanımıyla gerçekleştirilen ölçümlerde lazer sinyali ağacın yapraklarını geçerek yeryüzü topoğrafyasına ulaşamamaktadır. Bu koşullarda geri dönen lazer sinyallerinin tamamının ağacın yaprak veya dallarından geldiği söylenebilmektedir [117]. Tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemlerinde ise iletilen lazer sinyali ağacın yapraklarına nüfuz ederek yeryüzü topoğrafyasına ulaşabilmekte ve geri dönen tüm sinyaller kaydedilmektedir [50]. Bu yeteneğinden dolayı tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemlerinde, ayrık dönüşlü sistemlerde yaşanan sorun yaşanmamaktadır.

Ormanlık alanlarda, lazer tarayıcıdan gönderilen lazer enerjisinin bir kısmı ağaç tepeciklerinden geri dönerken, enerjinin kalanı dallara, gövdeye, çalılara ve en son ormanaltı topoğrafyasına ulaşarak geri dönmektedir [50]. Şekil 4.8’ de ormanın farklı katmanlarına iletilen 7 adet farklı LiDAR sinyalinin geri dönüşleri verilmektedir.



Şekil 4. 8 Ormanın farklı katmanlarına iletilen yedi adet LiDAR sinyali [72]

Dubayah ve Drake [118] de ağaç yüksekliğinin Şekil 4.8’de görüldüğü üzere hava LiDAR dışında herhangi bir Uzaktan Algılama yöntemiyle doğrudan ölçülemeyeceğini göstermiştir. Kaydedilen LiDAR sinyalleri kullanılarak, meşçere parametrelerinin bir

kısmı doğrudan elde edilebilirken bir kısmı için matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır [119]. Doğrudan veya modelleme ile elde edilen meşçere parametrelerinden ilerleyen kısımda bahsedilmektedir.

4.2.2 Meşçere Parametrelerinin LiDAR ile Elde Edinimi

Ormanlık alanlarda bitki örtüsünün çeşitli katmanlarından geri dönen lazer sinyallerinden birincil ve onu takip eden dönüşler doğrudan veya modelleme yoluyla kullanıcıya ağacın boyunu, çapını, hacmini, tepe çatısının genişliğini vb. temel meşçere parametrelerini hesaplama olanağı sağlamaktadır. Çizelge 4.1'de meşçere parametreleri ve bu parametrelerin LiDAR ölçümleriyle olan ilişkisi verilmektedir.

Çizelge 4. 1 Meşçere parametrelerinin LiDAR ölçümleriyle olan ilişkisi ([118]'den uyarlanmıştır)

Meşçere Parametreleri	LiDAR ile Elde Edinimi
Meşçere Yüksekliği	Doğrudan
Meşçerenin Düşey Profili	Doğrudan
Ormanaltı Topoğrafyası	Doğrudan
Yerüstü Biyokütle	Model ile
Bazal Alan	Model ile
Ortalama Gövde Çapı	Model ile
Düşey Yaprak Profili	Model ile
Meşçere Hacmi	Model ile
Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli	Model ile

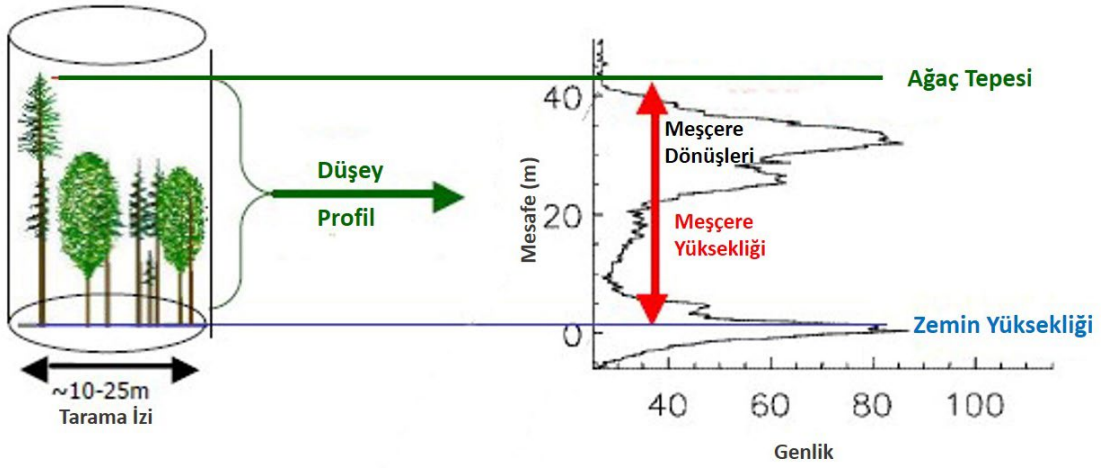
4.2.2.1 Doğrudan Elde Edilen Meşçere Parametreleri

Meşçere yüksekliği diğer bir deyişle ağaçların boyu, meşçere çatısı ile zemin arasındaki yüzeyin düşey profili ve ormanaltı topoğrafyası LiDAR ile doğrudan elde edilebilen temel meşçere parametreleridir. Bu parametreler LiDAR ölçümleri ile doğrudan elde

edilemeyen meşçere parametrelerinin çoğunun modellenmesi için kullanılmaktadır. Bitki örtüsü indeksleri hesaplanırken de çoğunlukla ağaç yükseklikleri ile pasif optik sensör birlikte kullanılmaktadır [118].

Meşçere yüksekliği ile diğer meşçere parametreleri arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Meşçere yüksekliğinin hesaplanması, biyokütle tahmini ve ağaçların karbon depolama seviyelerinin hesaplanması için oldukça önemlidir. Bu nedenle öncelikli olarak meşçere yüksekliğinin diğer bir deyişle ağaç yüksekliklerinin doğru ölçülmesi gerekmektedir [118]. Ağacın en tepe noktasından zemine kadar olan mesafe ile ağacın yüksekliği ölçülmektedir. LiDAR ile ağaç yüksekliğinin hesaplanması ise temelde ağacın konumunun belirlenmesine dayanmaktadır. Bu nedenle, LiDAR ölçümü ile elde edilen lazer noktalarının çoklu dönüş seviyelerinden faydalanılmaktadır.

Tam dalga formu LiDAR sensörleri bitki örtüsünün çeşitli katmanlarından geri dönen tüm dönüş sinyallerini kaydederek meşçere bileşenlerini (yaprak, dal ve gövde) ölçmektedir. Meşçere bileşenlerinden ve orman toprağından geri dönen dönüşler Şekil 4.10'da görülen dalga formuna neden olmaktadır. Bu dalga formunun düşey profili meşçere bileşenlerinin dağılımını vermektedir [118]. Ormanlık alanlarda bitki örtüsünün çeşitli katmanlarından geri dönen bu lazer sinyalinin dalga formu incelendiğinde ilk dönüşün dalga formunun orta noktasının düşey profildeki konumu ağacın en tepe noktasının konumunu, son dönüşün dalga formunun orta noktası ise zeminden geri döndüğü için ağaç gövdesinin toprağa değdiği noktanın konumunu vermektedir [118]. Aynı lazer sinyaline ait ilk ve son dönüşlerin yükseklikleri kullanılarak ağacın boyu (Şekil 4.9) doğrudan elde edilebilmektedir [1].



Şekil 4. 9 Kaydedilen bir dalga formunun düşey profili ([118]'den uyarlanmıştır)

Meşçere yüksekliği ve yüzeyin düşey profilinin doğrudan LiDAR ile ölçümü, lazer sinyallerinin ormanaltı topoğrafyasına ulaşabildiği sürece gerçekleşebilmektedir [119].

4.2.2.2 Modelleme ile Elde Edilen Meşçere Parametreleri

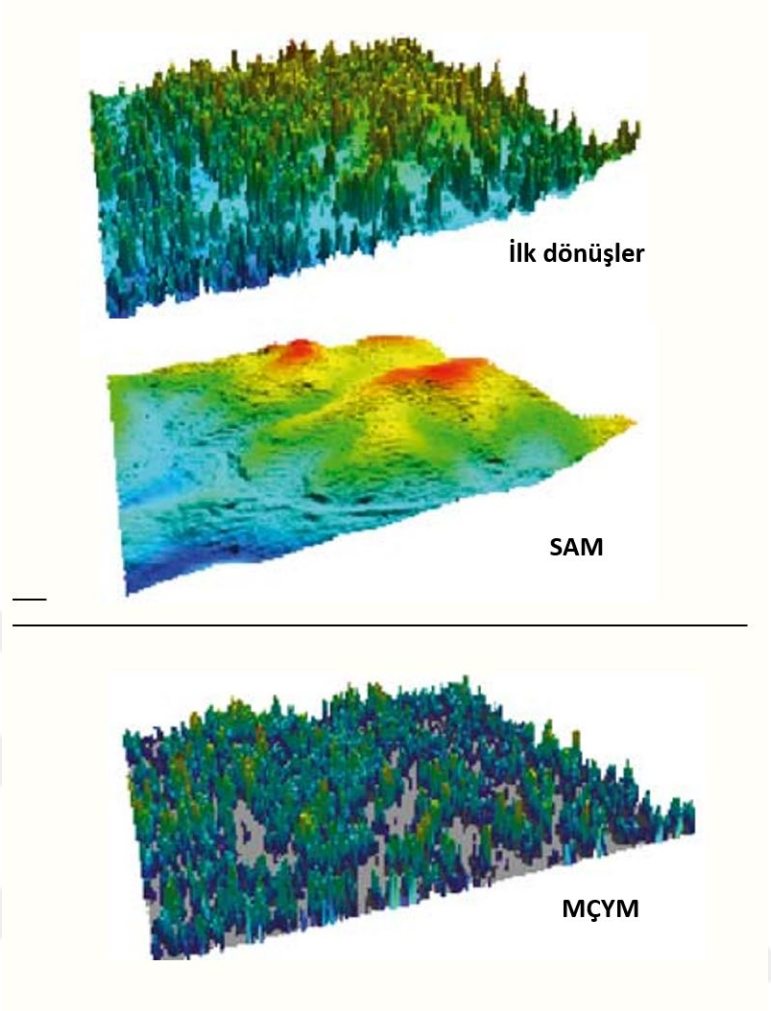
Yerüstü biyokütle, bazal alan, ortalama gövde çapı, düşey yaprak profili, meşçere hacmi ve Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli gibi diğer parametreler LiDAR ölçümleri ile doğrudan elde edilen meşçere parametrelerinin modellenmesi veya çıkarım yapılması ile elde edilmektedir.

Ormanlık bir alanda ağaçların biyokütle hesabı 'yerüstü biokütle' olarak adlandırılmaktadır. Biyokütle LiDAR ile doğrudan ölçülebilen bir meşçere parametresi değildir. Biyokütle tahmini için yoğunluğun ve hacmin bilinmesi gerekmektedir [1]. Uzun ağaçlar daha fazla odun hacmine sahip olduğu için aynı türe ait ve aynı çapta olan daha kısa ağaçlara göre daha fazla yaprak ve köke sahiptirler. Ağaç yüksekliğinin artmasıyla doğru orantılı olarak gövde çapı artacağından, ağacın hacmi ve kütlesi de artmaktadır [118]. Ağaç yüksekliği ve ağacın gövde şekli vb. gibi özellikler göz önünde bulundurularak biyokütle tahminlerinin doğruluğu artırılabilmektedir [120].

'Diameter at Breast Height' kelimelerinin kısaltmasından oluşan DBH, literatürde ağacın gövde çapı olarak tanımlanmaktadır. Ortalama gövde çapının belirlenmesi için 3-boyutlu nokta bulutu içerisinde ağaç gövdesine ait yeterli yoğunlukta noktanın var olması gerekmektedir. Bir ağacın gövde çapı en kolay şekilde, ağaç gövdesinin zeminden 1.3 m

yükseklikteki noktası referans alınarak hesaplanmaktadır [1], [116]. Bu nedenle tam dalga formu LiDAR nokta bulutununda yer alan ağaçların ortalama gövde çapları meşçere yüksekliğinin modellenmesi ile elde edilmektedir. Sonuç olarak, ortalama gövde çapı, bazal alan, biyokütle vb. meşçere parametrelerinin hesaplanabilmesi için meşçere yüksekliğinin doğru bir şekilde ölçülmesi oldukça önemlidir [121].

Lazer sinyallerinin çoklu dönüş seviyelerinden son dönüşlerin zeminden geri döndüğü varsayıldığı için bu son dönüşler Sayısal Arazi Modeli üretiminde kullanılmaktadır [50]. Yeryüzü topoğrafyasından geri dönen lazer sinyallerinin çoklu dönüş seviyelerinden birincil dönüşler, ağaç taçlarının en tepe kısımlarından geri döndüğü için birincil dönüşler filtrelenerek Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli oluşturulmaktadır. LiDAR nokta bulutunun yüksekliği deniz seviyesinden olan yükseklik olduğu için Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli üretilmeden önce ilk dönüşlerden oluşan nokta bulutunun Sayısal Arazi Modeli'ne göre normalize edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.10'da Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli'nin üretimi görsel olarak ifade edilmektedir.



Şekil 4. 10 Meşçere çatısı yükseklik modeli üretimi ([122]'den uyarlanmıştır)

Buraya kadar anlatılan temel meşçere parametrelerinin yanı sıra Yaprak Yüzey Alanı İndeksi "Leaf Area Index" (LAI) gibi gelişmiş meşçere parametrelerinin hesaplanması için de LiDAR ölçümleri kullanılmaktadır [116]. LAI, birim yüzey alanı (zemin yüzeyi) başına düşen tek taraflı toplam yeşil yaprak alanı olarak tanımlanmaktadır [116]. LAI hesabı eşitlik (4.1)'de verilmektedir. A_i, i yaprağının tek tarafının alanını, A_{LAI} ise LAI'nın hesaplanacağı yerin alanını ifade etmektedir [116].

$$\mathrm{LAI} = \frac{\sum_i \mathrm{A_i}}{\mathrm{A_{LAI}}} \tag{4.1}$$

İğne yapraklı ağaçlar için LAI hesabında, yaprağın tek tarafının alanının kullanılması mümkün değildir [1]. Chen ve Black [123] de LAI hesaplanırken öngörülen yaprağın toplam alanını kullanılmasının faydalı olacağı ifade edilmiştir. Jonckheere vd. [124] de

ise LAI parametresinin hesaplanmasında yaprağın tek tarafının alanının kullanılmasının biolojik olarak hiç bir önemi olmayacağı vurgulanmaktadır.

BÖLÜM 5

TAM DALGA LiDAR VERİLERİ İLE BİTKİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

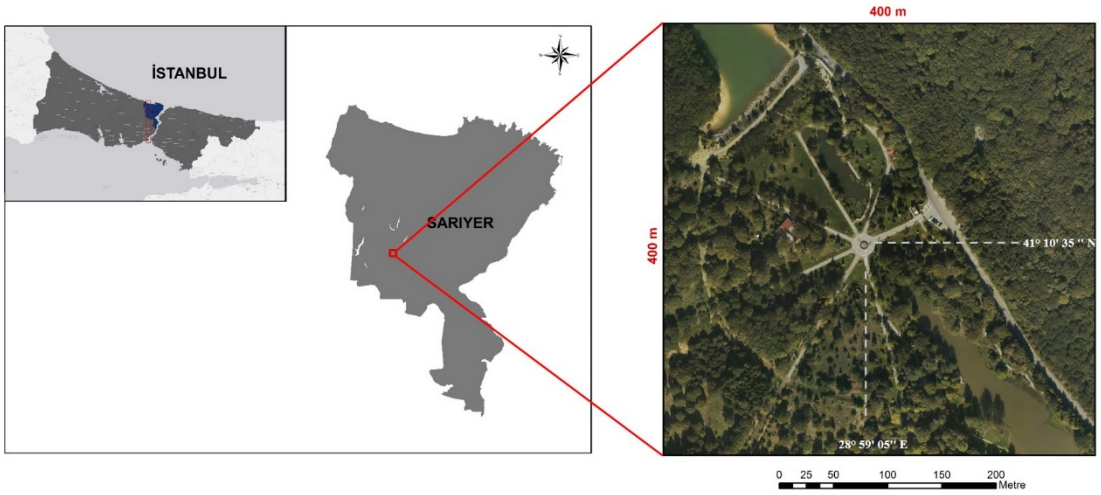
Bu tez çalışmasında tam dalga formu LiDAR nokta bulutunda yer alan bitki örtüsü noktalarının diğer yeryüzü objelerinden ayrılarak doğru sınıfa atanması hedeflenmektedir. Tam dalga formu ham LiDAR nokta bulutunun dalga formu analizi ve sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen tüm süreçler ve elde edilen ürünler bu bölümde anlatılmaktadır.

İlk olarak, bu tez çalışmasında kullanılan çalışma alanının özellikleri ve çalışma alanı içerisinde doğal ve doğal olmayan yeryüzü objelerini temsil etmeleri bakımında seçilen test alanları '5.1 Çalışma Alanı' başlığı altında tanımlanmıştır. '5.2 Tam Dalga Formu LiDAR Verisinin Elde Edilmesi' başlığı altında ise kullanılan tam dalga formu LiDAR verisinin elde edinimi, kullanılan lazer tarama sisteminin teknik özellikleri ve uçuş parametreleri anlatılmaktadır. Tam dalga formu ham LiDAR nokta bulutunun veri ön-işleme işlem adımları '5.3 Ham Tam Dalga Formu LiDAR Veri Ön-İşleme' başlığı altında sıralanmıştır. Tam dalga formu ham LiDAR nokta bulutunun dalga formu analizi Gauss Ayrıştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gauss Ayrıştırması sonucunda dalga formu öznitelikleri elde edilmiştir. LiDAR nokta bulutunun tam dalga formu analizi ve dalga formu özniteliklerinin çıkarılması ile birlikte LAS 1.4 formatında nokta bulutunun oluşturulması işlemleri de bu kısımda gerçekleştirilmiştir. LAS 1.4 nokta bulutunun kapsadığı parametreler ve bu parametrelerin kullanımının sınıflandırmaya sağladığı katkılar ile birlikte nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen işlem adımları '5.4 Sınıflandırma' başlığı altında toplanmıştır. Bu kısımda dalga formu

özniteliklerinden olan dönüş genişliği değeri kullanılarak nokta bulutunun nokta tabanlı sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Farklı yeryüzü objelerinden geri dönen lazer sinyallerini inceleyebilmek üzere seçilen test alanları '5.4.1 Test Alanlarının Seçimi' başlığı altında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. '5.4.2 Test Alanlarından Elde Edilen Sonuçlara Göre Sınır Değerlerin Belirlenmesi' başlığı altında ise incelenen her bir test alanından elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek karar ağacı sınıflandırıma yaklaşımının iç düğümlerini belirleyen sınır değerler ortaya konmuştur. Tasarlanan karar ağacı '5.4.3 Karar Ağacı Tasarımı' başlığında ve bu karar ağacı sınıflandırma yaklaşımının çalışma alanına uygulanması '5.4.4 Çalışma Alanına Ait Nokta Bulutunun Sınıflandırılması' başlığında verilmiştir. Uygulanan karar ağacı sınıflandırma yaklaşımının doğruluğu '5.4.5 Sınıflandırmanın Doğruluğu' başlığı altında incelenmiştir. Bitki bitki örtüsü olan ve bitki örtüsü olmayan nokta bulutları kullanılarak SAM ve MÇYM üretimi ise '5.5 Bitki Örtüsü Olan ve Bitki Örtüsü Olmayan Nokta Bulutları ile Elde Edilen Ürünler' başlığı altında anlatılmıştır. Sınıflandırma sonucunda bitki örtüsüne ait olmayan nokta sınıfı içerisinde zemine ait nokta bulutunun belirlenmesi ve zemin nokta sınıfı kullanılarak SAM üretimi '5.5.1 Sayısal Arazi Modeli Üretimi' başlığı altında ve bitki örtüsü nokta sınıfı içerisinde lazer sinyalinin çoklu dönüş seviyelerinden ilk dönüşler kullanılarak MÇYM üretimi ise '5.5.2 Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli Üretimi' başlığı altında anlatılmıştır.

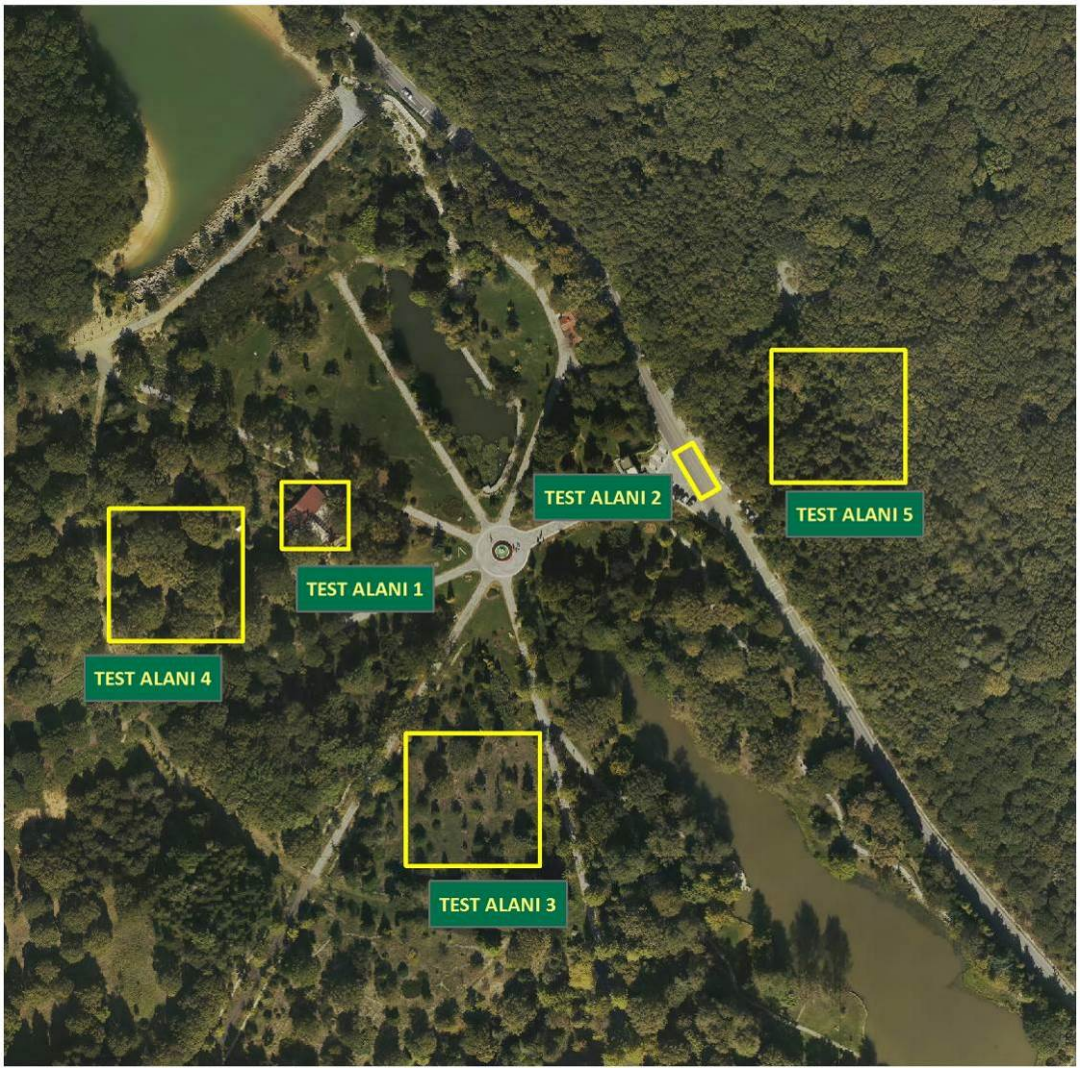
5.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak İstanbul ili Avrupa yakası Sarıyer ilçesinde, Kemerburgaz-Bahçeköy yolu üzerinde Belgrad Ormanı'nın güneydoğusunda yer alan Atatürk Arboretumu ve çevresine ait 400 m x 400 m boyutlarında bir alan seçilmiştir (Şekil 5.1). 28°57'21"-28°59'26" doğu boylamları ile 41°10'52"-41°11'57" kuzey enlemleri arasında yer alan Atatürk Arboretumu, Türkiye'nin ilk arboretumudur [125]. Çalışma alanındaki arazinin yer kotu 114.98 m ile 143.44 m arasında değişmektedir. Çalışma alanının kuzey batısında hafif bir eğim bulunmaktadır.



Şekil 5. 1 Çalışma alanı

Farklı yeryüzü objelerinden geri dönen lazer sinyallerinin tam dalga formu özniteliklerini incelemek üzere çalışma alanı içerisinde beş adet test alanı seçilmiştir. Bu seçim esnasında asfalt yol, bina çatısı ve bitki örtüsü olmak üzere farklı yeryüzü objelerinin değerlendirilebilmesi amacıyla kentsel alan ve bitki örtüsünü temsil edecek bölgeler göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere seçilen Test Alanlarından 2 tanesi kentsel alana ait detayları, 3 tanesi ise bitki örtüsünü temsil etmektedir.



Şekil 5. 2 Test alanları

5.2 Tam Dalga Formu LiDAR Verisinin Elde Edilmesi

Çalışma alanı olarak seçilen bölgeye ait kullanılan ham LiDAR verileri İstanbul Büyükşehir Belediyesi BİMTAŞ A.Ş. tarafından "İstanbul İl Sınırları İçinde Hava LiDAR Teknolojisiyle Elde Edilecek LiDAR Verilerinden Sayısal Yüzey Modelleri ve 3 Boyutlu Kent Modellinin Üretilmesi İşi" kapsamında 7 Ekim 2012 tarihinde uçuşu gerçekleştirilen ham LiDAR verileridir. Atatürk Arboretumu'na ait veriler Şekil 5.3'de görülen 'Riegl LMS-Q680i' lazer tarama cihazı ile kaydedilmiştir. Saniyede 400 000 Hz (400kHz) lazer sinyali yayımlayan Riegl LMS-Q680i, yeryüzü objesinden geri dönen lazer sinyallerinin tüm dönüş dalga formlarını sayısal olarak ölçme ve kaydetme yeteneğine sahiptir. Bell 206 JetRanger Light Utility Helikopteri ile 500 m uçuş yüksekliğinde ve 80 knot (41.15 m/sn) uçuş hızında veri alımı gerçekleştirilmiştir. Kuzeyde Karadeniz sahilinden başlayarak gündeyde Marmara

Denizi'ne kadar olan uçuş kolonu yaklaşık 30 km uzunluğundadır. Uçuş doğrultusu kuzeyden güneye doğru olacak şekilde veri alımı gerçekleştirilerek nokta yoğunluğu 16 nokta/m^2 sağlanmıştır. Lazer tarama sistemine ait teknik özellikler Çizelge 5.1'de yer almaktadır.



Şekil 5. 3 Riegl LMS-Q680i lazer tarama cihazı [126]

Çizelge 5. 1 Uçuş parametreleri ve lazer tarama sistemi teknik özellikleri

Lazer Tarayıcı	**Riegl LMS-Q680i**
Tarama Mekanizması	Dönel Poligon Aynası
Tarama Dokusu	Paralel Tarama
Tarama Açısı	±30° = toplam 60°
Uçuş yüksekliği	~ 1500 ft = ~500 m
Lazer dalga boyu	1550 nm =1.5 µm
Uçuş hızı	~80knot = 148km/sa = 41m/sn
Yansıyan Işının Iraksaması	≤ 0.5mrad
Tarama izi	30 cm
Sinyal Genişliği	4 ns
Sinyal Enerjisi	8 mJ
Örnekleme Aralığı	1 ns

5.3 Ham Tam Dalga Formu LiDAR Veri Ön-İşleme

Veri ön-işleme sürecine başlamadan önce hava aracına monte edilmiş olan GPS-IMU sisteminin kaydettiği anlık konum (X, Y, Z), açısal dönüklük (Roll, Pitch ve Yaw) ve zaman bilgilerinin işlenmesi sonucunda GPS-IMU sistemine ait konum ve dönüklük verileri POF "position and orientation file" elde edilmiştir. (Şekil 5.4). Bu işlem için veri işleme aşamasında GRAFNAV yazılımı ve AeroOffice yazılımı kullanılarak Kalman filtrelemesi işlemi ile GPS-IMU verileri birlikte değerlendirilmiş LiDAR veri kaydı sırasında konum ve dönüklük verileri elde edilmiştir [127].

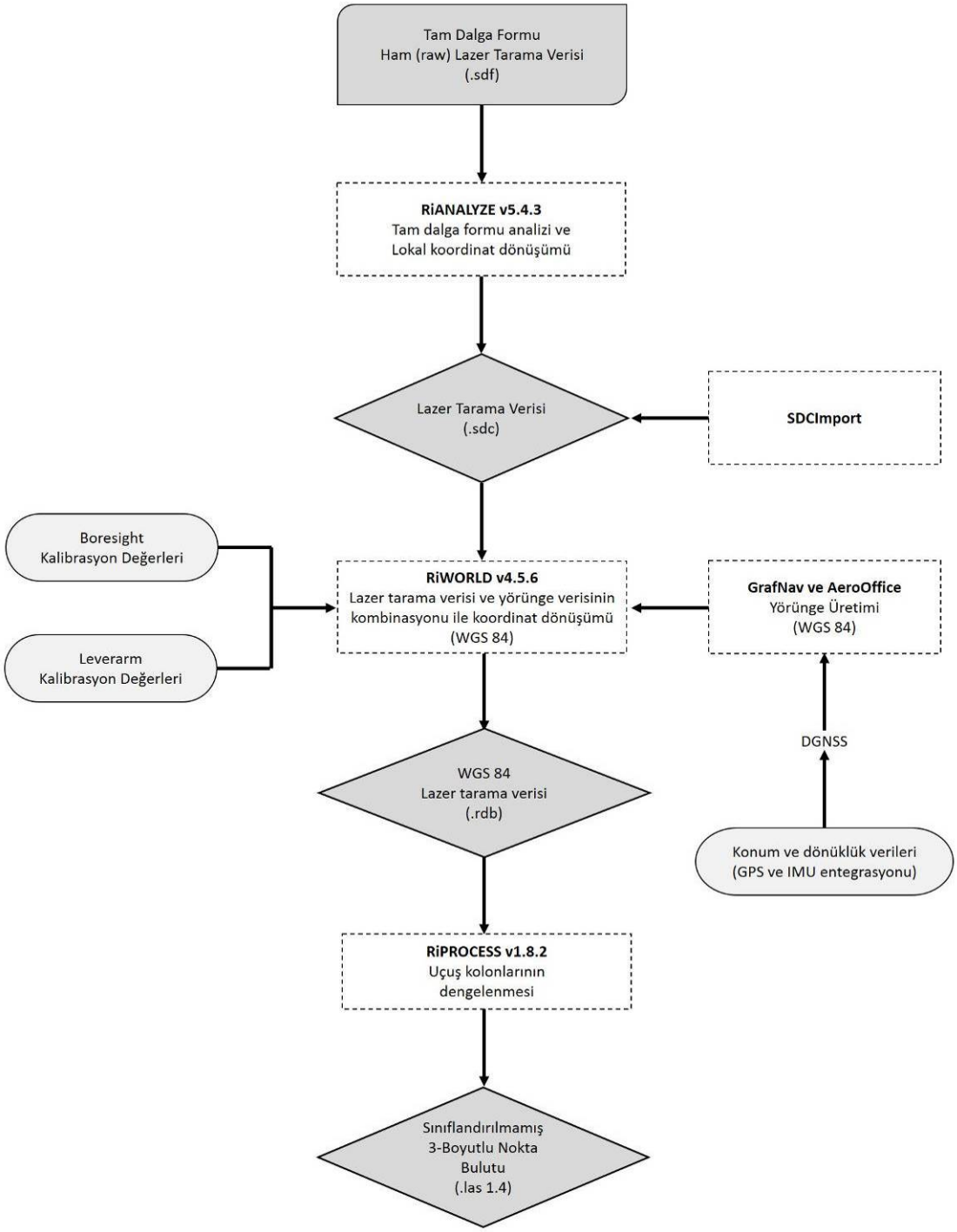
sariyer.txt

	Time[s]	Easting[m]	Northing[m]	Height[m]	Roll[deg]	Pitch[deg]	Yaw[deg]
2	31290.007120	414706.1432	4570992.2341	624.0553	0.505938129500	-2.148621249944	177.155776005238
3	31290.011024	414706.1351	4570992.0905	624.0587	0.532300304621	-2.129783006385	177.148411665112
4	31290.014928	414706.1269	4570991.9470	624.0621	0.551844723523	-2.105143228546	177.139468593523
5	31290.018833	414706.1186	4570991.8034	624.0654	0.572979021817	-2.084003733471	177.131703263149
6	31290.022737	414706.1104	4570991.6599	624.0688	0.589137235656	-2.065420048311	177.128731710836
7	31290.026641	414706.1021	4570991.5163	624.0720	0.601130146533	-2.053669877350	177.132365936413
8	31290.030545	414706.0939	4570991.3727	624.0753	0.611805003136	-2.048830501735	177.139319982380
9	31290.034449	414706.0856	4570991.2291	624.0785	0.622088173404	-2.048125835136	177.145026968792
10	31290.038353	414706.0774	4570991.0856	624.0818	0.628130938858	-2.054259376600	177.147267786786
11	31290.042258	414706.0691	4570990.9420	624.0851	0.622926363721	-2.053378773853	177.146740313619
12	31290.046162	414706.0609	4570990.7985	624.0884	0.618551848456	-2.052368922159	177.144354656339
13	31290.050066	414706.0527	4570990.6550	624.0917	0.624796953052	-2.056040279567	177.140934420750
14	31290.053970	414706.0445	4570990.5115	624.0951	0.641875332221	-2.053044084460	177.136603742838
15	31290.057874	414706.0363	4570990.3679	624.0986	0.673524225131	-2.037476459518	177.130560725927
16	31290.061778	414706.0282	4570990.2244	624.1020	0.707566151395	-2.013575881720	177.121564764529
17	31290.065682	414706.0200	4570990.0808	624.1055	0.740060526878	-1.992583153769	177.109920373186
18	31290.069587	414706.0117	4570989.9373	624.1089	0.770130772144	-1.977921193466	177.098860032856
19	31290.073491	414706.0035	4570989.7937	624.1122	0.788681348786	-1.960048042238	177.092771166936
20	31290.077395	414705.9952	4570989.6502	624.1155	0.801116572693	-1.952085569501	177.093221442774
21	31290.081299	414705.9869	4570989.5066	624.1188	0.803725691512	-1.958030685782	177.097086338326
22	31290.085203	414705.9786	4570989.3630	624.1221	0.805518748239	-1.966244280338	177.099278289825
23	31290.089107	414705.9703	4570989.2195	624.1254	0.808865558356	-1.968400022015	177.097508199513
24	31290.093012	414705.9621	4570989.0759	624.1288	0.806308155879	-1.953491549939	177.092915922403
25	31290.096916	414705.9539	4570988.9323	624.1321	0.807484807447	-1.938463132828	177.087559802458
26	31290.100820	414705.9456	4570988.7887	624.1355	0.814977977425	-1.925839399919	177.082499396056
27	31290.104724	414705.9374	4570988.6452	624.1389	0.834777625278	-1.923481738195	177.078060591593
28	31290.108628	414705.9292	4570988.5016	624.1424	0.854907017201	-1.919266059995	177.073540650308
29	31290.112532	414705.9210	4570988.3581	624.1458	0.872705904767	-1.903121424839	177.066905116662
30	31290.116437	414705.9128	4570988.2145	624.1492	0.891270730644	-1.889432100579	177.056845994666

Şekil 5. 4 Yörünge verisinin içeriği

Bu tez çalışması kapsamında çalışma bölgesine ait LiDAR verilerinin ön-işleme (pre-process) aşamaları Riegl firması yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. LiDAR cihazından sayısal ortama aktarılan ham LiDAR nokta bulutu verisi ".sdf" (sample data file) formatındadır. RiAnalyze yazılımı ile ".sdf" formatındaki ham verinin tam dalga formu analizi Gauss Ayrıştırma Yöntemi [128] kullanılarak yapılmış ve bir sonraki aşama için kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu analiz ile ".sdc" (sample data coordinate) formatındaki veriler elde edilmiştir. SDC dosyası, lazer sinyalinin kırınım konisi içerisinde yer alan her bir yeryüzü objesine ait mesafe ve tarama açısı bilgileriyle birlikte dönüş

sinyalinin genlik ve genişlik değerlerini ve bir lazer ölçümü içerisinde yer alan toplam hedef sayısına ait bilgileri içermektedir [129]. Veri alımı öncesinde test uçuşları ile elde edilen sistem kalibrasyonu değerleri ile yörünge verisi birlikte kullanılarak lokal koordinatlardaki SDC fortmatlı nokta bulutu RiWORLD yazılımı kullanılarak yeryüzü koordinatlarına (WGS 84) getirilmiştir [130]. Son olarak RiPROCESS yazılımında uçuş kolonu dengelemesi sonucunda nokta bulutu georeferanslandırılarak bir sonraki aşama için hazır hale getirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında çalışma alanına ait LiDAR veri ön-işleme için işlem adımlarını içeren iş akışı Şekil 5.5' de verilmiştir.



Şekil 5. 5 Tam Dalga Formu LiDAR verisi ön-işleme iş akışı

Veri ön-işleme adımlarının sonucunda tüm tam dalga formu öznitelikleriyle birlikte elde edilen nokta bulutu verisine ait yükseklikler elipsoidal yüksekliklerdir. Bu veriler, çalışma alanına ait berlirlenen ondülasyon değeri (yaklaşık -36.70 m) kullanılarak RiPROCESS yazılımında 3° aralıklı dilim orta meridyeni 30° olan TM (Transversal Merkator) projeksiyonunda ve ITRF-96 (TUREF "Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi") datumunda

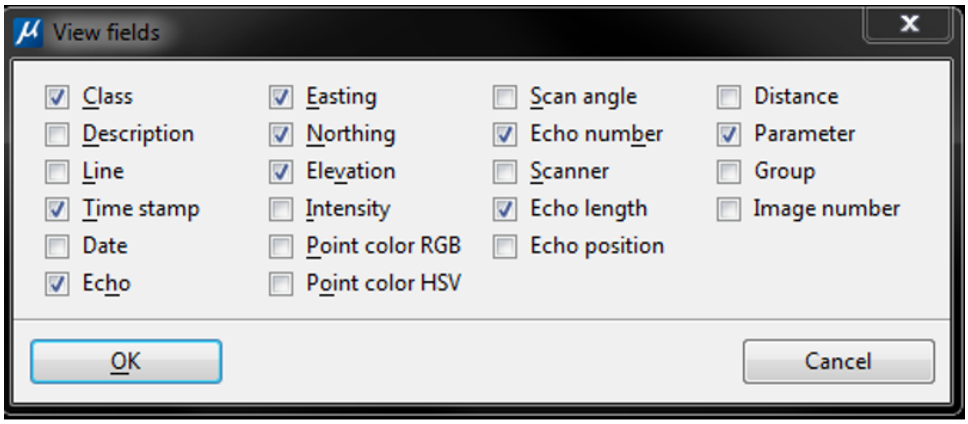
ortometrik yüksekliğe dönüştürülerek “LAS 1.4” formatında nokta bulutu ile birlikte “.wdp” uzantılı dosya oluşturularak kaydedilmiştir. “.wdp” dosyası dalga boyu bilgilerini “Waveform Data Packet” içermektedir [131]. LAS 1.4 ve WDP verileri anlık GPS zamanı bakımından birbirleriyle ilişkilidir. İlerleyen bölümlerde, bu iki veri birlikte kullanılmıştır.

Elde edilen nokta bulutu ile yapılacak sınıflandırma çalışmaları için temel olarak Bentley MicroStation CAD platformu üzerinde geliştirilmiş olan TerraSolid yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımın alt modüllerinden TerraScan ve TerraModel kullanılarak oluşturulan temel ürün ve süreçler ilerleyen bölümlerde detaylandırılmıştır.

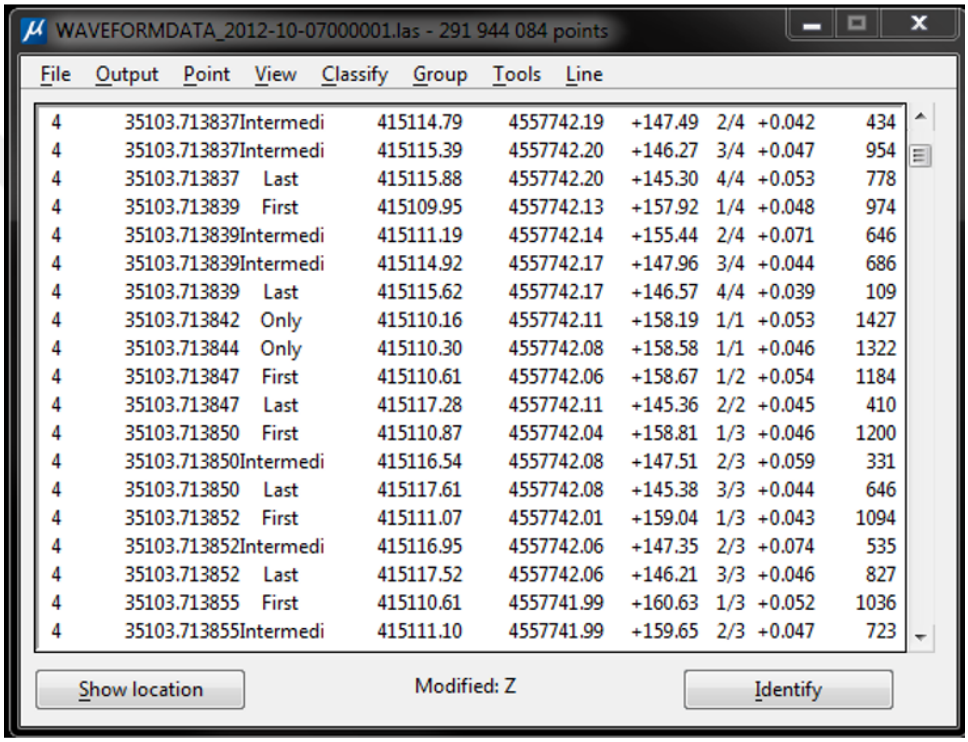
5.4 Sınıflandırma

Tam dalga formu 3-boyutlu LiDAR nokta bulutunun sınıflandırma aşamaları TerraSolid yazılımının TerraScan modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutunun sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmeden önce LAS 1.4 verisi ile yörünge verisi ilişkilendirilmiştir.

Yaklaşık 30 km uzunluğundaki uçuş kolonunda toplam 291 944 084 lazer noktası bulunmaktadır. Her bir lazer noktası için LAS 1.4 nokta bulutunun kapsadığı özelliklerin TerraScan’deki karşılıkları Şekil 5.6’ da gösterilmektedir. Verinin alındığı GPS zamanını “time stamp”, çoklu dönüş seviyelerinin sözel “echo” ve sayısal “echo number” ifadelerini, noktaya ait “X,Y,Z” koordinatlarını “easting, northing, elevation”, yansıyan sinyalin dönüş genişliğini “echo length” ve dönüş genliğini “parameter” içermektedir. Literatürde “pulse width” olarak adlandırılan dönüş genişliği değerinin TerraScan’deki karşılığı “echo length” ve birimi milimetredir. “Amplitude” olarak isimlendirilen genlik değerinin karşılığı ise “parameter” olmaktadır.



(a)



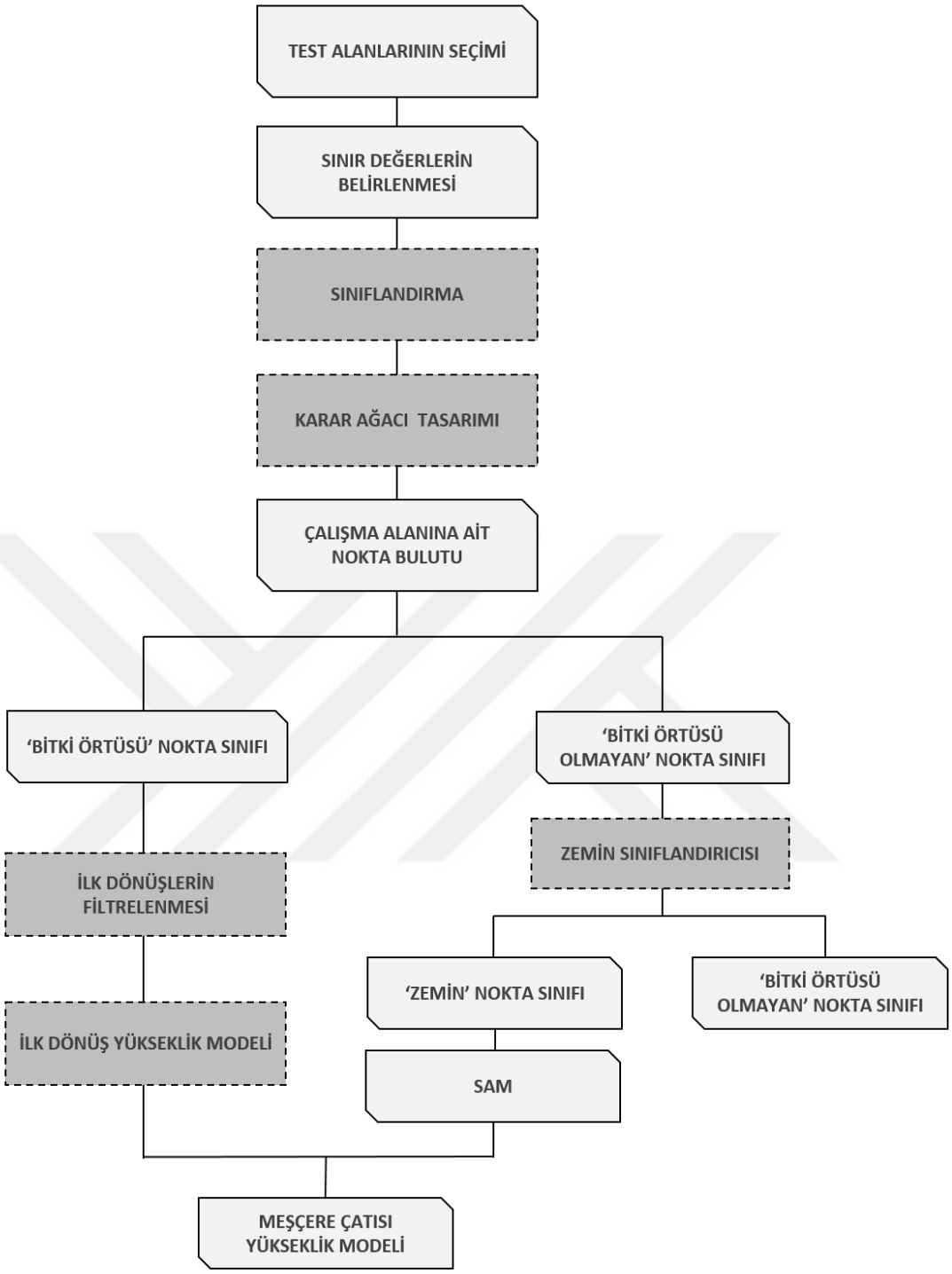
(b)

Şekil 5. 6 Nokta bulutuna ait seçilen parametreler (a) ve TerraScan ana penceresinde görünümü (b)

Nokta bulutunun tam dalga formu analiziyle elde edilen dalga formu öznitelikleri arasında yer alan dönüş genişliği değeri ile nokta bulutunun çoklu dönüş seviyelerine dair bilgiler kullanılarak sınıflandırılma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sınıflandırma işleminin odak noktası bitki örtüsü olan ve bitki örtüsü olmayan nokta bulutunun birbirinden ayrılarak kendi sınıflarına atanabilmesi işlemidir. Bu nedenle bu tez çalışmasında tercih edilen sınıflandırma yöntemi karar ağacı sınıflandırma

yaklaşımıdır. Karar ağacı iç düğümler ve yapraklardan oluşmaktadır. İç düğümleri belirleyen sınır değerlerin kestirimi için çalışma alanı içerisinde farklı yeryüzü objelerini temsil eden 5 adet test alanına ait her bir nokta bulutunun geri dönüşleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sınır değerler belirlenerek karar ağacı tasarlanmıştır. Tasarlanan karar ağacı çalışma alanına ait nokra bulutuna uygulanarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen tüm işlem adımları Şekil 5.7' de verilmektedir. Şekil 5.7'de verilen tüm işlem adımları ilerleyen kısımlarda sırasıyla detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.



Şekil 5. 7 Nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla gerçekleştirilen işlem adımlarının iş akış şeması

5.4.1 Test Alanlarının Seçimi

3-Boyutlu tam dalga formu LiDAR nokta bulutu sınıflandırılmadan önce lazer tarama cihazından yeryüzü topoğrafyasına doğru iletilen lazer sinyallerinin farklı yeryüzü

objelerinden geri dönen sinyallerin dönüş genişliği ve dönüş genliği değerleri incelenmiştir. Nokta bulutu görsel analize dayalı olarak incelendiğinde Gauss Ayrıştırması ile elde edilen dönüş genliği değerinin yeryüzü topoğrafyasının farklı objelerinden olan geri dönüşlerinde ayırt edici yani anlamlı değerlere sahip olmadığı görülmüştür. Bu nedenle bu tez çalışmasında gerçekleştirilen nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımında dalga formu özniteliklerinden dönüş genişliği değeri incelemeye alınmıştır.

Bitki örtüsü olan ve olmayan nokta bulutunu birbirinden ayırmak üzere çalışma alanı içerisinde farklı test alanları oluşturulmuştur. Doğal olmayan (yapay) ve doğal olan hedefleri temsil etmeleri bakımından test alanları temelde 2 gruba ayrılmıştır. Test Alanı 1 ve Test Alanı 2 doğal olmayan hedefleri Test Alanı 3, Test Alanı 4 ve Test Alanı 5 ise doğal olan hedefleri ifade etmektedir. Kiremit malzeme ile döşenmiş çatıyı temsil eden Test Alanı 1, 20 m x 20 m boyutlarındadır. Atatürk Arboretumu'nun giriş kapısı önündeki asfalt yol ile 8 m x 20 m boyutlarında Test Alanı 2 oluşturulmuştur. Yeryüzündeki doğal objeleri temsil etmekte olan Test Alanı 3, Test Alanı 4 ve Test Alanı 5 sırasıyla seyrek, orta yoğun ve yoğun bitki örtüsüne sahip her biri 50 m x 50 m boyutlarında olan alanlardan seçilmiştir. Bitki örtüsünün yoğunluğuna göre alan seçimi yapılmasının nedeni ise nokta bulutu içerisinde çimen, çalı ve çıplak arazi yüzeyi bulundurma durumlarını da değerlendirmeye dahil edebilmek ve ağaçlar arasında hiç boşluk olmaması durumunda lazer sinyalinin ormanaltı topoğrafyasına ulaşılabilirliğini incelemektir. Test Alanlarının çalışma alanı içerisinde dağılımı Şekil 5.2 'de verilmiştir.

5.4.2 Test Alanlarından Elde Edilen Sonuçlara Göre Sınır Değerlerin Belirlenmesi

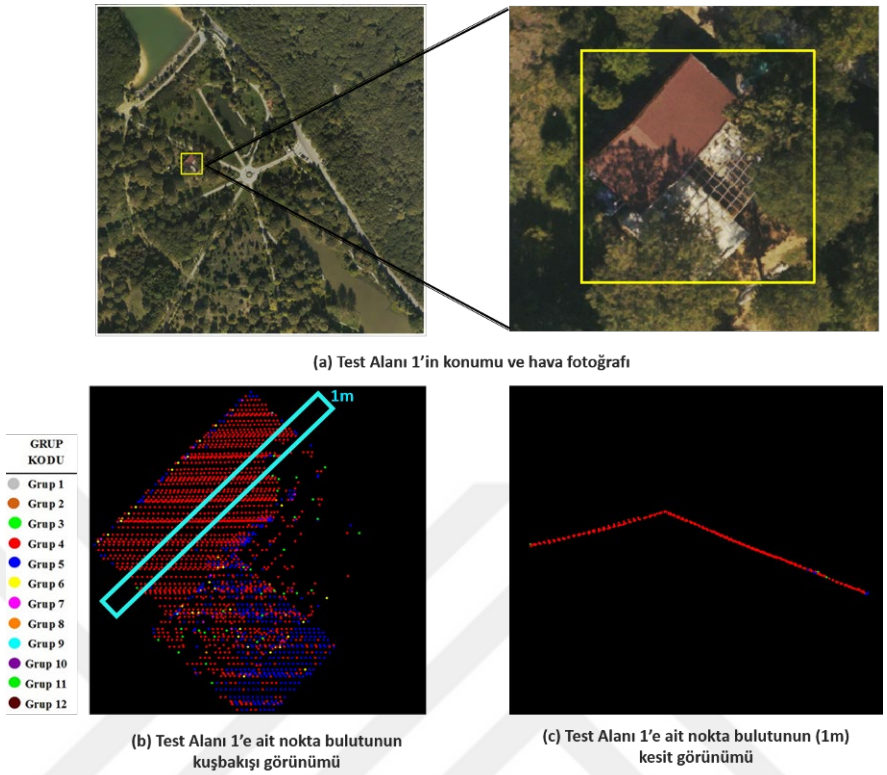
Farklı yeryüzü objelerinden geri dönen sinyallerin dönüş genişliklerinin kolay incelenebilmesi için en düşük dönüş genişliği ve en yüksek dönüş genişliği değerlerine bakılarak nokta bulutunun dönüş genişliği 0.005 m aralıklı olacak şekilde toplam 12 gruba ayrılmıştır. Dönüş genişliği değerinin gruplandırılması Çizelge 5.2'de verilmektedir. Tüm test alanlarının tam dalga formu LiDAR nokta bulutları dönüş genişliğine göre gruplandırılmış ve her bir test alanı için farklı sonuçlar gözlemlenmiştir.

Çizelge 5. 2 Dönüş genişliğinin 0.005m aralıklı gruplandırılması

GRUP KODU	DÖNÜŞ GENİŞLİĞİ (m)	
	min. değer	max. değer
Grup 1	-9999	0.030
Grup 2	0.030	0.035
Grup 3	0.036	0.040
Grup 4	0.041	0.045
Grup 5	0.046	0.050
Grup 6	0.051	0.055
Grup 7	0.056	0.060
Grup 8	0.061	0.065
Grup 9	0.066	0.070
Grup 10	0.071	0.075
Grup 11	0.076	0.080
Grup 12	0.081	9999

Test Alanı 1'e ait nokta bulutunda toplam 11 850 nokta yer almaktadır. Şekil 5.8(a)'da görüldüğü üzere Test Alanı 1'in içerisinde bina çatısı haricinde zeminden, çimenlerden ve ağaçlardan dönen lazer noktaları filtrelenmiştir. Filtreleme sonucunda yalnızca bina çatısına ait olan 2 434 noktanın (Şekil 5.8(b) ve Şekil 5.8(c)) dönüş genişliğine göre dağılımı Çizelge 5.3'de verilmektedir. Bu noktaların 1 767'si tekil dönüş, 177'si birinci dönüş, 63'ü orta seviye dönüş ve 427'si son dönüştür. Lazer tarama cihazından yeryüzü topoğrafyasına doğru iletilen lazer sinyalinin bina köşe ve kenarlarında çoklu dönüş yapması nedeniyle bina çatısı üzerinde tekil dönüşle birlikte çoklu dönüş sağlayan sinyallerde bulunmaktadır. Bina çatısı üzerindeki 1 817 noktanın dönüş genişliği değeri %75 yoğunlukla 0.041 m ile 0.045 m arasında yer almaktadır. Bu noktalar çoklu dönüş seviyelerine göre ayrıldığında 1 349 noktanın tekil dönüş olduğu görülmüştür. 0.046 m ile 0.050 m arasında dönüş genliğine sahip olan 529 nokta ise çoğunlukla binaya bitişik olan ızgara görünümündeki farklı materyale sahip çatıdan geri dönen lazer noktalarıdır. Bu 529 noktanın 384'si tekil dönüş, 32'si ilk dönüş, 12'si orta seviye ve 101 tanesi son dönüştür. Kiremit çatıdan farklı bir metaryale sahip olan çatıdan geri dönen lazer noktaları, sınıflandırmada herhangi bir karışıklık olmaması adına dikkate alınmamıştır. Bu sonuçlar ışığında lazer tarayıcıdan iletilen lazer sinyalilerinin kiremit bina çatısından

geri dönen lazer sinyallerinin çoğunlukla tekil dönüş yapacağını ve bu tekil dönüşlerin dönüş genişliğinin 0.041 m ile 0.045 m arasında olacağını söylemek mümkündür.



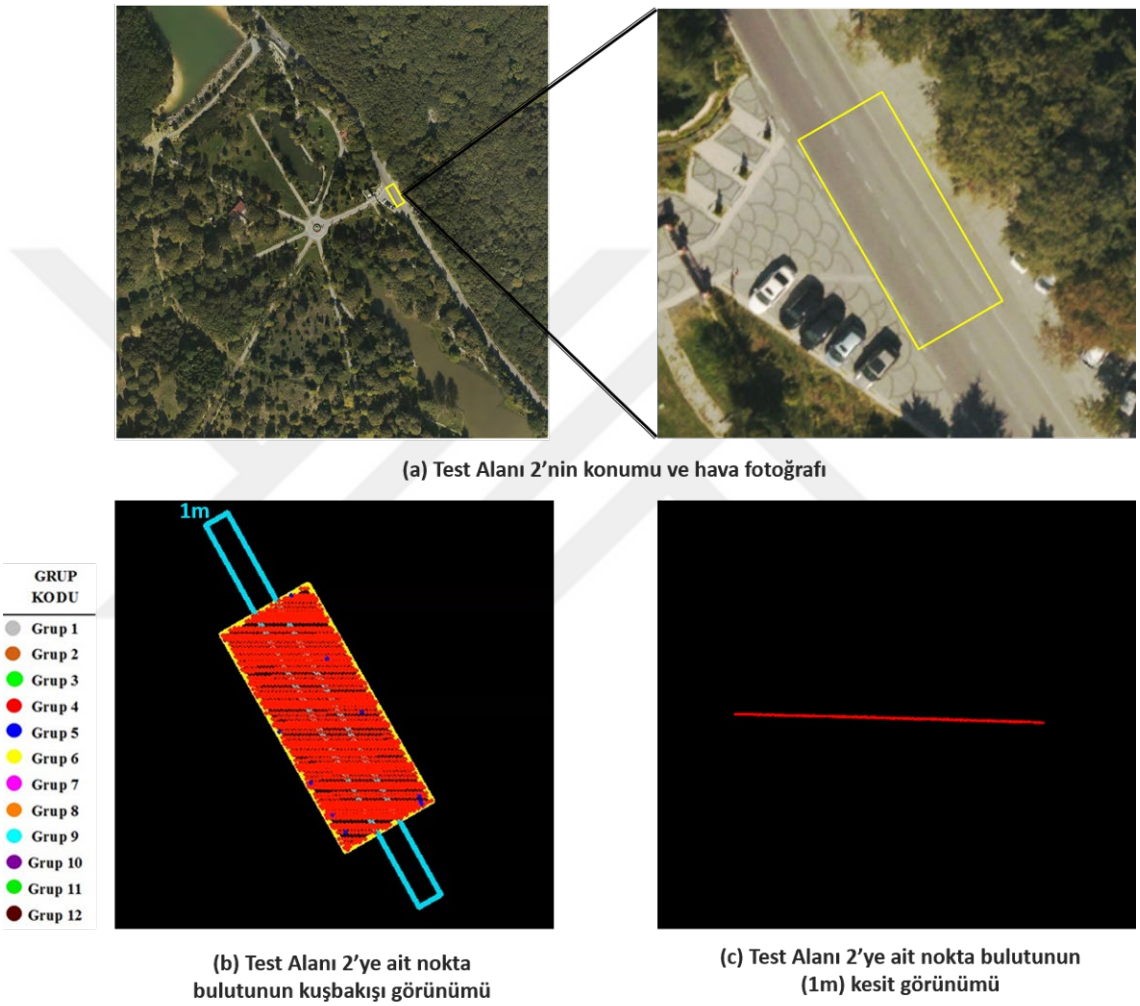
Şekil 5. 8 Bina çatısını temsil eden Test Alanı 1'in konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c)

Çizelge 5. 3 Test Alanı 1 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları

Grup Kodu	Dönüş Genişliği (m)	Nokta Sayısı
Grup 1	-9999-0.030	-
Grup 2	0.031-0.035	4
Grup 3	0.036-0.040	34
Grup 4	0.041-0.045	1 817
Grup 5	0.046-0.050	529
Grup 6	0.051-0.055	32
Grup 7	0.056-0.060	13
Grup 8	0.061-0.065	4
Grup 9	0.066-0.070	1
Grup 10	0.071-0.075	-
Grup 11	0.076-0.080	-
Grup 12	0.081-9999	-
Toplam Nokta Sayısı		**2434**

Atatürk Arboretumu'nun giriş kapısının önündeki asfalt yoldan alınan nokta bulutu örneği ile oluşturulan Test Alanı 2'de toplam 2 117 nokta yer almaktadır (Şekil 5.9(a)).

Bu noktalardan 2 105 nokta 0.041 m ile 0.045 m arasında ve 12 nokta ise 0.046 m ile 0.050 m arasında dönüş genişliği değerine sahiptir. Asfalt yoldan geri dönen tüm dönüş sinyalleri dönüş seviyelerine göre tekil dönüş yapmaktadır (Şekil 5.9(b) ve Şekil 5.9(c)). Bu sonuçlar ışığında asfalt yoldan geri dönen dönüşlerin tekil dönüş olacağı ve dönüş genişliği değerinin %99 çoğunlukla 0.041 m ile 0.045 m arasında olacağı söylenebilmektedir.



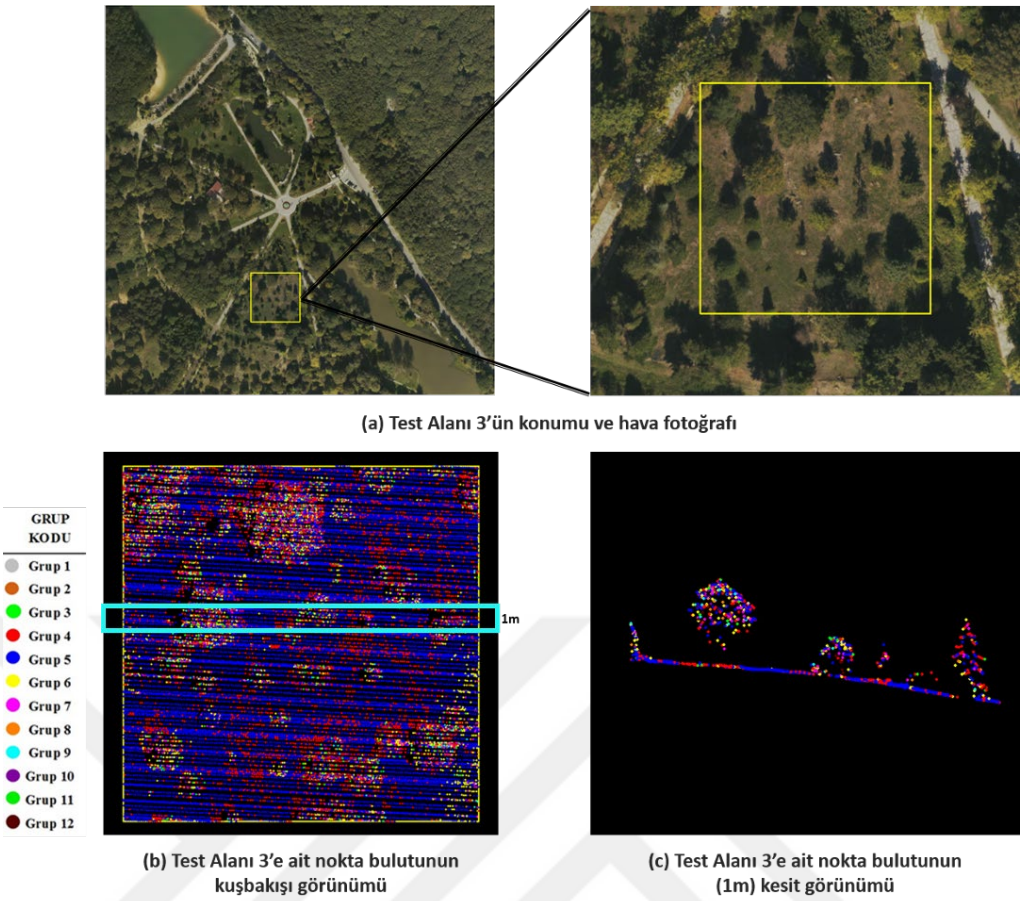
Şekil 5. 9 Asfalt yolu temsil eden Test Alanı 2'nin konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c)

Seyrek bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 3 (Şekil 5.10(a)) toplam 29 365 noktaya sahiptir. Tüm noktaların dönüş genişliğine göre dağılımı Çizelge 5.4' de verilmektedir. Test Alanı 3'te yer alan noktaların %56'sı olan 16 611 noktanın dönüş genişliği değeri 0.046 m ile 0.050 m arasındadır. Şekil 5.10(b) ve Şekil 5.10(c) birlikte görsel olarak

incelendiğinde 0.046 m ile 0.050 m arasındaki dönüş genişliğine sahip olan mavi noktaların çimen, çalı veya çıplak arazi yüzeyi gibi yeryüzü objelerinden geri döndüğünü söylemek mümkündür.

Orta yoğun bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 4 (Şekil 5.11(a)) toplam 47 201 noktaya sahiptir. Test Alanı 4'te değerlendirmeye alınan tüm noktaların dönüş genişliği gruplandırmasına göre dağılımı Çizelge 5.5'de verilmektedir. Bu noktaların %33'ü olan 15 766 noktanın dönüş genişliği değeri 0.046 m ile 0.050 m aralığındadır. Görsel analize dayalı olarak Şekil 5.11(b) ve Şekil 5.11(c) incelenmiştir. Ağaçlar arası boşluklarda nokta bulutunun üst katmanlarında dönüş genişliğinin 0.046 m ile 0.050 m arasında olduğu ve alt katmanlarında ise 0.41 m ile 0.45 m arasında olduğu gözlemlenmiştir.

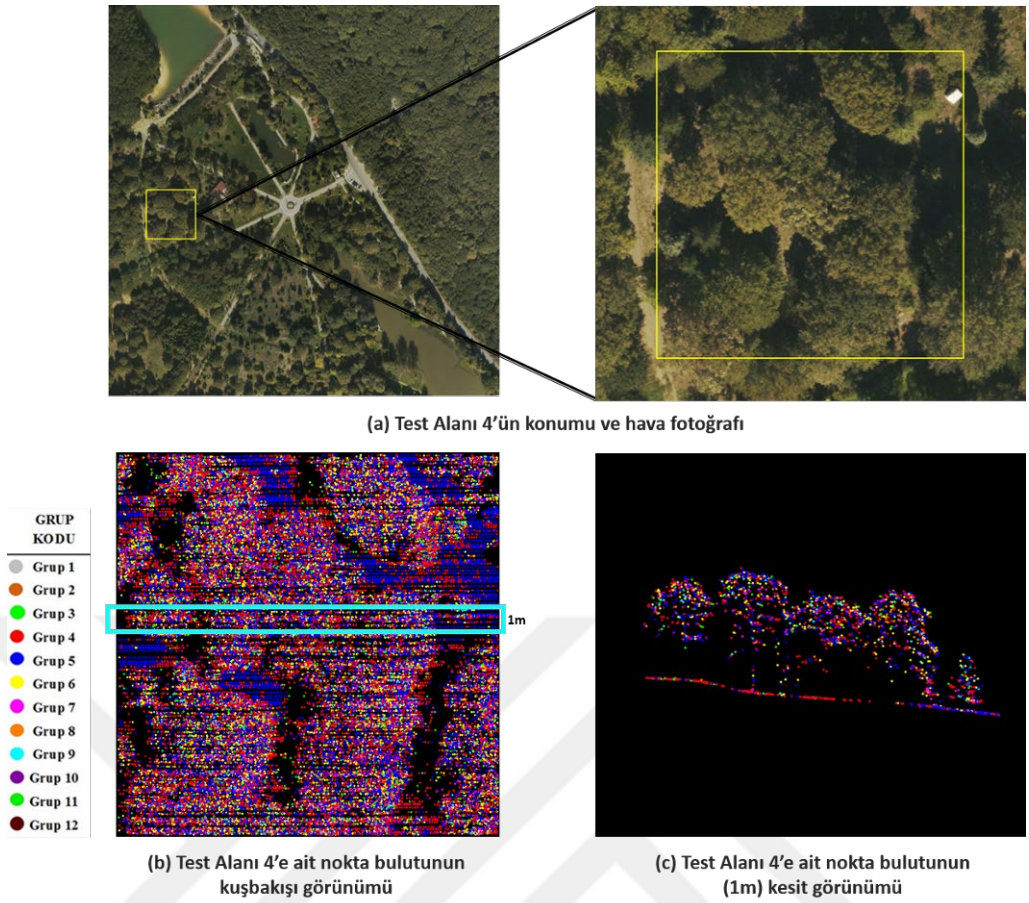
Yoğun bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 5'te Şekil 5.12(a)'da görüldüğü üzere ağaçlar arasında neredeyse hiç boşluk bulunmamaktadır. Toplam nokta sayısı 71 741'dir. Bitki örtüsünün yoğunluğunun artmasıyla nokta sayısı da artmaktadır. Bu durum lazer tarayıcıdan iletilen tek bir lazer sinyalinin ağacın farklı katmanlarına nüfuz ederek çoklu dönüş sağlıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Görsel analize dayalı olarak Şekil 5.12(b) ve Şekil 5.12(c) birlikte incelendiğinde seyrek bitki örtüsü ve orta yoğun bitki örtüsünü temsil eden test alanlarında elde edilen sonuçlara benzer yorumlar yapılmaktadır. Test Alanı 5 içerisinde yer alan noktaların %32'sinin dönüş genişliği değeri 0.046 m ile 0.050m arasındadır. Sonuç olarak Test Alanı 5'te bulunan toplam 71 741 noktanın %31'inin dönüş genişliği değeri 0.045 m 'den küçük ve %69'unun dönüş genişliği değeri 0.045m'den büyüktür (Çizelge 5.6). Bitki örtüsünün farklı yoğunluk seviyelerine göre seçilen bu 3 test alanından elde edilen sonuçlara göre bitki örtüsüne ait lazer noktalarının dönüş genişliği değerinin sistematik bir şekilde arttığını söylemek mümkündür.



Şekil 5. 10 Seyrek bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 3'ün konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c)

Çizelge 5. 4 Test Alanı 3 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları

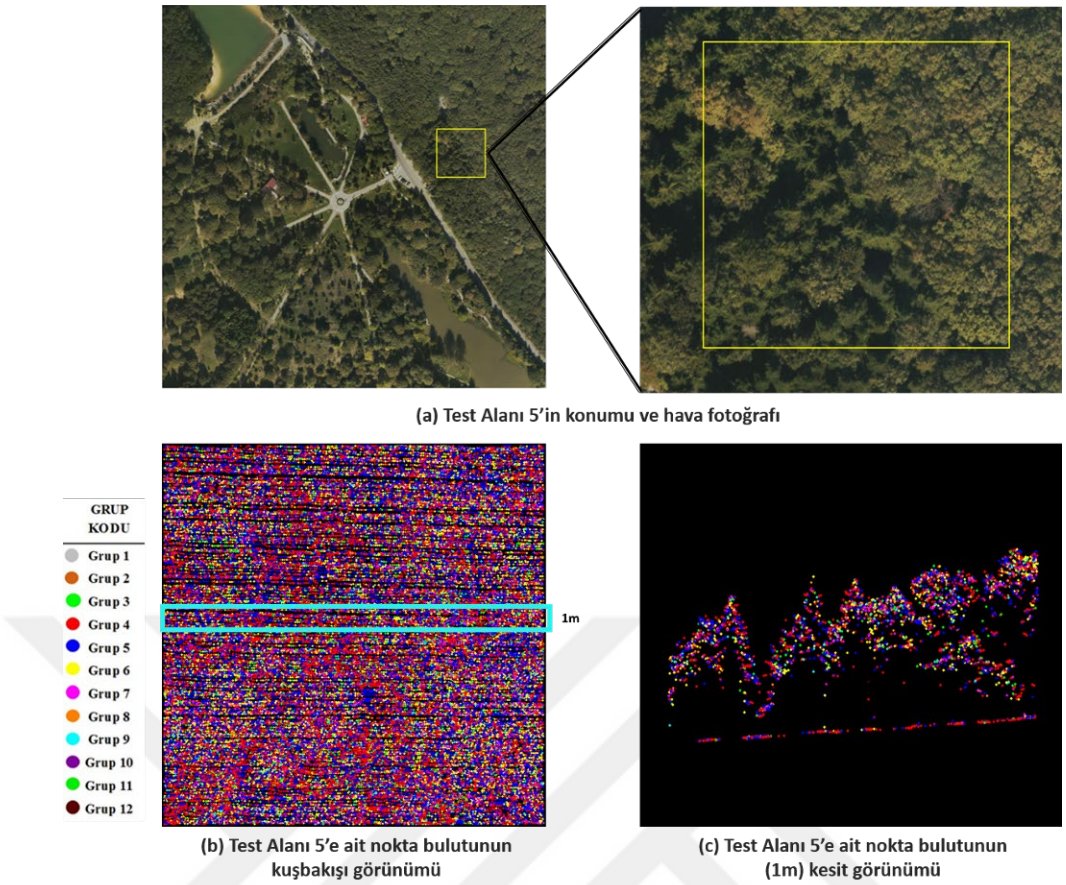
Grup Kodu	Dönüş Genişliği (m) Değeri	Toplam Nokta Sayısı	Tekil Dönüş Sayısı	İlk Dönüş Sayısı	Orta Seviye Dönüş Sayısı	Son Dönüş Sayısı
Grup 1	-9999-0.030	17	0	9	7	1
Grup 2	0.031-0.035	50	0	29	14	7
Grup 3	0.036-0.040	425	5	282	61	77
Grup 4	0.041-0.045	6698	2893	1749	446	1610
Grup 5	0.046-0.050	16611	13267	1368	585	1391
Grup 6	0.051-0.055	2300	814	582	370	534
Grup 7	0.056-0.060	1220	339	313	226	342
Grup 8	0.061-0.065	744	193	181	155	215
Grup 9	0.066-0.070	484	102	113	103	166
Grup 10	0.071-0.075	280	53	61	59	107
Grup 11	0.076-0.080	173	20	40	49	64
Grup 12	0.081-9999	363	23	66	111	163
Toplam Nokta Sayısı		**29365**	**17709**	**4793**	**2186**	**4677**



Şekil 5. 11 Orta yoğunluktaki bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 4'ün konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c)

Çizelge 5. 5 Test Alanı 4 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları

Grup Kodu	Dönüş Genişliği (m) Değeri	Toplam Nokta Sayısı	Tekil Dönüş Sayısı	İlk Dönüş Sayısı	Orta Seviye Dönüş Sayısı	Son Dönüş Sayısı
Grup 1	-9999-0.030	35	0	10	19	6
Grup 2	0.031-0.035	168	0	92	49	27
Grup 3	0.036-0.040	1460	6	623	352	479
Grup 4	0.041-0.045	14005	1027	4919	2499	5560
Grup 5	0.046-0.050	15766	4340	4591	3080	3755
Grup 6	0.051-0.055	6485	944	1942	1670	1929
Grup 7	0.056-0.060	3562	498	1060	902	1102
Grup 8	0.061-0.065	2139	276	580	597	686
Grup 9	0.066-0.070	1350	137	355	364	494
Grup 10	0.071-0.075	868	78	202	293	295
Grup 11	0.076-0.080	451	32	90	159	170
Grup 12	0.081-9999	912	26	120	373	393
Toplam Nokta Sayısı		**47201**	**7364**	**14584**	**10357**	**14896**



(a) Test Alanı 5'in konumu ve hava fotoğrafı

(b) Test Alanı 5'e ait nokta bulutunun kuşbakışı görünümü

(c) Test Alanı 5'e ait nokta bulutunun (1m) kesit görünümü

Şekil 5. 12 Yoğun bitki örtüsünü temsil eden Test Alanı 5'in konumu ve hava fotoğrafı (a), dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş nokta bulutunun kuşbakışı görünümü (b) ve 1m kesit görünümü (c)

Çizelge 5. 6 Test Alanı 5 içerisinde dönüş genişliğine göre nokta dağılımları

Grup Kodu	Dönüş Genişliği (m) Değeri	Toplam Nokta Sayısı	Tekil Dönüş Sayısı	Birincil Dönüş Sayısı	Orta Seviye Dönüş Sayısı	Sonuncul Dönüş Sayısı
Grup 1	-9999-0.030	51	0	32	18	1
Grup 2	0.031-0.035	283	0	164	71	48
Grup 3	0.036-0.040	2333	30	1158	502	643
Grup 4	0.041-0.045	19769	1641	8217	3557	6354
Grup 5	0.046-0.050	22595	5028	7010	4218	6339
Grup 6	0.051-0.055	11217	2562	2968	2202	3485
Grup 7	0.056-0.060	6270	1410	1567	1145	2148
Grup 8	0.061-0.065	3598	783	836	696	1283
Grup 9	0.066-0.070	2183	417	483	451	832
Grup 10	0.071-0.075	1297	231	228	297	541
Grup 11	0.076-0.080	782	115	140	168	359
Grup 12	0.081-9999	1363	82	186	419	676
Toplam Nokta Sayısı		**71741**	**12299**	**22989**	**13744**	**22709**

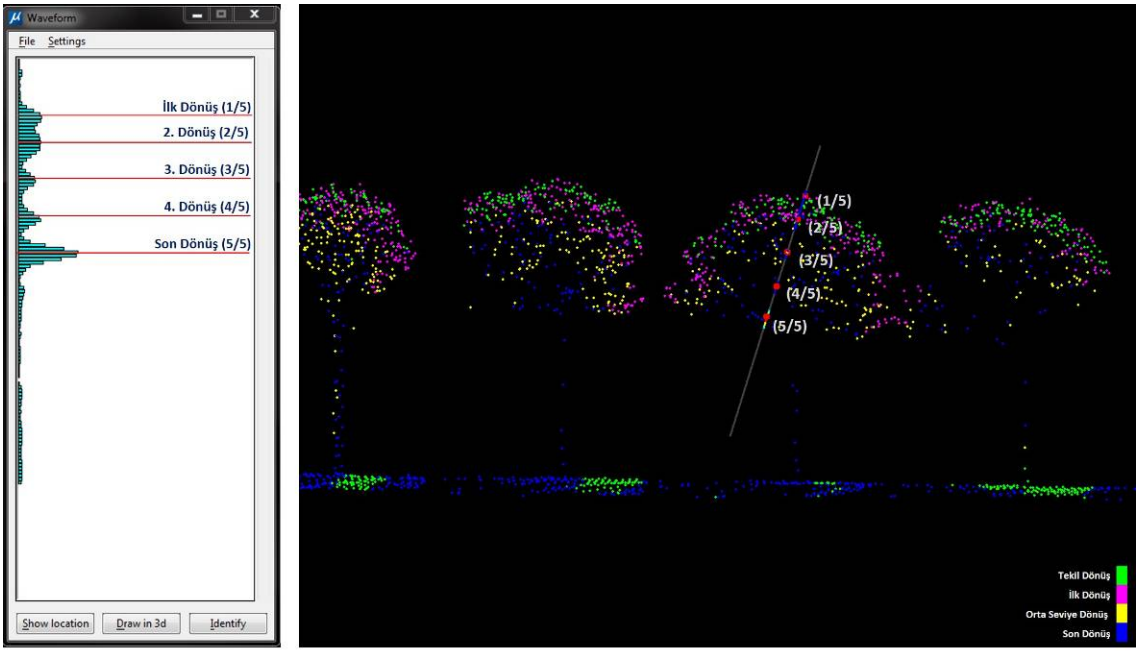
5.4.3 Karar Ağacı Tasarımı

Bu tez çalışmasında sınıflandırma yöntemi olarak karar ağacı sınıflandırma yaklaşımıkullanılmıştır. Bu bölümde ise belirlenen sınır değerlerle birlikte karar ağacının tasarım süreçleri sırayla anlatılmıştır.

Yeryüzü topoğrafyasında yer alan doğal ve doğal olmayan objeleri temsil eden Test Alanları bir önceki kısımda incelenmiştir. Test Alanı 1 ve Test Alanı 2 için elde edilen sonuçlar ışığında doğal olmayan objelerin dönüş genişliği değerinin çoğunlukla 0.041 m ile 0.045 m arasında olacağı ve bu sinyallerin tekil dönüş sağlayacağı ifade edilmiştir. Doğal objeleri temsil eden Test Alanı 3, Test Alanı 4 ve Test Alanı 5'de ise nokta bulutunun dönüş genişliği değerinin doğal olmayan objelere göre daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak bitki örtüsü olan ve olmayan alanların birbirinden ayrılarak sınıflandırılması amacıyla bir karar ağacı tasarlanmıştır. Karar ağacı tasarımında lazer sinyalinin dönüş seviyeleri ile dönüş genişliği değerleri birlikte kullanılmıştır. Bu karar ağacına göre nokta bulutu öncelikle çoklu dönüş sağlayanlar (>1) ve tekil dönüş sağlayanlar (=1) olarak ikiye ayrılmış ve her biri kendi içinde çeşitli parametrelere göre uygun sınıflara atanmıştır.

Önceki bölümlerde çoklu dönüş sağlayan lazer sinyallerinden son dönüş sinyalinin çoğunlukla zeminden geri döndüğü belirtilmiştir. Doğal olmayan objelere ait nokta bulutunun çoklu dönüşleri incelendiğinde en büyük enerjininin ilk dönüşte olduğu ve son dönüşe kadar enerjinin azalarak ilerlediği görülmüştür. Son dönüşler orta seviye dönüşlerden, orta seviye dönüşler ise ilk dönüşlerden daha az enerjiye sahip oldukları için çok yoğun bitki örtüsüne sahip ormanlık alanlarda bazı lazer sinyalleri zemine ulaşamayabilmektedir. Bu durumda son dönüş noktalarının bazıları ağaçların gövdesine veya ağaçların altında kalan küçük bitkilere ait olabilmektedir. Test Alanı 5'e ait nokta bulutu görsel analize dayalı olarak incelendiğinde bazı son dönüş noktalarının zemine ait olmadığı görülmüştür. Bu duruma örnek olarak, çalışma alanı içerisindeki bir ağaçta yer alan aynı LiDAR sinyaline ait 5 adet çoklu dönüşün dalga formu grafiği Şekil 5.13(a)'da verilmektedir. Dalga formu grafiğinde sinyalin dalga formu içerisindeki her bir tepe noktası için bir dönüş sağlanmıştır. Her bir dönüşün ağacın taç hacmi içerisindeki

konumu Şekil 5.13(b)'de kırmızı kutular içerisinde gösterilmektedir. Tüm enerjisini ağacın taç hacmi içerisinde tüketen bu lazer sinyali zemine ulaşamamaktadır.

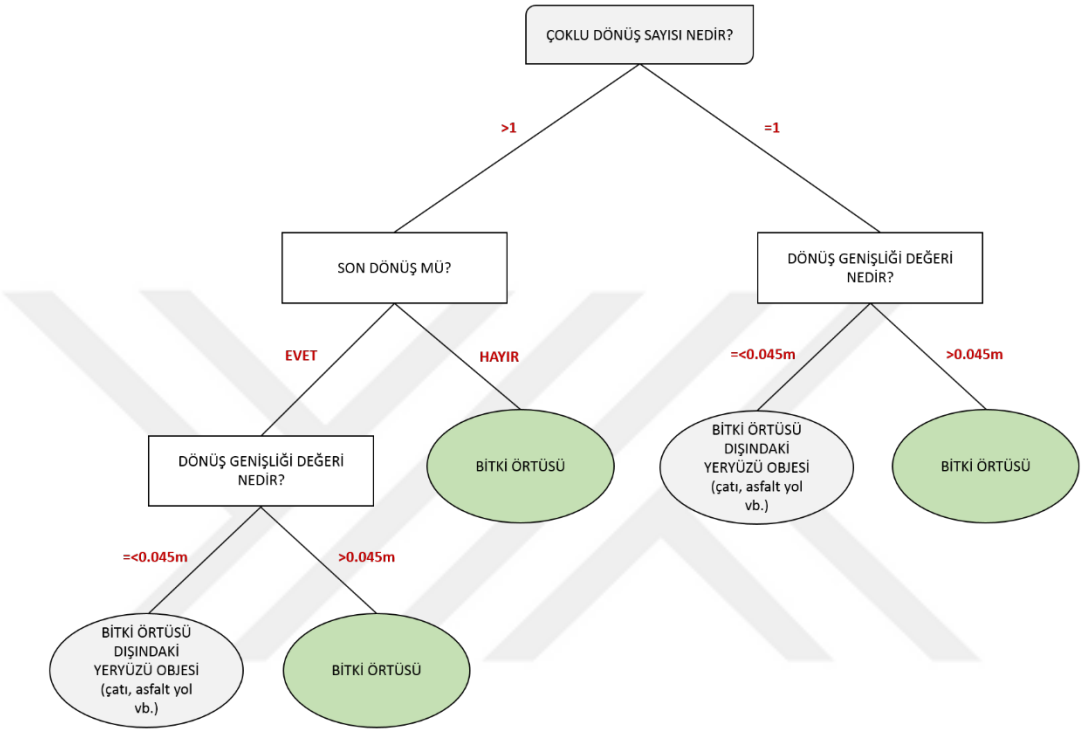


Şekil 5. 13 Son dönüşlerin zeminden gelmeme durumu örneği; dalga formu grafiği (a), çoklu dönüşlerin nokta bulutu üzerinde gösterimi (b)

Şekil 5.13'de de görüldüğü üzere son dönüş noktalarını doğrudan 'bitki örtüsü olmayan' sınıfına atamak sınıflandırma sonucunun kalitesini etkileyecektir. Zemine ulaşamayan son dönüş noktalarının doğru sınıfa atanması için dönüş genişliğine göre değerlendirmeye alınması sınıflandırma doğruluğunu artıracaktır. Bu nedenle çoklu dönüş sinyallerinin ayrıldığı nokta bulutunda yer alan son dönüşlerin dönüş genişliği değeri 0.045 m'den büyük olan noktaların 'bitki örtüsü' sınıfına ve 0.045 m'den küçük olan noktaların 'bitki örtüsü olmayan' sınıfına atanması uygun görülmüştür. Son dönüşler haricindeki kalan tüm çoklu dönüşler ise 'bitki örtüsü' sınıfına ait olacaktır. Bu işlemler sonucunda çoklu dönüş sağlayan lazer sinyalleri (>1) için karar ağacının sınır değerleri belirlenmiştir.

Tekil dönüş sağlayan lazer sinyallerinin (=1) ayrıldığı nokta bulutu için ise dönüş genişliği değeri değerlendirmeye alınmıştır. Test Alanlarından elde edilen bulgulara göre dönüş genişliği değeri 0.045 m'den küçük olan lazer sinyallerinin 'bitki örtüsü olmayan' sınıfına atanması uygun görülmüştür. Bitki örtüsünden olan geri dönüş noktalarının dönüş

genişliğinin doğal olmayan objelerin dönüş genişliği değerinden daha büyük olacağı görüşüyle de 0.045 m'den büyük olan tüm tekil dönüş noktaları 'bitki örtüsü' sınıfına atanacaktır. Tekil dönüş sağlayan lazer sinyalleri (=1) için de parametreler belirlendikten sonra karar ağacına ait tüm sınır değerler ortaya çıkmaktadır. Bu sınır değerler ile birlikte tasarlanan karar ağacı Şekil 5.14'de verilmektedir.



Şekil 5. 14 Karar ağacı

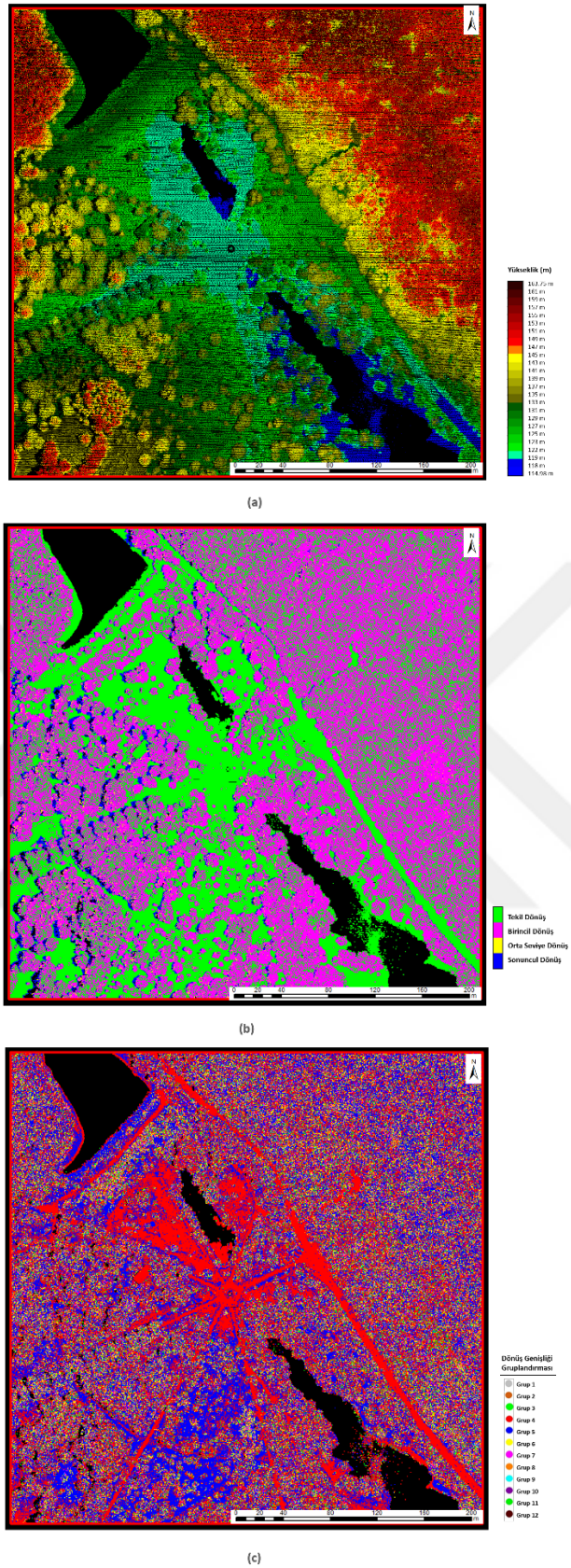
Karar ağacı sınıflandırması sonrasında 'bitki örtüsü' ve 'bitki örtüsü olmayan' olmak üzere 2 nokta sınıfının oluşması ve bu 2 nokta sınıfı haricinde sınıflandırılmayan nokta bulutu kalmaması hedeflenmektedir.

5.4.4 Çalışma Alanına Ait Nokta Bulutunun Sınıflandırılması

Bu bölümde çalışma alanı içerisinde yer alan nokta bulutunun bitki örtüsü olan ve bitki örtüsü olmayan şeklinde sınıflandırılması anlatılmaktadır. Sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmeden önce bu bölüme kadar anlatılan tüm veri analizleri çalışma alanı için tekrarlanmıştır.

400 m x 400 m boyutlarındaki çalışma alanı içerisinde toplam 2 824 209 lazer noktası bulunmaktadır. Sınıflandırmada herhangi bir karışıklık olmaması için öncelikle gürültü

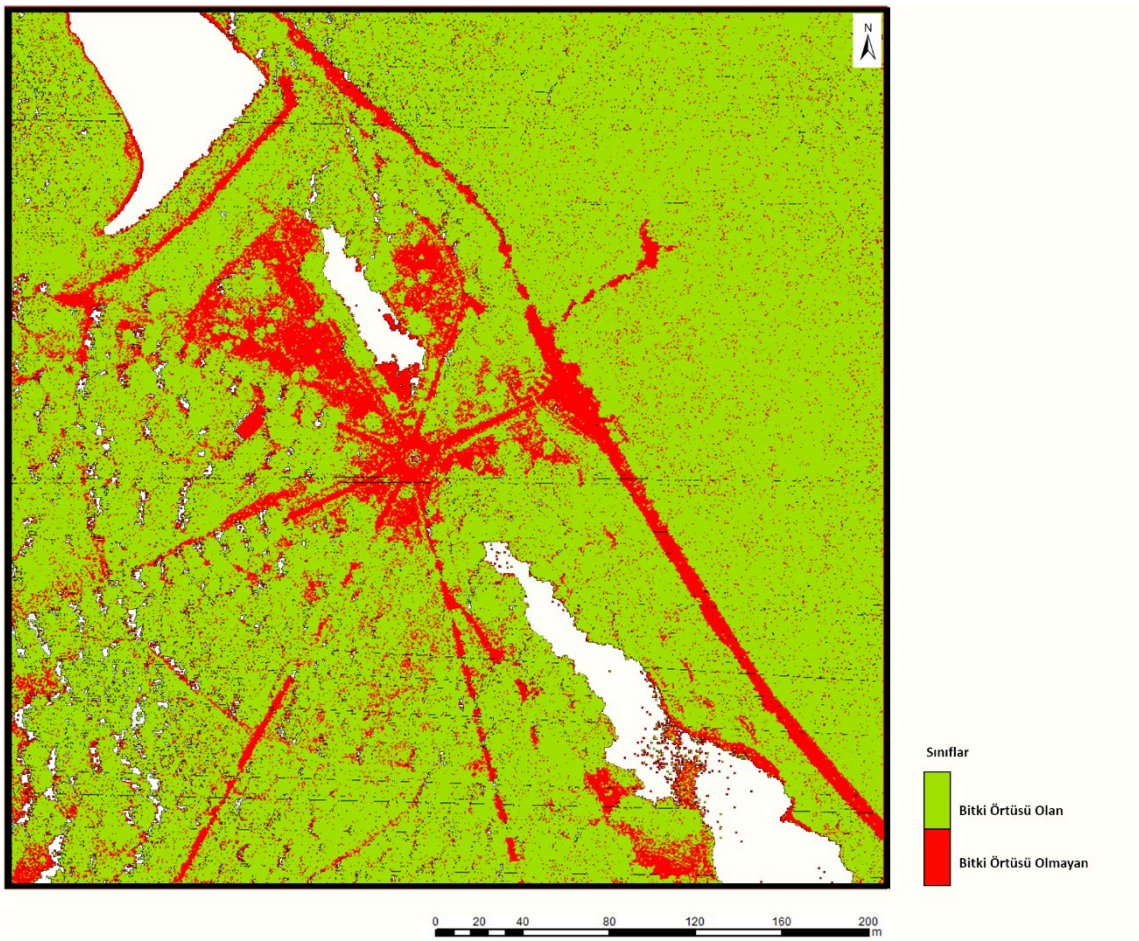
noktası olup olmadığına bakılmıştır. Nokta bulutundaki 23 noktanın gürültü noktası olduğu tespit edilerek manuel (el ile) silinmiştir. Geriye kalan toplam 2 824 186 nokta içerisinde en alçak nokta 114.98 m ve en yüksek nokta 163.75 m yüksekliğindedir. Şekil 5.15(a)'da görüldüğü üzere nokta yüksekliği bitki örtüsünün yoğunlaştığı bölgelerde artmaktadır. En düşük nokta yüksekliği ise asfalt yol, Arboretum'un içerisindeki arnavut kaldırımlı yürüyüş yolları ve çimenlik alanlarda görülmektedir. Çalışma alanına ait nokta bulutu içerisindeki noktaların 738 504'ü tekil dönüş, 791 967'si ilk dönüş, 514 854'ü orta seviye dönüş ve 778 861'i son dönüştür. Nokta bulutunun çoklu dönüş seviyelerine göre renklendirilmiş görüntüsü Şekil 5.15(b)'de verilmektedir. Şekil 5.15(b)'de de görüldüğü üzere sensörden iletilen lazer sinyalinin bitki örtüsünden olan geri dönüşleri çoklu dönüş yapmaktadır. Bu nedenle nokta bulutunun sınıflandırılma aşamasında çoklu dönüşlerin kullanılması oldukça faydalı olacaktır. Algılayıcı platformundan iletilen her bir lazer sinyalinin ormanlık alanlarda bitki örtüsünün farklı katmanlarından geri dönen çoklu dönüşleri incelendiğinde, ilk dönüşlerin ağaçların en tepe noktalarından geri döndüğü görülmektedir. İlk ve son dönüş noktaları arasındaki tüm orta seviye dönüşlerin ise ağaçların dallarından, gövdesinden veya yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda ağaçların altında kalan küçük bitkilerden (çalı, çimen, fidan vs.) geri döndüğü daha önceki bölümlerde gerçekleştirilen görsel analizler ile ortaya konmuştur. Bununla birlikte iletilen lazer sinyalinin çoklu dönüş seviyelerinden son dönüşlerin büyük bir çoğunluğunun ise zeminden geri döndüğü tespit edilmiştir. Çalışma alanına ait tüm noktaların dönüş genişliği gruplandırmasına göre renklendirilmiş görüntüsü Şekil 5.15(c)'de verilmektedir.



Şekil 5. 15 Çalışma alanına ait nokta bulutunun yüksekliğe göre renklendirilmesi (a), çoklu dönüş seviyelerine göre renklendirilmesi (b), dönüş genişliği değerlerine göre gruplandırılması (c)

Oluşturulan karar ağacı sınıflandırma yapısı çalışma alanında bulunan 2 824 186 noktaya uygulanmıştır. Tekil dönüş haricindeki tüm çoklu dönüş sinyalleri toplam 2 085 682 noktadır. Çoklu dönüş seviyelerine göre son dönüş sinyalleri toplam 778 861 noktadır. Son dönüş olan 778 861 nokta için dönüş genişliği değeri 0.045 m'den küçük olan 260064 nokta 'bitki örtüsü olmayan' sınıfına atanmıştır. Kalan son dönüş noktalarının dönüş genişliği 0.045 m'den büyüktür. Bu 518 797 nokta ise 'bitki örtüsü' sınıfına atanmıştır. Çoklu dönüş seviyelerine göre ilk dönüş ile ilk ve son dönüş arasındaki tüm orta seviye dönüşlerin toplamı 1 306 821 noktadır. İlk ve orta seviye dönüş noktaları da doğrudan 'bitki örtüsü' sınıfına atanmıştır.

Tekil dönüş sağlayan 738 504 noktadan dönüş genişliği değeri 0.045 m'den küçük ve eşit olan 229 377 nokta 'bitki örtüsü olmayan' ve 0.045 m'den büyük olan 509 127 nokta 'bitki örtüsü' sınıfına atanmıştır. Karar ağacı sınıflandırması sonucunda 2 334 745 nokta 'bitki örtüsü', 489 441 nokta ise 'bitki örtüsü olmayan' sınıfına atanarak sınıflandırma tamamlanmıştır. Şekil 5.16'da görüldüğü üzere yeşil noktalar 'bitki örtüsü' nokta sınıfını ve kırmızı noktalar ise 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfına ait noktaları temsil etmektedir.



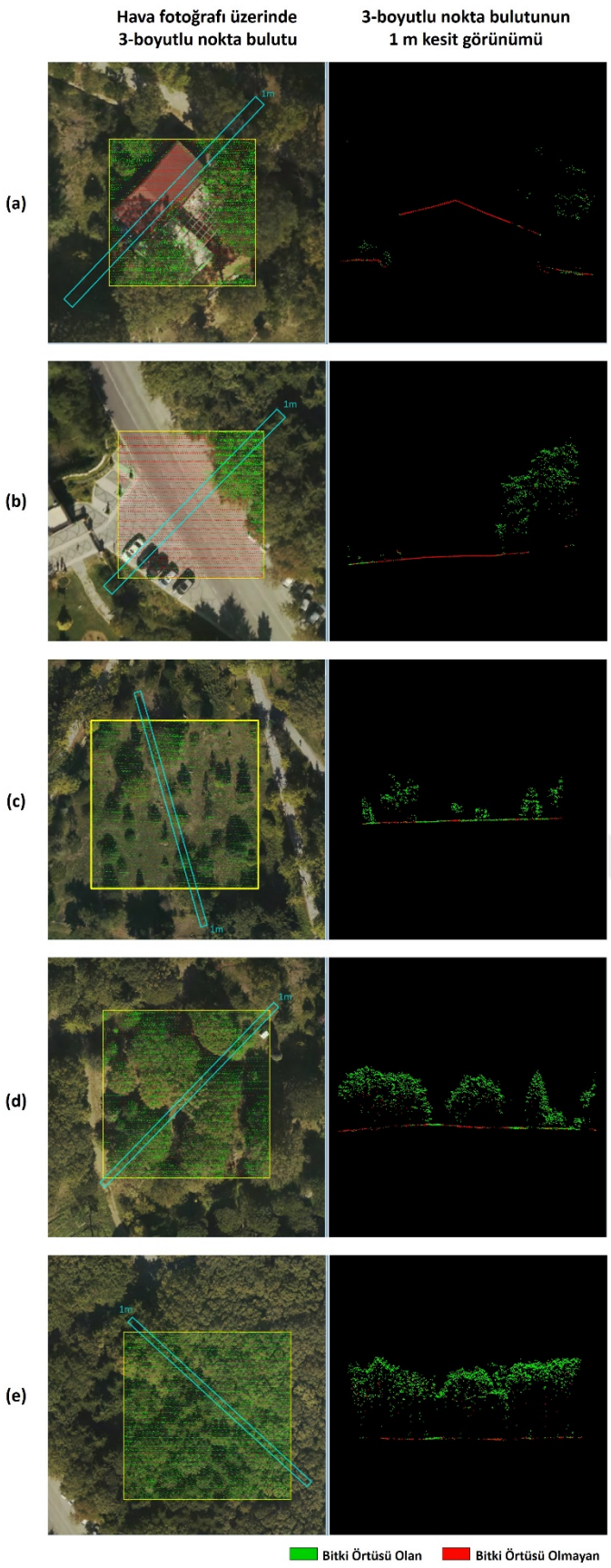
Şekil 5. 16 Çalışma alanına ait nokta bulutunun nokta tabanlı karar ağacı sınıflandırma sonucu

5.4.5 Sınıflandırmanın Doğruluğu

Bu tez çalışmasında önerilen karar ağacı sınıflandırmasının doğruluğunu analiz etmek için herhangi bir referans veri temin edilememiştir. Çalışma alanına uygulanan sınıflandırma işleminin doğruluk analizinin gerçekleştirilmesi için görsel analize dayalı olarak incelemeler yapılmıştır.

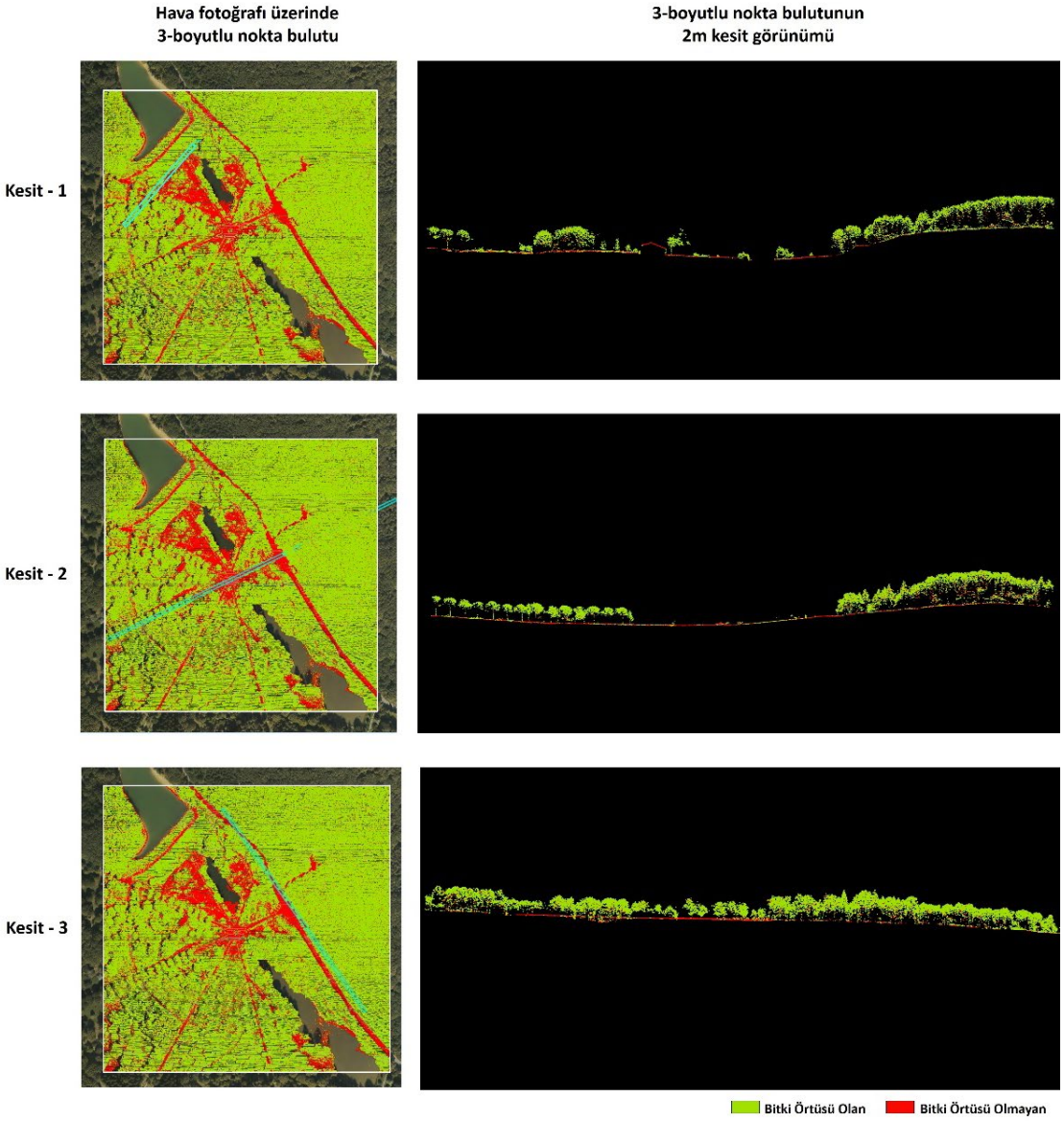
Karar ağacı sınıflandırma yaklaşımının sınır değerlerinin kestirimi amacıyla seçilen 5 adet Test Alanının sınıflandırma sonuçları, nokta bulutu üzerinde 1 m'lik kesitler ile görsel olarak Şekil 5.17'de verilmektedir. Bitki örtüsü nokta bulutu yeşil ile bitki örtüsü olmayan nokta bulutu ise kırmızı noktalar ile ifade edilmektedir. Bitki örtüsü olmayan nokta sınıfı bina çatısı, asfalt yol, araba vb. gibi yeryüzü topoğrafyasında yer alan bitki örtüsü haricinde olan tüm objeleri içermektedir. Buna göre Şekil 5.17(a)'da görüldüğü üzere Test Alanı 1'in içerisinde bina çatısına ait noktalar ve Şekil 5.17(b)'de Test Alanı 2'nin

içerisinde asfalt yola ait noktalar bitki örtüsü olmayan nokta sınıfına başarılı bir şekilde atanabilmiştir. Bitki örtüsünün yoğunluk seviyelerine göre seçilen Test Alanı 3, Test Alanı 4 ve Test Alanı 5 için sınıflandırma doğruluğu görsel analize dayalı olarak incelendiğinde ise ağaçlara ait lazer noktalarının bitki örtüsü nokta sınıfında olduğu görülmektedir. Şekil 5.17(c) ve Şekil 5.17(d) görüldüğü üzere seyrek ve orta yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda önerilen karar ağacı sınıflandırma yaklaşımı ağaçların altında kalan orman toprağını bitki örtüsünden net bir şekilde ayırt edebilmiştir. Ağaçlar arasında neredeyse hiç boşluk bulunmayan Test Alanı 5 için ise sınıflandırmanın başarılı bir şekilde gerçekleştiği Şekil 5.17(e)'de görülmektedir.



Şekil 5. 17 Sınıflandırma doğruluğu; (a) Test Alanı 1, (b) Test Alanı 2, (c) Test Alanı 3, (d) Test Alanı 4, (e) Test Alanı 5

Çalışma alanının farklı bölgelerinden alınan 2 m'lik kesit doğrultuları ile yapılan genel değerlendirme Şekil 5.18'de verilmektedir. Kesit 1'de görüldüğü üzere bina çatısı, doğal ve yapay zeminler (asfalt yol) 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfı içersinde yer almaktadır. Yalnızca bitki örtüsüne sahip olan alanlardan alınan Kesit 2 ve Kesit 3 doğrultuları ise bitki örtüsüne ait nokta bulutunun önerilen sınıflandırma yaklaşımıyla başarıyla sınıflandırıldığını göstermektedir.



Şekil 5. 18 Çalışma alanının farklı bölgelerinde incelenen 2 m'lik kesit doğrultuları

Görsel analize dayalı doğruluk değerlendirmesi sonucunda bu tez çalışmasında önerilen karar ağacı sınıflandırması ile tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun hiç bir geometrik bilgi olmaksızın yalnızca dalga formu öznitelikleri kullanılarak kentsel alanda bitki örtüsü

olan ve bitki örtüsü olmayan şeklinde sınıflandırılmasının mümkün olduğu görülmektedir.

5.5 Bitki Örtüsü Olan ve Bitki Örtüsü Olmayan Nokta Bulutları ile Elde Edilen Ürünler

'Bitki örtüsü' ve 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıflarına ait nokta bulutları ayrı ayrı kullanılarak çeşitli ürünler elde edilebilmektedir. SAM ve MÇYM görüntü verilerinin üretimi ve analizleri bu kısımda anlatılmaktadır.

5.5.1 Sayısal Arazi Modeli Üretimi

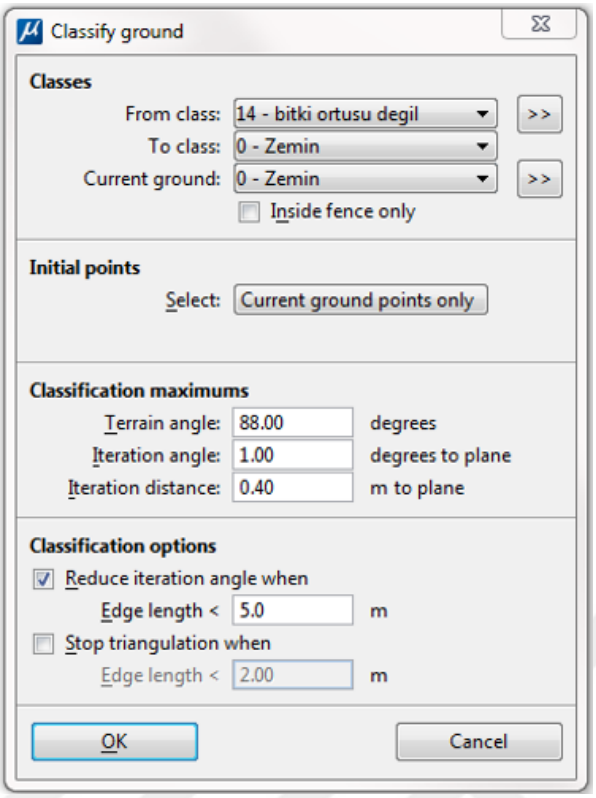
Sayısal Arazi Modeli, yalın yeryüzeyini temsil eden matematiksel bir yüzey modelidir. SAM üretiminde bitki örtüsü, ağaç, bina, elektrik direği vb. detaylardan arındırılmış olarak yer yüzeyini (zemini) temsil eden nokta bulutu kullanılmaktadır.

Tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun karar ağacı sınıflandırma yaklaşımı sonucunda elde edilen 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfı içerisinde bina, kulübe, araba, su fıskiyesi, elektrik direği vb. gibi zemine ait olmayan noktalar da yer almaktadır. Doğru bir SAM üretimi için zemini temsil eden noktaları 'bitki örtüsü olmayan' sınıfından ayırmak gerekmektedir. Bunun için TerraSolid'in TerraScan modülünde yer alan makrolardan faydalanılmıştır.

Makrolar, nokta bulutuna uygulanan çeşitli işlemlerin otomatikleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Nokta bulutunun sınıflandırılması, noktaların silinmesi, saklanması, nokta bulutundan çeşitli ürünler elde edilmesi (SAM, SYM vb.), nokta bulutundan vektörel CAD verisi elde edilmesi, nokta bulutunun koordinat dönüşümü vb. gibi birçok işlem makro penceresinde yer alan ana parametre olan 'action' ın alt menüsünde gerçekleştirilmektedir. İlerleyen kısımlarda 'action' parametresinden 'eylem' olarak bahsedilmektedir. Nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla 'classify points' eylemi kullanılmaktadır. Bu eylemin 'routine' olarak adlandırılan alt menüsünde ise nokta bulutunun otomatik sınıflandırılması için çeşitli komutlar bulunmaktadır. Birden fazla sınıflandırma rutini ile toplu işlemleri otomatik yapabilmek üzere rutinler makro eylemi olarak da saklanabilmektedir.

Nokta bulutunun sınıflandırılması amacıyla ‘classify point’ eyleminin ‘ground’ rutini kullanılmıştır. Hava LiDAR nokta bulutu içerisinde zemine ait noktaların sınıflandırılması için en uygun yöntem ‘ground’ rutinidir. Bu rutin ile arka planda nokta bulutundan oluşturulan üçgen yüzey modeli yinelenmektedir. Nokta bulutu içerisindeki bir noktanın zemine ait olup olmadığını belirleyerek üçgen yüzey modele eklemek için yineleme parametreleri belirlenmektedir. TerraScan kullanma klavuzuna göre [132] bu parametreler, yineleme açısı “iteration angle” ve yineleme mesafesinden “iteration distance” oluşmaktadır. Belirlenen yineleme açısı ve yineleme mesafesine dayalı olarak noktaların birbilerine olan komşuluklarına göre zemin noktaları sınıflandırılmaktadır. Bu işlem adımında nokta bulutunun yalnızca geometrik özelliklerinden faydalanılarak sınıflandırma yapılmaktadır.

Bir önceki bölümde, çalışma alanına ait nokta bulutuna uygulanan karar ağacı sınıflandırma yaklaşımı ile ‘bitki örtüsü’ ve ‘bitki örtüsü olmayan’ nokta sınıfları elde edilmiştir. ‘Bitki örtüsü olmayan’ nokta sınıfı içerisinde zemine ait olan nokta bulutunu elde etmek için Şekil 5.19’da görülen sınıflandırma eylemi uygulanmıştır. Bu sınıflandırma eylemi için yineleme parametreleri belirlenmiştir. Yineleme mesafesi için ideal değer olarak 0.40 m uygun görülmüştür. Zemine ait nokta bulutu içerisinde küçük dalgalanmalar olmaması ve çimen, çalı vb. gibi küçük boyutlu bitki örtüsüne ait noktaların sınıflandırma sonucundan muaf tutulması amacıyla yineleme açısı en küçük değer olan 1° seçilmiştir.



Şekil 5. 19 'Ground' eylemi ve yineleme parametrelerinin gösterimi

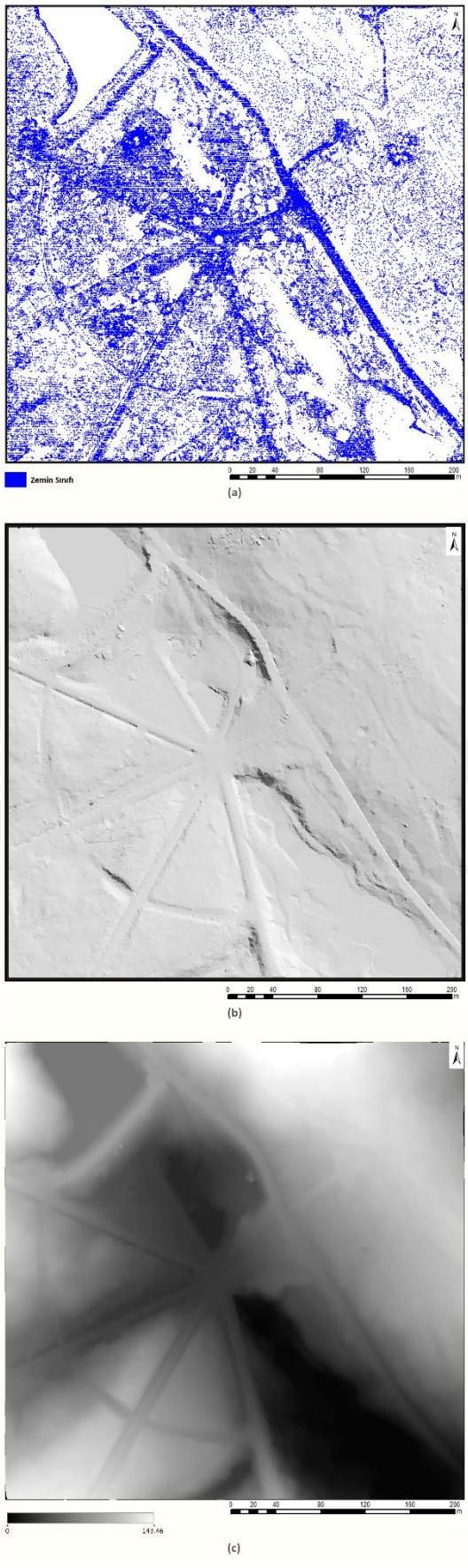
'Bitki örtüsü olmayan' nokta bulutuna uygulanan 'ground' sınıflandırma rutini ile üçgen yüzey modeline göre 0.40 m yüksekte olan noktalar zemin haricindeki noktalar olarak belirlenmiştir. Bu noktalar 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfında kalacak şekilde geri kalan noktalar 'zemin' olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonucunda 'zemin' olarak sınıflandırılacak nokta sayısı "0" olana dek sınıflandırma eylemi tekrarlanmıştır. Çizelge 5.7'de ardı ardına 15 defa yinelenen sınıflandırma eyleminde her bir yinelemenin sonucu verilmektedir.

Çizelge 5. 7 Yinelemeli sınıflandırma eylemi

	Yineleme Sonucu	Zemin	Bitki Örtüsü Olmayan
Başlangıç	-	0	489441
Belirlenen 'zemin' sınıfı	-	12930	476511
1. yineleme	81556	94486	394955
2.yineleme	17899	112385	377056
3.yineleme	4505	116890	372551
4.yineleme	2279	119169	370272
5.yineleme	1406	120575	368866
6.yineleme	1036	121611	367830
7.yineleme	749	122360	367081
8.yineleme	580	122940	366501
9.yineleme	465	123405	366036
10.yineleme	129	123534	365907
11.yineleme	99	123633	365808
12.yineleme	158	123791	365650
13.yineleme	35	123826	365615
14.yineleme	1	123827	365614
15.yineleme	0	123827	365614

Karar ağacı sınıflandırması sonucunda elde edilen ‘bitki örtüsü olmayan’ sınıfına ait 489441 nokta içerisinde 123 827 nokta yinelemeli sınıflandırma eylemi sonucunda ‘zemin’ sınıfına atanmıştır. ‘Zemin’ sınıfına ait nokta bulutu Şekil 5.20(a)’da verilmektedir. Görsel analize dayalı olarak çalışma alanı içerisinde asfalt yol ve toprak yüzeylerde nokta bulutu yoğunluğunun orman altı topoğrafyasına göre daha fazla olduğunu söylemek mümkündür. Sınıflandırma sonucunu görsel olarak kontrol etmek amacıyla Şekil 5.20(b)’de verilen zemin nokta sınıfının kabartı haritası oluşturulmuştur. Hatalı sınıflandırma sonuçları kabartma haritasında açıkça görülmektedir.

Makro eylemlerinden ‘export lattice model’ kullanılarak SAM üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu eylem bir veya birden fazla nokta sınıfına ait noktaların XY koordinatları, yükseklik bilgileri, nokta sayısı ve ortalama yoğunluk (intensity), yatay mesafe, dikey mesafe, yüzeyin pürüzlülüğü gibi analitik değerleri kullanarak üçgen yüzey modeli elde etmektedir [132]. SAM üretimi için ‘zemin’ noktalarına ait nokta sınıfı kullanılmıştır. Oluşturulan üçgen yüzey modelinin grid aralığı 0.25 m olarak belirlenmiştir. Elde edilen SAM’in veri formatı ‘TIF’ dir. Elde edilen SAM Şekil 5.20(c)’de verilmektedir.



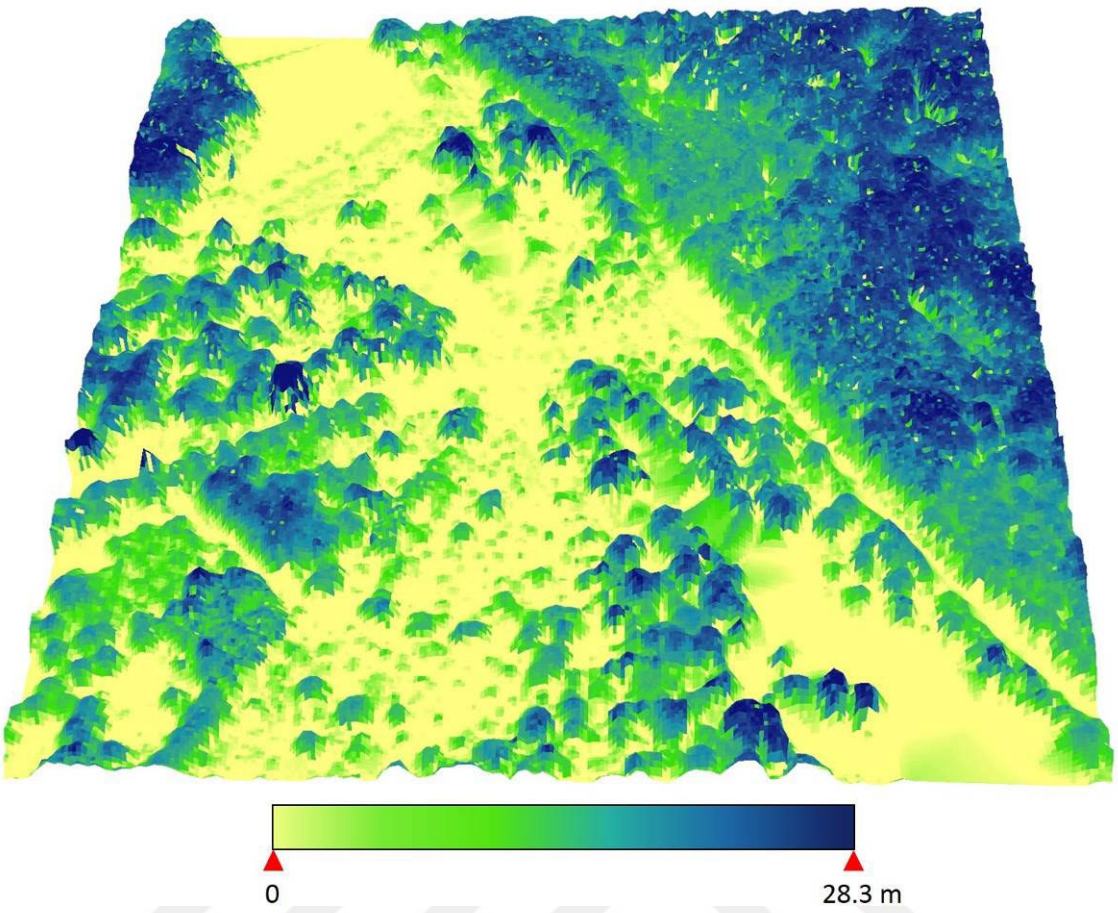
Şekil 5. 20 ‘Zemin’ nokta sınıfı; nokta bulutu (a), kabartı haritası (b) ve SAM (c)

5.5.2 Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli Üretimi

Lazer tarama cihazından iletilen lazer sinyalleri ormanlık alanlarda ağaçların farklı katmanlarından geri dönerek çoklu dönüşler sağlanmaktadır. Algılayıcıya geri dönen lazer sinyallerinden ilk dönüşler genellikle ağaç taçlarının en tepe kısımlarından yansımaktadır. Bu ilk dönüşler filtrelenerek Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli (MÇYM) elde edilmektedir.

MÇYM, ağaçların boylarını gösteren bir üçgen yüzey modelidir. LiDAR nokta bulutunun yüksekliği ise deniz seviyesinden olan yüksekliktir. MÇYM oluşturulmadan önce lazer noktalarının yüksekliğini zeminden olan yüksekliğe göre düzenlemek gerekmektedir. Bunun sonucunda elde edilen lazer noktaları zemin yüksekliğinde ilk dönüş noktaları olacaktır. Bu işlem ilk dönüşlerden elde edilen üçgenlenmiş yüzey modelinden SAM'in çıkarılmasıyla gerçekleştirilmektedir. İlk dönüşlerden yüzey modeli oluşturmak için SAM üretiminde olduğu gibi 'export lattice model' makrosu kullanılmıştır. SAM üretiminde seçilen 'zemin' sınıfı yerine 'bitki örtüsü' nokta sınıfı içerisindeki ilk dönüş noktaları kullanılmıştır. LiDAR nokta bulutunun m^2'deki nokta yoğunluğu 16 nokta olduğu için bu üçgen yüzey modelinin grid aralığı 0.25 m seçilmiştir. İlk dönüşlere ait yüzey modelinin veri formatı 'TIF'dir.

İlk dönüşlere ait yüzey modelinden SAM'in çıkarılma işlemi LASTOOLS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. LASTOOLS yazılımı ArcGIS 10.4.1 platformu üzerinde kullanılmıştır. Elde edilen MÇYM Şekil 5.21'de verilmektedir.



Şekil 5. 21 Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli

Çalışma alanı içerisindeki meşçere yüksekliklerine ait referans ölçüler temin edilemediği için MÇYM'nin doğruluğu analiz edilememiştir. Ancak elde edilen sonuçlar ışığında, tam dalga LİDAR verilerinin bitki örtüsünün sınıflandırma işleminin bu tez kapsamında önerilen karar ağacı sınıflandırma yaklaşımı ile başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve sınıflandırılmış nokta bulutu kullanılarak SAM ve MÇYM'nin başarılı bir şekilde üretilebildiğini ortaya konmaktadır.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte 3-boyutlu veri elde etme amacıyla hava LiDAR sistemlerinin kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Hava LiDAR sistemleri 3-boyutlu şehir modellerinin oluşturulması, kentsel alanlarda değişimlerin izlenmesi, ormanlık alanlarda bitki örtüsünün sınıflandırılması, meşçere yüksekliklerinin belirlenmesi, enerji nakil hatlarının modellenmesi, kıyı kenar çizgisinin belirlenmesi vb. birçok çalışmada başarı ile kullanılmaktadır. Ormancılık uygulamalarında sağladığı avantajlarla tercih edilen tam dalga formu kaydeden LiDAR sistemleri yeryüzü objesinden geri dönen LiDAR sinyalinin çoklu dönüş seviyeleriyle birlikte dönüş sinyalin enerjisinin de kaydedebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, tam dalga formu LiDAR verileri kullanılarak bitki örtüsününün sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, tam dalga formu LiDAR sensörü ile elde edilen nokta bulutu kullanılarak bitki örtüsünü diğer yeryüzü objelerinden ayırabilmek için ulusal ve uluslararası çalışmalarda uygulanan sınıflandırma yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler arasında yer alan karar ağacı sınıflandırma yaklaşımı tercih edilerek, hiç bir geometrik bilgiye veya noktaların birbirleri ile olan komşuluk ilişkilerine bakılmadan tam dalga formu LiDAR nokta bulutunun dönüş genişliği ve çoklu dönüş seviyeleri bilgileri ile nokta tabanlı bitki örtüsü sınıflandırması gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanı olarak, İstanbul ili, Sarıyer ilçesinde yer alan Atatürk Arboretumu ve çevresi seçilmiştir. Çalışma alanı seçilirken, yeryüzü topoğrafyasının doğal objelerinin ve doğal olmayan objelerinin bir arada bulunması göz önünde bulundurulmuştur. Farklı yeryüzü objelerinin birbirlerinden ayırt edilebilirliğini ele almak üzere çalışma alanı içerisinde beş

farklı test alanı oluşturulmuştur. Test Alanı 1 bina çatısını ve Test Alanı 2 ise asfalt yolu temsil ederken Test Alanı 3, Test Alanı 4 ve Test Alanı 5 sırasıyla seyrek, orta yoğun ve yoğun bitki örtüsünü temsil etmektedir.

Çalışma alanına ait tam dalga formu ham LiDAR nokta bulutunun dalga formu analizi için literatürde bir standart haline gelen 'Gauss Ayrıştırması' yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve dönüş genişliği ve dönüş genliği dalga formu öznitelikleri elde edilmiştir. Önerilen karar ağacı yaklaşımının sınır değerlerini belirlemek amacıyla her bir test alanına ait nokta bulutunun dalga formu öznitelikleri incelenmiştir.

Test Alanı 1'de bina çatısı ve Test Alanı 2'de asfalt yola ait nokta bulutlarının dönüş genişliği 0.041 m ile 0.045 m arasında değişmektedir. Bu durum, sadece dönüş genişliği değeri kullanılarak bina çatısı ve asfalt yolun birbirlerinden ayırt edilemeyeceğini ortaya koymuştur. Geri saçılımın enine kesiti gibi diğer dalga formu özniteliklerinin veya optik görüntüler vb. gibi ek bilgiler kullanılarak bina çatısı ve asfalt yol gibi objelerin birbirinden ayrılarak doğru bir şekilde sınıflandırılması mümkün olacaktır. Bu tez kapsamında bu veriler mevcut olmadığından sınıflandırma iyileştirilememiştir.

Farklı yoğunluklardaki (seyrek, orta yoğun ve yoğun) bitki örtüsünü içeren Test Alanı 3, Test Alanı 4 ve Test Alanı 5 içerisinde ağaçlara ait lazer noktalarının dönüş genişliği çoğunlukla 0.046 m ile 0.050 m arasında değişmektedir. Yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda bitki örtüsünden geri dönen lazer noktalarının dönüş genişliğinin diğer yeryüzü objelerinden olan dönüşlere göre daha büyük değer aldığı belirlenmiştir. Ayrıca bu değer aralıklarında olan lazer noktalarının büyük çoğunluğunun çoklu dönüş sağladığı da tespit edilmiştir. İlk ve orta seviye dönüşlerin tamamının bitki örtüsünden geri dönmesi nedeniyle bu noktaların doğrudan bitki örtüsü olarak sınıflandırılması uygundur. Ormanaltı topoğrafyasından dönmesi beklenen son dönüş sinyalerinin ise bazı özel durumlarda ormanaltına ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Bu duruma lazer sinyalinin seyahat yolu boyunca birden fazla hedef ile karşılaşması ve sinyalin enerjisinin azalması neden olmuştur. İlk dönüşlerin orta seviye dönüşlerden, orta seviye dönüşlerin ise son dönüşlerden daha fazla enerjiye sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda çok yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda son dönüş sinyalinin

enerjisinin yeryüzü topoğrafyasına ulaşmasına yetmediği ve son dönüşün ağacın taç hacmi içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Her bir test alanında yapılan tüm bu analizler sonucunda, yeryüzü objelerinin karakteristiklerine göre bu tez çalışmasında önerilen karar ağacı yaklaşımının sınır değerleri belirlenmiştir. Çalışma alanınıa ait nokta bulutunun önerilen karar ağacı yaklaşımı ile sınıflandırılma işleminin ardından bitki örtüsüne ait nokta bulutu diğer yeryüzü objelerinden başarılı bir şekilde ayrılarak 'bitki örtüsü' nokta sınıfına atanmıştır. Bitki örtüsü haricindeki diğer yeryüzü objeleri ise 'bitki örtüsü olmayan' nokta bulutu olarak sınıflandırılmıştır. Tüm bu sonuçlar ışığında bitki örtüsünün diğer yeryüzü objelerinden ayırt edilmesi için dönüş sinyallerinin genişlik değeri ile çoklu dönüş seviyelerinin birlikte kullanımının oldukça avantajlı olduğu ortaya konmuştur.

Bitki örtüsü haricindeki diğer tüm yeryüzü objelerini (bina, kulübe, su fıskiyesi, araba, sokak lambası, elektrik direği vb.) içeren 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfı kullanılarak SAM üretilebileceği de bu tez çalışmasında gösterilmiştir. 'Bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfında zemine ait noktaların tespit edilebilmesi için yüksekliğe bağlı bir filtreleme yöntemi önerilmiştir. Zeminden 0.40 m yükseklikte olan lazer noktaları filtrelendikten sonra geriye kalan nokta bulutunun zemine ait olduğu görülmüştür.

Sınıflandırmanın doğruluk analizi, çalışma alanına ait nokta bulutu üzerinde farklı doğrultularda alınan kesit doğrultuları ile görsel olarak gerçekleştirilmiştir. Alınan kesit doğrultularında yapılan görsel analizler, bu tez çalışmasında önerilen karar ağacı sınıflandırma yaklaşımının bitki örtüsü sınıflandırması için başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi, problemlerin bina çatısının kenar ve köşelerindeki noktalarda yaşandığı ve bu noktaların 'bitki örtüsü olmayan' nokta sınıfında olması beklenirken, 'bitki örtüsü' sınıfına atanmış olduğu görülmüştür. Bu durum, LiDAR sensöründen yeryüzüne iletilen lazer sinyallerinin, bina çatısının kenar ve köşelerinde çoklu dönüş sağlamasından kaynaklanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında önerilen sınıflandırma yaklaşımı kullanılarak, çok yoğun ağaç popülasyonuna sahip ormanlık alanlarda ormanaltı topoğrafyasının doğru bir şekilde çıkarılması için bitki örtüsünün sınıflandırılması ve SAM üretilmesi aşamalarında yaşanabilecek sorunlar elimine edilebilir. Önerilen yaklaşımla başarılı bir şekilde üretilen

SAM yüzey analizleri, eğim ve bakı hesapları, iki nokta arasındaki yüzey profillerinin çıkarılması, hacim hesaplamaları vb. çalışmalarda temel veri kaynağı olarak kullanılabilir. Yine tez kapsamında sınıflandırma sonucunda üretilen diğer bir ürün olan Meşçere Çatısı Yükseklik Modeli ise ağaç boylarının hesaplanması, gövde çaplarının belirlenmesi, ormanın karbon depolama hacminin çıkarılması, tekil ağaçların tespit edilmesi vb. gibi birçok meşçere parametresinin belirlenmesinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Hancock, S., (2010). Understanding the Measurement of Forests with Waveform LiDAR, Doktora Tezi, UCL (University College London), Departments of Space and Climate Physics and Geography, İngiltere.

[2] Evans, J. S., Hudak, A. T., Faux, R. ve Smith, A. M. S., (2009). "Discrete Return LiDAR in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing and Deliverables", Remote Sensing, 1(4): 776–794.

[3] Sumnall, M.J., Hill, R.A. ve Hinsley, S.A., (2016). "Comparison of Small-Footprint Discrete Return And Full-Waveform Airborne LiDAR Data for Estimating Multiple Forest Variables", Remote Sensing of Environment, 173: 214-223.

[4] Sun, X., (2012). "Space-Based LiDAR Systems", NASA Goddard Space Flight Center, Quantum Electronics and Laser Science Conference, Optical Society of America, Mayıs 2012.

[5] Abshire, J.B., (2010). "NASA's Space LiDAR Measurements of Earth and Planetary Surfaces", NASA Goddard Space Flight Center; Greenbelt, Maryland, United States.

[6] ICESat-1 NASA, https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/ , 17 Mayıs 2018.

[7] ICESat-2 NASA, https://nsidc.org/data/ICESat-2 , 04 Ocak 2018.

[8] Hyyppä, J., Hyyppä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönnholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., Maltamo, M., (2004). "Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurements", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(8): 82-89.

[9] Solodukhin, V., Zukov, A. ve Mazugin, I., (1977). "Possibilities of Laser Aerial Photography for Forest Profiling", Lesnoe Khozyaisto (Forest Management) 10: 53-58.

[10] Nelson, R., Krabill, W. ve Maclean, G., (1984). "Determining Forest Canopy Characteristics Using Airborne Laser Data", Remote Sensing of Environment 15: 201-212.

[11] Aldred, A.H. ve Bonnor, G.M., (1985). Application of Airborne Lasers to Forest Surveys, Information Report PI-X-51, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Canada.

[12] Maclean, G. ve Krabill, W., (1986). "Gross-Merchantable Timber Volume Estimation Using an Airborne LiDAR System", Canadian Journal of Remote Sensing, 12: 7-18.

[13] Heurich, M. ve Weinacker, H., (2004). "Automated Tree Detection and Measurement in Temperate Forests of Central Europe Using Laserscanning Data", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(8/W2) : 198-203.

[14] Yan, W.Y., Shaker, A. ve El-Ashmawy, N., (2015). "Urban Land Cover Classification Using Airborne LiDAR Data: A Review", Remote Sensing Environment, 158: 295-310.

[15] Kraus, K. ve Pfeifer, N., (1998). "Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53: 193-203.

[16] Blair, J.B., Coyle, D.B., Bufton, J.L. ve Harding, D.J., (1994). "Optimization of an Airborne Laser Altimeter for Remote Sensing of Vegetation and Tree Canopies", International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1994, Pasadena, California, 2: 939–941.

[17] Blair, J.B., Rabine, D.L. ve Hofton, M.A., (1999). "The Laser Vegetation Imaging Sensor: a Medium-Altitude, Digitisation-Only, Airborne Laser Altimeter for Mapping Vegetation and Topography". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 115–122.

[18] Næsset, E. (1997a). "Determination of Mean Tree Height of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 52: 49-56.

[19] Næsset, E. (1997b). "Estimating Timber Volume of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data", Remote Sensing of Environment 61: 246-253.

[20] Hyyppä, J. ve Inkinen, M., (1999). "Detecting and Estimating Attributes for Single Trees Using Laser Scanner", The Photogrammetric Journal of Finland, 16: 27-42.

[21] Brandtberg, T., (1999). Automatic Individual Tree-Based Analysis of High Spatial Resolution Remotely Sensed Data, Doktora Tezi, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.

[22] Brandtberg, T., Warner T., Landenberger, R. ve McGraw, J., (2003). "Detection and Analysis of İndividual Leaf-Off Tree Crowns in Small Footprint, High Sampling Density LiDAR Data from the Eastern Deciduous Forest in North America", Remote Sensing of Environment, 85(3): 290-303.

[23] Holmgren, J. ve Persson, A., (2004). "Identifying Species of Individual Trees Using Airborne Laser Scanning", Remote Sensing of Environment, 90: 415-423.

[24] Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H. ve Maltamo, M., (2004). "Automatic Detection of Harvested Trees and Determination of Forest Growth Using Airborne Laser Scanning", Remote Sensing of Environment, 90: 451-462.

[25] Reitberger, J., Krzystek, P. ve Stilla, U., (2008). "Analysis of Full-Waveform LiDAR Data for The Classification of Deciduous and Coniferous Trees", International Journal of Remote Sensing, 29(5): 1407–1431.

[26] Lefsky, M., Cohen, W., Acker, S., Parker, G., Spies, T. ve Harding, D., (1999). "LiDAR Remote Sensing of The Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests", Remote Sensing of Environment 70: 339-361.

[27] Mallet, C. ve Bretar, F., (2009). "Full-Waveform Topographic LiDAR: State-of-The-Art", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(1): 1-16.

[28] Fernandez-Diaz, J. C., Carter, W., Glennie, C., Shrestha, R., Pan, Z., Ekhtari, N., Singhania, A., Hauser, D. ve Sartori, M. (2016). "Capability Assessment and Performance Metrics for the Titan Multispectral Mapping LiDAR", Remote Sensing, 8(11): 936-970.

[29] Stoker, J. M., Abdullah, Q. A., Nayegandhi, A. ve Winehouse, J., (2016). "Evaluation of Single Photon and Geiger Mode LiDAR for the 3D Elevation Program", Remote Sensing, 8(9): 767.

[30] Yan, W.Y. ve Shaker, A., (2018). "Airborne LiDAR Intensity Banding: Cause and Solution", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 142:301-310.

[31] Sebat Proje, NABUCCO Doğal Gaz Botu Hattı Projesi, https://sebatproje.com.tr/portfolio/nabucco-dogal-gaz-boru-hatti-projesi/, 20 Haziran 2018.

[32] TÜBİTAK, LiDAR, http://uzay.tubitak.gov.tr/tr/projeler/lidar , 07 Ocak 2019.

[33] Reitberger, J., Krzystek, P., ve Stilla, U., (2012). "Analysis of Full-Waveform LiDAR Data for Tree Species Classification", The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences, 36: 228-233.

[34] Persson, A., Söderman, U., Töpel, J. ve Ahlberg, S., (2005). "Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data", The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, The Netherlands, 36(3/W19): 103-108.

[35] Hofton, M.A., Minster, J.B. ve Blair, J.B., (2000). "Decomposition of Laser Altimeter Waveforms", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(4): 1989-1996.

[36] Jutzi, B. ve Stilla, U., (2005). "Waveform Processing of Laser Pulses for Reconstruction of Surfaces in Urban Areas", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 36(8/W27).

[37] Wagner, W., Roncat, A., Melzer, T. ve Ullrich, A., (2007). "Waveform Analysis Techniques in Airborne Laser Scanning", International Archives of

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 36: 413–418.

[38] Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C., ve Ducic, V., (2008). "3D Vegetation Mapping Using Small-Footprint Full-Waveform Airborne Laser Scanners". International Journal of Remote Sensing, 29 (5): 1433-1452.

[39] Ducic, V., Hollaus, M., Ullrich, A., Wagner, W. ve Melzer, T., M., (2006). "3D Vegetation Mapping and Classification Using Full-Waveform Laser Scanning", Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14-15 Şubat 2006, Viyana, Session 8a, 211–217.

[40] Gross, H., Jutzi, B. ve Thoennessen, U., (2007). "Segmentation of Tree Regions Using Data of a Full-Waveform Laser", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (3/W49A): 57–62.

[41] Höfle, B. ve Hollaus, M., (2010). "Urban Vegetation Detection Using High Density Fullwaveform Airborne LiDAR Data - Combination of Object-Based Image and Point Cloud Analysis", International Archives of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, 36 (7B): 281–285.

[42] Höfle, B., Hollaus, M. ve Hagenauer, J., (2012). "Urban Vegetation Detection Using Radiometrically Calibrated Small-Footprint Full-Waveform Airborne LiDAR Data", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67(1): 134-147.

[43] Rutzinger, M., Höfle, B., Hollaus, M. ve Pfeifer, N., (2008). "Object-Based Point Cloud Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data For Urban Vegetation Classification", Sensors 8 (8): 4505–4528.

[44] Heinzel, J. ve Koch, B., (2011). "Exploring Full-Waveform LiDAR Parameters For Tree Species Classification", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13 (1): 152–160.

[45] Höfle, B., Hollaus, M., Lehner, H., Pfeifer, N. ve Wagner, W., (2008). "Area-Based Parameterization of Forest Structure Using Fullwaveform Airborne Laser Scanning Data", SilviLaser 2008: 8th International Conference on LiDAR Applications in Forest Assessment and Inventory, Heriot-Watt University, 17–19 Eylül 2008, Edinburgh, UK, 229–235.

[46] Litkey, P., Rönnholm, P., Lumme, J., Liang, X., (2007). "Waveform Features For Tree Identification", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (3/W52): 258–263.

[47] Reitberger, J., Krzystek, P. ve Heurich, M., (2006). "Full Waveform Analysis of Small Footprint Airborne Laser Scanning Data in The Bavarian Forest National Park For Three Species Classification", Proceeding of the International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry, 14–15 Şubat 2006, Vienna, Austria, 218–228.

[48] Yao, W., Krzystek, P. ve Heurich, M., (2012). "Tree Species Classification and Estimation of Stem Volume and DBH Based on Single Tree Extraction by

Exploiting Airborne Full-Waveform LiDAR Data", Remote Sensing of Environment, 123: 368–380.

[49] Heurich, M., (2006). Evaluierung und Entwicklung von Methoden Zur Automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten Flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren, Schriftenreihe des Wissenschaftszentrums Weihenstephan für Ernährung, Ph. D. Thesis, Department of Ecosystem and Landscapemanagement, Technical University of Munich, Munich, Germany.

[50] Doneus, M. ve Briese, C., (2006). "Digital Terrain Modelling for Archaeological Interpretation within Forested Areas Using Full-Waveform Laser Scanning", The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST, Zypern, 155-162.

[51] Petrie, G. ve Toth, C.K., (2008). "Introduction to Laser Ranging, Profiling and Scanning", Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 1-28.

[52] Wehr, A. ve Lohr, U., (1999). "Airborne Laser Scanning-An Introduction and Overview", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 68-82.

[53] Wehr, A., 2008. "LiDAR Systems and Calibration". Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Newyork, 129-172.

[54] Baltsavias, E.P., (1999). "Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3): 164-198.

[55] Baltsavias, E.P., (1999). "Airborne laser scanning: Basic relations and formulas", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2–3): 199–214.

[56] Erişir, Z., (2015). Nokta Tabanlı Sınıflandırma Yöntemleri ile LiDAR Verilerinin Sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[57] Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., ve Studnicka, N., (2006). "Gaussian Decomposition and Calibration of A Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60 (2): 100-112.

[58] Stilla, U. ve Jutzi, B., (2008). "Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed Laser Systems", Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 215-234.

[59] Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. ve Chipman, J., (1994). Remote Sensing and Image Interpretation, John Wiley & Sons, New York, USA.

[60] Habib, A., Ghanma, M., Morgan, M. ve Rami, A., (2005). "Photogrammetric and LiDAR Data Registration Using Linear Features", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71(6): 699-707.

[61] Hollaus, M., Wagner, W. Ve Kraus, K., (2005). "Airborne Laser Scanning and Usefulness for Hydrological Models", Advances in Geosciences, 5: 57-63.

[62] Reutebuch, S., Andersen, H.E. ve McGaughey, R., (2005). "LiDAR: An Emerging Tool for Multiple Resource Inventory", Journal of Forestry, 103(6): 286-292.

[63] Webster, T.L. ve Dias, G., (2006). "An Automated GIS Procedure for Comparing GPS and Proximal LiDAR Elevations", Computers & Geosciences, 32(6): 713-726.

[64] Pfeifer, N. ve Briese, C., (2007). "Geometrical Aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(3/W52): 311-319.

[65] Petrie, G. ve Toth, C.K., (2008). Airborne and Spaceborne Laser Profilers and Scanners, Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Newyork, 30-85.

[66] Jelalian, A. V., (1992). Laser Radar Systems, Artech House, Boston, London.

[67] Kamermann, G.W., (1993). Laser Radar, Active Electro-Optical Systems, The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Dallas, Texas.

[68] Hancock, S., Armston, J., Li, Z., Gaulton, R., Lewis, P., Disney, M., Danson, F.M., Strahler, A., Schaaf, C., Anderson, K. ve Gaston, K.J., (2015). "Waveform LiDAR Over Vegetation: An Evaluation of Inversion Methods for Estimating Return Energy", Remote Sensing of Environment, 164: 208-224.

[69] Jutzi, B. ve Stilla, U., (2005). "Measuring and Processing the Waveform of Laser Pulses", 7th Optical 3-D Measurement Techniques, 194-203.

[70] Lohani, B., ve Ghosh, S., (2017). "Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems", Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 87 (4): 567-579.

[71] Li, Q., (2008). "Decomposition of Airborne Laser Scanning Waveform Data Based on EM Algorithm", The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII (B1): 211-218.

[72] Harding, D., (2008). Pulsed Laser Altimeter Ranging Techniques and Implications for Terrain Mapping, Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Newyork, USA, 173-195.

[73] Bretar, F., Chauve, A., Bailly, J.-S., Mallet, C. ve Jacome, A., (2009). "Terrain Surfaces And 3-D Landcover Classification from Small Footprint Full-Waveform LiDAR Data: Application to Badlands", Hydrol Earth System Sciences, 13: 1531-1545.

[74] Guenther, G. ve Mesick, H., (1988). "Analysis of Airborne LiDAR Bathymetric Waveforms", 9th Ocean Optics, 4-6 Nisan 1988, Orlando, Florida, USA, 232-241.

[75] Wozencraft, J., ve Millar, D., (2005). "Airborne LiDAR and Integrated Technologies for Coastal Mapping and Nautical Charting", Marine Technology Society Journal, 39(3): 27-35.

[76] Hug, C., Ullrich, A. ve Grimm, A., (2004). "Litemapper-5600-A Waveform-Digitizing LiDAR Terrain and Vegetation Mapping System", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (8/W2): 24-29.

[77] Guo, L., Chehata, N., Mallet, C. ve Boukir, S. (2011). "Relevance of Airborne LiDAR and Multispectral Image Data for Urban Scene Classification Using Random Forests", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66: 56–66.

[78] Sun, G., ve Ranson, K.J., (2000). "Modeling LiDAR Returns from Forest Canopies", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(6): 2617-2626.

[79] Teledyne Optech, TiTAN World's First Multispectral LiDAR, https://www.teledyneoptech.com/en/products/airborne-survey/titan/, 8 Kasım 2018.

[80] Zou, X., Zhao, G., Li, J., Yang, Y. ve Fang, Y., (2016). "3D Land Cover Classification Based on Multispectral LiDAR Point Clouds", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41(B1):741-747.

[81] Leica HawkEye III, The Most Efficient Deep Water LiDAR Sensor, http://www.nik.com.tr/Leica_HawkEye_III.pdf, 3 Kasım 2018

[82] Harris, Geiger-mode LiDAR, https://www.harris.com/solution/geiger-mode-lidar, 9 Kasım 2018.

[83] Sigma Space, Single Photon LiDAR, http://www.sigmaspace.com/single-photon-lidar, 10 Kasım 2018.

[84] Toth, C.K., Laky, S.A., Zaletnyik, P. ve Grejner-Brzezinska, D., (2011). "Peak Detection From Full-Waveform Data", International LiDAR Mapping Forum, New Orleans, USA.

[85] Mallet, C., (2010). Analyze de donnees LiDAR a Retour d'Onde Complete pour la Classification en Milieu Urbain, Ph. D. Thesis, Télécommunications et Électronique, Telecom ParisTech, Paris, Fransa.

[86] Pirotti, F., Guarnieri, A., Masiero, A., Vettore, A. ve Lingua, E., (2014). "Processing LiDAR Waveform Data For 3D Visual Assessment of Forest Environments", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, (XL-5): 493-499.

[87] Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C. ve Kraus, K., (2004). "From Single-Pulse to Full-Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35 (B3), 201-206.

[88] Reitberger, J., Schnörr, C., Krzystek, P. ve Stilla, U., (2009). "3D Segmentation of Single Trees Exploiting Full-Waveform LiDAR Data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6): 561-574.

[89] Yao, W., Krzystek, P. ve Heurich, M., (2013). "Enhanced Detection of 3D Individual Trees in Forested Areas Using Airborne Full-Waveform LiDAR Data by Combining Normalized Cuts With Spatial Density Clustering", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 1: 349–354.

[90] Pirotti, F., (2011). "Analysis of Full-Waveform LiDAR Data for Forestry Applications: A Review of Investigations and Methods", iForest-Biogeosciences and Forestry, 4: 100-106.

[91] Zhou, M., Li, C.R., Ma, L. ve Guan, H.C., (2016). "Land Cover Classification from Full-Waveform LiDAR Data Based on Support Vector Machines", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, XLI-B3: 447–452.

[92] Chauve, A., Mallet, C., Bretar, F., Durrieu, S., Deseilligny, M.P. ve Puech, W., (2007). "Processing Full-Waveform LiDAR Data: Modelling Raw Signals", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (3/W52): 195-200.

[93] RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, LAS Extrabytes Implementation in RIEGL Software Whitepaper http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Whitepaper_LASextrabytes_implementation_in-RIEGLSoftware_2017-12-04.pdf, 24 Mart 2017.

[94] Toomay, J.C. ve Hannen, P.J., (2004). Radar Principles for the Non-Specialist, Third Edition, Science Applications International Corporation, Dayton, Ohio, USA.

[95] Li, X., Yang, B., Xie, X., Li, D. ve Xu, L., (2018). "Influence of Waveform Characteristics on LiDAR Ranging Accuracy amd Precision", Sensors, 18 (4): 1156.

[96] Roncat, A., Morsdorf, F., Briese, C., Wagner, W. ve Pfeifer, N., (2014). "Laser Pulse Interaction with Forest Canopy: Geometric and Radiometric Issues", Managing Forest Ecosystems, 27 (2): 19–41.

[97] Lehner, H. ve Briese, C., (2010). "Radiometric Calibration of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data Based on Natural Surfaces", International Archives Photogrammetry Remote Sensing Spatial Information Sciences, 38(7B): 360-365.

[98] Gonzales, S.A., Valentinuzzi, M. ve Arini, P.D., (2016), Deconvolution, https://pulse.embs.org/july-2016/deconvolution/ , 1 Eylül 2018.

[99] Jutzi, B. ve Stilla, U., (2006). "Range Determination with Waveform Recording Laser System Using a Wiener Filters", ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing, 61: 95-107.

[100] Fieber, K.D., Davenport, I.,J., Ferryman, J.,M., Gurney, R., J., Walker, J., P. ve Hacker, J.,M., (2013). "Analysis of Full-Waveform LiDAR Data For Classification of an Orange Orchard Scene", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82: 63-82.

[101] Wagner, W., (2010). “Radiometric Calibration of Small-Footprint Full-Waveform Airborne Laser Scanner Measurements: Basic Physical Concepts”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65 (6): 505–513.

[102] Uzar Dinlemek, M., (2012). Otomatik Bina Çıkarımı Uygulamalarında Çoklu Algılama Sistemi Verilerinin Kullanım Olanaklarının Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[103] Sithole, G., (2005). Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data, Ph. D. Thesis, ITC, University of Delft, the Netherlands.

[104] Alexander, C., Tansey, K., Kaduk, J., Holland, D. ve Tate, N.J., (2010). “Backscatter Coefficient as an Attribute For The Classification of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data in Urban Areas”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65 (5): 423–432.

[105] Mallet, C., Bretar, F., Roux, M., Soergel, U. ve Heipke, C., (2011). “Relevance Assessment of Full-Waveform LiDAR Data For Urban Area Classification”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66 (6): 71–84.

[106] Atasever, Ü. H., 2011. Uydu Görüntülerinin Sınıflandırılmasında Hızlandırma (Boosting), Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman (Random Forest) Ve Regresyon Ağaçları Yöntemlerinin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.

[107] Breiman, L., (2001). Random Forests, Machine Learning, 45(1): 5-32.

[108] Global Software Support, Random Forest Classifier–Machine Learning, https://www.globalsoftwaresupport.com/random-forest-classifier-bagging-machine-learning/, 9 Mart 2019.

[109] Koma, Z., Koening, K. ve Höfle, C., (2016). “Urban Tree Classification Using Full-Waveform Airborne Laser Scanning”, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-3: 185-192.

[110] Shi, Y., Wang, T., Skidmore, A.K. ve Heurich, M., (2018). “Important LiDAR Metrics For Discriminating Forest Tree Species in Central Europe”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 137 (2018): 163-174.

[111] Üstüner, M., 2013. Destek Vektör Makineleri Yöntemi İle Arazi Kullanımı Sınıflandırılmasında Kernel Fonksiyonlarına Ait Karşılaştırmalı Parametre Duyarlık Analizi: Rapideye Ve Spot Örneği, Yüksek Lisans Tez, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[112] Drakos, G., Support Vector Machines vs Logistic Regression, https://towardsdatascience.com/support-vector-machine-vs-logistic-regression-94cc2975433f, 10 Mart 2019.

[113] Mountrakis, G., Im, J. ve Ogole, C. (2011). “Support Vector Machines in Remote Sensing: A Review”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3): 247–259.

[114] Samadzadegan, F., Bigdeli, B. ve Ramzi, P. (2010). “A Multiple Classifier System for Classification of LiDAR Remote Sensing Data Using Multi-Class SVM”, IAPR Multiple Classifier Systems, Cairo, Egypt, 254–263.

[115] Mallet, C., Soergel, U. ve Bretar, F., (2008). “Analysis of Full-Waveform LiDAR Data For an Accurate Classification of Urban Areas”, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (B3a): 85–92.

[116] Romanczyk, P., 2015. Extraction of Vegetation Biophysical Structure from Small-Footprint Full-Waveform Lidar Signals, Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, Rochester, USA.

[117] Næsset, E. ve Okland, T., (2002). “Estimating Tree Height and Tree Crown Properties Using Airborne Scanning Laser in a Boreal Nature Reserve”, Remote Sensing of Environment, 79(1): 105-115.

[118] Dubayah, R.O. ve Drake, J.B., (1999). “LiDAR Remote Sensing for Forestry”, Journal of Forestry, 98(6): 44–46.

[119] Hancock, S., Lewis, P., Foster, M., Disney, M., ve Muller, J.P., (2012). “Measuring Forests with Dual Wavelength LiDAR: A Simulation Study Over Topography”, Agricultural and Forest Meteorology, 161: 123-133.

[120] Hofton, M. A., Rocchio, L. E., Blair, J. B., ve Dubayah, R., (2002). “Validation of Vegetation Canopy LiDAR Sub-Canopy Topography Measurements for a Dense Tropical Forest”, Journal of Geodynamics, 34(3-4): 491–502.

[121] Drake, J.B., Dubayah, R., Clark, D., Knox, R.G., Blair, J.B., Hofton, M.A., Chazdon, R.L., Weishampel, J.F., ve Prince, S., (2002). “Estimation of Tropical Forest Structural Characteristics Using Large-Footprint LiDAR”, Remote Sensing of Environment, 79(2): 305-319.

[122] Zimble, D.A., Evans, D.L.,Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C. ve Gerard, P.D., (2003). “Characterizing Vertical Forest Structure Using Small-Footprint Airborne LiDAR”, Remote Sensing of Environment, 87 (2003): 171-182.

[123] Chen, J. M., ve Black, T. A., (1992). “Defining Leaf Area Index for Non-Flat Leaves”, Plant Cell Environment, 15(4): 421–429.

[124] Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., ve Baret, F., (2004). “Review of Methods For in Situ Leaf Area Index Determination: Part I. Theories, Sensors and Hemispherical Photography”, Agricultural and Forest Meteorology, 121(1): 19–35.

[125] Yılmaz, O., Y. ve Yılmaz, H., (2012). “Atatürk Arboretumu Coğrafi Bilgi Veri Tabanının Oluşturulmasında Özgür Açık Kaynak Kodlu Yazılım Kullanımı”, Tarım Bilimleri Dergisi, 18: 308-314.

[126] Riegl, LMS-Q680i, Data Sheet, http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_LMS-Q680i_28-09-2012_01.pdf, 3 Haziran 2018.

[127] BİMTAŞ, (2016). Hava LiDAR Verilerinden Sayısal Yüzey Modeli Üretimi Eğitim Dökümanı, İstanbul.

[128] Jalobeanu, A. ve Gonçalves, G.R., (2012). "The Full-Waveform LiDAR Riegl LMS-Q680i: From Reverse Engineering to Sensor Modeling", American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference, Sacramento, California, USA, 264-274.

[129] Riegl RiWorld Kullanma Klavuzu, 2013, ss.69-70.

[130] Yastıklı, N., (2004). "Algılama Sistemlerinin Doğrudan Yöneltilmesi", Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 2004(90): 5-11.

[131] ASPRS 2011, Las Specification Version 1.4 - R13, http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf, 19 Ocak 2019.

[132] TerraSolid TerraScan Kullanma Klavuzu, https://www.terrasolid.com/download/tscan.pdf , 22 Şubat 2017.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ayşe Buşra KURTAK

Doğum Tarihi ve Yeri : 18/03/1991 – Beyoğlu/İSTANBUL

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : aysebusrakurtak@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Harita Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Kağıthane Anadolu Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2015-halen	BİMTAŞ	Harita Mühendisi
2013	Kağıthane Belediyesi Plan ve Proje Müdürlüğü Harita Servisi	Stajyer Harita Mühendisi
2012	İstanbul Tapu Ve Kadastro 2. Bölge Müdürlüğü Beşiktaş Kadastro Birimi	Stajyer Harita Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Bayburt, S., Kurtak, A.B., Büyüksalih, G., Jacobsen, K., (2017). “Geometric Accuracy Analysis of WORLDDEM in Relation to AW3D30, SRTM and ASTER GDEM2”, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(1W1): 211-217.

Bildiri

1. Bayburt, S., Yaman, R., Kurtak, A.B., Büyüksalih, G., Başkaraca, A.P., (2016). “Entegre Havza Modellemesinde Yeni Yaklaşım: Melen Hava LiDAR Projesi”, Dünya CBS Günü Sempozyumu, 24-25 Kasım 2016, İstanbul.

2. Kurtak, A.B., Yastıklı, N., 2018. “Tam Dalga Formu LiDAR Verileri ile Bitki Örtüsü Sınıflandırma Olanaklarının Araştırılması”, VII. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2018), 18-21 Eylül 2018, Eskişehir.