T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NOKTA TABANLI SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ İLE LiDAR VERİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

ZEHRA ERİŞİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

UZAKTAN ALGILAMA VE CBS PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. NACİ YASTIKLI

İSTANBUL, 2015

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NOKTA TABANLI SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ İLE LiDAR VERİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Zehra ERİŞİR tarafından hazırlanan tez çalışması 25.06.2015 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. Fatmagül KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Zaide DURAN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile çalışmama ışık tutan sayın Prof. Dr. Naci YASTIKLI' ya teşekkürlerimizi arz ederim.

Bu çalışmada kullanılan veri setini sağladıkları için İstanbul Büyükşehir Belediyesi' ne teşekkür ederim.

Bu tezin geliştirilmesi aşamasında, yapılan görüşmeler sırasında verdikleri bilgiler için BİMTAŞ' a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve hayatım boyunca her an yanımda olan değerli ailem ve özellikle en değerli varlığım annem Fatma ERİŞİR' e teşekkürlerimi bildirmeyi bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince bana destek olan, beni cesaretlendiren ve her zaman yanımda olan Erkut ÇETİN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2015

Zehra ERİŞİR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xii

ÇİZELGE LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 6
1.2 Tezin Amacı 11
1.3 Hipotez 12

BÖLÜM 2

LiDAR 13

2.1 LiDAR' ın Kullanım Alanları 14
2.2 Sistem Bileşenleri 15
2.3 LiDAR Ölçme Prensibi 17
2.3.1 Pulse ile Mesafe Belirleme 19
2.3.2 Faz Farkı ile Mesafe Belirleme 20
2.4 Çoklu Yansıma 21
2.5 Yoğunluk (Intesity) Verisi 24

BÖLÜM 3

SINIFLANDIRMA 25

3.1 Sınıflandırma Yöntemleri 25
3.1.1 Piksel Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi 25
3.1.1.1 Kontrolsüz Sınıflandırma 26

3.1.1.2 Kontrollü Sınıflandırma 27
3.1.2 Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi 28
3.1.2.1 Görüntü Segmentasyonu 28
3.1.2.2 Görüntü Sınıflandırması 29
3.1.3 Nokta Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi 30
3.2 Nokta Bulutunun Sınıflandırılması 30
3.2.1 Filtreleme 31
3.2.1.1 Filtre Karakteristikleri 33
Veri Yapısı 34
Test Komşuluğu ve Tek Seferde Filtrelenen Nokta Sayısı 34
Devasızlıkların Ölçümü 35
Tek Adım ya da İterasyon 35
Değiştirme ve Silme 35
İlk Gönderilen ve Yansıyan Verinin Kullanılması 36
3.2.1.2 Filtreleme Yaklaşımları 36
Morfolojik Filtreler 36
Artan Filtreler 38
Yüzey Tabanlı Filtreler 39
Segmentasyon Tabanlı Filtreler 41
3.2.2 Hava LiDAR ile Elde Edilen Nokta Bulutunun Yollar, Binalar, Ağaçlar, Çalılık ve Ormanlık Alanı vb. Gibi Farklı Objelere Ayrılarak Sınıflandırılması 43
3.2.2.1 LiDAR Nokta Bulutunun Grid Tabanlı (Grid-Based) Yöntem ile Sınıflandırılması 43
3.2.2.2 LiDAR Nokta Bulutunun Nokta Tabanlı (Point-Based) Yöntem ile Sınıflandırılması 44
Geometrik Özellikler 46
Dönüş (Echo) Tabanlı Özellikler 48
Tam Dalga Boyu Kaydeden (Full-waveform) LiDAR Özellikleri 50
3.3 Doğruluk Analizi 51
3.3.1 Hata Matrisi ve Hata Matrisinden Türetilen Doğruluk Değerlendiricileri 52

BÖLÜM 4

NOKTA TABANLI SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ İLE LiDAR NOKTA BULUTUNUN OTOMATİK SINIFLANDIRILMASI 57

4.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veriler 58
4.2 Nokta Tabanlı Sınıflandırma 65
4.2.1 Standart Yaklaşım 69
4.2.2 Yaklaşım 1 70
4.2.3 Yaklaşım 2 71
4.2.4 Parametre Analizleri 72
4.2.4.1 Zemin Sınıfı Parametre Analizi 73
4.2.4.2 Bitki Örtüsü Sınıfları Parametre Analizi 78
4.2.4.3 Bina Sınıfı Parametre Analizi 79
4.2.4.4 Diğer Parametre Analizleri 88

4.2.5 Test Alanlarındaki Nokta Bulutunun Nokta Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi ile Otomatik Sınıflandırılması 90
4.3 Doğruluk Analizi 98
4.4 3B Bina Modeli Üretimi 106

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 109

KAYNAKLAR 112

ÖZGEÇMİŞ 123

SİMGE LİSTESİ

R	Eğik mesafe
c	Işık hızı
t_L	Sinyalin gidiş - dönüş süresi
Δ_{tL}	Zaman ölçen aletin elde edilebilir zaman çözünürlüğü
ΔR	Eğik mesafe çözünürlüğü
T	Sinyalin periyodu
Φ	Gönderilen ve alınan sinyal arasındaki faz farkı
λ	Dalga boyu
$\Delta\Phi$	Faz farkı çözünürlüğü
d	Yatay mesafe
x,y,z	Nokta koordinatları
$\Delta h_{max}(d)$	Yapı elemanı
$\tan(\gamma)$	Araziye ait maksimum eğim
σ_z	Tarama noktalarının yükseklik hassasiyeti
$\forall$	Nokta seti
P_T	Zemin noktaları
α, β, γ	Üçgen ve üçgen köşelerinden aday noktayı birleştiren kenarlar arasındaki açı
l	İterasyon tekrarı
V	Yerel komşuluk
V_s	Küre
V_c	Düşey silindir
r	Yarıçap
Δz	LiDAR noktası ve geniş bir silindir içindeki en alçak nokta arasındaki yükseklik
Δz_{fl}	Çoklu dönüşlerde ilk (first) ve son (last) dönüş arasındaki yükseklik farkı
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Özdeğerler
$L_{1.2}$	Düzenleme standardı
N_z	Düşey doğrultudan sapma açısı
σ_{nz}	Normal vektörün saçma açısı

R_z	Yerel düzlemin artıkları
N_s	Tekli dönen
N_f	İlk dönen
N_i	Ortada dönen
N_l	Son dönen
N_{pt}	Tüm sınıflandırılmamış (üye) noktalar
A	Yüksek dönüş genliği
ω	Yüksek dönüş genişliği
α	En düşük dönüş şekli
σ	Dönüşün enine kesiti
i, j	Sınıflar
n_{i+}	Sınıflandırma sonucu i sınıfına atanmış örneklemlerin sayısı
n_{+j}	Referans veride j sınıfında bulunan örneklemlerinin sayısı
n_{ii}, n_{jj}	Hata matrisinde köşegen elemanları

KISALTMA LİSTESİ

ASCII	American Standart Code for Information Interchange
ALS	Airborne Laser Scanning, Airborne LiDAR System
ANN	Artificial Neural Network
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Coupled Device
CRF	Conditional Random Field
CW	Continuous Wave
DEM	Digital Elevation Model
DGPS	Differential Global Positioning System
DR	Density Ratio
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EM	Expectation – Maximization
FN	False Negative
FOV	Field of View
FP	False Positive
GD	Genel Doğruluk
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
ICM	Iterated Conditional Modes
IDW	Inverse Distance Weighting
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ISODATA	Iterative Self - Organizing Data Analysis Technique Algorithm
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LiDAR	Light Detection and Ranging
LRF	Laser Range Finder
MLS	Mobile Laser Scanner, Mobile Laser Scanning
MRF	Markov Random Field
NASA	National Aeronautics and Space Administration
nDSM	Normalized Digital Surface Model
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index

PD	Point Density
REIN	Repetitive Interpolation
RF	Random Forest
SAM	Sayısal Arazi Modeli
SVM	Support Vector Machine
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TIN	Triangulated Irregular Network
TLS	Terrestrial Laser Scanner, Terrestrial Laser Scanning
TN	True Negative
TP	True Positive
YM	Yüzey Modeli
3B	3 Boyutlu
3D	3 Dimensional
2D	2 Dimensional

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Lazer tarayıcı sistemi ana bileşenleri (Wehr ve Lohr [85]) 16
Şekil 2. 2 LiDAR sisteminden sinyalin yayılması (Badea ve Jacobsen [89]) 17
Şekil 2. 3 Lazer tarayıcı temel prensibi (Wehr ve Lohr [85]) 18
Şekil 2. 4 Tarama mekanizmaları (Sol üstten saat yönüne göre: döner ayna, palmer tarayıcı, fiber tarayıcı, döner poligon) (Wehr ve Lohr [85]) 19
Şekil 2. 5 Pulse lazerlerin ölçüm prensibi (Wehr [90]) 19
Şekil 2. 6 CW lazerlerin ölçüm prensibi (Wehr [90]) 20
Şekil 2. 7 Sırasıyla ölçüm, taşıyıcı ve modülasyon sinyalleri (Petrie ve Toth [63]) 20
Şekil 2. 8 Lazer sinyalinin bitki örtüsü yüzeyinden yansıması (Li [92]) 22
Şekil 2. 9 Dört dönüşlü LiDAR verisi; tüm dönüşler (a), ilk dönüş (b), ikinci dönüş (c), üçüncü dönüş (d), dördüncü dönüş (e) (Nayegandhi [93]) 22
Şekil 2. 10 İlk dönüş (a), son dönüş (b) (Vosselman [94]) 23
Şekil 2. 11 DSM (a), yoğunluk görüntüsü (b) (Uzar ve Yastıklı [57]) 24
Şekil 3. 1 Üç farklı sınıf için iki farklı kontrol verisinin iki boyutlu özellik uzayında oluşan karar sınırları ve kontrol verilerinin dağılımı (Sunar ve Özkan [103]) 27
Şekil 3. 2 Sınıflandırma yöntemleri; piksel tabanlı (a), nesne tabanlı (b) (Sunar ve Özkan [103]) 29
Şekil 3. 3 Eğim tabanlı (a), minimum blok (b), yüzey tabanlı (c) ve kümeleme/ segmentasyon (d) filtrelerinin çalışma prensipleri (Sithole ve Vosselman [116]) 32
Şekil 3. 4 Yakınlığa göre kümelenen nokta bulutu (a), düzlemsel bölgere göre kümelenen nokta bulutu (b) (Vosselman [94]) 33
Şekil 3. 5 Noktadan noktaya (a), noktadan noktalara (b) ve noktalardan noktalara (c) algoritmalarının çalışma prensipleri (Sithole ve Vosselman [116]) 35
Şekil 3. 6 Zemin ve zemine ait olmayan noktaların yapı elemanı kullanılarak sınıflandırma sonuçları (He [24]) 37
Şekil 3. 7 Aday noktanın zemine ait olup olmadığının belirlenmesi aşamasında hesaplanan değerler (Axelsson [123]) 39
Şekil 3. 8 Artan filtre kullanılarak filtrelenmiş yüzey; orjinal veri (a), filtrelenmiş veri (b), filtreleme öncesi ve sonrasının yandan görünümü (c) (Axelsson [123]) 39
Şekil 3. 9 Ağırlık fonksiyonu (Sithole [9]) 40

Şekil 3. 10 Yoğunluğa göre renklendirilmiş orjinal veri (a), yüzey tabanlı filtreleme ile elde edilmiş SAM (b) (Pfeifer ve Mandlburger [23]) 40
Şekil 3. 11 Orjinal nokta bulutu (a), segmentlerin aynı renkte olduğu ve sadece büyük segmentlerin gösterildiği segmentasyon sonucu (b), (b)'nin perspektif görünümü (c) (Pfeifer ve Mandlburger [23]) 42
Şekil 3. 12 Mevcut durum ve 8 önemli özellik (Mavi: Alçak ve Kırmızı: Yüksek) (Kim ve Sohn [130]) 45
Şekil 3. 13 Yoğunluk oranının nokta tabanlı hesaplanması (Kim ve Sohn [133]) 50
Şekil 3. 14 0.25 m çözünürlüklü ortogörüntü (a) ve sınıflandırmaya yardımcı bazı LİDAR özellikleri; dönüş genliği (b), dönüş genişliği (c) (Chehata vd. [132]) 51
Şekil 3. 15 Hata matrisinin matematiksel gösterimi (Congelton ve Green [138]) 53
Şekil 3. 16 Bina parçası olarak yanlış sınıflandırılmış düz ağaç tepesi (a), çatılar kısmen ağaç ile kaplı olduğundan eksik çıkarılan bina köşeleri (b) (Zhang vd. [8]) 54
Şekil 4. 1 Riegl LSM-Q680i lazer tarayıcı [140] 59
Şekil 4. 2 Çalışma alanındaki farklı arazi karakteristiklerine sahip üç test alanı 60
Şekil 4. 3 Test alanlarının ortofotoları; Test Alanı 1 (a), Test Alanı 2 (b), Test Alanı 3 (c) 61
Şekil 4. 4 Test Alanı 1' e ait nokta bulutu (Yoğunluk değerine göre renklendirilmiş perspektif görünüm (a), işaretli kısmın yakından görünümü (b), sınıflara göre renklendirilmiş görünüm (c)) 62
Şekil 4. 5 Test Alanı 2' ye ait nokta bulutu (Yoğunluk değerine göre renklendirilmiş perspektif görünüm (a), işaretli kısmın yakından görünümü (b), sınıflara göre renklendirilmiş görünüm (c)) 63
Şekil 4. 6 Test Alanı 3' e ait nokta bulutu (Yoğunluk değerine göre renklendirilmiş perspektif görünüm (a), işaretli kısmın yakından görünümü (b), sınıflara göre renklendirilmiş görünüm (c)) 64
Şekil 4. 7 Zemin iterasyon parametreleri [141] 66
Şekil 4. 8 Standart Yaklaşım' a ilişkin genel işlem adımları 69
Şekil 4. 9 Yaklaşım 2' ye göre genel işlem adımları 71
Şekil 4. 10 Parametre analizi gerçekleştirilen pilot bölgeye ait ortofoto (a) ve bu bölgenin yüksekliğe göre renklendirilmiş nokta bulutu (b) 74
Şekil 4. 11 Standart yaklaşım (a) ve 10 iterasyonlu zemin kuralının bulunduğu kurallar bütünü kullanılarak sınıflandırma (b) 75
Şekil 4. 12 İterasyon açısını azalt seçeneği kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma (a), iterasyon açısını azalt seçeneği kullanılmadan gerçekleştirilen sınıflandırma (b) 77
Şekil 4. 13 İşaretli çizgi boyunca (Şekil 4.12) alınan kesit 78
Şekil 4. 14 Bitki örtüsü analizi öncesi sınıflandırma (a) ve bitki örtüsü analizi sonrası sınıflandırma sonuçları (b) 79
Şekil 4. 15 Test Alanı 2' deki pilot bölge 1 (a), pilot bölge 2 (b), pilot bölge 3 (c)' e ait ortofotolor ve yüksekliğe göre renklendirilmiş nokta bulutları 81
Şekil 4. 16 Pilot bölge 1' de minimum bina boyutu 100 m^2 (a), 50 m^2 (b), 20 m^2 (c) ve 10 m^2 (d) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları 82
Şekil 4. 17 Pilot bölge 2' de minimum bina boyutu 100 m^2 (a), 50 m^2 (b), 20 m^2 (c) ve 10 m^2 (d) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları 83

Şekil 4. 18 Pilot bölge 3' de minimum bina boyutu 100 m^2 (a), 50 m^2 (b), 20 m^2 (c) ve 10 m^2 (d) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları 84
Şekil 4. 19 Pilot bölge 1' de Z hata payı değeri 0.01 m (a), 0.12 m (b) 0.5 m (c), 1.5 m (d) ve 2 m (e) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları 86
Şekil 4. 20 Pilot bölge 2' de Z hata payı değeri 0.01 m (a), 0.12 m (b) 0.5 m (c), 1.5 m (d) ve 2 m (e) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları 87
Şekil 4. 21 Pilot bölge 3' de Z hata payı değeri 0.01 m (a), 0.12 m (b), 0.5 m (c), 1.5 m (d) ve 2 m (e) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları 88
Şekil 4. 22 Alçak nokta adımının kontrolü için alınan bir kesit doğrultusundaki alçak noktalar 89
Şekil 4. 23 Yüzeyin altı adımının kontrolü için alınan bir kesit doğrultusundaki noktalar 89
Şekil 4. 24 Hava nokta adımındaki limit değerinin çok küçük olduğu sınıflandırma sonucu 90
Şekil 4. 25 Seyrek yerleşim alanının (Test Alanı 1) Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) ile sınıflandırma sonuçları ve ortofotosu (d) 91
Şekil 4. 26 Kentsel alanın (Test Alanı 2) Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) ile sınıflandırma sonuçları ve ortofotosu (d) 94
Şekil 4. 27 Ormanlık alanın (Test Alanı 3) Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) ile sınıflandırma sonuçları ve ortofotosu (d) 96
Şekil 4. 28 Pilot bölge 1' in Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) kullanılarak sınıflandırılan nokta bulutları ve ortofotosu (d) 100
Şekil 4. 29 Pilot bölge 2' nin Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) kullanılarak sınıflandırılan nokta bulutları ve ortofotosu (c) 101
Şekil 4. 30 3B bina modeli ve bina olarak sınıflandırılan noktalarının çakıştırılması (a), sadece 3B bina modeli (b) 107
Şekil 4. 31 3B bina modeli ve bina olarak sınıflandırılan noktaların çakıştırılmış halinin perspektif görünümü (a), sadece 3B bina modellerinin perspektif görünümü (b) 108

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Kappa değerinin yorumu.....55
Çizelge 4. 1 RIEGL LMS-Q680i teknik özellikleri..... 59
Çizelge 4. 2 Yaklaşım 1' i oluşturan kurallar ve oluşan sınıflar.....70
Çizelge 4. 3 Hiyerarşik düzende Yaklaşım 2' yi oluşturan kurallar ve oluşan sınıflar..72
Çizelge 4. 4 İterasyon sayısına göre zemin noktalarının değişimi..... 74
Çizelge 4. 5 Maksimum bina boyutuna göre zemin noktalarının değişimi..... 75
Çizelge 4. 6 İterasyon açısına göre zemin noktalarının değişimi.....76
Çizelge 4. 7 İterasyon mesafesine göre zemin noktalarının değişimi..... 76
Çizelge 4. 8 Sınıflandırma için belirlenen aralıklar.....79
Çizelge 4. 9 Pilot bölge 1' de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi.....103
Çizelge 4. 10 Pilot bölge 1' de Yaklaşım 1 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi..... 103
Çizelge 4. 11 Pilot bölge 1' de Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi.....104
Çizelge 4. 12 Pilot bölge 2' de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi.....105
Çizelge 4. 13 Pilot bölge 2' de Yaklaşım 1 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi.....106
Çizelge 4. 14 Pilot bölge 2' de Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi.....106

ÖZET

NOKTA TABANLI SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ İLE LiDAR VERİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Zehra ERİŞİR

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Naci YASTIKLI

Hava LiDAR verileri nokta yoğunluğu ve doğruluğunun artması ile birlikte, günümüzde obje çıkarımı, 3 boyutlu modelleme, değişim belirleme, haritaların revize edilmesi gibi birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda ilk işlem adımı olarak LiDAR nokta bulutu sınıflandırılmalıdır. Yüksek doğruluklu sonuçlar elde edebilmek için LiDAR nokta bulutunun doğru bir şekilde sınıflandırılmasına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, ham LiDAR nokta bulutu verisinin otomatik nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı ile sınıflandırılması olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla, LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için mevcut olan yöntemler incelenmiş ve ulusal ve uluslararası alanda yapılan ilgili araştırmalar özetlenmiştir. Yoğunluk, çoklu yansıma gibi farklı özelliklere sahip LiDAR verisinin doğru bir şekilde otomatik olarak sınıflandırılması uygulamalarında ortaya çıkan sorunlar analiz edilmiştir. Bununla birlikte, LiDAR nokta bulutunun düzenli gride dönüştürülüp sınıflandırılmasına dayanan sınıflandırma yaklaşımında karşılaşılan sorunlar incelenmiştir. Bu çalışmada, düzenli grid yapıdaki verilerle sınıflandırmada yaşanan problemlerin elimine edilmesi için LiDAR nokta bulutunun nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi ile sınıflandırılması önerilmiştir. LiDAR verisinin özelliklerine bağlı olarak yaşanabilecek sorunlara (sınıf karışımı vb.) çözüm üretilmesi amacıyla, hiyerarşik kurallar bütününden oluşan otomatik nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı oluşturulmuştur. Kurallara ilişkin

parametre analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı hiyerarşiye sahip iki nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımların performanslarının test edilmesi amacıyla nokta tabanlı sınıflandırma uygulamalarında kullanılan Standart Yaklaşım için de hiyerarşik kurallar bütünü oluşturulmuştur.

Önerilen sınıflandırma yaklaşımları kullanılarak İstanbul, Zekeriyaköy' de farklı üç test alanına ait nokta bulutu sınıflandırılmış ve üç temel sınıf (zemin, bina, bitki örtüsü) elde edilmiştir. Test Alanı 1 (seyrek yerleşim alanı) ve Test Alanı 2 (kentsel alan)' de önerilen yaklaşımlarla gerçekleştirilen nokta tabanlı sınıflandırma için doğruluk analizleri yapılmıştır. Test Alanı 1' de Standart Yaklaşım' ın genel sınıflandırma doğruluğu %54 iken, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' nin genel sınıflandırma doğruluğu % 80 olarak hesaplanmıştır. Test Alanı 2' de ise Standart Yaklaşım' ın genel doğruluğu %59 iken önerilen her iki yaklaşım için de genel doğruluk %83 olarak hesaplanmıştır.

Standart Yaklaşım ile seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alanda zemin noktaları büyük oranda bitki örtüsü olarak sınıflandırılmıştır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alanda elde edilen sınıflandırma sonuçları birbirine oldukça yakındır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırılmış nokta bulutunda, Standart Yaklaşım' da karşılaşılan zemin sınıfına ait noktaların bitki örtüsü sınıfına atanması, bina çatılarındaki bitki örtüsü sınıfına atanmış noktalar ve bina köşelerinde bazı noktaların bitki örtüsü sınıfına atanması gibi sorunlarda büyük oranda iyileştirmeler elde edilmiştir.

Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırılan nokta bulutunun 3 boyutlu bina modelleme uygulamalarında kullanılabilirliğinin test edilmesi amacıyla Test Alanı 2' de bulunan binaların 3 boyutlu modelleri üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 3B bina modellerinin başarılı bir şekilde üretildiğini göstermiştir. Test alanlarında gerçekleştirilen nokta tabanlı sınıflandırmanın doğruluk analizi sonuçları ve üretilen 3 boyutlu bina modelleri, bu tez çalışması kapsamındaki araştırma hedeflerinin başarıyla gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: LiDAR, 3B modelleme, filtreleme, sınıflandırma, nokta tabanlı sınıflandırma, doğruluk analizi

ABSTRACT

CLASSIFICATION OF LiDAR DATA WITH POINT BASED CLASSIFICATION METHODS

Zehra ERİŞİR

Department of Geomatics Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Naci YASTIKLI

Nowadays, airborne LiDAR data is used frequently in various applications such as object extraction, 3D modelling, change detection and revision of maps with increasing point density and accuracy. In this application, LiDAR point cloud should be classified as a first processing step. To achieve high accuracy, accurate classification of LiDAR point cloud is needed.

In this study, possibilities of raw LiDAR point classification with automatic point based classification are investigated. The available methods for classifying LiDAR point cloud are examined and researches are summarized in national and international arena for this purpose. The problems in the accurate automatic classification of LiDAR data with intensity and multiple returns are analysed. Furthermore, the problems encountered in the classification of LiDAR data, which was converted from point cloud to the regular grid, were investigated. In this study, the point based classification of LiDAR point cloud is proposed to eliminate problems in classification of regular grid. The automatic point based classification approach composed of hierarchical rules has ben established to solve problems (class mix, etc.) may arise depending on the characteristics of LiDAR data. The analyses of the parameter in the hierarchical rules have been performed and two point based classification approach were proposed which have different hierarchy. The hierarchical classification rules have been established for Standart Approach,

which was used frequently in point based classification, in order to test the performance of the proposed approach.

The point clouds for three different sites in Zekeriyaköy, Istanbul have been classified with proposed approach and three main classes (ground, buildings and vegetation) were acquired. The accuracy assessments for point based classification have been performed for Test Site 1 (light urban area) and Test Site 2 (urban area). The overall classification accuracy was computed as %54 for Standard Approach and %80 for Approach 1 and Approach 2 in Test Site 1. For Test Side 2, the computed overall classification accuracy was %59 for Standard Approach and %83 for Approach 1 and Approach 2.

In Standard Approach, ground points were mostly classified as vegetation with in light urban area, urban area and forested area. The obtained classification results were quite close to each other in light urban area, urban area and forested area with Approach 1 and Approach 2. The improvements have been obtained substantially for the problems encountered with Standard Approach such as ground points classified as vegetation, points in roofs classified as vegetation and some points in building corners classified as vegetation.

The 3D building models were generated for buildings in Test Site 2 to test usage of the classified point clouds for 3D building model generation with Approach 1 and Approach 2. The obtained results showed that the 3D building models were generated successfully. The results of the accuracy assessment of the point based classification and generated 3D building models proves that the research aims are successfully achieved.

Keywords: LiDAR, 3D modelling, filtering, classification, point based classification, accuracy assesment

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yeryüzündeki objelerin 3 boyutlu koordinatlarının ölçülmesinde küresel konumlama sistemi/küresel navigasyon uydu sistemi (Global Positioning System/Global Navigation Satellite System (GPS/GNSS)) teknolojileri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Üç boyutlu koordinat ölçümü için yerde ve havada kullanılan mobil algılama sistemleri, küresel konumlama sistemi/atalet ölçüm birimi (Global Positioning System/Inertial Measurement Unit (GPS/IMU)), sayısal kamera ve lazer tarama sistemlerinden oluşmaktadır. Buradaki IMU sistemi ile ataletsel navigasyon sistemi (Inertial Navigation Systems (INS)) birçok literatürde birbirinin yerine kullanılmaktadır. INS sistemleri, IMU sistemini ölçme birimi olarak içermekte ve buna ek olarak konum ve yönlendirme fonksiyonları genellikle bir yazılımla gerçekleştirilmektedir (Yastıklı [1]).

Objelere ilişkin 3 boyutlu koordinatlar yersel lazer tarayıcılar (terrestrial laser scanner (TLS)), mobil lazer tarayıcılar (mobile laser scanner (MLS)) ve havadan lazer tarayıcılar (airborne laser scanner (ALS)) yardımıyla farklı ölçme prensipleri kullanılarak ölçülmekte ve sonuçta yoğun nokta bulutu elde edilmektedir (Vosselman [2]; Rutzinger vd. [3]; Kaartinen vd. [4]). ALS diğer bir ifade ile LiDAR (Light Detection And Ranging) ile obje ve algılama sistemi arasındaki eğik (range) mesafe, gönderilen lazer sinyallerinin gidiş-dönüş zamanının elde edilmesine dayanan yöntemle ölçülür. Ölçülen her bir eğik mesafe için, GPS/IMU' dan elde edilen konum ve dönüklük verileri kullanılarak objenin 3 boyutlu koordinatları belirlenir (Sithole ve Vosselman [5]). Hava aracına yerleştirilen ALS ile gerçekleştirilen taramalar sayesinde geniş alanlarda farklı objelerin (zemin, binalar, ağaçlar, arabalar vb.) düzensiz aralıklı 3 boyutlu noktaları elde edilir (Wang ve Tseng [6]). LiDAR ile yükseklik bilgisinin yanında, yoğunluk (intensity) verisi de elde

edilmekte, çoklu dönüşler (multiple-returns) kaydedilmekte ve yerleştirilen bütünleşik kamera ile sayısal görüntü elde edilebilmektedir. Hızlı veri toplama imkânı, arazinin topoğrafyası ve üzerindeki detayların operatör ihtiyacı olmadan doğrudan belirlenmesi, sayısal kamera ve GPS/IMU sistemlerinden oluşan bütünleşik sistemlerle doğrudan ortofoto üretim imkânı LiDAR'ın birçok uygulamada geleneksel hava fotogrametrisi yöntemi yerine tercih edilmesine sebep olmuştur (Charaniya vd. [7]). Hava fotoğrafları ve uydu görüntüleriyle karşılaştırıldığında LiDAR ölçümleri güneş gölgesinden ve rölyef hatalarından etkilenmezler (Zhang vd. [8]).

LİDAR günümüzde, topografik harita üretimi, bitki örtüsü haritalarının yapımı (orman alanları, yaylalar vb.), koridor haritalarının üretimi (yollar, demiryolları, elektrik hatları vb.), mühendislik çalışmaları (hacim hesaplamaları vb.) ve kıyı mühendisliği ve yönetimi alanlarında kullanılmaktadır (Sithole [9]). LiDAR sistemi, yoğun yerleşim alanları, ormanlık alanlar, elektrik hatları vb. gibi ölçülmesi zor, hatta imkânsız olan objelerin ölçümünde ön plana çıkmaktadır (Axelsson [10]). Genellikle lazer noktalarının kullanımı ile ilgili araştırmalar, Sayısal Arazi Modeli (SAM) üretimi (Kraus ve Pfeifer [11]; Vosselman [12]), 3 boyutlu bina modelleme (Maas ve Vosselman [13]; Rottensteiner [14]; Brenner [15]; Oude Elberink ve Vosselman [16]; Pu ve Vosselman [17]) ve değişim belirleme (Matikainen vd. [18]; Vosselman vd. [19]; Hommel [20]; Champion vd. [21]) gibi uygulamalar üzerine yoğunlaşmıştır. LiDAR sistemleri çoğunlukla Sayısal Yükseklik/Yüzey Modelleri (SYM/YM) üretimi amacıyla yeryüzündeki nesnelerin 3 boyutlu koordinatlarını elde etmek için kullanılırlar (Yan vd. [22]). Havadan lazer tarama sistemi (ALS)' den elde edilen orijinal veri yeryüzü objelerinin yüzeyini göstermektedir. Yani sadece zemin yüzeyi değil ağaçlar, bina çatıları gibi insan yapımı objeler de mevcuttur. Bu gösterim Sayısal Yüzey Modeli (YM) olarak isimlendirilir (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Sayısal Yüzey Modellerinden ağaçlar ve binalar gibi yapay objeler filtrelenerek çıplak yeryüzüne ait yüksekleri gösteren Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) elde edilir (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Kentsel planlama, suların korunması ve jeolojik tehlike belirleme gibi birçok çalışmada Sayısal Yüzey Modeli yerine Sayısal Yükseklik Modeli tercih edilir. SYM çıplak yeryüzünün sürekli topografik modeli olarak tanımlanabilir (He [24]). Bazı ülkelerde SYM ile eş anlamlı olarak kullanılan Sayısal Arazi Modeli (SAM), genellikle arazi yüzeyinin belirgin topografik

özelliklerinin, düzensiz olarak dağılmış noktalar ve arazinin su ayrım ve su toplama çizgilerinin (break lines), arazinin gerçek şeklinin daha iyi bir biçimde sayısal olarak sunulmuş biçimidir (Jacobsen ve Yastıklı [25]). Normalize edilmiş Sayısal Yüzey Modeli (Normalized DSM (nDSM)) ise bir YM (DSM) ile SAM (DTM) arasındaki yükseklik farkıdır (He [24]). nDSM topoğrafyanın etkisini ortadan kaldırdığı için, bina, ağaç gibi araziyi kaplayan objelerin yüksekliği verir. Bu nedenle objelerin görünümü hakkındaki bilgi doğrudan kullanılabilir (Chen vd. [26]). Birçok çalışmada nDSM, sınıflandırma, bina, ağaç vb. çıkarımı, 3B modelleme amaçlarıyla kullanılmıştır.

Havadan lazer taramanın önemli uygulamalarından biri de 3 boyutlu kent modeli üretimidir (Oude Elberink ve Vosselman [16]). Kamu güvenliği açısından doğru 3B bina modelleri, acil durumlar sırasında stratejik planlar yapmak için gereklidir. Ayrıca navigasyon sistemleri ve sanal turizm de gerçekçi kent modellerine ihtiyaç duymaktadır (Pu ve Vosselman [17]). Bu uygulamalara ek olarak, LiDAR ile elde edilen nokta bulutu ve yoğunluk verisi otomatik obje çıkarımına önemli katkılar sağlamaktadır (Zhou ve Vosselman [27]; O'Neil-Dunne vd. [28]). Güncel araştırma konularından bir tanesi olan otomatik bina ve yol orta çizgilerinin çıkarımında LiDAR nokta bulutu verisi yöntemin başarısını artırmaktadır (Oude Elberink ve Vosselman [16]; Uzar Dinlemek [29]). ALS sistemlerindeki gelişmelere bağlı olarak haritaların revize edilmesi, afet risk analizleri, yaşadışı faaliyet belirleme (kaçak yapılaşma vb.) vb. çalışmalara daha fazla gereksinim doğmuştur. Sınıflandırma gibi, verilerin ön-işleme aşamaları bu gereksinimler için gereklidir (Xu vd. [30]).

Ham LiDAR nokta bulutunda arazi, bitki örtüsü, binalar ve diğer doğal ve insan yapımı objeler bulunmaktadır. Bu farklı türdeki objelerin modellemesi, analiz ve görselleştirilmesi için farklı yöntemlere gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle bu tür modelleme çalışmalarında yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmek için LiDAR nokta bulutunun doğru bir şekilde sınıflandırılmasına ihtiyaç vardır (Charaniya vd. [7]). Sınıflandırma aşamasında düzensiz dağılmış nokta bulutundaki her bir 3 boyutlu nokta semantik bir obje sınıfına atanır (Niemeyer vd. [31]; Charaniya vd. [7]). LiDAR verisi milyonlarca nokta içerdiğinden sınıflandırma işleminin elle (manuel) yapılması pahalı ve aynı zamanda zaman alıcı bir yöntemdir (Flood [32]; Kaartinen vd. [4]). Bu nedenle, yarı

otomatik ya da otomatik yöntemler kullanarak LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması hala güncel bir araştırma konusudur.

LiDAR nokta bulutu verisinin sınıflandırılmasında kullanılan temel yaklaşımda noktalar arazi ve araziye ait olmayan noktalar (binalar, ağaçlar vb.) olarak iki gruba ayrılmaktadır (Chang vd. [33]; Chen vd. [34]). Lazer noktalarının çıplak yeryüzü noktaları ve diğer noktalar olarak sınıflandırılması lazer tarama ile sayısal yükseklik modelleri üretimi için büyük önem taşımaktadır (Vosselman vd. [19]). Filtreleme olarak adlandırılan bu sınıflandırma yöntemi için çok sayıda algoritma geliştirilmiştir (Sithole ve Vosselman [35]).

LiDAR nokta bulutu verisinin sınıflandırılmasında kullanılan ikinci yaklaşımda ise, noktalar kullanım amacına göre zemin, yeşil alan, ağaçlar, binalar ve insan yapısı diğer objeler vb. gibi çok sayıda farklı sınıfa ayrılmaktadır (Niemeyer vd. [31]; Xu vd. [30]). Bu sınıflandırma yaklaşımında genellikle kentsel alanlarda, zemin, bitki örtüsü ve binadan oluşan üç temel sınıf (Nardinocchi vd. [36]; Sithole [9]; Forlani ve Nardinocchi [37]; Samadzadegan vd. [38]; Mallet vd. [39]) elde edilmektedir. Bu yaklaşımla sınıflandırma işleminde, ilk yaklaşım diğer bir ifade ile filtreleme yaklaşımı da kullanılabililir. Özellikle filtreleme yaklaşımı zemin ve diğer sınıfların birbirinden ayırt edilmesi için kullanılmaktadır (Chang vd. [33]).

Hava LiDAR verilerinin nokta yoğunluğu ve doğruluğunun artması ile birlikte, bu veriler kullanılarak kentsel arazi örtüsü sınıflandırılması uygulamalarına ilgi de gün geçtikçe artmaktadır. Buna rağmen günümüzde hala, karmaşık obje yapıları ve binalar, yollar, ağaçlar, alçak bitki örtüsü (çalı, ot vb.) gibi değişken obje sınıfları nedeniyle sınıflandırma işlemini gerçekleştirmek oldukça zordur (Niemeyer vd, [40]). Sıklıkla, detaylı kentsel arazi örtüsü haritalarının üretimi için, LiDAR verisi önce eğik (range) mesafe görüntüsüne dönüştürülür (Zhou [41]). Eğik mesafe görüntülerinin başka bir ifade ile düzenli grid yapıya enterpole edilmiş LiDAR verilerinin sınıflandırılmasında klasik görüntü sınıflandırma yöntemleri kullanılır (Bao vd. [42]). Fakat nokta bulutu verisi düzenli grid yapıya örneklendiğinde orjinal düzensiz dağılmış nokta bulutundaki bazı bilgiler kaybolur. Özellikle orman alanlarında, veri toplama aşamasında çoklu dönüşlerin de kaydedildiği durumlarda, benzer XY koordinatına sahip fakat farklı

yükseklikteki noktaları düzenli grid yapıda temsil etmek zor olduğundan veri kaybı önemli olabilir (Axelsson [10]). Bu nedenle, enterpolasyandan kaynaklanan istenmeyen etkilerden kurtulmak için LiDAR nokta bulutu, ham olarak öznitelik çıkarımında kullanılır (Maas ve Vosselman [13]). Nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi özellikle 3 boyutlu kent modelleme çalışmaları için önemlidir. 3 boyutlu kent modeli üretimi çalışmalarında LiDAR nokta bulutunun hassas bir şekilde sınıflandırılmasına ihtiyaç vardır. Ham LiDAR verilerinin kullanıldığı sınıflandırma işlemleri nokta tabanlı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bununla birlikte, sayısal (raster) görüntü sınıflandırılmasında kullanılan mevcut sayısal görüntü işleme teknikleri doğrudan düzensiz dağılmış noktalara uygulanamadığından, LiDAR ölçümlerinden elde edilen yoğun hacimli nokta bulutu verisi otomatik analizler için yeni bir zorluk oluşturmaktadır (Zhang vd. [8]).

Bu tez çalışmasında, ham (işlenmemiş) LiDAR nokta bulutu verisinin, otomatik, diğer bir ifade ile kullanıcı müdahalesi gerektirmeyen nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı ile sınıflandırılmasına yönelik bir yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile önerilen nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı kullanılarak İstanbul' da Zekeriyaköy bölgesindeki çalışma alanına ait LİDAR verisi sınıflandırılmıştır. Belirlenen test alanlarında, elle (manuel) sınıflandırma ile elde edilen referans veri setleri kullanılarak sınıflandırma doğruluğu analiz edilmiş ve son olarak sınıflandırılan veri üzerinden 3 boyutlu bina modelleri oluşturulmuştur.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşım, İstanbul' ait ham LiDAR nokta bulutu verisinin otomatik olarak sınıflandırılmasına olanak sağlayacaktır. Bu yaklaşım kullanılarak ham veriye uygulanacak ön-işlemler sırasındaki veri kaybı en aza indirilecek ve bu işlemler esnasında harcanacak zaman da ortadan kaldırılacaktır. Ortaya çıkan sonuç ürünlerin, daha sonraki kent haritaları, arazi örtüsü ve arazi kullanımı haritaları, 3 boyutlu kent modelleri, ulaşım ağ haritaları üretimi, veri tabanlarının güncellenmesi, değişim analizleri gibi çok sayıda farklı çalışmada altlık olarak kullanılma olanağı sağlanacaktır.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan giriş bölümü literatür özeti, tezin amacı ve hipotezden oluşmaktadır. İkinci bölümde ise LiDAR' ın gelişim

süreci, temel çalışma prensibi ve diğer teknik özellikleri özetlenmiştir. Sınıflandırma yöntemleri ve sınıflandırma doğruluğu analiz seçeneklerine üçüncü bölümde yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, nokta tabanlı sınıflandırma yöntemleri kullanılarak ham nokta bulutunun otomatik sınıflandırılma olanakları irdelenmiştir. Sınıflandırma uygulamalarında çoğunlukla kullanılan Standart Yaklaşım ve oluşturulan Yaklaşım 1 ile Yaklaşım 2' nin işlem adımları bu bölümde yer almaktadır. İstanbul, Zekeriyaköy' de farklı arazi sınıflarını içeren test alanlarına ait LiDAR verileri kullanılarak sınıflandırmada en uygun sınıflandırma parametrelerinin belirlenmesi için parametre analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler de bu bölümde verilmiştir. Bunlara ek olarak iki farklı pilot bölgede, yaklaşımın çalışabilirliğinin test edilmesi amacıyla gerçekleştirilen doğruluk analizlerine ve sınıflandırılmış veri kullanılarak elde edilen 3 boyutlu bina modellerine de dördüncü bölümde yer verilmiştir. Son bölümde ise çalışma sonuçları ve ileriki çalışmalar için öneriler bulunmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

LiDAR'ın ortaya çıkmasından bu yana nokta bulutu verisi kullanılarak çok sayıda sınıflandırma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamalar incelendiğinde, kullanılan sınıflandırma yöntemlerinde uygulamanın amacı, kullanılan veri seti özellikleri, sınıflandırma sonucunda elde edilecek hedef sınıflara göre çeşitli farklılıklar göze çarpmaktadır.

Nokta bulutları, genellikle Sayısal Yükseklik ve Sayısal Arazi Modeli üretimi için izlenen yol olan filtreleme yöntemi ile çıplak yeryüzü ve üzerindeki noktalar olarak iki sınıfa ayrıştırılabilir ya da filtrelemenin aksine direk olarak zemin, bina, ağaç, köprü, yol şeklinde çoklu sınıflar elde edilebilir (Sithole ve Vosselman [35]; Yuan vd. [43]; Awrangjeb ve Fraser [44]; Gou vd. [45]).

Sithole ve Vosselman [46] yaptıkları çalışmada, ISPRS Çalışma Grubu (ISPRS Working Group) III/3' ün önceki yıllarda, çıplak yeryüzünü sınıflandırmak için geliştirilen filtrelerin performanslarını değelerlendirmek, nokta yoğunluğunun etkisini incelemek ve gelecek çalışmalara yön vermek amacıyla yürüttüğü test çalışmasının sonuçlarına yer vermişlerdir. Test çalışmasında, Vaihingen/Enz ve Stuttgart şehir merkezinde yer alan, dört kentsel ve dört kırsal olmak üzere toplamda sekiz test bölgesi, otomatik

filtrelemenin zor olabileceğinin düşünüldüğü farklı karakteristik özelliklere sahip olduğu için seçilmiştir. Bu bölgelere ait verilerden türetilen 12 veri seti ve 8 katılımcı ile test çalışması gerçekleştirilmiştir. Sağlanan veri setlerinin özellikleri ve katılımcılar tarafından geliştirilen filtreleme yaklaşımları, filtre performanslarının hem niceliksel hem niteliksel olarak analizi Sithole ve Vosselman' ın çalışmasında yer almaktadır.

Bretar vd. [47] çok geçişli sınıflandırma (multiple pass classification) yaklaşımını kullanarak nokta bulutlarını zemin/zemine ait olmayan şeklinde sınıflandırmak ve düzenli grid yapıdaki Sayısal Arazi Modelleri (SAM) üretmek için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritma, belirli yayılma kurallarını izleyerek nokta bulutlarını dolaşmakta ve dolaşırken zemin yükseliğini tahmin ederek komşu lazer noktalarını zemin ya da zemine ait olmayan noktalar şeklinde sınıflandırmaktadır. Geliştirilen yaklaşımda noktalar sonuç SAM' a onay verilene kadar birçok kez filtrelenir ve sonuç SAM, enerji minimizasyonu algoritması kullanılarak (ICM) hafif de olsa var olan gürültülerden arındırılır ve böylece çıplak yeryüzü elde edilmiş olmaktadır.

Vosselman vd. [19] topografik veri tabanlarının daha sık güncellenmesini sağlamak amacıyla, binalardaki değişimlerin otomatik olarak belirlenmesi için bir araştırma yapmışlardır. Lazer tarama verilerinden bina segmentlerini elde etmek iki sınıflandırma adımı ile gerçekleştirilmiştir. Önce noktaları çıplak yeryüzü veya obje noktaları olarak ayırmışlar, daha sonra da obje noktalarını binalar ya da bitkiler olarak sınıflandırmışlardır. Sınıflandırılan binaları topografik veri tabanlarındaki binalar ile eşleştirmişler ve böylece yeni ya da yıkılmış olan binaları analiz etme imkânı bulmuşlardır.

Vosselman vd. [48] çalışmalarında, değişim belirleme ve kentsel alanların yarı otomatik 3 boyutlu (3B) haritalarının üretiminde havadan lazer taramanın kullanım olanaklarını araştırmışlardır. Bu amaçla, ilk olarak binalardaki değişimi belirlemek için, lazer verisini çok çözünürlüklü bölge bazlı segmentasyon kullanarak homojen nokta bulutu segmentlerine ayırmışlardır. Daha sonra bu segmentleri bina ve diğer objeler olarak iki sınıfa ayırmışlardır. Yıkılan ve değişen binaları, bina segmentleri ile haritadan elde edilen binaları karşılaştırarak belirlemişlerdir. İnteraktif olarak bir kent modelinin yeniden üretilmesi için interaktif bina üretim olanaklarını araştırarak, otomatik bina

üretimi için kullandıkları algoritmanın performansı ile birlikte 3B harita üretim sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

Xu vd. [49], 2010 yılında Hollanda'nın Rotterdam kentinden elde edilmiş 1.5 $km^{2'}$ lik veri setini kullanarak kentsel alanlarda en uygun özellik ve varlık kombinasyonunu seçerek havadan lazer tarama verilerini etkili bir şekilde sınıflandırmayı amaçlamışlardır. Tek noktalar, düzlemsel segmentler ve "mean-shift" segmentasyonu ile elde edilen segmentler olmak üzere üç çeşit varlık tanımlanmış ve bu varlıklar için çeşitli özellikler hesaplanmıştır. Bütün bu özellikleri yöntemin farklı aşamalarında kullanarak bir dizi kural tabanlı sınıflandırma sonucu su, zemin, bitki örtüsü, duvar, çatı, çatı elemanı ve diğer olmak üzere yedi sınıf oluşturmuşlardır. Referans veri kullanarak gerçekleştirdikleri doğruluk analizi sonucu oluşturulan yöntemin ileriki çalışmalarda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Han vd. [50] Çin' in ekolojik kentlerinden biri olan Nanjing kentinde yaptıkları çalışmada, çoklu dönüşlü LiDAR noktalarını yoğunluk (intensity) verisi ile kullanarak çok katmanlı bitki örtüsü çıkarımı için bir yöntem sunmaktadırlar. Bu yönteme göre nokta bulutunu, lazer sinyalinin yoğunluk ve mekânsal bilgilerini dikkate alarak bikti örtüsü ve bitki örtüsü olmayan şeklinde iki sınıfa ayırmışlardır. Engebeli arazinin etkisi ortadan kaldırıldıktan sonra, ters mesafe ağırlıklandırma (inverse distance weighting (IDW)) enterpolasyon yöntemini kullanarak çok katmanlı bitki örtüsü haritalarını elde etmişlerdir. Sonuçları da nitelik bakımından Quickbird uydu görüntülerinin sınıflandırılması ile, ve nicelik bakımından ise TerraSolid (Terrasolid Ltd., Helsinki) yazılımı kullanılarak yapılan sınıflandırma ile karşılaştırmışlardır.

LiDAR verisi doğrudan ham olarak sınıflandırma uygulamalarında kullanılacağı gibi, düzenli grid yapıya dönüştürülerek de işlem yapılabilir. Düzenli yapıdaki veri setinin ham nokta bulutuna göre avantajı, görüntü işleme yöntemlerin kullanılmasına olanak sağlamasıdır (Clode vd. [51]; Antonarakis vd. [52]).

Nardinocchi vd. [36], Sayısal Yükseklik Modeli üretimi amacıyla LiDAR verisinin sınıflandırılması ve filtrelenmesi için geliştirdikleri stratejiyi yaptıkları çalışmada açıklamışlardır. Geliştirilen stratejinin iki belirgin özelliği vardır. İlk kısımda, ham veriyi düzenli grid yapıya enterpole etmişler, yükseklik farklarına göre segmentlere ayırmışlar

ve üç sınıf olacak şekilde hiyerarşik kural tabanlı yöntemlerle sınıflandırmışlardır. İkinci ve son aşamada ise ham veriye geri dönerek önceki sınıflandırmaya göre her ızgara hücre içindeki noktaları filtrelemişlerdir. Çalışmada İtalya' nın Pavia şehrine ait iki bölgedeki veriye ait sonuçlar gösterilmiştir.

Forlani ve Nardinocchi [37]' nin sınıflandırma stratejileri üç aşama içermektedir. İlk aşamada ham veriyi düzenli grid yapıya enterpole etmişlerdir. İkinci aşamada artan bölge (region growing) algoritması ile grid yapıdaki veriyi segmente ederek bu segmentleri geometrik ve topolojik özelliklerine dayanan kural setleri ile yeryüzeyi, bina ve bitki örtüsü sınıflarına ayırmışlardır. Son aşama olan üçüncü aşamayı ise tamamen yeryüzeyi olarak sınıflandırılmış hücrelerin doğruluğuna dayandırmışlardır ve ISPRS filtre testinde kullanılan veri setini kullanarak, geliştirdikleri stratejinin etkinliğini gösteren sonuçlara çalışmanın sonuç bölümünde yer vermişlerdir.

Schmidt vd. [53] çalışmalarında havadan lazer tarama verilerinde su yüzeylerinin belirlenmesi ve sınıflandırılması için bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışmanın amacı, sınıflandırma için önemli özellikleri analiz etmek ve tam dalga boyu kaydeden lazer tarayıcıların bu uygulama için potensiyellerini araştırmaktır. Yöntem hem yükseklik ve yükseklik değişimleri gibi geometrik özellikler, hemde yoğunluk ya da sinyal genişliği gibi tam dalga boyu kaydeden sistemlerden elde edilen sinyallerin özellikleri ile çalışmaktadır. Düzenli grid yapıdaki veri, bulanık mantığa (fuzzy logic) dayanan bu yöntem ile sınıflandırılmıştır. Almanya' da farklı göl ve nehirleri içeren iki farklı veri setinde çalışma sonuçları sunulmuştur. Sınıflandırma doğruluğu, sonuçların bütünlük (completeness) ve doğruluk (correctness) değerleri ile analiz edilmiştir.

Düzenli grid yapıdaki sınıflandırma uygulamalarında LiDAR veri seti tek başına kullanılabileceği gibi uydu görüntüleri, hava fotoğrafları gibi ek veriler ile birlikte de kullanılarak daha yüksek doğruluk elde edilebilir (Schenk ve Csatho [54]; Rottensteiner vd. [55]; Moussa ve El-Sheimy [56]).

Zhou [41] yaptığı çalışmada, obje tabanlı sınıflandırma yaklaşımları ile tek başına LiDAR verisi kullanılarak, detaylı kentsel arazi örtüsü haritalarının üretiminin verimli bir şekilde mümkün olup olmadığını irdelemiştir. Bu amaçla LiDAR yükseklik ve yoğunluk verisini obje tabanlı bir yöntem ile sınıflandırarak bina, kaldırım, ağaçlar ve çalılar,

çimen olmak üzere dört sınıf üretmiştir. Bu yöntemi, multispektral görüntünün ana veri, LiDAR normalize edilmiş yüzey modelinin ise yardımcı veri olduğu yöntem ile karşılaştırmış ve yapılan doğruluk analizlerinin ardından LiDAR yükseklik ve yoğunluk veri kombinasyonun kentsel arazi örtüsü sınıflandırmasında doğruluğunun daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

Charaniya vd. [7] çalışmalarında Santa Cruz' daki Californiya Üniversitesi ve Santa Cruz şehrine ait LiDAR verisini ağaçlar, çimen, yollar ve bina çatıları olmak üzere dört ayrı sınıfa ayırmışlardır. Bu amaçla, denetimli parametrik sınıflandırma (supervised parametric classification) yöntemini kullanmışlardır. Gauss modellerinin karışımını kullanmışlar ve beklenti maksimizasyonu (Expectation-Maximization (EM)) algoritması ile verilerini eğitmişlerdir. Ayrıca çalışmada hem geometri hem de görüntü verisi sınıflandırma sonuçlarını iyileştirebileceğinden LiDAR verisine ek olarak görüntü verisi de kullanılmıştır.

Uzar ve Yastıklı [57]' de aynı platformda bulunan çoklu algılama sistemi ile elde edilen LiDAR verisi ve hava fotoğraflarını kullanılarak otomatik bina çıkarımı için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Hiyerarşik kural tabanlı (rule-based) sınıflandırma yaklaşımı ile ilk olarak bitki ve zemin sınıfı üretilmiş, ardından bina sınıfı elde edilmiştir. Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)), eğim ve Hough görüntüleri bina sınıfının diğer sınıflar ile karışmasını engellemek amacıyla çalışmada kullanılmıştır. Bunlara ek olarak LiDAR verisinden yoğunluk görüntüleri de elde edilmiş ve bina sınıfının doğruluğunu arttırmak için morfolojik işlemlerden faydalanılmıştır. Uygulama sonucunda, genel doğruluk (overall accuracy), bütünlük (completeness) ve doğruluk (correctness) değerleri ile çalışma sonuçlarının analizi gerçekleştirilmiştir.

LiDAR verisinin sınıflandırılması sonucu bina, ağaç, yol, çıplak yeryüzü vb. gibi farklı sınıflar elde edilebilir; fakat yapılan çalışmanın amacına göre bina, ağaç, yol ya da elektrik hatları gibi tek bir sınıfa ait objelerin çıkarılması da hedeflenebilir (Xu vd. [30], Vosselman ve Liang, [58]; Zhou ve Vosselman [27], Jwa vd. [59]; Antonarakis vd. [52], Zhang vd. [60]).

Sithole ve Vosselman [5] yaptıkları çalışmada, çıplak yeryüzünün tespiti ve Sayısal Arazi Modellerinin (SYM) güvenirliliğini arttırmak için köprüleri, çıplak yeryüzüne ait nokta

bulutundan elemine etmeye yarayan yeni bir yöntem geliştirmeye çalışmışlardır. Bu amaçla, segmentasyon tabanlı filtrelemeye dayalı, ön-işleme, tohum noktalarının seçimi ve köprü noktalarının belirlenmesi olarak üç kısma ayrılan bir algoritma tasarlamışlardır. Bu kısımların detaylı bir şekilde açıklandığı çalışmada algoritmanın simülasyon verisi, Nijmegen şehri, Kruithuis köprüsü, Reineveld köprüsü, Geerweg köprüsü, Nijmegen şehrindeki başka bir veri seti ve Stuttgard şehrine ait farklı nokta bulutları üzerindeki test sonuçlarına da yer verilmiştir.

Zhang vd. [8] yaptıkları uygulamada LiDAR ölçümlerinden binaların zemin oturumlarını (footprints) otomatik olarak çıkarmaya çalışmışlardır. Önerilen yaklaşımla, ilk olarak arazi ve araziye ait olmayan LİDAR ölçümleri artan morfolojik filtreler ile birbirinden ayrılmıştır. Daha sonra düzlem yerleştirme (plane-fitting) tekniğine dayalı alan büyütme (region-growing) algoritması ile araziye ait olmayan ölçümlerden binalar tanımlanmıştır. Son olarak da sınır noktaları birleştirilerek segmente edilmiş bina ölçümlerinin ham zemin oturumları elde edilmiştir ve düzensiz aralıklı LiDAR ölçümlerinden kaynaklanan gürültüler giderilmiştir.

Xu ve Ye [61] kentsel obje çıkarımı üzerine olan ISPRS test projesi tarafından sağlanan, karmaşık çatı yapılarına sahip, farklı boyut ve yükseklikte birçok binanın bulunduğu test verisini kullanarak bina çıkarımı için bir yöntem geliştirmeye çalışmışlardır. İlk olarak zemin noktalarını filtrelemek amacıyla zemin/zemine ait olmayan nokta sınıflandırması gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra Douglas-Peucker algoritmasını kullanarak tarama çizgilerini yükseklik değişimlerine dayanan nesne segmentlerine ayırmışlardır. Bu nesneleri basit kuralları kullanan local anazlizler ile önden binalar ve bitkiler olmak üzere sınıflandırmışlar ve son olarak alan genişleme (region growing) algoritmasını kullanarak nesne çıkarımının kalitesini arttırmak istemişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, doğrudan LiDAR ile elde edilmiş ham nokta bulutu verisinin otomatik olarak sınıflandırılması için bir yaklaşım geliştirmek ve bu yaklaşım kullanılarak LiDAR nokta bulutunun, araziyi ifade eden anlamlı sınıflara ayrılmasıdır. Nokta tabanlı sınıflandırma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için sınıflandırmada kullanılan yaklaşım ve parametrelerin çalışma bölgesi

karakteristiklerine uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu şekilde ham nokta bulutunun doğrudan kullandığı 3 boyutlu kent modeli üretimi, bina çıkarımı vb. uygulamalarda, çalışma bölgesi ve LiDAR verisinin özelliklerine bağlı olarak yaşanabilecek sorunlara (sınıf karışımı vb.) çözüm üretilmesi ve zor ve zahmetli olan sınıflandırma aşamasının otomatikleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda İstanbul ili, Zekeriyaköy bölgesine ait kentsel alan, tarım alanı, ormanlık alan vb. farklı arazi karekteristiklerini içeren test alanlarına ait ham nokta bulutu verisinin otomatik nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı ile yeryüzeyi (zemin), bitki örtüsü ve bina olmak üzere üç temel sınıfa ayrılması için iki yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımların geliştirilmesi aşamasında farklı eğitim alanlarında yapılan detaylı parametre testleri ile en iyi sınıflandırma doğruluğunu veren, nokta tabanlı hiyerarşik kurallar bütününün elde edilmesi amaçlanmıştır. Yöntemin tüm arazi türlerinde çalışabilirliğini test etmek için farklı bölgelerde, istatistiksel yöntemler yardımıyla, elle sınıflandırılmış referans veriler kullanılarak sınıflandırma doğruluğunun analiz edilmesi bu çalışmanın diğer bir hedefidir. Önerilen yaklaşımla sınıflandırma sonucunda elde edilen verinin ileriki çalışmalarda altlık olarak kullanılabilirliğinin gösterilmesi amacıyla bina sınıfının 3 boyutlu modelleme performansının gösterilmesi yine bu tez çalışmasının amaçları arasındadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışma ile LiDAR veri sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan klasik piksel ve nesne tabanlı yöntemler yerine, veriyi ham haldeyken otomatik olarak sınıflandırabilen nokta tabanlı bir yaklaşım geliştirilerek bu işlem otomatik olarak gerçekleştirilebilir.

Nokta bulutu verisini sınıflandırırken, rastgele dağılmış üç boyutlu noktaları düzenli grid yapıya enterpole etmek bazı bilgilerin kaybolmasına neden olmaktadır. Özellikle çoklu dönüşlerin kaydedildiği yeşil alan ya da ormanlık alanlarda bu bilgi kayıpları çok fazla olabilir. Bu nedenle ham nokta bulutu üzerinde sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirmek, gride dönüştürme aşamasındaki enterpolasyon işlemlerini ortadan kaldıracak ve böylece bu aşamadaki veri kayıpları ve hatalar önleneceğinden sonraki 3 boyutlu kent modeli üretimi gibi uygulamalarda daha yüksek doğruluklu sonuç ürünler elde etmeye katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

LiDAR

Light Detection And Ranging kelimelerinin kısaltmasından oluşan LiDAR, lazer ışını kullanarak 3 boyutlu (3B) nokta bulutu verisi elde etmeye yarayan aktif bir uzaktan algılama sistemidir. Havadan lazer tarama başlangıçta topografik harita üretimi için tasarlanmış olan, hızla gelişen bir teknolojidir (Wagner vd. [62]). ALS (Airborne Laser Scanning) olarak da ifade edilen LİDAR' ın ölçme prensibi, hava taşıtının hareketi boyunca ardışık eğik (range) mesafelerin ölçülmesini içerir. Lazer icadının 1960' ların başlarına dayanmasına rağmen çeşitli destekleyici teknolojilerin eksikliğinden dolayı bu sistemlerin harita üretimi alanında kullanımı zaman almıştır (Petrie ve Toth [63]). LiDAR ile yalnızca eğik mesafe ölçümlerinden lazer noktalarının yer koordinatlarını belirlemek mümkün olmadığından, doğrudan yöneltme yapan teknolojilerin sisteme dâhil olmaları lazer taramanın kabulü için gerekli olmuştur (Petrie ve Toth [63]). 1988 yılında lazer tarama teknolojisinin küresel konumlama sistemi (Global Positioning System (GPS)) ve atalet ölçüm sistemi (Inertial Measurement Units (IMU)) ile bütünleşik kullanılmasının ardından (Lindenberger [64]), ilk havadan lazer tarama 1990' ların başlarında tanıtılmıştır (Vosselman [2]). 1990'lı yılların ortalarında doğrudan yöneltme teknolojisinin yanında bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler de lazer tarama sistemlerinin topografik harita üretiminde ticari amaçlı kullanımının yaygınlaşmasında anahtar faktör olmuştur (Petrie ve Toth [63]). NASA, 1960' lardan bu yana kuzey kutbunda topografik harita üretimi amaçlı yaptığı çalışmalar aracılığıyla bu gerekli teknolojiye öncülük etme ve geliştirmede büyük bir rol oynamıştır (Petrie ve Toth [63]).

Teorik olarak günün her saatinde kullanılabilmesi, çoklu dönüş özelliği ile orman ve bitki örtüsünün farklı katmanlarından veri toplayabilmesi ve hızlı bir biçimde sayısal formatta veri elde edebilmesi LiDAR' ı daha çekici hale getirmiştir (Sithole [9]). Büyük alanlarda kısa veri toplama ve işleme süreleri, nispeten yüksek doğruluk ve yoğun nokta elde etmesi LiDAR'ın geleneksel fotogrametrik teknikler yerine tercih edilmesine neden olmuştur (Charaniya vd. [7]; Lefsky vd.[65]).

Günümüz havadan lazer tarama sistemleri yoğunluğu metrekarede 20 ile 50 (20 - 50 nokta/m^2) nokta arasında değişen nokta bulutu verisi elde edebilmektedir (Zhou ve Vosselman [27]). Bazı özel uygulamalarda modern sensörler ile kaydedilen nokta yoğunluğu metrekarede 100 noktadan daha yükseğe çıkabilmektedir (Mallet ve Bretar [66]).

LiDAR teknolojisindeki son gelişmelerle birlikte, LiDAR verisinin doğruluk potansiyeli önemli ölçüde gelişmiştir. İdeal koşullar altında modern LiDAR sistemleriyle, mühendislik açısından harita üretim doğruluk seviyesinin gerektirdiği gibi 2-3 cm doğrulukla mesafe ölçümü gerçekleştirilebilir (Csanyi ve Toth [67]). LiDAR noktalarının doğruluğu GPS ve IMU sistemlerinin doğruluğuna bağlıdır (Yastıklı [68]).

Bugün birçok uygulama alanına sahip LİDAR teknolojisinin kullanım alanları, bileşenleri, ölçme prensibi ilerleyen bölümlerde detaylı olarak verilecektir.

2.1 LiDAR' ın Kullanım Alanları

LiDAR, arazinin yükseklik verisini elde etmek için çok popüler bir teknik olarak ortaya çıkmıştır (Charaniya vd. [7]). Sayısal Yükseklik Modeli üretimi havadan lazer taramanın ana kullanımlarından biridir (He [24]). LiDAR üstün özellikleri ile obje çıkarımı (bina, ağaç, yol vb.) (Rottensteiner ve Briese [69]; Rottensteiner vd. [70]), topografik harita üretimi (Flood [32]), bitki örtüsü haritası üretimi (ormanlar, yaylalar vb.) (Reitberger vd. [71]; Wagner vd. [72]), koridor haritaları üretimi (yollar, demiryolları, enerji hatları vb.) (Jwa vd. [59]; Liang vd. [73]), kent modelleri üretimi (Haala ve Brenner [74]; Frueh ve Zakhor [75]), Sayısal Yükseklik Modelleri (Mongus ve Zalik [76]) ve ortofoto üretimi (Keinan ve Doytsher [77]; Barazzetti vd. [78]), mühendislik çalışmaları (hacim hesaplamaları vb.) (Popescu [79]), su yönetimi (Liu vd. [80]), afet yönetimi (Webster

vd. [81]), kentsel planlama, ulaşım (Csanyi [82]), buzulları izleme (Hopkinson ve Demuth [83]) ve kıyı mühendisliği ve yönetimi (Pe'eri ve Long [84]) gibi alanlarda kullanılmaktadır. LiDAR ile Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretimi, en önemli kullanım alanıdır ve bugün standart bir üretim haline gelmiştir (Wang ve Tseng [6]). Lazer taramanın doğruluk potansiyelinden dolayı LiDAR, SYM üretimi ve su ayrım ve su toplama çizgilerinin çıkarımı (break-line extraction) için diğer yöntemlere göre daha uygun bir yöntemdir (He [24]).

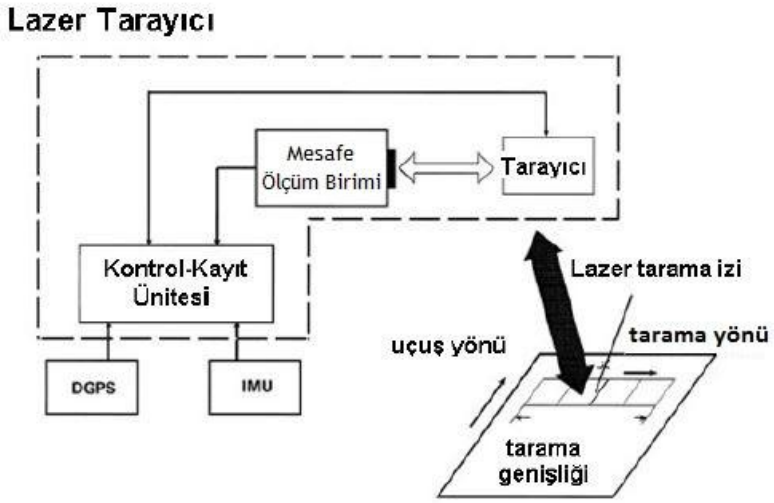
2.2 Sistem Bileşenleri

LiDAR sistemleri karmaşık çoklu sensörlü sistemlerdir; GPS, INS konum belirleme sensörü ve lazer tarama sensörlerini içeren en az 3 sensör ile bütünleşik çalışır (Csanyi ve Toth [67]).

Havadan lazer tarama sisteminin ana bileşenleri (Wehr ve Lohr [85]);

- Opto-mekanik tarayıcı,
- Lazer mesafe ölçüm birimi (Laser Range Finder (LRF)),
- Kontrol-kayıt ünitesi,
- GPS,
- IMU

şeklinde sıralanabilir. Tüm bu bileşenler uçak ya da helikopter platformalarına yerleştirilirler. Lazer tarayıcı sistemi ana bileşenleri ve tarama işlemi Şekil 2.1' de görülmektedir. Bu bileşenlerin yanında LiDAR sistemlerine opsiyonel olarak, özellikle video ve sayısal CCD kameralar, fotogrametrik hava kameraları ve termal veya multispektral çizgi CCD kameralar gibi diğer sensörler eklenebilir. Yine opsiyonel olarak sıcaklık ve nem kontrol birimleri de eklenebilir (Baltsavias [86]).



Şekil 2. 1 Lazer tarayıcı sistemi ana bileşenleri (Wehr ve Lohr [85])

Mesafe ölçüm birimi (LRF); özel hedefler ya da reflektörlere gerek duymadan, herhangi bir yüzeye olan sanal yansımalar ile mesafe belirlemeyi sağlar (Lindenberger [64]). LRF, lazer gönderici ve elektro-optik alıcı sistemlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler aynı birim üzerinde bulunduğundan aynı optik yolu paylaşırlar ve bu sayede lazer tarafından aydınlatılan obje yüzey noktasının daima optik alıcının görüş alanı (Field of View (FOV)) içerisinde kalması sağlanır (Wehr ve Lohr [85]).

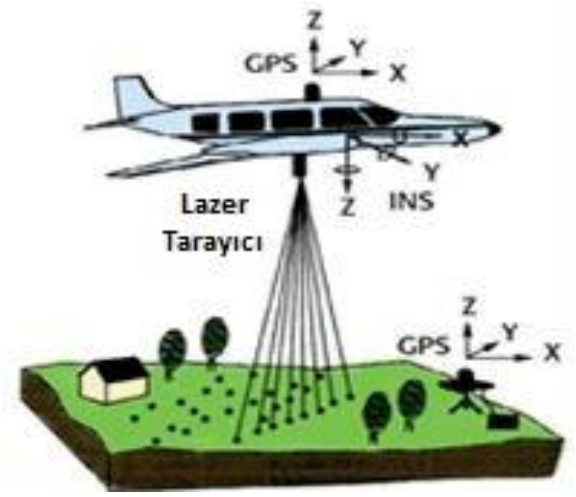
Kontrol-kayıt ünitesi tarayıcı, GPS, INS ve olası görüntü verileri için kayıt biriminden ve online veri kaydının kontrolü için bilgisayar, işletim sistemi ve yazılımdan oluşur (Baltsavias [86]).

Küresel konumlama sistemi (Global Positioning System (GPS)), antenlerinin konumlarını 3 boyutlu jeodedezik koordinat sisteminde belirlemeye yarar. GPS havadan lazer tarama uygulamalarında lazer mesafe ölçerin konumunu hesaplama ve belirlenen uçuş hattı boyunca hava aracının navigasyonunu sağlama olmak üzere iki şekilde kullanılabilir (Lindenberger [64]).

Havadan lazer tarama sistemlerinde INS/IMU, temel olarak lazer sinyali yöneltmesinin yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesi amacıyla gerekli olan dönüklüklerin belirlenmesi için gereklidir (Lindenberger [64]).

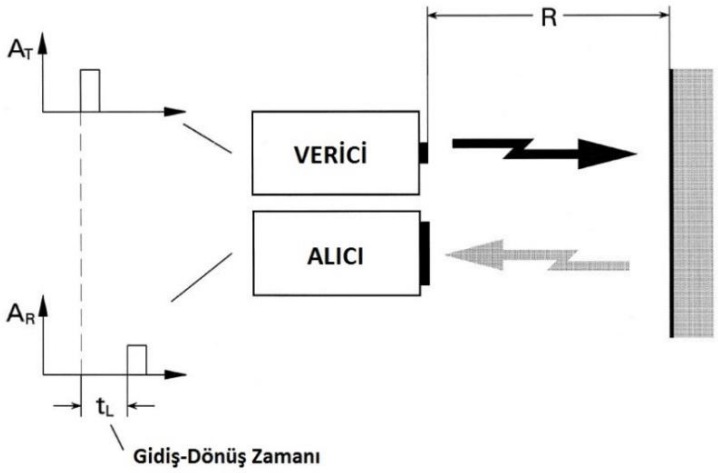
2.3 LiDAR Ölçme Prensibi

LiDAR, direk olarak lazer tarayıcı ile yeryüzü topografyası arasındaki eğik (range) mesafeyi ölçer ve bu mesafe ölçümleri 3B nokta bulutu şeklinde ifade edilir (Mallet ve Bretar [66]). LiDAR çalışma ilkesi, lazer tarayıcı tarafından gönderilen ve obje yüzeyinden yansıyan lazer sinyalinin alıcıya geri dönüş süresinin ölçülme işlemidir (Petrie ve Toth [63]). Yayılan lazer sinyali yüzey ile etkileşime girerek geri yansıma üretir ve alınan sinyal zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilir (Höfle ve Pfeifer [87]). Teorik olarak bir LiDAR sisteminden sinyalin yayılması Şekil 2.2' de görülmektedir. Işık hızı ve sinyalin hava aracı ile obje arasındaki gidiş - dönüş süresi bilindiğinden aradaki mesafe hesaplanabilir (Badea ve Jacobsen [88]). LiDAR'ın temel prensibi Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2. 2 LiDAR sisteminden sinyalin yayılması (Badea ve Jacobsen [89])

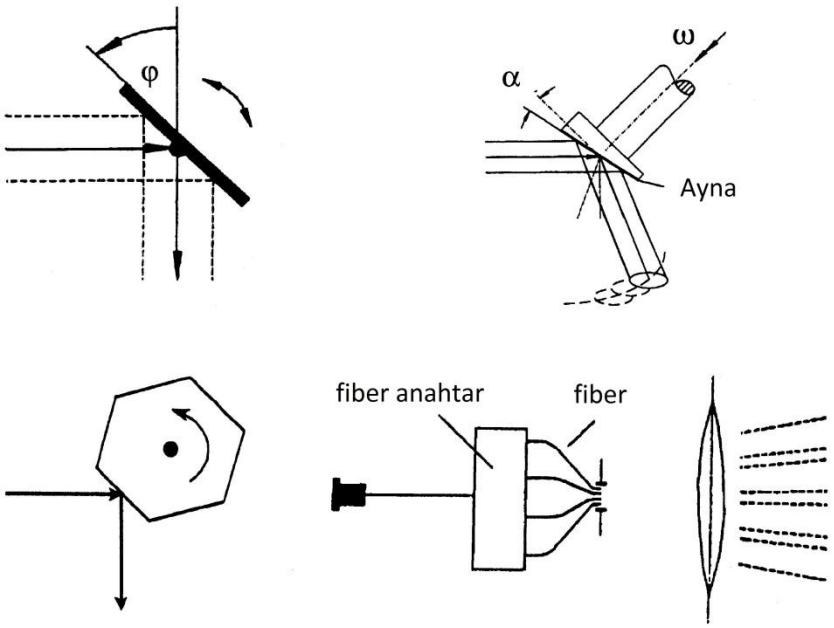
Gidiş - dönüş zamanının belirlenmesinin ardından konum, dönüklükler, mesafe ve projeksiyon dönüşümleri dikkate alınarak noktaların koordinatları (X, Y, Z) elde edilir (Badea ve Jacobsen [89]).



Şekil 2. 3 Lazer tarayıcı temel prensibi (Wehr ve Lohr [85])

LiDAR sistemleri genellikle, tarama açısı (scan angle), tarama izi (footprint), sinyal oranı (pulse rate), geri yansıyan ışının ıraksaması (beam divergence), sinyal başına maksimum dönüş sayısı, tarama deseni (scanning pattern) ve ışın çapı (beam diameter) gibi bir dizi değişken parametre içerir (Charaniya [7]). Havadan lazer taramanın çalışma şekli, arazi üzerinde uçuş çizgisi boyunca taramaları elde edip daha sonra bu taramaları arazinin modelini elde etmek için birleştirmektir (Sithole [9]). Veriler genellikle her biri çoklu tarama çizgisi içeren bindirmeli kolon setleri halinde elde edilir (Charaniya [7]). Taramalar tek veya çift yönlü olabilir. Havadan ölçümler için kullanılan klasik tarama mekanizmaları Şekil 2.4' de gösterilmektedir (Wehr ve Lohr [85]).

Belirli bir uçuş yüksekliğine göre tarama izi, lazer ışınının ıraksamasına ve görüş alanı (FOV) üzerindeki tarama genişliğine dayanır (Wehr ve Lohr [85]).



Şekil 2. 4 Tarama mekanizmaları (Sol üstten saat yönüne göre: döner ayna, palmer tarayıcı, fiber tarayıcı, döner poligon) (Wehr ve Lohr [85])

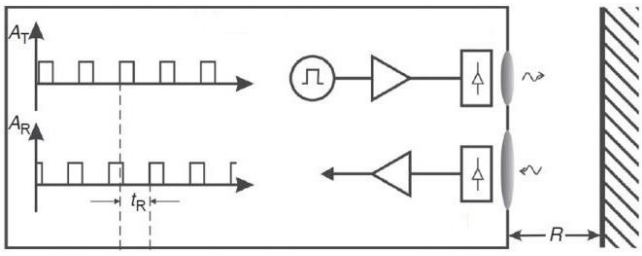
Lazer ile mesafe ölçümlerinde;

- Pulse ile mesafe belirleme,
- Faz farkı ile mesafe belirleme

olmak üzere iki ana ölçüm prensibi uygulanır (Wehr ve Lohr [85]).

2.3.1 Pulse ile Mesafe Belirleme

Pulse lazer yönteminde lazer ışınının vericiden hedefe ve geri alıcıya olan gidiş - dönüş zamanı ölçülür (Mallet ve Bretar [66]). Pulse lazerlerinin ölçüm prensipleri Şekil 2.5' de verilmiştir.



Şekil 2. 5 Pulse lazerlerin ölçüm prensibi (Wehr [90])

R lazer ile obje yüzeyi arasındaki eğik mesafeyi, c ise ışık hızını ifade ederken t_L ölçüldüğünde eğik mesafe (R) doğrudan eşitlik (2.1)' deki şekilde hesaplanır. Eğik

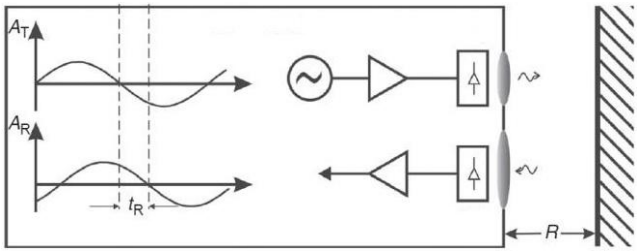
mesafe çözünürlüğü ise zaman ölçen aletin elde edilebilir zaman çözünürlüğü Δt_L kullanılarak eşitlik (2.2)' deki şekilde hesaplanır (Wehr [90]).

$$\mathrm{R} = \frac{\mathrm{c}}{2} . t_{\mathrm{L}} \tag{2.1}$$

$$\Delta \mathrm{R} = \frac{\mathrm{c}}{2} . \Delta t_{\mathrm{L}} \tag{2.2}$$

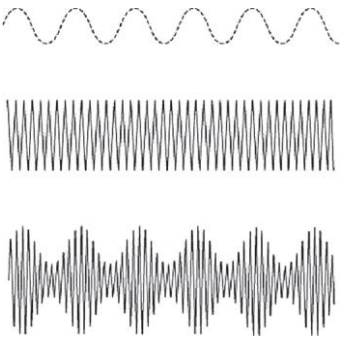
2.3.2 Faz Farkı ile Mesafe Belirleme

Faz farkı ile mesafe belirleme yönteminde iletilen ve alınan sinyal arasındaki faz farkı ölçülür (Mallet ve Bretar [66]). Faz farkı metodu sürekli yayılan lazer ışını ile uygulanır. Bu lazerler sürekli dalga lazerleri (Continuous Wave (CW)) olarak adlandırılır (Wehr ve Lohr [85]). CW lazerlerde sinyalin yansıması, sürekli olmasının dışında pulse lazerdekine benzerdir (Petrie ve Toth [63]). CW lazerlerin ölçüm prensipleri Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2. 6 CW lazerlerin ölçüm prensibi (Wehr [90])

CW yaklaşımını kullanan cihazlarda, gönderilen ışın basit taşıyıcı sinyal üzerine eklenmiş modülasyon sinyali içerir (Petrie ve Toth [63]). Ölçüm, taşıyıcı ve modülasyon sinyalleri Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2. 7 Sırasıyla ölçüm, taşıyıcı ve modülasyon sinyalleri (Petrie ve Toth [63])

Faz farkı yöntemi ile sinyalin periyodu T, gönderilen ve alınan sinyal arasındaki faz farkı Φ, dalga boyu ʎ olmak üzere sinyalin gidiş - dönüş süresi eşitlik (2.3), eğik mesafe (R)

eşitlik (2.4) ve eğik mesafe çözünürlüğü de eşitlik (2.5) kullanılarak hesaplanır (Wehr [90]).

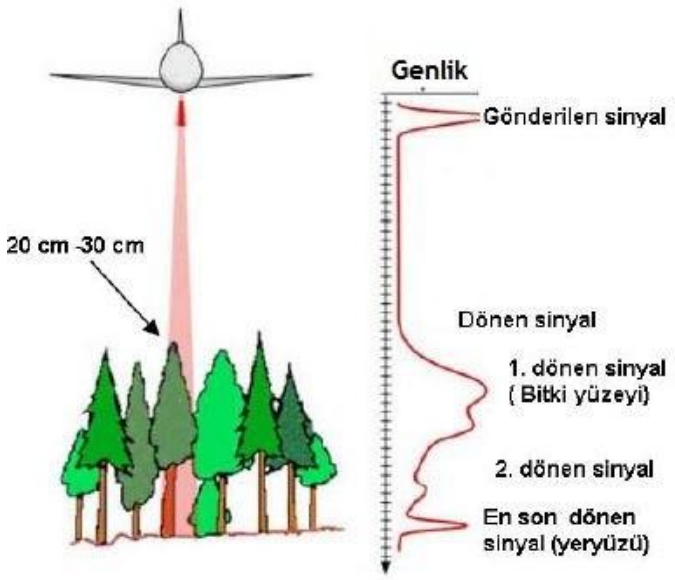
$$t_{\mathrm{L}} = \frac{\phi}{2\pi} \,.\, \mathrm{T} \tag{2.3}$$

$$\mathrm{R} = \frac{\lambda}{4\pi} \,.\, \phi \tag{2.4}$$

$$\Delta\mathrm{R} = \frac{\lambda}{4\pi} \,.\, \Delta\phi \tag{2.5}$$

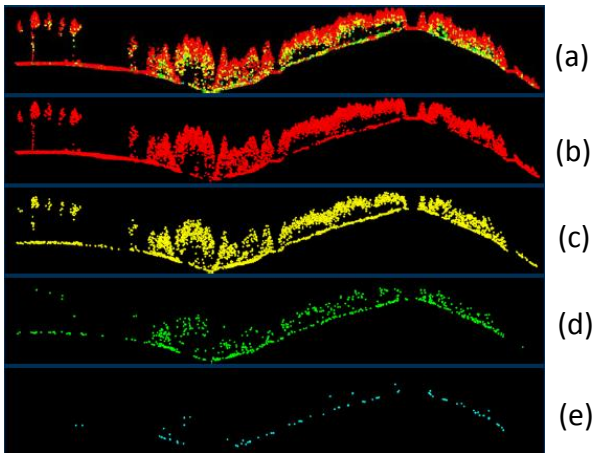
2.4 Çoklu Yansıma

Eğik mesafe ölçmenin yanında, bazı lazerler gönderilen her sinyal için çoklu yansımaları da kaydederler; lazer yolu boyunca ve lazer izi içinde çeşitli nesnelerin mesafelerini ölçerler (Wehr ve Lohr [85]). Yayılan lazer sinyali yer yüzeyinden veya binalar, ağaçlar, köprüler gibi yerin üstündeki objelerden geri yansır ve LiDAR sensörüne tek olarak veya çoklu geri dönebilir. Yeryüzüne doğru giderken birden fazla yansıma yüzeyi ile karşılaşan sinyal, karşılaştığı yüzey kadar farklı dönüşe ayrılır. Çoklu dönüşler genellikle bina kenarları ve bitki örtüsünde ortaya çıkar. Örneğin, lazer sinyalinin bir parçası ağacın tepesinden yansırken bazı parçaları ağacın iç kısımlarından ya da yeryüzünden yansıyabilir (Persson vd. [91]). Bir lazer sinyalinin bitki örtüsü yüzeyinden farklı dönüşlere ayrılarak geri yansıması Şekil 2.8' de görülmektedir. Lazer izi içerisinde tek bir hedef varsa sadece bir sinyalin kaydedilmesi yeterlidir. Böyle bir durumda yansıyan sinyalin şekli "Tek Modlu (Single Mode)" olarak ifade edilir ve yorumlanması kolaydır (Wagner vd. [62]). Aksine, ağaçlardaki durum gibi, çoklu objelerin düşey profili gerektiğinde çoklu yansımaların kaydedilmesi yararlı olabilir (Wehr ve Lohr [85]).



Şekil 2. 8 Lazer sinyalinin bitki örtüsü yüzeyinden yansıması (Li [92])

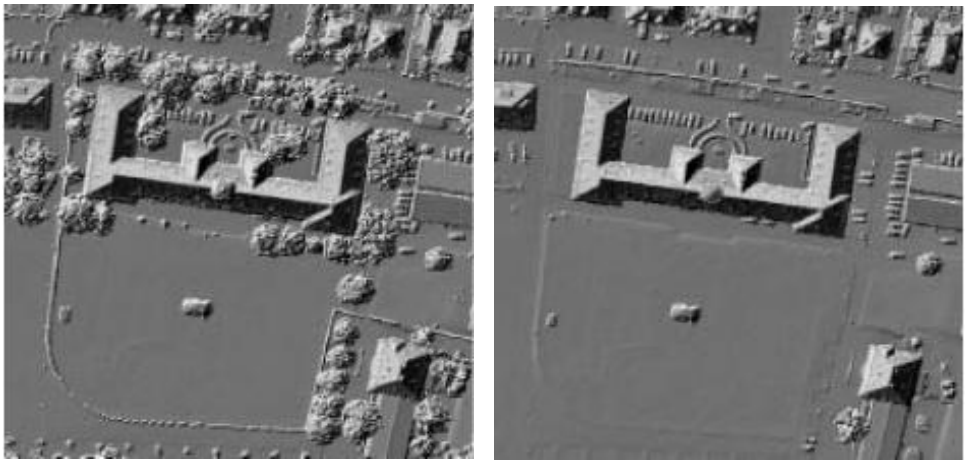
İlk ticari havadan lazer tarayıcılar sadece bir geri yansıyan sinyalin zamanını ölçerken son model sistemler ilk ve son yansımayı, bazıları ise 5 yansımaya kadar ölçerler (Wagner vd. [62]). Lazer sinyalinin seyahat yolu üzerinde çoklu yansıma yaratacak farklı objeler olabilir. Bu nedenle daha gelişmiş, bir sinyalden daha fazlasını kaydedebilen lazer tarayıcılar geliştirilmiştir. Sinyal belirleme bireysel yansımaların konumunu belirlemek için kullanılır (Wagner vd [62]). Dört dönüş olarak kaydedilen örnek bir LiDAR verisi Şekil 2.9' da verilmiştir.



Şekil 2. 9 Dört dönüşlü LiDAR verisi; tüm dönüşler (a), ilk dönüş (b), ikinci dönüş (c), üçüncü dönüş (d), dördüncü dönüş (e) (Nayegandhi [93])

Dalga boylarının analizi, sinyal belirlemenin güvenilirliği, doğruluğu ve çözünürlüğünü arttıran gelişmiş veri işleme metodlarını uygulamaya olanak sağlar (Mallet ve Bretar [66]). 2004 yılından itibaren, geri yansıyan ışını bütün dalga boyuyla kaydetme yeteneğine sahip tam dalga (full - waveform) LiDAR olarak adlandırılan yeni havadan lazer tarama sistemleri geliştirilmiştir. Böylece, eğik mesafeye ek olarak lazer izi içerisinde kalan objelere ait daha ayrıntılı fiziksel özellikler geri yansıyan dalgaların analizi ile oluşturulabilmektedir (Mallet ve Bretar [66]). Gelecek nesil ticari LiDAR sistemlerindeki yeni özellik, lazerden gönderilen sinyalin geri yansımasının tam dalga kaydedilmesi olanağıdır (Persson vd. [91]). Yeni bir teknoloji olan tam dalga LiDAR sistemleri fiziksel ölçümlerin yorumlanması aşamasında kullanıcılara daha fazla kontrol sağlar (Mallet ve Bretar [66]).

Günümüzde topografik harita üretimi için tasarlanan çoğu LiDAR sistemi 3 dönüş kaydetmek için optimize edilmiştir. İlk dönüş (first return), bina, ağaç, köprü vb. arazi yüzeyindeki objeleri de içeren Sayısal Yüzey Modeli üretmek için kullanılabilir. İkinci dönüş (intermediate return), bitki örtüsünü arazi yüzeyindeki diğer objelerden ayırmak için yardımcı olan dönüştür. Son dönüş (last return) ise çıplak yeryüzünün ilk tahminidir. Her zaman son dönüş arazi yüzeyinden olmayabilir. Yayılma sırasında kalın bitki örtüsüne rastlaması durumunda son dönüş arazi yüzeyinden olmaz. Şekil 2.10’ da bir lazer tarayıcı ile kaydedilen ilk ve son dönen sinyallerden elde edilen görüntüler yer almaktadır görülmektedir.

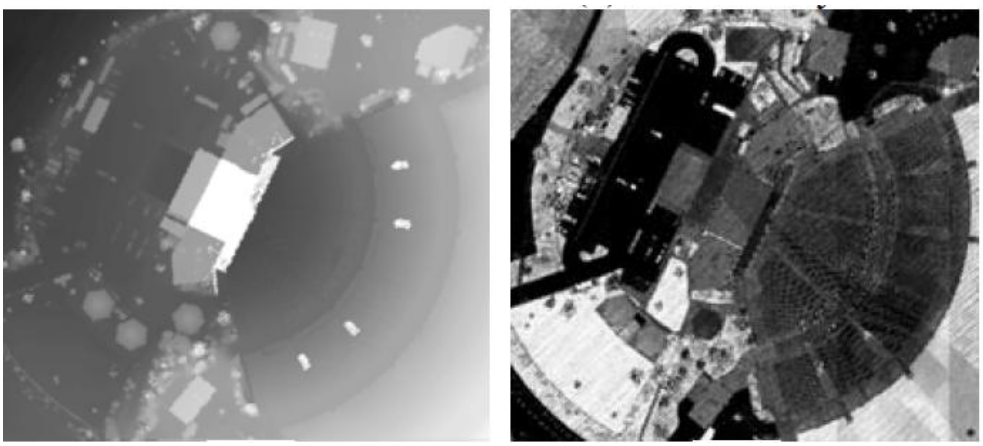


(a) (b)

Şekil 2. 10 İlk dönüş (a), son dönüş (b) (Vosselman [94])

2.5 Yoğunluk (Intesity) Verisi

Aktif bir uzaktan algılama tekniği olan LiDAR, sadece geometrik olarak detaylı bilgi sunmaz; aynı zamanda, genellikle 800 nm ile 1550 nm arasında olan yakın kızılötesi dalga boyunda yeryüzeyinin yansıtma karakteristiğinin elde edilmesini sağlar (Höfle ve Pfeifer [87]). Lazer sinyalinin çarptığı objenin yansıtma özelliğine dayanan yoğunluk (intensity), noktayı oluşturan lazer sinyalinin dönüş gücünden her nokta için elde edilen bir ölçümdür. Modern LiDAR sistemlerinde lazer sinyali aynı zamanda yoğunluk bilgisini de kaydederek "intensity görüntü" oluşturmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, Californiya'da, San Bernardino şehrinin kuzey batısındaki bir bölgeye ait 0.2 m çözünürlüğe sahip YM ve 0.2 m yer örnekleme arağına sahip yoğunluk görüntüsü Şekil 2.11' de yer almaktadır. Yoğunluk, LiDAR nokta bulutu sınıflandırmasında öznitelik belirleme ve obje çıkarımına yardımcı olarak ve mevcut olmadığında hava fotoğrafları yerine kullanılır. Mevcut ticari sistemler, 8-bit, 12-bit veya 16-bit çözünürlüğünde yoğunluk verisi sağlarlar (Höfle ve Pfeifer [87]). Ormancılık ve buzul bilimi vb. çeşitli uygulama alanlarında sınıflandırma ve obje çıkarımı için ek veri olarak kullanılan yoğunluk verisinin katkıları uzun zamandır incelenmektedir (Höfle ve Pfeifer [87]).



(a) (b)

Şekil 2. 11 DSM (a), yoğunluk görüntüsü (b) (Uzar ve Yastıklı [57])

BÖLÜM 3

SINIFLANDIRMA

Sınıflandırma, bilinmeyen desenleri önceden verilen sınıflara atama anlamına gelir (Rehor ve Bahr [95]). Ortak özelliklere göre gruplandırma işlemi sınıflandırma olarak adlandırılır. Özünde, birçok bilim dalında kullanılan bir karar verme işlemidir ve tematik bilgi çıkarımında kullanılan en önemli yöntemdir (Ayhan vd. [96]; Çölkesen [97]). Sınıflandırma temel olarak piksel tabanlı, nesne tabanlı ve nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi olarak gruplandırılmaktadır. Bu bölümde sınıflandırma yöntemleri hakkında özet bilgiler verilecek, nokta bulutunun sınıflandırılması ve sınıflandırmada doğruluk analizi konularına ayrıntılı bir şekilde değinilecektir.

3.1 Sınıflandırma Yöntemleri

Sınıflandırma yöntemleri temel olarak (Uzar Dinlemek [29]);

- Piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi,
- Nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi,
- Nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi

şeklinde üç başlık altında toplanabilir.

3.1.1 Piksel Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi

Piksel tabanlı sınıflandırma yönteminde, spektral yansıma değerleri kullanılarak ilgili pikselin ait olduğu sınıfa atama işlemi gerçekleştirilir (Uzar Dinlemek [29]). Piksel tabanlı işlemler, ilgili pikselin mekânsal ya da bağlamsal (contextual) özelliklerini

dikkate almadan tüm pikselleri spektral özelliklerine göre analiz ederler (Weih ve Riggan [98]). Spektral özelliklerine göre bir görüntüde hiçbir sınıf ile eşleşmeyen pikseller sınıflandırılmamış olarak kalır (Navulur [99]). Geleneksel görüntü analiz teknikleri genellikle piksel tabanlı tekniklerdir (Navulur [99]). Piksel tabanlı sınıflandırma işlemi, kontrolsüz (unsupervised) ve kontrollü (supervised) sınıflandırma olmak üzere ikiye ayrılır (Oruç vd. [100]).

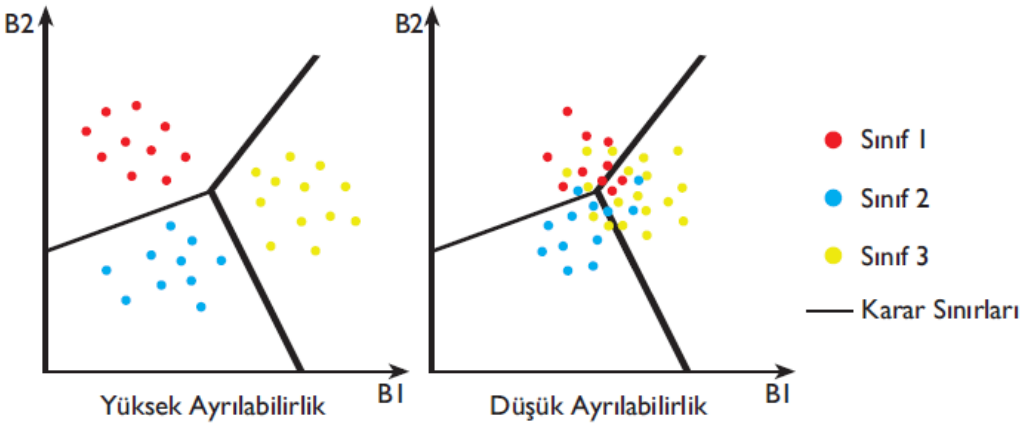
3.1.1.1 Kontrolsüz Sınıflandırma

Kontrolsüz sınıflandırma teknikleri, görüntü analizlerinde yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tekniğin amacı, pikselleri farklı spektral bantlarda, benzer spektral yansımalar ile istatistiksel olarak ayrılabilir kümelere ya da sınıflara toplamaktır (Navulur [99]). Kontrolsüz sınıflandırma yöntemi, görüntü üzerindeki piksellerin kullanıcı müdahalesi olmaksızın belirli algoritmalar kullanılarak otomatik olarak gruplandırılması temeline dayanmaktadır (Çölkesen [97]; Uzar Dinlemek [29]). Tüm pikseller, en yakın uyumu görmek için her ayrı küme ile karşılaştırılır. Sonuç bütün piksellerin en büyük olasılıkla ait olduğu kümeye atandığı tematik haritalardır (Navulur [99]). Çalışma bölgesine ait yeterince bilgi ya da istatistiksel veri bulunmadığı veya bölge hakkında ön bilgiye gereksinim duyulan durumlarda başvurulan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, arazi örtü tipinin bilinmesine gerek yoktur, öncelikle görüntü üzerinde sınıf sayıları belirlenir (Çölkesen [97]). Sınıflandırma sonucunda oluşan spektral sınıfların neler olduğu önceden bilinmez; bu sınıflar topoğrafik haritalar, hava fotoğrafları veya mevcut diğer bilgiler kullanılarak belirlenir. Uzaktan algılama uygulamalarında çok tercih edilen bir yöntem değildir, sonuçların doğruluğu genelde tatmin edici olmaz (Küpçü ve Çabuk [101]).

Görüntü analizlerinde kullanılan çok sayıda kontrolsüz sınıflandırma algoritması vardır. Bunlardan en sık kullanılanlar K-ortalamalar (K-means) ve ISODATA (iterative self-organizing data analysis technique algorithm) – tekrarlı veri analiz kümeleme algoritmalarıdır (Navulur [99]).

3.1.1.2 Kontrollü Sınıflandırma

Kontrollü sınıflandırmada kullanıcı görüntüdeki mevcut özellikler ile ilgili ön bir bilgiye sahiptir (Navulur [99]). Görüntünün hangi sınıflara ayrılacağı ve görüntüden hangi sınıfların elde edilmek istendiği önceden belirlenmektedir (Çölkesen [97]; Küpçü ve Çabuk [101]). Kontrollü sınıflandırmada ilk adım, arazi örtüsünü temsil edecek sınıfların belirlenmesi ve ardından bu sınıflara ait kontrol alanlarının başka bir deyişle örneklem alanlarının seçimi; ikinci adım ise sınıflandırma adımıdır. Kullanıcı belirlenen sınıflar için kontrol alanları seçer ve sınıflandırma adımında, istatistiksel analizler çok bandlı görüntüde her sınıf için gerçekleştirilir (Navulur [99]). Kontrol alanları arazi çalışmaları, hava fotoğrafları veya haritalardan yararlanılarak seçilir. Kontrol alanlarının seçimi sınıflandırmanın doğruluğunu etkileyen bir aşamadır (Çölkesen [97]). Doğru bir sınıflandırmanın yapılabilmesi için, kontrol alanları arazide homojen bir şekilde ve yeterli büyüklükte belirlenmelidir. Uygulamada sıklıkla karşılaşılan sorun sınıf karışmasıdır. Sınıf karışıklıklarının nedenlerinden biri kontrol alanlarının ölçümünde yapılan hatalardır (Bayram [102]; Uzar Dinlemek [29]). Şekil 3.1' de üç farklı sınıf için, iki farklı kontrol verisinin dağılımı ve karar sınırları gösterilmektedir. Kontrol alanlarının homojen ve karar sınırlarından uzakta seçildiği durumlarda sınıflandırma için yüksek ayrılabilirlik aksi durumda ise düşük ayrılabilirlik söz konusudur.



Şekil 3. 1 Üç farklı sınıf için iki farklı kontrol verisinin iki boyutlu özellik uzayında oluşan karar sınırları ve kontrol verilerinin dağılımı (Sunar ve Özkan [103])

Yaygın olarak kullanılan kontrollü sınıflandırma tekniklerinden bazıları; en küçük mesafe (minimum distance-to-means), paralelyüz sınıflandırıcısı (parallelopiped classifier) ve en büyük benzerlik (maximum likelihood classifier) sınıflandırıcılarıdır

(Navulur [99]; Oruç vd [100]; Küpçü ve Çabuk [101]). Son yıllarda, uzaktan algılanmış görüntülerin sınıflandırılmasında kullanılmaya başlanılan yapay sinir ağları (neural network), destek vektör makineleri (support vector machine (SVM)) , karar ağaçları (decision tree) ve örnek tabanlı sınıflandırıcılar gibi güçlü ve yüksek genelleştirme kabiliyetine sahip kontrollü sınıflandırma yöntemleri de uygulamalarda yer almaktadır (Çölkesen [97]; Üstüner [104]).

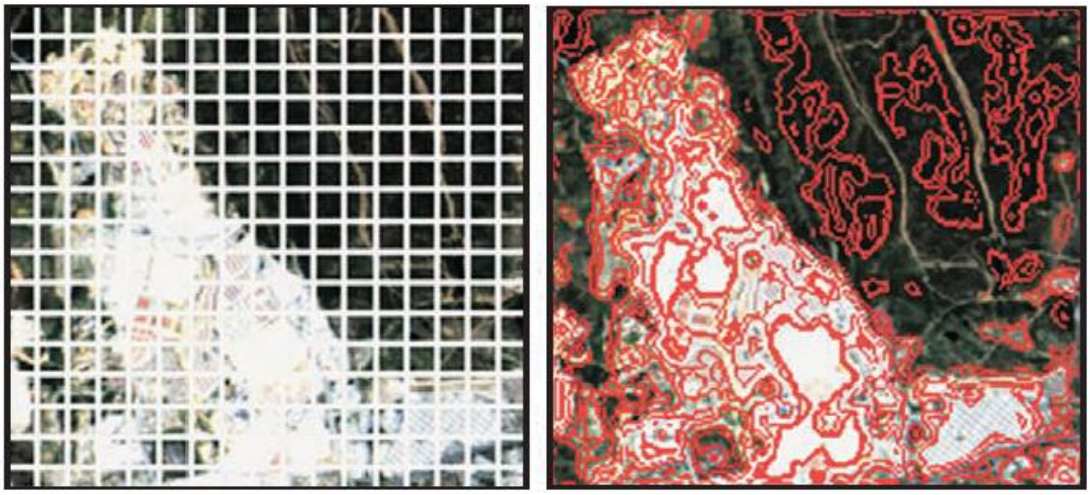
3.1.2 Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi

Nesne tabanlı görüntü analizi kavramı piksel tabanlı analizlere alternatif olarak 1970' li yıllarda ortaya çıkmıştır (Gao ve Mas [105]). 1990' lı yılların ortalarından itibaren artan donanım özellikleri ve yüksek çözünürlüklü görüntülerin ulaşılabilir olmasıyla, piksel tabanlı görüntü sınıflandırması ciddi problemlerle karşılaştığından nesne tabanlı görüntü analiz tekniklerine yönelim artmıştır (Gao ve Mas [105]). Nesne tabanlı sınıflandırma yönteminde nesne, benzer spektral ve mekânsal özelliklere sahip bir piksel grubu olarak tanımlanır (Uzar Dinlemek [29]). Piksel tabanlı sınıflandırma yönteminin aksine, nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi yapıyı, dokuları ve spektral bilgileri dikkate alır (Oruç vd [100]). Nesne tabanlı analizler tekil pikseller yerine nesneleri sınıflandırırlar (Yan vd. [106]). Bireysel piksellerde görülemeyen semantik (anlamsal) bilgiler nesnelerde ve nesnelerin karşılıklı ilişkilerinde tespit edilebilir (Sunar ve Özkan [103]). Yüksek çözünürlüklü görüntülerin varlığının artması ile birlikte, nesne tabanlı sınıflandırma son yıllarda giderek daha popüler bir hale gelmiştir (Zhang ve Jia [107]). Birçok çalışma, yüksek çözünürlüklü görüntülerin arazi örtüsü sınıflandırılmasında nesne tabanlı görüntü analiz tekniklerinin piksel tabanlı yaklaşımlara göre daha üstün olduğunu göstermiştir (Blaschke [108]). Nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi segmentasyon ve sınıflandırma aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalara '3.1.2.1 Görüntü Segmentasyonu' ve '3.1.2.2 Görüntü Sınıflandırması' başlıkları altında değinilmiştir.

3.1.2.1 Görüntü Segmentasyonu

Segmantasyon ölçek, renk ve şekil gibi belirli homojenlik ölçütlerine göre piksellerin gruplanmasıdır (Sunar ve Özkan [103]). Segmentasyon aşaması sayesinde milyonlarca

piksel ile işlem yapmak yerine elde edilen homojen segmentler üzerinden işlemler gerçekleştirilir. Şekil 3.2' de piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi ve görüntü segmentasyonu ile gerçekleştirilen nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi görülmektedir. Görüntü segmentasyonu nesne tabanlı sınıflandırmada ilk aşamadır (Yan vd. [106]). Piksellerden nesneleri oluşturmak için temel bir kavramdır ve görüntünün ortak özelliklere sahip bölgelere ya da nesnelere ayrılmasını içerir (Navulur [99]). Nesneler genellikle otomatik segmentasyon algoritmalarıyla oluşturulur (Sunar ve Özkan [103]). Görüntü segmentasyon teknikleri temelde eşik değer/kümeleme (thresholding/ clustering), alan tabanlı (region based) ve kenar tabanlı (edge based) olarak üç gruba ayrılır (Yan vd. [106]; Navulur [99]).



(a) (b)

Şekil 3. 2 Sınıflandırma yöntemleri; piksel tabanlı (a), nesne tabanlı (b) (Sunar ve Özkan [103])

Segmentasyonun doğruluğu obje tabanlı görüntü sınıflandırmasının performansını direk olarak etkiler. Sadece iyi segmentasyon sonuçları obje tabanlı sınıflandırmanın piksel tabanlı sınıflandırmaya göre üstün olmasını sağlar (Yan vd. [106]).

3.1.2.2 Görüntü Sınıflandırması

Segmentasyon aşamasını sınıflandırma aşaması takip eder. Sınıflandırmaya esas olan yapı, segmentasyon sonucunda oluşan nesnelerdir; ancak iki aşama kesinlikle yapılırken birbirlerine bağlı değildir (Oruç vd. [100]; Güler [109]). Objeleri temsil eden segmentler; şekil, doku, komşuluk ilişkisi, morfolojik ilişkiler, alan, yükseklik değeri,

mesafe, geometrik şekil, standart sapma, yoğunluk vb. değerler kullanılarak analiz edilir ve hedef sınıflara atanır (Uzar ve Yastıklı [57]; Güler [109]). Bu şekilde, ağaç örtüsü gibi heterojen yansıtma değerleri olan nesneler heterojenliklerine rağmen tanınabilirler (Zhou ve Troy [110]).

Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgiler ve gerçekleştirilen uygulamalar Uzar Dinlemek [29] ve Uzar ve Yastıklı [57]' de verilmiştir.

3.1.3 Nokta Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi

Nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi, sınıflandırma sırasında noktaları esas alan bir yaklaşımdır. Sınıflandırma aşamasının en küçük birimi noktalardır ve tüm noktalar ayrı ayrı işlemden geçirilirler. Bu yöntemde amaç, objeleri temsil eden homojen özelliklere sahip noktaları aynı grup altında toplayarak sınıf oluşturmaktır. Bu yöntem, havadan lazer tarama gibi yeni nesil sistemlerle ya da yoğun görüntü eşleme (dense image matching) algoritmaları ile fotoğraflar kullanılarak (Haala [111]) elde edilen üç boyutlu nokta bulutu verilerinin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması, LİDAR nokta bulutunun nokta tabanlı sınıflandırılması esasına dayandığından bu konudaki ayrıntılı bilgiler '3.2 Nokta Bulutunun Sınıflandırılması' başlığı altında açıklanmıştır.

3.2 Nokta Bulutunun Sınıflandırılması

Hava LiDAR sistemlerinin son yıllarda hızla gelişim göstermesi ve olağanüstü ölçüm yetenekleri, tüm veri toplama işlem adımları için havadan lazer taramanın çok güvenilir ve ekonomik olarak kabul edilebilir bir teknoloji olmasına neden olmuştur (Gajski vd. [112]). Havadan lazer tarama otomatik veri toplama yöntemi olmasına rağmen elde edilen nokta bulutunu otomatik sınıflandırma olanağı bulunmamaktadır (Gajski vd. [112]). Tarama mekanizması ve uçağın hareketinden dolayı lazer sinyali arazi, bitki örtüsü, bina ya da diğer hedef objelere çarpar ve ve geri yansıyan enerji kaydedilererek lazer nokta bulutu elde edilir (Forlani ve Nardinocchi [37]). Bu nedenle, noktalar farklı objelere ait olsalar dahi sistem tarafından sadece konum ve yoğunluk (intensity) verisi olarak kaydedilmektedirler (Gajski vd. [112]). Ham LiDAR nokta bulutu verisinde

yeryüzeyi, bitki örtüsü, binalar ve diğer doğal ve insan yapımı yapıların hepsi aynı sınıfa aittir. Hava LiDAR verisini anlamlı sınıflara ayırmak önemli bir iş kalemidir (Charaniya vd. [7]). Modelleme, analiz ve görselleştirme için farklı türdeki nesnelere ait nokta bulutunun sınıflandırılmasına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, ham LiDAR nokta bulutu veri setine herhangi bir işlem uygulamadan, yollar, yaya yolları, zemin, beton zemin, toprak, yeşil alan vb. fiziksel yeryüzeyi üzerindeki objeler ile binalar, ağaçlar, çalılar, konteiner, müştemilat ve araçlar vb. yeryüzüne ait olmayan objelerin farklı sınıflara ayrılmasına ihtiyaç vardır (Charaniya vd. [7]).

Yapılan çalışmalara göre hava LiDAR ile elde edilen nokta bulutunun sınıflandırılması genel olarak (Caharaniya vd. [7]; Zhang vd. [8]; Hu ve Ye [113]);

- Hava LiDAR ile elde edilen nokta bulutunun arazi ve araziye ait olmayan noktalar şeklinde sınıflandırılması (başka bir ifade ile filtreleme),
- Hava LiDAR ile elde edilen nokta bulutunun yollar, binalar, ağaçlar, çalılık ve ormanlık alan vb. gibi farklı objelere ayrılarak sınıflandırılması

şeklinde ikiye ayrılabilir.

3.2.1 Filtreleme

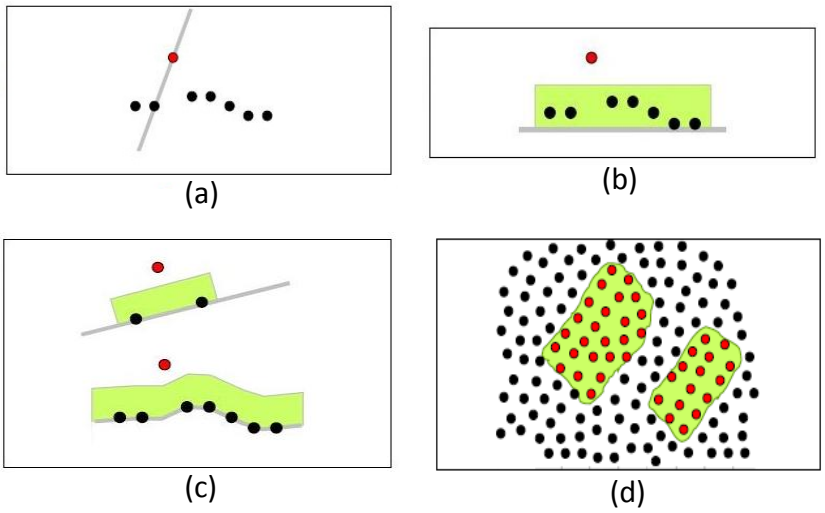
Havadan lazer tarama ile arazi üzerinde ve bina, bitki örtüsü gibi diğer objeler üzerinde noktalar ölçülür. Filtreleme olarak adlandırılan yöntemler ile noktalar arazi ve obje noktaları olarak sınıflandırılırlar (Tóvári ve Pfeifer [114]). Filtreleme, LiDAR verisini arazi ve araziye ait olmayan noktalar şeklinde sınıflandırırken arazi yüzeyine ait olmayan noktaları yok etme işlemi olarak bilinir (Passini ve Jacobsen [115]; Hu ve Ye [113]). Bu işlem aynı zamanda Sayısal Yüzey Modeli (SYM) olarak adlandırılabilecek ham LiDAR verisinden Sayısal Yükseklik Modeli elde edilmesi işlemidir.

Filtreleme adımı SYM üretmek için gerekli bir adımdır. Yüksek kalitede SYM elde etmek için nokta bulutunu, etkili ve hassas filtreleme önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, normalize edilmiş yüzey modeli kullanılarak gerçekleştirilen bina, elektrik hatları gibi başka topografik özelliklerin yeniden oluşturulması çalışmalarında da filtrelemeye ihtiyaç duyulur (Tóvári ve Pfeifer [114]).

Bütün filtreler, lokal bir komşulukta çıplak yeryüzündeki noktalarının yapısı hakkında bir varsayımda bulunurlar. Filtrelemede eğim tabanlı (slope based), minimum blok (blok minimum), yüzey tabanlı (surface based) ve kümeleme/segmentasyon (clustering/segmentasyon) olmak üzere dört farklı kavram ön plana çıkmaktadır (Sithole ve Vosselman [46]). Bu kavramların dayandırıldığı prensipler şematik olarak Şekil 3.3' de görülmektedir.

Eğim tabanlı yaklaşımda, iki nokta arasındaki eğim ya da yükseklik farkı ölçülmektedir. Eğer eğim değeri belli bir eşik değerin üstünde ise en yüksek noktanın bir objeye ait olduğu varsayılır (Sithole ve Vosselman [46]).

Minimum blok, diskriminant fonksiyonunun, üzerindeki tampon bölgeye uyan yatay bir düzlem olduğu yaklaşımdır. Yüzey tabanlı yaklaşım ise diskriminant fonksiyonunun, üzerindeki tampon bölgeye uyan parametrik bir yüzey olduğu yaklaşımdır. Minimum blok da düzlem, yüzey tabanlı yaklaşımda da yüzey tampon bölgeyi belirler ve bu tampon bölgeler de yeryüzü noktalarının 3 boyutlu olarak içinde olmasının beklendiği bir bölge tanımlarlar (Sithole ve Vosselman [46]).

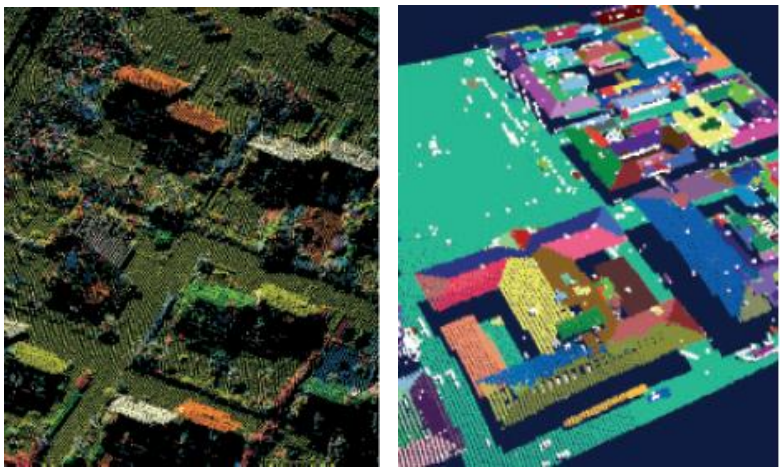


Şekil 3. 3 Eğim tabanlı (a), minimum blok (b), yüzey tabanlı (c) ve kümeleme/ segmentasyon (d) filtrelerinin çalışma prensipleri (Sithole ve Vosselman [116])

Kümeleme/segmentasyon yaklaşımında da, noktalar benzer özelliklerine göre gruplandırılırlar (Tóvári ve Pfeifer [114]). Kümeleme/segmentasyon algoritmasının arkasındaki mantığa göre komşu olan noktalar bir küme ise bu noktalar bir nesneye

aittir. Böyle bir kavramın çalışması için kümeler/segmentler nesnelerin yönlerini değil, nesneleri tanımlamalıdırlar (Sithole ve Vosselman [46]).

Lazer tarama alanında genellikle bina çatıları gibi homojen bölgeler kümelenir. Birçok uygulama, yüzey analizleri ya da modelin yeniden oluşturulması için bu tür özelliklere ihtiyaç duyduğundan çok sayıda yüzey segmentasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar yükseklik, eğim ve eğrilik farkı gibi geometrik ilişkilere göre noktaları gruplandırırlar. İlk segmentasyon türleri alan büyümeye (region growing) dayanmaktadır (Tóvári ve Pfeifer [114]). Şekil 3.4' de yakınlığa (proximity) göre ve düzlemsel bölgelere göre kümelenmiş iki nokta bulutu örneği verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3. 4 Yakınlığa göre kümelenen nokta bulutu (a), düzlemsel bölgere göre kümelenen nokta bulutu (b) (Vosselman [94])

LiDAR verisinden çıplak yeryüzeyine ait noktaların belirlenmesi için çok sayıda filtreleme algoritması geliştirilmiştir (Sithole ve Vosselman [46]). Bu algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilen filtreleme işlemleri sırasında nokta bulutuna ilişkin farklı özellikler kullanılır. Filtrelemede kullanılan bu özellikler bir sonraki bölümde özetlenmiştir.

3.2.1.1 Filtre Karakteristikleri

Bir filtrenin nasıl çalıştığını ve filtreleme sonucunda nasıl bir ürün elde edileceğini anlamak ya da tahmin etmek için geliştirilen filtreleme yaklaşımının dayandığı temel özelliklerin bilinmesi gerekir. Birçok filtreleme yaklaşımında kullanılan bu özellikler; veri

yapısı, test komşuluğu ve tek seferde filtrelenen nokta sayısı, devamsızlıkların ölçümü, tek adım ya da iterasyon, değiştirme ve silme, ilk gönderilen ve yansıyan verinin kullanılması olarak ifade edilebilir (Sithole ve Vosselman [116]).

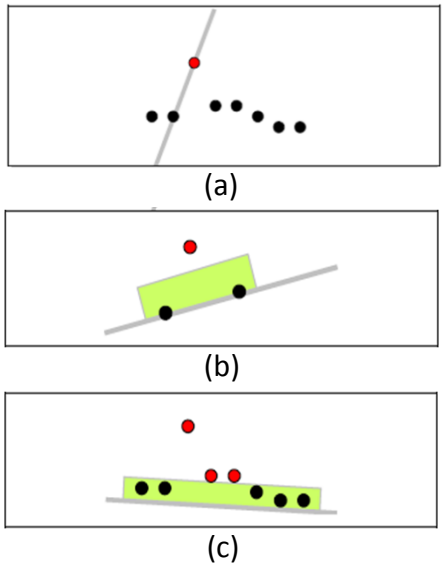
Veri Yapısı

Havadan lazer tarama ile elde edilen nokta bulutu düzensiz aralıklı 3 boyutlu nokta bulutudur. Bazı filtreleme algoritmaları ham (raw) nokta bulutuyla çalışırken bazı algoritmalar görüntü işlemenin sağladığı olanakları kullanabilmek için nokta bulutunu belirli aralıklı grid yapıya sonrasında da görüntüye dönüştürerek kullanır (Sithole ve Vosselman [116]).

Test Komşuluğu ve Tek Seferde Filtrelenen Nokta Sayısı

Filtreler her zaman lokal komşuluk bazlı çalışırlar. Sınıflandırma uygulamalarında (arazi yüzeyi ya da obje) iki ya da daha çok nokta tek seferde sınıflandırılır. Komşuluk göz önünde tutularak bu sınıflandırma, noktadan noktaya (point to point), noktadan noktalara (point to points) ve noktalardan noktalara (points to points) olmak üzere üç şekilde yapılabilir (Şekil 3.5) (Sithole ve Vosselman [46]).

Noktadan noktaya olan algoritmada, iki nokta karşılaştırılmaktadır. Bu noktaların konumlarına göre diskriminant fonksiyonları belirli eşik değerinin üstündeyse noktalardan biri objeye ait sayılır ve tek seferde bir nokta sınıflandırılabilir. Noktadan noktalara olan algoritmada, komşu noktalar diskriminant fonksiyonunu çözmede kullanılır. Diskriminant fonksiyonunun sonucuna göre de ilgili bir nokta sınıflandırılabilir. Bu durumda da tek seferde bir nokta sınıflandırılır. Noktalardan noktalara olan algoritmada, birkaç nokta diskriminant fonksiyonunu çözmede kullanılır ve daha sonra noktalar sınıflandırılır. Bu tür bir formülde birden fazla nokta sınıflandırılabilir (Sithole ve Vosselman [46]).



Şekil 3. 5 Noktadan noktaya (a), noktadan noktalara (b) ve noktalardan noktalara (c) algoritmalarının çalışma prensipleri (Sithole ve Vosselman [116])

Devasızlıkların Ölçümü

Objelerin çıplak yeryüzünde devamsızlıklar oluşturduğu varsayılır. Örneğin, bina arazi yüzeyindeki devamlılığı kırar. Buna göre bütün algoritmalar bazı devamsızlık ölçümlerine göre sınıflandırma yaparlar. Kullanılan bazı devamsızlık ölçümleri; yükseklik farkı, eğim, TIN yüzeylerine ve parametrik yüzeylere en kısa mesafedir (Sithole ve Vosselman [46]).

Tek Adım ya da İterasyon

Bazı filtre algoritmaları noktaları tek seferde sınıflandırırken bazıları da iterasyon uygulayarak birkaç seferde sınıflandırırlar. Tek seferde yapılan hesaplamanın avantajı hızlı olmasıdır ancak iterasyonlu yapılan hesaplamalarda her iterasyonda daha çok bilgi edinilmekte ve daha güvenli sınıflandırma yapılabilmektedir (Sithole ve Vosselman [46]).

Değiştirme ve Silme

Silme özeliğinde filtrelenmiş nokta, nokta bulutunda silinmektedir. Değiştirme özelliğinde ise filtrelenmiş nokta genellikle çevresine göre enterpole edilerek nokta bulutuna farklı yükseklikte tekrar gelmektedir. Silme özelliği genellikle düzensiz aralıklı

nokta bulutları kullanan algoritmalar, değiştirme özelliği de genellikle düzenli aralıklı nokta bulutu kullanan algoritmalarda kullanılmaktadır (Sithole ve Vosselman [46]).

İlk Gönderilen ve Yansıyan Verinin Kullanılması

Bazı hava LiDAR sistemleri birden çok sinyalin yansımasını kaydederler. Bu özellik ormanlık alanlarda avantaj sağlamaktadır. Birden çok sinyalin kaydedilmesinin yanında yansıyan sinyalin yoğunluğu (intensity) da kayıt edilmektedir. Farklı arazi yüzeyleri sinyalleri farklı şekilde emer (absorb) ya da yansıtır. Bu yüzden yoğunluk bilgisinin elde edilmesi noktaları sınıflandırmada avantaj sağlayabilmektedir (Sithole ve Vosselman [46]).

Bu özellikler dikkate alınarak geliştirilen filtreleme yaklaşımları takip eden bölümde açıklanmıştır.

3.2.1.2 Filtreleme Yaklaşımları

Bir önceki bölümde verilen filtreleme karakteristikleri kullanılarak geliştirilen filtreleme yaklaşımları (Tóvári ve Pfeifer [114]; Pfeifer ve Mandlburger [23]);

- Morfolojik filtreler,
- Artan filtreler,
- Yüzey tabanlı filtreler,
- Segmentasyon tabanlı filtreler

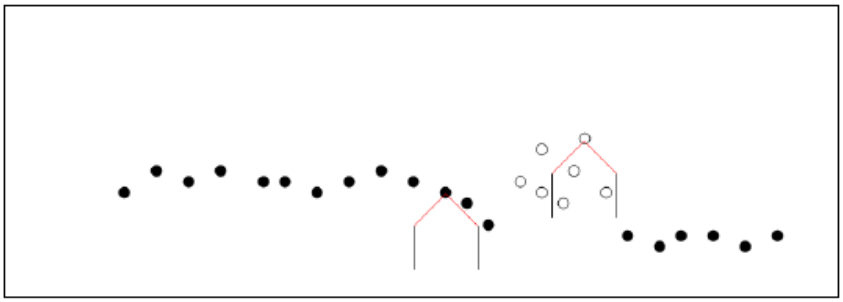
olmak üzere dört grupta toplanmaktadır. Bu yaklaşımların çoğu, noktanın araziye ait olup olmadığını belirlemek için komşu noktalar arasındaki geometrik ilişkiyi kullanmaktadır.

Morfolojik Filtreler

Filtreleme yaklaşımlarının ilk grubu olan morfolojik filtreler adını matematiksel morfoloji (Haralick and Shapiro, 1992)' den almıştır (Tóvári ve Pfeifer [114]). Aynı zamanda eğim tabanlı (sloped based) filtre olarak bilinirler. Eşitlik (3.1)' de verilen yatay mesafe (d) ve yükseklik farkına dayanırlar (He [24]).

$$d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad (3.1)$$

Morfolojik filtrelemede, yatay mesafede kabul edilebilir yükseklik farkını tanımlayan bir yapı elemanı ($\Delta h_{max}(d)$) kullanılır (Tóvári ve Pfeifer [114]). Matematiksel morfolojide erozyon işlemi de, yatay mesafenin bir fonksiyonu olan bu yapı elemanını oluşturmak için kullanılır (He [24]). Filtreleme sırasında, yapı elemanı her aday noktaya yerleştirilir ve komşularına göre bir veya birden fazla yükseklik farkı kabul edilebilir farkın üstündeyse o nokta araziye ait olmayan nokta olarak tanımlanır (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Şekil 3.6' ya göre siyah noktalar yapı elemanının altında herhangi bir nokta olmadığı için zemin noktası olarak sınıflandırılmış, beyaz noktalar ise yapı elemanın altında kalan noktalar olduğu için zemine ait olmayan noktalar olarak sınıflandırılmıştır (He [24]).



Şekil 3. 6 Zemin ve zemine ait olmayan noktaların yapı elemanı kullanılarak sınıflandırma sonuçları (He [24])

Yapı elemanı, araziye ait maksimum eğim (tan(ɣ)) ve lazer tarama noktalarının yükseklik hassasiyeti (σ_z) varsayımlarından bulunabilir (Eşitlik (3.2)) (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Zemin noktaları da bir küme halinde Eşitlik (3.3)' deki şekilde tanımlanabilir (Vosselman [12]). Bu eşitlikte ∀ tüm nokta setini ifade ederken, P_T zemin noktası olarak sınıflandırılan noktaları göstermektedir.

$$\Delta h_{max}(d) = \sqrt{2}\,\sigma_z + d\tan(\gamma), \quad d \leq d_{max} \quad (3.2)$$

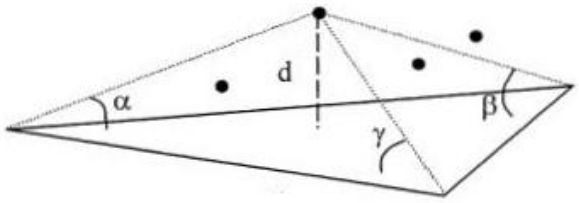
$$P_T = \{p_i \in P | \forall\, p_k \in P : z_i - z_k \leq \Delta h_{max}(d_{ik})\} \quad (3.3)$$

Morfolojik filtreler, farklı çalışmalarda farklı varyasyonlarda kullanılmıştır. Kilian vd. [118] çalışmalarında hem bitki örtüsü hem de büyük binalar gibi araziye ait olmayan değişik boyutlardaki tüm nesneleri doğru bir şekilde filtrelemek için, farklı

büyüklüklerdeki morfolojik açılım (opening) operatörü; yani farklı nesneler için farklı yapı elemanı (pencere büyüklüğü) kullanmışlardır. Zhang vd. [119] çalışmalarında, Kilian vd. [118]' nin geliştirdikleri yaklaşıma benzer olarak artan morfolojik filtre (progressive morphological filter) olarak adlandırdıkları filtreleme işleminde araçlar, bitki örtüsü, binalar gibi nesneleri zeminden ayırmak için kademeli olarak artan pencere büyüklüğü kullanmışladır. Lohmann vd. [120] geliştirdikleri çift aşamalı filtrelemede (dual rank filter), morfolojik aşınım (erosion) ve genişleme (dilatation) operatörlerinin kombinasyonunu kullanmışlardır. Sithole [121]' de belli bir eşik değere göre yapılan filtreleme yerine, daha dik eğimli bölgelerde de doğru filtreleme işlemi gerçekleştirmek amacıyla arazinin eğimine göre değişen eşik değer kullanılması uygun görülmüştür. Kobler vd. [122]' de diğer filtreleme algoritmalarının sıklıkla sorun yaşadığı dik ve ormanlık bölgelerde filtreleme işlemini doğru bir şekilde gerçekleştirmek amacıyla tekrarlı enterpolasyon (repetitive interpolation (REIN)) olarak adlandırılan bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

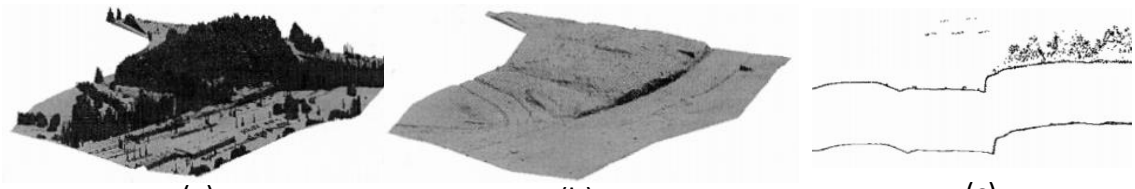
Artan Filtreler

Bu gruptaki filtreler artarak çalışırlar. İlk olarak bazı noktalar zemin noktası olarak tanımlanır ve daha sonra bu noktalara dayanarak daha fazla nokta zemin noktası olarak sınıflandırılır (Tóvári ve Pfeifer [114]). Axelsson [123] büyük bir grid hücresindeki en alçak noktayı ilk zemin noktası olarak kullanır ve var olan zemin noktalarını da referans bir yüzey oluşturmak için üçgenler (Tóvári ve Pfeifer [114]). Her üçgen için sınıflandırılmamış bir nokta belirlenir ve bu noktaya olan uzaklıklar analiz edilir. Bu uzaklıklar üçgen yüzeyi ve üçgen köşelerinden aday noktayı birleştiren kenarlar arasındaki α, β ve γ açılarıdır (Şekil 3.7) (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Eğer bir nokta eşik değerlerin altındaki uzaklıklarda bulunuyorsa zemin noktası olarak sınıflandırılır ve algoritma sonraki üçgen ile devam eder. Eğer bir üçgen içinde artık hiçbir nokta bulunmazsa, belirli bir yoğunlukta zemin noktası elde edilmişse ya da tüm kabul edilebilir noktalar yüzeye başka bir eşik değerden daha yakın ise algoritma durabilir (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Bu yöntemin kullanıldığı bir filtreleme örneği Şekil 3.8' de yer almaktadır.



Şekil 3. 7 Aday noktanın zemine ait olup olmadığının belirlenmesi aşamasında hesaplanan değerler (Axelsson [123])

Sohn ve Dowman [124] çalışmalarında benzer artan filtre yönteminden yararlanmışladır ve bu yöntemde 'böl ve al (divide-and-conquer)' üçgenleme yaklaşımını benimsemişlerdir. Başlatma ve durdurma kriterine dayanan bu yaklaşımı, aşağı doğru (downward) ve yukarı doğru (upward) üçgenleme olarak adlandırılan iki aşamada gerçekleştirmişlerdir. Belirlenen eşik değere göre, aşağı doğru üçgenleme aşamasında, mevcut üçgenlemenin altındaki noktalar zemine eklenirken bunu takip eden yukarı doğru üçgenleme aşamasında her üçgen üzerindeki bir ya da daha çok nokta zemine eklenmektedir.



(a) (b) (c)

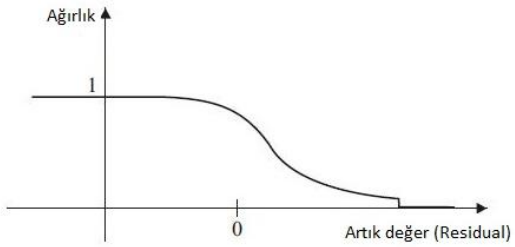
Şekil 3. 8 Artan filtre kullanılarak filtrelenmiş yüzey; orjinal veri (a), filtrelenmiş veri (b), filtreleme öncesi ve sonrasının yandan görünümü (c) (Axelsson [123])

Yüzey Tabanlı Filtreler

Artan filtreler yüzeyi yeniden inşa ederken, yüzey tabanlı filtreler ilk olarak bütün noktaları arazi yüzeyine ait kabul eder, daha sonra arazi yüzeyine uymayan noktaları silerler. Bu nedenle, l iterasyon tekrarı olmak üzere, genel bir yüzey modeli s_l (x, y)' den iteratif bir yaklaşım ile arazi yüzeyi SAM (x, y) yeniden inşa edilir (Pfeifer ve Mandlburger [23]).

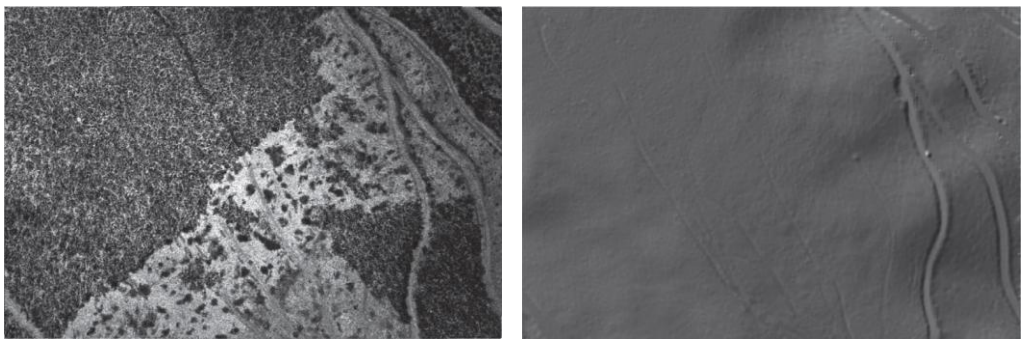
'Robust enterpolasyon' olarak bilinen bu yaklaşımda (Kraus ve Preifer [125]) doğrusal en küçük kareler enterpolasyonu yüzeyi tanımlamak için kullanılmıştır (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Araziyi oluşturmanın yanı sıra arazi noktalarının sınıflandırılması hiyerarşik bir yöntemle yapılır. Her bir tekrarda robust enterpolasyon ile yüzey tekrar

oluşturulur. Arazinin kaba yaklaşımı, ilk olarak tüm noktalar kullanılarak hesaplanır. Daha sonra noktaların bu yaklaşık yüzeye düşey mesafesi (artıklar) tüm noktalara ağırlık atamak için bir ağırlık fonksiyonunda (Şekil 3.9) kullanılır. Yüzeyin üzerindeki noktalara düşük ağırlık, altındaki noktalara yüksek ağırlık verilir. Yüzey bireysel ağırlıklar dikkate alınarak yeniden hesaplanır. Böylece yeniden oluşturulan yüzey alçak noktalara çekilir (Sithole [9]).



Şekil 3. 9 Ağırlık fonksiyonu (Sithole [9])

Yineleme işlemi, iterasyonlar belirlenen bir sayıya ulaşana kadar ya da hesaplanan yüzey, iterasyonlar arasında önemli ölçüde değişmeden kalana kadar tekrarlanır. Yinelemenin tamamlanması üzerine bir nokta, yüksekliğine göre yüzeyin üzerinde ya da altında olarak belirlenir (Sithole [9]). Robust enterpolasyon yöntemi ile gerçekleştirilen bir filtreleme örneği Şekil 3.10' da verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3. 10 Yoğunluğa göre renklendirilmiş orjinal veri (a), yüzey tabanlı filtreleme ile elde edilmiş SAM (b) (Pfeifer ve Mandlburger [23])

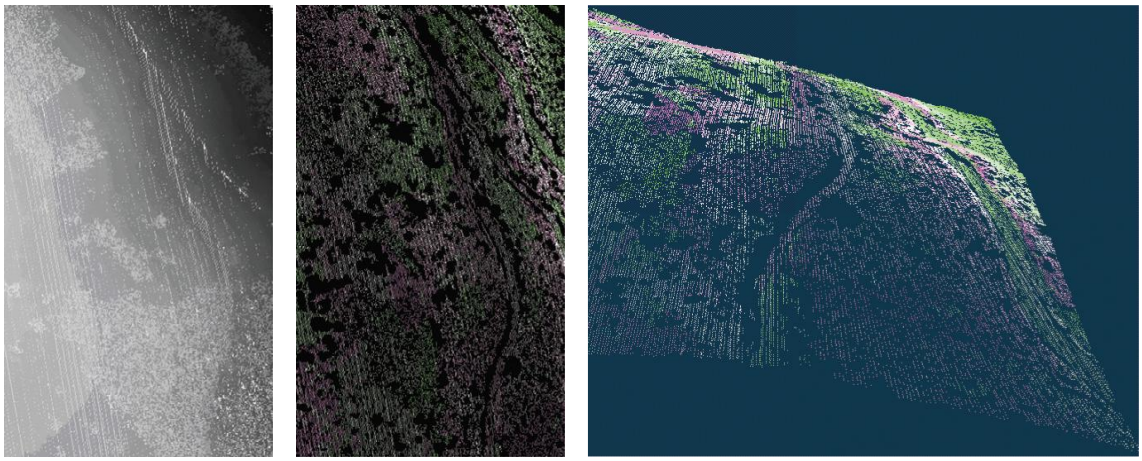
Yüzey tabanlı filtreleme yaklaşımı, SAM üretimi için birçok çalışmada kullanılmıştır. Pfeifer vd. [126]' da veri piramitleri kullanarak hiyerarşik bir düzendeki iteratif robust enterpolasyon yöntemi ile lazer tarama verilerinin filtreleme ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu kabadan inceye giden yaklaşımın, yöntemin sağlamlığını

güçlendirdiği ve hızlandırdığı için avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Elmqvist [127] lazer nokta bulutu verilerinden zeminin tahmini için, kıvrım yaklaşımını kullanan (snake-approach) bir aktif alan modeli (active shape model) geliştirmiştir. Bu algoritmada aktif alan modelini, alttan yukarı doğru itilen yapışkan kauçuk bir beze benzetmek mümkündür; bu bez sürekli yüzeyi oluşturan en düşük noktalara yapışarak zemini oluşturmaya yarar. Brovelli vd. [128] de çalışmalarında ortalama bir eğri yüzey (spline surface interpolation) enterpolasyonu sonucu elde edilen artıkların analiz edildiği benzer bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda enterpolasyondan sonra yüzey nesnelerinin kenarları çıkarılır ve bu nesneler silinir. Zemin olarak kalan noktalar üzerinden tekrar enterpolasyon gerçekleştirilir ve belirlenen iki eşik değere göre zemine ait olmayan noktalar silinir.

Segmentasyon Tabanlı Filtreler

Filtreleme yaklaşımlarının dördüncü grubu olan segmentasyon tabanlı filtreler segmentler üzerinde çalışırlar (Tóvári ve Pfeifer [114]). Segmentasyon tabanlı filtreler iki adımdan oluşur; ilk adımda segmentasyon algoritmaları kullanılarak kümeleme işlemi gerçekleştirilir, ikinci adımda ise oluşturulan segmentlere dayanarak filtreleme yapılır. Aynı segmentteki her nokta aynı sınıfa ait olmalıdır (He [24]).

Segmentasyon yöntemi nokta bulutundaki noktalardan daha fazla bilgi elde etmek için ortaya çıkmıştır. Bu algoritmaların arkasındaki mantık, noktaları sınıflandırmak için bağlamsal ve geometrik bilgileri kullanmaktır (He [24]). Segmentasyon, bölge büyütme (region-growing) teknikleri kullanılarak doğrudan nesne uzayında uygulanabilir. Genellikle, normal vektör veya bu vektörün değişimi verinin homojenliğini belirlemek için kullanılır. Alternatif olarak, homojenlik yükseklik veya sadece yükseklik değişimine göre de belirlenebilir. Bölge büyütme tekniklerinin aksine segmentasyon, ayrıca özellik uzayında da uygulanabilir. Bu durumda, kümelerin özellik uzayında belirlenmesinden önce özelliklerin varyasyonlarının bilinmesi avantajdır (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Şekil 3.11’ de bir segmentasyon tabanlı filtreleme örneği gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 3. 11 Orjinal nokta bulutu (a), segmentlerin aynı renkte olduğu ve sadece büyük segmentlerin gösterildiği segmentasyon sonucu (b), (b)'nin perspektif görünümü (c) (Pfeifer ve Mandlburger [23])

Birçok segmentasyon tabanlı uygulama grid yapıya dönüştürülmüş veri gerektirmektir ve segmentasyon yöntemlerinin çoğu görüntü işleme yaklaşımlarından uyarlanmıştır. Genellikle bu filtreleme yöntemleri tekil nokta ya da piksel yerine daha büyük varlıklar üzerinde çalıştıklarından gürültüden daha az etkilenirler (Pfeifer ve Mandlburger [23]). Filtrelemenin kalitesi için segmentasyonun doğruluğu en önemli etkendir (He [24]).

Segmentasyon tabanlı filtre yaklaşımından yola çıkılarak segment tabanlı farklı filtreleme yaklaşımları da geliştirilmiştir. Nardinocchi vd. [36] çalışmalarında hiyerarşik kural tabanlı yaklaşım geliştirmişlerdir. Bölge büyütme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen segmentasyonun ardından, bu segmentlerin geometrik karakteristikleri ve topolojik ilişkilerine göre zemin ve diğer sınıfları ayırmışlardır. Jacobsen ve Lohmann [129]' da benzer şekilde hiyerarşik kural tabanlı yaklaşımı kullanan eCognition yazılımı ile segmentasyon işlemini otomatik olarak gerçekleştirmişlerdir. Üç aşamalı ve seçilebilen segmentasyon parametleri ile segmentasyon işlemi, en iyi görsel sonucu vermek için iteratif olarak uygulanmaktadır. Segmentlerin bütünlük, yükseklik farkları gibi özelliklerine göre de filtreleme ve sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Tóvári ve Pfeifer [114] nokta tabanlı ve segment tabanlı filtreleme yaklaşımlarının kombinasyonları ile yeni bir filtreleme yaklaşımı geliştirmişlerdir. İki yaklaşımın gücü birleştirilerek daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi sağlamışlardır. Bu yaklaşımda,

tahmin edilen normal vektör ve mekânsal yakınlık açısından, homojenliği belirlenen bölge büyütme tekniği ile segmentasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Hava LiDAR ile Elde Edilen Nokta Bulutunun Yollar, Binalar, Ağaçlar, Çalılık ve Ormanlık Alanı vb. Gibi Farklı Objelere Ayrılarak Sınıflandırılması

Nokta bulutunun sınıflandırılması sonucu bina, ağaç, yol, çıplak yeryüzü vb. gibi farklı sınıflar elde edilebilmektedir. LiDAR nokta bulutu verisinin sınıflandırılmasında;

- Grid tabanlı (grid-based),
- Nokta tabanlı (point-based)

olmak üzere iki farklı yöntem vardır (Kim ve Sohn [130]).

3.2.2.1 LiDAR Nokta Bulutunun Grid Tabanlı (Grid-Based) Yöntem ile Sınıflandırılması

Grid tabanlı yaklaşım, 3B lazer nokta bulutunun 2B temsili olan raster görüntüler ile işlem yapar. Bu yöntemde, ham LiDAR nokta bulutu düzenli grid ağına enterpole edilir ve her grid (piksel) ilk dönüşlerin yüksekliği, çoklu dönüş sayısı, yoğunluk, geri yansıma katsayısı, yansıyan sinyalin genişliği gibi tanımlayıcı bilgiler içerir (Kim ve Sohn [130]). Grid tabanlı sınıflandırma genellikle, kentsel alanların sınıflandırılması için çoklu lazer dönüşlerini, optik görüntülerden elde edilen multispekral bilgilerle birleştirmek için kullanılır (Yang ve Lin [131]).

Ham nokta bulutunun düzenli grid ağına örneklenmiş hali kullanılarak yapılan sınıflandırma işleminde, görüntü işleme algoritmaları doğrudan kullanılabilir. Bu tür görüntü işleme algoritmalarının sınıflandırmada kullanılması işlem hızını ciddi bir şekilde arttırır (Axelsson [10]). Ancak, farklı sınıflara ait çoklu yansımalar pikselin içinde düşey olarak dağılmasına rağmen, grid tabanlı sınıflandırmada kesin olarak bir piksel sadece bir sınıfı temsil eder (Kim ve Sohn [130]). Bu nedenle verinin önce düzenli grid ağına dönüştürülmesi hassasiyet kaybına yol açar (Axelsson [10]).

Düzenli grid ağına enterpole edilmiş verilerin kullanıldığı yaklaşımlarda sınıflandırma işlemi, segmentasyon ve sınıflandırma olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilebilir. Segmentasyon aşamasında ‘region-growing’ algoritması en yaygın kullanılan

algoritmalardan biridir. LiDAR veri sınıflandırmasında sıklıkla kullanılan sınıflandırıcılar; Random Forest (RF), AdaBoost, Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), Expectation Maximum (EM) ve Dempster-Shafer şeklinde sıralanabilir (Xu vd. [30]). Bu sınıflandırıcılar bağlamsal (contextual) bilgiye bakılmaksızın sadece yerel özellikleri dikkate alırlar. Bağlamsal bilgiyi hesaba katan popüler sınıflandırıcılar ise, Markov Random Field (MRF) ve Conditional Random Field (CRF) sınıflandırıcılarıdır (Xu vd. [30]).

Bu çalışma, ham nokta bulutu verisinin sınıflandırılmasına yönelik olduğu için LiDAR verisinin görüntüye çevirilip sınıflandırılmasına çok detaylı değinilmemiştir. Görüntü işleme algoritmalarının doğrudan kullanıldığı bu sınıflandırmaya ilişkin detaylı bilgiler Uzar Dinlemek [29]' da bulunabilir.

3.2.2.2 LiDAR Nokta Bulutunun Nokta Tabanlı (Point-Based) Yöntem ile Sınıflandırılması

Grid tabanlı sınıflandırmanın aksine, nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi her tekil lazer noktası için bir nesne sınıfı belirlemeyi amaçlar. Bu, 3B bireysel lazer noktalarının karşılık geldikleri nesne sınıfına atanması için detaylı incelenmesini gerektirir. Nokta tabanlı yaklaşımın en büyük yararı, hesaplama maliyetinin pahalı olmasına rağmen, her yayılan lazer sinyalinin geri yansıyan çoklu dönüşlerinin, sinyallerin çarptığı materyale göre ait oldukları farklı sınıflara atanabilmesidir (Kim ve Sohn [130]).

LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için nokta tabanlı farklı sınıflandırıcılar (SVM, RF vb.) mevcuttur. Bu sınıflandırıcılar, 3B LiDAR nokta bulutundan hesaplanan farklı özelliklere dayanmaktadır (Chehata vd. [132]; Kim ve Sohn [133]; Mallet vd. [39]; Kim ve Sohn [130]). Sınıflandırma için, hedeflenen sınıflara göre dikkate alınacak özellikler derlenir ve genellikle eğitim aşamaları sonucunda sınıflandırma işleminde kullanılacak özelliklerin uygun parametreleri belirlenir.

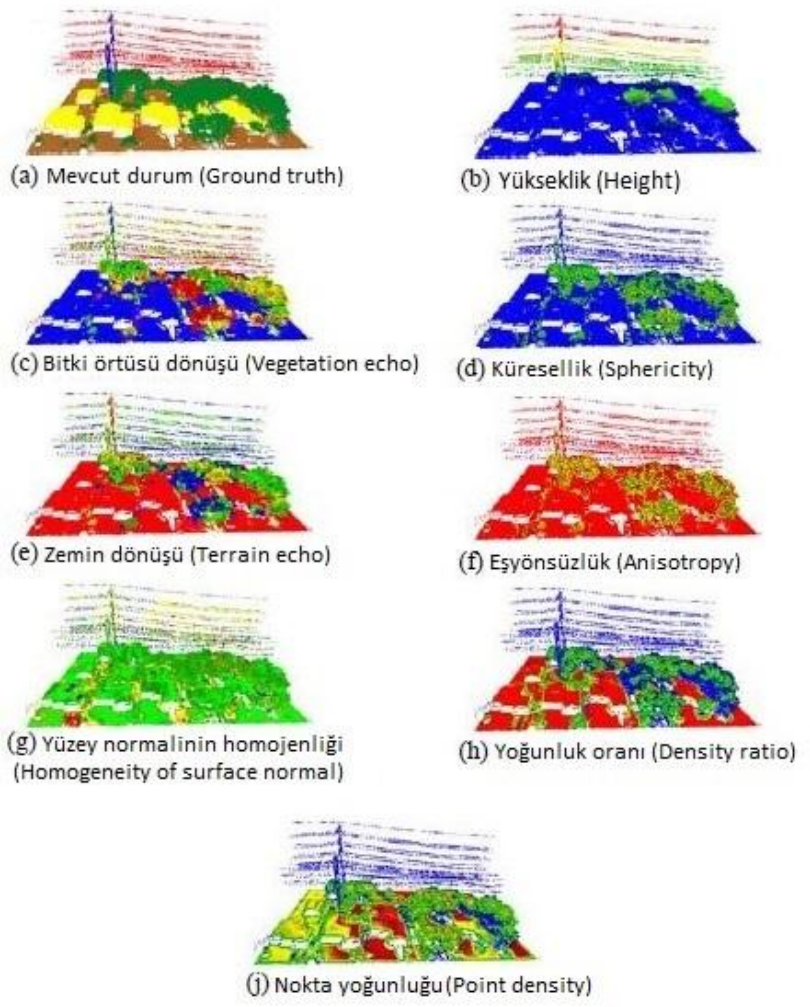
Sınıflandırma algoritmalarının temelini oluşturan özellikler (Mallet vd. [39]);

- Geometrik özellikler (Nokta yüksekliği veya nokta komşuluğunun geometrik tanımına (özdeğer veya yüzey özellikleri) dayanan mekânsal faktörler vb.),
- Dönüş (echo) tabanlı özellikler (Dönüş sayısı vb.),

- Dalga formuna dayanan faktörler (Tam dalga boyu kaydeden LiDAR özellikleri)

olarak gruplandırılabilirler. Bu özelliklerden dalga formuna dayanan (waveform-based) faktörler sadece tam dalga boyu kaydeden LiDAR sistemlere özgü iken, geometrik özellikler (spatial-based) ve dönüş tabanlı (echo-based) faktörler geleneksel çoklu dönüş kaydeden sistem verilerinden hesaplanabilirler (Mallet vd. [39]).

Mevcut durum; bu bölümde detaylı olarak açıklanacak geometrik özelliklerden yükseklik, küresellik (sphericity), eşyönsüzlük (anisotropy), yüzey normalinin homojenliği ve yine bu bölümde detaylı bir şekilde değinilecek olan dönüş tabanlı özelliklerden bitki örtüsü dönüşü, zemin dönüşü, yoğunluk oranı, nokta yoğunluğu gibi nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımlarına temel olan bazı özelliklerin renklendirilmiş haritaları Şekil 3.12' de yer almaktadır.



Şekil 3. 12 Mevcut durum ve 8 önemli özellik (Mavi: Alçak ve Kırmızı: Yüksek) (Kim ve Sohn [130])

Geometrik Özellikler

- **Yerel çevre (The local environment):** Her 3B nokta P için, volumetrik yaklaşımlar kullanılarak mekânsal özellikler hesaplanır. 3B belirli bir V komşuluğundaki LiDAR noktaları, mevcut LiDAR noktası P' ye ek olarak kullanılır. V burada çevre (environment) olarak isimlendirilir ve P'nin orta nokta olduğu bir küre (sphere, Vs) ya da düşey bir silindir (vertical cylinder, Vc) olabilir. Vc düşey pozisyonda 3B çevre içindeki tüm noktaları içerir. Bu iki çevre için yarıçap (r) temel bir parametredir ve veri setinin nokta yoğunluğuna göre deneysel olarak r = 1.25 m olarak belirlenmiştir (Mallet vd. [39]).

- **Yükseklik (Height features):** Δz, Δzfl ve σz şeklinde üç özellik tanımlanmıştır. Δz, LiDAR noktası ve yarıçapı deneysel olarak 20 m belirlenen geniş bir silindir içindeki en alçak nokta arasındaki yükseklik farkı; Δzfl, çoklu dönüşlerde ilk (first) ve son (last) dönüş arasındaki yükseklik farkı ve σz, Vc içindeki 3B noktanın yükseklik değişimidir (Mallet vd. [39]).

- **Zemin seviyesinden yükseklik (Hight from ground level):** Yükseklik, belli bir noktadan daha önceden tanımlanan arazi yüzeyine olan düşey uzaklıktır (Şekil 3.12b). Eğer zemin, sınıflandırılması gerekli olan hedef sınıflardan biri ise sonraki sınıflandırmalar için yükselik en önemli özellik olacaktır (Kim ve Sohn [133]). Örneğin, binaları, bitki örtüsü ya da elektrik direği gibi diğer sınıflardan ayırmak için yükseklik faydalı bir sınıflandırma değişkeni olarak dikkate alınabilir (Kim ve Sohn [130]).

- **Özdeğer (Eigenvalue):** Yerel komşuluk (V) içinde varyans - kovaryans matrisi hesaplanır ve bu matristen hesaplanan özdeğerler (λ1 > λ2 > λ3) sınıflandırmada ayırıcı özellik olarak kullanılırlar. Özdeğerler sağladıkları ek özelliklerin yanında düzlemleri, kenarları, köşeleri, çizgileri ve hacimleri ayırmada da kullanılırlar. Bu özellikler 3B noktaların mekansal yerel dağılımlarını gösterirler. Özdeğerler kullanılarak eşyönsüzlük (anisotropy) (Eşitlik 3.4), düzlemsellik (planarity) (Eşitlik 3.5), küresellik (sphericity) (Eşitlik 3.6) ve doğrusallık (linearity) (Eşitlik 3.7) özellikleri hesaplanabilir (Chehata vd. [132]).

$$A_\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad (3.4)$$

$$P_\lambda = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad (3.5)$$

$$S_\lambda = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \quad (3.6)$$

$$L_\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} \quad (3.7)$$

Eşyönsüzlük, üç keyfi dik eksendeki nokta dağılımının homojenliğini ifade eder ve bitki örtüsü dışındaki eşyönsüz yapıların ayrılmasında kullanılır (Şekil 3.12f). Düzlemsellik, özelliği zemin ve bina çatıları gibi düzlemsel yapıların çıkarılmasında kullanılabilir. Küresellik, noktaların tüm üç eksende eşit olarak dağılımının büyüklüğünü gösterir (Şekil 3.12d). Buna göre, bitki örtüsü en güçlü dağılıma sahip olabilir. Son olarak doğrusallık da doğrusal yapıların belirlenmesine yardımcı olur (Kim ve Sohn [133]).

λ3 düzlemsel objeler için düşük değere, düzlemsel olmayan objeler için yüksek değere sahiptir. Düzlemsellik özelliği, özellikle düzlemsel objeler için yüksek değere sahipken, aksine küresellik özelliği 3B komşulukta enyönlü dağılım için yüksek değere sahiptir (Chehata vd. [132]).

- **Yerel düzlem özellikleri (Local plane features):** Yerel düzlem özellikleri, bir 3B yerel düzleme göre noktaların saçılması ile ilgilidir. Böyle bir yüzey, L1.2 (Xu ve Zhang [134]) standardında sağlam bir M-tahminleyicisi tarafından Vs' nin içerdiği 3B noktalar kullanılarak hesaplanır. Düşey doğrultudan sapma açısı zemini ($N_z \cong 0$) binadan ($N_z \in [-45°, +45°]$) ayırmak için yararlıdır. Geçerli nokta P' nin etrafındaki yükseklik saçılmasını arttırmak için σnz ve Rz özellikleri önemli ipuçlarıdır. Burada verilen Nz düşey doğrultudan normal vektörün saçma açısı; σnz, Vs içerisindeki her nokta için hesaplanan sapma açısının varyansı ve Rz de yerel düzlemin artıklarıdır (Mallet vd. [39]).
- **Yüzey tabanlı (Surface - based):** Düzlem tabanlı özellikler, verilen bir segmentin üye noktalarından üretilen tahmini düzlem ya da TIN model tarafından ölçülürler. Bu özellikler yüzey eğimi, yüzey pürüzlüğü ve yüzey normalinin homojenliği ile ilişkilendirilirler (Kim ve Sohn [133]).

Düzlem eğimi (plane slope), tahmini bir düzlem ve z doğrultusu arasındaki açı farkıdır. Rastgele değerler alan bitki örtüsü ile kıyaslandığında, bina çatıları ve zemin genellikle zayıf değerler alırlar. Düzlem pürüzlülüğü (surface roughness), noktalardan tahmini bir yüzeye olan ortogonal mesafenin karesel ortalamasıdır. Bitki örtüsü sınıfı nokta dağılımından dolayı ön plana çıkacaktır. Yüzey üçgenlerinin normal vektörleri arasındaki değişim, yüzey normalinin homojenliğini (homogenity of surface normal) ifade eder (Şekil 3.12g). Bitki örtüsü bu değişimde çok yüksek değer alır. Yüzeye olan mesafe özelliği de yüzey pürüzlülüğü özelliğine benzerdir ancak bireysel nokta ile tahmini yüzey arasındaki düşey mesafedir (Kim ve Sohn [133]).

- **Dış bükey kabuk tabanlı (Convex hull - based):** Bu özellik, XY izdüşüm alanı (XY projection area) ve sınırlayıcı hacim (bounding volume) olmak üzere iki değişken içerir. XY izdüşüm alanı için, üye noktalar XY düzlemine izdüşürülür ve iki boyutlu noktaların dışbükey kabuğu bu noktaların sınırını çizmek için uygulanır. Zemin ve bina çatıları alanın büyük bir değerine sahip olabilirken elektrik hatları neredeyse sıfır değerini alır. Sınırlayıcı hacim özelliğinde ise, üye noktaların 3 boyutlu dış bükey kabuğu hesaplanırken, noktalar tarafından polihedran şeklindeki sınırlayıcı hacim tahmin edilebilir. XY izdüşüm alanının tersine, sadece bitki örtüsü sınıfı için sınırlayıcı hacim değeri güçlü olabilir (Kim ve Sohn [133]).
- **Düşey profil (Vertical profile):** Ağaçlar, sokak lambaları, elektrik hattı kuleleri gibi yapılar düşey süreklilik gösterirler. Bu yapıların çıkarımı için düşey profil 75 cm yüksekliğindeki çeşitli kutular tarafından parçalara ayrılır (Kim ve Sohn [133]).

Dönüş (Echo) Tabanlı Özellikler

Dönüş özellikleri, bitki örtüsü gibi lazer sinyallerinin çoklu yansımalarına sebep olan yüzeylerden dönen sinyaller kullanılarak belirlenir. Dönüş tabanlı özellikler, tekli dönen (single return (N_s)), ilk dönen (first return (N_f)), ortada dönen (intermediate return (N_i)) ve son dönen (last return (N_l)) noktaların farklı birleşimleri ile oluşturulurlar. Bu özellikler belirlenirken kullanılan N_{pt} değeri de tüm sınıflandırılmamış (üye) noktaları ifade etmektedir (Kim ve Sohn [133]).

LiDAR nokta bulutunun çoklu dönüşlerinde genellikle tekli dönüş ve son olarak kaydedilen noktalar zemin noktalarıdır. Bu nedenle, bu iki dönüş zemin dönüşü olarak ifade edilir (Eşitlik 3.8) (Şekil 3.12e) (Kim ve Sohn [133]).

$$\text{Zemin dönüşü} = \frac{N_s + N_l}{N_{pt}} \tag{3.8}$$

Genellikle yapraklarından olan çoklu dönüşlerden dolayı orta dönüşlerin önemli kısmı bitki örtüsü noktalarına aittir (Şekil 3.12c). Buna ek olarak, ilk dönüşler de bitki örtüsünün taç kısımlarından olabilir. Sonuç olarak, bitki örtüsü sınıfı çoğunlukla ilk ve orta dönüş noktalarını içerir (Eşitlik 3.9) (Kim ve Sohn [133]).

$$\text{Bitki örtüsü dönüşü} = \frac{N_f + N_i}{N_{pt}} \tag{3.9}$$

Elektrik hatları, etrafı herhangi bir doğal ya da yapay engeller ile çevrili olmayan bölgelere inşa edilmelidirler. LiDAR' ın ayak izi de elektrik hatlarının yarıçaplarından çok daha büyük olacağından elektirik hattı bulunan bölgelerde çoklu yansımalar söz konusudur. Bu nedenle genellikle elektrik hatları tekli dönen noktalardan değil de ilk dönen noktalardan oluşurlar (Eşitlik 3.10) (Kim ve Sohn [133]).

$$\text{Elektirik hattı dönüşü} = \frac{N_i}{N_{pt}} \tag{3.10}$$

Bir lazer sinyali kesinlikle somut materyallerden yapılmış bina çatılarından nufüz edemez. Yani binalardan çatılardan olan yansımalar dışında başka hiçbir yansıma olmaz. Bina dönüşü sadece tekli dönüş olarak ifade edilir (Eşitlik 3.11) (Kim ve Sohn [133]).

$$\text{Bina dönüşü} = \frac{N_s}{N_{pt}} \tag{3.11}$$

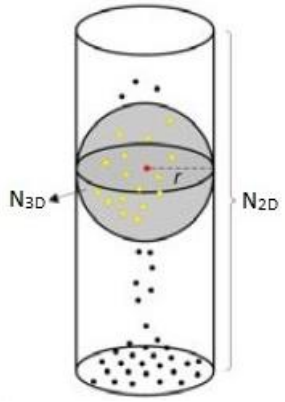
- **Yoğunluk tabanlı (Density-based):** Bir yüzeyden yansıyan LiDAR nokta sayısı, lazerin yüzeye nüfuz etme derecesini belirleyen sinyalin çarptığı yüzeyin karakteristik özelliğine göre değişiklik gösterir. Buna göre, nokta yoğunluğu (point density (PD)) ve yoğunluk oranı (Density Ratio (DR)) tanımlanan iki yoğunluk tabanlı sınıflandırma özelliğidir (Kim ve Sohn [130]).

  Nokta yoğunluğu, belirli bir segmentteki nokta sayısının, segmentin hacmine bölünmesiyle elde edilir (Şekil 3.12j). Genellikle, bu değer zemin ve bina çatısı için

en büyük, bitki örtüsü için ise elektrik hatlarından daha büyüktür (Kim ve Sohn [133]).

Yoğunluk oranı, r yarıçaplı bir silindirden izdüşürülen bir daire ve yarıçapı r olan bir küre arasındaki orandır (Eşitlik 3.12) (Şekil 3.12h). Bu değerin nokta tabanlı hesaplanmasına ilişkin değerler Şekil 3.13' de görülmektedir (Kim ve Sohn [133]).

$$\mathrm{DR}_{3D/2D} = \frac{N_{3D}}{N_{2D}} \times \frac{3}{4r} \tag{3.12}$$



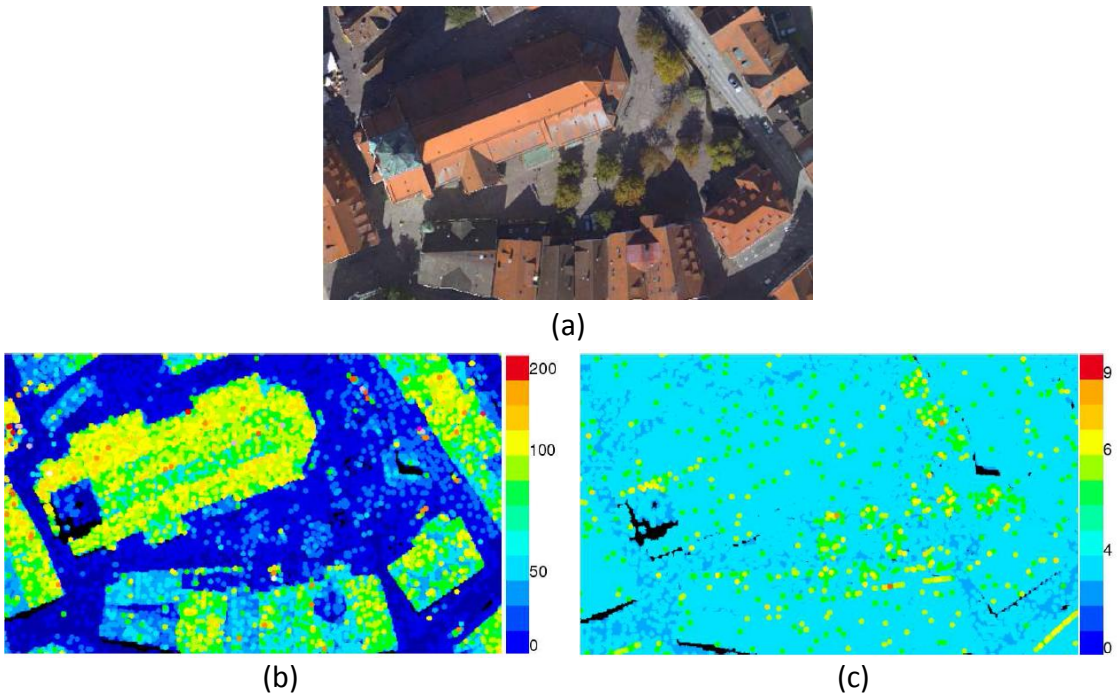
Şekil 3. 13 Yoğunluk oranının nokta tabanlı hesaplanması (Kim ve Sohn [133])

Tam Dalga Boyu Kaydeden (Full-waveform) LiDAR Özellikleri

Tam dalga boyu kaydeden LiDAR sistemlerine özgü olan özellikler, dönüş genliği (echo amplitude), dönüş genişliği (echo width), tepenin yerel olarak nasıl yayıldığını tanımlayan dönüş şekli (echo shape) ve çok veya az tepe enerjine karşılık gelen dönüş enine kesiti (echo cross-section) olarak tanımlanabilir (Chehata vd. [132]). Şekil 3.14' de 0.25 m çözünürlüklü bir ortogörüntü ve bu ortogörüntüdeki bölgeye ait dönüş genliği ve dönüş genişliği görülmektedir.

Yüksek dönüş genliği (A), bina çatıları, çakıl ve arabalar üzerinde bulunabilir (Şekil 3.14b). En düşük değerler ise yüksek hedef heterojenliği ve etkinin azalmasından dolayı bitki örtüsünde bulunur. Yüksek dönüş genişliği (ω) için yüksek değerler LiDAR sinyalini dağıttığı için bitki örtüsü yansımalarında, düşük genişlik ise bina ve zemin yansımalarında olur (Şekil 3.14c). Fakat bu değer çatı eğimi ile artabilir. En düşük dönüş şekli (α) bina çatıları ve en yüksek şekil de bitki örtüsüne karşılık gelir. Dönüşün enine kesiti (σ), σ = A x ω şeklindedir. Bu değer, bir obje tarafından yansıyan dalgayı

tanımlamak için temel niceliktir ve binalar için yüksek, bitki örtüsü için orta, yapay zemin için düşüktür (Chehata vd. [132]).



(a) (b) (c)

Şekil 3. 14 0.25 m çözünürlüklü ortogörüntü (a) ve sınıflandırmaya yardımcı bazı LİDAR özellikleri; dönüş genliği (b), dönüş genişliği (c) (Chehata vd. [132])

Bu çalışmada gerçekleştirilen sınıflandırma uygulamasında tam dalga boyu kaydeden LiDAR özelliklerinden yararlanılmadığından bu konuda çok detaylı bilgi verilmemiştir. Daha detaylı bilgiler Mallet vd. [39]' da yer almaktadır.

Bu bölümü takip eden bölümde, buraya kadar açıklanan özellikler kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma yaklaşımlarının doğruluk analizi yöntemlerine değinilecektir.

3.3 Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi bilgi çıkarımının vazgeçilmez bir parçasıdır (Navulur [99]). Sınıflandırmada doğruluk kavramı, dokuların gerçekten ait oldukları kategorilere atanmasını ifade ederken, yanlış sınıflara atanması sınıflandırma hatasını gösterir. Doğruluk analizi ile sınıflandırma işleminin doğruluğu arttırılabilir, uygun sınıflandırma algoritması seçilebilir ve sınıflandırılmış tematik bilginin veri olduğu işlemlerin hataları için sınır değerler belirlenebilir (Sunar ve Özkan [103]).

Uzaktan algılanmış verilerin kalitesini değerlendirmek için kullanılan en yaygın yaklaşım doğruluğun istatistiksel ölçümüdür (O'Neil-Dunne vd. [135]). Doğruluk değerlendirmesi için kullanılan bazı yöntemler (Navulur [99]);

- Hata matrisi (error (confusion) matrix),
- İçerme hatası (error of comission),
- Dâhil etmeme hatası (error of omission),
- Üretici doğruluğu (producer's accuracy),
- Kullanıcı doğruluğu (consumer's (user's) accuracy),
- Genel doğruluk (overall accuracy),
- Kappa katsayısı (Kappa coefficient)

şeklinde sıralanabilir. Bunların yanında, genellikle amacın nesne ve arka planı arasındaki farkı belirlemek olan otomatik nesne çıkarımında (Rutzinger vd. [136]);

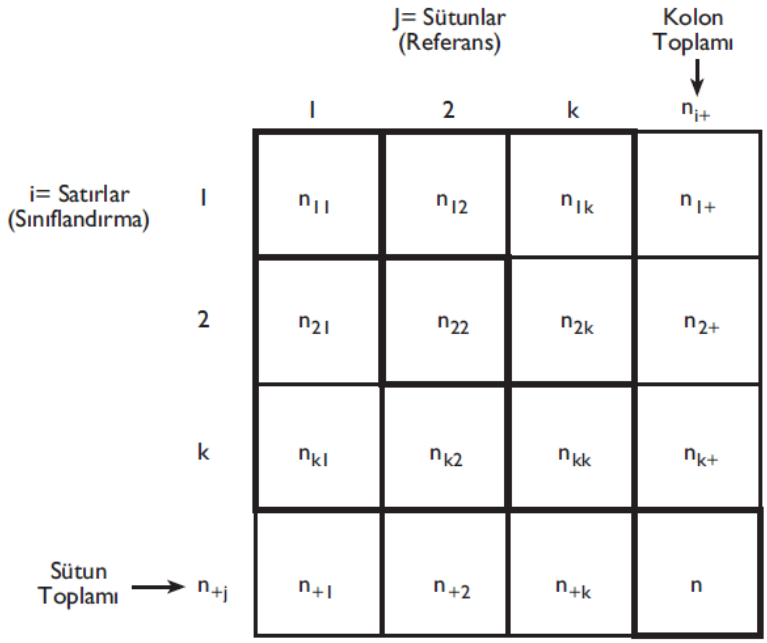
- Bütünlük (completeness),
- Doğruluk (correctness),
- Kalite (quality) (bütünlük ve doğruluğun performanslarının birleşiminden hesaplanan)

olmak üzere doğruluk değerlendirmesi için üç yöntem daha mevcuttur. Doğruluk analizi için kullanılan bu yöntemler bir sonraki '3.3.1 Hata Matrisi ve Hata Matrisinden Türetilen Doğruluk Değerlendiricileri' başlığı altında açıklanmıştır.

3.3.1 Hata Matrisi ve Hata Matrisinden Türetilen Doğruluk Değerlendiricileri

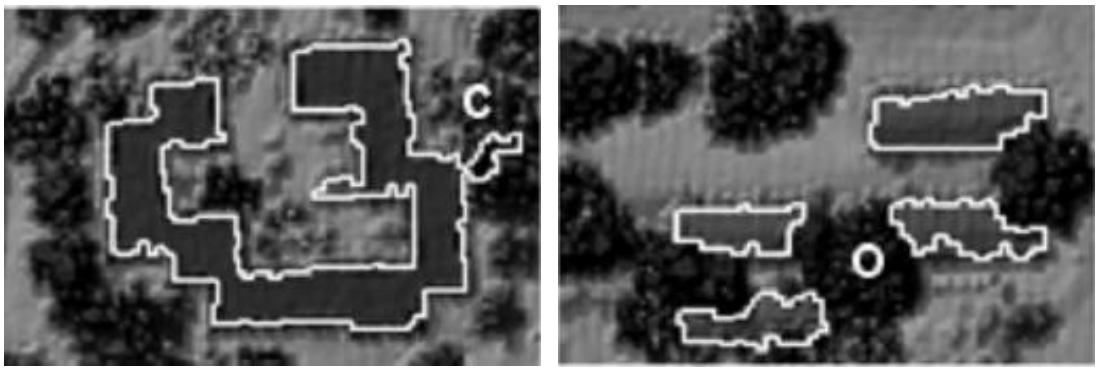
Nicel doğruluk değerlendirmesinin temel unsuru bir hata matrisinin oluşturulmasıdır (Congalton [137]). Hata matrisi, sınıflandırma sonucunda elde edilen değerler ile referans verinin değerlerini (tahmin edilen veriler ile gerçek veriler) içeren matristir. Matris, referans veri ile gösterildiği gibi gerçek sınıfa göre, belli bir sınıfa atanan örneklemlerin (pikseller, piksel kümeleri ya da poligonlar gibi) sayısını ifade eden, satır ve sütunlar halinde düzenlenen numaraların kare bir dizisidir (Colgalton [137]).

Sütunlar genellikle doğru olarak kabul edilen referans veriyi gösterirken, satırlar uzaktan algılanmış verilerden elde edilen sınıflandırmayı gösterirler (Congalton ve Green [138]). Toplam k tane sınıf için hata matrisi k satır ve k sütundan oluşur (Şekil 3.15). Hata matrisi her sınıfın ayrı ayrı doğruluğunu, sınıflandırmada mevcut olan içerme ve dâhil etmeme hataları ile doğrudan gösterdiğinden harita doğruluğunun gösterimi için çok etkili bir yoldur (Congalton ve Green [138]).



Şekil 3. 15 Hata matrisinin matematiksel gösterimi (Congelton ve Green [138])

İçerme hatası, bir sınıf içinde ayırt etme yeteneğinin bir ölçüsüdür ve sınıflandırıcı diğer sınıflar tarafından aranan pikselleri yanlış sınıfa atadığında ortaya çıkmaktadır (Navulur [99]). Dâhil etmeme hatası, algılayıcı bir sensör ya da sınıflandırıcı tarafından zemindeki bir sınıf başka bir sınıf olarak tanımlandığında sınıf ayrımı ve sonuçları ölçer (Navulur [99]). Şekil 3.16' da sırasıyla, artan bölge (region-growing) bina segmentasyon algoritması sonucu ortaya çıkan içerme ve dâhil etmeme hataları gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 3. 16 Bina parçası olarak yanlış sınıflandırılmış düz ağaç tepesi (a), çatılar kısmen ağaç ile kaplı olduğundan eksik çıkarılan bina köşeleri (b) (Zhang vd. [8])

Hata matrisi içerme ve dâhil etmeme hatalarını açıkça göstermenin yanında üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk gibi diğer hata ölçümlerinin hesaplanmasında da kullanılabilir (Story ve Congalton [139]).

Genel doğruluk, hata matrisinde toplam doğrunun (ana köşegen toplamının) tüm örneklem sayısına bölünmesi ile hesaplanır (Navulur, [99]). Bu değer en sık başvurulan ve muhtemelen en çok bilinen doğruluk değerlendirme istatistiğidir (Congalton ve Green [138]). Kullanımı kolay ve pratik olmasına karşın genel doğruluk ölçütü her bir sınıf için sınıflandırma performansı hakkında bilgi vermez. Bir sınıf için yüksek olan doğruluk diğer sınıfların kötü performansını maskeleyebilir. Bundan dolayı genel doğruluk istatistiksel anlamda yanlı bir ölçüttür. Bu durumdan kaçınmak için hata matrisinden her bir sınıfın üretici ve kullanıcı doğruluk ölçütleri hesaplanabilir (Sunar ve Özkan [103]).

Üretici doğruluğu, bir sınıfa ait doğru sınıflandırılan piksel sayısının bir sınıftaki olması gereken gerçek piksel sayısına oranlanması ile bulunur. Kullanıcı doğruluğu ise, bir sınıfa ait doğru sınıflandırılan piksel sayısının o sınıftaki toplam piksel sayısına oranı ile bulunur. Üretici doğruluğu sınıflandırma yönteminin başarısını ölçerken, kullanıcı doğruluğu üretilen tematik bilgiye olan güveni ölçer (Sunar ve Özkan [103]).

Hata matrisinin matematiksel modeline göre; eşitlik (3.13) sınıflandırma sonucu i sınıfına atanmış örneklemlerin sayısını; eşitlik (3.14) ise referans veride j sınıfında bulunan örneklemlerinin sayısını ifade etmektedir. Buna göre üretici, kullanıcı ve genel

doğruluklar sırasıyla eşitlik (3.15), (3.16) ve (3.17)' deki şekilde hesaplanabilir (Congalton ve Green [138]).

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^{k} n_{ij} \tag{3.13}$$

$$n_{+j} = \sum_{i=1}^{k} n_{ij} \tag{3.14}$$

$$j = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \tag{3.15}$$

$$i = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \tag{3.16}$$

$$\text{Genel doğruluk} = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_{ii}}{n} \tag{3.17}$$

Kappa katsayısı, değerlendiriciler arası anlaşmanın bir ölçüsüdür (Navulur [99]). Hata matrisinin satır ve sütun toplamları ile köşegeni üzerindeki elemanlar kullanılarak hesaplanır (Eşitlik 3.18). Kappa değerleri +1 ile -1 arasında değişir. Ancak, sınıflandırılmış veri ile referans veri arasında pozitif korelasyon olması gerektiğinden, pozitif Kappa değerleri beklenir (Congalton [137]). Çizelge 3.1' de kappa katsayısının doğruluk analizi için genel yorum kuralları görülmektedir (Navulur [99]).

$$\kappa = \frac{n \sum_{i=1}^{k} n_{ii} - \sum_{i=1}^{k} (n_{i+} \cdot n_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^{k} (n_{i+} \cdot n_{+i})} \tag{3.18}$$

Çizelge 3. 1 Kappa değerinin yorumu

KAPPA DEĞERİ	**YORUM**
0.00' ın altı	Zayıf
0.00 - 0.20	Hafif
0.21 – 0.40	Makul
0.41 – 0.60	Ilımlı
0.61 – 0.80	Tatmin edici
0.81 – 1.00	Neredeyse mükemmel

Bütünlük ve doğruluk değerlendiricileri sırasıyla üretici ve kullanıcı doğruluğu olarak da ifade edilebilir (Rutzinger vd. [136]). Bu değerlendiriciler üretici ve kullanıcı doğruluğu

ile aynı sonucu verirken, farklı olarak hata matrisinde yer alan 'True Positive (TP)', 'True Negative (TN)', 'False Positive (FP)' ve 'False Negative (FN)' değişkenleri kullanılarak farklı şekilde hesaplanırlar. Bütünlük (Eşitlik 3.19) ve doğruluk (Eşitlik 3.20) değerlendiricilerinin hesaplanmasında kullanılan değişkenlerden TP, hem sınıflandırılan hemde referans veride nesneyi ifade eden birimdir; başka bir ifade ile her iki veride de doğru sınıflandırılan nesnelerdir. TN, hem sınıflandırılan hemde referans veride arka planı ifade eden birimdir. FP, sınıflandırılan veride nesne olan fakat referans veride nesneye karşılık gelmeyen; FN ise sınıflandırılan veride arka plan olan fakat referans veride nesneye karşılık gelen birimdir (Rutzinger vd, [136]).

$$\text{Bütünlük (Comp)} = \frac{\|\text{TP}\|}{\|\text{TP}\| + \|\text{FN}\|} \tag{3.19}$$

$$\text{Doğruluk (Corr)} = \frac{\|\text{TP}\|}{\|\text{TP}\| + \|\text{FP}\|} \tag{3.20}$$

İyi bir sınıflandırma hem yüksek bütünlük hem de yüksek doğruluğa sahip olmalıdır. Bu iki değerlendiricinin birleşik performansını gösteren kalite değeri de Eşitlik 3.21 ve Eşitlik 3.22'deki şekilde ifade edilmektedir (Rutzinger vd. [136]).

$$\text{Kalite (Ouality)} = \frac{\|\text{TP}\|}{\|\text{TP}\| + \|\text{FP}\| + \|\text{FN}\|} \tag{3.21}$$

$$\text{Kalite (Ouality)} = \frac{\text{Bütünlük x Doğruluk}}{\text{Bütünlük} + \text{Doğruluk} - \text{Bütünlük x Doğruluk}} \tag{3.22}$$

Burada açıklanan doğruluk analiz yöntemlerinin hiçbiri nokta bulutu verisinin doğruluk değerlendirmesi için tasarlanmamıştır. Fakat bu çalışmada gerçekleştirilen nokta tabanlı sınıflandırma yönteminin doğruluğunu, görsel değerlendirmenin yanında istatistiksel yöntemlerle de değerlendirebilmek için hata matrisinin nokta bulutu verisine uyarlanması planlanmıştır. Hata matrisi elemanları olarak pikseller yerine noktalar kullanılabilir. Belirlenen hata matrisine göre, üretici, kullanıcı ve genel doğruluk değerlerinin yanında, kappa katsayısı da hesaplanarak istatistiksel yöntemler ile doğruluk hakkında bilgi sahibi olunabilir.

BÖLÜM 4

NOKTA TABANLI SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ İLE LiDAR NOKTA BULUTUNUN OTOMATİK SINIFLANDIRILMASI

Bu çalışmada LiDAR nokta bulutu verisinin otomatik sınıflandırılma olanakları araştırılmıştır. Grid yapıdaki nokta bulutu verisi kullanılarak gerçekleştirilen piksel ve ya nesne tabanlı sınıflandırma yerine, gride enterpolasyon sırasında yaşanabilecek veri kayıplarını önlemek amacıyla ham nokta bulutu verisini kullanan nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi esas alınmıştır. Ham nokta bulutunun doğrudan kullanıldığı 3 boyutlu kent modeli üretimi, bina çıkarımı vb. Uygulamalarda çalışma bölgesi ve LiDAR verisinin özelliklerine bağlı olarak yaşanabilecek sorunlara (sınıf karışımı vb.) çözüm üretilmesi amacıyla, hiyerarşik kurallar bütününden oluşan otomatik nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı oluşturulmuştur. Yaklaşımı oluşturan kuralların parametrelerine ilişkin detaylı analizler gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda en iyi sınıflandırma sonucunu veren değerlerin yer aldığı fakat farklı hiyerarşiye sahip iki yaklaşım elde edilmiştir.

Bu bölümde, ilk olarak seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alan olmak üzere üç farklı özellikteki test alanlarını içeren çalışma bölgesi ve kullanılan veriler tanımlanmıştır. İkinci kısımda, Standart Yaklaşım olarak ifade edilen genel yaklaşım ve bu çalışmada oluşturulan, otomatik nokta tabanlı sınıflandırmaya olanak sağlayan Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 için işlem adımlarına ve kurallar bütününe yer verilmiştir. Sınıflandırma yaklaşımlarındaki kurallar bütününü oluşturan adımlarda yer alan her parametre için belirlenen pilot alanlarda çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu

parametrelerden özellikle kritik öneme sahip olanlar için, gerçekleştirilen testlerin detaylı analizi de bu kısımda yer almaktadır. Bunlara ek olarak, Standart Yaklaşım ve parametre testleri sonucunda belirlenen değerleri içeren Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırılan üç test alanı için sınıflandırma sonuçları gösterilmiştir. Sınıflandırma doğruluğunu belirlemek amacıyla, yine belirlenen pilot bölgelerde doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Doğruluk analizi sonuçları bu bölümün üçüncü kısmında, sınıflandırılmış veri üzerinden üretilen 3 boyutlu bina modelleri de bu bölümün son kısmı olan dördüncü kısımda yer almaktadır.

4.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veriler

Ham LiDAR nokta bulutu verisinin otomatik olarak nokta tabanlı yöntem ile sınıflandırılması için oluşturulan iki yaklaşım, farklı özelliklere sahip üç farklı test alanında uygulanmıştır. Farklı bölgelere ait test verilerinin kullanılmasındaki amaç, oluşturulan yaklaşımların farklı arazi karakteristiklerini içeren bölgelerde de kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Burada kullanılan tüm veriler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi' nden temin edilen ve 'Hava LiDAR Teknolojisiyle Sayısal Yüzey Modeli ve 3 Boyutlu Kent Modeli Projesi' kapsamında 2013 yılı Eylül ayında uçuşu gerçekleştirilen İstanbul Zekeriyaköy'e ait LiDAR verileridir. Nokta yoğunluğu 16 nokta/m^2 olan veriler 'Eurocopter AS350' helikoptere yerleştirilmiş 'Riegl LSM-Q680i' tam dalga boyu kaydeden (full-waveform) lazer tarayıcı (Şekil 4.1) ile kaydedilmiştir. Uçuş yüksekliği yaklaşık 600 m ve helikopterin hızı 148 km/h olarak belirlenmiştir. Ayrıca sisteme bütünleşik 'IGI Aerocontrol' georeferans sistemi ve 'IGI DigiCam' kamera kullanılmıştır. Veri toplamada kullanılan lazer taracıya ilişkin bazı teknik veriler (Reigl'ın belirlediği test koşulları altında) Çizelge 4.1' de verilmiştir. 500 m x 700 m bindirmeli parçalar halinde nokta bulutları toplanmıştır. Elde edilen verilerin kalibrasyonu ve kolon dengelemesi ise ilgili proje kapsamında uçuşları gerçekleştiren BİMTAŞ'da yapılmıştır.



Şekil 4. 1 RIEGL LSM-Q680i lazer tarayıcı [140]

Çizelge 4. 1 RIEGL LMS-Q680i teknik özellikleri

Eğik (Range) Mesafe Ölçüm Performansı	
Minimum mesafe	30 m
Doğruluk (Accuracy)	20 mm
Hassasiyet (Precision)	20 mm
Lazer sinyali tekrarlama oranı (laser pulse repetition rate)	400 000 Hz (e varan)
Etkin ölçüm oranı	266 Hz (e varan) (60° tarama açısında)
Paralel tarama çizgileri (parallel scan lines)	8956 x 6708 piksel
Lazer dalgaboyu	Yakın kızılötesi
Lazer ışını ıraksaması (Laser beam divergence)	≤ 0.5 mrad
Sinyal başına hedef sayısı	Sayısallaştırılmış dalga işleme: Sınırsız Veri çıkışı gözleme: İlk dönen
Tarayıcı (Scanner) Performansı	
Tarama mekanizması	Döner ayna (Rotating poligon mirror)
Tarama deseni (Scanning pattern)	Paralel tarama çizgileri
Tarama açısı aralığı	+/-30° = toplam 60°
Tarama hızı	10 - 200 çizgi/sn
Açı ölçüm çözünürlüğü	0.001°
Yoğunluk (Intensity) Ölçümü	Her dönüş sinyali için 16 bit (yüksek çözünürlüklü) yoğunluk verisi
Genel Teknik Özellikleri	
Ağırlık	17.5 kg
Maksimum uçuş yükseliği	5000 m

Çalışma bölgesi olarak belirlenen Zekeriyaköy, İstanbul Avrupa yakasında bulunan Sarıyer ilçesine bağlı bir köydür. Türkiye' nin en yüksek nüfusa sahip köyü olan Zekeriyaköy, Sarıyer ilçe merkezine 6 km uzaklıkta, kent merkezine yakın fakat kentin karmaşasından uzak, yeşil alan bakımından zengin bir bölgedir. Zekeriyaköy özellikle Marmara depreminden sonra önemli bir çekim merkezi haline gelmiştir.

Bu çalışma için Zekeriyaköy' e ait F22D01C1A (Test alanı 1), F22D01C3C (Test alanı 2) ve F22D01C4C (Test alanı 3) numaralı paftalar farklı özelliklere sahip test alanları olarak seçilmiştir (Şekil 4.2). Şekil 4.3' de test alanlarına ait ortofotolar verilmiştir. Test Alanı 1 (Şekil 4.3a), seyrek yerleşim alanı olarak nitelendirilebilecek, hem yeşil alanlara sahip hem de az sayıda binanın bulunduğu, aynı zamanda yeni inşa edilen binaların da yer aldığı bir bölgedir. Test Alanı 2 (Şekil 4.3b), ormanlık alanın hemen yanında yer alan, yoğun yerleşimin bulunduğu kentsel alan niteliğinde bir bölgedir. Test Alanı 3 (Şekil 4.3c) ise büyük oranda ağaçların bulunduğu orman niteliğinde olan bir bölgedir.



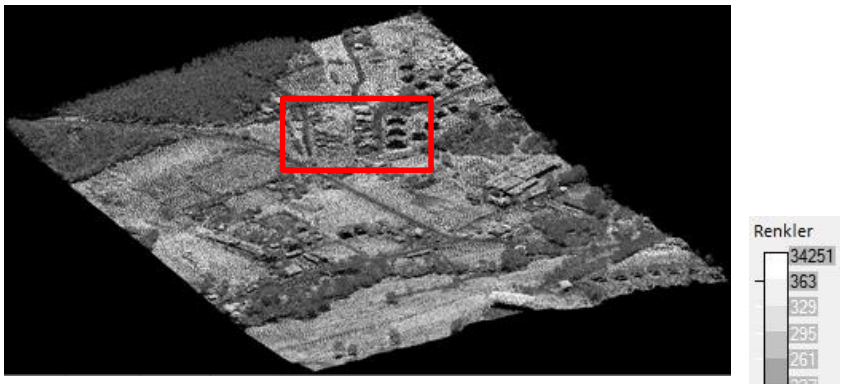
Şekil 4. 2 Çalışma alanındaki farklı arazi karakteristiklerine sahip üç test alanı



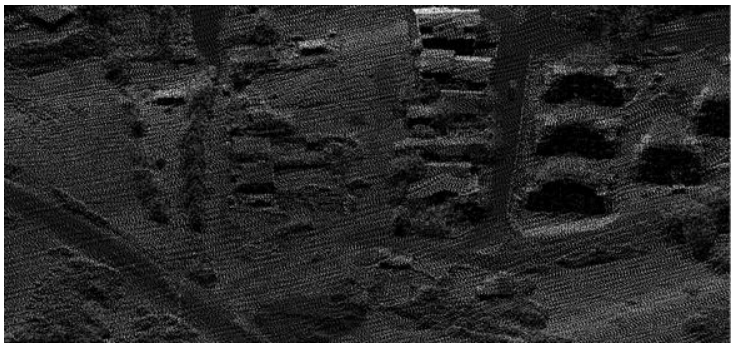
(a) (b) (c)

Şekil 4. 3 Test alanlarının ortofotoları; Test Alanı 1 (a), Test Alanı 2 (b), Test Alanı 3 (c)

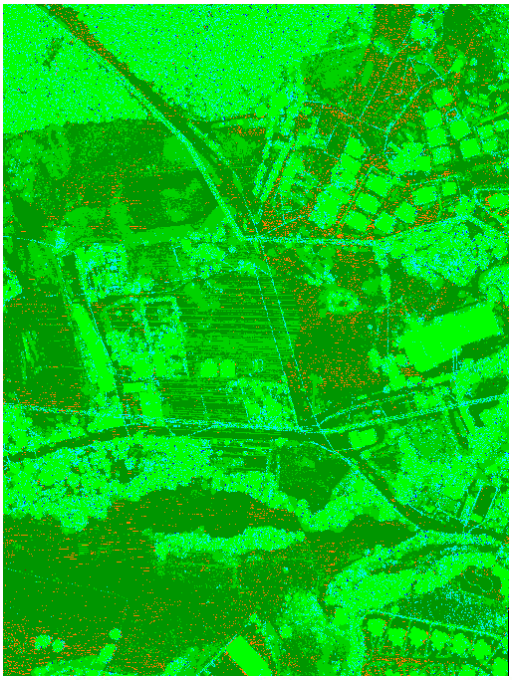
Test alanlarına ait nokta bulutu verileri, LAS (Log ASCII Standart) formatında; zemin, alçak bitki örtüsü, orta bitki örtüsü, yüksek bitki örtüsü, alçak nokta ve 15, 18, 99 kodlu isimleri bilinmeyen üç sınıf olmak üzere toplamda 8 sınıfa ayrılmış verilerdir (Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6).



(a)

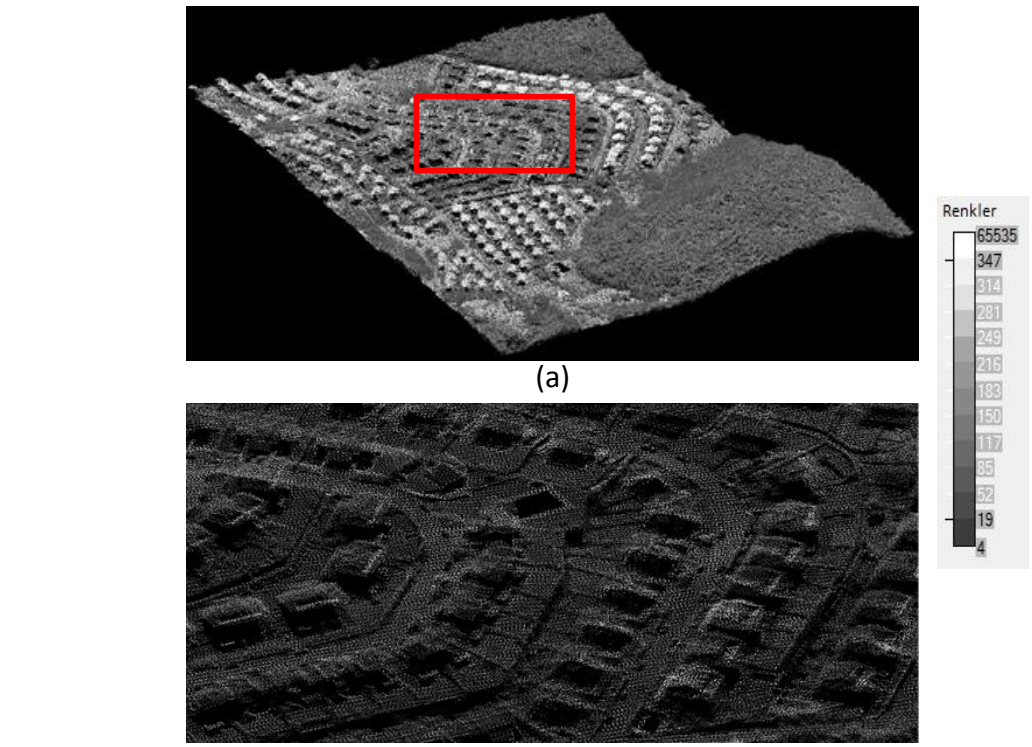


(b)



(c)

Şekil 4. 4 Test Alanı 1’ e ait nokta bulutu (Yoğunluk değerine göre renklendirilmiş perspektif görünüm (a), işaretli kısmın yakından görünümü (b), sınıflara göre renklendirilmiş görünüm (c))

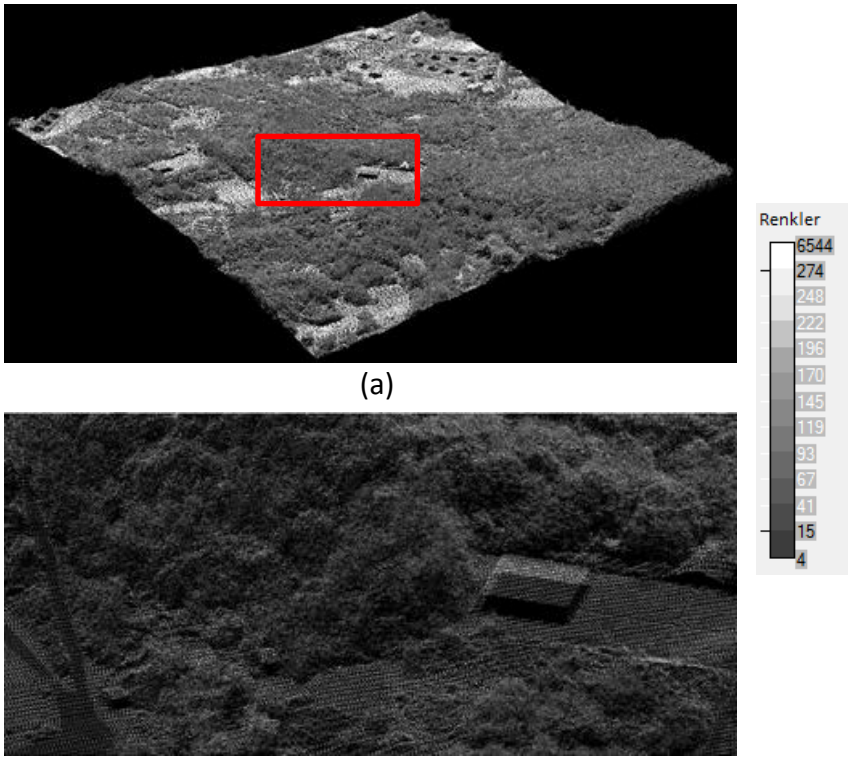


(a)

(b)

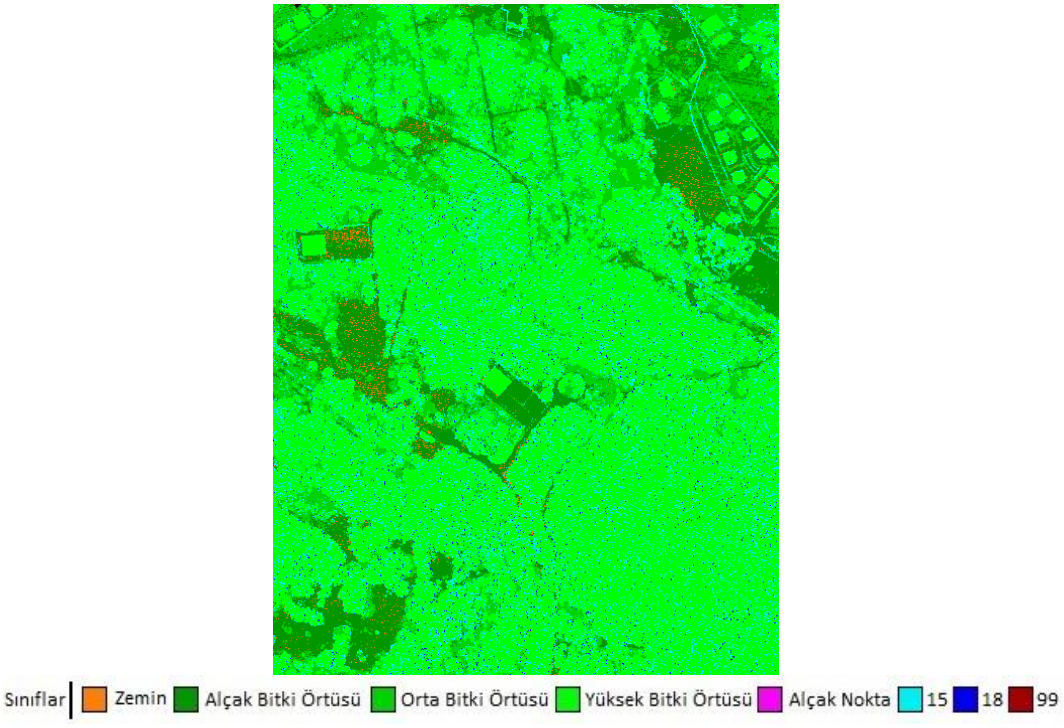
(c)

Şekil 4. 5 Test Alanı 2' ye ait nokta bulutu (Yoğunluk değerine göre renklendirilmiş perspektif görünüm (a), işaretli kısmın yakından görünümü (b), sınıflara göre renklendirilmiş görünüm (c))



(a)

(b)



(c)

Şekil 4. 6 Test Alanı 3’ e ait nokta bulutu (Yoğunluk değerine göre renklendirilmiş perspektif görünüm (a), işaretli kısmın yakından görünümü (b), sınıflara göre renklendirilmiş görünüm (c))

4.2 Nokta Tabanlı Sınıflandırma

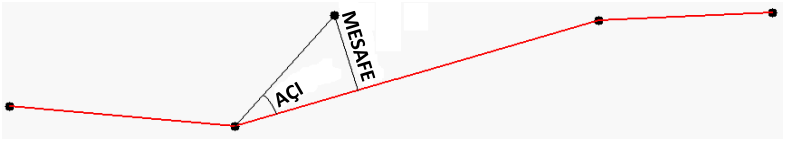
Nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi, yapısal olarak herhangi bir işlem uygulanmamış (ham) LiDAR nokta bulutu verilerini araziyi ifade eden temel sınıflara ayırmak için kullanılmıştır. Sınıflandırma işlemi, TerraSolid yazılım ailesinin ana modülü olan, nokta bulutu yönetim ve işlemeye olanak sağlayan 'TerraScan' kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutu yönetim, işleme ve görselleştirmenin yanında, lazer noktalarından 3B vektör veri oluşturma, otomatik 3B bina modeli üretme ve elle modifiye etme gibi önemli özellikleri ile nokta bulutuyla çalışma konusunda ön plana çıkan TerraScan bir CAD ortamı olan MicroStation ortamında çalışmaktadır. Bu çalışmada, hava LiDAR nokta bulutunun sınıflandırılması için birçok otomatik nokta sınıflandırma seçeneğini barındırması sebebiyle bu yazılım tercih edilmiştir. 'Routine' olarak adlandırılan sınıflandırma seçenekleri biraraya getirilerek 'Macro' olarak ifade edilen kurallar bütünü ile detaylı sınıflandırmalar gerçekleştirilebilmektedir.

Genellikle, nokta tabanlı sınıflandırma seçenekleri, tekil olarak noktaların eğim, yükseklik farkı, birbirlerine göre komşuluk ilişkileri vb. geometrik özellikleri ve LiDAR'ın çoklu dönüş özellikleri gibi bilgileri kullanarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirmeyi sağlarlar (Guo vd., 2011; Mallet vd. [39]).

'By class' sınıfa göre seçeneği basit olarak tüm noktaları verilen sınıftan değerine geçirmeyi sağlar. Belli bir kapalı alan tanımlanarak da bu sınıflandırma yapılabilir.

'Air points' hava nokta, yerel bir çevrede belirlenen yarıçap değerini dikkate alarak (Mallet vd. [39]), bu çevreleyen alana düşen noktaların orta (median) yüksekliğini hesaplar ve orta yükselikten daha yukarıda olan noktaları sınıflandırır. Havadaki gürültü noktalarını sınıflandıran bir seçenektir. 'Isolated points' dışlanmış noktalar seçeneği de benzer şekilde, belirlenen yarıçap değerine göre yerel çevrede çok fazla komşu noktası bulunmayan noktaları sınıflandırır. Bu seçenek havada ya da zeminin altında bulunan ayrık noktaları bulmak için faydalıdır. Genellikle zeminin altında kalan hatalı noktaları sınıflandırmak için kullanılan 'Low points' alçak nokta seçeneği, lokal çevrede belirlenen yarıçap değerine göre hesaplanan XY arama aralığında, her bireysel noktanın (orta noktanın) komşuluğundaki diğer noktalarla yüksekliğini karşılaştırır. Eğer, orta nokta açık bir şekilde diğer noktalardan daha alçakta ise sınıflandırılır.

‘Ground’ zemin sınıflandırıcısı, iteratif olarak bir üçgen yüzey modeli inşa ederek zemin noktalarını sınıflandırır (Axelsson, 2000). Yerde olduğu düşünülen bazı yerel noktaların seçilmesiyle sınıflandırma adımı başlar, başlangıç bir model inşa edilir ve daha sonra iteratif olarak yeni lazer noktaları eklenerek gerçek zemin yüzeyi elde edilir. Bu seçenekteki iterasyon parametreleri (Şekil 4.7), bir noktanın zemin noktası kabul edilmesi ve modele eklenmesi için üçgen düzlemine ne kadar yakında olması gerektiğini belirler.



Şekil 4. 7 Zemin iterasyon parametreleri [141]

‘Below surface’ yüzeyin altı seçeneği bir sınıftaki komşu noktalarından alçakta olan noktaları sınıflandırır. Zemin sınıflandırmasının ardından gerçek zemin altındaki noktaları tespit etmek için kullanılabilir. İlgili sınıftaki her nokta için 25 en yakın komşu noktası belirlenir ve bu noktalardan bir düzlem geçirilir (Mallet vd. [39]). Eğer nokta yüzeyin üzerinde ya da yüzeye belirlenen bir Z değerinden daha yakın ise o nokta sınıflandırılmaz. Fakat nokta, komşu noktalarının yüzeye göre yükseklik farklarının standart sapmalarının belli bir limit değeri ile çarpılmasından elde edilen büyüklüğe göre, zeminin daha da altında ise hedef sınıfa atanır.

‘By height from ground’ zeminden olan yükseklik, zemine göre belirlenen bir yükseklik aralığından olan noktaları sınıflandırır (Kim ve Sohn [130]). Bu sınıflandırma seçeneği, zemini temel aldığı için zemin sınıfının daha önceden sınıflandırılmış olmasını gerektirir. Bina sınıflandırması, enerji hattı işlemleri ya da ağaç çıkarımı çalışmalarına hazırlık için noktaları farklı bitki örtüsü sınıflarına ayırmada kullanılabilir. Buna göre de, en yüksek bitki örtüsü sınıfı, hedef objelerin tüm noktalarını içermelidir (bina çatıları, elektrik telleri veya ağaçlar). ‘By absolute elevation’ mutlak yüksekliğe göre seçeneği de belirlenen bir yükseklik aralığındaki noktaları bulunduğu sınıftan hedef sınıfına atar. Bu adım, havadaki yüksek ya da açıkca zeminin altında bulunan hatalı noktaları sınıflandırmak için kullanılır.

‘By echo’ dönüşe göre adımı, noktaları dönüş bilgilerine dayanarak sınıflandırır (Mallet vd. [39]; Kim ve Sohn [130]). Tek dönüş (only echo), ilk dönüş (first of many), orta dönüş (intermediate), son dönüş (last of many), tek dönüş ve ilk dönüşün birleşimi (any first), tek dönüş ve son dönüşün birleşimi (any last) ya da istenilen özel bir dönüş sayısı (ilk, ikinci…) gibi dönüş seçenekleri yapılacak sınıflandırma uygulamasının amacına göre belirlenerek sınıflandırma gerçekleştirilir. ‘By echo difference’ dönüş farkına göre seçeneği ilk ve son dönüş arasındaki yükseklik farkını dikkate alarak sınıflandırma yapar. İki dönüş arasındaki yükseklik farkı belirlenen değerin üstünde ise belirlenen dönüş yine belirlenen sınıfa atanır (Chehata vd. [132]). Yine dönüş özelliklerinden olan ‘By echo length’ dönüş uzunluğuna göre seçeneği ise mutlak yüksekliğe göre adımında olduğu olduğu gibi belirlenen bir dönüş uzunluk aralığına göre noktaları sınıflandırır.

‘By intensity‘ yoğunluk seçeneği, belirlenen yoğunluk aralığına göre noktaların sınıflandırılmasını sağlar. Demiryolu ya da yol çizgileri gibi alanlarda metal yüzeylerin ya da beyaz boyamaların etrafına göre daha yüksek yoğunluk değerine sahip olduğu noktalar sınıflandırılabilir. ‘By color’ renge göre, mevcut ise her nokta için saklanan renk değerine göre sınıflandırma yapar. Konumuna göre sınıflandırılması zor olan noktaları sınıflandırılmasına yardımcı bir seçenektir. Yoğunluk sınıflandırıcısına benzer şekilde, noktanın doğal renk (hue), doygunluk (saturation) ve parlaklık gibi özellikleri belirlenen aralıklarda bulunuyorsa o nokta sınıflandırılır. Noktaların renk değerleri mevcut değil ise önce renk değerleri referans görüntülerden elde edilip, daha sonra sınıflandırma gerçekleştirilebilir.

‘By time stamp’ zaman işaretine göre seçeneği, eğer kaydedilen noktaların zaman bilgileri mevcut ise, belirlenen bir zaman aralığına göre noktaları sınıflandırır.

‘By angle’ açıya göre seçeneği noktaları tarama açısı ya da düşeyden olan açıya göre sınıflandırır. Tarama açısı -128 ve +127 derece arasında değişirken, düşeyden olan açısı 0 ile 90 derece arasında değerler alır. Yine belirlenen açı aralığındaki noktalar hedef sınıfa atanır. ‘By scan direction’ tarama doğrultusuna göre seçeneği de noktaları negatif ya da pozitif tarama doğrultusuna göre ya da köşe noktalara göre sınıflandırmaktadır.

‘By scanner’ tarayıcıya göre seçeneği, noktaları onları kaydeden tarayıcı numarasına göre sınıflandırır. Birden çok tarayıcı ile kaydedilen verinin olduğu durumlarda istenilen tarayıcı verileri istenen sınıfa atanır.

‘Railroad’ demiryolı adımı, bir demiryolu rayının yükseklik deseni ile eşleşen noktaları demiryolu olarak sınıflandırır. Bu sınıflandırma seçeneği, bir noktanın demiryolunun yükseklik deseninde yer alması için komşuluğundaki noktaların bu noktaya göre yüksekte ya da alçakta olması durumlarını inceler.

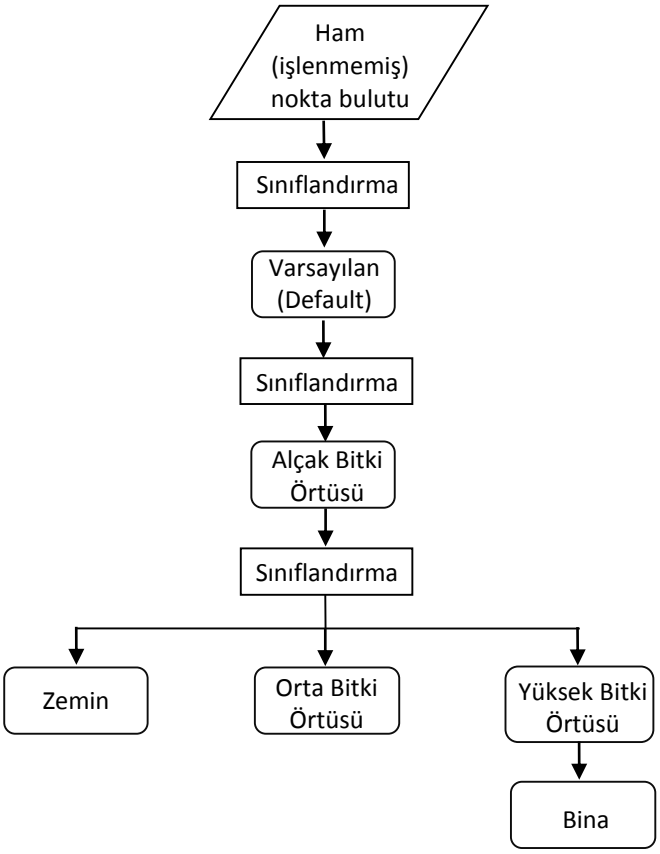
‘Buildings’ bina sınıflandırıcı, bina çatılarındaki düzlemsel yüzeyleri oluşturan noktaları sınıflandırır. Buradaki düzlemsel yüzeyler özdeğerler ya da yerel düzlemin özellikleri kullanılarak belirlenebilir (Kim ve Sohn [133]; Mallet vd. [39]; Kim ve Sohn [130]). Bina sınıflandırması ayrıca, zemin sınıfının daha önceden sınıflandırılmış olmasını gerektirir. Hatta sadece belirli bir yükseklikteki noktalardan binaları elde edebilmek için alçak bitki örtüsünün sınıflandırılmış olması da tavsiye edilir.

‘Model keypoints’ model anahtar noktaları seçeneği, verilen bir doğrulukta üçgenlenmiş yüzey modeli oluşturulmak istenen noktaları sınıflandırır. Bu sınıflandırıcı normalde zemin noktası olarak sınıflandırılan veriden inceltilmiş veri elde etmek için kullanılır. İlk olarak belirlenen doğrulukta bir üçgenlenmiş yüzey modeli elde etmek için küçük bir nokta seti bulunur ve başlangıç bir yüzey modeli oluşturulur (Axelsson [123]). Daha sonra verilen tolerans değerine göre bu yüzeye olan uzaklıklar analiz edilir ve buna göre sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. ‘Contour keypoints’ dış hat anahtar noktaları seçeneği, dış hatların üretimi için uygun hale getirilmiş model anahtar noktalarını sınıflandırır. Model anahtar noktaları seçeneğine benzer şekilde çalışır fakat harita üretimi için, pürüzsüz, kartografik dış sınırların üretimi için uygun olan bir zemin modeli üretir.

Bu çalışma kapsamında, test alanlarına ait LİDAR verilerinin otomatik olarak nokta tabanlı yöntemlerle sınıflandırılması amacıyla Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 olmak üzere üç farklı yaklaşımla sınıflandırma işleminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşımların detayları takip eden bölümde verilmiştir.

4.2.1 Standart Yaklaşım

Ham LiDAR nokta bulutu verilerinin sınıflandırılması için gerçekleştirilen ilk sınıflandırma işleminde, bu tür çalışmalarda çoğunlukla kullanılan standart bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda kullanılan parametreler, çoğunlukla kullanılan 'TerraScan' yazılımı kullanım klavuzunda [141] önerilen değerler ve yöntemler esas alınarak belirlenmiştir. Benzer yaklaşım İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 'Hava LiDAR Teknolojisiyle Sayısal Yüzey Modeli ve 3 Boyutlu Kent Modeli Projesi' kapsamında yüklenici BİMTAŞ tarafından nokta bulutunun sınıflandırılması için kullanılmıştır. Standart Yaklaşım' a ait genel işlem adımları Şekil 4.8' de yer almaktadır.



Şekil 4. 8 Standart Yaklaşım' a ilişkin genel işlem adımları

Buradaki yaklaşım, farklı sınıflandırma seçeneklerinin belirli bir sıraya göre birbiri ardına eklenmesi sonucunda oluşturulmuştur.

4.2.2 Yaklaşım 1

İkinci yaklaşım olarak geliştirilen Yaklaşım 1' in işlem adımları Standart Yaklaşım ile benzerdir (Şekil 4.8). Bu yaklaşımın asıl hedefi, standart olarak kullanılan parametreler yerine pilot bölgelerde yapılan parametre analizleri sonucunda elde edilen parametreler kullanılarak sınıflandırma işleminin iyileştirilmesidir. Bu amaçla, bu yaklaşımda geliştirilen kural adları ve bu kurallar sonucu oluşturulması hedeflenen sınıflar hiyerarşik bir düzende Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Yaklaşım 1' i oluşturan kurallar ve oluşan sınıflar

Kural	Oluşan Sınıf
Sınıfa göre 1	Varsayılan
Çoklu dönüşe göre	Alçak bitki örtüsü
Alçak noktalar	Alçak nokta
Zemin	Zemin
Yüzeyin altı	Alçak nokta
Sınıfa göre 2	Alçak bitki örtüsü
Hava noktaları	Hava nokta
Yerden yüksekliğe göre 1	Zemin
Yerden yüksekliğe göre 2	Orta bitki örtüsü
Yerden yüksekliğe göre 3	Yüksek bitki örtüsü
Bina	Bina

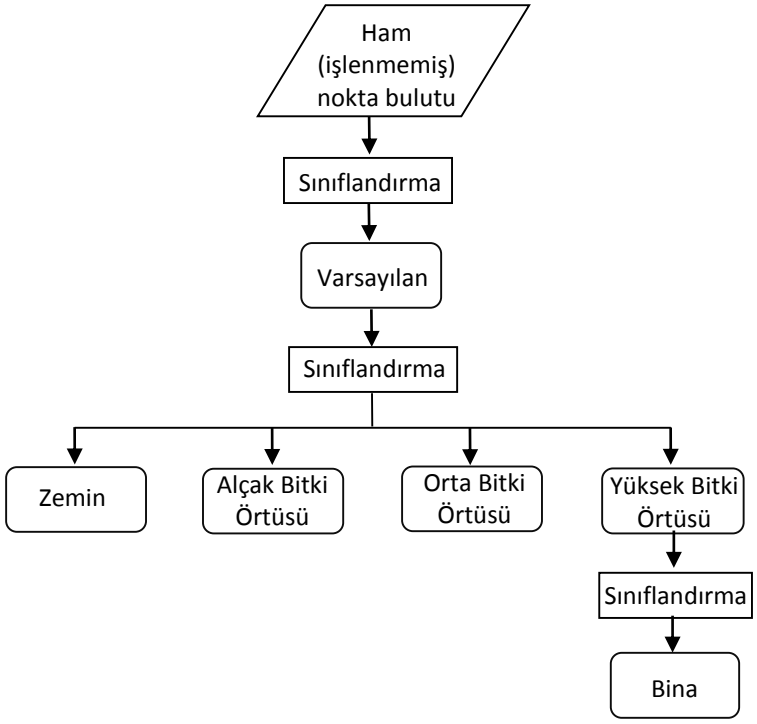
Yaklaşım 1 için Çizelge 4.2' de verilen kural seti incelendiğinde, ilk olarak LİDAR nokta bulutundaki tüm noktaların varsayılan sınıfına atanması için 'Sınıfa göre 1' kuralı oluşturulmuştur. Ardından, LiDAR'ın önemli bir özelliği olan çoklu dönüşlerden faydalanarak son dönüş noktaları ve tek dönüşlü noktaların alçak bitki örtüsü sınıfına atanması sağlayacak 'Çoklu dönüşe göre' kuralı, daha sonra da zemini elde etmeden önce alçak bitki örtüsü sınıfından zemine ait olamayacak kadar alçakta bulunan gürültü noktalarının alçak nokta sınıfına atanması sağlayacak 'Alçak noktalar' sınıflandırma kuralı hiyerarşik kurallar bütününe eklenmiştir. Alçak bitki örtüsü noktalarından zemin sınıfının oluşturulmasını sağlayacak 'Zemin' kuralı da kural setine dâhil edilmiştir. Bir sonraki aşamada zemin sınıfındaki hatalı noktaları elemine etmek amacıyla, zeminin altında kalan noktaları temizleyen bir kural ('Yüzeyin altı') eklenmiştir. Oluşacak sınıflar dışında kalan tüm noktaların alçak bitki örtüsü sınıfına atanması ('Sınıfa göre 2') ve ardından havada kalan noktalarının temizlenmesi ('Hava nokta') amacıyla iki yeni kural

ilave edilmiştir. Oluşturulan zemin yüzeyine göre belirli yükseklikte bulunan ve zemine ait olmasına rağmen zemin olarak sınıflandırılamamış noktaların zemin sınıfına eklenmesi için 'Yerden yüksekliğe göre 1' kuralı ardışık kural setine dâhil edilmiştir. Yine zemin yüzeyine göre noktaların yükseklikleri esas alınarak, alçak bitki örtüsü sınıfından orta ve yüksek bitki örtüsü sınıfı oluşturulması için kural setleri ('Yerden yüksekliğe göre 2, 3') oluşturulmuştur. Son olarak da oluşturulan yüksek bitki örtüsü sınıfından bina sınıfının oluşturulması için 'Bina' kuralı ile kural seti tamamlanmıştır.

Yaklaşım 1' in Standart Yaklaşımdan diğer önemli bir farkı ise bu açıklanan kural setine zemin sınıfının iyileştirilmesi amacıyla eklenen 'Yerden yüksekliğe göre 1' kuralıdır.

4.2.3 Yaklaşım 2

Yaklaşım 2 ile yine ham LiDAR nokta bulutu verileri kullanılarak nokta tabanlı sınıflandırmaya dayanan otomatik bir sınıflandırma yöntemi oluşturmak amaçlanmıştır. Bu sınıflandırma yaklaşımının genel işlem adımları Şekil 4.9' da yer almaktadır.



Şekil 4. 9 Yaklaşım 2' ye göre genel işlem adımları

Yaklaşım 2' de, Yaklaşım 1' den farklı olarak LiDAR' ın çoklu dönüş özelliği kullanılmamıştır. Sınıflandırma adımları da farklı bir hiyerarşik sıraya göre birbiri ardına

eklenerek yine nokta tabanlı fakat Yaklaşım 1' dekinden farklı bir kural seti geliştirilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4. 3 Hiyerarşik düzende Yaklaşım 2' yi oluşturan kurallar ve oluşan sınıflar

Kural	Oluşan Sınıf
Sınıfa göre	Varsayılan
Alçak noktalar	Alçak nokta
Zemin	Zemin
Yüzeyin altı	Alçak nokta
Hava noktaları	Hava nokta
Yerden yüksekliğe göre 1	Zemin
Yerden yüksekliğe göre 2	Alçak bitki örtüsü
Yerden yüksekliğe göre 3	Orta bitki örtüsü
Yerden yüksekliğe göre 4	Yüksek bitki örtüsü
Bina	Bina

Yaklaşım 2 için belirlenen kural setlerine göre, tüm noktaların varsayılan sınıfa atanmasını sağlayacak kuraldan ('Sınıfa göre') sonra, ilk olarak 'Alçak noktalar' kuralı hiyerarşik kural setine eklenmiştir. 'Zemin' sınıflandırıcı kuralının ilave edilmesinin ardından Yaklaşım 1' de olduğu gibi 'Yüzeyin altı' kuralı eklenmiştir. Bu işlemin ardından zemin noktaları ayrıldıktan sonra ham nokta bulutunda kalan noktalar için havadaki noktalarının temizlenmesi amacıyla bir kural ('Hava nokta') daha bu kural setine dâhil edilmiştir. Havadaki noktalar temizlendikten sonra, zemin yüzeyi dikkate alınarak belirli yükseklikteki noktaların zemin sınıfına eklenmesi ve bitki örtüsü sınıflarının elde edilmesi için 'Yerden yüksekliğe göre 1, 2, 3, 4' kuralları eklenmiştir. Son olarak da 'Bina' sınıflandırma kuralı ile bu kural seti de tamamlanmıştır.

4.2.4 Parametre Analizleri

Nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımında sınıflandırma işlemine tabii tutulan her bir nokta özelliklerine göre analiz edilmekte ve oluşturulan kural setlerine göre ait olduğu sınıfa otomatik olarak atanmaktadır. Buradaki kritik unsur kural setleri içerisindeki sınıflandırma işlemi için kullanılacak parametrelerin gerçekçi bir yaklaşımla belirlenmesidir. Belirlenen bu parametrelerin farklı arazi topoğrafyası ve farklı arazi örtüsü (orman, yeşil alan, kentsel ve tarım alanı) için en optimum sonuçları vermesi nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi ile otomatik sınıflandırma işleminin başarı

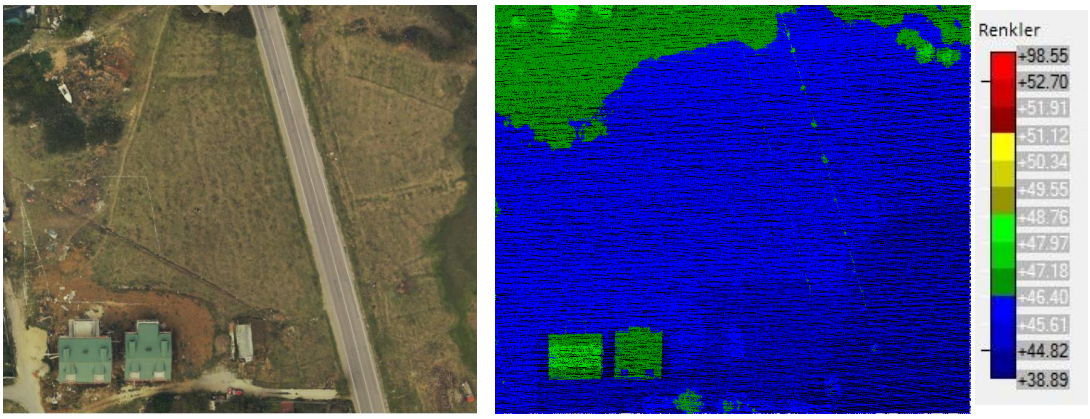
açısından kritik öneme sahiptir. Söz konusu parametrelerin değerleri ne kadar iyi belirlenirse sınıflandırma işlemi doğruluğu o kadar artacaktır.

Zemin, bina ve bitki örtüsü olmak üzere üç ana sınıfın elde edilmesi amaçlanan bu çalışmada sınıflandırma doğruluğunun yüksek olması için özellikle zemin ve bina sınıflarına ilişkin çok detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin amacı, özellikle belirlenen çalışma bölgesindeki tüm alanlarda (seyrek yerleşim alanı, kentsel alan, ormanlık alan) doğru sınıflandırma yapmayı sağlayacak ortak parametre değerlerini belirlemektir. Bu nedenle Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' de sınıflandırma işlemlerinde kullanılmak üzere geliştirilen kural setleri içerisinde yer alan parametreler yapılan parametre analizleri sonucunda belirlenmiştir. Standart Yaklaşım' daki kural setleri içerisinde kullanılan genel parametreler, parametre analiz işlemleri için başlangıç değer olarak kullanılmıştır. Tekrar ifade etmek gerekirse Standart Yaklaşım' da genel parametreler kullanılmış, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' de ise parametre analiz işlemleri sonucunda belirlenen parametreler kullanılmıştır.

4.2.4.1 Zemin Sınıfı Parametre Analizi

Bu çalışmada kullanılan zemin sınıflandırma seçeneğinde ilk olarak hangi nokta sınıfından zemin noktalarının elde edileceği ve başlangıç zemin noktalarının belirlenmesinde seçimin hangi noktalardan yapılacağı belirlenir. Bu adımda, 'maksimum bina boyutu (max building size)', 'arazi açısı (terrain angle)', 'iterasyon açısı (iteration angle)', 'iterasyon mesafesi (iteration distance)', 'belli bir kenar uzunluğuna göre iterasyon açısını azalt (reduce iteration angle when)' ve 'belli bir kenar uzunluğuna göre üçgenlemeyi durdur (stop triangulation when)' seçenekleri istenilen değerlerin girilebileceği seçeneklerdir.

Zemin sınıfının doğru bir şekilde elde edilmesi için, seyrek yerleşim alanı olarak nitelendirilen, Test Alanı 1' de yer alan ve zemin noktalarını yoğun bir şekilde içeren pilot bir bölgede parametre analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10). Bu pilot bölge 542 053 noktadan oluşmaktadır.



(a) (b)

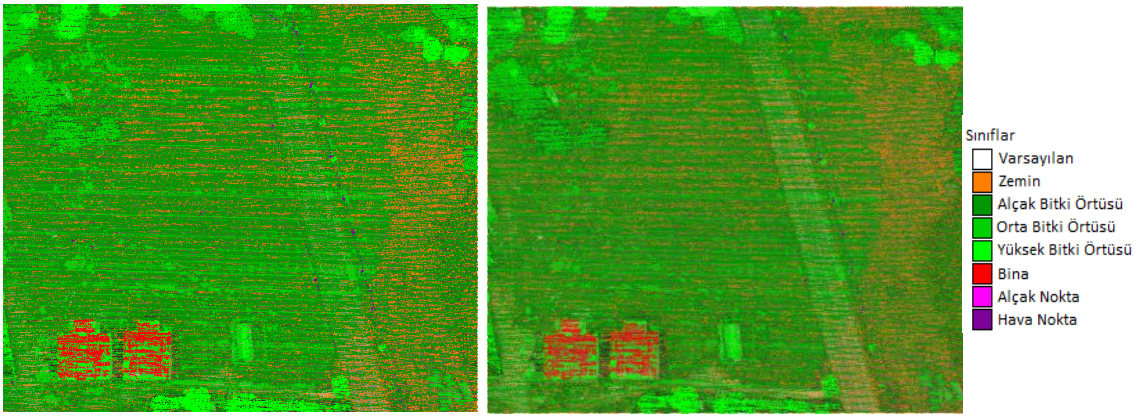
Şekil 4. 10 Parametre analizi gerçekleştirilen pilot bölgeye ait ortofoto (a) ve bu bölgenin yüksekliğe göre renklendirilmiş nokta bulutu (b)

Kullanılan zemin adımı iteratif bir şekilde çalıştığından, öncelikle zemin adımının tasarlanan hiyerarşik kurallar bütününde kaç kez tekrar etmesi gerektiği irdelenmiştir. Çünkü her bir iterasyon aşamasında zemin sınıfına yeni noktalar eklenmekte ve sonuçta zemin yüzeyi değişmektedir. Standart Yaklaşım' daki kurallar bütününe göre zemin sınıflandırma işlemi sadece bir kez yapılmaktadır. Bu durumda zemin sınıfına ait olması gereken birçok noktanın zemin sınıfında yer almadığı görülmüştür. Bu nedenle iterasyon sayıları arttırılarak tekrar sınıflandırmalar yapılmıştır. Genel yaklaşım olarak, parametre analizi sırasında diğer tüm parametreler sabit bırakılarak sadece analiz edilen parametre için farklı değerler test edilmiştir. Benzer yaklaşımla farklı iterasyon sayıları ile Test Alanı 1' de belirlenen pilot bölge için yapılan sınıflandırma sonucunda elde edilen zemin sınıfına ait noktalar Çizelge 4.4' de verilmiştir. Çizelge 4.4' e göre iterasyon sayısı arttıkça zemin sınıfının nokta sayısı da artmıştır fakat 10 iterasyondan sonra nokta sayısında değişim gözlenmemiştir. Bu nedenle iterasyon sayısını 10 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4. 4 İterasyon sayısına göre zemin noktalarının değişimi

İterasyon sayısı	**Zemin nokta sayısı**
1	101 592
2	109 491
3	111 389
5	112 121
10	112 333
20	112 333

Standart Yaklaşım yani tek iterasyon ve 10 iterasyon sonucunda belirlenen zemin sınıfına ait noktaların dağılımları Şekil 4.11' de verilmiştir. Şekil 4.11b'de görüldüğü üzere 10 iterasyon sonucunda elde edilen zemin sınıfındaki iyileşmeler yollarda ve açık alanlarda görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4. 11 Standart yaklaşım (a) ve 10 iterasyonlu zemin kuralının bulunduğu kurallar bütünü kullanılarak sınıflandırma (b)

Başlangıç zemin noktalarının seçilmesine ilişkin parametrelerden olan zemin adımındaki 'maksimum bina boyutu', en büyük binanın kenar uzunluğunu ifade etmektedir. Yapılan analizlere göre belli bi değerin üzerinde olduğunda zemin sınıflandırmasında neredeyse hiç nokta dönmemiş ve tersine maksimum bina boyutu değeri belli bir değerin altında indirildiğinde de nokta sayısı biraz azalmıştır (Çizelge 4.5). Çizelge 4.5' te de görüleceği üzere 50 m - 100 m arasındaki maksimum bina boyutu değerleri kabul edilebilir değerlerdir. Çalışma alanındaki arazi örtüsü dikkate alındığında Standart Yaklaşım' da kullanılan 80 m değerinin maksimum bina boyutu olarak kullanılmasının uygun olacağı tespit edilmiştir.

Çizelge 4. 5 Maksimum bina boyutuna göre zemin noktalarının değişimi

Max. bina boyutu (m)	**Zemin nokta sayısı**
150	1
125	2
110	112 001
100	112 538
80	112 333
50	112 762
20	111 928

Arazi açısı değeri zeminde izin verilen en dik eğim olarak tanımlanmaktadır. Bu değer değiştirildiğinde çok tutarlı sonuçlar ve büyük değişimler gözlenmemiştir. Bu nedenle 'Terrain angle' değerinin de Standart Yaklaşım' da olduğu gibi 88° bırakılmasına karar verilmiştir.

İterasyon açısı nokta, noktanın üçgen düzlemine izdüşümü ve en yakın üçgen köşesi arasındaki maksimum açıdır. Zemin adımında, iterasyon açısı değerinin normalde 4 ile 10 derece arasında bir değer olduğu belirtilmiştir [141]. Bu sınır değerleri içerecek şekilde iterasyon açısı için 4, 7 ve 10 derece değerleri ile yapılan sınıflandırma sonucunda dönen zemin noktaları sayısı Çizelge 4.6' da verilmiştir. Çizelge 4.6' da görüldüğü üzere açı değeri küçüldükçe zemin olarak sınıfladırılan nokta sayısı azalmıştır. Bu nedenle iterasyon açısı değeri için Standart Yaklaşım' da kullanılan 10° değerinin kullanılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 4. 6 İterasyon açısına göre zemin noktalarının değişimi

İterasyon açısı (derece)	**Zemin nokta sayısı**
10	112 333
7	93 352
4	67 164

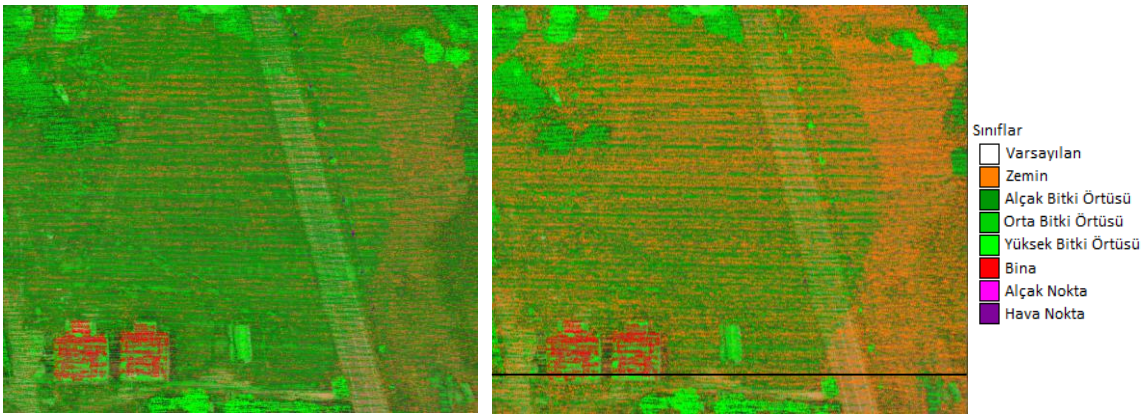
Zemin adımındaki iterasyon mesafesi değeri, iterasyon boyunca noktadan üçgen düzlemine olan maksimum mesafedir. Normalde 0.5 m ile 1.5 m arasında verilen değerler uygun sonuçlar üretmektedir [141]. İterasyon açısı için gerçekleştirilen parametre testinde verilen sınır değerler dışında anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Çizelge 4.7' de görüldüğü gibi seçilen farklı iterasyon mesafesi ile yapılan sınıflandırma sonucunda zemin noktası sayısında çok belirgin değişimler oluşmamıştır. Bu analiz işlemi sonucunda iterasyon mesafesi için Standart Yaklaşım' da kullanılan 1.40 m değeri 0.5 m olarak değiştirilmiştir.

Çizelge 4. 7 İterasyon mesafesine göre zemin noktalarının değişimi

İterasyon mesafesi (m)	**Zemin nokta sayısı**
0.50	113 398
1.00	113 135
1.40	112 333
1.50	113 095

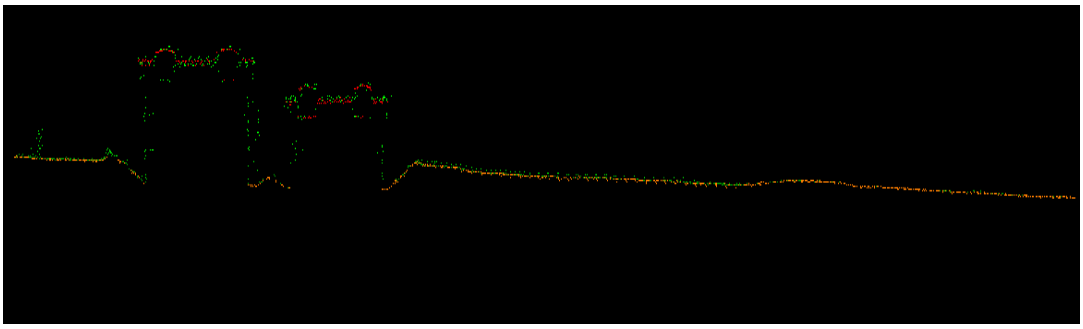
Zemin adımındaki diğer sınıflandırma değişkenleri, kenar uzunluğuna göre iterasyon açısını azalt ve üçgenlemeyi durdur seçenekleridir. Bu seçeneklerin kullanımı isteğe bağlıdır. Eğer seçenekler işaretlenirse, kenar uzunluğu parametresi değişken bir değer olmaktadır. İterasyon açısını azalt seçeneğinde, üçgenin tüm kenarları tanımlanan kenar uzunluğu değerinden küçük bir değer aldığında bu üçgen içindeki noktalardan zemin sınıfına yeni bir nokta dâhil edilmemektedir. Üçgenlemeyi durdur seçeneği işaretlenirse de üçgendeki her kenar belirlenen kenar uzunluğu değerinden küçük olduğunda işlem durdurulur. Bu seçeneklerin her ikisi de gereksiz nokta yoğunluğunun yüzey modeline eklenmesini engellemekte ve hafıza gereksinimini azaltmaktadır.

Standart Yaklaşım' da iterasyon açısını azalt seçeneği sınıflandırmaya dâhil edilmiş ve kenar uzunluğu değeri 5 m olarak belirlenmiştir. Bu seçeneğin sınıflandırmaya dâhil edildiği durumda kenar uzunluğunun analizi gerçekleştirilmiştir. İterasyon açısını azalt seçeneğinde farklı kenar uzunlukları ile zemin sınıfına atanan nokta sayıları farklı olmaktadır. Fakat, iterasyon açısını azalt seçeneği sınıflandırmaya dâhil edilmediği durumda ise zemin sınıfına atanan nokta sayısı oldukça fazla olmuştur. Şekil 4.12' de görüldüğü üzere bu parametrenin etkisi, diğer tüm analizlerde kullanılan parametrelerden çok daha fazla olmaktadır. Şekil 4.12' deki işaretli kesit doğrultusu boyunca alınan kesit Şekil 4.13' de verilmiştir. Şekil 4.13' de görüleceği gibi zemine ait noktalar doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır. Bu analiz sonucunda Standart Yaklaşım' dan farklı olarak iterasyon açısını azalt seçeneğinin kullanılmamasına karar verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4. 12 İterasyon açısını azalt seçeneği kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma (a), iterasyon açısını azalt seçeneği kullanılmadan gerçekleştirilen sınıflandırma (b)



Şekil 4. 13 İşaretli çizgi boyunca (Şekil 4.12) alınan kesit

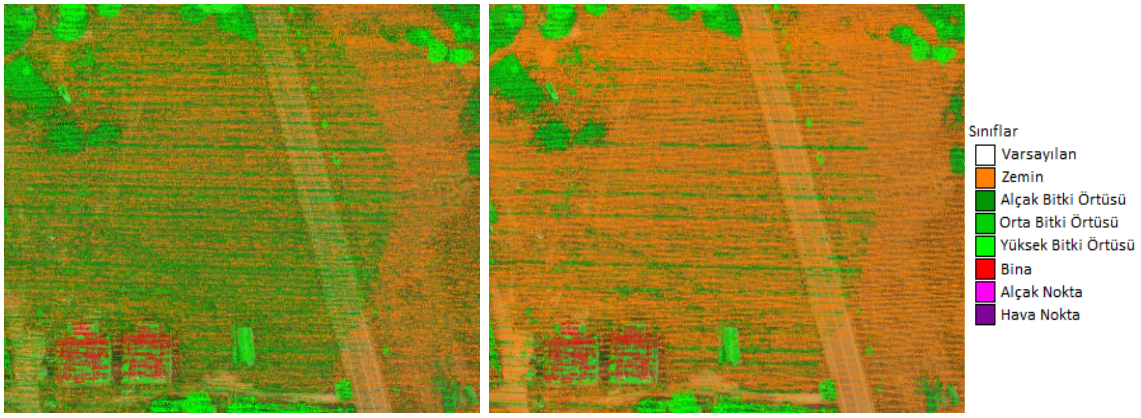
İsteğe bağlı parametrelerden diğeri olan üçgenlemeyi durdur seçeneği için analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde bu parametrenin kullanılıp kullanılmamasının zemin sınıfındaki nokta sayısını çok az etkilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Standart Yaklaşım' da olduğu gibi isteğe bağlı olan üçgenlemeyi durdur seçeneğinin kullanılmamasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

4.2.4.2 Bitki Örtüsü Sınıfları Parametre Analizi

Bitki örtüsü sınıfı için yapılan analiz işlemlerinde en kritik nokta alçak bitki örtüsü, orta bitki örtüsü ve yüksek bitki örtüsü için yapılacak sınıflandırmadaki sınır değerlerin belirlenmesidir. Bu sınır değerlerinin tespiti için yapılan analizler sırasında alçak bitki örtüsü sınıfı içerisinde hala zemine ait noktalar bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.14a). Bu tespitten hareketle Standart Yaklaşım' dan farklı olarak zemin sınıfındaki noktalardan belirli yükseklikteki noktaların zemin sınıfına dâhil edilmesine karar verilmiştir. Bu durum dikkate alındığında zemin sınıfına dâhil edilen noktalar ile belirli yükseklik farkına (-0.15 m – 0.15 m) sahip noktalar zemin sınıfına atanmıştır (Çizelge 4.8). Çizelge 4.8' de görüleceği gibi alçak bitki örtüsü, orta bitki örtüsü ve yüksek bitki örtüsü için yükseklik aralıkları gerçekleştirilen analizler sonucunda belirlenmiştir. Şekil 4.14' de bitki örtüsü analizi aşaması öncesi sınıflandırma ve bu aşama sonrası sınıflandırma sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4. 8 Sınıflandırma için belirlenen aralıklar

Yükseklik aralığı (m)	Oluşan Sınıf
-0.15 – 0.15	Zemin
0.15 – 0.24	Alçak bitki örtüsü
0.25 – 2.29	Orta bitki örtüsü
2.30 – 9999.0	Yüksek bitki örtüsü



(a) (b)

Şekil 4. 14 Bitki örtüsü analizi öncesi sınıflandırma (a) ve bitki örtüsü analizi sonrası sınıflandırma sonuçları (b)

4.2.4.3 Bina Sınıfı Parametre Analizi

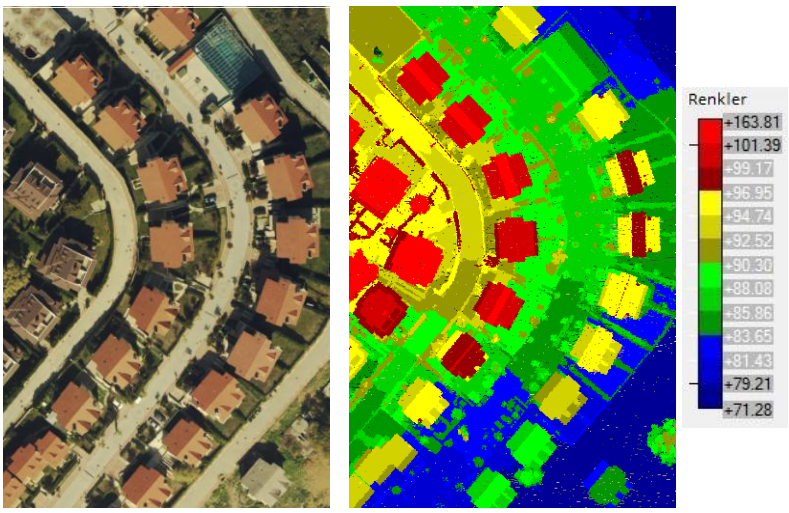
Bu çalışma da kullanılan bina sınıflandırma yaklaşımında, bina sınıfı geliştirilen kurallar esas alınarak yüksek bitki örtüsü sınıfından otomatik olarak elde edilmektedir. Bina sınıflandırma işleminde geliştirilen kurallar içerisinde kullanılacak parametreler 'Minimum boyut (Minimum size)' ve 'Z hata payı (Z tolerance)' parametreleridir. Bu parametrelere ek olarak dönüş (echo) bilgilerini kullan isteğe bağlı seçeneği mevcuttur.

Bina sınıfının oluşturulması için 'Minimum boyut' ve 'Z hata payı' parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, kentsel alan olan Test alanı 2' de üç farklı pilot bölgede parametre analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı büyüklükteki birinci pilot bölge 742 439 nokta, ikinci pilot bölge 464 815 nokta ve üçüncü pilot bölge 697 660 noktadan oluşmaktadır (Şekil 4.15).

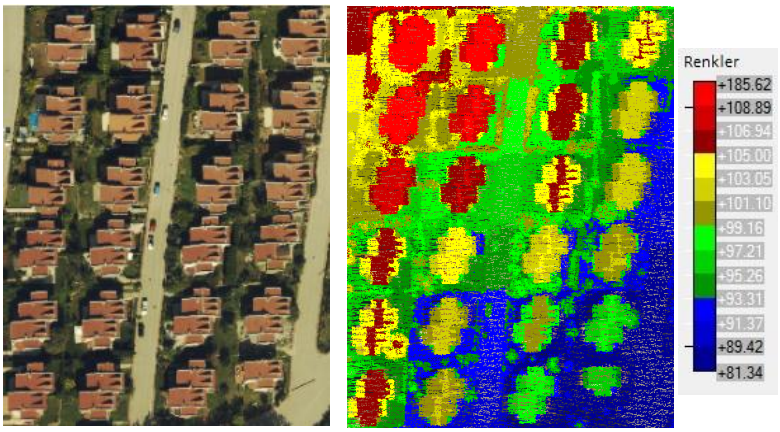
Bina sınıfının elde edilebilmesi için yapılan analiz işlemleri sonucunda, öncelikle sundurma olarak ifade edilen yapıların ve inşaat halindeki binaların bina sınıfına dâhil

edilmesine karar verilmiştir. Ayrıca, isteğe bağlı olan dönüş bilgilerini kullan seçeneğinin de tüm bina sınıflandırmalarında kullanılması uygun görülmüştür.

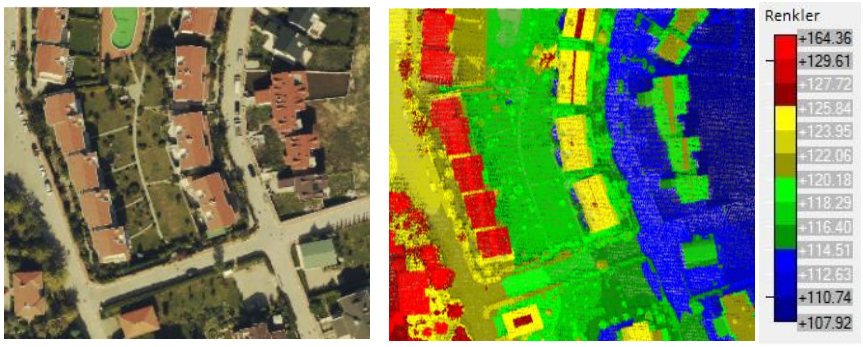
Bina adımındaki minimum boyut değeri, m^2 cinsinden en küçük binanın ayak izi değerini ifade etmektedir. Çalışma bölgesinde yapı olarak birbirinden farklı bina türleri (bitişik, teraslar, çıkmalar vb.), sundurma tipi oluşumlar ve inşaat halindeki binalar da bulunmaktadır. Bu nedenle minimum boyut değeri için Standart Yaklaşım' daki 50 m^2 değerinin üzerinde ve altında farklı değerler belirlenerek görsel analizler ile bina sınıfının değişimi incelenmiştir. Minimum boyut değeri üç pilot bölgede 100 m^2, 80 m^2, 60 m^2, 50 m^2, 40 m^2, 25 m^2, 20 m^2 ve 10 m^2 olacak şekilde sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu değerin 100 m^2, 50 m^2, 20 m^2 ve 10 m^2 olduğu sınıflandırma sonuçları Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18' de verilmiştir. Minimum boyut değerinin 100 m^2 olduğu durumda, özellikle ikinci ve üçüncü pilot bölgede bina sınıfında olması gereken fakat yeşil alan olarak sınıflandırılan yapılar mevcuttur (Şekil 4.17a, Şekil 4.18a). Minimum boyut değeri küçüldükçe sınıflandırma sonuçları iyileşmektedir. Bu değer 50 m^2 olduğunda çoğu bina sınıflandırılmıştır, fakat özellikle ikinci pilot bölgede bina olması gereken alanlarda çok sayıda yeşil alan noktası da bulunmaktadır (Şekil 4.17b). Birinci ve üçüncü pilot bölgede de sınıflandırılamayan binalar mevcuttur. Şekil 4.16b ve Şekil 4.18b' deki üzeri düz çizgi ile işaretli binalar, eksik sınıflandırılan binalara örnek gösterilebilir. Genel olarak tüm pilot bölgelerde bina köşeleri de çok iyi sınıflandırılamamıştır. Minimum bina boyutu 20 m^2 olarak gerçekleştirilen sınıflandırma diğer minimum bina boyutu parametreleri ile yapılan sınıflandırma sonuçlarına göre çok daha iyi sonuç vermiştir. Yine 20 m^2 minimum bina boyutu ile bina sınıfına ait noktalar incelendiğinde önceki durumlarda sınıflandırılamayan bina noktaları artık bina olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 4.16c, Şekil 4.18c).



(a)



(b)



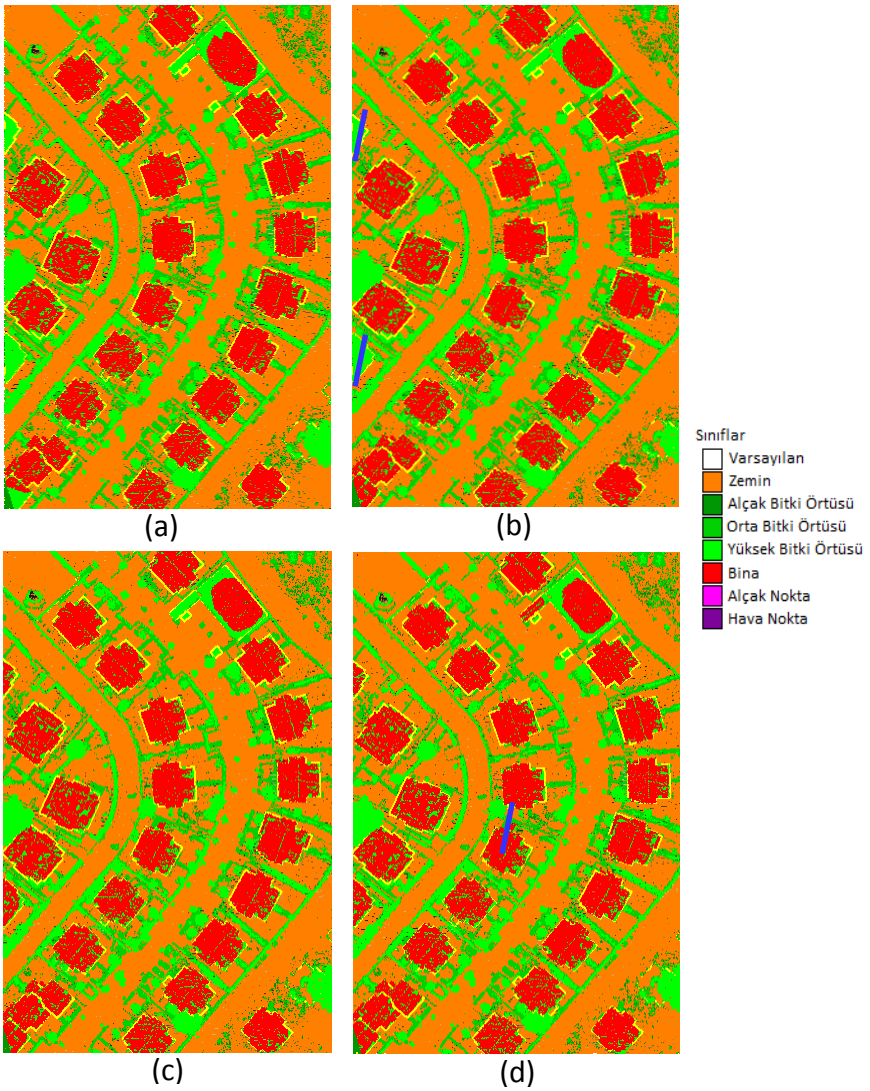
(c)

Şekil 4. 15 Test Alanı 2' deki pilot bölge 1 (a), pilot bölge 2 (b), pilot bölge 3 (c)' e ait ortofotolor ve yüksekliğe göre renklendirilmiş nokta bulutları

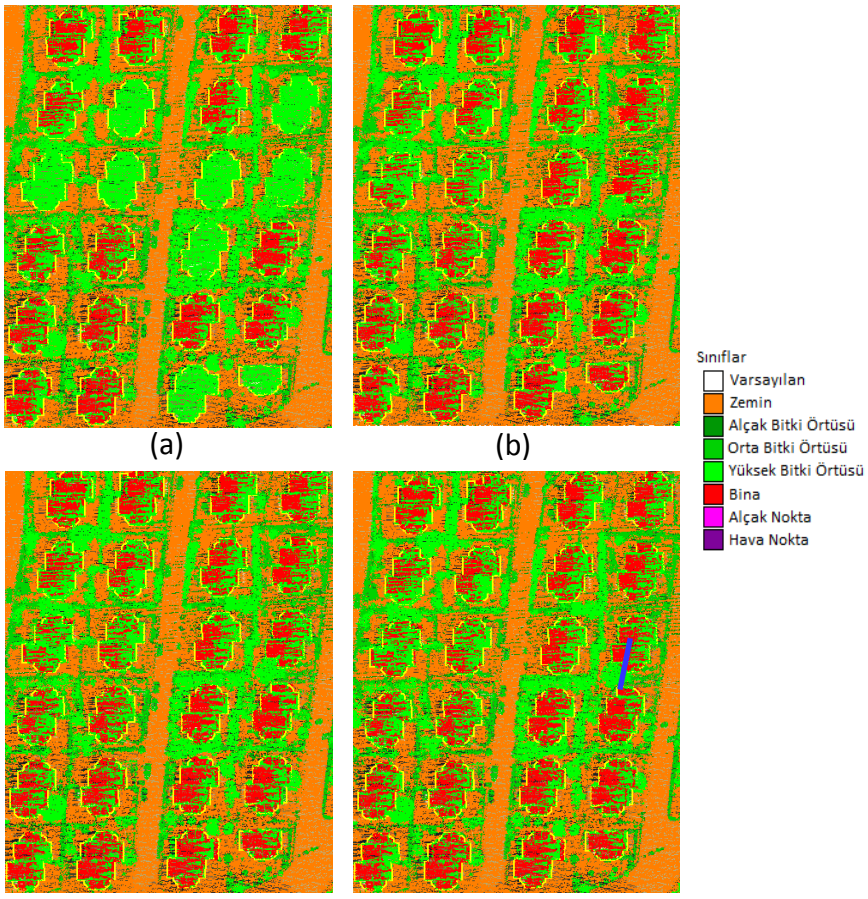
Minimum bina boyutu 10 m^2 yapıldığında ise sonuçların 20 m^2' ye çok yakın olduğu görülmüştür. Hatta özellikle bazı bina köşelerinde 20 m^2' dekinden daha iyi sınıflandırma sonucu elde edilmiştir (Şekil 4.16d, Şekil 4.17d, Şekil 4.18d). Fakat elde edilen sınıflandırılmış nokta bulutu dikkatle incelendiğinde Şekil 4.16d ve Şekil 17d' deki düz çizgi ile işaretli kısımlarda görüldüğü gibi fotogrametrik haritadan elde edilen

bina sınırlarının (sarı çizgi olarak görünen) dışında da bazı yeşil alan noktaları bina sınıfına dâhil edilmiştir. Bu durum minimum bina boyutu 20 m^2 olduğu durumda da söz konusudur ancak bu değer 10 $m^{2'}$ ye indirildiğinde yanlış sınıflandırılan nokta sayısında artış gözlenmiştir. Özellikle ormanlık alanlarda, bina olmadığı halde bina olarak sınıflandırılan noktalar bulunduğu tespit edilmiştir.

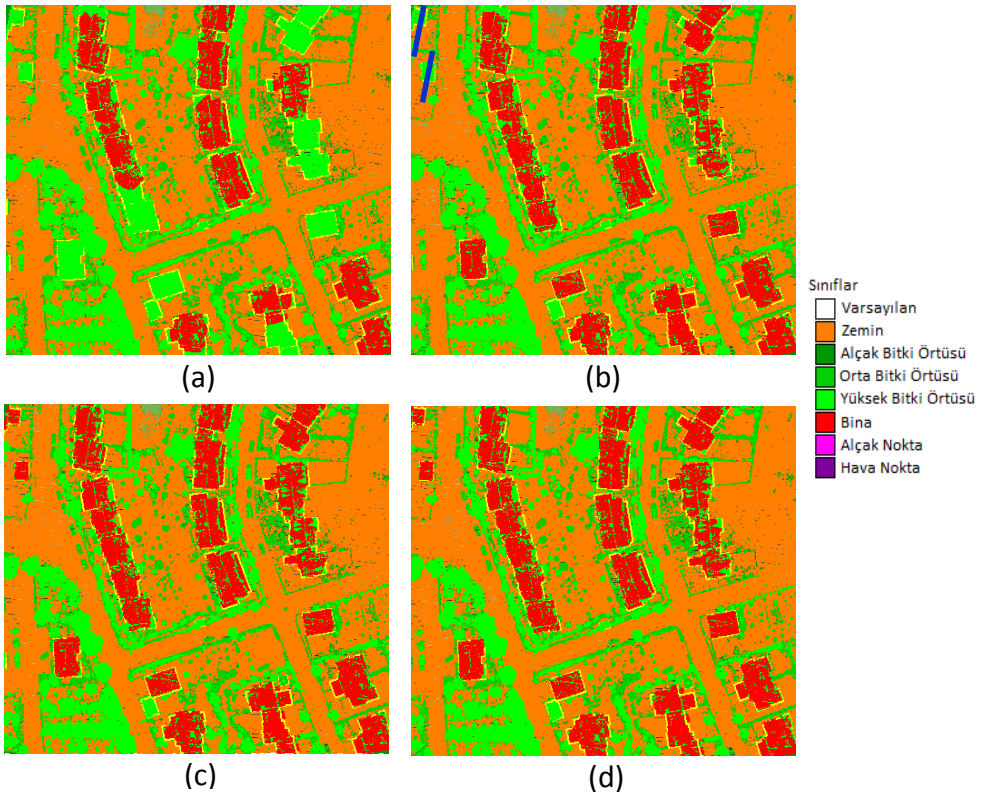
Minimum bina boyutu değeri için, gerçekleştirilen analizler dikkate alındığında Standart Yaklaşım' da kullanılan 50 m^2 değeri yerine 20 m^2 kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 4. 16 Pilot bölge 1' de minimum bina boyutu 100 m^2 (a), 50 m^2 (b), 20 m^2 (c) ve 10 m^2 (d) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları



Şekil 4. 17 Pilot bölge 2’ de minimum bina boyutu 100 m^2 (a), 50 m^2 (b), 20 m^2 (c) ve 10 m^2 (d) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları

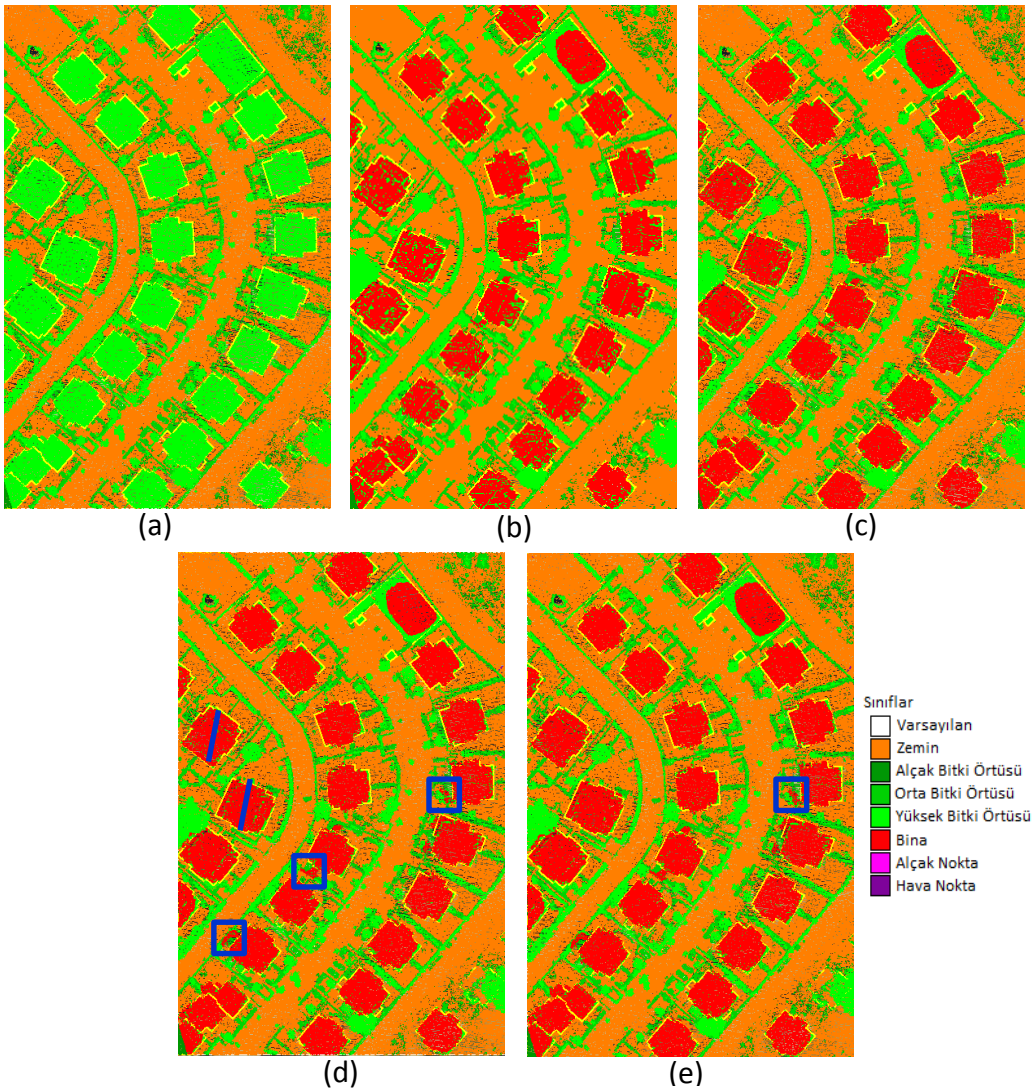


Şekil 4. 18 Pilot bölge 3' de minimum bina boyutu 100 m^2 (a), 50 m^2 (b), 20 m^2 (c) ve 10 m^2 (d) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları

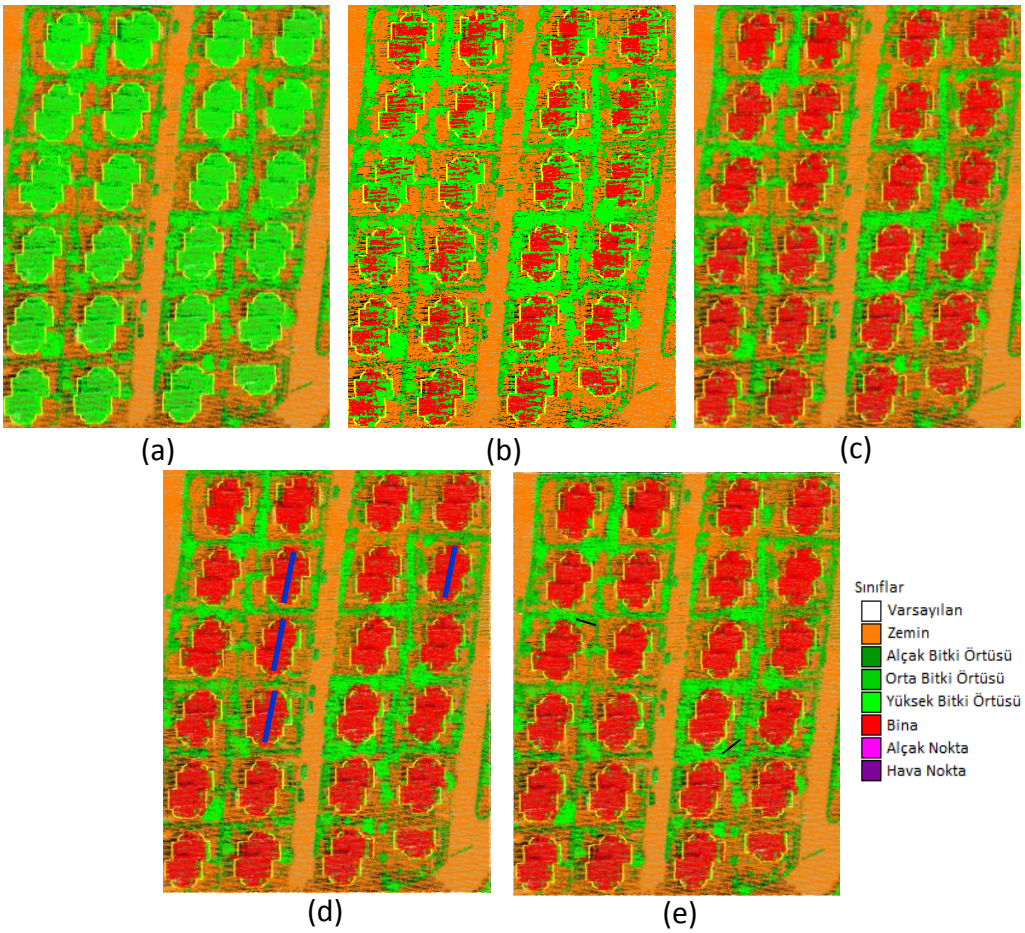
Bina sınıfına ait nokta bulutunun sınıflandırılmasında kullanılan diğer parametre Z hata payı değeri, metre cinsinden lazer noktalarının yaklaşık yükseklik doğruluğunu ifade etmektedir. Standart Yaklaşım' da Z hata payı değeri 0.12 m olduğundan, bu değere ek olarak 0.01 m, 0.10 m, 0.50 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m ve 5 m değerlerinin yer aldığı kurallar bütünü ile üç pilot bölgede sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Z hata payı değerinin 0.01 m, 0.12 m, 0.5 m, 1.5 m ve 2 m olduğu sınıflandırma sonuçları Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21' de verilmiştir. Bu değer girilebilen en küçük değer olan 0.01 iken bina olarak sınıflandırılması gereken noktaların tümü yeşil alan olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 4.19a, Şekil 4.20a, Şekil 4.21a). Z hata payı değeri arttırıldıkça bina noktaları sınıflandırılmaya başlamıştır. Standart Yaklaşım' daki 0.12 m değeri ile sınıflandırılan sonuç incelendiğinde binaların tümünün sınıflandırıldığı fakat bina olarak sınıflandırılan noktaların arasında yüksek bitki örtüsü sınıfına ait noktalar bulunduğu görülmüştür (Şekil 4.19b, Şekil 4.20b, Şekil 4.21b). Bu noktalar çoğunlukla dubleks evlerde çatıların düzgün olmadığı alanlarda görülmüştür. Z hata payı değeri 0.5 m olarak belirlendiğinde üç pilot bölgede de bina sınıfındaki yüksek bitki örtüsü noktalarının azaldığı

gözlenmiştir (Şekil 4.19c, Şekil 4.20c, Şekil 4.21c). Fakat özellikle Şekil 4.19d ve Şekil 4.21d' deki düz çizgi ile işaretli binalar incelendiğinde Z hata payı 1.5 m olarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda, bu değerin 0.5 m olduğu duruma göre bina sınıfı olarak sınıflandırılan yüksek bitki örtüsü noktalarının daha da azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, Z hata payı 1.5 m olarak gerçekleştirilen sınıflandırılma sonucunda yüksek bitki örtüsü sınıfına ait olup bina olarak sınıflandırılan noktalar bulunmaktadır (Şekil 19d ve 21d' deki kare ile çevrilmiş alanlar içindeki noktalar). Z hata payı 2 m olarak gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinde ise yüksek bitki örtüsü sınıfına ait olup bina olarak sınıflandırılan bazı noktaların sayısında artış gözlemlenmiştir (Şekil 19e ve 21e' deki kare ile çevrilmiş alanlar içindeki noktalar).

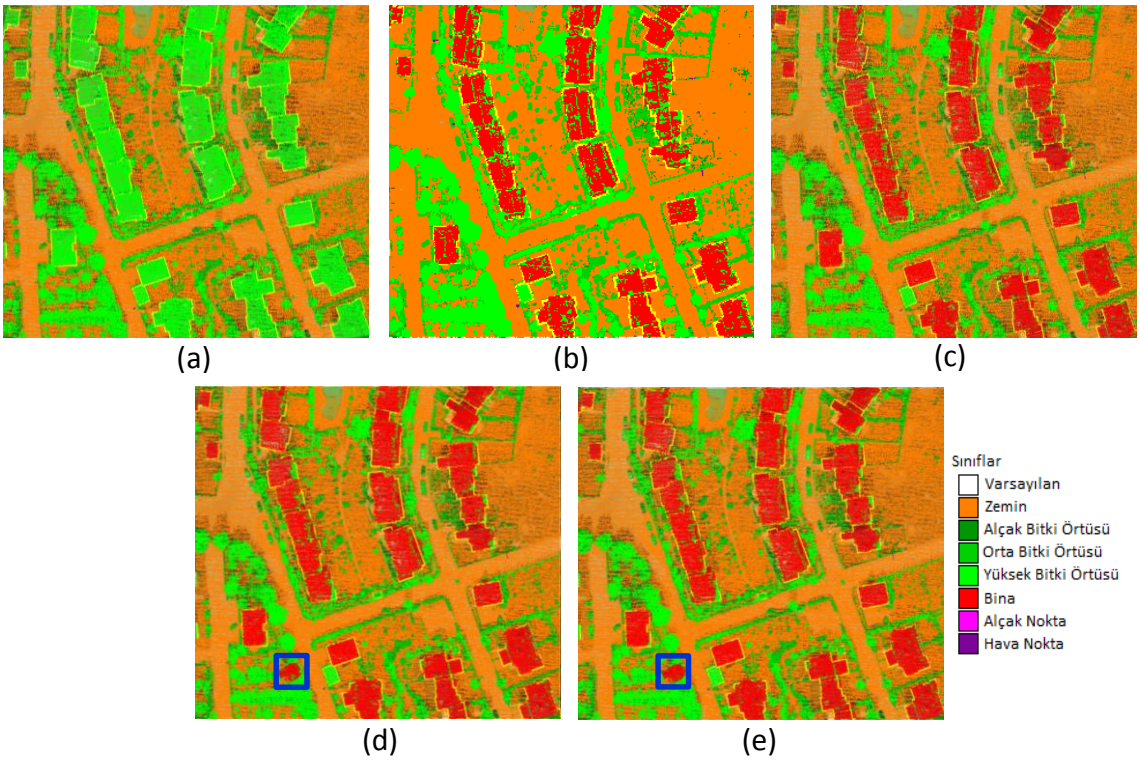
Z hata payı değeri için gerçekleştirilen analizler dikkate alındığında yine Standart Yaklaşım' da kullanılan 0.12 m değerinden farklı olarak Z hata payı değeri için 1.5 m değerinin kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 4. 19 Pilot bölge 1' de Z hata payı değeri 0.01 m (a), 0.12 m (b) 0.5 m (c), 1.5 m (d) ve 2 m (e) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları



Şekil 4. 20 Pilot bölge 2’ de Z hata payı değeri 0.01 m (a), 0.12 m (b) 0.5 m (c), 1.5 m (d) ve 2 m (e) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları

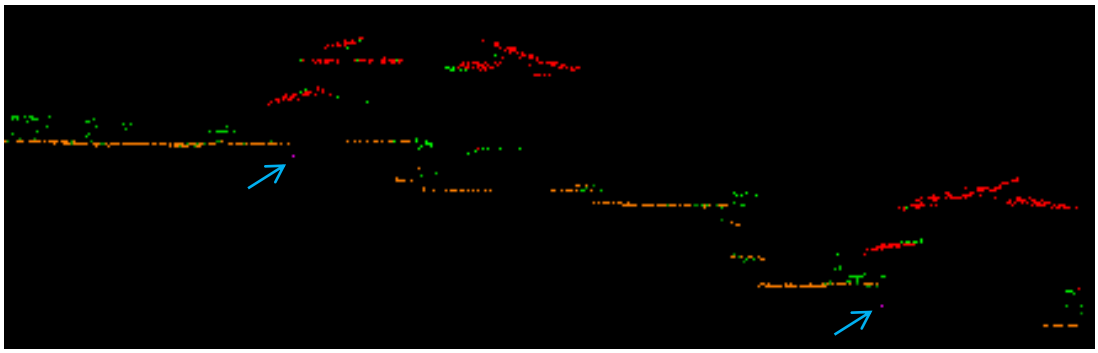


Şekil 4. 21 Pilot bölge 3' de Z hata payı değeri 0.01 m (a), 0.12 m (b), 0.5 m (c), 1.5 m (d) ve 2 m (e) olduğunda elde edilen sınıflandırma sonuçları

4.2.4.4 Diğer Parametre Analizleri

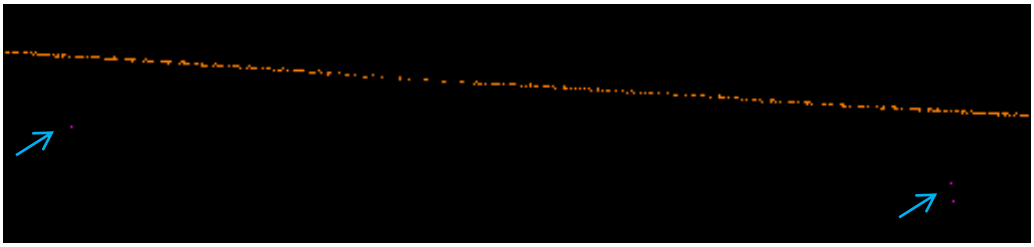
Zemin, bitki örtüsü ve bina sınıflarının elde edilebilmesi için gerçekleştirilen paramatre analizlerinin yanında alçak noktalar, yüzeyin altı ve hava noktalar kuralları içinde paramatre analizi yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, kurallar bütünündeki alçak noktalar (low points) sınıflandırılmasında, değişken değerler alabilen 'Maksimum sayı (Max. Count)', 'Belli bir yükseklikten daha alçakta olan noktalar (lower than others)' ve 'Belli bir yarıçap içinde (within)' parametreleri için Standart Yaklaşım' dan farklı olarak sırasıyla 24, 0.3 m ve 2 m değerleri uygun bulunmuştur. Şekil 4.22' deki gibi bir test bölgesindeki tüm kesitler ayrı ayrı incelenerek belirlenen değerlerin alçak noktaları büyük ölçüde sınıflandırdığı görülmüştür.



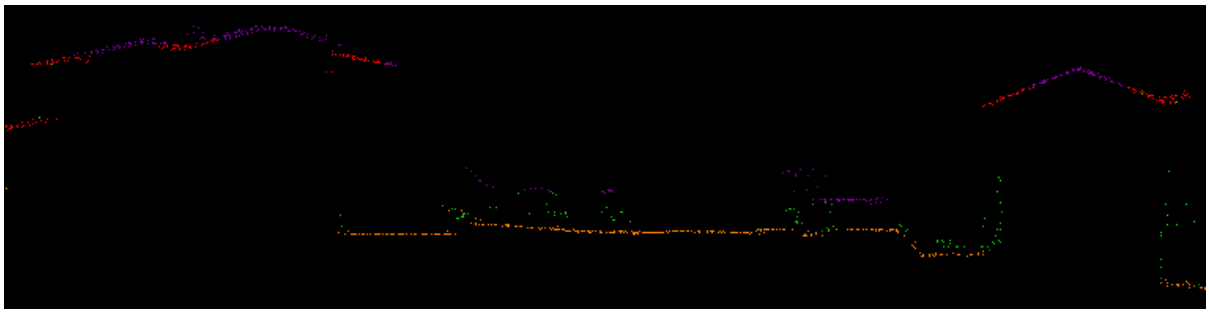
Şekil 4. 22 Alçak nokta adımının kontrolü için alınan bir kesit doğrultusundaki alçak noktalar

Kurallar bütünündeki yüzeyin altı (below surface) seçeneği için 'Z hata payı' değeri ve komşu noktalar arasındaki yükseklik farklarının standart sapmasının çarpılacağı 'Limit' değeri değişken parametrelerdir. Standart Yaklaşım' daki yüzeyin altı kuralında Z hata payı değeri 0.10 m ve limit değeri 8 iken, yapılan analizler sonucunda zemin noktalarının bulunduğu kesitler (Şekil 4.23) incelenerek Z hata payı değeri Standart Yaklaşımda ile aynı bırakılmış, limit değeri ise 7 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 23 Yüzeyin altı adımının kontrolü için alınan bir kesit doğrultusundaki noktalar

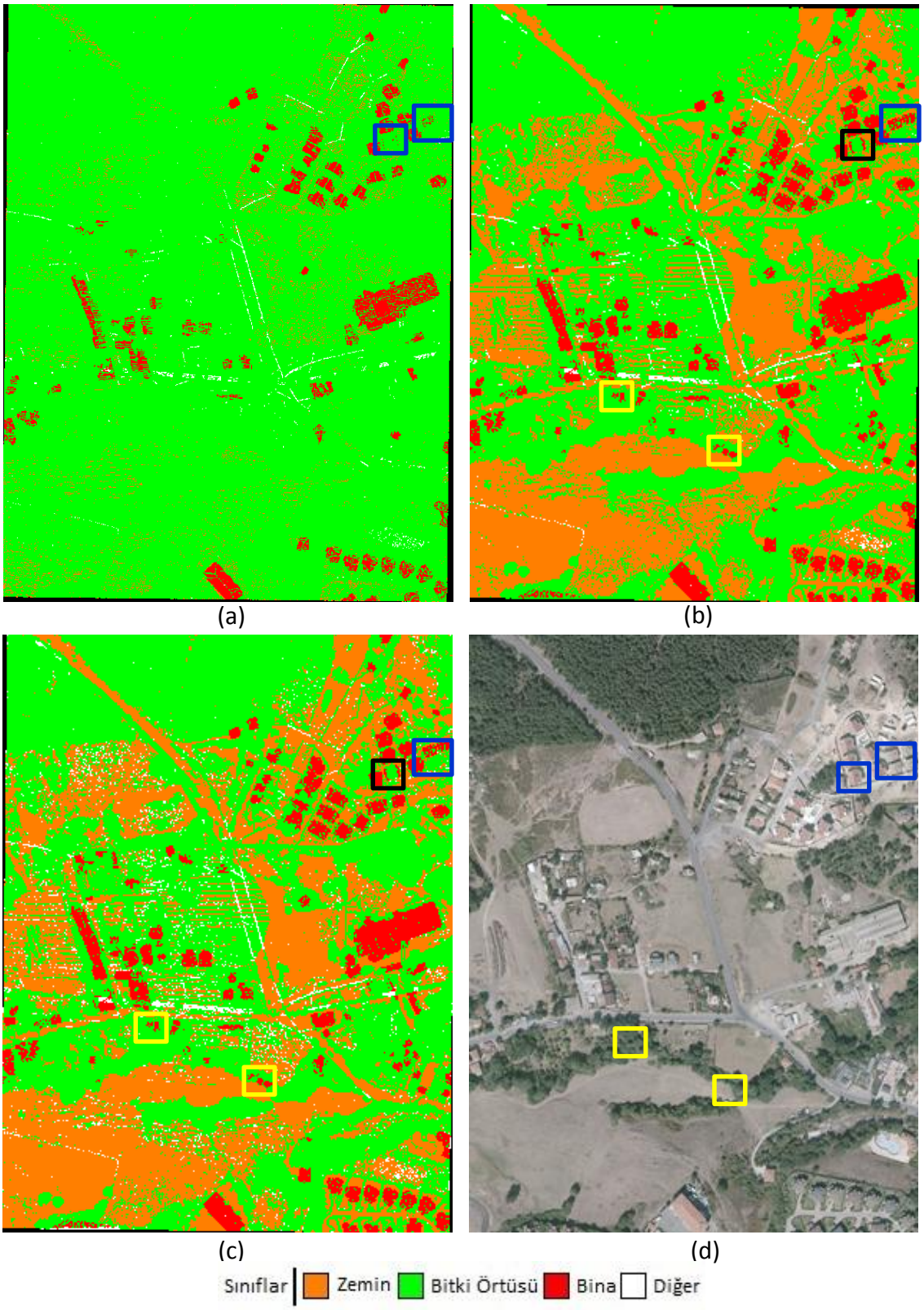
Hava nokta (air points) sınıflandırma seçeneğinde ise, 'Arama yarıçapı (search radius)', bu yarıçap değeri içindeki 'Minimum nokta sayısı (require)' ve 'Limit' değeri değişken parametrelerdir. Standart Yaklaşım' da bu değerler sırasıyla 5 m, 10 nokta ve 5 şeklindedir. Yapılan analizlerde limit değerinin en çok değişime sebep olan parametre olduğu ortaya çıkmıştır. Bu değer çok küçük seçilirse bina çatıları ya da bitki örtüsü noktaları hava nokta olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.24). Bu nedenle yine kesitler incelenerek arama yarıçapı ve minimum nokta sayısı Standart Yaklaşım' daki haliyle bırakılması, limit değerinin ise 4 yapılması uygun görülmüştür.



Şekil 4. 24 Hava nokta adımındaki limit değerinin çok küçük olduğu sınıflandırma sonucu

4.2.5 Test Alanlarındaki Nokta Bulutunun Nokta Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi ile Otomatik Sınıflandırılması

Gerçekleştirilen detaylı parametre testlerinin ardından, çalışma bölgesinde belirlenen farklı arazi karakteristiğine sahip seyrek yerleşim alanı (Test Alanı 1), kentsel alan (Test Alanı 2) ve ormanlık alana (Test Alanı 3) ait nokta bulutu verileri Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada kullanılan Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2, parametre analizleri sonucu belirlenen parametreler kullanılarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirmektedir. Sınıflandırma işlemi tamamlandıktan sonra zemin, alçak bitki örtüsü, orta bitki örtüsü, yüksek bitki örtüsü, bina, varsayılan, alçak nokta ve hava nokta sınıfları elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda tek bir bitki örtüsü sınıfı elde edilmesi öngörüldüğünden sınıflandırma işlemi tamamlandıktan sonra alçak bitki örtüsü, orta bitki örtüsü ve yüksek bitki örtüsü sınıfları birleştirilerek tek bir bitki örtüsü sınıfı altında toplanmıştır. Ayrıca varsayılan, alçak nokta ve hava nokta sınıfları da diğer olarak isimlendirilen tek bir sınıf altında toplanmıştır. Seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alanın Standart Yaklaşım ve bu çalışma kapsamında geliştirilen Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırma işlemi sonuçları ve bölgelerin ortofotoları sırasıyla Şekil 4.25, 4.26 ve Şekil 4.27’ de verilmiştir.



Şekil 4. 25 Seyrek yerleşim alanının (Test Alanı 1) Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) ile sınıflandırma sonuçları ve ortofotosu (d)

Seyrek yerleşim alanında Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları incelendiğinde zemin sınıfının büyük oranda sınıflandırılamadığı, zemin olarak sınıflandırılması gereken noktaların bitki örtüsü sınıfına atandığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, zemin sınıfı ile bitki örtüsü sınıfı arasında sınıf karışması söz konusudur. Standart Yaklaşım sonucunda elde edilen bina sınıfı incelendiğinde ise, Şekil 4.25a' da mavi renkteki kare ile işaretlenmiş kısımlarda görüldüğü üzere sınıflandırılamayan binaların bulunduğu görülmektedir. Şekil 4.25d' de eksik olan bu binalar yine mavi renkte kare ile işaretlenmiş bir şekilde görülmektedir. Standart Yaklaşım ile sınıflandırılan binalarda ise, binalara ait nokta bulutları arasında, özellikle çatı kısmındaki noktaların arasında bitki örtüsü olarak sınıflandırılan çok sayıda nokta bulunmaktadır. Yine sınıflandırılan binalara ilişkin nokta bulutları detaylı bir şekilde incelendiğinde bina köşelerine ait nokta bulutlarında sıkıntılar olduğu, buradaki noktaların bazılarının diğer sınıfında, bazılarının da bitki örtüsü sınıfında bulunduğu gözlemlenmiştir. Özetle, seyrek yerleşim alanında Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma beklenilen sınıflandırma performansının altında kalmıştır.

Seyrek yerleşim alanında Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları incelendiğinde, iki yaklaşımın birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Her iki yaklaşımla elde edilen sınıflandırma sonuçları, Standart Yaklaşım ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, zemin sınıfının çok daha doğru bir şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir (Şekil 4.25b ve 4.25c). Seyrek yerleşim alanında yolların bulunduğu alanlar Standart Yaklaşım ile sınıflandırma sonucunda büyük ölçüde bitki örtüsü olarak sınıflandırılmışken, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' de başarılı bir şekilde zemin sınıfına atanmıştır. Bununla birlikte Şekil 4.25b ve 4.25c'nin orta kısmında bulunan yolun bir kısmının hala bitki örtüsü sınıfına atandığı görülmektedir.

Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucuna göre, Standart Yaklaşım' daki mavi renkte kare ile işaretli kısımlarda (Şekil 4.25a) bulunan binalardan bazıları neredeyse tamamen sınıflandırılmış (Şekil 4.25b ve Şekil 4.25c' deki siyah renkli kare ile işaretlenmiş kısım), bazılarında ise yine sınıflandırma başarısız olmuş, sadece bina sınır çizgileri sınıflandırılmıştır (Şekil 4.25b ve Şekil 4.25c' deki mavi renkli kare ile işaretlenmiş kısım). Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucuna

göre elde edilen bina sınıfına ait noktalarda, özellikle çatı kısmındaki noktaların arasında bitki örtüsü olarak sınıflandırılan nokta sayısı oldukça azalmıştır. Benzer şekilde bina köşelerine ait nokta bulutlarında, yanlış sınıflandırılan nokta sayılarında belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucuna göre Şekil 4.25b ve Şekil 4.25c' deki sarı renkli kare ile gösterilen bölgelerde ise bina olmadığı halde bina olarak sınıflandırılan noktalar mevcuttur. Şekil 4.25d' de yine sarı renkli kare ile bina olmayan bu kısımlar görülmektedir. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda test alanında bulunan elektrik hatları diğer sınıfı olarak başarı ile sınıflandırılmıştır. Seyrek yerleşim alanında Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 sınıflandırma sonuçları genelde birbirine yakındır. Görülen temel farklılık diğer sınıflarına atanan nokta sayısıdır. Yaklaşım 2' de ile elde edilen diğer sınıfında Yaklaşım 1' e göre daha fazla sayıda nokta bulunmaktadır. Bu durum sınıflandırılamayan noktaların da Yaklaşım 2' de diğer sınıfına atanması olarak ile açıklanabilir.

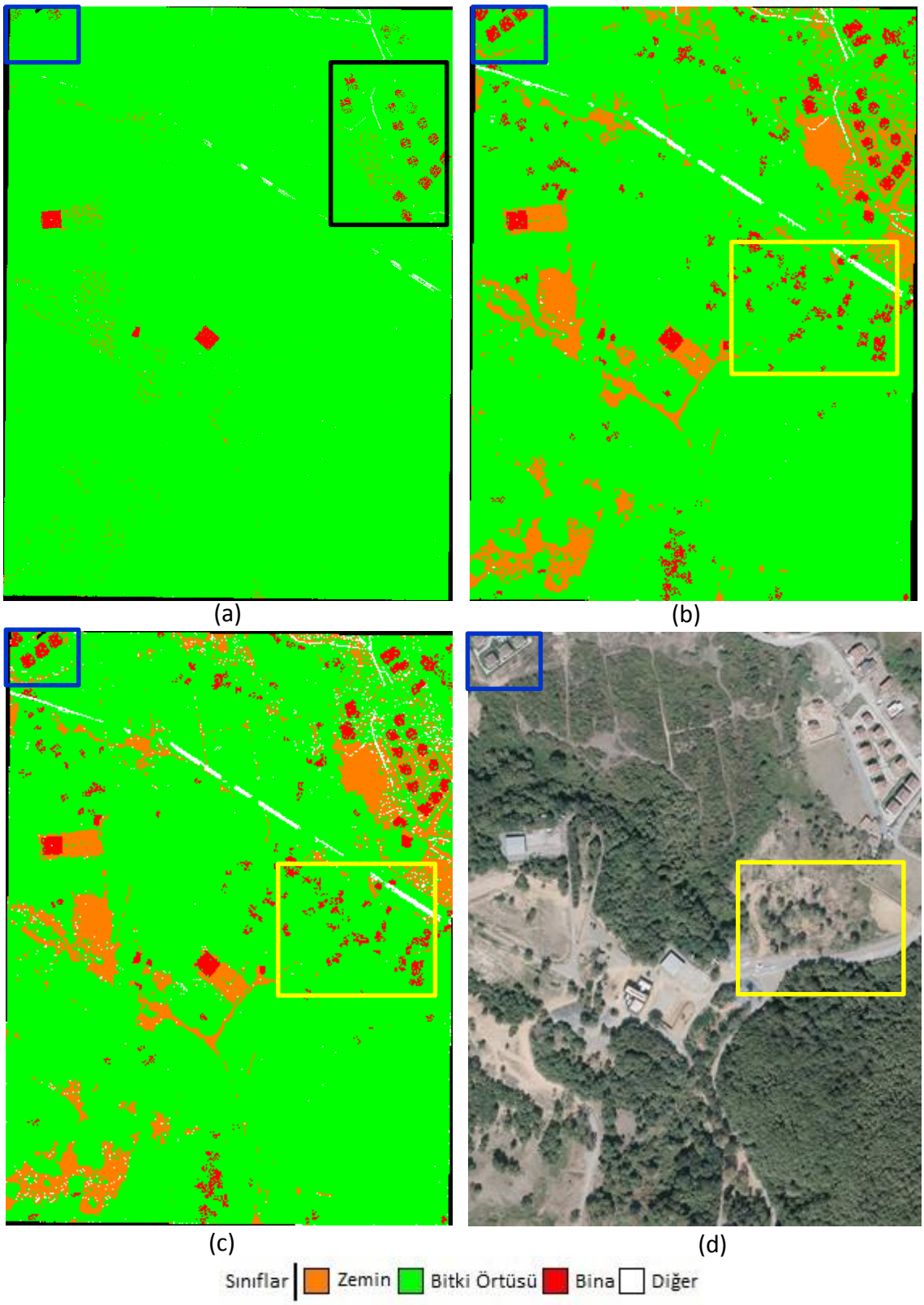
Kentsel alandaki sınıflandırma sonuçlarına göre, Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmada seyrek yerleşim alanlarındaki gibi zemin sınıfı nerdeyse hiç sınıflandırılamamış, zemin olarak sınıflandırılması gereken noktalar bitki örtüsü sınıfına atanmıştır. Standart Yaklaşım ile sınıflandırma sonucunda kentsel alanda bina sınıfına atanan noktalar incelendiğinde, test alanındaki binaların tamamına yakın bir kısmının başarı ile bina sınıfına atandığı, yalnızca Şekil 4.26a' da sarı renkle işaretlenen kare bir alandaki inşaat halindeki birkaç binanın sınıflandırılamadığı görülmüştür. Standart Yaklaşım kullanılarak sınıflandırılamayan bu inşaat halindeki binalar Şekil 4.26d' deki ortofoto üzerinde de işaretlenmiştir. Bunlara ek olarak kentsel alanda Standart Yaklaşım kullanılarak yapılan sınıflandırma sonuçlarına göre Şekil 4.26a' da beyaz renkli kare ile işaretlenen kısımdaki binalara ait nokta bulutları arasında, özellikle çatı kısmındaki noktaların arasında bitki örtüsü olarak sınıflandırılan çok sayıda nokta bulunmaktadır. Ayrıca sınıflandırılan binalara ilişkin nokta bulutları detaylı bir şekilde incelendiğinde de bina köşelerine ait noktaların bitki örtüsü sınıfına atandığı gözlemlenmiştir. Kentsel alanda yine Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma beklentileri karşılayamamıştır.



Şekil 4. 26 Kentsel alanın (Test Alanı 2) Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) ile sınıflandırma sonuçları ve ortofotosu (d)

Kentsel alanda Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları seyrek yerleşim alanında olduğu gibi yine birbirine çok yakındır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırma sonuçları Standart Yaklaşım ile karşılaştırıldığında zemin sınıfının çok daha doğru bir şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir (Şekil 4.26b ve 4.26c). Test alanındaki binalar arasından geçen yolların büyük bir çoğunluğu, Standart Yaklaşım ile sınıflandırmada bitki örtüsü sınıfına atanmışken Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırma sonucunda zemin sınıfına dâhil edilmiştir. Bununla birlikte, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırma sonuçlarında Şekil 4.26b, Şekil 4.26c ve Şekil 4.26d' deki mavi kare ile belirlenen alanlarda zemin sınıfına atanması gereken noktalar bitki örtüsü sınıfına atanmıştır.

Kentsel alanlarda Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilen bina sınıfı incelendiğinde, binaların büyük bir çoğunluğu sınıflandırılmıştır. İnşaat halindeki binalar Standart Yaklaşım' da olduğu gibi burada da bina olarak sınıflandırılamamıştır (Şekil 4.26b ve Şekil 4.26c' de sarı renkli kare ile işaretlenmiş alanlar). Bu durum zemin sınıfından belirli yükseklikte noktaların bina sınıfına atanması ile açıklanabilir. Standart Yaklaşım' daki binalara ait nokta bulutları arasında bulunan, bitki örtüsü olarak sınıflandırılan noktalar Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırma sonucunda bina sınıfına atanmıştır. Benzer şekilde Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırma sonucunda, Standart Yaklaşım' daki bina köşelerinde yanlış sınıflandırılan nokta sayılarında da belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' nin kullanıldığı sınıflandırmalarda Şekil 4.26b, Şekil 4.26c ve Şekil 4.26d' deki siyah kare ile belirtilmiş alanda bitki örtüsü olarak sınıflandırılması gereken noktalar bina sınıfına atanmıştır. Bu durum normalde pek karşılaşılması mümkün olmayan kentsel alan içerisinde yer alan ormanlık alanlarla ilgilidir. Bu tür yanlış sınıflandırmalar Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' de bina kuralı içerisinde kullanılan Z hata payı değerinin bu test alanı için yeterince küçük olmamasından kaynaklanmaktadır. Kentsel alandaki, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 sınıflandırma sonuçları arasında seyrek yerleşim alanında olduğu gibi diğer sınıfına atanan nokta sayıları açısından büyük bir farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 4. 27 Ormanlık alanın (Test Alanı 3) Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) ile sınıflandırma sonuçları ve ortofotosu (d)

Ormanlık alan olarak nitelendirilen test alanındaki sınıflandırma sonuçları incelendiğinde seyrek yerleşim alanı ve kentsel alandaki sınıflandırmalara benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen ormanlık alan sınıflandırmasına göre, yine büyük bir çoğunlukla zemine ait olması gereken noktaların bitki örtüsü sınıfına atandığı görülmektedir. Zemin sınıfı ile bitki örtüsü sınıfı arasında sınıf karışması Standart Yaklaşım kullanılarak sınıflandırılan ormanlık alanda da ortaya çıkmıştır. Standart Yaklaşım' ın kullanıldığı sınıflandırma sonuçlarına göre elde edilen bina sınıfı incelendiğinde ise Şekil 4.27a ve 4.27d' de mavi renkteki kare ile işaretlenmiş kısımlarda bina olarak sınıflandırılması gereken noktaların bitki örtüsü olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. Ormanlık alanda, Şekil 4.27a' da siyah kare ile işaretlenmiş kısımdaki binalara ait nokta bulutları arasında, özellikle çatı kısmındaki noktaların arasında bitki örtüsü olarak sınıflandırılan çok sayıda nokta bulunmaktadır. Ormanlık alanda Standart Yaklaşım'ın kullanıldığı sınıflandırma sonucunda bitki örtüsü olup bina olarak sınıflandırılan noktalara rastlanmamıştır.

Ormanlık alanda, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları diğer iki test alanında olduğu gibi birbirine çok yakındır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile ormanlık alanda gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda zemin sınıfı diğer test alanlarına göre daha düşük doğrulukla sınıflandırılmıştır. Özellikle Şekil 4.27b, Şekil 4.27c' de zemin sınıfında bulunması gereken yola ait noktalar genellikle bitki örtüsü sınıfına atanmıştır.

Ormanlık alanda Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırma sonucu elde edilen bina sınıfı incelendiğinde, test alanında bulunan binaların çoğunlukla bina sınıfına dâhil edildiği görülmüştür. Şekil 4.27b ve Şekil 4.27c' deki mavi kare ile işaretlenmiş kısımlardaki Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmada sınıflandırılamayan binalar Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanıldığında sınıflandırılmıştır. Binalara ait nokta bulutları arasında bulunan, bitki örtüsü olarak sınıflandırılan noktalar ormanlık alanda da Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırma sonucunda büyük çoğunlukla bina sınıfına atanmıştır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucuna göre özellikle Şekil 4.27b ve Şekil 4.27c' de sarı renkteki kare ile işaretlenen alanlarda bina olmadığı halde bina olarak sınıflandırılan çok sayıda bitki örtüsü noktası görülmektedir. Şekil 4.27d' de sarı renkteki bu kare ile

belirlenen alanda bina noktalarının yer almadığı açıkca görülmektedir. Bu durum daha önce de ifade edildiği gibi bina kuralı içerisinde kullanılan Z hata payı değerinin ormanlık alan içinde yeterince küçük olmamasından kaynaklanmaktadır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda test alanında bulunan elektrik hatları başarılı bir şekilde diğer sınıfına atanmıştır. Diğer olarak isimlendirilen bu sınıf incelendiğinde, her iki yaklaşımla da birbirine yakın sayıda noktanın bu sınıfa atandığı görülmektedir.

Burada ifade edilmesi gereken diğer önemli bir nokta, seyrek yerleşim alanı (Test Alanı 1), kentsel alan (Test Alanı 2) ve ormanlık alanların (Test Alanı 3) sınıflandırılmasında kullanılan Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 için geliştirilen kural setlerinde hep aynı parametrelerin kullanıldığıdır. Bu çalışmadaki temel hedeflerden biri, sadece tek bir arazi tipi için yüksek doğruluklu sonuçların elde edilmesi yerine farklı arazi tiplerinde optimum doğruluk veren bir yaklaşım geliştirilmesidir.

Bu bölümde çoğunlukla görsel olarak yapılan inceleme sonucunda elde edilen sınıflandırma sonuçları analiz edilmiştir. Detaylı doğruluk analizleri bir sonraki bölümde verilmiştir.

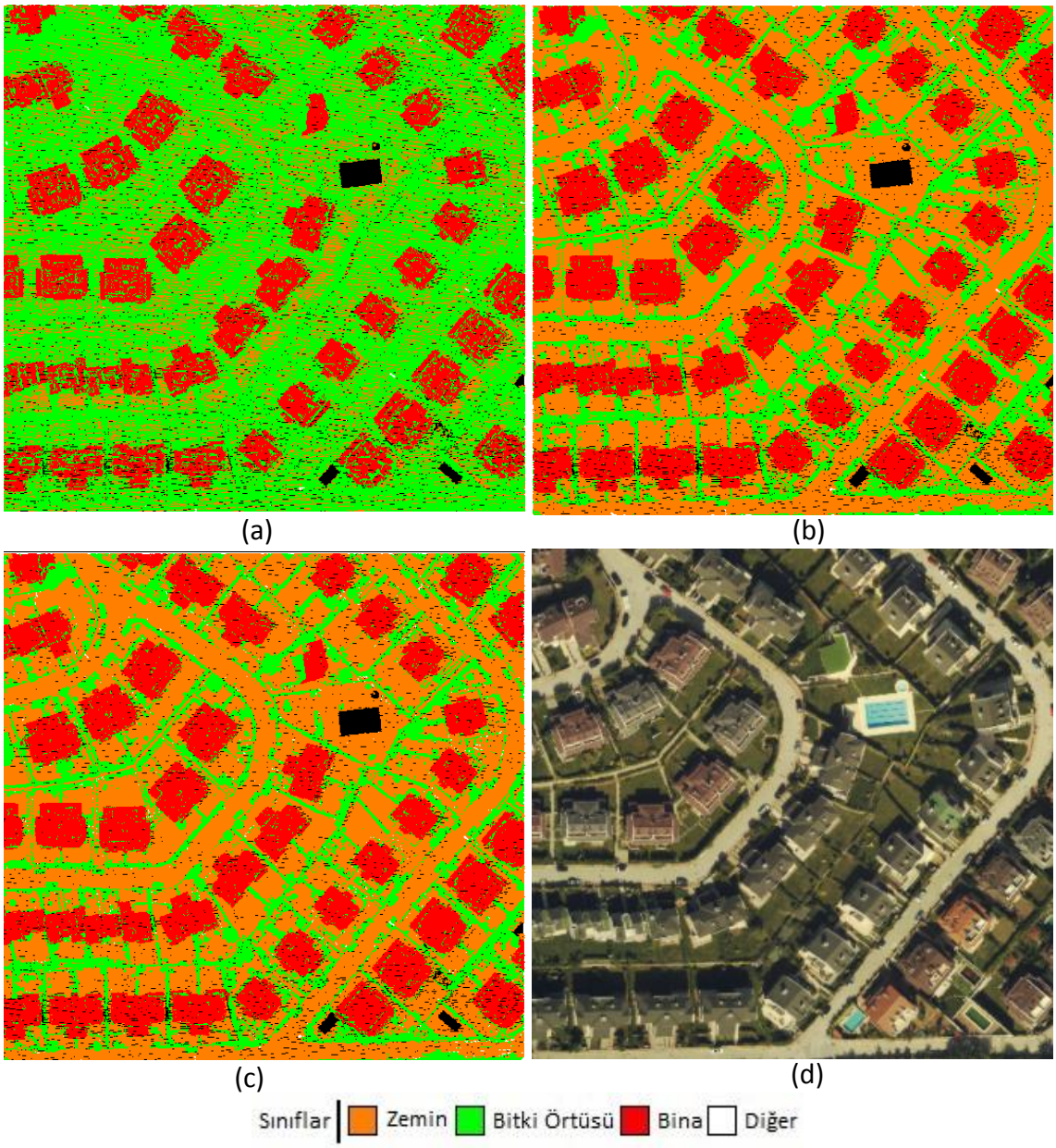
4.3 Doğruluk Analizi

Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırmaların doğruluğu, 1/1000 ölçekli 2013 tarihli fotogrametrik harita ve 1/1000 ölçekli 2013 tarihli ortofotolardan yararlanılarak elle sayısallaştırma sonucunda elde edilmiş referans veriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen sınıflandırma işleminin doğruluk analizinin yapılması için, görüntü sınıflandırmada istatistiksel doğruluk analiz yöntemlerinden biri olan 'Hata Matrisi ve Hata Matrisinden Türetilen Doğruluk Değerlendiricileri' yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntem, uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kullanılan ve sınıflandırma işlemi sonucunda bir sınıfa atanan pikselleri esas almaktadır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sınıflandırma işlemi doğrudan noktaları esas almaktadır. Bu nedenle bu çalışmada doğruluk analizi için pikseller yerine noktalar esas alınarak 'Hata Matrisi ve Hata Matrisinden Türetilen Doğruluk Değerlendiricileri' yöntemindeki hata matrisi oluşturulmuş ve bu matristen yararlanılarak genel doğruluk, üretici doğruluğu (user's

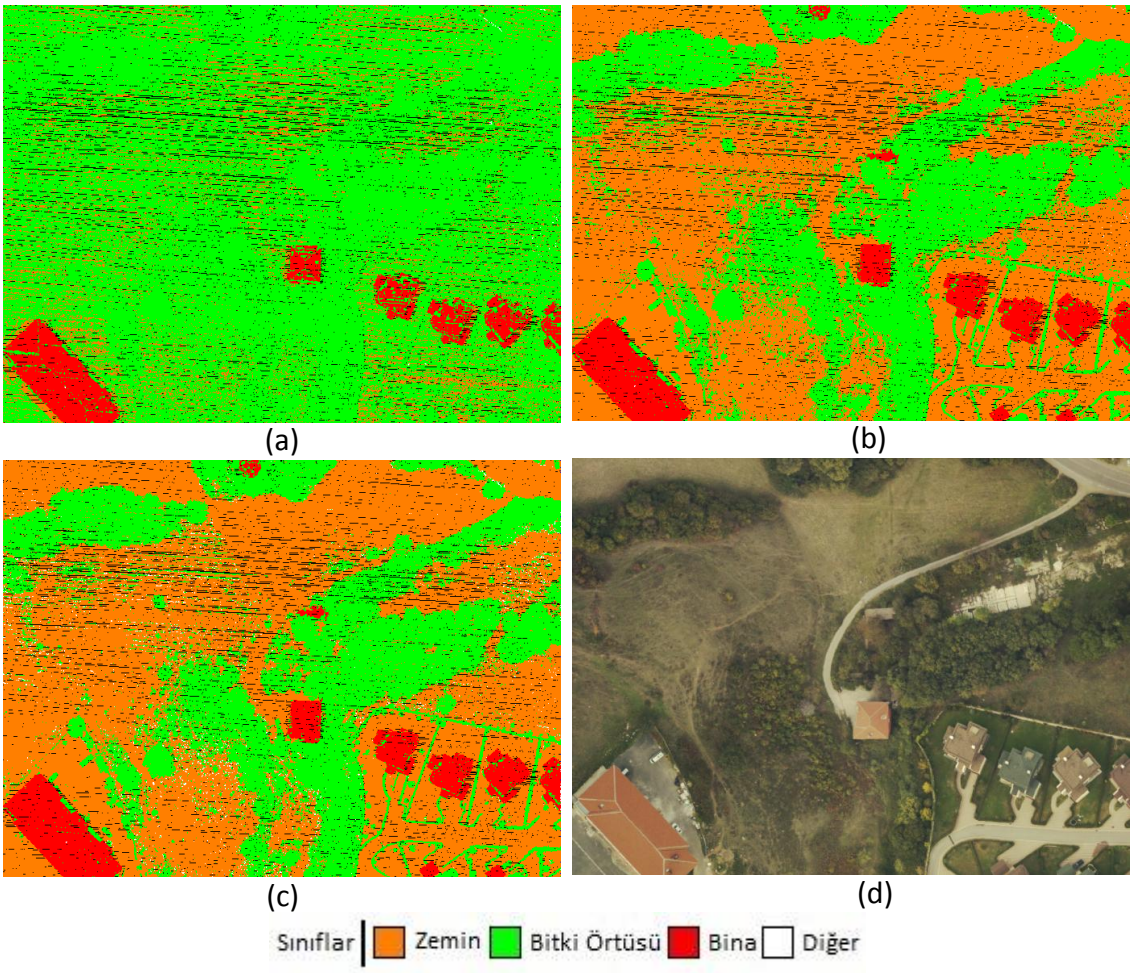
accuracy) ve kullanıcı doğruluğu (user's accuracy) değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemin uyarlanması için, referans verideki sınıf sınırları (kapalı alan) üzerine nokta tabanlı sınıflandırma sonucunda elde edilen noktalar her bir sınıf için ayrı ayrı açılarak doğru sınıflandırılan nokta sayıları ve farklı sınıflarda yanlış sınıflandırılan nokta sayıları belirlenmiştir. Bu şekilde yapılan doğruluk analizine daha önce literatürde rastlanmamıştır. Bu yöntem, bu çalışma kapsamında doğruluk analizi için önerilen bir yaklaşımdır.

Doğruluk analizi için, seyrek yerleşim alanı olarak isimlendirilen Test Alanı 1 ve kentsel alan olan Test Alanı 2' de birer pilot bölge seçilmiştir. Pilot bölge 1, çok sayıdaki binaya ek olarak, zemin sınıfında yer alması gereken yollar, yüzme havuzu, çalılar, ağaçlar ve arabalar gibi farklı karakteristikteki objeleri içerdiğinden doğruluk analizi için seçilmiştir. Pilot bölge 2 ise, hem açık alan hem de ağaçlık alanın bulunduğu bir bölge olduğundan, daha çok zemin ve bitki örtüsü sınıflarının doğruluğunu analiz etmek için doğruluk analizlerinde kullanılmak üzere belirlenmiştir.

Birinci pilot bölge 919 462, ikinci pilot bölge 1 029 791 noktadan oluşmaktadır ve sınıflandırma sonucu zemin, bitki örtüsü, bina, diğer olmak üzere 4 sınıfa ayrılmışlardır. Pilot bölge 1 ve pilot bölge 2' nin Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak sınıflandırma sonuçları ve ortofotoları Şekil 4.28 ve Şekil 4.29' da verilmiştir.



Şekil 4. 28 Pilot bölge 1' in Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) kullanılarak sınıflandırılan nokta bulutları ve ortofotosu (d)



Şekil 4. 29 Pilot bölge 2' nin Standart Yaklaşım (a), Yaklaşım 1 (b) ve Yaklaşım 2 (c) kullanılarak sınıflandırılan nokta bulutları ve ortofotosu (c)

Pilot bölge 1 için gerçekleştirilen doğruluk analizlerine ilişkin, hata matrisi ve bu matris kullanılarak hesaplanan genel doğruluk, üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu değerleri Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 için sırasıyla Çizelge 4.9, Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11' de verilmiştir. Çizelge 4.9' da görüldüğü üzere Standart Yaklaşım ile gerçekleştirilen sınıflandırmanın genel doğruluğu %54 olarak hesaplanmıştır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmanın genel doğruluğu ile %80 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.10, Çizelge 4.11). Elde edilen bu sonuçlara göre, geliştirilen Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile yapılan sınıflandırmalarda benzer doğruluk sonuçları elde edilmiş ve genel doğruluk Standart Yaklaşım' a göre %26 oranında iyileştirilmiştir. Genel doğruluk ölçütü, her bir sınıf için sınıflandırma performansı açısından bilgi vermediğinden bu çalışmada genel doğruluğun yanında her sınıf için ayrı hesaplanan üretici ve kullanıcı doğrulukları da incelenmiştir.

Pilot bölge 1’ de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmada, zemin sınıfına atanması gereken noktaların birçoğu bitki örtüsü sınıfına atandığı için zemin sınıfının üretici doğruluğu %39 hesaplanmıştır. Üretici doğruluğu %39 olarak hesaplanan zemin sınıfında bulunan noktalardan çoğunun gerçekten zemin sınıfına ait olmasından dolayı zemin sınıfın kullanıcı doğruluğu %88 olarak hesaplanmıştır. Buradan da anlaşıldığı üzere kullanıcı doğruluğu sınıflandırma doğruluğunu tam yansıtmayabilir. Pilot bölge 1’ de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda bina sınıfının üretici doğruluğu %70 olarak hesaplanmıştır. Bina sınıfı için elde edilen bu üretici doğruluğu zemin sınıfından daha yüksektir ve bu durum bina sınıfına atanan noktaların zemin sınıfından çok daha doğru bir şekilde atandığı göstermektedir (Çizelge 4.9). Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilen bina sınıfının kullanıcı doğruluğu %96 olarak hesaplanmıştır. Bu durum bina sınıfına atanan noktaların çok büyük bir oranda gerçekte de bina sınıfında olduğunu göstermektedir. Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilen bitki örtüsü sınıfına için üretici doğruluğu %86 ve kullanıcı doğruluğu %23 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ise zemin ve bina sınıflarının aksine bitki örtüsü olarak sınıflandırılan noktaların çok küçük bir oranının (%23) gerçekten bitki örtüsü sınıfında olduğu anlamına gelmektedir.

Özetle, Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen Pilot bölge 1’ in sınıflandırma doğruluğu analizi sonucunda elde edilen doğruluk değerlerinin düşük olması, zemin sınıfına atanması gereken noktaların büyük ölçüde bitki örtüsü olarak sınıflandırılması ve binalara ait nokta bulutları arasında bitki örtüsü olarak sınıflandırılan noktaların da bulunması ile açıklanabilir.

Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’ e göre Pilot bölge 1’ de görüldüğü üzere Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmalar sonucunda hesaplanan üretici ve kullanıcı doğrulukları tüm sınıflar için birbirinin aynıdır. Bu yaklaşımlara göre, zemin sınıfının üretici doğruluğu %83, kullanıcı doğruluğu ise %88 hesaplanmıştır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak elde edilen bina sınıfı incelendiğinde ise, üretici doğruluğu %80, kullanıcı doğruluğu da %95 olarak hesaplanmıştır. Son olarak Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2’ nin kullanıldığı bitki örtüsü sınıfının sınıflandırılması göre, bitki örtüsü olarak sınıflandırılması gereken noktaların önemli bir kısmının zemin sınıfına

atanmasından dolayı bitki örtüsü sınıfının üretici doğruluğu %66' da kalmıştır. Bu bitki örtüsü sınıfının kullanıcı doğruluğu da %43 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarına göre bitki örtüsü sınıfı, zemin ve bina sınıfına göre daha düşük doğrulukla sınıflandırılmıştır.

Farklı karakteristikteki objeleri içeren Pilot bölge 1' de, Standart Yaklaşım kullanılarak sınıflandırılan zemin ve bina sınıflarının üretici ve kullanıcı doğrulukları Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak elde edilen zemin ve bina sınıfının doğruluklarından çok daha düşük olmakla birlikte, Standart Yaklaşım kullanılarak elde edilen bitki örtüsünün üretici doğruluğu Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak üretilen bitki örtüsü sınıfının üretici doğruluğundan yüksektir. Bu sonuçlara göre, sınıf karışımı sorununun büyük oranda elemine edilmesine rağmen tamamen giderilemediği tespit edilmiştir.

Çizelge 4. 9 Pilot bölge 1' de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi

SINIFLAR	**Zemin**	**Bina**	**Bitki Örtüsü**	**Kullanıcı Doğruluğu [%]**
Zemin	204860	10092	18869	0.88
Bina	6878	177142	371	0.96
Bitki Örtüsü	318544	66240	116081	0.23
Üretici Doğruluğu [%]	0.39	0.70	0.86	**GD:** 0.54

Çizelge 4. 10 Pilot bölge 1' de Yaklaşım 1 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi

SINIFLAR	**Zemin**	**Bina**	**Bitki Örtüsü**	**Kullanıcı Doğruluğu [%]**
Zemin	438820	18691	42998	0.88
Bina	9463	202266	1533	0.95
Bitki Örtüsü	81992	32429	87783	0.43
Üretici Doğruluğu [%]	0.83	0.80	0.66	**GD:** 0.80

Çizelge 4. 11 Pilot bölge 1’ de Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi

SINIFLAR	**Zemin**	**Bina**	**Bitki Örtüsü**	**Kullanıcı Doğruluğu [%]**
Zemin	438981	18921	43029	0.88
Bina	9459	202179	1536	0.95
Bitki Örtüsü	80486	31876	86508	0.43
Üretici Doğruluğu [%]	0.83	0.80	0.66	**GD:** 0.80

Pilot bölge 2 için de benzer şekilde, gerçekleştirilen doğruluk analizlerine ilişkin, hata matrisleri ve bu matris kullanılarak hesaplanan üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk değerleri, Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 için sırasıyla Çizelge 4.12, Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’ de verilmiştir. Doğruluk analizlerinin sonuçlarının yer aldığı çizelgeler incelendiğinde, pilot bölge 2’ de Standart Yaklaşım’ ın kullanıldığı sınıflandırmanın genel doğruluğunun %59, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 olarak ifade edilen diğer iki yaklaşımın kullanıldığı sınıflandırmaların genel doğruluklarının ise %83 olarak hesaplandığı görülmektedir. Buna göre, geliştirilen yaklaşımlar Standart Yaklaşım’ a göre %24 oranında daha yüksek doğruluklu sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir.

Pilot bölge 2’ de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmada yine zemin ve bitki örtüsü sınıfının büyük ölçüde karışmasından dolayı zemin sınıfının üretici doğruluğu %30 olarak hesaplanmıştır. Zemin sınıfının kullanıcı doğruluğu ise %81 olarak belirlenmiştir. Standart Yaklaşım kullanılarak sınıflandırılan pilot bölge 2’de bina bina sınıfının üretici doğruluğu %59 ve kullanıcı doğruluğu %97 olarak hesaplanmıştır. Bina sınıfına doğru olarak atanan nokta sayısı çok fazla olmadığından üretici doğruluğu düşük, bina sınıfında bulunan noktalar gerçekte de büyük oranda bina sınıfına ait olduğundan kullanıcı doğruluğu oldukça yüksektir. Standart Yaklaşım’ ın kullanıldığı sınıflandırma sonuçlarına göre bitki örtüsünün üretici doğruluğu %93 olarak elde edilmiştir. Yüksek üretici doğruluğunun aksine bitki örtüsü sınıfının kullanıcı doğruluğunun %52 olduğu Çizelge 4.12’ de görülmektedir.

Pilot bölge 2’de Standart Yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçlara göre üretici, kullanıcı ve hatta genel doğruluk değerlerinin genelde düşük olmasının nedeni pilot bölge 1’ de de karşılaşılan en önemli sorunlardan olan biri olan sınıf karışmasıdır.

Pilot bölge 2’ de Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarına göre her sınıf için ayrı olarak gerçekleştirilen doğruluk hesaplamaları Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’ de görülmektedir. Her iki yaklaşım için Pilot bölge 2’ de de çoğunlukla aynı sınıflandırma doğrulukları elde edilmiştir. Buna göre Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırılan pilot bölge 2’ deki zemin sınıfı büyük oranda doğru sınıflandırıldığından üretici doğruluğu Yaklaşım 1 için %91, Yaklaşım 2 için %90 olarak elde edilmiştir. Bunun yanında zemin sınıfında yer alan noktaların büyük çoğunluğunun gerçekte de zemin sınıfında yer almasından dolayı bu sınıfın kullanıcı doğruluğu da her iki yaklaşım %81 olarak hesaplanmıştır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilen bina sınıfının üretici doğruluğu çok yüksek bir doğruluk değeri olmayan %68 olarak elde edilmiştir. Bu durumun aksine bina olarak sınıfladırılan noktalardan çoğunun gerçekte de bina sınıfına ait olmasından dolayı Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırma sonucu elde edilen bina sınıfının kullanıcı doğruluğu ise %95 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırılan bitki örtüsü sınıfının üretici doğruluğu %77, kullanıcı doğruluğu da Yaklaşım 1’ e göre %84, Yaklaşım 2’ ye göre %85 olarak belirlenmiştir.

Pilot bölge 1’ de Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonucuna göre üretici doğruluğunun en düşük olduğu sınıf bitki örtüsü sınıfı iken pilot bölge 2’ de üretici doğruluğunun en düşük olduğu sınıf bina sınıfıdır. Pilot bölge 2 genellikle açık alan ve ağaçlık alanlardan oluşan bir bölge olduğundan bina sınıfı ile diğer sınıfların karışımı söz konusu olmuştur. Bu nedenle, bina sınıfının üretici doğruluğunun düşük olması bu bölge için normal bir durumdur.

Çizelge 4.12 Pilot bölge 2’ de Standart Yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi

SINIFLAR	**Zemin**	**Bina**	**Bitki Örtüsü**	**Kullanıcı Doğruluğu [%]**
Zemin	154264	4333	31312	0.81
Bina	1049	41578	46	0.97
Bitki Örtüsü	361081	24650	411350	0.52
Üretici Doğruluğu [%]	0.30	0.59	0.93	**GD:** 0.59

Çizelge 4. 13 Pilot bölge 2’ de Yaklaşım 1 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi

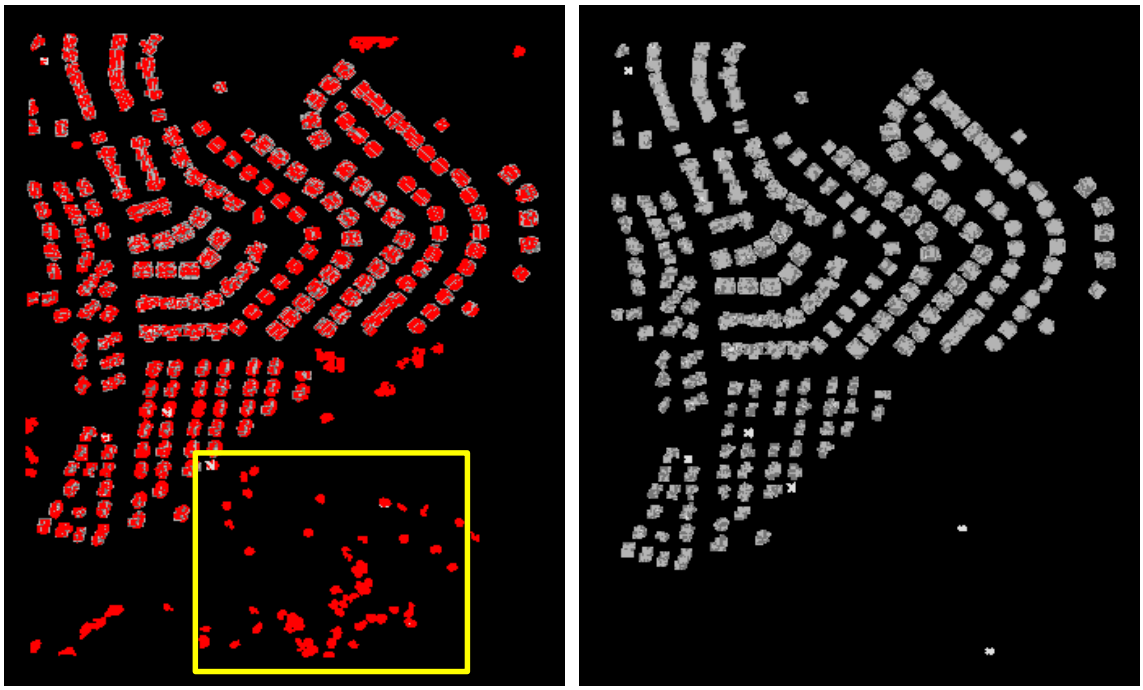
SINIFLAR	Zemin	Bina	Bitki Örtüsü	Kullanıcı Doğruluğu [%]
Zemin	463810	9342	99616	0.81
Bina	1414	47855	1525	0.94
Bitki Örtüsü	51170	13350	341567	0.84
Üretici Doğruluğu [%]	0.90	0.68	0.77	**GD:** 0.83

Çizelge 4. 14 Pilot bölge 2’ de Yaklaşım 2 kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmaya ilişkin hata matrisi

SINIFLAR	Zemin	Bina	Bitki Örtüsü	Kullanıcı Doğruluğu [%]
Zemin	463834	9361	99727	0.81
Bina	1414	47850	1525	0.94
Bitki Örtüsü	46559	13173	338314	0.85
Üretici Doğruluğu [%]	0.91	0.68	0.77	**GD:** 0.83

4.4 3B Bina Modeli Üretimi

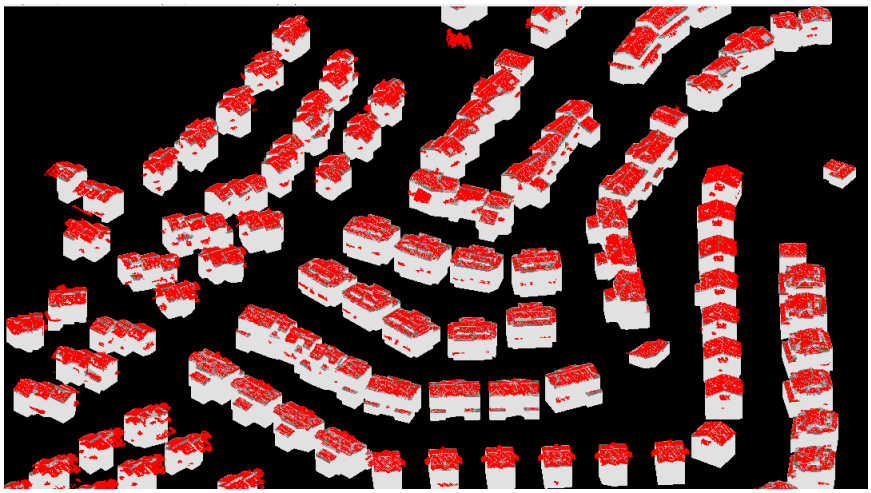
Bu çalışmada geliştirilen, LiDAR nokta bulutunun otomatik olarak nokta tabanlı sınıflandırılmasına olanak sağlayan Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırılan verinin kullanılabilirliğinin test edilmesi amacıyla, kentsel alan olan Test Alanı 2’ de bulunan binaların 3 boyutlu modelleri üretilmiştir. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2’ nin kullanıldığı sınıflandırmalar sonucunda elde edilen binalara ait nokta bulutları esas alınarak 3 boyutlu modelleri üretilmiştir. Burada, kentsel alan olan Test alanı 2’ ye ait bina noktaları, bölgede çok sayıda ve farklı tipte bina bulunduğundan 3B bina modeli üretiminde kullanılmıştır. Yaklaşım 1 ile sınıflandırılmış nokta bulutunu kullanılarak üretilen binaların Şekil 4.30’ da tepeden ve Şekil 4.31’ de daha yakından ve farklı bir açıdan görünümü verilmiştir.



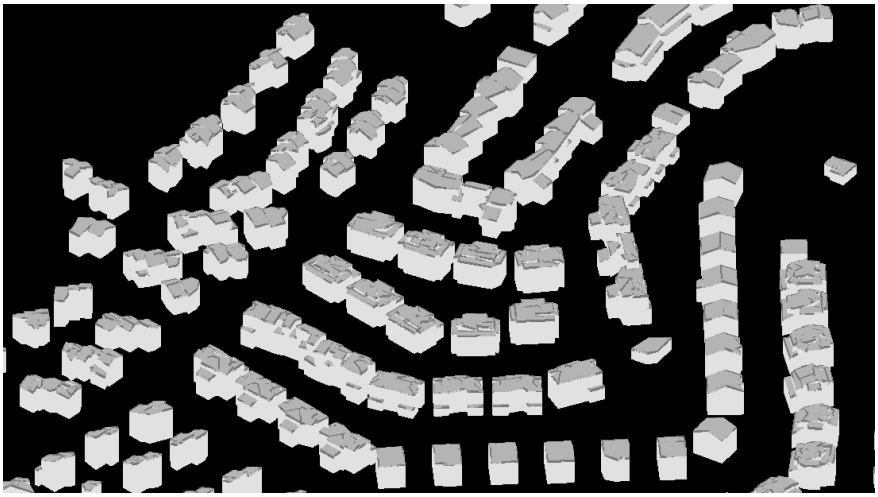
(a) (b)

Şekil 4. 30 3B bina modeli ve bina olarak sınıflandırılan noktalarının çakıştırılması (a), sadece 3B bina modeli (b)

3B bina modelleme sonuçları incelendiğinde, çoğunlukla doğru olarak sınıflandırılan binalar için başarılı bir şekilde 3B model üretildiği görülmektedir (Şekil 4.30, Şekil 4.31). Bina olarak sınıflandırılan fakat gerçekte bina olmayan, Şekil 4.30a' da sarı renkte bir kare ile işaretlenen kısımdaki bina sınıfında bulunan noktalar için bina modelleri üretilmemiştir (Şekil 4.30b). Bu iki durum dikkate alındığında, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırma sonucu elde edilen bina sınıfları kullanılarak gerçekçi 3 boyutlu bina modelleri üretiminin başarı ile gerçekleştirilebileceği sonucuna varılabilir.



(a)



(b)

Şekil 4. 31 3B bina modeli ve bina olarak sınıflandırılan noktaların çakıştırılmış halinin perspektif görünümü (a), sadece 3B bina modellerinin perspektif görünümü (b)

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, LiDAR nokta bulutunun obje çıkarımı, SYM üretimi, 3 boyutlu modelleme, değişim belirleme, haritaların revize edilmesi gibi farklı uygulamalarda kullanılabilmesi için, nokta tabanlı yöntemlerle otomatik olarak sınıflandırılma olanakları araştırılmıştır. LiDAR nokta bulutu verilerinin grid yapıdaki veriye dönüştürülmesi sırasında yaşanabilecek veri kayıplarının sınıflandırmaya olumsuz etkilerini gidermek amacıyla doğrudan nokta bulutu verisi üzerinde işlem yapabilen nokta tabanlı sınıflandırma yöntemi ile otomatik sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, İstanbul Zekeriyaköy' de seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alan özellikleri taşıyan test alanlarına ait ham LiDAR nokta bulutu verileri Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 olarak isimlendirilen üç farklı nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımı ile sınıflandırılmıştır. Standart Yaklaşım' da nokta tabanlı sınıflandırma işleminde bu uygulamalarda kullanılan genel parametreler kullanılarak oluşturulan kurallar kullanılırken, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' deki sınıflandırma işlemleri, uygulama alanı içerisinde belirlenen pilot bölgelerde gerçekleştirilen parametre analizleri ile belirlenen parametreler ve kurallar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test alanlarında farklı yaklaşımlarla gerçekleştirilen nokta tabanlı otomatik sınıflandırma sonucunda zemin, bina, bitki örtüsü ve bu sınıflar dışındaki noktaların yer aldığı diğer sınıfları elde edilmiştir.

Standart Yaklaşım kullanılarak seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alanda elde edilen sınıflandırma sonuçlarında, zemin noktaları büyük oranda bitki örtüsü sınıfına atanmıştır. Başka bir deyişle Standart Yaklaşım' ın kullanıldığı sınıflandırmalarda zemin ve bitki örtüsü sınıfının karıştığı gözlemlenmiştir. Standart Yaklaşım' da karşılaşılan diğer sorunlar ise, bina sınıfı içerisinde özellikle çatı kısımlarındaki noktalarda bina sınıfında olması gerekirken bitki örtüsü sınıfına atanmış noktalar, bina köşelerinde bazı noktaların bitki örtüsü sınıfına atanması ve az sayıda olsa da sınıflandırılamayan inşa halinde binalar olarak sıralanabilir.

Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 kullanılarak seyrek yerleşim alanı, kentsel alan ve ormanlık alanda elde edilen sınıflandırma sonuçları birbirine oldukça yakındır. Her iki yaklaşım sonucunda elde edilen sınıflandırılmış nokta bulutunda, Standart Yaklaşım' da karşılaşılan zemin sınıfına ait noktaların bitki örtüsü sınıfına atanması, bina çatılarındaki bitki örtüsü sınıfına atanmış noktalar ve bina köşelerinde bazı noktaların bitki örtüsü sınıfına atanması gibi sorunlarda büyük oranda iyileştirmeler elde edilmiştir. Bununla birlikte inşaat halindeki binalardaki problemler devam ederken ormanlık alanlarda bina olmadığı halde bina olarak sınıflandırılan noktalara rastlanmıştır. Bu durumun bina sınıflandırma seçeneği için belirlenen Z hata payı değerinden dolayı meydana geldiği tespit edilmiştir.

Görsel analizlere ek olarak Standart Yaklaşım, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile gerçekleştirilen sınıflandırmaların 'Hata Matrisi ve Hata Matrisinden Türetilen Doğruluk Değerlendiricileri' yöntemi kullanılarak kentsel alanda yer alan pilot bölge 1 ve seyrek yerleşim alanında yer alan Ppilot bölge 2' de doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Pilot bölge 1' de Standart Yaklaşım' la elde edilen genel doğruluk %54 iken, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile elde edilen genel doğruluk %80 olarak hesaplanmıştır. Pilot Bölge 2' de genel doğruluk değeri Standart Yaklaşım' da %59, Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' de %83 olarak hesaplanmıştır. Seçilen her iki plot bölgede de elde edilen doğruluk analizleri görsel analizler sonucunda ortaya çıkan Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2' nin Standart Yaklaşım' a göre üstünlüğünü onaylamaktadır. Yaklaşım 1 ve Yaklaşım 2 ile sınıflandırma doğruluğu Standart Yaklaşım' a göre Pilot bölge 1'de %26, Pilot bölge 2'de %24 oranında iyileştirilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar bu çalışma kapsamında

önerilen yaklaşımlarla nokta tabanlı otomatik sınıflandırma doğruluğunun arttırılabileceğini göstermektedir.

Doğruluk analizleri sonucunda elde edilen bu sonuçlara göre, bu tez çalışması kapsamında ortaya konulan araştırma hedefleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımlar ile gerçekleştirilecek sınıflandırmalarda sınıf karışması olasılığı daha da düşecek ve aynı zamanda nokta bulutunun grid yapıya dönüştürülmesi sırasında yaşanacak veri kayıpları, daha sonra başka çalışmalara altlık oluşturacak sınıflandırma sonuçlarına yansımamış olacaktır. Yani daha yüksek doğruluklu sınıflandırılmış veri elde edildiğinde bu verinin kullanıldığı diğer çalışmalar daha doğru bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Bu çalışma kapsamında bina sınıfındaki noktalar yardımıyla test alanında başarı ile gerçekleştirilen 3 boyutlu bina modellemesi, önerilen yaklaşımın 3 boyutlu kent modeli üretimi çalışmalarında başarı ile kullanılabileceğini teyit etmektedir.

Nokta tabanlı otomatik sınıflandırma uygulamalarında her bölge için standart parametrelerin kullanıldığı yaklaşımlar yerine uygulama alanının karakteristiklerini yansıtan test bölgelerinde geliştirilen kurallar ve bu kuralların içerinde yer alan parametrelerin test edilmesi sınıflandırma işleminin başarısı açısından hayati derecede önemlidir. Kurallar geliştirilirken zemin sınıfı gibi bazı kritik sınıflarda tek bir sınıflandırma işlem adımı yerine iteratif sınıflandırma işlemleri kullanılabilir.

3 boyutlu kent modeli üretimi amacıyla gerçekleştirilecek nokta tabanlı otomatik sınıflandırma işlemlerinde bu çalışma kapsamında alınan bazı önlemlerle modelleme aşamasında karşılaşılması muhtemel birçok problem elimine edilebilir. Özellikle belirli periyotlarda (4-5 yıl) toplanan verilerle gerçekleştirilecek nokta tabanlı otomatik sınıflandırma işlemleri ile kentsel alanlarda kaçak yapılaşma takibi yapılabilir. Ormanlık alanlarda ve su toplama havzalarındaki kaçak yapılaşma takibinde LiDAR verileri ile gerçekleştirilen nokta tabanlı otomatik nokta bulutu sınıflandırma sonuçlarından faydalanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Yastikli, N., (2004). "Algılama Sistemlerinin Doğrudan Yöneltilmesi", Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi yönetimi Dergisi, 90: 5-11.

[2] Vosselman, G., (2009). "Advanced Point Cloud Processing", In D. Fritsch (Ed.), Photogrammetric Week 2009, Wichmann, 137–146.

[3] Rutzinger, M., Pratihast, A. K., Oude Elberink, S. ve Vosselman, G., (2011). "Tree Modelling From Mobile Laser Scanning Datasets", The Photogrammetric Record, 26(135): 361–372.

[4] Kaartinen, H., Hyyppä, J., Kukko, A., Lehtomäki, M., Jaakkola, A., Vosselman, G., Oude Elberink, S., Rutzinger, M., Pu, S. ve Vaaja, M., (2013). "Mobile Mapping – Road Environment Mapping Using Mobile Laser Scanning", EuroSDR Official Publication, 62: 49–95.

[5] Sithole, G. ve Vosselman, G., (2006). "Bridge Detection In Airborne Laser Scanner Data", ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 61(1): 33–46.

[6] Wang, C. K. ve Tseng, Y. H., (2010). "Dem Generation From Airborne Lidar Data By An Adaptive Dual-Directional Slope Filter", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(Part 7B): 628–632.

[7] Charaniya, A. P., Manduchi, R. ve Lodha, S. K., (2004). "Supervised Parametric Classification of Aerial Lidar Data", IEEE Workshop on Real Time 3D Sensor and their Use, June 2004, Washington DC.

[8] Zhang, K., Yan, J. ve Chen, S.-C., (2006). "Automatic Construction of Building Footprints From Airborne LiDAR Data", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 44(9): 2523–2533.

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

[10] Axelsson, P., (1999). "Processing of Laser Scanner Data—Algorithms and Applications", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3): 138–147.

[11] Kraus, K. ve Pfeifer, N., (2001). “Advanced DTM Generation From LiDAR Data”, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIV: 23–30.

[12] Vosselman, G., (2000). “Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data”, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIII: 935–942.

[13] Maas, H.-G. ve Vosselman, G., (1999). “Two Algorithms For Extracting Building Models From Raw Laser Altimetry Data”, ISPRS J. Photogramm. Rem. Sens., 54(2/3): 153–163.

[14] Rottensteiner, F., (2003). “Automatic Generation of High-Quality Building Models From LiDAR Data”, IEEE Computer Graphics and Applications, 23(6): 42.

[15] Brenner, C., (2005). “Building Reconstruction From Images and Laser Scanning”, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, theme issue on Data Quality in Earth Observation Techniques, 6(3–4): 187–198.

[16] Oude Elberink, S. ve Vosselman, G., (2009). “Building Reconstruction by Target Based Graph Matching on Incomplete Laser Data: Analysis and Limitations”, Sensors, 9(8): 6101–6118.

[17] Pu, S. ve Vosselman, G., (2009). “Knowledge Based Reconstruction of Building Models From Terrestrial Laser Scanning Data”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(6): 575–584.

[18] Matikainen, L., Hyyppä, J. ve Hyyppä, H., (2003). “Automatic Detection of Buildings From Laser Scanner Data For Map Updating”, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34: 218-224.

[19] Vosselman, G., Gorte, B. ve Sithole, G., (2004). “Change Detection For Updating Medium Scale Maps Using Laser Altimetry”, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(Part B3): 207–212.

[20] Hommel M., (2009) “Verification of A Building Damage Analyses and Extension To Surroundings of Reference Buildings”, Proceedings of ISPRS laserscanning 2009 workshop, 38 (Part 3-W8): 18–23.

[21] Champion, N., Rottensteiner, F., Matikainen, L., Liang, X., Hyyppä, J. ve Olsen, B. P., (2009). “A Test of Automatic Building Change Detection Approaches”, Proceedings of the CMRT09 Workshop, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Paris, France.

[22] Yan, W. Y., Shaker, A., Habib, A. ve Kersting, A. P., (2012). “Improving Classification Accuracy of Airborne LiDAR Intensity Data by Geometric Calibration and Radiometric Correction”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67: 35-44.

[23] Pfeifer, N. ve Mandlburger, G., (2008), "LiDAR Data Filtering and DTM Generation", Topographic Laser Ranging And Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 308-331.

[24] He, Y., (2010). A Segment-Based Approach For Digital Terrain Model Derivation In Airborne Laser Scanning Data, Master's thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.

[25] Yastikli N. ve Jacobsen K., (2003). "Automatic Digital Elevation Model Generation, Problems and Restrictions In Urban Areas", Journal of Yildiz Technical University, 2003(2): 38–46.

[26] Chen, L., Zhao, S., Han, W. ve Li, Y., (2012). "Building Detection In An Urban Area Using Lidar Data And Quickbird İmagery", International Journal of Remote Sensing, 16: 5135–5148.

[27] Zhou, L. ve Vosselman, G., (2012). "Mapping Curbstones In Airborne and Mobile Laser Scanning Data", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 18(2012): 293–304.

[28] O'Neil-Dunne, J. P. M., MacFaden, S. W., Royar, A. R., ve Pelletier, K. C., (2012). "An Object-Based System for LiDAR Data Fusion and Feature Extraction.", Geocarto International, 1–16.

[29] Uzar Dinlemek, M., (2012). Otomatik Bina Çıkarımı Uygulamalarında Çoklu Algılama Sistemi Kullanım Olanaklarının Analizi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[30] Xu, S., Vosselman, G. ve Oude Elberink, S., (2014). "Multiple-Entity Based Classification of Airborne Laser Scanning Data In Urban Areas", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 88: 1–15.

[31] Niemeyer, J., Rottensteiner, F. ve Soergel, U., (2014). "Contextual Classi-Fication of LiDAR Data and Building Object Detection In Urban Areas", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87: 152–165.

[32] Flood, M., (2001). "Lidar Activities and Research Priorities In The Commercial Sector", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIV(Pt. 3/W4): 3 – 8.

[33] Chang, Y. C., Habib, A. F., Lee, D. C. ve Yomb, J. H., (2008). "Automatic Classification of Lidar Data Into Ground and Non-Ground Points", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII (Part B4): 463-468.

[34] Chen, C., Li, Y., Li, W. ve Dai, H., (2013). "A Multiresolution Hierarchical Classification Algorithm for Filtering Airborne LiDAR Data", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82 (1): 1–9.

[35] Sithole, G. ve Vosselman, G., (2005). "Filtering of Airborne Laser Point Scanner Data Based On Segmented Point Clouds", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(Part 3/W19): 66–71.

[36] Nardinocchi, C., Forlani, G. ve Zingaretti, P., (2003), "Classification and Filtering of Laser Data", In IAPRS, XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany.

[37] Forlani, G. ve Nardinocchi, C., (2007). "Adaptive Filtering of Aerial Laser Scanning Data", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(Part 3/W52): 130–135.

[38] 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.

[39] 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–S84.

[40] Niemeyer, J., Rottensteiner, F. ve Soergel, U., (2012). "Conditional Random Fields For LiDAR Point Cloud Classification In Complex Urban Areas", ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Proceedings XXII ISPRS Congress (TC III), 25 August–1 September. Melbourne, Australia, 263–268.

[41] Zhou, W., (2013). "An Object-Based Approach For Urban Land Cover Classification: Integrating LiDAR Height and Intensity Data", IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 10(4): 928–931.

[42] Bao, Y., Guoping, L., Chunxiang, C., Xiaowen, L., Hao, Z., Qisheng, H., Linyan, B. ve Chaoyi, C., (2008). "Classification of LiDAR Point Cloud and Generation Of DTM From LiDAR Height and Intensity Data In Forested Area", Internat. Arch. Photogram. Remote Sensing Spatial Inform. Sci., XXXVII(3/W19): 313–318.

[43] Yuan, F., Zhang, J. X., Zhang, L. ve Gao, J. X., (2011). "DEM Generation From Airborne LiDAR Data", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(Part 7/C4): 308–312.

[44] Awrangjeb, M. ve Fraser, C. S., "Rule - Based Segmentation of LiDAR Point Cloud For Automatic Extraction of Building Roof Planes", ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci 2013, II: 1–6.

[45] 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(1): 56–66.

[46] Sithole, G. ve Vosselman, G., (2004). "Experimental Comparison of Filter Algorithms For Bare-Earth Extraction From Airborne Laser Scanning Point Clouds", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(1–2): 85–101.

[47] Bretar, F., Chesnier, M., Pierrot-Deseilligny, M. ve Roux, M., (2004). "Terrain Modeling and Airborne Laser Data Classification Using Multiple Pass Filtering", In: Proc. of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 314– 319.

[48] Vosselman, G., Kessels, P. ve Gorte, B., (2005). “The Utilisation of Airborne Laser Scanning For Mapping”, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 6: 177–186.

[49] Xu, S., Oude Elberink, S. ve Vosselman, G., (2012). “Entities and Features For Classification of Airborne Laser Scanning Data In Urban Area”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1(4): 257–262.

[50] Han, W., Zhao, S., Feng, X. ve Chen, L., (2014). “Extraction of Multilayer Vegetation Coverage Using Airborne Lidar Discrete Points With Intensity Information In Urban Areas: A Case Study In Nanjing City, China”, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 30: 56–64.

[51] Clode, S. P., Kootsookos, P. ve Rottensteiner, F., (2004). “The Automatic Extraction of Roads From Lidar Data”, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(Part B3): 231–236.

[52] Antonarakis, A. S., Richards, K. S. ve Brasington, J., (2008). “Object-Based Land Cover Classification Using Airborne Lidar”, Remote Sensing of Environment, 112(6): 2988–2998.

[53] Schmidt, A., Rottensteiner, F. ve Soergel, U., (2011). “Detection of Water Surfaces In Full-Waveform Laser Scanning Data”, IAPRSSIS XXXVIII-4/W19.

[54] Schenk, T. ve Csatho B., (2002). “Fusion of LiDAR Data and Aerial Imagery For A More Complete Surface Description”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34(3A): 310-317.

[55] Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. ve Kubik, K., (2005). “Using the Dempster Shafer Method For The Fusion of LiDAR Data and Multispectral Images For Building Detection”, Information Fusion, 6(4): 283–300.

[56] Moussa, A. ve El-Sheimy, N., (2012). “A New Object Based Method For Automated Extraction of Urban Objects From Airborne Sensors Data”, XXII ISPRS Congress, 2012, Melbourne, Australia.

[57] Uzar, M. ve Yastikli, N., (2013). “Automatic Building Extraction Using Lidar and Aerial Photographs”, Bol. Ciênc. Geod., 19: 153–171.

[58] Vosselman, G. ve Zhou, L., (2009). “Detection of Curbstones In Airborne Laser Scanning Data”, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(Part 3/W8): 111–116.

[59] Jwa, Y., Sohn, G. ve Kim, H. B., (2009). “Automatic 3D power line reconstruction using airborne LiDAR data”, Laser Scanning, XXXVIII: 105–110.

[60] Zhang, J., Sohn, G. ve Brédif, M., (2013). “Single Tree Detection From Airborne Laser Scanning Data Using A Marked Point Process Based Method”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W1, 2013.

[61] Hu, X. ve Ye, L., (2013). “A Fast and Simple Method of Building Detection From Lidar Data Based On Scan Line Analysis”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W1, VCM 2013 - The ISPRS Workshop on 3D Virtual City Modeling, 28 May, Regina, Canada.

[62] 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”, IAPRS XXXV, Istanbul, Turkey.

[63] Petrie, G. ve Toth C., (2008). “Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning”, Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 1- 27.

[64] Lindenberger, J., (1989), “Test Results of Laser Profiling For Topographic Terrain Survey”, Photogrammetric Week’89, Special Publications of the Institute of Photogrammetry, University of Stuttgart, 13: 25–39.

[65] Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G. ve Harding, D. J., (2002). “Lidar Remote Sensing For Ecosystem Studies”, BioScience, 52: 19–30.

[66] 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.

[67] Csanyi, N. ve Toth, C., (2007). “Improvement of Lidar Data Accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73(4): 385–396.

[68] Yastıklı, N., (2006). “Fotogrametri ve Uzaktan Algılama’da Son Gelişmeler”, Prof. Dr. Muzaffer Şerbetçi Anma Töreni ve Toplantısı Bildiri ve Tutanaklar Kitabı, YTÜ, İstanbul, Türkiye.

[69] Rottensteiner, F. ve Briese, C., (2002). “A New Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data”, IAPRSIS, XXXIV/3A: 295 – 301.

[70] Rottensteiner, F., Trinder, J. ve Clode, S., (2005). “Data Acquisition For 3D City Models From LiDAR Extracting Buildings And Roads”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International, 1:521- 524.

[71] Reitberger, J., Krzystek, P. ve Stilla, U., (2006). “Analysis of Full Waveform Lidar Data For Tree Species Classification”, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36: 228–233.

[72] 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.

[73] Liang, J., Zhang, J., Deng, K., Liu, Z. ve Shi, Q., (2011). “A New Power-Line Extraction Method Based On Airborne Lidar Point Cloud Data”, In Proceedings of the IEEE 2011 International Symposium on Image and Data Fusion (ISIDF), 9–11 August, Tengchong, China.

[74] Haala, N. ve Brenner, C., (1997). “Generation of 3D City Models From Airborne Laser Scanning Data”, Proc. 3rd EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea. Tallinn, Estonia, 17–19 July, 105–112.

[75] Frueh, C. ve Zakhor, A. (2003). “Constructing 3D City Models By Merging Ground-Based and Airborne Views”, In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR ’03), Madison, WI, 562.

[76] Mongus, D., ve Žalik, B., (2012). “Parameter-Free Ground Filtering of LiDAR Data for Automatic DTM Generation”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67: 1–12.

[77] Keinan, E. ve Doytsher, Y., (2008). “Automatic Methods Toward Generating Digital True Orthophoto By Using Dense Lidar Data”, Proc. ASPRS 2008, Annual Conference, 28 April–2 May, Portland, Oregon

[78] Barazzetti, L., Brovelli, M. ve Scaioni, M., (2008). “Generation Of True-Orthophotos With LiDAR Dense Digital Surface Models”, The Photogrammetric Journal of Finland, 21(N.1): 26-34.

[79] Popescu, S. C., (2007). “Estimating Biomass of Individual Pine Trees Using Airborne LiDAR”, Biomass and Bioenergy, 31(9): 646–655.

[80] Liu, X., Peterson, J. ve Zhang, Z., (2005). “High-Resolution DEM Generated From Lidar Data For Water Resource Management”, In Proceedings of International Congress on Modelling and Simulation 'MODSIM05', 12 - 15 December, Melbourne, Australia, 1402-1408.

[81] Webster, T. L., Forbes, D. L., Dickie, S. ve Shreenan, R., (2006). “Flood-Risk Mapping For Stormsurge Events and Sea-Level Rise Using Lidar For Southeast New Brunswick”, Canadian Journal of Remote Sensing, 32(2): 194–211.

[82] Csanyi, N., (2006). “Precision LiDAR Mapping of Transportation Corridors Using LiDAR-Specific Ground Targets”, Geospatial Information Systems for Transportation Symposium, March 27-29, Columbus, OH.

[83] Hopkinson, C., ve Demuth, M. D., (2006). “Using Airborne LiDAR To Assess The Influence Of Glacier Downwasting To Water Resources In The Canadian Rocky Mountains”, Canadian Journal of Remote Sensing, 32: 212-222.

[84] Pe’eri, S. ve Long, B., (2011). “LIDAR Technology Applied In Coastal Studies and Management”, Journal of Coastal Research, Special Issue, 62: 1–5.

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

[86] 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.

[87] Höfle, B. ve Pfeifer, N., (2007). “Correction of Laser Scanning Intensity Data: Data and Model-Driven Approaches”, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 62(6): 1415-1433.

[88] Badea, D. ve Jacobsen, K., (2008). “Filtering Process of LiDAR Data”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII (Part B1).

[89] Badea, D. ve Jacobsen, K., (2007). “Filtering Process of LiDAR Data”, Cadastre Journal RevCAD’07/2007, University “1 Decembrie 1918” Alba Iulia.

[90] Wehr, A., (2008). “LiDAR Systems and Calibration”, Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 129-172.

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

[92] Li, Q., (2008). “Decomposition of Airborne Laser Scanning Waveform Data Based On EM Algorithm”. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII (Part B1): 211-218.

[93] Nayegandhi, A., (2007). “LiDAR Technology Overview, Airborne Lidar Technology and Applications”, Baton Rouge, LA, June 20-21, 2007.

[94] Vosselman, G., (2005). “Sensing Geo-Information”, Inaugural Address, ITC, Enschede, 14.

[95] Rehor, M. ve Bähr, H. -P., (2006). “Segmentation of Damaged Buildings From Laser Scanning Data”, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI(Part 3): 67-72.

[96] Ayhan, E., Karslı, F. ve Tunç, E., (2003). “Uzaktan Algılanmış Görüntülerde Sınıflandırma ve Analiz”, Harita Genel Komutanlığı, Harita Dergisi, 130: 32-46.

[97] Çölkesen, İ., (2009). Uzaktan Algılamada İleri Sınıflandırma Tekniklerinin Karşılaştırılması ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Entitüsü, Kocaeli.

[98] Weih, R. C. ve Riggan N. D., (2010). “Object-Based Classification vs. Pixel-Based Classification: Comparative Importance of Multi-Resolution Imagery”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (GEOBIA 2010), XXXVIII-4/C7.

[99] Navulur, K., (2007). Multispectral Image Analysis Using The Object-Oriented Paradigm, CRC Press, Taylor and Frances Group, New York.

[100] Oruç, M., Marangoz, A. M. ve Karakış, S., (2007). “Pan-Sharp Landsat 7 ETM+ Görüntüsü Kullanılarak Piksel-Tabanlı ve Nesne-Tabanlı Sınıflandırma Yaklaşımlarının Karşılaştırılması”, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 2-6 Nisan 2007, Ankara.

[101] Küpçü, R. ve Çabuk, A., (2010). Uzaktan Algılama, Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları, Eskişehir.

[102] Bayram, B., Sayısal Görüntü İşleme,

http://www.yildiz.edu.tr/~bayram/sgi/saygi.htm, 06 Nisan 2015.

[103] Sunar, F. ve Özkan, C., (2011). Uzaktan Algılama, Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları, Eskişehir.

[104] Üstüner, M., (2014). Destek Vektör Makineleri Yöntemi ile Arazi Kullanımı Sınıflandırılmasında Kernel Fonksiyonlarına Ait Karşılaştırmalı Parametre Duyarlık Analizi: Rapideye ve Spot Örneği, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[105] Gao, Y. ve Mas, J. F., (2008). "A Comparison of The Performance of Pixel-Based and Object-Based Classifications Over Images With Various Spatial Resolutions", Proceedings of GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence: Geographic ObjectBased Image Analysis for the 21st Century, August 6–7, Calgary, Alberta.

[106] Yan, G., Mas, J. -F., Maathuis, B. H. P., Xiangmin, Z. ve Van Dijk, P. M., (2006). "Comparison of Pixel-Based and Object-Oriented Image Classification Approaches — A Case Study In A Coal Fire Area, Wuda, Inner Mongolia, China", International Journal of Remote Sensing, 27(18): 4039–4055.

[107] Zhang, L., Jia, K., Li, X. S., Yuan, Q. Z., ve Zhao, X. F., (2014). "Multi-Scale Segmentation Approach For Object-Based Land-Cover Classification Using High-Resolution Imagery", Remote Sens. Lett., 5 (1): 73–82.

[108] Blaschke, T., (2010). "Object Based Image Analysis For Remote Sensing", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65: 2–16.

[109] Güler E., (2014). Tarihi Yapılarda Fotogrametrik Yöntemle Doku Deformasyonlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[110] Zhou, W. ve Troy, A., (2008). "An Object-Oriented Approach For Analyzing and Characterizing Urban Landscape At The Parcel Level", International Journal of Remote Sensing, 29(11): 3119–3135.

[111] Haala, N., (2013). "The Landscape of Dense Image Matching Algorithms", Photogrammetric Week '13, Wichmann, Berlin/Offenbach, Germany, 271–284.

[112] Gajski D., Fiedler T. ve Krtalić A., (2003). "Classification and Filtering of Airborne Topographic Lidar Data", Institute for Photogrammetry, Faculty for Geodesy, University of Zagreb, Kačićeva 26, Zagreb, Croatia.

[113] Hu, X. ve Ye, L., (2013). "A Fast and Simple Method of Building Detection From Lidar Data Based On Scan Line Analysis", The ISPRS Workshop on 3D Virtual City Modeling, 28 May, Regina, Canada.

[114] Tóvári, D. ve Pfeifer, N., (2005). "Segmentation Based Robust Interpolation-A New Approach To Laser Data Filtering", IAPRS, 2005, 36(3): W19.

[115] Passini, R. ve Jacobsen, K., (2002). "Filtering of Digital Elevation Model", Proceedings of the ASPRS Annual Convention, Washington DC.

[116] Sithole, G. ve Vosselman, G., (2003). “Report: ISPRS Comparison of Filters.” ISPRS Commission III, Working Group 3.

[117] Haralick, R. ve Shapiro, L., (1992). “Computer and Robot Vision”, Addison Wesley, Reading, Mass.

[118] Kilian, J., Haala, N. ve Englich, M., (1996). “Capture And Evaluation Of Airborne Laser Scanning Data”, IAPRS XXXI 3, Vienna.

[119] Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., ve Zhang, C., (2003). “A Progressive Morphological Filter For Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR Data”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(4): 872–882.

[120] Lohmann, P., Koch, A. ve Schaeffer, M., (2000). “Approaches To The Filtering of Laser Scanner Data”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B3/1): 534–541.

[121] Sithole, G., (2001). “Filtering of Laser Altimetry Data Using A Slope Adaptive Filter”, IAPRS, XXXIV 3/W4, Annapolis, MD.

[122] Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Ostir, K. ve Dzeroski, S., (2007). “Repetitive Interpolation: A Robust Algorithm For DTM Generation From Aerial Laser Scanner Data In Forested Terrain”, Remote Sensing of Environment, 108: 9–23.

[123] Axelsson, P., (2000). “DEM Generation From Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models”, IAPRS, XXXIII (B4/1), Istanbul, Turkey.

[124] Sohn, G. ve Dowman, I., (2002). “Terrain Surface Reconstruction By The Use of Tetrahedron Model With The MDL Criterion”, IAPRS, XXXIV(3A): 336–344.

[125] Kraus, K., ve Pfeifer, N., (1998). “Derivation of Digital Terrain Models In Wooded Areas”, ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing, 53(4): 193–203.

[126] Pfeifer, N., Stadler, P. ve Briese, C., (2001). “Derivation of Digital Terrain Models In The SCOP++ Environment”, OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm.

[127] Elmqvist, M., (2001). “Ground Estimation of Laser Radar Data Using Active Shape Models”, OEEPE workshop on airborne laser scanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models, Stockholm.

[128] Brovelli, M., Cannata, M. ve Longoni, U., (2003). “Lidar Data Filtering and DTM Interpolation Within GRASS”, Transactions in GIS, 8(2): 155–174.

[129] Jacobsen, K. ve Lohmann, P., (2003). “Segmented Filtering of Laser Scanner DSMs”, IAPRS, XXXIV 3/W13, Dresden, Germany.

[130] Kim, H. B. ve Sohn, G., (2013). “Point-Based Classification of Power Line Corridor Scene Using Random Forests”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 79: 821–33.

[131] Yang, Y. ve Lin, Y., (2009). “A Novel Deformable Model For Urban Vegetation Detection Using LiDAR Data”, In Image and Signal Processing, CISP ’09, 2nd International Congress on, 1–5.

[132] Chehata, N., Guo, L. ve Mallet, C., (2009). “Airborne LiDAR Feature Selection For Urban Classification Using Random Forests”, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39(Part 3/W8): 207–212.

[133] Kim, H. B. Ve Sohn, G., (2010). “3D Classification of Power-Line Scene From Airborne Laser Scanning Data Using Random Forests” ISPRS Archives, September 1-3, Saint-Mandé, France, 38(3A): 126-132.

[134] Xu, G. ve Zhang, Z., (1996). “Epipolar Geometry In Stereo, Motion, And Object Recognition”, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA.

[135] O’Neil-Dunne, MacFaden, S., ve Royar, A., (2014). “A Versatile, Production-Oriented Approach To High-Resolution Tree-Canopy Mapping In Urban And Suburban Landscapes Using GEOBIA and Data Fusion”, Remote Sensing, 6: 12837-12865.

[136] Rutzinger, M., Rottensteiner, F. ve Pfeifer, N., (2009). “A Comparison of Evaluation Techniques For Building Extraction From Airborne Laser Scanning” IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2 (1): 11–20.

[137] Congalton, R. G., (2001), “Accuracy Assessment and Validation of Remotely Sensed and Other Spatial Information”, International Journal of Wildland Fire, 10,:321–328.

[138] Congalton, R. G. ve Green, K., (2009). Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practises, , Second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, New York.

[139] Story, M. ve Congalton, R. G., (1986). “Accuracy Assessment: A User’s Perspective”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52 (3): 397–399.

[140] Reigle LMS-Q680i Data Sheet,

http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_LMS-Q680i_28-09-2012.pdf, 20 Nisan 2015.

[141] TerraScan User Guide, https://www.terrasolid.com/download/tscan.pdf, 01 Ocak 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Zehra ERİŞİR

Doğum Tarihi ve Yeri : 19.01.1989 / Adapazarı

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : zerisir@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Jeodezi ve Fotogrametri Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2013	YTÜ İnşaat Fakültesi / Harita Müh. Bölümü	Araştırma Görevlisi

2012	Nebula Mühendislik İnşaat Harita San. ve Dış Tic. Ltd. Şti.	Harita Mühendisi
2011	Aktürk Yapı Endüstrisi ve Ticaret A.Ş.	Harita Mühendisi - Stajer
2010	İBB Su ve Kanalizasyon İdaresi	Harita Mühendisi – Stajer

YAYINLARI

Bildiri

1. Yastikli N., Bayraktar H. ve Erisir Z., (2014). "Performance Validation of High Resolution Digital Surface Models Generated by Dense Image Matching With the Aerial Images", ISPRS Technical Commission I Symposium, 17 – 20 November 2014, Denver, Colorado, USA.
2. Yastıklı N., Erişir Z., Altıntaş P. ve Çak T., (2014). "Yersel Fotogrametrinin Tersine Mühendislik Uygulamalarında Kullanımı", IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2014), 14-17 Ekim 2014, İstanbul.

ÖDÜLLERİ

1. Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 2011 – 2012 Öğretim Yılı Bölüm Birinciliği