KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LiDAR NOKTA BULUTU İLE ARKEOLOJİK KAZI ÇALIŞMALARINDA YÜKSEK DOĞRULUKLU ARAZİ MODELİ ÜRETİM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat AYGÜN

NİSAN 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LiDAR NOKTA BULUTU İLE ARKEOLOJİK KAZI ÇALIŞMALARINDA YÜKSEK DOĞRULUKLU ARAZİ MODELİ ÜRETİM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Murat AYGÜN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"HARİTA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 03 / 2025
Tezin Savunma Tarihi : 11 / 04 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fevzi KARSLI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

"LiDAR Nokta Bulutu İle Arkeolojik Kazı Çalışmalarında Yüksek Doğruluklu Arazi Modeli Üretim Performansının Değerlendirilmesi" isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca destek ve emeklerini esirgemeyen, cesaret veren, tecrübesi ile yoluma ışık tutan değerli danışman hocam Prof. Dr. Sayın Fevzi KARSLI'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, yapıcı eleştirileri, önerileri ve teknik destekleri ile tezime büyük katkıları bulunan arkadaşlarım Öğr. Gör. Murat BAHADIR, Harita Yüksek Mühendisi Feride Seçil YILDIRIM ve Harita Yüksek Mühendisi Merve YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları sırasında sürekli desteğini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Harita Mühendisi Anıl ALTUNTAŞ, Harita Mühendisi Murat ÖZ, Harita Mühendisi Volkan CEYLAN ve Topoğraf Yüksel AKGÜN'e teşekkür ederim.

Halen görev yapmakta olduğum Ordu Büyükşehir Belediyesi tarafından sağlanan olanaklar çerçevesinde, başta Büyükşehir Belediye Başkanı Sayın Dr. M. Hilmi GÜLER olmak üzere, tüm yönetici ve idarecilerime teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, aldığım her kararda yanımda olan, sürekli destekleri ve fedakârlıklarıyla bu noktaya ulaşmamda en büyük paya sahip olan eşim Asuman AYGÜN ile oğullarım Özcan AYGÜN, Fatih AYGÜN ve Yusuf AYGÜN'e en içten teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Yüksek düzeyde emek vererek hazırladığım bu tez çalışmasının bundan sonra yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını ümit ve temenni ederim.

Murat AYGÜN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “LiDAR Nokta Bulutu İle Arkeolojik Kazı Çalışmalarında Yüksek Doğruluklu Arazi Modeli Üretim Performansının Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Fevzi KARSLI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 11/04/2025

Murat AYGÜN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Çalışmanın Motivasyonu 3
1.3. Tezin Ana Hattı 3
1.4. Çalışmanın Amacı 4
1.5. Literatür Araştırması 5
1.6. Temel Kavramlar 7
1.6.1. Hava Görüntüleri 7
1.6.2. Fotogrametri 9
1.6.3. Görüntü Eşleştirme 13
1.6.4. Ortofoto Üretimi 15
1.6.5. LiDAR Teknolojisi 17
1.6.6. LiDAR Nokta Bulutu 20
1.6.7. Zemin Filtreleme Yöntemleri 22
1.6.8. Nesne Tabanlı Doğruluk Analizi 27
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 29
2.1. Çalışma Alanı 29
2.2. Veri Seti ve Alan Ölçüleri 32
2.2.1. Havadan Lazer Tarama (ALS) Verisi 33
2.2.2. İHA Fotogrametrik Verisi 36
2.2.3. Yersel Laser Tarayıcı Verisi 39
2.3. Ön Hazırlık İşlemleri 44
2.4. DJI Terra Zemin Filtreleme Yöntemi 47
2.5. CSF Yöntemi ile Zemin Filtreleme 49

2.6. PTIN ile Zemin Filtreleme 50
2.7. DVM ile Zemin Filtreleme 51
2.8. Zemin Filtreleme Doğruluk Değerlendirmesi 54
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 57
3.1. DJI Terra Program Çıktıları 57
3.2. CSF Çıktıları 60
3.2.1. CSF Birinci Deneme Sonuçları 60
3.2.2. CSF İkinci Deneme Sonuçları 64
3.2.3. CSF Üçüncü Deneme Sonuçları 67
3.2.4. CSF Dördüncü Deneme Sonuçları 71
3.2.5. CSF Beşinci Deneme Sonuçları 75
3.3. PTIN Çıktıları 80
3.3.1. PTIN Birinci Deneme Sonuçları 81
3.3.2. PTIN İkinci Deneme Sonuçları 84
3.3.3. PTIN Üçüncü Deneme Sonuçları 88
3.3.4. PTIN Dördüncü Deneme Sonuçları 92
3.3.5. PTIN Beşinci Deneme Sonuçları 95
3.4. DVM Çıktıları 99
3.5. Zemin Filtreleme Performanslarının İrdelenmesi 103
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 108
5. KAYNAKLAR 111
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

LiDAR NOKTA BULUTU İLE ARKEOLOJİK KAZI ÇALIŞMALARINDA YÜKSEK DOĞRULUKLU ARAZİ MODELİ ÜRETİM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Murat AYGÜN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Fevzi Karslı
2025, 114 Sayfa

Arkeolojik kazılar, kültürel mirası koruma ve insanlık tarihini yeniden inşa etme açısından büyük öneme sahiptir. Son yıllarda uzaktan algılama ve fotogrametrik yöntemlerin gelişmesi, arkeolojik alanların analizini hızlandırmıştır. Arkeolojik kazı bölgeleri genellikle yoğun bitki örtüsüyle kaplı olup, bu alanlarda gerçek arazi modelinin elde edilmesi önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu tez çalışmasında, LiDAR nokta bulutu verisi kullanarak zemin filtrelemesi yapmak amacıyla literatürde yer alan Kumaş Simülasyon Filtresi (CSF), Aşamalı Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ (PTIN) ve Destek Vektör Makinesi (DVM) yöntemleri farklı parametre kombinasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Test bölgesi olarak, Ordu ili Fatsa ilçesi, Yapraklı Mahallesi'nde yer alan ve 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı olarak tescillenen Çıngırt Kalesi seçilmiştir. Arazide yersel LiDAR verisiyle elde edilen 1159 adet referans veriyle yapılan karşılaştırmada, CSF, PTIN ve DVM yöntemlerinin zemin çıkarım performansları sırasıyla %97,66, %96,80 ve %73,40 F-skoru ile sonuçlanmıştır. PTIN ve CSF yöntemlerinin birleşimi ile zemin çıkarım performansı %96,89 F-skor değerine ulaşmıştır. Referans veriye göre ortalama yükseklik farkı yaklaşık 10 cm olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, PTIN'in bitki örtüsü ve zemin filtrelemesinde, CSF'nin ise kayalık ve branda alanlarında daha başarılı olduğunu göstermektedir. Bütünleşik yöntemle (PTIN+CSF) hassas arazi modeli üretimi daha etkin bir şekilde zemin çıkarımını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Arkeolojik Kazı, LiDAR Nokta Bulutu, Zemin Filtreleme, CSF, PTIN.

MSc. Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF HIGH-ACCURACY TERRAIN MODEL GENERATION PERFORMANCE IN ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS USING LiDAR POINT CLOUD

Murat AYGÜN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geomatics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Fevzi KARSLI
2025, 114 Pages

Archaeological excavations are of great importance for preserving cultural heritage and reconstructing human history. In recent years, the development of remote sensing and photogrammetric methods has accelerated the analysis of archaeological sites. Archaeological excavation sites are often covered by dense vegetation, and obtaining a true terrain model in these areas has been an important research topic. In this thesis, in order to perform ground filtering using LiDAR point cloud data, Cloth Simulation Filter (CSF), Progressive Triangulated Irregular Network (PTIN) and Support Vector Machine (SVM) methods in the literature are compared with different parameter combinations. Çıngırt Castle, located in Yapraklı Neighborhood of Fatsa District, Ordu Province, and registered as a Grade 1 Archaeological Site, was chosen as the test site. In the comparison with 1159 reference data obtained with ground-based LiDAR data in the field, the ground extraction performances of CSF, PTIN and SVM methods resulted in F-score of 97.66%, 96.80% and 73.40% respectively. The combination of PTIN and CSF methods resulted in an F-score of 96.89%. The average height difference with respect to the reference data was approximately 10 cm. The results show that PTIN is more successful in vegetation and ground filtering, while CSF is more successful in rocky and canvas areas. Precise terrain model generation with the integrated method (PTIN+CSF) resulted in more efficient ground extraction.

Key Words: Archaeological Excavation, LiDAR Point Cloud, Ground Filtering, CSF, PTIN.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Fotogrametrinin matematiksel modeli 11
Şekil 2. Epipolar geometri destekli nokta eşleme 13
Şekil 3. Ortofoto üretim süreci 15
Şekil 4. Ortofoto ve sayısal yüksek modeli arasındaki ilişki 16
Şekil 5. LiDAR teknolojisinin temel bileşenleri 18
Şekil 6. Nokta bulutu örnekleri: a) ham b) sınıflandırılmış ve c) yalnızca zemin nokta bulutu 22
Şekil 7. CSF algoritmasına genel bakış 23
Şekil 8. Kütle yay modeli 23
Şekil 9. PTIN algoritmasının şematik diyagramı 25
Şekil 10. Doğrusal DVM sınıflandırması. 26
Şekil 11. Samsun Kültür Varlıkları Bölge Koruma Kurulu kararı harita eki 30
Şekil 12. Çıngırt Kalesi kazı çalışma alanı haritası 31
Şekil 13. Çalışma alanı 32
Şekil 14. Çalışma bölgesindeki ağaç boylarını gösterir profil 33
Şekil 15. Arazi çalışmaları esansında çalışma alanının görüntüsü 33
Şekil 16. İHA kontrol ünitesi ekranından görev aşamasında bir görüntü 36
Şekil 17. Fotogrametrik veri için İHA'nın göreve başlama aşamasında bir görüntü 39
Şekil 18. Arazi çalışmalarından görseller 40
Şekil 19. Çalışma alanındaki yersel lazer tarama bölgeleri 42
Şekil 20. Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı proje ayarları ekran görüntüleri 42
Şekil 21. Arazide toplanan referans noktaları (1159 adet) 44
Şekil 22. Çıngırt kalesi hava LiDAR nokta bulutu 45
Şekil 23. Kazı alanı içerisinde branda ile kaplı alan ve kayalık bölge 46
Şekil 24. Zemin referans nokta verileri 47
Şekil 25. DJI Terra ile elde edilen zemin noktaları 48
Şekil 26. CSF testleri ile elde edilen zemin noktalarına örnek 49
Şekil 27. PTIN testleri ile elde edilen zemin noktalarına örnek 50
Şekil 28. Bölümlendirilmiş nokta bulutu verisi 51
Şekil 29. Eğitim veri seti (4 ve 5) 53
Şekil 30. DVM tahmin sonuçları 54

Şekil 31. Nesne tabanlı doğruluk analizi uygulama şeması 55
Şekil 32. DJI Terra programı ile üretilen zemin noktaları 57
Şekil 33. DJI Terra programı ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 58
Şekil 34. DJI Terra programı ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 59
Şekil 35. CSF birinci denemede üretilen zemin noktaları 60
Şekil 36. CSF birinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 61
Şekil 37. CSF birinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 62
Şekil 38. CSF birinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 63
Şekil 39. CSF İkinci denemede üretilen zemin noktaları 64
Şekil 40. CSF ikinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları..... 65
Şekil 41. CSF ikinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 66
Şekil 42. CSF ikinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar 67
Şekil 43. CSF üçüncü denemede üretilen zemin noktaları 68
Şekil 44. CSF üçüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları ... 69
Şekil 45. CSF üçüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 70
Şekil 46. CSF üçüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 71
Şekil 47. CSF dördüncü denemede üretilen zemin noktaları 72
Şekil 48. CSF dördüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 73
Şekil 49. CSF dördüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 74
Şekil 50. CSF dördüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 74
Şekil 51. CSF beşinci denemede üretilen zemin noktaları 75
Şekil 52. CSF beşinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları ... 76
Şekil 53. CSF beşinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 77
Şekil 54. CSF beşinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 78
Şekil 55. PTIN birinci denemede üretilen zemin noktaları 81
Şekil 56. PTIN birinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları .. 82

Şekil 57. PTIN birinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 83
Şekil 58. PTIN birinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 84
Şekil 59. PTIN ikinci denemede üretilen zemin noktaları..... 85
Şekil 60. PTIN ikinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları.... 86
Şekil 61. PTIN ikinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 87
Şekil 62. PTIN ikinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 88
Şekil 63. PTIN üçüncü denemede üretilen zemin noktaları 89
Şekil 64. PTIN üçüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 90
Şekil 65. PTIN üçüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 90
Şekil 66. PTIN üçüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 91
Şekil 67. PTIN Dördüncü denemede üretilen zemin noktaları..... 92
Şekil 68. PTIN dördüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 93
Şekil 69. PTIN dördüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi 93
Şekil 70. PTIN dördüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 94
Şekil 71. PTIN beşinci denemede üretilen zemin noktaları 95
Şekil 72. PTIN beşinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 96
Şekil 73. PTIN beşinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi. 96
Şekil 74. PTIN beşinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar..... 97
Şekil 75. DVM üretilen zemin noktaları..... 99
Şekil 76. DVM ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları 100
Şekil 77. DVM ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi. 101
Şekil 78. DVM ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar. 102
Şekil 79. Zemin filtreleme sonuçlarının iki boyutlu karşılaştırılması: a) CSF, b) PTIN, c) DVM ve d) PTIN+CSF. 103
Şekil 80. Zemin filtreleme sonuçlarının üç boyutlu karşılaştırılması: a) CSF, b) PTIN, c) DVM ve d) PTIN+CSF 105
Şekil 81. Hibrit yaklaşımın DJI Terra ile karşılaştırılması: a-b) DJI Terra, c-d) PTIN5+CSF5 107

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Uydu, İHA ve Uçak tabanlı görüntüleme sistemlerinin karşılaştırması 9
Tablo 2. Farklı görüntü eşleştirme yöntemlerinin özellikleri, avantajları ve kısıtları 14
Tablo 3. Hava, Yersel ve Mobil LiDAR sistemlerinin karşılaştırılması 18
Tablo 4. Zenmuse L2 sensörü teknik özellikleri 34
Tablo 5. Zenmuse P1 sensörü teknik özellikleri 37
Tablo 6. Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı teknik özellikleri 41
Tablo 7. Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı ayarları 43
Tablo 8. Yersel lazer tarama verilerinin genel bilgileri 43
Tablo 9. Bölümlenen nokta bulutlarının içerdikleri nokta sayıları 52
Tablo 10. Grid Search optimizasyon hiperparametreleri 53
Tablo 11. Test verilerin değerlendirilmesi 54
Tablo 12. CSF parametre seçimi özet bilgileri 79
Tablo 13. CSF yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi 79
Tablo 14. CSF yöntemi ortak referans noktalarına göre doğrulukların değerlendirilmesi 80
Tablo 15. PTIN parametre seçimi özet bilgileri 81
Tablo 16. PTIN yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi 98
Tablo 17. PTIN yöntemi ortak referans noktalarına göre doğrulukların değerlendirilmesi 98
Tablo 18. DVM yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi 102
Tablo 19. PTIN5+CSF5 birleştirme yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi 105
Tablo 20. PTIN yöntemi ortak referans noktalarına göre doğrulukların değerlendirilmesi 106

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ALS : Airborne Laser Scanning (Havadan Lazer Tarama)
CBS : Coğrafi Bilgi Sistemleri
CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor
CSF : Cloth Simulation Filter (Kumaş Simülasyon Filtresi)
DP : Doğru Pozitif
DVM : Destek Vektör Makinesi
DTM : Digital Terrain Model (Sayısal Arazi Modeli)
GNSS : Global Navigation Satellite System (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi)
GPS : Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
GSD : Ground Sample Distance (Yer Örnekleme Aralığı)
İHA : İnsansız Hava Aracı
IMU : Inertial Measurement Unit (Atalet Ölçüm Birimi)
LiDAR : Light Detection and Ranging (Işık Algılama ve Mesafe Ölçme)
MCC : Multiscale Curvature Classification (Eğrilik Tabanlı Filtrasyon)
MHF : Multi-resolution Hierarchical Filter (Çok Çözünürlüklü Hiyerarşik Filtre)
MLS : Mobile LiDAR System (Mobil LiDAR Sistemi)
NIR : Near Infrared (Yakın Kızılötesi)
PPK : Post Processing Kinematics
PRF : Pulse Repetition Frequency (Darbe Tekrarlama Frekansı)
PTIN : Progressive Triangulated Irregular Network (Aşamalı Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ)
PTD : Progressive TIN Densification (Aşamalı TIN Yoğunlaştırma)
RGB : Red, Green, Blue (Kırmızı, Yeşil, Mavi)
RTK : Real Time Kinematics (Gerçek Zamanlı Kinematik)
SAM : Sayısal Arazi Modeli
SBF : Slope Based Filter (Eğim Tabanlı Filtre)
SegBF : Segmentation Based Filter (Segmentasyon Tabanlı Filtre)
SMRF : Simple Morphological Filter (Basit Morfolojik Filtre)
SVM : Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
SYM : Sayısal Yüzey Modeli

TIN : Triangulated Irregular Network (Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ)

TLS : Terrestrial Laser Scanning (Yersel Lazer Tarama)

ToF : Time-of-Flight (Uçuş Süresi)

YN : Yanlış Negatif

λ : Ölçek Faktörü

ω, φ, κ : Açısal Dönüklük Değerleri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Arkeolojik kazılar, insanlık tarihini anlamada ve kültürel mirasın korunmasında önemli bilimsel araştırma alanlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmalar, geçmiş medeniyetlerin yaşam tarzlarını, sosyal organizasyonlarını ve çevresel etkileşimlerini bilimsel yöntemlerle analiz etmeyi ve belgelemeyi amaçlamaktadır (Renfrew & Bahn, 2016). Geleneksel arkeolojik araştırma yöntemleri genellikle manuel ölçümler ve görsel analizlere dayanmaktadır. Ancak, bu yöntemler geniş alanların belgelenmesi ve topografik değişimlerin izlenmesi açısından yetersiz kalabilmektedir (Doneus vd., 2013). Son yıllarda gelişen uzaktan algılama teknolojileri ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) teknolojileri, arkeolojik alanların yüksek doğruluklu mekânsal verilerle modellenmesini ve analiz edilmesini mümkün kılmıştır (Opitz & Cowley, 2013).

Bu bağlamda, hassas arazi modelleme yöntemleri, arkeolojik kazı alanlarında envanter oluşturma, yüzey morfolojisinin detaylı şekilde incelenmesi ve kazı alanlarının daha etkin yönetilmesi açısından önemli bir araç hâline gelmiştir (Remondino, 2011). Arkeolojik kazı alanlarının hassas haritalanması, yalnızca kazı sürecini kolaylaştırmakla kalmayıp, aynı zamanda arkeolojik mirasın korunmasına ve uzun vadeli dokümantasyonuna da olanak tanımaktadır. Ancak, geleneksel haritalama teknikleri, özellikle yoğun bitki örtüsüne sahip veya ulaşımı zor olan alanlarda yeterince etkin değildir (Opitz & Cowley, 2013). Bu nedenle, modern uzaktan algılama teknikleri arkeolojik çalışmalar için güçlü bir çözüm olanağı sunmaktadır.

LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, yoğun bitki örtüsüyle kaplı veya topografik açıdan zorlayıcı bölgelerde yüksek doğruluklu yüzey modeli oluşturabilmesi nedeniyle arkeolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Chiabrando vd., 2020). LiDAR verileri, bitki örtüsünün ve yüzey üzerindeki unsurların filtrelenmesiyle, zemindeki topografik özelliklerin daha detaylı analiz edilmesini sağlamaktadır (Doneus vd., 2013). Böylece, arkeolojik alanlarda daha verimli kazı süreçleri yürütülebilmekte ve koruma stratejileri daha iyi geliştirilebilmektedir.

LiDAR teknolojisi, lazer darbeleri kullanarak nesneler arasındaki mesafeyi ölçen ve yüzeyin üç boyutlu nokta bulutu şeklinde modellenmesini sağlayan bir uzaktan algılama yöntemidir. Kullanım amacına ve veri toplama platformuna göre Havadan LiDAR (ALS - Airborne LiDAR), Yersel LiDAR (TLS - Terrestrial LiDAR) ve Mobil LiDAR (MLS - Mobile LiDAR) olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu üç sistem, geniş bir kullanım yelpazesi sunarak, mühendislikten çevresel analizlere kadar birçok alanda yüksek hassasiyetli üç boyutlu veri üretimine olanak tanımaktadır.

LiDAR teknolojisi, arkeolojik kazı alanlarının detaylı olarak haritalanması, topografik değişimlerin izlenmesi ve yoğun bitki örtüsü altında kalan yapıların tespit edilmesi açısından devrim niteliğinde bir araç hâline gelmiştir. Özellikle Havadan LiDAR (ALS), arkeolojik yüzey araştırmalarında geniş ölçekli haritalama için kullanılırken, Yersel LiDAR (TLS) ve Mobil LiDAR (MLS), kazı alanlarında detaylı yüzey modellerinin oluşturulmasını sağlamaktadır. Örneğin, Doneus vd. (2013), ALS kullanarak ormanlık alanlar altında gömülü arkeolojik yapıların tespit edilmesi sağlanmış ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk elde etmiştir. Opitz & Cowley (2013), LiDAR ve fotogrametri kombinasyonunun, arkeolojik alanlarda üç boyutlu haritalama sürecini inceleyerek, kazı süreçlerini hızlandırdığını ortaya koymuştur. Bitelli vd. (2004), Pompeii'de Yersel LiDAR kullanarak kazı alanındaki mimari yapıların korunmasına yönelik hassas yüzey modelleri üretmiş ve LiDAR'ın tarihî alanların belgelenmesindeki önemini vurgulamıştır. Bu çalışmalar, LiDAR teknolojisinin, arkeolojik alanların mekânsal analizinde ve kazı süreçlerinin sistematik olarak yönetilmesinde vazgeçilmez bir araç olduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışması, arkeolojik kazı alanlarında LiDAR nokta bulutu kullanarak yüksek doğruluklu arazi modelleme sürecinin değerlendirilmesini ve farklı zemin filtreleme yöntemlerinin performanslarının karşılaştırması amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, Ordu ili, Fatsa ilçesinde bulunan ve 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı olarak tescillenmiş olan Çıngırt Kalesi pilot bölge olarak seçilmiştir. Bu bölgenin yoğun bitki örtüsüne sahip olması ve geleneksel yöntemlerle haritalandırılmasının zorlukları, LiDAR tabanlı arazi modelleme yöntemlerinin etkinliğini test etmek için uygun bir ortam sunmaktadır. Arkeolojik kazı alanının detaylı ve yüksek doğruluklu bir şekilde modellenmesi amacıyla hem havadan hem de yersel LiDAR verileri toplanmış ve nokta bulutu verileri elde edilmiştir. Kazı alanlarının yüksek doğruluklu haritalandırılması için CSF, PTIN ve DVM gibi farklı zemin filtreleme algoritmaları test edilmiştir.

Bu tez çalışmasının sonuçları, arkeolojik kazı süreçlerinin hızlandırılması, hassas konumlandırma olanaklarının geliştirilmesi ve mekânsal veri doğruluğunun artırılması açısından önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca, LiDAR teknolojisinin arkeolojik yüzey modellemesi alanında kullanımına yönelik bilimsel literatüre katkı sağlaması ve gelecekteki çalışmalara temel oluşturması amaçlanmaktadır.

1.2. Çalışmanın Motivasyonu

Bu çalışmanın temel motivasyonu, arkeolojik kazı alanlarında LiDAR teknolojisinin kullanımıyla, yüksek doğruluklu yüzey modelleri oluşturmak ve farklı zemin filtreleme yöntemlerinin performansını karşılaştırmaktır. Geleneksel haritalama yöntemleri, özellikle yoğun bitki örtüsü ve engebeli arazi yapısına sahip kazı alanlarında yetersiz kalabilmektedir. Bu durum, arkeolojik alanların belgelenmesini ve kazı süreçlerinin planlanmasını zorlaştırmaktadır. LiDAR tabanlı veri toplama ve işleme yöntemleri, bu kısıtlamaları aşarak kazı sahalarının detaylı bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, farklı filtreleme algoritmalarının yüzey modeli üretimindeki doğruluğu analiz edilerek, arkeolojik kazılar için en uygun yöntemlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma bulgularının, LiDAR teknolojisinin arkeolojik kazılarda daha etkin kullanılmasına katkı sağlaması ve bu yöntemin kazı süreçlerine entegrasyonu konusunda araştırmacılara rehberlik etmesi beklenmektedir.

1.3. Tezin Ana Hattı

Bu tez çalışması, arkeolojik kazı alanlarında LiDAR teknolojisinin kullanımıyla yüksek doğruluklu arazi modeli üretimini değerlendirmeyi ve farklı zemin filtreleme algoritmalarının karşılaştırmalı analizini yapmayı amaçlamaktadır. Geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşarak, kazı alanlarının daha sistematik ve detaylı bir şekilde belgelenmesini sağlamak bu çalışmanın temel hedeflerinden biridir. Bu kapsamda, LiDAR tabanlı veri toplama süreçlerinin etkinliği incelenmiş ve çeşitli zemin filtreleme algoritmalarının doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, çalışmanın genel çerçevesini sunmaktadır. Bu kapsamda, çalışmanın amacı, motivasyonu ve literatürde yer alan benzer araştırmalar ele alınmış; LiDAR teknolojisinin arkeolojik kazılardaki kullanımına ilişkin mevcut bilimsel çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca, tez kapsamında ele

alınan temel kavramlar ve araştırmada uygulanan yaklaşımlar detaylandırılarak, çalışmanın teorik ve metodolojik çerçevesi ortaya konmuştur.

İkinci bölüm, çalışma alanı, veri toplama süreçleri ve kullanılan yöntemleri içermektedir. Ordu ili, Fatsa ilçesinde yer alan ve 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı olarak tescillenmiş Çıngırt Kalesi çalışma sahası olarak belirlenmiştir. Bu bölümde, havadan ve yersel LiDAR verilerinin toplanma süreci açıklanarak kullanılan sensörler ve veri işleme yöntemleri detaylandırılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan Hava LiDAR (ALS) ve Yersel LiDAR (TLS) sistemleri tanıtılmış ve veri toplama sürecindeki avantajları ve sınırlılıkları ele alınmıştır.

Üçüncü bölüm, çalışmadan elde edilen bulguları ve yapılan analizleri kapsamaktadır. Farklı zemin filtreleme algoritmalarının performans karşılaştırmaları detaylı olarak ele alınmış; CSF (Cloth Simulation Filter), PTIN (Aşamalı Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ) ve DVM (Destek Vektör Makinesi) yöntemlerinin doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırılarak, arkeolojik kazılar için en uygun filtreleme yönteminin belirlenmesine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

Dördüncü bölüm, tez boyunca yapılan analizlerin ve elde edilen sonuçların genel bir değerlendirmesini sunmaktadır. Arkeolojik kazı alanlarında LiDAR verilerinin kullanılarak yüksek doğruluklu arazi modellerinin oluşturulmasını ve farklı zemin filtreleme algoritmalarının karşılaştırılmasının sonuçları irdelenmiş, CSF ve PTIN yöntemlerinin yüksek doğruluk sağladığı, DVM yönteminin ise optimizasyona ihtiyaç duyduğunu göstermiştir. Önerilen hibrit yaklaşımın arazi modelleme doğruluğunu artırdığı belirlenmiştir. Bu bölümlerin ardından kaynaklar ve özgeçmiş ile tez tamamlanmıştır.

1.4. Çalışmanın Amacı

Arkeolojik kazı alanlarında hassas arazi modelleme ve zemin haritalaması, kazı süreçlerinin verimliliğini artırmak, kültürel mirası koruma stratejilerini geliştirmek ve mekânsal veri bütünlüğünü sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, yüksek çözünürlüklü ve üç boyutlu nokta bulutu verisi sağlayarak, geleneksel fotogrametrik yöntemlere kıyasla yoğun bitki örtüsü altındaki arazi morfolojisinin daha doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır. Ancak, LiDAR verilerinin işlenmesi sürecinde, zemin filtreleme yöntemlerinin performanslarının değerlendirilmesi ve en uygun algoritmanın belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, arkeolojik kazı alanlarında LiDAR nokta bulutu kullanılarak yüksek doğruluklu arazi modelleme sürecinin değerlendirilmesi ve farklı zemin filtreleme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizinin gerçekleştirilmesidir. Bu doğrultuda, literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı algoritmanın (CSF, PTIN ve DVM) performansları karşılaştırılarak, arkeolojik yüzey modellemesi için en yüksek doğruluğa sahip yöntemin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

1.5. Literatür Araştırması

Wu vd. (2022), yaptıkları çalışmada ormanlık alanlarda nokta bulutlarından zemin noktalarını ayırt etmek için yerel minimum değerler ve makine öğrenimi tekniklerini birleştiren yeni bir filtreleme yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntem, iteratif minimum değerler ve makine öğrenimini birleştirerek, zemin ve zemin olmayan noktaları %87,3'lük bir çapraz doğrulama performansı ile tahmin etmektedir.

Li vd. (2022), ormanlık alanlarda insansız hava aracı LiDAR verilerinden zemin noktalarını ayırt etmek için yeni bir derin öğrenme mimarisi olan Terrain-Net'i tanıtmışlardır. Terrain-Net, 70 farklı ormanlık alandan elde edilen 15 milyondan fazla etiketlenmiş nokta ile eğitilmiş ve çeşitli ormanlık ortamları kapsayan 17 farklı sahada test edilmiştir. Terrain-Net için Kappa katsayısı %93, MIoU %93 ve genel doğruluk %98'lik sonuç elde edilmek suretiyle üstün bir performans sergilenmiştir.

Jin vd. (2022), tarafından yapılan çalışmada ormanlık alanlarda hava kaynaklı LiDAR verilerinden zemin noktalarını ayırt etmek için nokta tabanlı tam konvolüsyonel bir sinir ağı (PFCN) önerilmektedir. Bu ağ, yalnızca geometrik özellikleri kullanarak doğrudan nokta bulutlarını işlemekte ve zemin ile zemin olmayan noktaları ayırt etmektedir.

Chen vd. (2021), LiDAR verilerinden zemin noktalarını ayırt etmek için ölçekten bağımsız ve araziye uyarlanabilir bir yöntem önermektedir. Bu yaklaşım, farklı ölçeklerde ve karmaşık arazi koşullarında daha etkili zemin filtrelemesi sağlamayı amaçlamaktadır.

Rizaldi vd. (2018), yaptıkları çalışmada, LiDAR nokta bulutlarından zemin sınıflandırması yapmak için tam konvolüsyonel sinir ağları (CNN) kullanımını ele almaktadır. Bu yaklaşımda, tüm nokta bulutu tek bir görüntüye dönüştürülerek, sınıflandırma işlemi piksel bazında görüntü sınıflandırmasına yönelik olarak modifiye edilmiş, Tam Konvolüsyonel Ağ (FCN) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Rashidi ve Rastiveis (2018), yaptıkları çalışmada, LiDAR verilerinden zemin noktalarını ayırt etmek için yeni bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritma, çok ölçekli ve eğim tabanlı yöntemleri birleştirerek, yerel pencerelerdeki noktaların eğim ve yükseklik bilgilerini kullanarak zemin ve zemin olmayan noktaları ayırmayı hedeflemektedir.

Zeybek ve Şanlıoğlu (2019), tarafından gerçekleştirilen çalışmada nokta bulutlarından zemin noktalarını ayırt etmek için dört farklı algoritmanın performansı incelenmiştir. Bu algoritmalar; Eğrilik Tabanlı Filtreleme (Multiscale Curvature Classification- MCC), Yüzey Tabanlı Filtreleme (FUSION), Aşamalı TIN Tabanlı Filtreleme (LAStools-lasground Modülü), Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ (TIN) ve Kumaş Simülasyon Filtreleme (Cloth Simulation Filtering- CSF) şeklindedir. Sonuçlar, farklı metotların, yoğun bitki örtüsü, düz yüzeyler, engebeli ve karmaşık araziler gibi çeşitli arazi özelliklerinde benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Özellikle, CSF filtreleme yöntemiyle düz yüzeylerde %93 doğrulukla zemin noktalarının uygun bir şekilde ayırt edilebildiği gözlemlenmiştir.

Chen vd. (2021), çalışmasında farklı arazi özelliklerine sahip altı çalışma sahasında beş temsili zemin filtreleme algoritmasının performansını karşılaştırmıştır. Değerlendirilen yöntemler arasında Eğim Tabanlı Filtre (SBF), Aşamalı TIN Yoğunlaştırma (PTD), Segmentasyon Tabanlı Filtre (SegBF), Basit Morfolojik Filtre (SMRF) ve Çok Çözünürlüklü Hiyerarşik Filtre (MHF) yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, kentsel alanlarda SMRF'nin, ormanlık alanlarda ise MHF'nin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, MHF, tüm çalışma sahalarında kappa katsayısı açısından SMRF'e kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamıştır.

Moudry vd. (2020), LiDAR nokta bulutlarında kullanılan altı farklı zemin filtreleme algoritmasının performansın GNSS verileriyle karşılaştırılarak nitel ve nicel olarak değerlendirmiştir. Yapılan analizde tüm algoritmaların genel olarak iyi performans gösterdiğini ancak arazi eğimi ve bitki örtüsünden etkilendiğini ortaya koymuştur. Özellikle, PTIN algoritmasının farklı ortamlarda dengeli sonuçlar sağladığı belirlenmiş, algoritmaların eğilimlerinin arazi yapısına ve bitki örtüsüne bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Jimenez vd. (2021), LiDAR nokta bulutlarından zemin segmentasyonu için iki aşamalı bir strateji önermiştir. İlk aşamada, noktalar küçük gruplara ayrılarak yerel geometrik özelliklerine göre başlangıç sınıflandırması yapılmış, ardından bu sınıflandırma Loopy İnanç Yayılımı (LBP) algoritması ile çözülen bir Markov Rastgele Alanı (MRF) modeli oluşturmak için kullanılmıştır. Deneyler, nuScenes veri kümesi ve otonom araç

prototipi verileriyle gerçekleştirilmiş olup, önerilen yöntemin özellikle eğimli araziler ve seyrek verilerde mevcut yöntemlere kıyasla daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir.

Doneus vd. (2020), havadan lazer taramasına (ALS) dayalı sayısal arazi modeli (SAM) üretiminde zemin noktası filtrelemesinin önemi vurgulanmış ve farklı bitki örtüsü yoğunluklarına uyarlanmış çoklu filtreleme stratejisi önermiştir. Hırvatistan'daki Akdeniz peyzajı üzerinde gerçekleştirilen çalışma, tek bir filtrenin tüm arazi türleri için yeterli olmadığını ve farklı filtreleme ayarlarının kombinasyonunun optimum sonuçlar sağladığını göstermiştir. Sonuçlar, arkeolojik araştırmaların yanı sıra çeşitli alanlarda kullanılabilecek uyarlanabilir bir zemin noktası filtreleme yaklaşımının geliştirilmesine yönelik önemli bir adım sunmaktadır.

Cai vd. (2019), CSF ve PTIN algoritmalarını birleştiren yeni bir filtreleme yöntemi önermiştir. Yüksek kaliteli bir başlangıç sayısal arazi modeli (SAM) oluşturmak için CSF kullanılmış ve PTIN'nın parametre eşikleri istatistiksel analizle uyarlanabilir hale getirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen algoritmanın doğruluk ve pratiklik açısından mevcut yöntemlerden üstün olduğunu göstermektedir.

1.6. Temel Kavramlar

1.6.1. Hava Görüntüleri

Hava görüntüleri, belirli bir bölgenin atmosferden çekilmiş fotoğraf veya dijital görüntülerdir. Uzaktan Algılama, Fotogrametri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) alanlarında yaygın olarak kullanılan bu görüntüler, kent planlaması, arazi modelleme, doğal afet yönetimi ve arkeolojik çalışmalar gibi birçok alanda temel veri kaynağını oluşturmaktadır (Karslı, 2018; Bahadır, 2023).

Hava görüntüleme teknolojileri, geleneksel fotogrametrik yöntemlerden dijital görüntüleme tekniklerine evrilerek yüksek doğruluklu mekânsal veri üretimini mümkün kılmıştır. Özellikle LiDAR teknolojisinin hava görüntüleme sistemleriyle entegrasyonu, yoğun bitki örtüsü altındaki topografik detayların belirlenmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır (Acar, 2018).

Hava görüntüleme çalışmaları, Gaspard-Félix Tournachon (Nadar) tarafından 1858 yılında Paris'in üzerinden sıcak hava balonuyla çekilen ilk hava fotoğrafları ile başlamıştır (Rehak, 2018). I. ve II. Dünya Savaşları sırasında askeri keşif ve haritalama amacıyla

büyük ilerlemeler kaydedilmiş, 1950'lerden itibaren ise tarım, orman yönetimi ve şehir planlaması gibi sivil kullanım alanlarında yaygınlaşmıştır (Kavzoğlu & Çölkesen, 2019). Günümüzde yüksek çözünürlüklü dijital hava fotoğrafları, uydu görüntüleri ve LiDAR tabanlı üç boyutlu (3B) modeller ile arazi analizleri daha detaylı hale gelmiştir (Bahadır, 2023).

Hava görüntüleri, çekim yöntemi, sensör teknolojisi ve spektral özelliklerine göre sınıflandırılabilir.

1- Düşey (Nadir) ve Oblik (Eğimli) Hava Fotoğrafları: Düşey hava fotoğrafları, kamera ekseni yere dik olacak şekilde çekilen ve haritalama amaçlı kullanılan görüntülerdir (Awrangjeb, 2016). Oblik hava fotoğrafları, farklı açılardan çekilen eğimli görüntüler olup, mimari belgeleme ve arkeolojik analizlerde detaylı yapı bilgisi sunmaktadır (Acar, 2018).

2- Analog ve Dijital Hava Fotoğrafları: Analog hava fotoğrafları, 20. yüzyılın ortalarına kadar film bazlı sistemlerle çekilmiş ve fotogrametrik analizler için kullanılmıştır (Karslı, 2018). Dijital hava fotoğrafları, yüksek çözünürlüklü sensörlerle elde edilerek geometrik düzeltme ve görüntü işleme süreçlerinde daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Yavuz, 2024).

3- Spektral Özelliklerine Göre Hava Görüntüleri: RGB Görüntüler (Görünür Spektrum); İnsan gözünün algılayabildiği kırmızı, yeşil ve mavi renklerde elde edilen görüntülerdir. Yakın Kızılötesi (NIR) Görüntüler; Bitki örtüsü analizlerinde, tarımsal haritalamada ve çevresel değişimlerin izlenmesinde kullanılır (Huang & Zhang, 2012). Termal Görüntüler; Sıcaklık farklarını belirleyerek yangın tespiti, enerji kayıpları ve jeotermal analizlerde kullanılır. Hiperspektral ve Multispektral Görüntüler; Elektromanyetik spektrumun geniş bir aralığında veri sağlayarak mineral keşfi, su kalitesi analizi ve çevresel izleme gibi ileri seviye araştırmalarda tercih edilir (Kavzoğlu & Çölkesen, 2019).

Hava görüntüleri, farklı platformlardan elde edilebilir:

1- Uçak ve Helikopter ile Görüntüleme: Geleneksel hava fotogrametrisi için tercih edilen yöntem olup, geniş alanları kapsayan detaylı veri sağlar (Acar, 2018).

2- İnsansız Hava Araçları (İHA – Drone) ile Görüntüleme: Küçük ölçekli projeler için düşük maliyetli ve yüksek çözünürlüklü veri üretimi sağlar. Özellikle arkeolojik alanların dokümantasyonu için tercih edilmektedir (Karslı, 2018).

3- Uydu Tabanlı Görüntüleme: Geniş alanları kapsayan sürekli veri toplama kapasitesine sahiptir, ancak yer çözünürlüğü genellikle hava platformlarına göre düşüktür.

Farklı hava görüntüleme platformlarının avantajları, dezavantajları ve kullanım alanlarına göre karşılaştırmalı analizi Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Uydu, İHA ve Uçak tabanlı görüntüleme sistemlerinin karşılaştırması

Özellik/Kriter	Uydu Tabanlı Görüntüleme	Uçak Tabanlı Görüntüleme	İHA Tabanlı Görüntüleme
Çözünürlük	Orta-Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Maliyet	Yüksek	Orta-Yüksek	Düşük-Orta
Hava Koşullarına Bağlılık	Düşük	Yüksek	Yüksek
Erişim ve Esneklik	Düşük	Orta	Yüksek
Kapsama Alanı	Geniş (Küresel)	Orta (Bölgesel)	Dar (Yerel)

Hava görüntüleri, modern haritalama ve uzaktan algılama çalışmalarında vazgeçilmez bir veri kaynağıdır. Arkeolojik araştırmalarda hava görüntüleri, yer altındaki yapıların belirlenmesi, kazı alanlarının haritalanması ve zaman içindeki değişimlerin izlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Arkeolojik alanların dokümantasyonunda LiDAR ile entegre hava görüntülerinin kullanılması, yapıların korunması ve analiz edilmesi açısından büyük bir katkı sağlamaktadır.

1.6.2. Fotogrametri

Fotogrametri, fiziksel nesnelerin veya arazi yüzeylerinin fotoğrafik görüntülerinden konum, boyut ve şekil bilgilerinin çıkarılmasını sağlayan disiplinler arası bir bilim dalıdır. Etimolojik açıdan incelendiğinde, Hellence "phos" (ışık), "gramma" (kayıt) ve "metron" (ölçme) sözcüklerinin birleşiminden oluşan bu terim, ışığın kaydettiği görüntülerden ölçüm yapma sanatını ifade etmektedir. Bu teknoloji, elektromanyetik radyasyonun cisimlerle etkileşimini ve bu etkileşimin oluşturduğu optik izdüşümleri kullanarak, gerçek nesnelerin sayısal temsillerinin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

Fotogrametrinin gelişimi, teknolojinin ilerlemesiyle üç temel döneme ayrılmaktadır:

- 19. yüzyıl: İlk fotogrametrik yöntemler Fransız Albay Aimé Laussedat tarafından geliştirilmiş, askeri haritacılıkta kullanılmaya başlanmıştır (Krause, 2004).

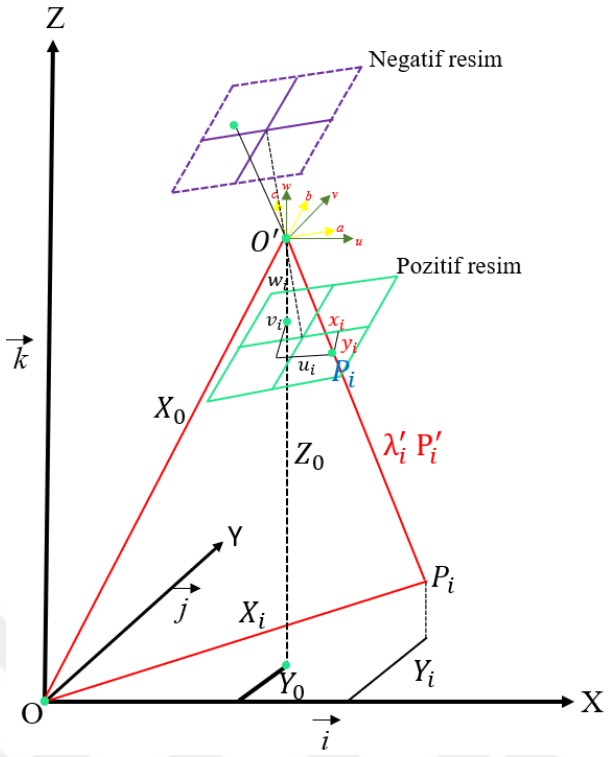
- 20. yüzyıl: Hava fotogrametrisi gelişmiş, analog görüntüleme tekniklerinden sayısal sistemlere geçiş yapılmıştır. Özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrası havadan görüntüleme teknikleri jeodezi ve haritacılıkta yaygınlaşmıştır (Remondino & Campana, 2014).

- 21. yüzyıl: LiDAR teknolojisi, yapay zekâ tabanlı görüntü işleme teknikleri ve yüksek çözünürlüklü sensörlerle desteklenen fotogrametrik yöntemler, veri toplama süreçlerini hızlandırmış ve hassasiyetini artırmıştır (Luhmann vd., 2019).

Türkiye'de fotogrametri çalışmaları, 1925'te Harita Umum Müdürlüğü'nün kurulmasıyla başlamış, 1930'larda ilk hava fotogrametrisi uygulamaları gerçekleştirilmiştir (Alptekin, 2010). 1950'lerde İTÜ'de ve sonrasında KTÜ, YTÜ gibi üniversitelerde kurulan jeodezi ve fotogrametri bölümleri akademik gelişime öncülük etmiştir (Yılmaz, 2015). 1980-90'larda analog sistemlerden dijital teknolojilere geçiş yaşanmış (Çelik & Ateş, 2007), 2000 sonrası İHA kullanımının yaygınlaşmasıyla fotogrametrinin uygulama alanları genişlemiştir (Yıldız vd., 2018). Günümüzde LiDAR, yapay zekâ ve bulut teknolojileriyle entegre edilen fotogrametri, yüksek çözünürlüklü arazi modelleri üretiminde etkin biçimde kullanılmaktadır (Özdemir & Kaya, 2021).

Uygulama alanlarına göre fotogrametri; hava fotogrametrisi, yersel fotogrametri ve yakın mesafe fotogrametrisi olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Hava fotogrametrisi, insansız hava araçları (İHA) veya fotogrametrik uçaklar kullanılarak geniş alanların modellenmesini sağlarken; yersel fotogrametri, yeryüzündeki nesnelerin çevresinden çekilen görüntüler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Yakın mesafe fotogrametrisi ise, nesne ile kamera arasındaki mesafenin 300 metreden az olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Uzaktan algılama, haritacılık ve mühendislik gibi birçok alanda kullanılan bu teknik, stereoskopik prensipler ile farklı açılardan alınan görüntüleri birleştirerek yüzey modelleri oluşturur (Karslı & Özdemir, 2022; Linder, 2016).

Fotogrametri, iki boyutlu görüntülerden üç boyutlu nesnelerin koordinatlarını çıkarmak için kullanılan matematiksel prensiplere dayalı bir ölçme yöntemidir. Bu yöntem, kolinearite denklemleri temelinde çalışır ve görüntü uzayındaki noktaların, izdüşüm merkezinden geçerek yeryüzüne ait koordinat sistemine dönüştürülmesini sağlar (Karslı, 2022). Fotogrametrinin temel matematiksel modeli, Şekil 1'de detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 1. Fotogrametrinin matematiksel modeli (Karslı, 2022)

Fotogrametrik modelin yeniden konumlandırılması için iç yöneltme parametreleri, kamera sabiti (c) ve asal nokta koordinatları (x_o, y_o) ile dış yöneltme parametreleri, iz düşüm merkez koordinatları (X_o, Y_o, Z_o) ve açısal dönüklük değerleri (ω, φ, κ) gereklidir (Karslı, 2022).

Modelde yer alan O noktası, üç boyutlu obje koordinat sisteminin başlangıç noktası P_i (X, Y, Z) nesnenin yeryüzündeki konumunu tanımlamaktadır. İzdüşüm merkezi O' ise (X_o, Y_o, Z_o) koordinatlarına sahiptir ve OP_i vektörü, bu noktalar arasındaki mekansal üçgeni tanımlamaktadır. Resim koordinat sistemi ile obje koordinat sistemi arasındaki dönüşüm işleminin gerçekleştirilebilmesi için ölçek faktörü (λ_i) ve dönüklük matrisinin (R) bilinmesi gerekmektedir. Genel izdüşüm denklemleri Denklem 1'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \lambda_i' R \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ -c \end{pmatrix} \quad (1)$$

Obje ve görüntü koordinat sistemlerinde bulunan birim vektörler (i, j, k ve a, b, c), birbirine dik konumlanmış olup tüm eksenlerde aynı ölçek faktörü uygulanmaktadır. Arazi

koordinatlarından (X_i, Y_i ve Z_i), resim koordinatlarının (x_i, y_i) hesaplanması amacıyla kullanılan izdüşüm denklemi, Denklem 2'de gösterilmektedir.

$$\begin{pmatrix} X_i \\ y_i \\ -c \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda_i'} R^T \begin{pmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{pmatrix} \tag{2}$$

(1) ve (2) numaralı denklemlerde tanımlanan dönüklük matrisinin hesaplanabilmesi için, üç eksendeki dönüklük matrislerinin (Rω, Rφ, Rχ) bilinmesi gerekmektedir. Dönüklük açılarının hesaplanması için ilgili açının kosinüs ve sinüs değerleri kullanılır. (3), (4) ve (5) numaralı eşitliklerde X, Y ve Z eksenlerine ait dönüklük matrisleri verilmiş olup, bu matrisler kullanılarak (6) numaralı denklemdeki genel dönüklük matrisi formülü türetilmektedir (Karslı, 2022).

$$R_\omega^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\,\omega & sin\,\omega \\ 0 & -sin\,\omega & cos\,\omega \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$R_\varphi^T = \begin{pmatrix} cos\,\varphi & 0 & sin\,\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\,\varphi & 0 & cos\,\varphi \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$R_\chi^T = \begin{pmatrix} cos\,\chi & sin\,\chi & 0 \\ -sin\,\chi & cos\,\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$R^T = R_\omega^T R_\varphi^T R_\chi^T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} \tag{6}$$

(2) numaralı denklemde R^T matrisi yerine yazıldıktan sonra, resim koordinatlarının (x_i, y_i) hesaplanmasını sağlayan izdüşüm denklemleri (7) ve (8) numaralı eşitliklerde ifade edilmektedir. Ölçek faktörü (λ), sadeleştirme işlemi nedeniyle genel izdüşüm denklemlerinde yer almamaktadır. Genel olarak, izdüşüm denklemlerinin oluşumu; görüntü, izdüşüm merkezi ve arazi noktalarının doğrusal bir hat üzerinde konumlanması prensibine dayanmaktadır.

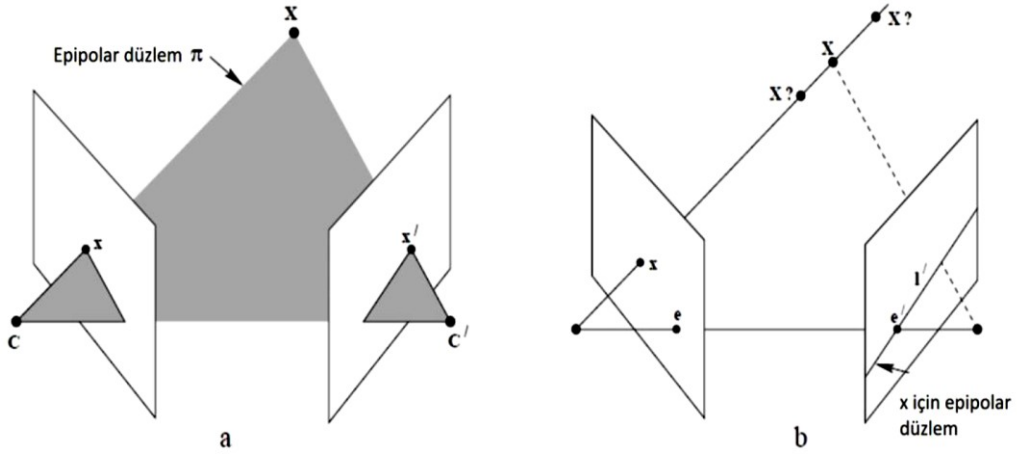
$$x_i = -c\frac{r_{11}(X_i-X_0)+r_{12}(Y_i-Y_0)+r_{13}(Z_i-Z_0)}{r_{31}(X_i-X_0)+r_{32}(Y_i-Y_0)+r_{33}(Z_i-Z_0)} \tag{8}$$

$$-c\frac{r_{21}(X_i-X_0)+r_{22}(Y_i-Y_0)+r_{23}(Z_i-Z_0)}{r_{31}(X_i-X_0)+r_{32}(Y_i-Y_0)+r_{33}(Z_i-Z_0)} \tag{9}$$

1.6.3. Görüntü Eşleştirme

Görüntü eşleştirme, birden fazla görüntü arasında ortak detay noktalarının belirlenmesi, eşleştirilmesi ve geometrik uyumlarının sağlanması sürecidir. Dijital fotogrametri, uzaktan algılama ve bilgisayarla görme alanlarında kullanılan bu yöntem, üç boyutlu modelleme, arazi analizleri, kentsel planlama ve arkeolojik haritalama gibi uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır (Hirschmüller, 2011; Qi vd., 2017). Stereo görüntü çiftlerinden derinlik haritalarının oluşturulması ve nokta bulutu üretimi süreçlerinde, yoğunluk tabanlı ve özellik tabanlı eşleştirme algoritmaları kullanılarak yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmektedir (Grilli vd., 2017; Svensk, 2017). Modern algoritmalar, görüntü yoğunluklarını analiz ederek otomatik eşleştirme ve hata azaltma teknikleriyle veri doğruluğunu artırmakta, ayrıca mimari dokümantasyon, kentsel modelleme ve jeodezik ölçümler gibi alanlarda geniş bir kullanım alanı sunmaktadır.

Görüntü eşleştirme teknikleri manuel, yarı otomatik ve tam otomatik olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Manuel ve yarı otomatik yöntemlerde kullanıcı tarafından belirlenen kontrol noktaları ile eşleme gerçekleştirilir. Epipolar geometri kullanılarak temel dönüşüm matrisleriyle düzeltilmiş görüntüler üzerinden eşleşen noktalar belirlenir ve eşleştirme gerçekleştirilir. (Svensk, 2017).



Şekil 2. Epipolar geometri destekli nokta eşleme (Hartley & Zisserman, 2004)

Tam otomatik algoritmalar, SIFT, SURF ve ORB gibi yöntemlerle görüntüde belirli özellik noktalarını seçildiği ve bu noktalar kullanılarak eşleştirmenin yapıldığı özellik tabanlı algoritmalardır (Qi vd., 2017). Yoğunluk tabanlı algoritmalarda, her piksel seviyesinde, ışık yoğunluğu farklılıkları analiz edilerek nokta eşleştirme gerçekleştirilir

(Hirschmüller, 2011). Yarı Global Eşleme'de (SGM) ise stereo görüntülerde, epipolar geometri temel alınarak, çoklu yol optimizasyonu ile eşleşen noktalar belirlenir ve hata minimizasyonu sağlanır (Hirschmüller, 2011; Svensk, 2017).

Görüntü eşleştirme teknikleri, dijital fotogrametri, uzaktan algılama ve bilgisayarla görme alanlarında nesnelerin veya mekânsal yapıların analiz edilmesi için kritik bir süreçtir. Manuel, yarı otomatik ve tam otomatik yöntemler, kullanım amaçlarına, doğruluk seviyelerine ve işlem süresine bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır (Hirschmüller, 2008; Li vd., 2020). Manuel eşleştirme yöntemleri en yüksek kullanıcı kontrolünü sağlarken, büyük veri kümelerinde uygulanabilirliği sınırlıdır. Yarı otomatik eşleştirme teknikleri, insan müdahalesi ve algoritmik işlemenin bir kombinasyonunu içererek doğruluk ve verimlilik açısından dengeli bir çözüm sunar (Bay vd., 2006). Tam otomatik eşleştirme yöntemleri ise derin öğrenme ve bilgisayarla görme algoritmalarını kullanarak büyük ölçekli verilerde hızlı ve tutarlı sonuçlar üretmekte ancak yanlış eşleşmeleri ayıklama süreci zor olabilmektedir (Zhang vd., 2021). Modern eşleştirme algoritmaları, yoğun piksel tabanlı eşleme ve derin öğrenme tabanlı modeller ile yüksek doğrulukta 3B nokta bulutları oluşturmaktadır (Wen vd., 2020). Tablo 2'de farklı görüntü eşleştirme yöntemlerinin temel özelliklerini, avantajlarını ve kısıtlarını bilimsel çerçevede karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2. Farklı görüntü eşleştirme yöntemlerinin özellikleri, avantajları ve kısıtları

Eşleştirme Tekniği	**Tanım**	**Avantajları**	**Dezavantajları**
Manuel Eşleştirme	Kullanıcının görüntüler üzerinde kontrol noktalarını elle belirleyerek eşleştirme yaptığı yöntemdir.	Kullanıcı kontrolü yüksektir; hassas ve spesifik eşleştirmeler yapılabilir.	Zaman alıcıdır; büyük veri setleri için pratik değildir; kullanıcı hatalarına açıktır.
Yarı Otomatik Eşleştirme	Başlangıçta kullanıcı tarafından belirlenen birkaç kontrol noktasının, algoritmalar tarafından işlenerek geri kalan eşleştirmelerin otomatik tamamlandığı yöntemdir.	Kullanıcı müdahalesiyle doğruluk artırılır; tamamen manuel yöntemlere göre daha hızlıdır.	Algoritma karmaşıklığı nedeniyle yanlış eşleşmeler oluşabilir; kullanıcı müdahalesi gerektirir.
Tam Otomatik Eşleştirme	Algoritmaların, görüntülerdeki özellikleri otomatik olarak tespit edip eşleştirdiği yöntemdir.	Büyük veri setlerinde hızlı ve verimli; kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymaz.	Yanlış eşleşmelerin tespiti ve düzeltilmesi zor olabilir; algoritmaların karmaşıklığı nedeniyle yüksek hesaplama gücü gerektirebilir.

1.6.4. Ortofoto Üretimi

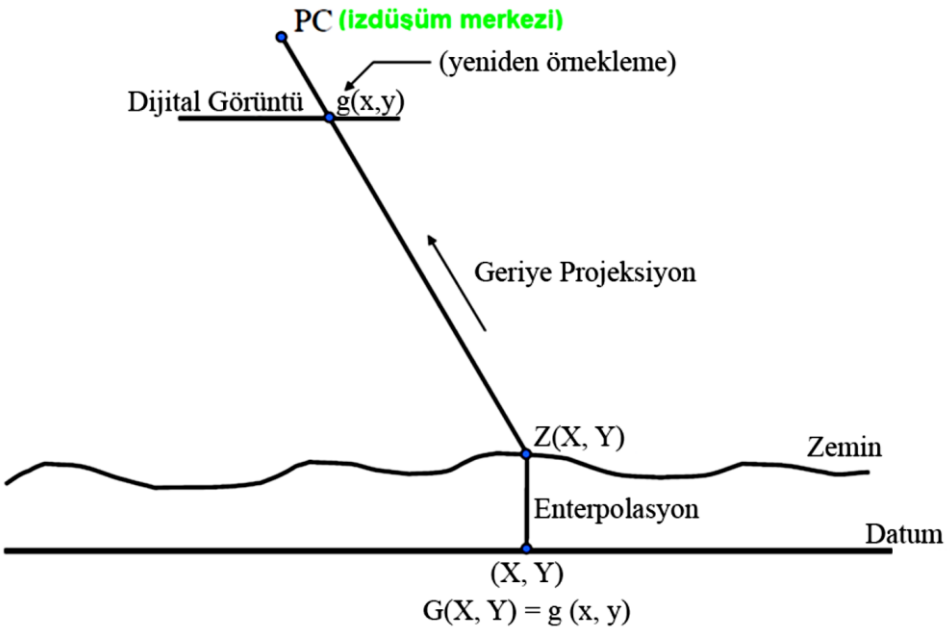
Ortofoto, hava fotoğraflarının veya uydu görüntülerinin belirli fotogrametrik ve jeodezik işlemlerden geçirilerek geometrik doğruluğu artırılmış, koordinat sistemine uygun hale getirilmiş raster formatında görüntüdür (Karslı, vd., 2016; Kraus, 2007). Geleneksel hava fotoğrafları, çekim esnasında kamera eğimi, arazi topoğrafyası ve optik bozulmalar nedeniyle perspektif hatalarına sahip olabilir. Bu hatalar, ortofoto üretim süreci kapsamında fotogrametrik düzeltme işlemlerine tabi tutulur ve görüntüler, ölçülebilir doğrulukta harita formatına dönüştürülür (Axelsson, 2000; Karslı vd., 2021).

Ortofoto üretim sürecinin temel dayanağı, hava fotoğraflarının iç ve dış yöneltme parametrelerine göre düzeltilmesi ve bu sürecin sayısal yükseklik modeli (SYM) veya sayısal arazi modeli (SAM) ile desteklenmesidir. Bu süreç, özellikle arazi topoğrafyasından kaynaklanan eğim etkilerinin giderilmesini ve yeryüzü şekillerinin gerçeğe en yakın haliyle temsil edilmesini sağlar (Karslı vd., 2016). Ortofoto üretimindeki temel aşamalar; görüntü yöneltme, yükseklik modelinin entegrasyonu, geometrik düzeltme ve mozaikleme adımlarını içerir. Sayısal yükseklik modelinin doğruluğu, elde edilen ortofotonun kalitesini doğrudan etkilediği için, özellikle LiDAR veya yüksek çözünürlüklü stereo görüntülerden elde edilen yükseklik verilerinin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır (Karslı vd., 2022). Dijital ortofoto üretim aşamaları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Ortofoto üretim süreci

Ortofoto üretim süreci, bir bölgenin hava fotoğraflarından elde edilen görüntülerin, belirli fotogrametrik işlemlerden geçirilerek harita doğruluğunda ortogonal görüntülere dönüştürülmesini kapsamaktadır. Süreç, hava fotoğraflarının veya uydu görüntülerinin çekilmesi ile başlar. Bu aşamada, çalışma alanı yüksek çözünürlüklü kameralarla görüntülenir ve veri toplama işlemi gerçekleştirilir. Elde edilen ham görüntüler, radyometrik ve geometrik hataların düzeltilmesi amacıyla ön işleme aşamasına tabi tutulur. Bu aşama, mercek distorsiyonlarının giderilmesi ve renk dengelerinin sağlanmasını içerir. Ortofoto üretim sürecinde, görüntülerin iç ve dış yöneltme parametreleri belirlenerek fotogrametrik analizlere hazır hale getirilmesi, sürecin temel aşamalarından biridir (Skarlatos, 1999). Gerçek dünya koordinatlarına hizalanan görüntüler, sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılarak arazi yükseklik farklarıyla modellenir ve ortorektifikasyon sürecine entegre edilir (Forkuo & Dorda, 2011). Ortorektifikasyon, hava fotoğraflarında meydana gelen perspektif bozulmaların giderilmesini sağlayarak, geometrik olarak düzeltilmiş ortogonal görüntülerin elde edilmesini mümkün kılar (Zheng vd., 2018). Sayısal arazi modeli (SAM) kullanılarak ortofoto üretiminde gerçekleştirilen geriye projeksiyon ve enterpolasyon süreçlerini, fotogrametrik prensiplere göre nasıl ilişkilendirildiği Şekil 4'te gösterilmektedir (Kraus, 2007). Mozaikleme ve radyometrik düzeltme işlemleri, farklı görüntülerin birleştirilerek renk ve parlaklık farklarının dengelenmesini sağlar, böylece tutarlı bir ortofoto oluşturulur (Lee & Lee, 2016).



Şekil 4. Ortofoto ve sayısal yüksek modeli arasındaki ilişki (Kraus, 2007)

Ortofotolar, şehir planlama, arazi yönetimi, haritacılık ve arkeolojik alanların haritalanması gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sheng vd., 2003; Özdemir vd., 2021). Fotogrametri ve uzaktan algılama teknolojilerinin gelişimiyle, geleneksel ortofotoların yerini, yüzey yapılarını daha doğru temsil eden gerçek ortofotolar (True Orthophoto) almaktadır. Bu sistemler, özellikle kentsel modelleme ve afet yönetimi gibi hassas analizlerde, eğim kaynaklı bozulmaları gidererek yüksek doğrulukta veri sağlamaktadır (Acar & Karslı, 2019).

Nihai aşamada, oluşturulan ortofoto verileri coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile uyumlu hale getirilerek şehir planlama, arazi yönetimi ve arkeolojik çalışmalar gibi alanlarda kullanılabilecek hassas bir veri ürünü elde edilir (Sheng vd., 2003).

1.6.5. LiDAR Teknolojisi

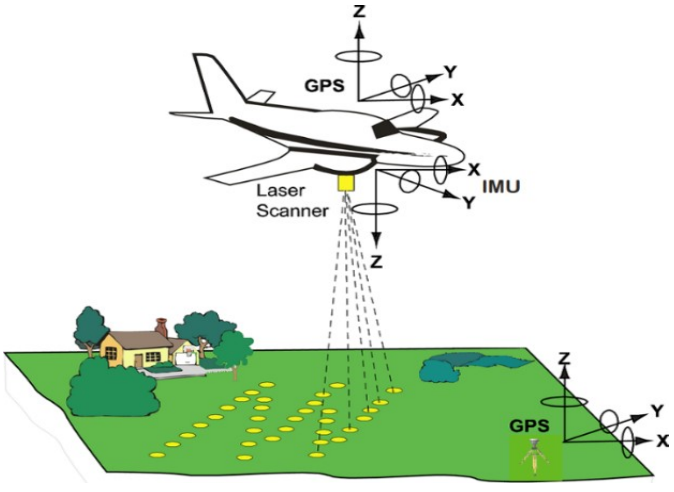
LiDAR (Light Detection and Ranging), lazer ışınları kullanarak nesnelerin veya yüzeylerin konumunu, mesafesini ve morfolojik özelliklerini yüksek doğrulukta ölçmeye olanak tanıyan bir aktif uzaktan algılama teknolojisidir (Wehr & Lohr, 1999). Sistem, lazer darbeleri göndererek yüzeyden geri yansıyan sinyalin seyahat süresini hesaplar ve bu veriler kullanılarak hedef yüzeyin mesafesi, yüksekliği, yoğunluğu ve yapısal karakteristikleri belirlenir (Vosselman & Maas, 2010).

LiDAR sistemleri, veri toplama yöntemlerine göre üç ana gruba ayrılmaktadır: Havadan LiDAR (Airborne LiDAR), Yersel LiDAR (Terrestrial LiDAR) ve Mobil LiDAR (Mobile LiDAR). Hava LiDAR, uçak, helikopter veya insansız hava araçlarına (İHA) monte edilerek geniş alanların hızlı ve yüksek doğrulukla haritalanmasını sağlar. Yersel LiDAR, tripod veya sabit platformlara yerleştirilerek detaylı yüzey analizleri yapmak için kullanılır. Mobil LiDAR ise kara taşıtları, trenler veya gemilere entegre edilerek geniş alanlarda hızla veri toplayarak yollar, binalar, tabelalar ve diğer altyapı unsurlarının üç boyutlu modellemesini gerçekleştirir. Her üç sistem de hassas konumlandırma ve veri işleme teknolojileriyle desteklenerek farklı ölçeklerde yüksek doğruluklu mekânsal veriler üretmektedir. LiDAR sistemlerinin veri toplama yöntemlerine göre temel özellikleri ve kullanım alanları, Tablo 3'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Hava, Yersel ve Mobil LiDAR sistemlerinin karşılaştırılması

Özellik	Hava LiDAR	Yersel LiDAR	Mobil LiDAR
Kullanım Platformu	Uçak, helikopter veya insansız hava araçları (İHA) üzerine monte edilir.	Tripod veya sabit platformlar üzerine kurulur.	Hareketli platformlar (araçlar, trenler, gemiler) üzerine entegre edilir.
Veri Toplama Hızı	Yüksek; geniş alanları kısa sürede tarayabilir.	Düşük; nokta nokta tarama yapıldığından daha yavaştır.	Çok yüksek; hareket halinde sürekli veri toplar.
Veri Yoğunluğu	Orta; uçuş yüksekliğine bağlı olarak nokta yoğunluğu değişir.	Çok yüksek; detaylı ve yoğun nokta bulutları oluşturur.	Yüksek; hareket hızına bağlı olarak nokta yoğunluğu değişebilir.
Doğruluk	Orta; uçuş yüksekliği ve hızına bağlı olarak değişir.	Yüksek; sabit konumda detaylı tarama yapar.	Orta; hareket hızına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişir.

Hem Hava LiDAR hem de Yersel-Mobil LiDAR sistemleri, veri toplama süreçlerinde belirli temel bileşenlere sahiptir. Bu sistemlerin en önemli bileşenlerinden biri olan lazer kaynağı, yüzeye lazer darbeleri göndererek yansıyan ışınları analiz eder ve mesafe ölçümünü gerçekleştirir. Sensör ve dedektörler, yansıyan sinyalleri algılayarak geri dönüş süresini hesaplar ve böylece yüzeyin topoğrafik özellikleri belirlenir. Atalet Ölçüm Birimi (IMU), cihazın hareket yönünü, eğimini ve ivmesini takip ederek tarama sırasında oluşabilecek hata paylarını minimize eder. Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS-GPS), LiDAR sisteminin konumunu hassas bir şekilde belirleyerek verilerin coğrafi koordinatlarla ilişkilendirilmesini sağlar. Bu bileşenlerin bir arada çalışması, LiDAR teknolojisinin yüksek hassasiyetli ve güvenilir mekânsal veri sağlamasına katkıda bulunur. LiDAR teknolojisinin temel bileşenlerini ve ölçüm prensibi gösterilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. LiDAR teknolojisinin temel bileşenleri

LiDAR tarayıcıları tarafından gönderilen lazer ışınları, nesnelerden yansıma sırasına göre kaydedilerek yüzeyin yapısal özelliklerini belirlemekte; yüksek detaylı nesnelerden gelen ilk yansımalar ve zemin yüzeyinden dönen son yansımalar analiz edilerek nesne türü tahmin edilebilmektedir. Ancak, su yüzeyleri ışınları büyük ölçüde absorbe ettiğinden, ölçüm hassasiyeti suyun derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, Batimetrik LiDAR sistemleri, yeşil dalga boyunda (532 nm) lazer kullanarak suyun alt katmanlarından daha fazla veri toplayabilmekte ve su altı morfolojisinin daha doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır (Karslı, 2022; Acar, 2018; Lefsky vd., 2002; Shan & Toth, 2018)

LiDAR sistemleri, hedef yüzeylerin topografik özelliklerini belirlemek amacıyla farklı tarama modları kullanmaktadır. Doğrusal (lineer) tarama, en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olup, sistemin belirli bir doğrultuda lazer darbeleri göndermesi ve yansımaları algılaması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde, her lazer darbesi, bir önceki darbenin sensöre ulaşmasının ardından gönderildiğinden, ölçüm hassasiyeti Darbe Tekrarlama Frekansı (Pulse Repetition Frequency - PRF) ile doğrudan ilişkilidir (Wehr & Lohr, 1999). Doğrusal tarama sistemleri genellikle zikzak veya paralel çizgiler halinde veri toplayarak geniş alanların detaylı bir şekilde haritalanmasını sağlamaktadır (Baltsavias, 1999). Özellikle Hava LiDAR sistemlerinde ise çoklu darbe (multi-pulse) teknolojisi kullanılmaktadır. Bu sistem, önceki lazer darbesinin dönüşü tamamlanmadan yeni bir darbenin gönderilmesini sağlayarak ölçüm yoğunluğunu artırır (Mallet & Bretar, 2009). Bu özellik, büyük ölçekli haritalama projelerinde nokta yoğunluğunu artırarak daha yüksek çözünürlüklü arazi modellerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Buna ek olarak, Tam Dalga Biçimi (Full Waveform - FWD) teknolojisi, geleneksel tekli veya çoklu dönüş sinyallerinin aksine, yüzeyden geri saçılan tüm sinyal bilgilerini kaydederek topoğrafik detayların daha doğru modellenmesini sağlamaktadır (Shan & Toth, 2018).

LiDAR teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, çok spektral (Multispectral LiDAR - MSL) ve foton algılama sistemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çok Spektral LiDAR (MSL) sensörleri, nesnelerden yansıyan lazer ışınlarının yoğunluk bilgilerini kaydederek yüzey türlerinin daha doğru sınıflandırılmasını sağlamaktadır (Lefsky vd., 2002). Bu sistemler, farklı elektromanyetik dalga boylarında çalışarak, özellikle bitki örtüsü, su yüzeyleri ve sert zeminler gibi farklı yüzeylerden daha fazla spektral bilgi toplayabilmektedir. MSL sistemleri genellikle 532 nm (yeşil), 1064 nm (kızılötesi) ve 1550 nm (kısa dalga kızılötesi) dalga boylarında lazer darbeleri göndererek yüzey özelliklerini

analiz etmektedir. Bu durum, özellikle hassas arazi modelleme, kentsel analiz ve ekosistem izleme gibi uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir.

Buna ek olarak, Geiger Mod LiDAR (GML) ve Tek Foton LiDAR (SPL) sistemleri, geleneksel LiDAR sensörlerinden farklı olarak yalnızca birkaç fotonu bile algılayarak düşük enerji tüketimiyle yüksek çözünürlüklü veri üretmeyi mümkün kılmaktadır (Karslı, 2022). Bu sistemler, özellikle yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda veya düşük ışık koşullarında çalışırken, geleneksel LiDAR sistemlerinin yetersiz kaldığı durumları aşmak için tercih edilmektedir. Geiger Mod LiDAR, lazer darbesini birden fazla parçaya bölerek daha geniş alanların taranmasını sağlarken, Tek Foton LiDAR, ışık fotonlarının yansımalarını daha hassas bir şekilde algılayarak mesafe ölçümlerinin doğruluğunu artırmaktadır (Shan & Toth, 2018). Bu sensörler, özellikle otonom sistemler, hassas jeodezik ölçümler ve çevresel modelleme gibi yüksek doğruluk gerektiren alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

LiDAR teknolojisinin farklı tarama modları ve gelişmiş sensör sistemleri, veri toplama kapasitesini artırarak yüzey analizlerinin daha hassas ve ayrıntılı yapılmasını sağlamaktadır. Modern LiDAR sistemleri, doğrusal tarama, çoklu darbe ve tam dalga biçimi teknolojileriyle geniş alanların hızlı ve yüksek çözünürlüklü haritalanmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, gelişmiş sensör sistemleri sayesinde nokta yoğunluğu artırılarak daha doğru mekânsal analizler gerçekleştirilmektedir.

1.6.6. LiDAR Nokta Bulutu

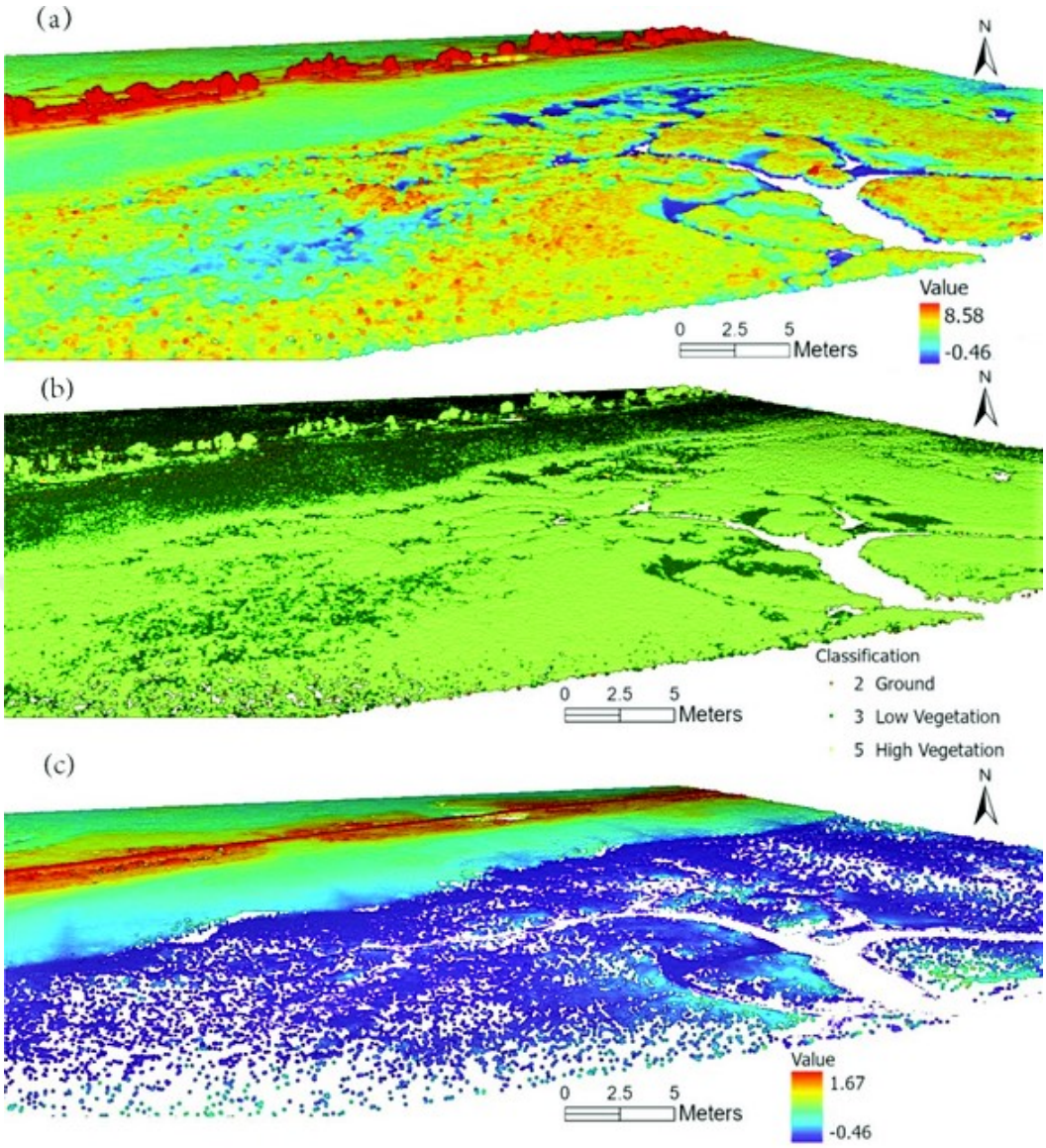
LiDAR teknolojisi, lazer tabanlı mesafe ölçümüne dayalı, yüksek doğruluklu ve aktif bir uzaktan algılama sistemidir. Bu teknoloji, elektromanyetik spektrumun görünür veya kızılötesi bölgesinde çalışan lazer ışınlarını hedef yüzeye yönlendirerek, yansıyan sinyalin geri dönüş süresini hassas bir şekilde ölçer (Dong & Chen, 2017). Böylece hedef nesnenin X, Y, Z koordinatları, yoğunluk (intensity), dönüş sayısı ve spektral özellikleri (R, G, B, IR) içeren 3B nokta bulutu oluşturulur (Bahadır, 2023).

LiDAR sistemlerinde tarayıcı, belirli bir frekansta lazer sinyali üretir ve farklı yönlere doğru yüzey taraması yapar. Gönderilen sinyalin bir veya birden fazla dönüş yaparak tarayıcıya ulaşması, hedef yüzeyin geometrik ve fiziksel özelliklerine bağlıdır (Özbalmumcu, 2022). LiDAR tarama sistemleri, elektromanyetik dalga prensibine dayalı olarak çalışmakta olup, ışık hızında hareket eden lazer sinyalinin hedef yüzeye çarpıp geri

dönme süresini (Time-of-Flight, ToF) temel alarak mesafe ölçümü gerçekleştirir. Lazer sinyalinin gidip gelme süresi dikkate alınarak, mesafe formülü uygulanır ve böylece hedef nesne ile alıcı arasındaki eğik mesafe doğru bir şekilde belirlenir. Tarama işlemi, GPS (Global Positioning System) ve IMU (Inertial Measurement Unit) sistemleri ile entegre olarak gerçekleştirilir. GPS yardımıyla tarayıcının anlık konumu belirlenirken, IMU sensörü kullanılarak tarayıcının yönelme açısı (ω, φ, χ) hesaplanır. Bu birleşik sistem sayesinde, tarama sırasında her bir noktanın uzaydaki kesin konumu belirlenerek nokta bulutu veri seti oluşturulur (Liu vd., 2018; Bahadır, 2023).

Üretilen nokta bulutları, uçuş yüksekliği, tarama açısı, sensör hassasiyeti, ortam koşulları ve veri toplama yöntemi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişken yoğunluklarda olabilir. Özellikle hava, yersel ve mobil sistemleri arasında tarama geometrisi ve nokta yoğunluğu açısından belirgin farklılıklar bulunmaktadır (Dong & Chen, 2017). ALS sistemleri, geniş alanların hızlı bir şekilde taranmasını sağlarken, yer seviyesine daha yakın konumlanan TLS ve MLS sistemleri, daha yüksek nokta yoğunluğu ve detaylı modelleme avantajı sunmaktadır (Bahadır, 2023).

LiDAR nokta bulutları, ham veri olarak elde edildikten sonra ön işleme ve filtreleme süreçlerinden geçirilerek gürültü ve hatalı noktalar temizlenir. Bu süreçte yükseklik bazlı segmentasyon, zemin ve yüzey ayrımı, nokta sınıflandırma ve spektral analiz teknikleri uygulanarak veri optimize edilir (Özbalmumcu, 2022). Modern LiDAR sistemleri, yüksek çözünürlükte nokta bulutu üretme kabiliyetine sahip olup, günümüzde 1000-3000 nokta/m² yoğunluğunda veri setleri üretebilmektedir (Liu vd., 2018).



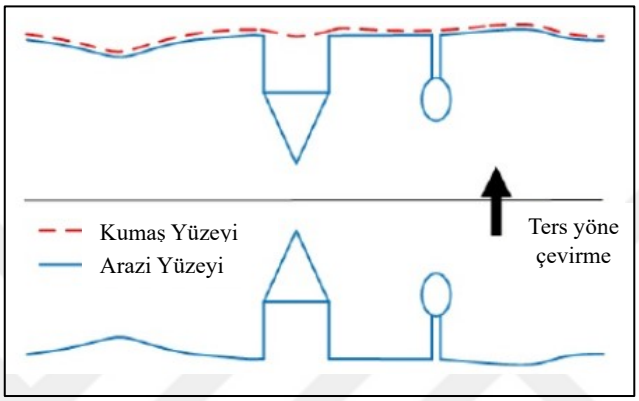
Şekil 6. Nokta bulutu örnekleri: a) ham b) sınıflandırılmış ve c) yalnızca zemin nokta bulutu

1.6.7. Zemin Filtreleme Yöntemleri

Zemin filtreleme yöntemleri/algoritmaları zemin ve zemin üstü nesnelerin birbirinden ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Özellikle SAM oluşturmak için gerekli olan zemin noktalarının çıkarılması işlemi bu yöntemler aracılığıyla elde edilmektedir. Zemin çıkarımı için kullanılan yöntemler, Kumaş Simülasyon Filtreleme (CSF), Aşamalı TIN Yoğunlaştırma (PTIN) ve Destek Vektör Makinesi (DVM)'dir.

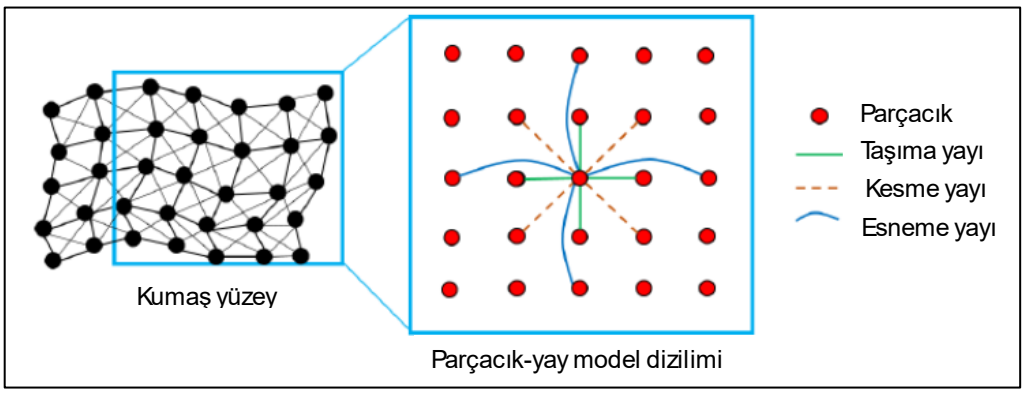
CSF algoritması, Zhang vd. (2016), tarafından geliştirilen, özellikle LiDAR nokta bulutlarından zemin ve zemin dışı nesneleri ayırmak için kullanılan bir yöntemdir.

Algoritmanın temel prensibi, bir kumaş (cloth) modelinin yerçekimi etkisi altında ters çevrilmiş nokta bulutunun üzerine serilmesi ve böylece arazi yüzeyine en iyi şekilde oturmasına dayanmaktadır (Şekil 7). Özetle öncelikle nokta bulutu ters çevrilir ve ters yüzeye yukarıdan kumaş parçası bırakılır. Nokta bulutunu saracak kumaşın sertlik değeri ve yapısı parametreler yardımıyla belirlenir. Kumaşın aldığı son şekil ise SAM'i temsil etmektedir (Zhang vd. 2016).



Şekil 7. CSF algoritmasına genel bakış (Zhang vd., 2016)

Kumaş yüzey olarak adlandıran bu yüzey ara bağlantılara sahip ve sabit bir kütle taşıyan parçacıklardan oluşan bir grid yüzeyi olarak modellenir (Provot, 1995). Bu parçacıkların üç boyutlu uzaydaki konumları kumaş yüzeyin şeklini belirler. Kumaş yüzeydeki parçacıkların aralarındaki ilişki ise Hooke yasalarından "sanal yay" tanımına uymaktadır. Bu yüzey üzerindeki parçacıklar üç tür yay tipi ile etkileşirler ve hareket ederler (Zhang vd., 2016). Bunlar; kesme yayı (shear spring), taşıma yayı (traction spring) ve esneme yayı (flexion spring) olarak adlandırılmıştır (Karasaka & Keleş, 2020) (Şekil 8).



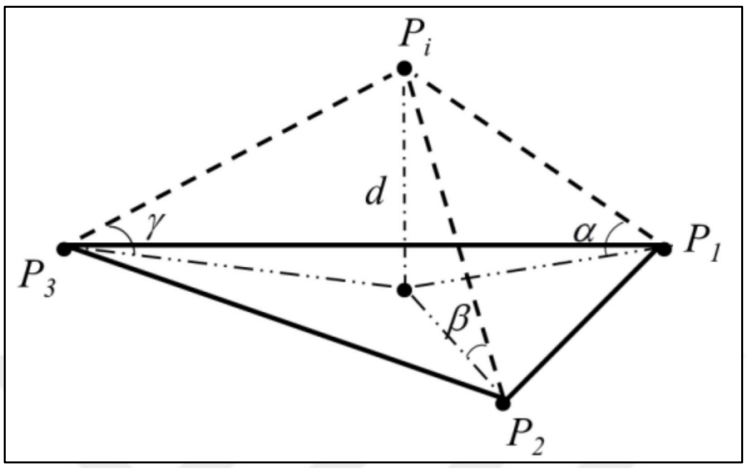
Şekil 8. Kütle yay modeli (Zhang vd. 2016)

CSF algoritması zemin noktaları filtreleme parametreleri kullanıcı girişi gerektirmektedir. Bu parametrelerden rigidness (sertlik) düzeyi, çalışma bölgesinin arazi karakteristiğine göre belirlenmektedir. Rigidness parametresi için; dik yamaç, hafif eğimli ve düz olmak üzere üç farklı seçim içermektedir. Diğer parametreler ise grid çözünürlüğü (cloth resolution), yineleme süresi (max iterations) ve sınıflandırma eşiği (classification threshold) olmak üzere sayısal değerlerden oluşan parametrelerdir. Grid çözünürlüğü arazi yüzeyini saracak örtü ile tasvir edilen yüzeyin grid boyutlarıdır. Örtü yüzeyde bulunan komşu iki parçacık arasındaki yatay mesafeyi temsil eder. Yineleme süresi simülasyonun maksimum tekrarlanma süresidir. Sınıflandırma eşiği ise noktaların, simülasyon ile oluşturulmuş arazi örtüsü ile arasındaki mesafeye bağlı olarak zemin ve obje olarak sınıflandırıldığı bir eşik değeridir (Karasaka & Keleş, 2020).

PTIN arazi yüzeylerinin modellenmesi için yaygın olarak kullanılan bir veri yapısıdır. Ancak, büyük veri setlerinin işlenmesi sırasında geleneksel TIN algoritmalarının yüksek hesaplama süreleri ve bellek gereksinimleri nedeniyle bazı kısıtlamalar ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, PTIN algoritması, aşamalı ve verimli bir şekilde TIN yapılarını oluşturarak bu sorunları çözmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem, özellikle hava kaynaklı LiDAR verilerinin işlenmesinde, arazi modeli oluşturma ve zemin olmayan noktaların filtrelenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Axelsson'un çalışması, LiDAR verilerinden dijital arazi modelleri üretiminde önemli bir adım olarak kabul edilir. PTIN, büyük ve yoğun veri setlerinden aşamalı olarak üçgenleme yapıları oluşturan bir algoritmadır. Geleneksel Delaunay üçgenlemesi veya Voronoi diyagramlarına dayalı yöntemler yerine, verileri belirli seviyelerde ele alarak, iteratif bir şekilde arazi yüzeyini oluşturan üçgen ağı üretir. Bu süreç, verinin belirli bir doğruluk seviyesinde işlenmesini sağlayarak hesaplama yükünü azaltır ve işlem süresini optimize eder. PTIN algoritması, aşağıdaki temel adımlardan oluşur:

Öncelikle, arazi yüzeyi hakkında düzensiz nokta verisi toplanır ve temizlenir. Gürültülü veya eksik veriler ayıklanarak algoritmanın performansı artırılır (Peucker ve Douglas, 1975). Daha sonra, düşük çözünürlüklü bir üçgenleme ağı oluşturulur (Şekil 9). Bu adım genellikle rastgele veya eşit aralıklı seçilen bir alt veri kümesiyle gerçekleştirilir. Bu başlangıç üçgen ağı, sonraki iterasyonlar için temel teşkil eder (Lee & Schachter, 1980). Başlangıçta oluşturulan düşük çözünürlüklü ağ, belirli bir hata eşiği ile aşamalı olarak iyileştirilir. Daha fazla detay elde etmek için yeni noktalar eklenerek üçgen ağı rafine edilir. Bu aşamada, eklenen noktaların hangi bölgelerde olması gerektiği, hata

analiziyle belirlenir (Garland & Heckbert, 1997). Her iterasyonda üçgen yapısı güncellenir ve hata değerlendirmesi yapılır. Eşik değerin altına düşene kadar bu süreç devam eder. Son olarak, üçgenler arasındaki uyum ve topolojik bütünlük kontrol edilir (Chen & Xu, 2004).



Şekil 9. PTIN algoritmasının şematik diyagramı (Cai vd., 2019)

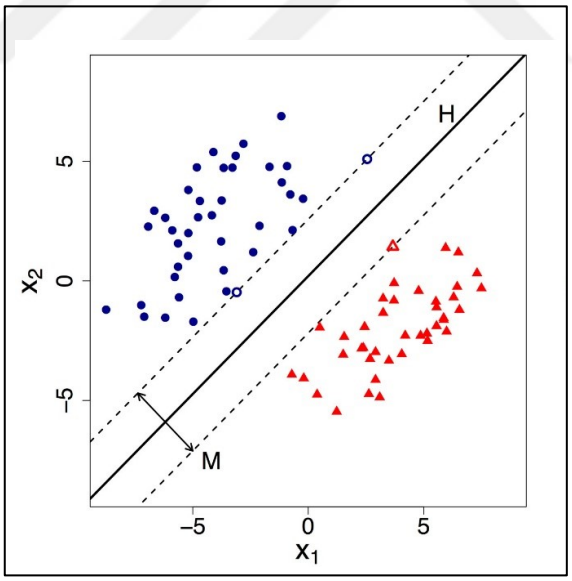
Şekil 9 bir noktanın tohum noktası olarak seçilme kriterlerini ve ilgili geometrik koşulları göstermektedir. Şekildeki P_i potansiyel tohum noktası olarak belirtilmiş olup, bu noktanın seçiminde iki temel ölçüt dikkate alınmaktadır. Birincisi, P_i ile oluşturulan üçgen (TIN) arasındaki mesafe (d), belirlenen eşik değerden küçük olmalıdır. İkinci olarak, P_i'nin üçgenin diğer köşeleriyle olan bağlantı çizgileri arasındaki açılar (α, β, γ), belirli bir eşik değerin altında olmalıdır. Bu süreç iteratif olarak ilerlemekte olup, başlangıçta belirlenen grid sistemi içinde bir tohum noktası seçilir ve mevcut noktalar arasında bir TIN oluşturulur. Eğer P_i belirlenen mesafe ve açı koşullarını sağlıyorsa, bir tohum noktası olarak kabul edilir ve süreç devam eder. Ancak, bu koşullar sağlanmazsa P_i reddedilir ve başka bir nokta seçilerek tekrar değerlendirilir. Eğer yeni bir nokta eklenemezse, süreç sona erer, aksi takdirde yoğunlaştırma işlemi devam eder.

PTIN algoritması, geleneksel TIN yöntemlerine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Aşamalı yapı sayesinde büyük veri setlerinde daha hızlı işlem yapabilir. Yüksek çözünürlüklü verilerle çalışırken, belirli bir hassasiyet seviyesine ulaşana kadar optimizasyon devam edebilir. Yalnızca gerekli bölgelerde üçgenleme yaparak bellek tüketimini düşürür ve çeşitli yüzey tipleri için esnek bir modelleme sağlar.

DVM, doğrusal veya doğrusal olmayan sınıflandırma, regresyon ve aykırı değer tespiti yapabilen çok yönlü bir makine öğrenimi modelidir. DVM, denetimli öğrenme

yöntemlerinden biri olup, özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde etkili bir şekilde kullanılan bir algoritmadır (Cortes & Vapnik, 1995). Özellikle karmaşık küçük veya orta ölçekli veri kümelerinin sınıflandırılması için kullanılmaktadır (Geron, 2019).

DVM'nin temel amacı, verilen veri noktalarını mümkün olan en büyük marjı sağlayan bir hiperdüzlem ile ayırmaktır. Marj, iki farklı sınıfa ait en yakın veri noktaları arasındaki mesafe olarak tanımlanır (Şekil 10) ve bu marjın maksimize edilmesi, modelin genelleme yeteneğini artırır (Vapnik, 1998). Maksimum marj, bir sınıfa ait gözlemleri diğer sınıfa ait gözlemlerden ayıran en geniş tampon bölgedir. Bu marjın tam üzerinde bulunan veri noktalarına destek vektörleri denir ve bu noktalar, sınıflandırma sınırını belirleyen en kritik verilerdir. Eğer yalnızca iki tahmin edici değişken varsa, ayırma sınırı bir doğru olur. Üç tahmin edici değişken varsa, bu sınır bir düzlem haline gelir. Üçten fazla tahmin edici değişkenin olduğu durumlarda ise sınır, ayırma hiper düzlemi olarak adlandırılır. Sınıflandırma işlemi, DVM'nin oluşturduğu karar fonksiyonu ile gerçekleştirilir. Bu fonksiyon, belirlenen sınırı matematiksel olarak ifade eder ve yeni gözlemlerin hangi sınıfa ait olduğunu belirlemek için kullanılır.



Şekil 10. Doğrusal DVM sınıflandırması.

Sınıflandırma hiper düzlemi (H) ve maksimum marj (M) grafikte gösterilmiştir (Kirchner, A. & Signorino, C. S., 2018). Şekil 10'da ki örnekte X_1 ve X_2 verilerine dayanarak iki farklı sınıf tahmin edilmeye çalışılmaktadır. X_1 ve X_2 kullanılarak DVM, kırmızı üçgenler ve mavi daireler olarak sınıflandırmaya çalışır. Kırmızı üçgenler ve mavi

daireler arasındaki ayırıcı optimal hiper düzlem (yani sınır), H ile etiketlenmiş çizgidir. Sınıflandırma sınırı "optimal" olup, eğitim veri setindeki sınıflandırma hatasını minimize eder. En basit durumda, Şekil 10'da gösterildiği gibi, eğitim verisi, X_1 ve X_2 tarafından lineer olarak ayrılabilir ve tahmin edilen sınır H, herhangi bir iç örnekleme sınıflandırma hatası üretmez. Maksimal margin sınıflandırıcısı, maksimum margin'leri bulur, böylece sonuçta ortaya çıkan ayırıcı hiper düzlem H, tüm bu tür hiper düzlemler arasında eğitim gözlemlerinden en uzakta olanını temsil etmektedir (James vd. 2013). Margin üzerinde yer alan gözlemler, destek vektörleri olarak adlandırılır.

DVM, doğrusal ayrılabilir verilerde doğrudan hiperdüzlem oluşturarak çalışırken, doğrusal olarak ayrılamayan veriler için çekirdek (kernel) dönüşümleri kullanarak veri uzayını yüksek boyutlu bir özellik uzayına taşır (Boser vd., 1992). Böylece, doğrusal olarak ayrılamayan veriler, daha yüksek boyutlu bir uzayda doğrusal olarak ayrılabilir hale gelir. Yaygın olarak kullanılan çekirdek fonksiyonları arasında polinom çekirdeği (polynomial kernel), radyal baz fonksiyonu (RBF) ve sigmoid çekirdeği bulunmaktadır (Schölkopf & Smola, 2002).

DVM'nin en önemli avantajlarından biri, küçük veri kümelerinde bile yüksek doğruluk oranına sahip olması ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) kontrol edebilmesidir (Burges, 1998). Bu özellikleri nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır (Joachims, 1998; Cristianini & Shawe-Taylor, 2000). Ancak, DVM'nin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle büyük veri kümelerinde eğitim süreci uzun zaman alabilir. Ayrıca, çekirdek fonksiyonunun ve hiperparametrelerin doğru seçilmesi, model performansı açısından kritik bir öneme sahiptir (Hastie vd., 2009). Sonuç olarak, Destek Vektör Makineleri, yüksek boyutlu veri kümeleriyle başa çıkabilen, esnek ve güçlü bir makine öğrenmesi yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Özellikle küçük veri setlerinde ve yüksek doğruluk gerektiren sınıflandırma problemlerinde üstün performans göstermektedir (Vapnik, 2000).

1.6.8. Nesne Tabanlı Doğruluk Analizi

Nesne tabanlı doğruluk analizi kapsamında, referans veri ile tahmin sonuçları arasındaki ilişkilerin incelenmesi gerekmektedir. Doğruluk metriklerinin hesaplanabilmesi için tahmin sonuçları, Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Negatif (YN) ve

Yanlış Pozitif (YP) olmak üzere dört farklı kategoriye ayrılarak etiketlenmelidir. Bu sınıflandırma aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir:

- Doğru Pozitif (DP): Tahmin edilen nesne, belirlenen mesafe eşik değeri içinde referans verideki karşılığı ile eşleşiyorsa, bu tahmin DP olarak etiketlenir.
- Doğru Negatif (DN): Tahmin sonucunda belirli bir nesnenin üretilmemesi durumunda, referans veri üzerinde de aynı nesnenin bulunmaması halinde bu durum DN olarak değerlendirilir.
- Yanlış Negatif (YN): Referans veride belirli bir nesne mevcut olmasına rağmen, tahmin sonuçlarında bu nesnenin belirlenen mesafe eşik değeri içerisinde eşleştirilememesi durumu YN olarak kabul edilir.
- Yanlış Pozitif (YP): Referans veride herhangi bir karşılığı bulunmayan ancak tahmin sonuçlarında belirlenen mesafe eşik değeri içerisinde bir nesne olarak tespit edilen durumlar YP olarak etiketlenir.

Referans verilerin etikelendirilmesi tamamlandıktan sonra tamlık (Cp-Completeness), doğruluk (Cr-Correctness) ve F1-skor (F-score) metriklerinin nicel değerlendirmesi hesaplanır. Doğruluk değerlendirme ölçütlerinin formülleri aşağıda sunulmaktadır (Denklem 10-12).

$$Cp = \frac{DP}{DP+YN} \tag{10}$$

$$Cr = \frac{DP}{DP+YP} \tag{11}$$

$$F - skor = \frac{2 \times Cp \times Cr}{Cp+Cr} \tag{12}$$

Cp metriği, referans veride bulunan nesnelerden kaç tanesinin doğru tahmin edildiğini gösteren oransal bir değeri ifade etmektedir. Cr metriği ise doğru tahmin edilen nesne sayısının, toplam pozitif tahmin edilen nesne sayısına oranını temsil etmektedir. F-skor metriği, tamlık (Cp) ve doğruluk (Cr) metriklerinin harmonik ortalaması olarak hesaplanmaktadır. Bu metriğin harmonik ortalama kullanılarak belirlenmesi, dengesiz veri kümelerinde aşırı uç değerlerin etkisini azaltarak daha dengeli bir değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır. Genel değerlendirme ve analiz aşamalarında, F-skor metriği diğer iki ölçütün birleşimini yansıttığından dolayı model performansının bütüncül olarak yorumlanmasında temel bir gösterge olarak kullanılmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

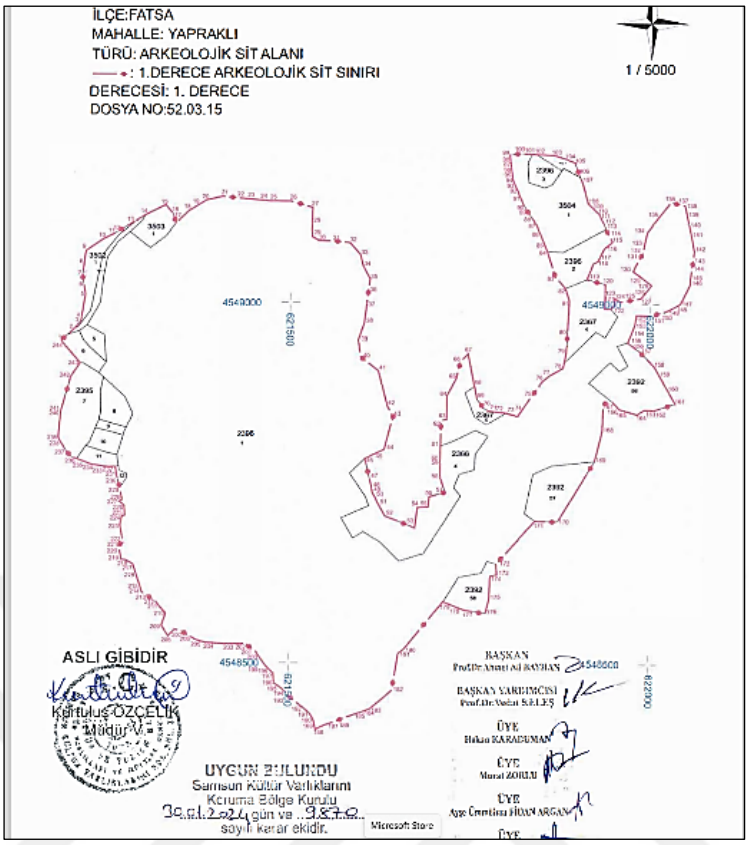
Tez kapsamında, havadan elde edilen LiDAR nokta bulutu verisinden arkeolojik sit alanına ait zemin noktalarının hassas bir şekilde çıkarılması ve doğru bir arazi modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, CSF, PTIN ve DVM yöntemleri farklı kombinasyonlarla karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda, CSF ve PTIN yöntemlerinin belirli bölgelerde daha başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiş olup, bu bulgulardan hareketle her iki yöntemin güçlü yönlerini birleştiren hibrit bir yaklaşım önerilmektedir.

2.1. Çalışma Alanı

Bu tez çalışması, Ordu İli, Fatsa İlçesi, Yapraklı Mahallesi'nde yer alan ve 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı olarak tescilli Çıngırt Kalesi'nde gerçekleştirilmiştir. Çıngırt Kalesi, MÖ 301 ile 63 yılları arasında inşa edilmiş olup, Hellenistik Dönem'e tarihlendirilmektedir (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2012). Arkeolojik sit alanı olarak ilan edilen bölge, kültürel ve tarihî mirası koruma açısından büyük bir öneme sahiptir. Kale, kayalara oyulmuş basamaklı tünelleri ve savunma amaçlı yapılarıyla dikkat çekmektedir (Arkeoloji ve Sanat Dergisi, 2015).

Fatsa ilçe merkezine yaklaşık 7 km mesafede bulunan kale, deniz seviyesinden ortalama 210 m yükseklikte konumlanmıştır. Ordu-Samsun karayoluna yaklaşık 4 km mesafede bulunan alan, kara yolu ile ulaşılabilir konumda olup, kazı alanına erişim stabilize yollar aracılığıyla sağlanmaktadır. Ancak, doğal bitki örtüsü ve sarp arazi yapısı nedeniyle belirli bölgelere yalnızca yaya erişimi mümkündür.

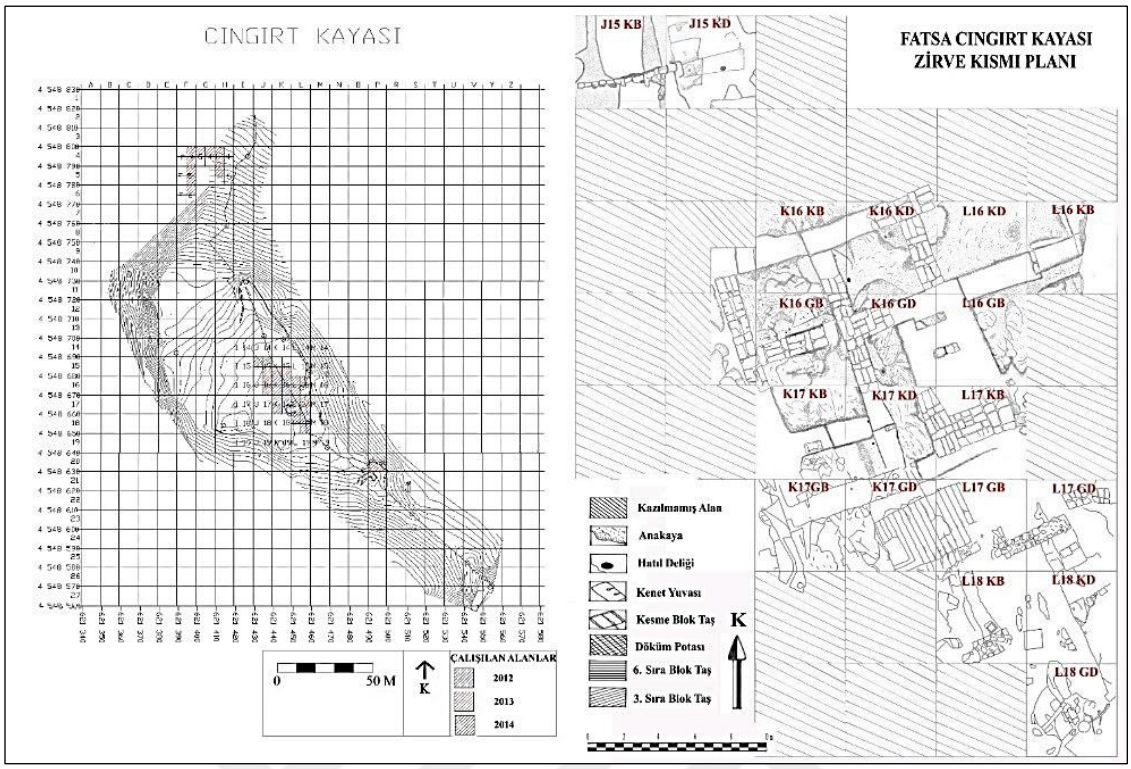
Çıngırt Kalesi'nin yer aldığı bölge, hem jeomorfolojik yapısı hem de tarihî ve kültürel önemi nedeniyle arkeolojik araştırmalar için elverişli bir çalışma alanı sunmaktadır. Bu alan, Samsun Kültür Varlıkları Bölge Koruma Kurulu'nun 30.01.2024 tarih ve 9870 sayılı kararı ile 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı olarak tescillenmiştir. Tescillenmiş alan büyüklüğü 342.628 m²'dir (Şekil 11). Bölgenin geçmişten günümüze ulaşan mimari kalıntıları ve coğrafi konumu, hem bilimsel araştırmalar hem de kültürel çalışmalar açısından önemli bir arkeolojik merkez olmasını sağlamaktadır.



Şekil 11. Samsun Kültür Varlıkları Bölge Koruma Kurulu kararı harita eki

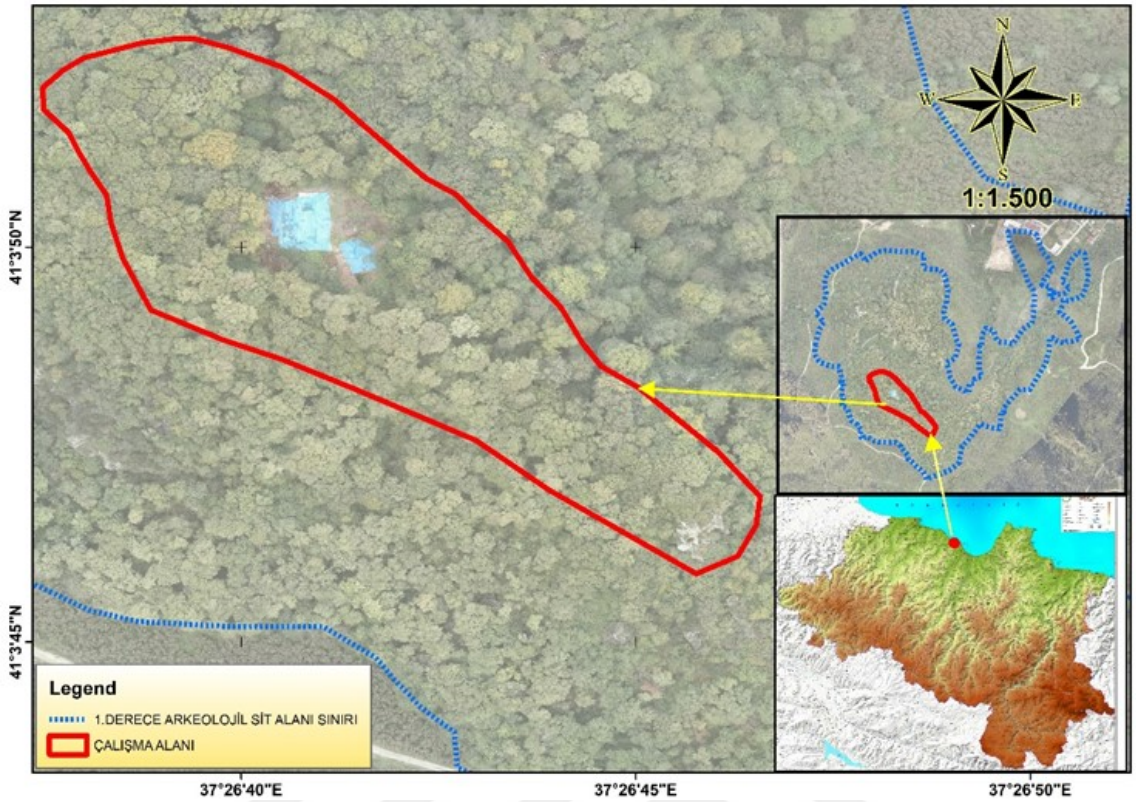
Arkeolojik kazı alanlarında hassas haritalama çalışmaları, topoğrafyanın korunması ve belgeleme sürecinin hızlandırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Erdem, 2020). Çıngırt Kalesi, yoğun bitki örtüsü ve engebeli arazi yapısı nedeniyle geleneksel haritalama yöntemleriyle detaylı analizlerin zor olduğu bir alandır. Bu nedenle, LiDAR teknolojisinin arkeolojik alanlarda kullanımını ve doğruluk analizlerini yapmak amacıyla bu bölge çalışma alanı olarak seçilmiştir.

Çalışma alanının genişliği, tez kapsamında üretilecek veri yoğunluğu ve analiz kapasitesi açısından önemli bir faktör olduğundan, özellikle veri işleme ve analiz sürecinin yönetilebilir olması amacıyla, kazı çalışmalarının yoğunlaştığı alan, çalışma bölgesi olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Arkeoloji Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ayşe Fatma EROL'un başkanlığında yürütülen kazı çalışmaları temel alınmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Çıngırt Kalesi kazı çalışma alanı haritası

Çalışma alanı, 40°03'50" kuzey enlemi ile 37°26'42" doğu boylamı arasında konumlanmaktadır. Toplam 17.125 m² büyüklüğe sahip olan bu alan, tez çalışması kapsamında veri toplama, analiz ve modelleme süreçlerinin yürütüleceği bölge olarak seçilmiştir (Şekil 13).



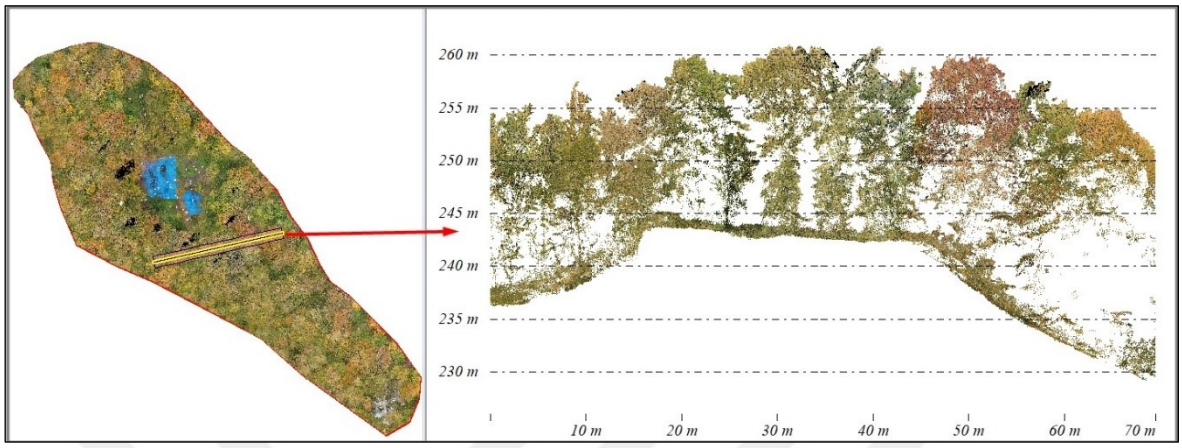
Şekil 13. Çalışma alanı

2.2. Veri Seti ve Alan Ölçüleri

Çalışma alanı olarak belirlenen 17.125 m²'lik bölge, ortalama 20 m yüksekliğe ulaşan geniş yapraklı ağaçlarla kaplıdır. Bitki kapalılık oranı (canopy cover) yaklaşık %90 (kapalılık seviyesi 3) olup, bu durum alanın yoğun bir orman örtüsüne sahip olduğunu göstermektedir. Yoğun kapalılık seviyesinden dolayı zemine ait ölçülerin toplanması sınırlıdır. Bu durum, hassas arazi modeli üretiminde LiDAR teknolojisinin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Geleneksel fotogrametrik yöntemler veya optik tabanlı uzaktan algılama teknikleri, yoğun bitki örtüsünün altında bulunan arkeolojik kalıntıları ve yüzey morfolojisini tam olarak ortaya koymada yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, çalışma alanında havadan lazer tarama (ALS) verisinin kullanılması ve LiDAR nokta bulutu analizine dayalı modelleme süreçlerinin uygulanması, arkeolojik yüzey modellemesinde hassasiyetin artırılması ve alana ilişkin daha doğru mekânsal verilerin elde edilmesi açısından kritik bir katkı sunmaktadır.

Çalışma bölgesi içerisindeki ağaçlar için örnek profil çıkarımı Şekil 14'te paylaşılmaktadır. Ortalama ağaç yüksekliği 20 m olarak belirlenmiştir. İlgili alanın

topoğrafik yapısını daha net ortaya koyabilmek için araziden çekilmiş görüntü Şekil 15'te verilmektedir.



Şekil 14. Çalışma bölgesindeki ağaç boylarını gösterir profil



Şekil 15. Arazi çalışmaları esansında çalışma alanının görüntüsü

2.2.1. Havadan Lazer Tarama (ALS) Verisi

Havadan Lazer Tarama (Airborne Laser Scanning - ALS) verisi, DJI Matrice 350 RTK insansız hava aracı (İHA) üzerine entegre edilen LiDAR-Zenmuse L2 sensörü ile elde edilmiştir. Özellikle yoğun bitki kapalılığına sahip bölgelerde, geleneksel fotogrametri teknikleri yetersiz kalabilirken, LiDAR verileri yüksek nokta yoğunluğu ve zemin penetrasyon kabiliyeti sayesinde arazi modelleme süreçlerinde üstün hassasiyet sağlamaktadır (Karslı vd., 2022). Zenmuse L2 sensörü, yüksek hassasiyetli nokta bulutu üretimi ve gerçek zamanlı GNSS/IMU entegrasyonu ile öne çıkmaktadır. Sensör, farklı yansıtıcılık seviyelerine sahip yüzeylerde LiDAR geri dönüş sinyallerini hassas bir şekilde

analiz edebilir ve bitki örtüsü altındaki topografik yüzeyi yüksek doğrulukla tespit edebilir. L2 sensörünün özellikleri Tablo 4'de sunulmaktadır.

Tablo 4. Zenmuse L2 sensörü teknik özellikleri

Özellik	**Zenmuse L2**
Lazer Dalga Boyu	905 nm
Maksimum Tarama Menzili	450 m (@50% yansıtıcılık)
Etkin Nokta Hızı (Tek Dönüş)	240.000 nokta/sn
Çoklu Dönüş Kapasitesi	5 dönüş
Ranging Accuracy (RMS 1σ) @150m	±2 cm
Yatay Doğruluk @150m	±5 cm
Dikey Doğruluk @150m	±4 cm
Görüş Açısı (FOV)	70°
IMU Güncelleme Sıklığı	200 Hz
GNSS-IMU Entegrasyonu	RTK destekli, yüksek hassasiyetli
Veri Formatı	LAS, PLY, SBF
RGB Haritalama Kamerası	Entegre 4/3 CMOS Sensör
Sensör Çözünürlüğü	20 MP
Odak Uzaklığı	8 mm
Açısal Hız Ölçer Aralığı	±2000 dps

Havadan lazer tarama işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi, uçuş planlamasının titizlikle yapılmasını gerektirmektedir. İHA tabanlı LiDAR sistemlerinde veri kalitesini en üst seviyeye çıkarmak için uçuş yüksekliği, hız, bindirme oranları, GNSS-IMU entegrasyonu ve gimbal açısı gibi faktörler büyük önem taşımaktadır. Bu faktörlerin doğru şekilde belirlenmesi, taranan bölgedeki nokta yoğunluğunu, yüzey detaylarını ve modelleme doğruluğunu etkilemektedir. Çalışma alanının topoğrafik yapısı ve bitki örtüsü dikkate alınarak belirlenen uçuş parametreleri, LiDAR verisinin optimum doğrulukta toplanmasını sağlamak amacıyla belirli kriterler doğrultusunda optimize edilmiştir.

Bu kapsamda, uçuş yüksekliği ve hızı, LiDAR nokta yoğunluğunu ve modelleme hassasiyetini artıracak şekilde planlanmıştır. GNSS-IMU entegrasyonu ile hassas konumlandırma sağlanırken, gimbal açısı doğrudan zemine bakacak şekilde ayarlanmıştır. Bindirme oranları, nokta bulutu verisinde örtüşme sağlayarak hassas arazi modeli üretimini destekleyecek şekilde belirlenmiştir. Uçuş sırasında ve sonrasında veri işleme aşamalarında yüksek mekânsal doğruluk elde edilmesi için post-processing kinematik (PPK) yöntemi

kullanılmıştır. Belirlenen uçuş parametreleri doğrultusunda gerçekleştirilen veri toplama süreci, hassas arazi modelleme, arkeolojik yüzey analizi ve mekânsal doğruluk açısından optimize edilerek uygulanmıştır.

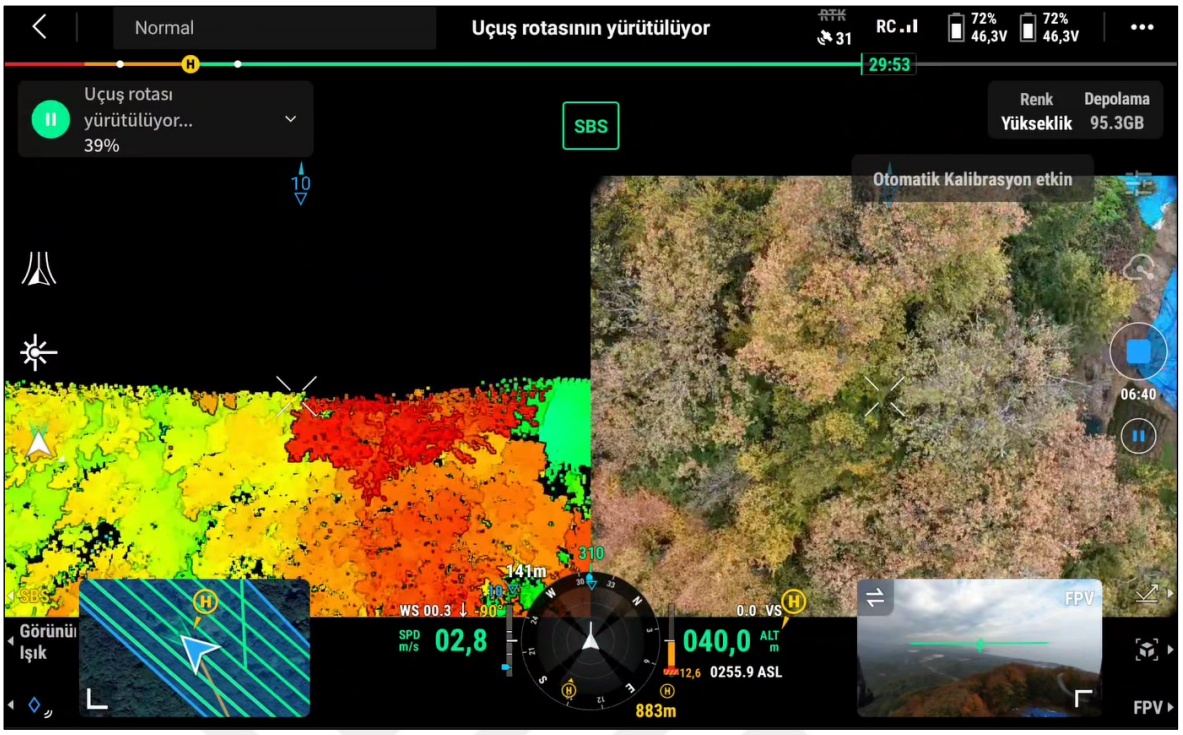
Uçuş yüksekliği, hem cihaz güvenliği hem de veri kalitesini optimize etmek amacıyla zemine mümkün olduğunca yakın olacak şekilde 40 m olarak belirlenmiştir. Bu irtifa, LiDAR sensörünün yüzey detaylarını hassas şekilde algılamasını sağlarken, aynı zamanda nokta yoğunluğunu artırarak modelleme doğruluğunu ideal seviyeye çıkarmaktadır. Daha düşük irtifalarda, nokta yoğunluğu artmasına rağmen, uçuş süresi uzayarak operasyonel verimliliği düşürebilir ve veri işleme sürecinde ek yük oluşturabilir. Buna karşılık, daha yüksek irtifalarda uçuş gerçekleştirilmesi ise nokta yoğunluğunun azalmasına, detay kaybına ve yüzey modellemesinde hassasiyet düşüşüne neden olabilmektedir. Bu nedenle, çalışma alanının topoğrafik ve arazi örtüsü özellikleri dikkate alınarak, 40 m uçuş yüksekliği ideal irtifa değeri olarak seçilmiştir.

İHA uçuş hızı, batarya verimliliği ve operasyon süresi göz önünde bulundurularak 8 m/sn olarak belirlenmiştir. Bu hız, LiDAR taramaları sırasında optimum nokta yoğunluğunu koruyarak veri kalitesinin sürdürülebilirliğini sağlamak için seçilmiştir. Uçuş hızının artırılması, tarama süresini kısaltmasına rağmen nokta yoğunluğunun azalmasına ve yüzey detaylarının kaybolmasına neden olabilir. Buna karşılık, daha düşük hızlarda gerçekleştirilen taramalar nokta yoğunluğunu artırsa da batarya tüketiminin artmasına bağlı olarak operasyon süresini uzatabilir ve saha uygulamalarında verimliliği düşürebilir. Bu nedenle, 8 m/sn uçuş hızı, veri kalitesi, operasyonel süre ve enerji yönetimi açısından en uygun dengeyi sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Uçuş esnasında bindirme oranları enine %50, boyuna %70 olarak planlanmıştır. Bu oranlar, nokta bulutu veri setinde yeterli örtüşme sağlamak ve LiDAR verisinin işlenmesi sırasında hassas arazi modellemesi oluşturmak için önemli parametrelerdir.

GNSS ve IMU modülü, PPK destekli hassas pozisyonlandırma ile çalıştırılmıştır. PPK sisteminin kullanımı, GPS sinyal doğruluğunu artırarak LiDAR nokta bulutunun koordinat hassasiyetini yükseltmektedir. Böylece elde edilen nokta bulutu ve SAM, yüksek mekânsal doğruluğa sahip olmaktadır.

Gimbal açısı -90° (nadir görüş) olarak ayarlanmıştır. Bu açı, LiDAR sensörünün doğrudan zemine ulaşmasını sağlayarak yüksek hassasiyette veri toplanmasına olanak tanımaktadır. Arazi üzerinde İHA kontrol ünitesine ait örnek görsel Şekil 16'da sunulmaktadır.



Şekil 16. İHA kontrol ünitesi ekranından görev aşamasında bir görüntü

Belirlenen uçuş parametreleri doğrultusunda gerçekleştirilen uçuş, 40 dakika sürmüştür. PPK yöntemi kullanılarak konum düzeltmeleri gerçekleştirilmiş, böylece hassas jeodezik koordinatlar elde edilmiştir. Toplanan ham LiDAR verisi, DJI Terra yazılımında işlenmiş ve *.las formatında LiDAR nokta bulutu ile SYM üretilmiştir. Çalışma alanı olarak belirlenen 17.125 m²'lik bölgede elde edilen LiDAR nokta bulutu toplamda 37.484.626 nokta içermekte olup, 2317 nokta/m² yoğunluğa sahiptir.

2.2.2. İHA Fotogrametrik Verisi

İHA fotogrametrisi, yüksek çözünürlüklü optik görüntülerden 3B arazi modelleri üretmeye olanak tanıyan uzaktan algılama yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, fotogrametrik veriler İHA üzerine entegre edilen yüksek çözünürlüklü kameralar aracılığıyla toplanmakta ve özel yazılımlar kullanılarak işlenmektedir (Kraus, 2007; Wolf & Dewitt, 2000).

Bu çalışma kapsamında, fotogrametrik optik verilerin elde edilmesi için DJI Matrice 350 RTK İHA üzerine entegre edilmiş DJI Zenmuse P1 sensörü kullanılmıştır. Zenmuse P1, 45 MP çözünürlüğe sahip tam kare (full-frame) CMOS sensörü ile geniş alanların hassas görüntülenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, GNSS-IMU destekli entegre RTK özelliği

sayesinde, elde edilen görüntülerin yüksek mekânsal doğruluğa sahip olmasını sağlamaktadır. İlgili fotogrametrik kameranın teknik özellikleri detaylı bir şekilde Tablo 5'de verilmektedir.

Tablo 5. Zenmuse P1 sensörü teknik özellikleri

Özellik	**Zenmuse P1**
Sensör Tipi	Full-frame (Tam Kare) CMOS
Efektif Çözünürlük	45 MP (8192 × 5460 piksel)
Piksel Boyutu	4,4 µm
Zemin Örnekleme Mesafesi (GSD)	1 cm/piksel @100 m uçuş yüksekliği
FOV (Görüş Açısı)	84° (24mm) / 63,5° (35mm) / 46,8° (50mm)
Minimum Fotoğraf Aralığı	0,7 s
Deklanşör Tipi	Mekanik ve elektronik deklanşör
Mekanik Deklanşör Hızı	1/2000 - 1 s
Elektronik Deklanşör Hızı	1/8000 - 1 s
Diyafram Açıklığı	f/2,8 - f/16
ISO Aralığı	100 - 25600
GNSS & IMU Entegrasyonu	RTK destekli, PPK uyumlu
Mutlak Konum Doğruluğu	±3 cm yatay, ±5 cm düşey (@RTK etkin)

Belirlenen uçuş parametreleri doğrultusunda gerçekleştirilen fotogrametrik veri toplama süreci, hassas arazi modelleme, arkeolojik yüzey analizi ve mekânsal doğruluk açısından optimize edilerek uygulanmıştır. Aşağıda, uçuş sürecinde kullanılan yöntemler ve teknik parametreler detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Fotogrametrik veri toplama sürecinde uçuş yüksekliği, yer örnekleme aralığı (GSD/YÖA-Ground Sample Distance) ve mekânsal doğruluğu optimize edecek şekilde belirlenmiştir. Bu irtifa, Zenmuse P1 sensörünün yüksek çözünürlüklü görüntü almasını sağlarken, aynı zamanda optik verinin fotogrametrik işleme sürecinde en iyi sonuçları vermesi için ideal bir nokta yoğunluğu üretmektedir. Daha düşük irtifalarda uçuş yapılması, zemin örnekleme mesafesini (GSD) iyileştirse de, daha fazla görüntü çekilmesi gerekeceğinden veri işleme süresini uzatabilir ve operasyonel verimliliği düşürebilir. Bu nedenle, çalışma alanının topografik özellikleri dikkate alınarak, 150 m uçuş yüksekliği en uygun değer olarak seçilmiştir.

İHA uçuş hızı, batarya verimliliği, görüntü netliği ve operasyon süresi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu hız, fotogrametrik görüntülerin keskinliğini koruyarak hareket kaynaklı bulanıklığı en aza indirmek için optimize edilmiştir. Daha hızlı uçuşlar,

daha kısa sürede veri toplanmasını sağlasa da, görüntü yürümesi (motion blur) riskini artırarak görüntülerin kalitesini düşürebilir. Daha düşük hızlarda uçuş yapılması ise, batarya tüketimini artırarak operasyon süresini uzatabilir ve saha uygulamalarında verimliliği azaltabilir. Bu nedenle, 10 m/sn uçuş hızı, veri kalitesi, operasyon süresi ve enerji yönetimi açısından en uygun dengeyi sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Fotogrametrik görüntülerin işlenmesi sırasında nokta bulutu üretimi, ortofoto, SAM ve SYM oluşturulması için uçuş bindirme oranları planlanmıştır. Bu bindirme oranları, görüntüler arasında yeterli örtüşme sağlayarak stereo fotogrametri yöntemleri ile doğru nokta eşleme yapılmasını mümkün kılmaktadır. Daha düşük bindirme oranları, bazı bölgelerde eksik veri oluşmasına sebep olabilirken, daha yüksek bindirme oranları ise gereksiz veri tekrarına ve veri işleme sürecinin uzamasına neden olabilir. Bu nedenle, optimum veri kalitesini sağlamak için bindirme oranları enine %80 ve boyuna %70 olarak belirlenmiştir.

GNSS ve IMU modülü, RTK (Real Time Kinematics) destekli hassas pozisyonlandırma ile çalıştırılmıştır. RTK yöntemi, hava fotoğraflarının hassas konumlandırılması için uçuş sırasında kaydedilen GNSS verilerinin post-processing aşamasında düzeltilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntem sayesinde, hava fotoğraflarının konum hassasiyeti artırılarak, nokta bulutu üretimi ve ortofoto mozaikleme süreçlerinde hata payı minimize edilmiştir. Böylece, fotogrametrik görüntüler ile LiDAR verisi arasında konumsal uyumluluk sağlanmış ve mekânsal doğruluk artırılmıştır.

Kamera açısı, geniş alan kapsama ve optimal görüntüleme sağlamak amacıyla -90° (nadir görüş) olarak ayarlanmıştır. Bu açı, kamera sensörünün doğrudan zemine bakmasını sağlayarak dikey perspektif görüntüler elde edilmesini mümkün kılmıştır. Arazide yapılan uçuşa ait örnek görsel Şekil 17'de sunulmaktadır.



Şekil 17. Fotogrametrik veri için İHA'nın göreve başlama aşamasında bir görüntü

Gerçekleştirilen uçuş operasyonu 40 dakika sürmüş ve RTK yöntemi ile konum düzeltmeleri sağlanmıştır. Bu süreçte toplamda 629 adet yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafı çekilmiştir. Toplanan veriler Pix4D yazılımında işlenerek Çıngırt Kalesi çalışma alanını ve çevresini kapsayan 100 hektarlık alanın nokta bulutu, ortofotosu, SAM'i ve SYM'si üretilmiştir. Elde edilen nokta bulutu toplamda 179.426.509 nokta içermekte olup, 347 nokta/m² yoğunluğa sahiptir. Çalışma alanı olarak belirlenen 17.125 m²'lik bölgede ise nokta bulutu 7.146.963 noktadan oluşmakta ve nokta yoğunluğu 422 nokta/m² olarak hesaplanmıştır.

Ortofoto, SAM ve SYM verileri 3,47 cm/piksel YÖA ile üretilmiştir. Bu çözünürlük seviyesi, arkeolojik alanın detaylı topografik analizine olanak sağlamaktadır.

2.2.3. Yersel Laser Tarayıcı Verisi

Yersel Lazer Tarama (Terrestrial Laser Scanning - TLS) yöntemi, yüzey ve yapıların yüksek doğrulukla üç boyutlu (3B) modellemesini sağlayan gelişmiş bir uzaktan algılama teknolojisidir. TLS, yüzeye yönlendirilen milyonlarca lazer ışınının geri yansıtılan sinyalleri üzerinden analiz edilmesiyle nokta bulutu verisi üretir. Bu veriler, detaylı dijital yüzey modellerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Remondino & Fraser, 2006; Kraus, 2007).

Bu çalışmada, Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı kullanılarak Çıngırt Kalesi arkeolojik alanında yüksek çözünürlüklü TLS verileri toplanmıştır. Elde edilen TLS verileri, hava LiDAR ve fotogrametrik verilerle karşılaştırılarak doğruluk analizinde kullanılmıştır.

Yersel lazer tarama yöntemi, geleneksel optik ölçüm cihazlarına kıyasla daha yüksek mekânsal çözünürlük ve doğruluk sağlaması nedeniyle bu çalışmada tercih edilmiştir. Özellikle, çalışma alanında bulunan orman altı ve yumuşak zemin yapısının neden olabileceği ölçüm hatalarını en aza indirmek ve daha güvenilir veriler elde etmek amacıyla TLS yöntemi tercih edilmiştir. TLS'nin sunduğu yüksek doğruluk ve detay seviyesi, arkeolojik alanların belgelenmesi ve topografik analizlerde LiDAR ve fotogrametrik yöntemlerle birlikte etkin bir biçimde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Tarama aşamasına geçilmeden önce, taramaların doğru bir şekilde birleştirilebilmesi için çalışma alanında uygun hedef noktalar belirlenmiş ve kağıt reflektörler (targetler) yerleştirilmiştir. Bu hedef noktalar, örneğin ağaçlar gibi doğal unsurlar kullanılarak konumlandırılmıştır. Ayrıca, çalışma alanında kullanılan koordinat sistemi (ITRF-36°-3°) temel alınarak, bu noktaların üç boyutlu (Y, X, Z) koordinatları Total Station ve Jeodezik GPS kullanılarak ölçülmüş ve koordinatlandırılmıştır.

Yersel lazer tarayıcı ile yapılan ölçümlere ait arazideki örnek görseller Şekil 18'de paylaşılmaktadır. Yersel lazer tarayıcısının teknik özellikleri ise Tablo 6'da özetlenmiştir.



Şekil 18. Arazi çalışmalarından görseller

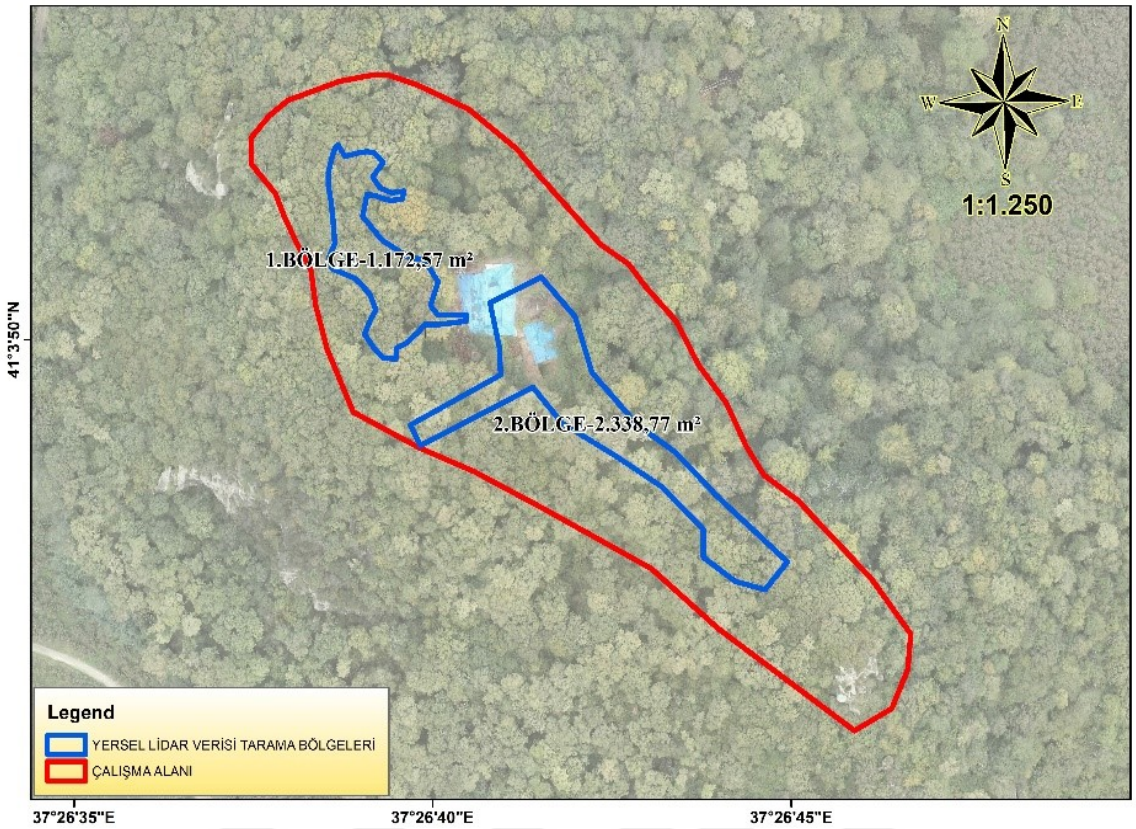
Tablo 6. Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı teknik özellikleri

Özellik	**Açıklama**
Tarama Menzili	0,6 m ile 130 m arası
Mesafe Doğruluğu	±2 mm
Ölçüm Hızı	Saniyede 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000 nokta
Lazer Sınıfı	Sınıf 1
Görüş Alanı	Dikey: 300°, Yatay: 360°
Açı Çözünürlüğü	Dikey/Yatay: 0,009° (40.960 3D piksel)
Renkli Kamera	70 MP kadar çözünürlük
Boyutlar (G x Y x D)	240 × 200 × 100 mm
Ağırlık	5,2 kg
Güç Kaynağı	Dahili batarya: 14,4V (4,5 saat kullanım süresi); Harici güç kaynağı: 19V
Çalışma Sıcaklığı	5°C ile 40°C arası
Depolama	SD kart

FARO Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı kullanılarak Çıngırt Kalesi arkeolojik sit alanında detaylı yersel lazer tarama işlemleri iki farklı bölgede yapılmıştır (Şekil 19). Cihaz üzerinde proje oluşturma aşamaları ise Şekil 20'de gösterilmektedir.

Arazi çalışmaları, ölçme planlaması, veri toplama, veri işleme ve sonuç ürünlerin elde edilmesi olmak üzere dört ana aşamadan oluşmaktadır.

Ölçme planlaması, yersel tarama çalışmalarının başarısını doğrudan etkileyen kritik bir aşamadır. Planlama sürecinde; tarama pozisyonlarının optimum dağılımı, taramaların çözünürlüğü ve nokta yoğunluğu, hangi görüntü kalitesinde tarama yapılacağı, tarama açılarının belirlenmesi, hedef noktaların ve referans reflektörlerin konumlandırılması önceden belirlenmiştir. Çalışma alanında yer alan orman altı yoğun bitki örtüsü nedeniyle, nokta bulutunun doğru yöneltilmesini sağlamak amacıyla kağıt reflektörler (targetler) stratejik olarak yerleştirilmiştir. Reflektörlerin konumu, Total Station ve Jeodezik GPS kullanılarak ITRF-36°-3° koordinat sisteminde tanımlanmıştır. Bu aşamada yapılan en önemli optimizasyonlardan biri, tarama noktalarının farklı açılardan üst üste binecek şekilde yerleştirilmesi olmuştur. Bu sayede nokta bulutunun kesintisiz bir şekilde birleşmesi sağlanmış ve mutlak konum doğruluğu ±2 mm seviyesinde korunmuştur.



Şekil 19. Çalışma alanındaki yersel lazer tarama bölgeleri



Şekil 20. Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı proje ayarları ekran görüntüleri

Veri bütünlüğü sağlanması için her tarama noktasında en az üç ortak reflektör kullanılmıştır. Orman altı yoğun bitki örtüsü nedeniyle ortam ışık ayarları optimize edilmiştir. Tarayıcı arayüz üzerinden kontrol edilerek aşağıdaki parametrelerle taramalar tamamlanmıştır. Yersel lazer tarayıcının ayarları Tablo 7'de paylaşılmaktadır.

Tablo 7. Faro Focus 3D X130 yersel lazer tarayıcısı ayarları

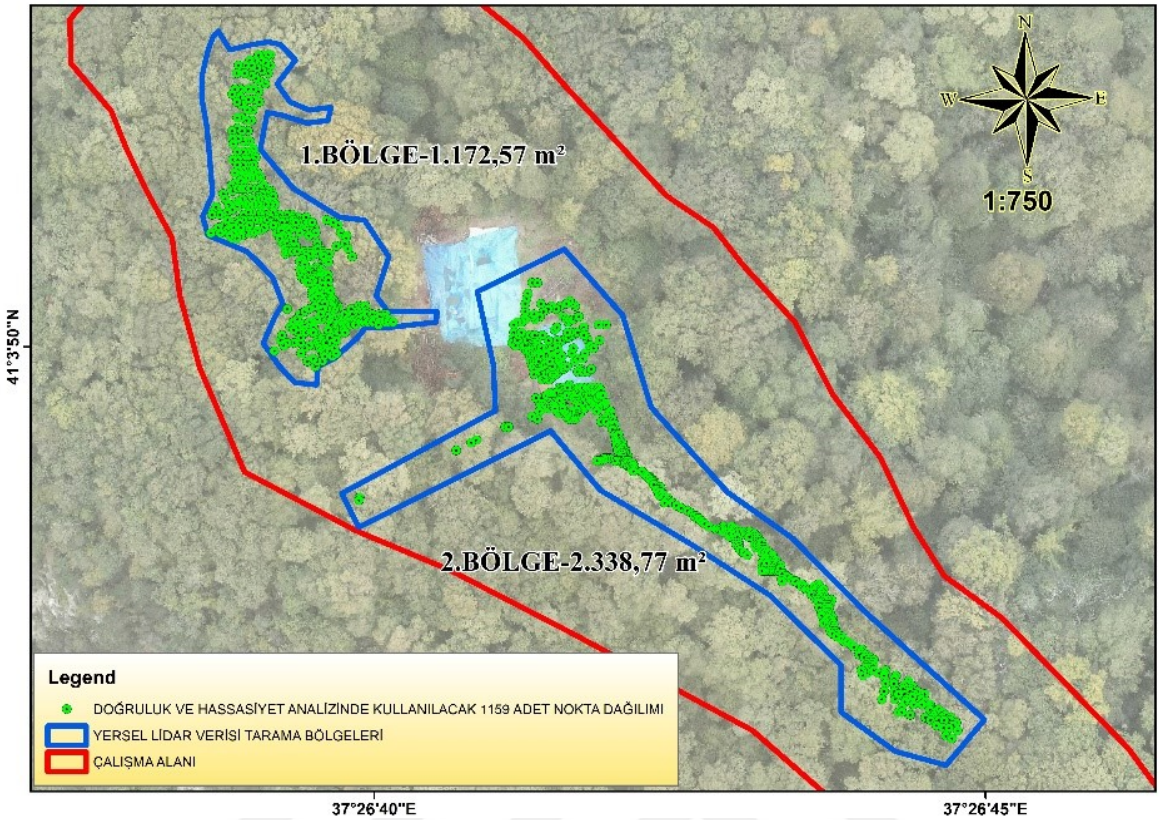
Bölge	Nokta Çözünürlüğü	Görüntü Kalitesi	Noktalar Arası Mesafe (mm/10m)	Tarama Süresi (dk)	Tarama Verisi Boyutu	Ortam Işığı Seçimi
1	1/5	3×	7,67	06:30	8192×3414	Ufuk Çizgisi Ağırlıklı
2	1/5	3×	7,67	06:30	8192×3414	Ufuk Çizgisi Ağırlıklı

Veri toplama aşamasının tamamlanmasının ardından, FARO Scene yazılımı kullanılarak ham tarama verileri işlenmiştir. İşlem aşamaları dört temel adımdan oluşmaktadır. Ön işleme aşamasında; tarama noktaları, ortak hedef noktalar kullanılarak hizalanmıştır. Gürültü ve parazit filtreleme işlemi gerçekleştirilmiş ve tarama verisindeki hatalar düzeltilmiştir. Lazer sinyallerinin yanlış geri dönüşlerinden kaynaklanan hatalar tespit edilerek veri setinden çıkarılmıştır. Nokta bulutu birleştirme aşamasında; birden fazla tarama noktası, Reflektör Target Matching (RTM) yöntemi ile tek bir veri kümesine entegre edilmiştir. Yer kontrol noktaları (YKN) kullanılarak hassas konum doğruluğu artırılmıştır. Koordinat sistemi uyarlaması aşamasında, veriler, ITRF-36°-3° koordinat sistemine dönüştürülerek hava tabanlı LiDAR ve fotogrametrik verilerle uyumlu hâle getirilmiştir. Sonuç ürünlerin oluşturulması aşamasında ise nokta bulutu verisi, SYM ve 3B Mesh modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu işlem adımlarının ardından, 1. ve 2. bölge için hava LiDAR ve fotogrametrik verilerle karşılaştırılarak doğruluk analizinde kullanılmak üzere, FARO Scene programında toplam 1159 nokta seçilmiştir. Bu noktalar, gerçek araziyi en iyi şekilde temsil eden ve minimum hata içeren noktalar olarak belirlenmiş olup, alan dağılımları Şekil 21'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen yersel lazer tarama çalışmaları sonucunda, 1. ve 2. bölge için elde edilen veriler doğruluk ve hassasiyet açısından detaylı olarak değerlendirilmiştir (Tablo 8).

Tablo 8. Yersel lazer tarama verilerinin genel bilgileri

Bölge	Tarama Alanı (m^2)	Target Reflektör Sayısı	Nokta Sayısı	Maksimum Hata (mm)	Ortalama Hata (mm)	Kontrol Nokta Sayısı
1	1.172,58	12	112.549.840	10,2 mm	7,1 mm	450
2	2.338,77	38	127.235.306	12,2 mm	8,1 mm	709

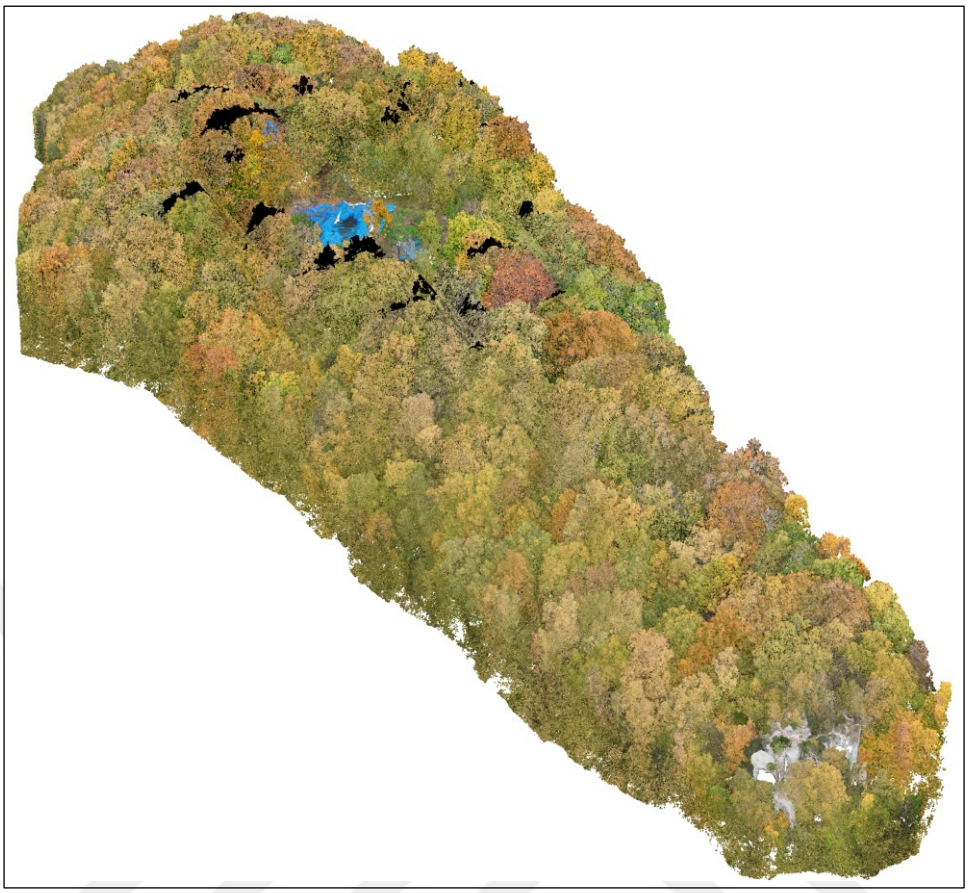


Şekil 21. Arazide toplanan referans noktaları (1159 adet)

1. bölge toplam 1.172,58 m² tarama alanına sahip olup, 12 adet target reflektör ile desteklenmiş ve 112.549.840 adet nokta elde edilmiştir. Bu bölgede tespit edilen maksimum hata 10,2 mm, ortalama hata ise 7,1 mm olarak hesaplanmıştır. 2. bölge ise 2.338,77 m² tarama alanına sahip olup, 38 adet target reflektör kullanılarak 127.235.306 adet nokta elde edilmiştir. Bu bölgede belirlenen maksimum hata 12,2 mm, ortalama hata ise 8,1 mm olarak hesaplanmıştır.

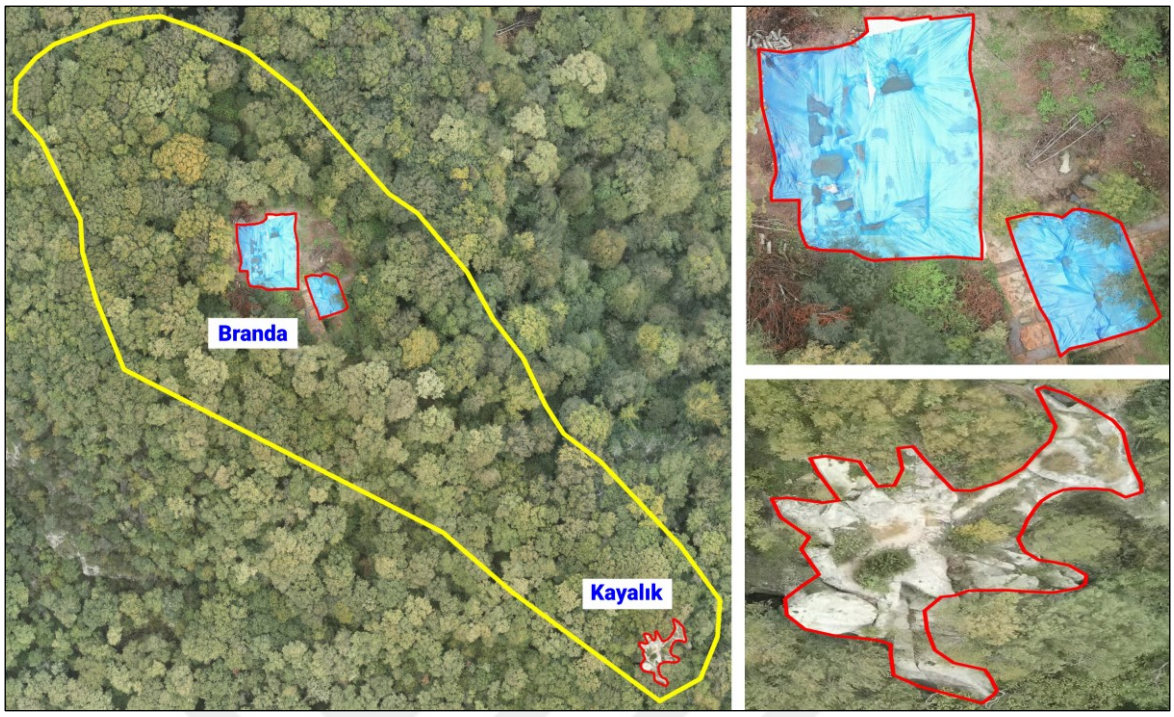
2.3. Ön Hazırlık İşlemleri

Bu çalışmada, Çıngırt Kalesi arkeolojik kazı alanında gerçekleştirilen hava ve yersel LiDAR taramaları, yüksek hassasiyetli arazi modeli üretimi için birkaç ön işleme sürecinden geçirilmiştir. Hava LiDAR verileri, geniş alan kapsama kabiliyeti ve yüzey detaylarını belirleme avantajı nedeniyle ana veri kaynağı olarak değerlendirilirken, yersel LiDAR verileri yüksek doğrulukta detay elde etmek ve hava verilerinin doğruluk analizini sağlamak amacıyla referans veri olarak kullanılmıştır. Üretilen hava LiDAR verisi Şekil 22'de sunulmaktadır.



Şekil 22. Çıngırt kalesi hava LiDAR nokta bulutu

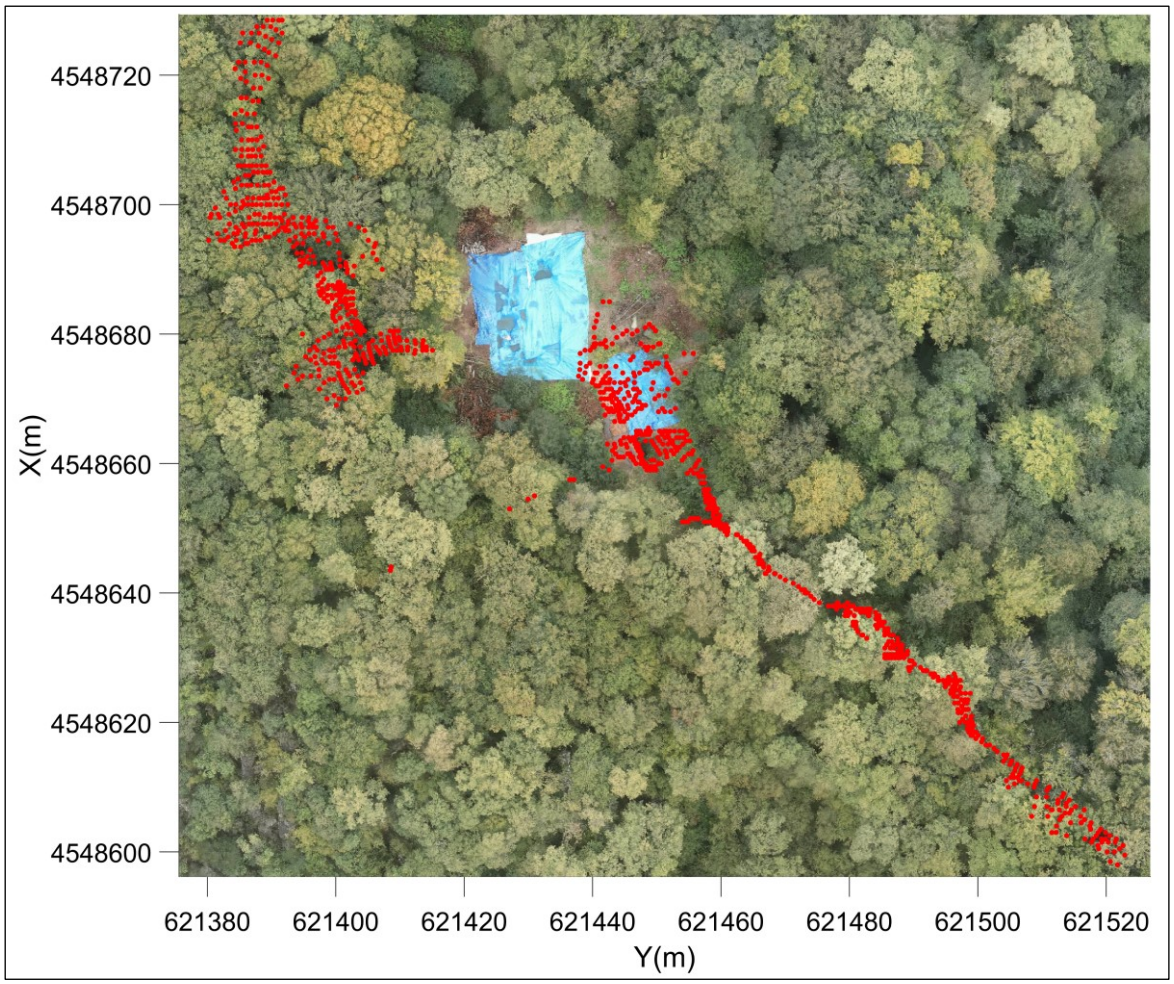
Çalışma alanı sınırları içerisinde üretilen LiDAR nokta bulutu 37.480.698 adet noktadan oluşmaktadır. Bölge içerisinde metre kare başına nokta yoğunluğu ise yaklaşık olarak 2317 olarak hesaplanmıştır. Kazı alanı içerisinde ağaç yoğunluğu ile birlikte mavi branda ile kaplı kazı alanı ve zemin örtüsü ile bütünleşik kayalık bir bölgenin yer aldığı bilinmektedir (Şekil 23). Bu alanlar Global Mapper programında manuel olarak çizilmiştir. Bulgular ve Tartışma aşamasında özellikle bu bölgeler ile ilgili değerlendirme ve analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 23. Kazı alanı içerisinde branda ile kaplı alan ve kayalık bölge

Veri işleme sürecinde, tüm verilerin orijinal halleri korunarak analiz sürecine uygun hale getirilmiştir. Nokta bulutları üzerinde yalnızca gürültü ve hatalı noktaların temizlenmesi işlemi uygulanmış, enterpolasyon veya veri kaybına neden olabilecek herhangi bir düzeltme yapılmadan analiz edilebilir formda tutulmuştur. Hava ve yersel LiDAR verileri, SAM ve SYM üretimi için optimize edilmiş, bu sayede topografik yapıların ve arkeolojik unsurların en hassas şekilde belirlenmesi sağlanmıştır.

Ön işleme aşamasında, hava LiDAR verileri, DJI Terra yazılımı kullanılarak dengeleme işlemine tabi tutulmuş ve bu süreçte zemin ile zemin üstü noktaları filtrelenmesi gerçekleştirilmiştir. Zemin filtreleme işlemleri, verinin analiz sürecine uygun hale getirilmesi amacıyla DJI Terra'nın yerleşik algoritmaları kullanılarak uygulanmıştır. Yersel LiDAR verileri, Faro Focus 3D X130 cihazı ile toplanmış ve Faro Scene yazılımında işlenerek gerçek arazi yüzeyini temsil eden 1159 adet referans nokta oluşturulmuştur (Şekil 24). Referans noktaları erişilebilirlik durumundan dolayı brandalı alan üzerinden seçilebilirken kayalık alan üzerinden seçilememiştir.



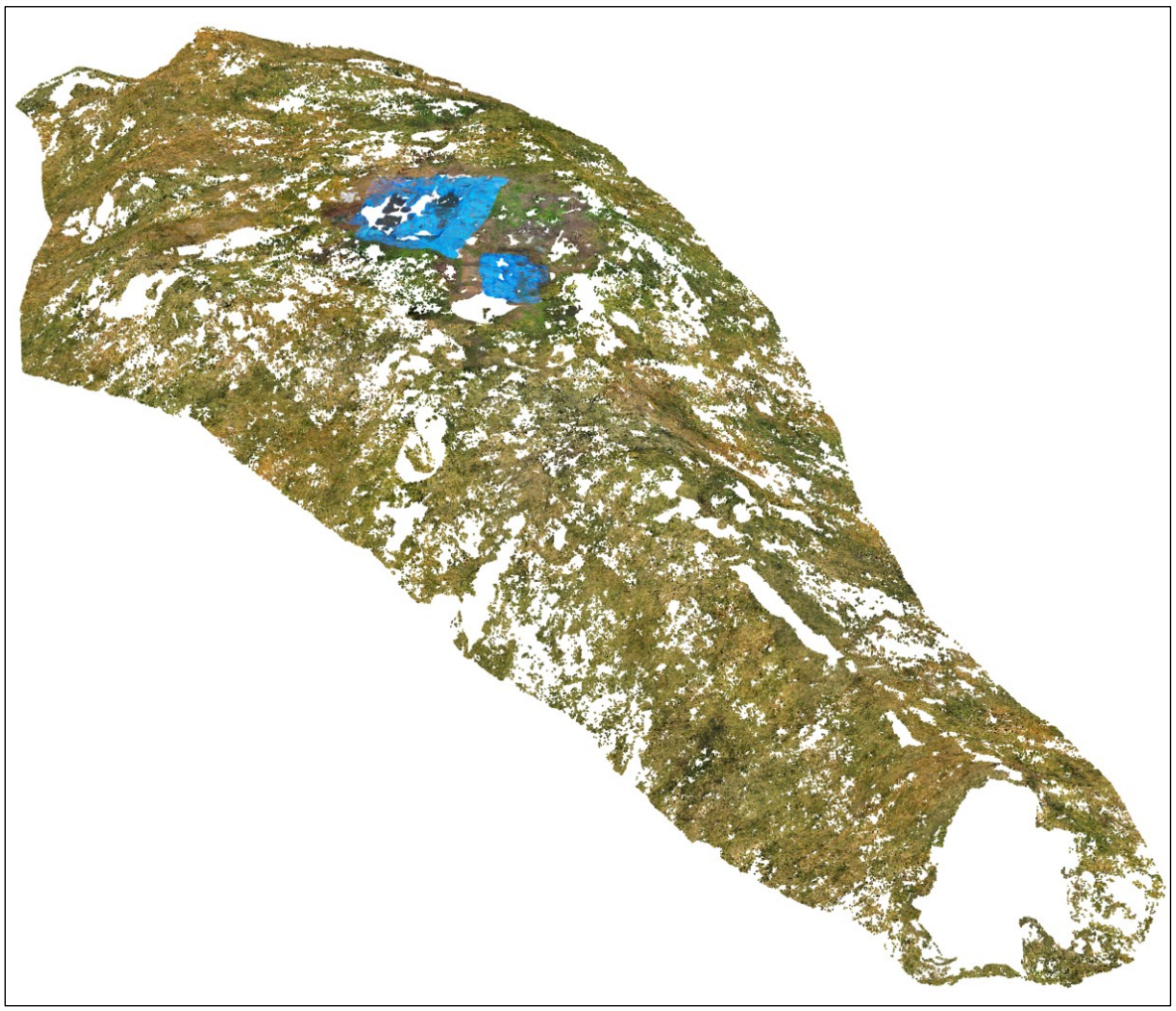
Şekil 24. Zemin referans nokta verileri

İlk aşama işlemlerden sonra oluşturulan hava LiDAR verisi, bir sonraki aşamada CSF, PTIN ve DVM ile zemin filtreleme yöntemlerinde kullanılmak üzere *.las veya *.laz formatında kaydedilmiştir. Bu filtreleme süreçleri, Çıngırt Kalesi'nin jeomorfolojik yapısını ideal olarak temsil edebilecek şekilde tasarlanmış olup, farklı yöntemlerin doğruluk analizleri Bulgular ve Tartışma bölümünde detaylandırılmıştır. Ayrıca ön hazırlık kısımlarının görselleştirilmesi için Matlab R2024b ticari yazılımı kullanılmıştır.

2.4. DJI Terra Zemin Filtreleme Yöntemi

DJI Terra yazılımının zemin filtreleme algoritmasıyla ilgili spesifik teknik detaylar kamuya açık kaynaklarda belirtilmemiştir. Tez kapsamında LiDAR nokta bulutunun üretilmesi aşamasında DJI firması tarafından kullanılan Terra programı nokta bulutunu zemin ve zemin üstü olmak üzere iki sınıfa ayırmaktadır. Tez çalışmasında Çıngırt

Kalesi'ne ait nokta bulutu filtrelendikten sonra yaklaşık 3 milyon noktanın zemin olarak etiketlenmesi sağlanmıştır. Üretilen zemin noktaları bitki örtüsü kaplı alanları görsel olarak iyi bir şekilde filtreleyebilmesine rağmen mavi branda ve kayalıkla örtülü alanları zemin üstü olarak yanlış bir şekilde sınıflandırmaktadır (Şekil 25). Özellikle kazı yapılan alanda DJI Terra programındaki çıktı ürün önerilen algoritmanın dezavantajlı yapısını ortaya koymaktadır.

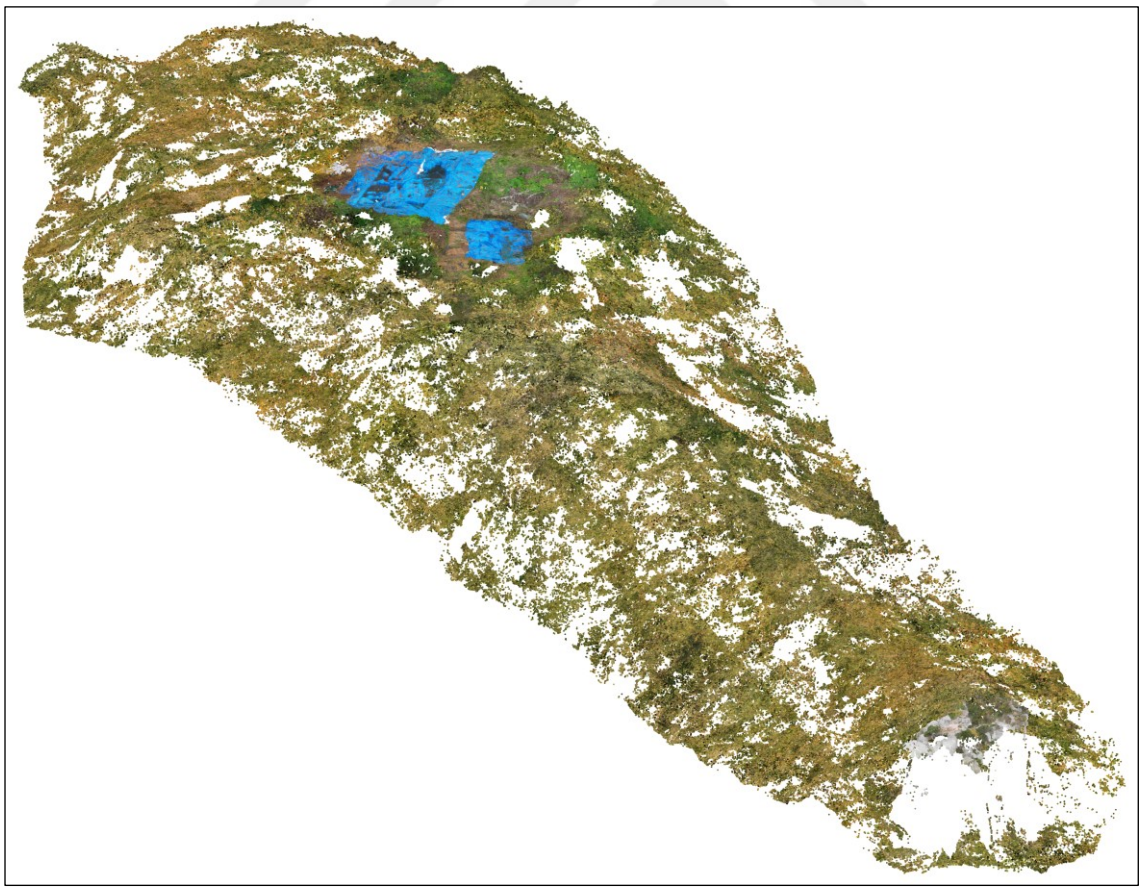


Şekil 25. DJI Terra ile elde edilen zemin noktaları

Şekil 25 incelendiğinde, kayalık alanın büyük ölçüde zemin üstü sınıfına atandığı ve bu nedenle zemin sınıfına ait nokta içermediği görülmektedir. Ayrıca, branda ile kaplı alanların içerisindeki kazılar ve su birikintileri de zemin sınıfına dahil edilmemiştir.

2.5. CSF Yöntemi ile Zemin Filtreleme

Literatürde yaygın olarak kullanılan CSF yöntemi ile Çıngırt Kalesine ait LiDAR nokta bulutu filtrelenmesi sağlanmıştır. CSF algoritması üç farklı parametreye sahip olmakla birlikte bu parametrelerin seçimi veriden veriye değişiklik göstermektedir. Bu durum parametre değişkenliğinin zemin noktalarının çıkarılmasını etkileyebileceğini kanıtlamaktadır. İdeal parametreleri seçebilmek için 5 farklı kombinasyon ile üretilen zemin noktaları analiz edilmiştir. CSF algoritması Cloud Compare yazılımında uygulanmıştır. Uygulama esnasında çalışma alanının topoğrafik yapısı çok eğimli olduğu için "Steep Slope" seçilmiştir. Ayrıca filtreleme yapılırken eğim işleme özelliği aktif hale getirilmiştir. İleri düzey parametrelerde ise kumaş çözünürlüğü değişkeni 0,15-1 arasında dört farklı değerde test edilmiştir. Sınıflandırma eşiği 0,15-0,50 arasında 3 farklı değerde analiz edilmiştir. Maksimum iterasyon ise 500 olarak sabit değerde bırakılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda en iyi çıkan arazi modeli Şekil 26'da gösterilmektedir.

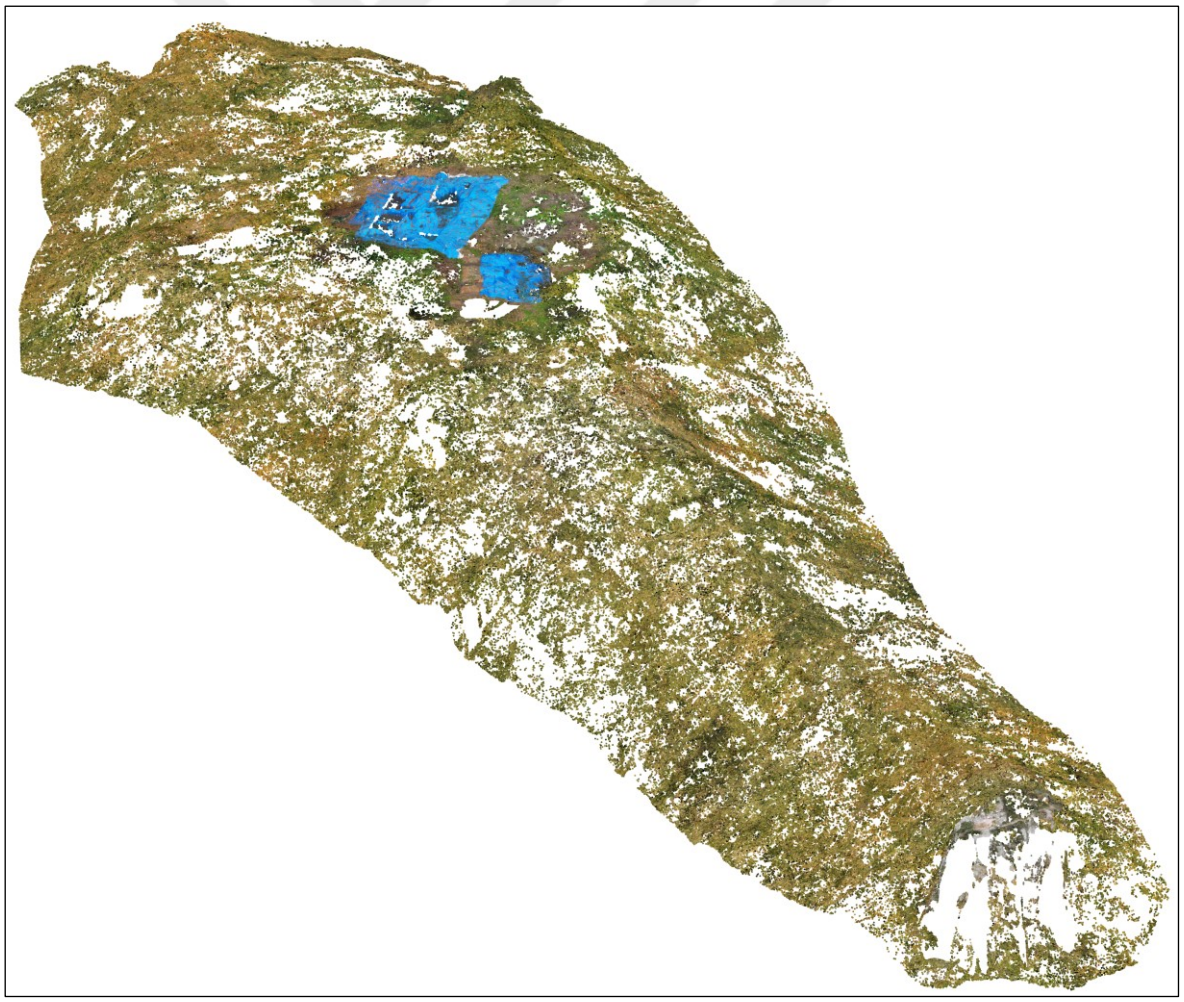


Şekil 26. CSF testleri ile elde edilen zemin noktalarına örnek

CSF yönteminde bitki örtüsüne ait bazı noktaları zemin olarak alması dezavantaj olarak değerlendirilse de kayalık ve branda ile kaplı alanda daha yoğun nokta üretmesi bölgesel bazda avantajlı hale getirmektedir.

2.6. PTIN ile Zemin Filtreleme

PTIN algoritması ile Çıngırt Kalesi LiDAR nokta bulutunu filtreleyebilmek için LAStools akademik yazılımı içerisindeki *lasground_new* arayüzü kullanılmıştır. Arazi topoğrafyası eğimli olduğu için arayüz içerisindeki arazi örtüsü tipi Nature ve Wilderness olarak test edilmiştir. Filtreleme türü olarak extra, hyper ve ultra olmak üzere 3 farklı türde değerlendirme yapılmıştır. CSF yönteminde olduğu gibi PTIN'de de 5 farklı parametre kombinasyonu ele alınmıştır. PTIN ile yapılan analize örnek Şekil 27'de gösterilmektedir.



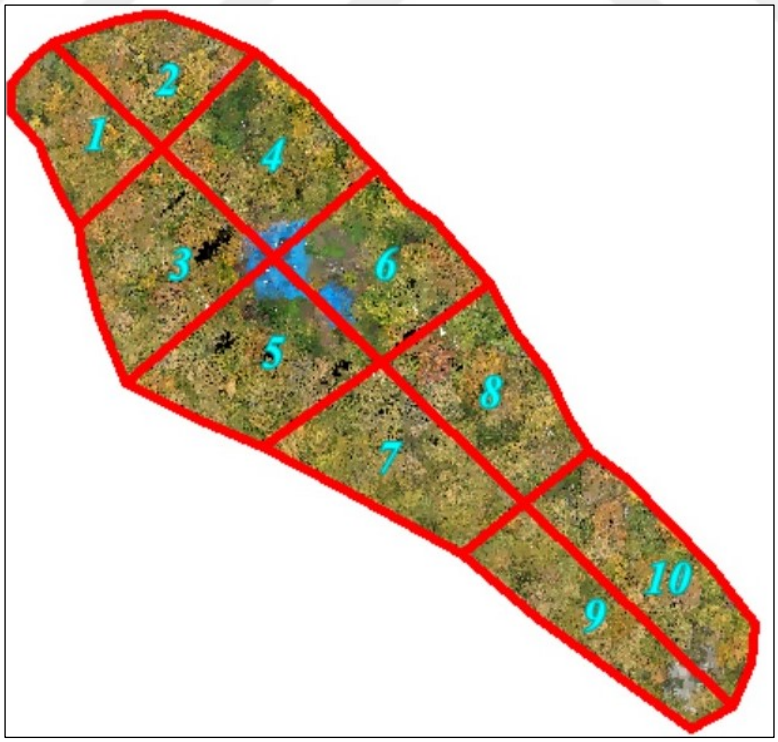
Şekil 27. PTIN testleri ile elde edilen zemin noktalarına örnek

PTIN yönteminde zemin nokta sayıları parametre değişimine rağmen birbirine yakın çıkmıştır. PTIN yöntemi daha önceki aşamalarda yapılan tüm filtreleme yöntemlerine göre daha az nokta üretmesine rağmen, nokta dağılımı düzenli seviyede oluşmuştur. Ayrıca kayalık alandaki tüm denemelerde iyi derecede nokta üretebilmiş olması diğer yöntemlere göre bölgesel bazda daha iyi sonuç ürettiğini kanıtlamaktadır.

2.7. DVM ile Zemin Filtreleme

Bu aşamada, ilgili çalışma bölgesine ait elde edilen nokta bulutu verisinin zemin-zemin üstü olarak sınıflandırılması amacıyla DVM yöntemi kullanılmıştır. DVM eğitimine başlamadan önce veri seti ön hazırlık aşaması adımları gerçekleştirilmiştir.

Nokta bulutu verisi, DVM algoritmasının eğitimi ve eğitilen modelin zemin veya zemin üstü olarak sınıflandırılabilmesi amacıyla, Global Mapper yazılımında belirli bir koşula bağlı kalmaksızın bölümlere ayrılmıştır. Bu işlem sonucunda, çalışma alanına ait 10 adet *.las uzantılı nokta bulutu verisi elde edilmiştir (Şekil 28). Bölümlenen bu 10 adet *.las nokta bulutu verisinin içerdiği nokta sayıları Tablo 9'da sunulmuştur.



Şekil 28. Bölümlendirilmiş nokta bulutu verisi

Tablo 9. Bölümlenen nokta bulutlarının içerdikleri nokta sayıları

Parça Sayısı	Nokta Sayısı
1	2.325.796
2	2.344.173
3	4.534.359
4	4.431.622
5	3.707.852
6	3.802.507
7	4.878.712
8	4.220.766
9	3.301.159
10	3.933.716

DVM algoritmasının eğitim ve tahmin işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla algoritmaya yedi adet parametre sunulmuştur. Bu parametreler, nokta bulutundaki her bir noktanın X, Y ve Z koordinat bilgileri, RGB (Kırmızı, Yeşil ve Mavi gri değerleri) bileşenleri ile her bir nokta için 100 metrelik yarıçap esas alınarak hesaplanan nokta yoğunluğu değerlerinden oluşmaktadır. Eğitim ve tahmin işlemlerinde metoda çeşitli parametrelerin sunulmasının daha yüksek doğruluk oranları sağlayabileceği öngörüsüne dayanarak, tez çalışmasının DVM aşamasında belirtilen parametreler kullanılmıştır.

Kullanılacak parametrelerin belirlenmesi ve *.las dosyalarından sayısal değerlerin elde edilmesinin ardından, tüm parametreler -1 ile +1 aralığında ölçeklendirilmiştir. Ölçekleme işlemi, tüm nokta bulutlarına ait X, Y, Z ve RGB verilerinin aynı standartta olması ve modelin daha dengeli bir şekilde öğrenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Eğitim ve tahmin (test) amacıyla seçilen nokta bulutlarına ait ölçeklenmiş parametrelerin hazırlanmasının ardından DVM eğitimi aşamasına geçilmiştir. Eğitim ve test işlemlerinin tamamlanmasının ardından doğruluk analizi gerçekleştirilmiş olup, bu aşamada DJI Terra tarafından otomatik olarak üretilen zemin (1) ve zemin üstü (2) etiketleri kullanılmıştır.

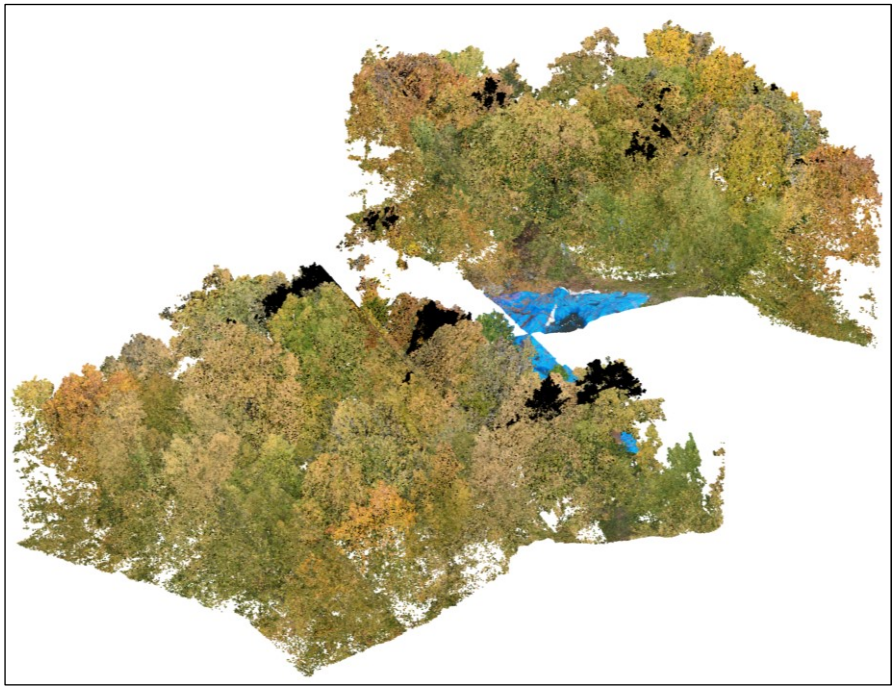
DVM eğitimi için bölümlendirilmiş 10 adet nokta bulutu arasından 4 ve 5 numaralı parçalar, çalışma bölgesinin orta kısımlarında yer almaları ve daha yoğun bir ağaçlık alana sahip olmaları nedeniyle eğitim işlemi için seçilmiştir. Seçilen nokta bulutları birleştirilerek ölçeklendirilmiş ve DVM eğitiminin maksimum verimle tamamlanabilmesi için en uygun hiperparametrelerin belirlenmesi amacıyla Grid Search optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Grid Search yöntemi ile en uygun hiperparametrelerin belirlenmesi adımında algoritmada kullanılması için sunulan parametreler Tablo 10'de listelenmiştir.

Tablo 10. Grid Search optimizasyon hiperparametreleri

Düzenleme Parametresi (C)	Kernel Ölçeklendirme Parametresi (gamma)	Çekirdek Fonksiyonu (Kernel)
0,1	0,001	linear
1	0,01	rbf
10	0,1	poly
100	1	sigmoid

Tablo 10'da sunulan parametreler kullanılarak gerçekleştirilen Grid Search optimizasyonu sonucunda, çalışmada kullanılan nokta bulutu verisi için en uygun hiperparametrelerin C = 100, gamma = 0,1 ve kernel = rbf olarak belirlenmesine karar verilmiştir. Belirlenen hiperparametreler kullanılarak, veri setinde yer alan 4 ve 5 numaralı nokta bulutları ile DVM eğitimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 29). Eğitim sonucunda, modelin Genel Doğruluk (Overall Accuracy) değeri 0,9315 olarak hesaplanmıştır.

DVM modelinin test aşaması, önceden kaydedilen modelin veri setinde yer alan 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı nokta bulutları üzerinde zemin ve zemin üstü tahmini yapmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda, çalışma bölgesine ait nokta bulutu verisinin zemin ve zemin üstü olmak üzere iki sınıfa ayrılması tamamlanmıştır. Test işlemi sonucunda, her bir parça nokta bulutu için gerçekleştirilen tahminlere ait genel doğruluk değerleri Tablo 11'da sunulmuştur.

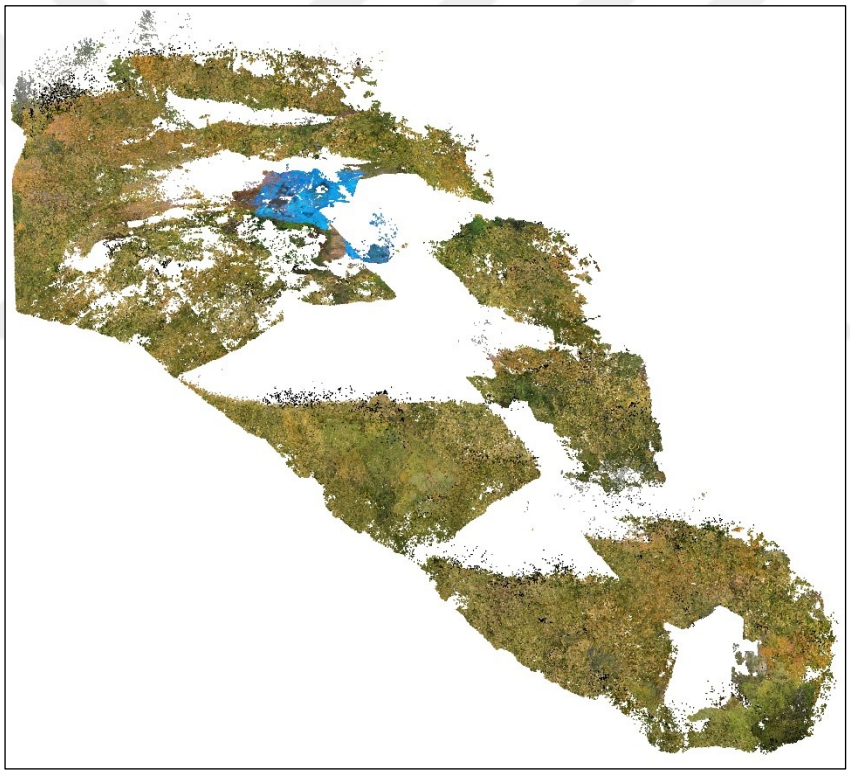


Şekil 29. Eğitim veri seti (4 ve 5)

Tablo 11. Test verilerin değerlendirilmesi

Nokta Bulutu Numarası	Genel Doğruluk
1	0.9458
2	0.9313
3	0.8756
6	0.7972
7	0.8395
8	0.8947
9	0.8713
10	0.8771

DVM ile yapılan zemin filtreleme işleminin tüm veri seti için tahmin sonuçları Şekil 30'da gösterilmektedir.

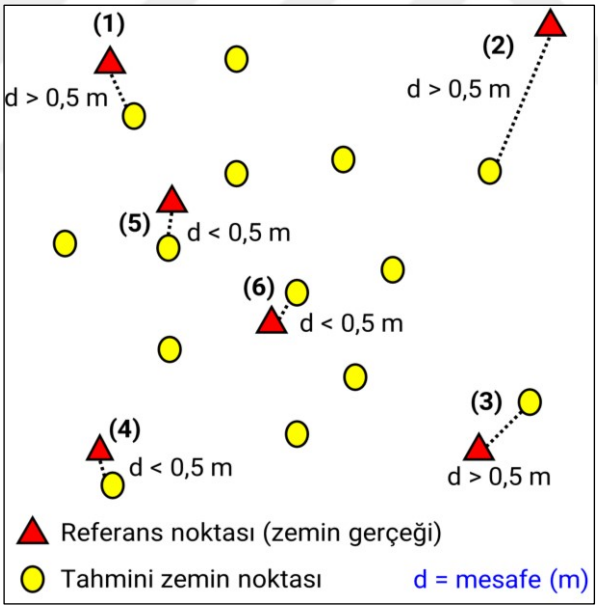


Şekil 30. DVM tahmin sonuçları

2.8. Zemin Filtreleme Doğruluk Değerlendirmesi

Üç adet zemin filtreleme yönteminin doğruluk değerlendirmesini yapabilmek için 1159 adet arazide ölçülmüş referans (zemin gerçeği) noktası ele alınmıştır. Öncelikle zemin noktası olarak üretilen tüm noktaların referans noktalarına olan 3B öklid mesafesi hesaplanmıştır. Referans noktasına en yakın bulunan 1159 adet zemin noktası otomatik

olarak seçilmiştir. Seçilen bu noktaların referans noktalar ile arasındaki 3B öklid mesafesi 0,5 m'den küçük veya eşit olanlar otomatik olarak tespit edilmiştir. 50 cm'den büyük olan ilgili zemin noktası, referans noktasına göre doğru bir eşleştirme gerçekleştirmediği için Yanlış Negatif (YN) etiketli nokta oluşacağı kabul edilmiştir. Doğruluk analizi için belirlenen 50 cm mesafe eşiği içine düşen zemin noktaları, referans noktalarla doğru bir şekilde eşleştirebileceği kabul edilir ve ilgili noktalar Doğru Pozitif (DP) olarak etiketlenir. YN ve DP etiketli noktaların adet sayısı belirlendikten sonra Tamlık (Cp), Doğruluk (Cr) ve F-skor (F1) değerlendirme ölçütleri kullanılarak obje tabanlı doğruluk analizi uygulanmıştır. Yapılan bu analiz 1159 adet noktanın 50 cm mesafe eşiği içerisinde yüzde kaçının doğru eşleşebildiğini yansıtmaktadır. Buradaki F1 değeri Cp ve Cr ölçütünün harmonik ortalama olduğu için yorumlama aşamasında bu ölçüt daha fazla ele alınmaktadır. Referans ve zemin noktaları arasındaki obje tabanlı analiz yöntemi Şekil 31'de örnek bir senaryo üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 31. Nesne tabanlı doğruluk analizi uygulama şeması

Şekil 31' de gösterildiği üzere hesaplanan mesafe değerleri 50 cm'den büyük veya küçük olabilmektedir. Gösterilen bu örnek üzerinde 4, 5 ve 6 numaralı senaryolar eşik değerinin altında kaldığı için DP olarak etiketlenirken 1, 2 ve 3 numaralı senaryolar ise eşik değerden daha büyük olduğu için YN olarak değerlendirilecektir. Bu yaklaşım ile DP etiketli nokta sayısı azaltılarak zemin filtreleme performansının gerçek doğruluk değerine yakınlaşması hedeflenmiştir.

Tez kapsamında obje tabanlı doğruluk analizinin dışında referans noktaların, üretilen zemin noktaları ile arasındaki ilişkileri de değerlendirilmiştir. Bunun için öncelikle DP etiketli referans noktalarına en yakın bulunan zemin noktalarının yükseklik değerlerinin farkı alınır ve tüm sonuçların ortalaması alınarak genel bir yükseklik farkı hesaplanır. Hesaplanan yükseklik farkı ne kadar düşük olursa filtreleme algoritmasının ürettiği zemin noktasının, referans veriye göre daha tutarlı olduğu anlaşılmaktadır. Ancak şu unutulmamalıdır ki sadece DP etiketli referans noktalar baz alınarak yükseklik farkı irdelenmiştir. Buradaki temel hedef 50 cm eşik mesafe içerisinde hesaplanan en yakın mesafedeki zemin noktası, referans noktaya göre ne denli benzerlik gösterebileceğini analiz etmektir.

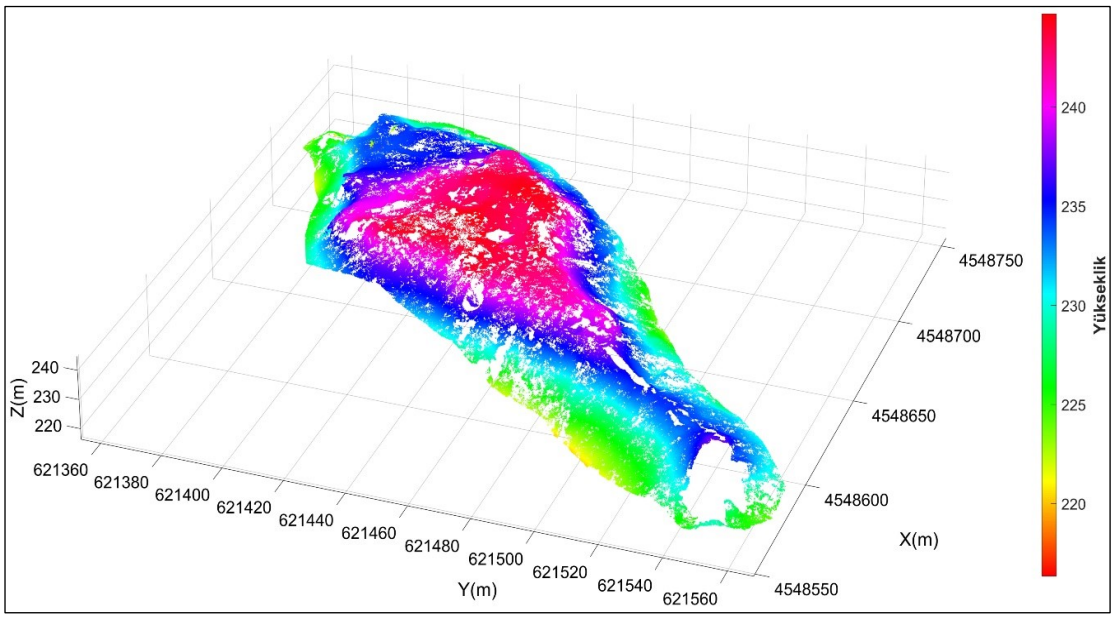
Çalışmada temel olarak DJI Terra programında üretilen zemin çıkarım performansını iyileştirebilecek yeni yöntem belirlenebilir mi sorusu üzerine araştırma yapıldığı için DJI Terra'nın referans noktaya göre olan doğruluk değerlendirme ölçütü, mesafe ve yükseklik farkı verileri diğer tüm yöntem ve kombinasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Burada karşılaştırılan iki yöntemin de DP olarak etiketlediği ortak referans noktası ele alınmaktadır. Her iki yöntemde ortak bir şekilde eşleşen DP noktaların, referans veriye göre tutarlılıkları irdelenmiştir. Temel karşılaştırma ölçütleri ise referans ve üretilen sonuç arasındaki öklid mesafe ortalaması ve yükseklik farkı ortalaması olarak ele alınmıştır. Değerlendirme ve eşleştirme yöntemlerinin tamamı Matlab R2024b bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışması kapsamında zemin filtreleme algoritmaları ile elde edilen nicel ve nitel bulgular karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir. Analiz sürecinde herbir zemin filtreleme yönteminin sonuçları, yersel lazer tarama sistemi ile üretilen referans nokta verileri (1159 nokta) ve DJI Terra programı tarafından üretilen zemin noktaları ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirme işlemi, her bir yönteme göre üretilen zemin noktasının referans noktasına olan maksimum (0.5 m) eşik mesafeli durumu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. DJI Terra Program Çıktıları

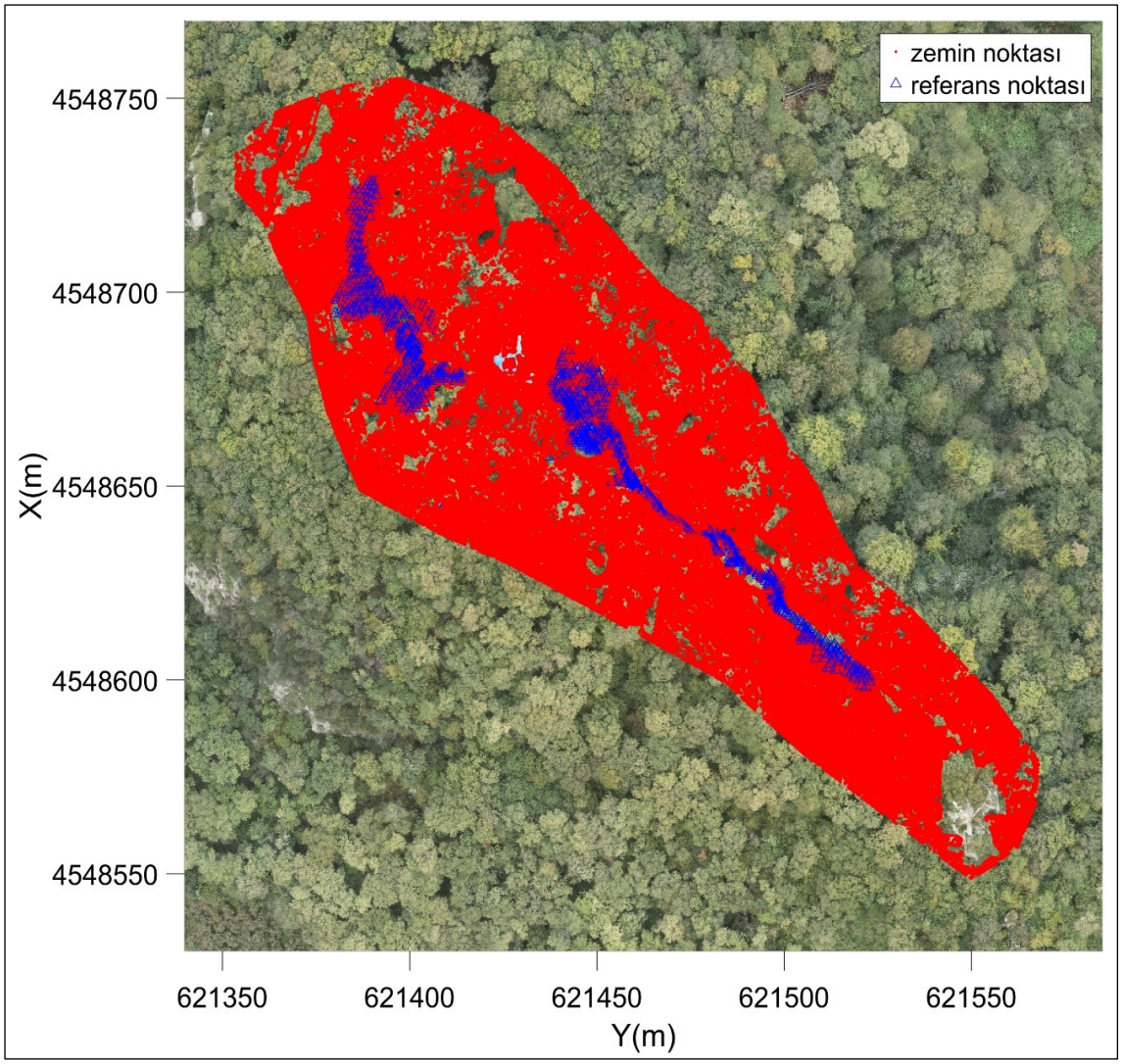
DJI Terra programı zemin çıkarım modülü kullanılarak program içerisinde mevcut uygun parametreler (çok eğimli zemin) seçilmek suretiyle Çıngırt Kalesi bölgesini içeren LiDAR nokta bulutu filtrelenmiştir. Bu filtreleme sonucu üretilen zemin noktalarına ait veri görselleştirilmiştir (Şekil 32).



Şekil 32. DJI Terra programı ile üretilen zemin noktaları

Üretilen zemin nokta sayısı 2.964.366 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 600 adet nokta düşmektedir. Şekil 32'de görüldüğü üzere kayalık ve branda ile kaplı alanda

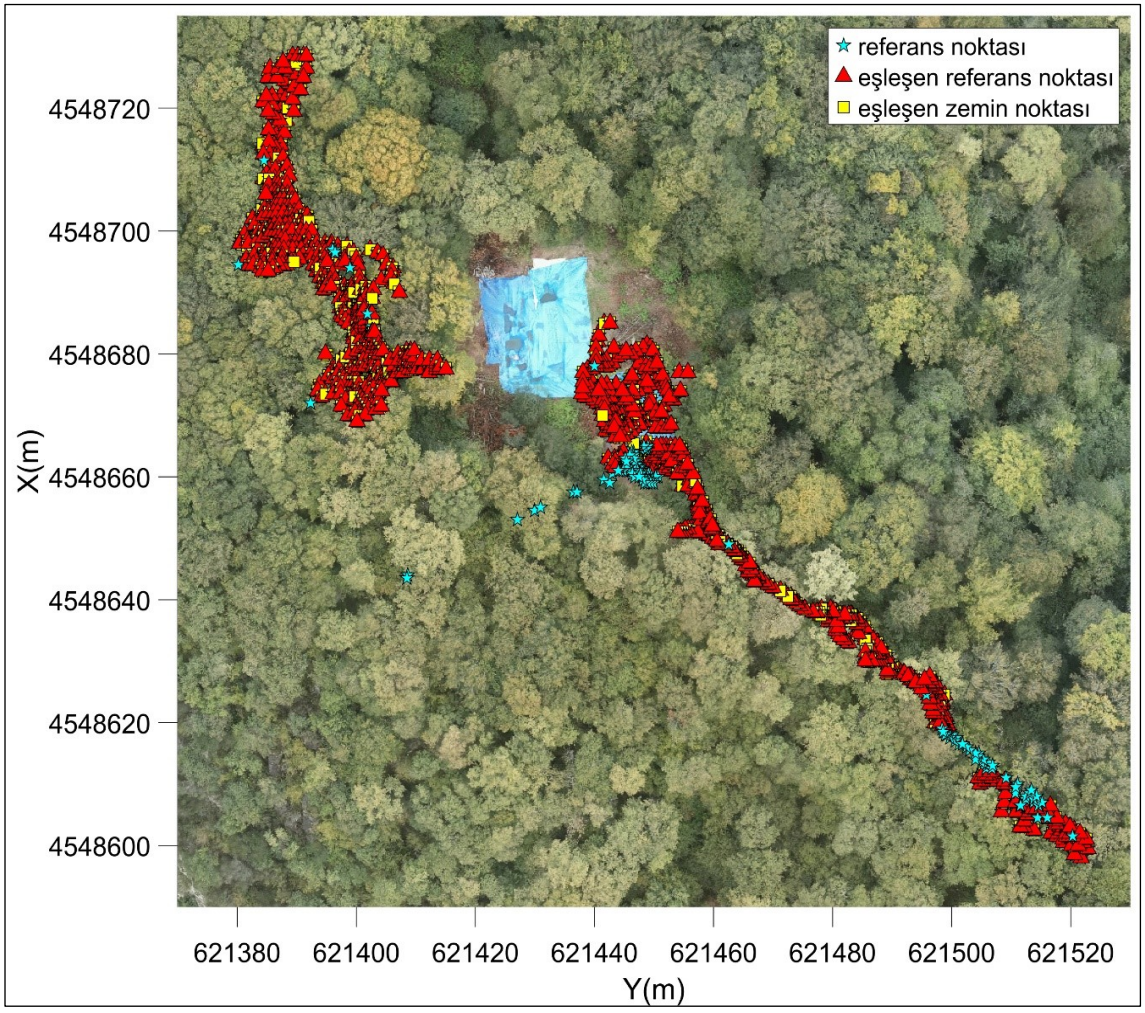
zeminin doğru bir biçimde çıkarılamadığı gözlemlenmiştir. Referans noktalarının DJI Terra tarafından üretilen nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi Şekil 33'de gösterilmektedir.



Şekil 33. DJI Terra programı ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Şekil 33'de görüldüğü üzere 1159 adet referans noktasının zemin noktalarıyla yüksek oranda örtüşebilmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak referans noktalara en yakın zemin noktaları hesaplanmıştır. Bu mesafe değerleri içerisinde 50 cm eşik değerinden küçük mesafeye sahip noktaların, zemin noktası olarak etiketlenmesi uygun bulunmuştur. 50 cm'den uzakta olan noktalar ise değerlendirme aşamasında dikkate alınmamıştır. DJI Terra programı tarafından üretilen zemin noktaları 50 cm eşik değeri baz alındığında, 1023 adet referans noktası ile eşleşebildiği tespit edilmiştir (Şekil 34). Değerlendirme kriteri için

obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre DJI Terra 1023 adet Doğru Pozitif (DP) ve 136 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli nokta üretebilmiştir. Bu durumda %93,76 F-Skor değeri ile zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1023 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ortalama 7,8 cm'lik bir hata oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 34. DJI Terra programı ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

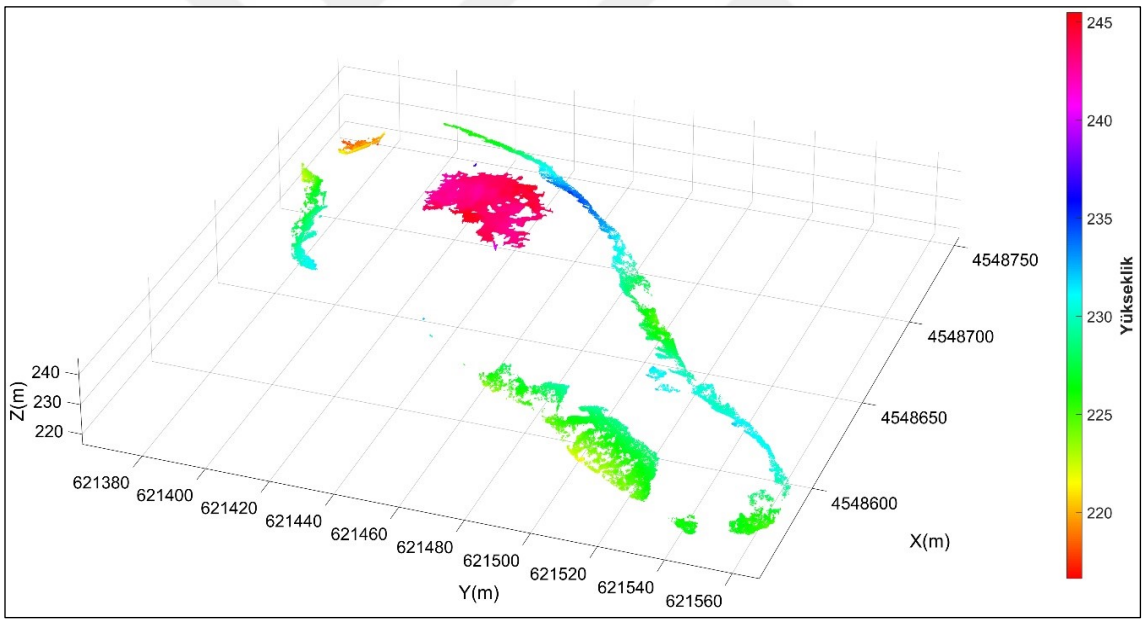
Genel olarak değerlendirildiğinde DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları %90'ın üzerinde referans veriler ile tutarlı sonuç ürettiği ortaya konulmuştur. Fakat görsel olarak değerlendirildiğinde mavi brandalı alan ve kayalık bölgelerde bu yöntemin zemin noktası üretemediği ve bu konuda zayıf kaldığı görülmektedir (Şekil 34). Özellikle bitki örtüsünün kayalık ile örtüşmesinden dolayı DJI terra bazı bölgelerde yükselti farkını doğru bir biçimde değerlendirememektedir.

3.2. CSF Çıktıları

Cloud Compare yazılımında, Çıngırt Kalesi bölgesini içeren LiDAR nokta bulutunun filtrelenmesi için CSF algoritmasından yararlanılmıştır. CSF yöntemi içerisinde, genel parametre ayarlarında sahne türü "*Steep Slope*" olarak belirlenmiş ve eğim işleme (Slope Processing) seçeneği "*Evet*" olarak etkinleştirilmiştir. İleri parametre ayarlarında ise beş farklı kombinasyon kullanılarak zemin filtreleme modelindeki değişimler analiz edilmiştir.

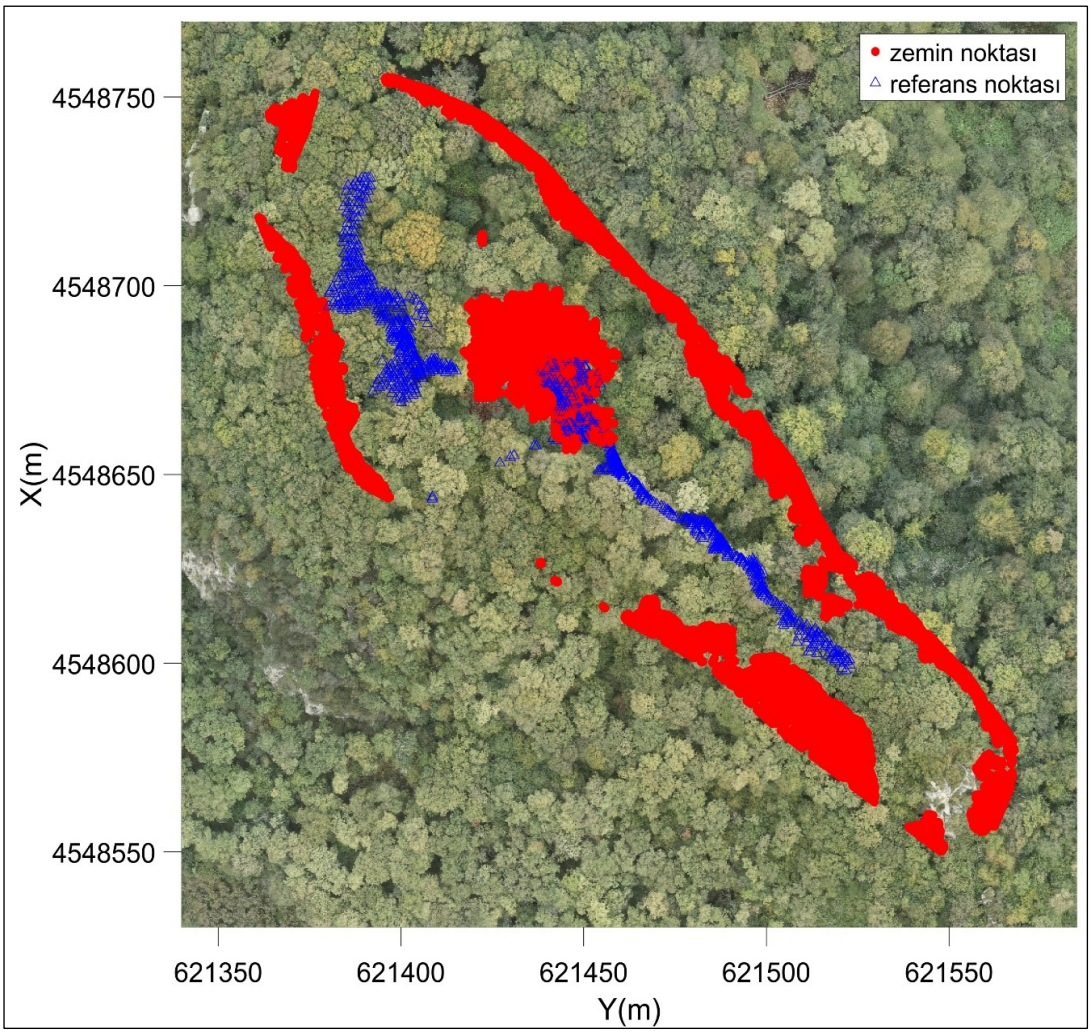
3.2.1. CSF Birinci Deneme Sonuçları

İlk denemede CSF modülü içerisinde yer alan "*Cloth resolution*", "*Max iterations*" ve "*Classsification threshold*" parametreleri sırasıyla 1, 500 ve 0,5 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 35'de sunulmaktadır.



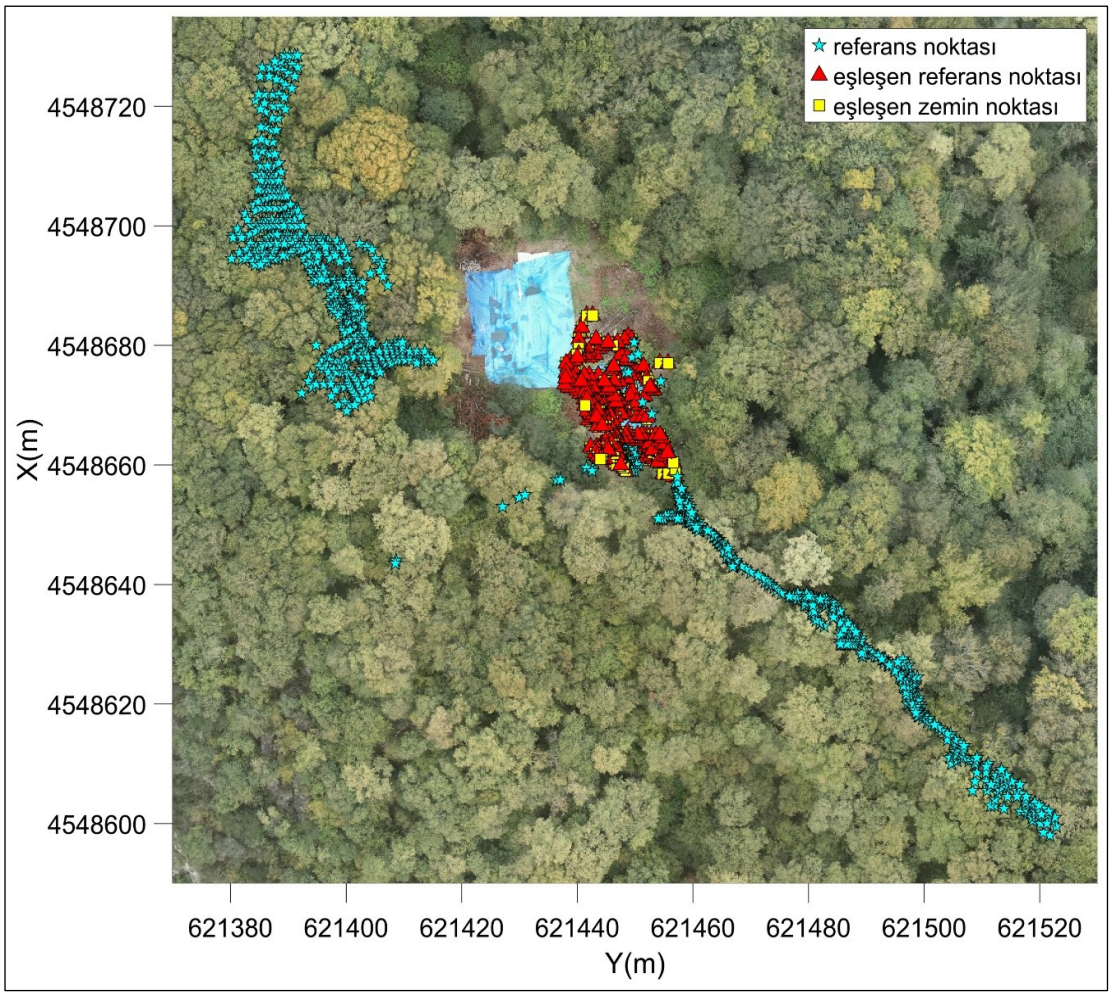
Şekil 35. CSF birinci denemede üretilen zemin noktaları

Üretilen zemin nokta sayısı 1.516.552 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 667 adet nokta düşmektedir. Şekil 35'de görüldüğü üzere ilk parametre kombinasyonu sonucu üretilen veride birçok zemin noktasını çıkarılamadığı görülmektedir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi Şekil 36'da gösterilmektedir.



Şekil 36. CSF birinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Şekil 36'da görülebileceği üzere 1159 adet referans noktanın birinci deneme ile üretilen zemin noktaları ile çok düşük düzeyde örtüştüğü görülmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 257 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece ilk denemede 257 adet referans nokta zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 37). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 257 adet Doğru Pozitif (DP) ve 902 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %36,29 F-Skor değeri ile düşük bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 257 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 8 cm'lik bir hata oluştuğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak eşleşme doğruluğu düşük olsa da 257 adet eşleşen zemin noktasının ±8 cm'lik bir hassasiyete sahip olduğu değerlendirilmiştir.

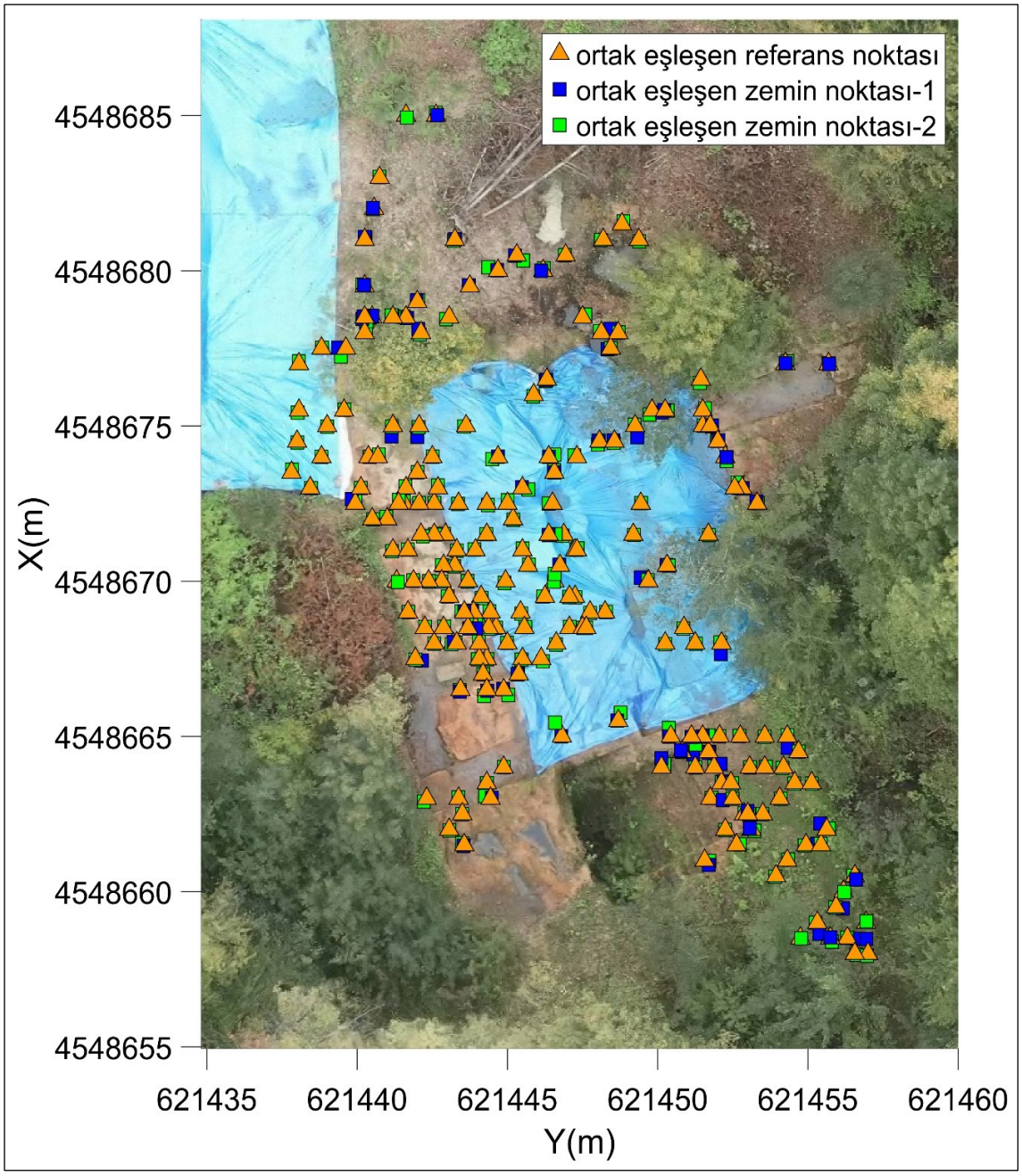


Şekil 37. CSF birinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

İlk denemede, arazi üzerindeki referans zemin noktalarının birçoğunun, üretilen zemin verisi ile örtüşemediği belirlenmiştir. Görsel analiz sonucunda, zemin noktalarının ağırlıklı olarak çalışma alanının tepe kısımlarına yakın bölgelerde üretildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, belirlenen parametreler kullanılarak elde edilen nesne tabanlı doğruluk değerlendirme performansının, DJI Terra tarafından üretilen performans değerine kıyasla daha düşük olduğu ortaya konmuştur.

CSF yönteminin birinci denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 209 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 38). Bu ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, CSF yöntemi ile 12,5 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 14,1 cm hata değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise hata değerleri sırasıyla 8,3 cm ve 11,3 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ortak

olarak tespit edilen 209 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, CSF yönteminin birinci deneme sonucunda zemin filtreleme performansının daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

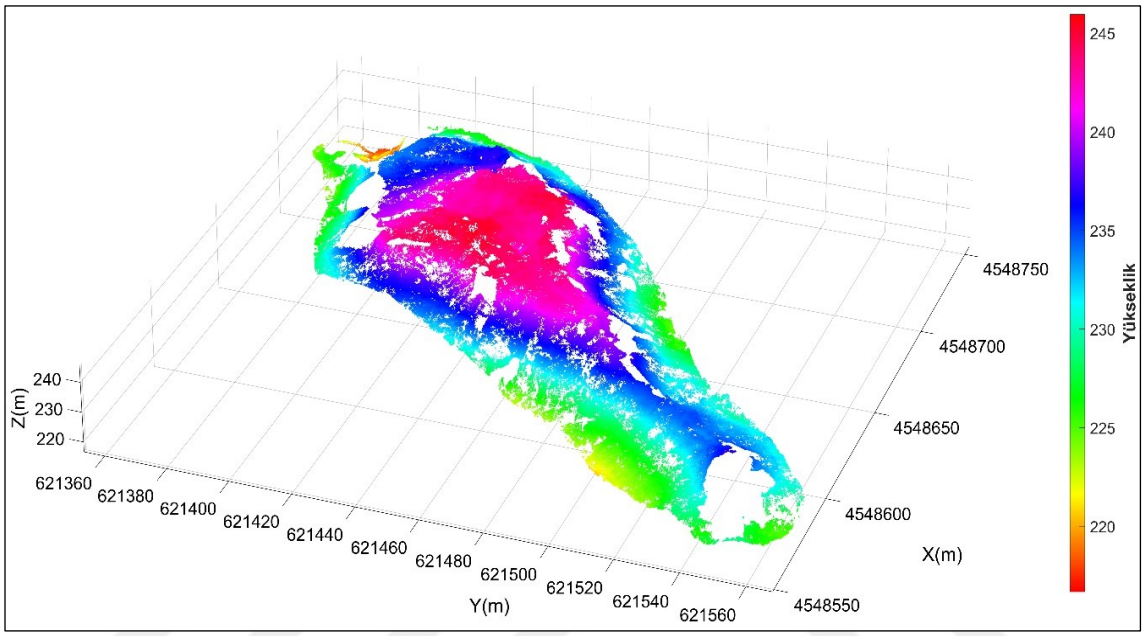


Şekil 38. CSF birinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 38'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla CSF ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

3.2.2. CSF İkinci Deneme Sonuçları

İkinci denemede CSF modülü içerisinde yer alan "*Cloth resolution*", "*Max iterations*" ve "*Classsification threshold*" parametreleri sırasıyla 0,5, 500 ve 0,5 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 39'da sunulmaktadır.

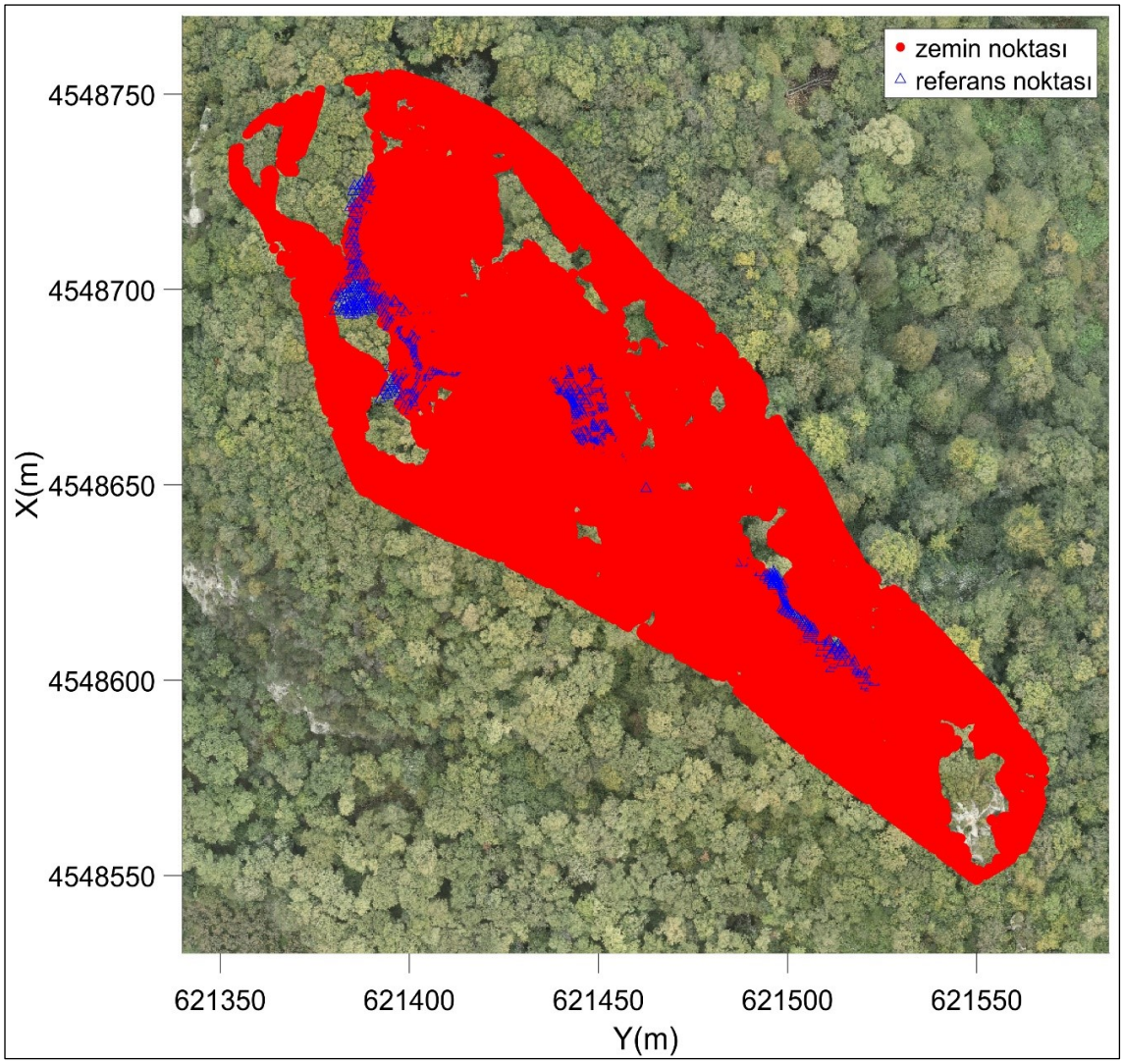


Şekil 39. CSF İkinci denemede üretilen zemin noktaları

Üretilen zemin nokta sayısı 3.955.342 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 740 adet nokta düşmektedir. Şekil 39'da görüldüğü üzere ikinci parametre kombinasyonu ile üretilen veride birinci denemeye göre gözle görülebilir iyileştirmeler yapılmıştır. Fakat yine kayalık kısım ve bazı ağaçlık alanlarda zemin noktası yakalayamadığı tespit edilmiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi Şekil 40'da gösterilmektedir.

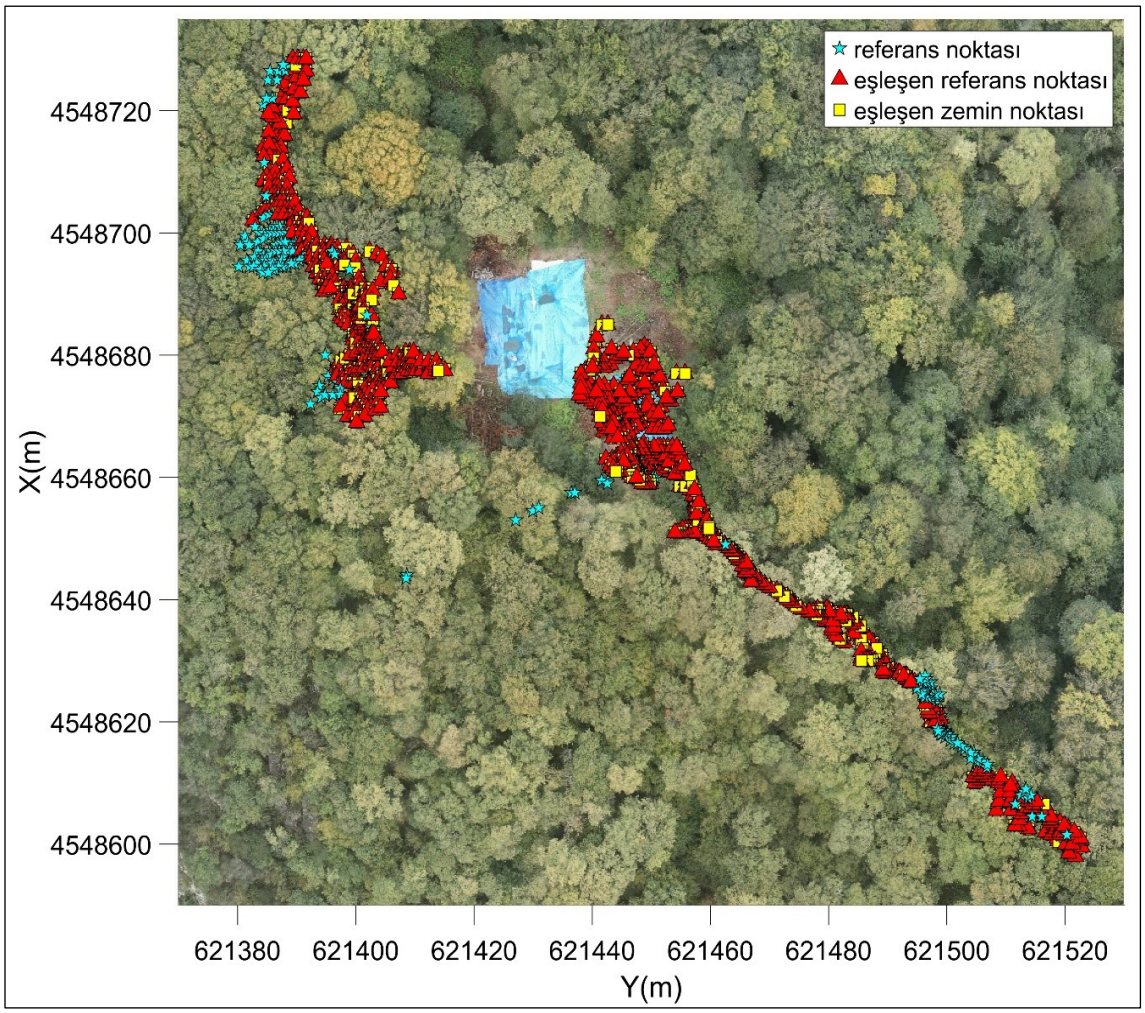
Şekil 40'da görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta, ikinci deneme ile üretilen zemin noktaları ile birinci denemeye göre çok daha yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 961 adet 50 cm eşik değerinden küçük mesafeye sahip zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece ikinci denemede 961 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 41). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 961 adet Doğru Pozitif (DP) ve 198 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu

durumda %90,66 F-Skor değeri ile yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 961 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 6,5 cm'lik bir hata oluştuğu tespit edilmiştir.



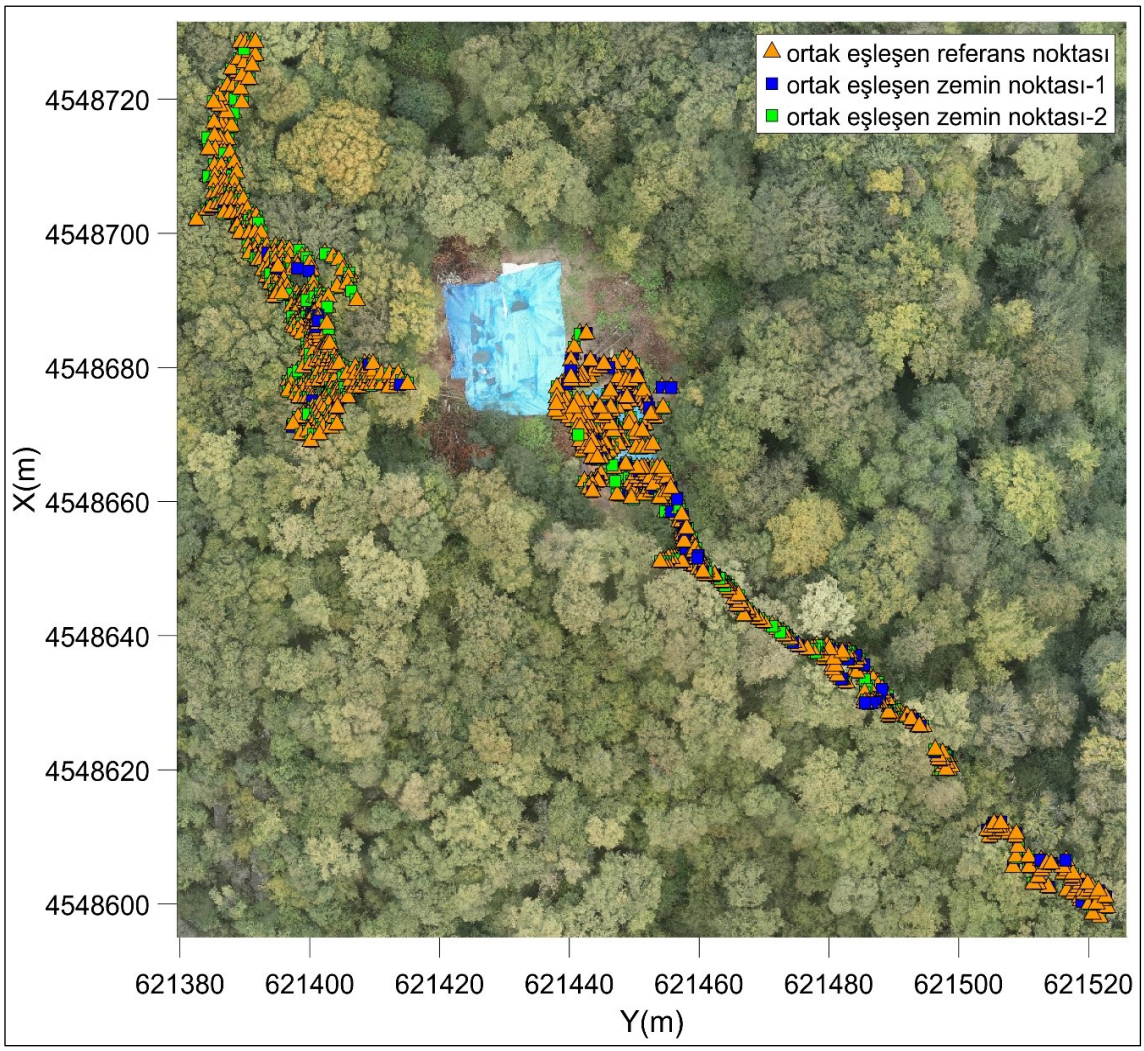
Şekil 40. CSF ikinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

İkinci denemede, arazi üzerindeki referans noktaların zemin noktaları ile yüksek oranda eşleşebildiği tespit edilmiştir. Görsel analiz sonucunda, kayalık bölgeye yakın kısımlarda zemin noktasının üretilemediği görülmektedir. Sonuç olarak, ikinci denemede seçilen parametreler kullanılarak elde edilen nesne tabanlı doğruluk değerlendirme performansının, DJI Terra tarafından üretilen performans değerine yakın olmakla birlikte daha düşük olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 41. CSF ikinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

CSF yönteminin ikinci denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 897 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 42). Bu ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, CSF yöntemi ile 9,8 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,3 cm hata değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise hata değerleri sırasıyla 6,2 cm ve 7,7 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 897 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, CSF yönteminin ikinci deneme sonucunda da zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.



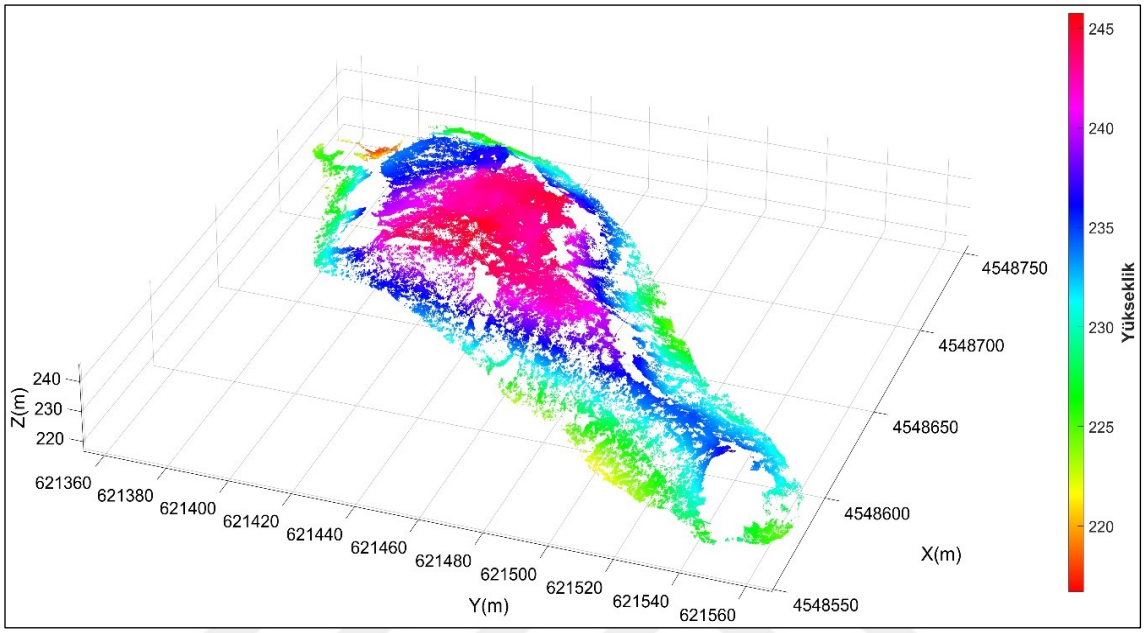
Şekil 42. CSF ikinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 42'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla CSF ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

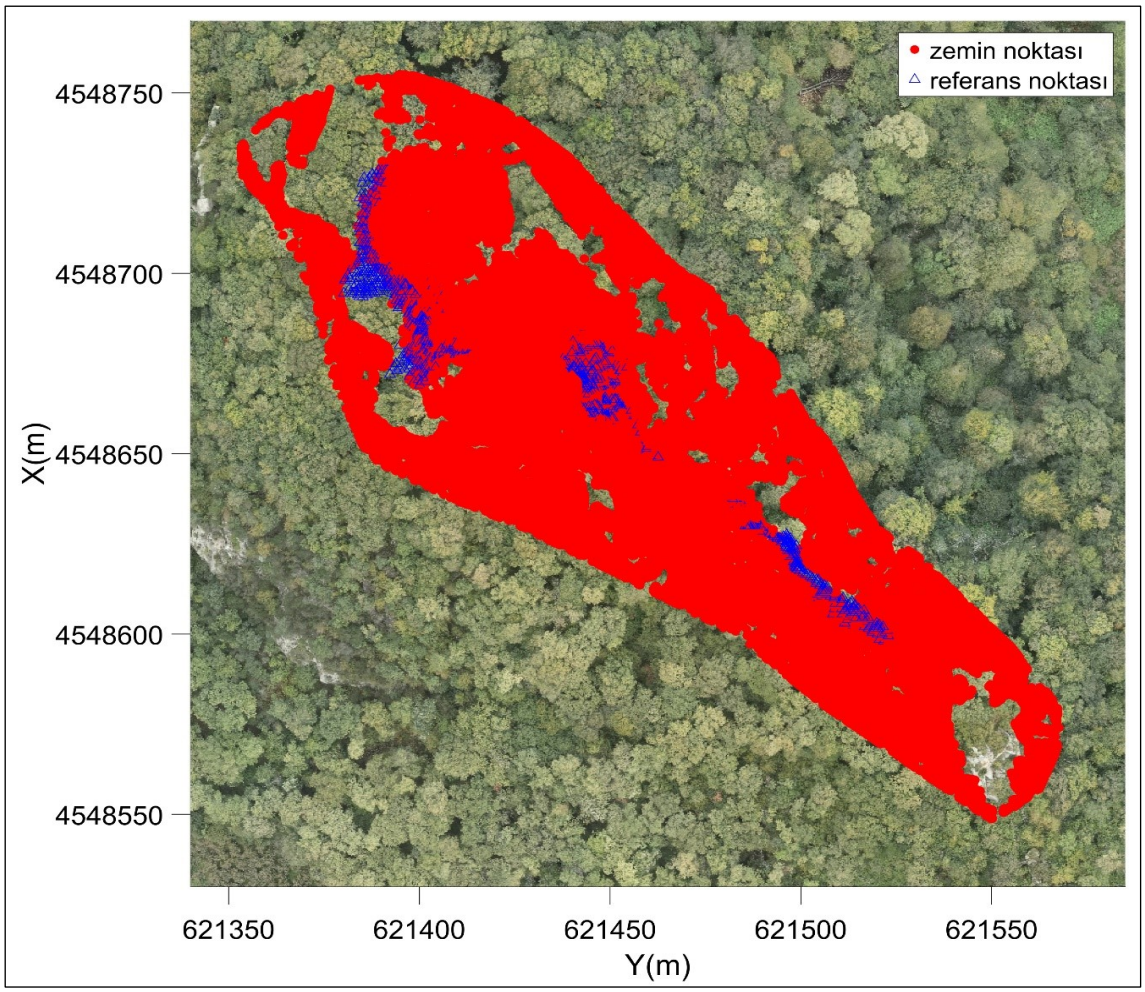
3.2.3. CSF Üçüncü Deneme Sonuçları

Üçüncü denemede CSF modülü içerisinde yer alan "*Cloth resolution*", "*Max iterations*" ve "*Classsification threshold*" parametreleri sırasıyla 0,5, 500 ve 0,2 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 43'de sunulmaktadır. Üretilen zemin nokta sayısı 2.788.809 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 735 adet nokta düşmektedir. Şekil 43'de görüldüğü üzere üçüncü parametre kombinasyonu ile üretilen veride ikinci denemeye göre daha düşük seviyede zemin noktası üretilmiştir. Bu

denemede de yine kayalık kısım ve bazı ağaçlık alanlarda zemin noktası tespit edilememiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi Şekil 44'de paylaşılmaktadır.

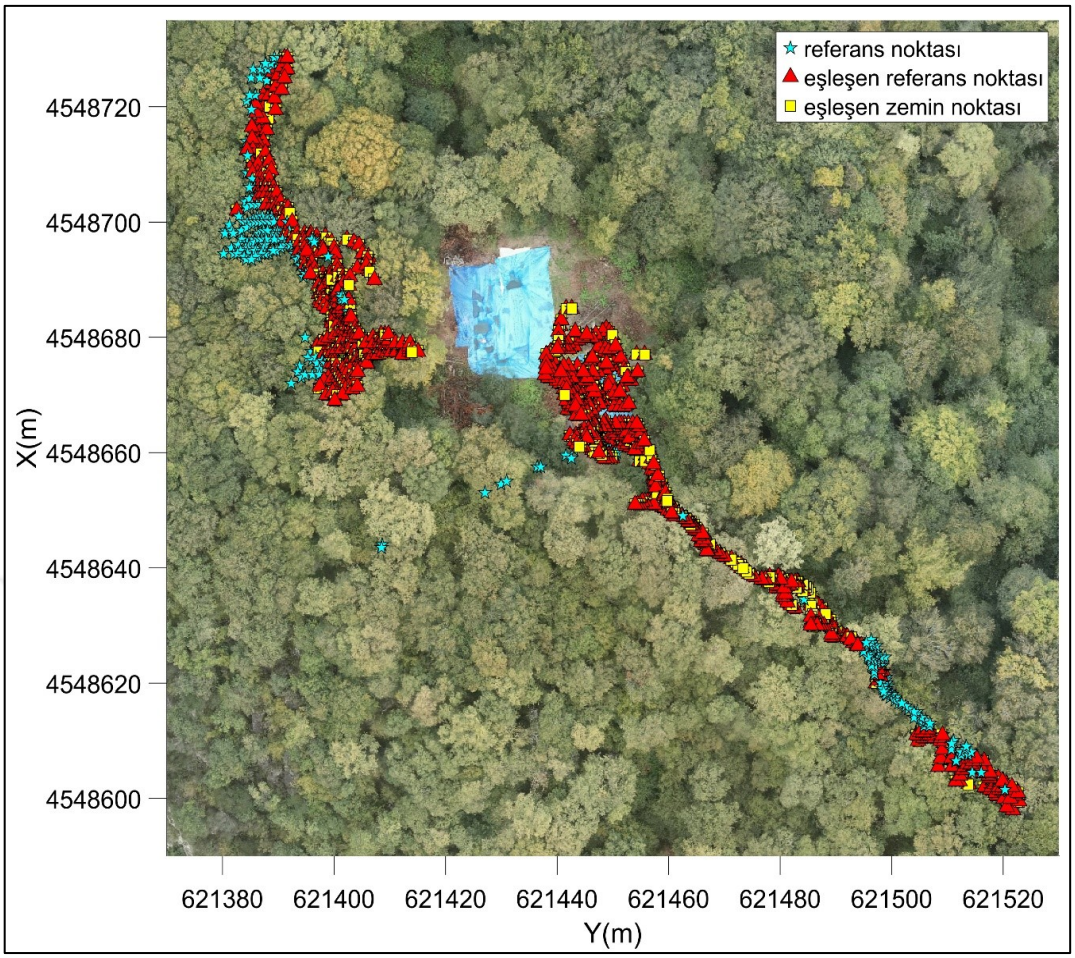


Şekil 43. CSF üçüncü denemede üretilen zemin noktaları



Şekil 44. CSF üçüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Şekil 44'de görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 898 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece üçüncü denemede 898 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 45). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 898 adet Doğru Pozitif (DP) ve 261 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %87,31 F-Skor değeri ile yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 898 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 7,1 cm'lik bir hata oluştuğu tespit edilmiştir.

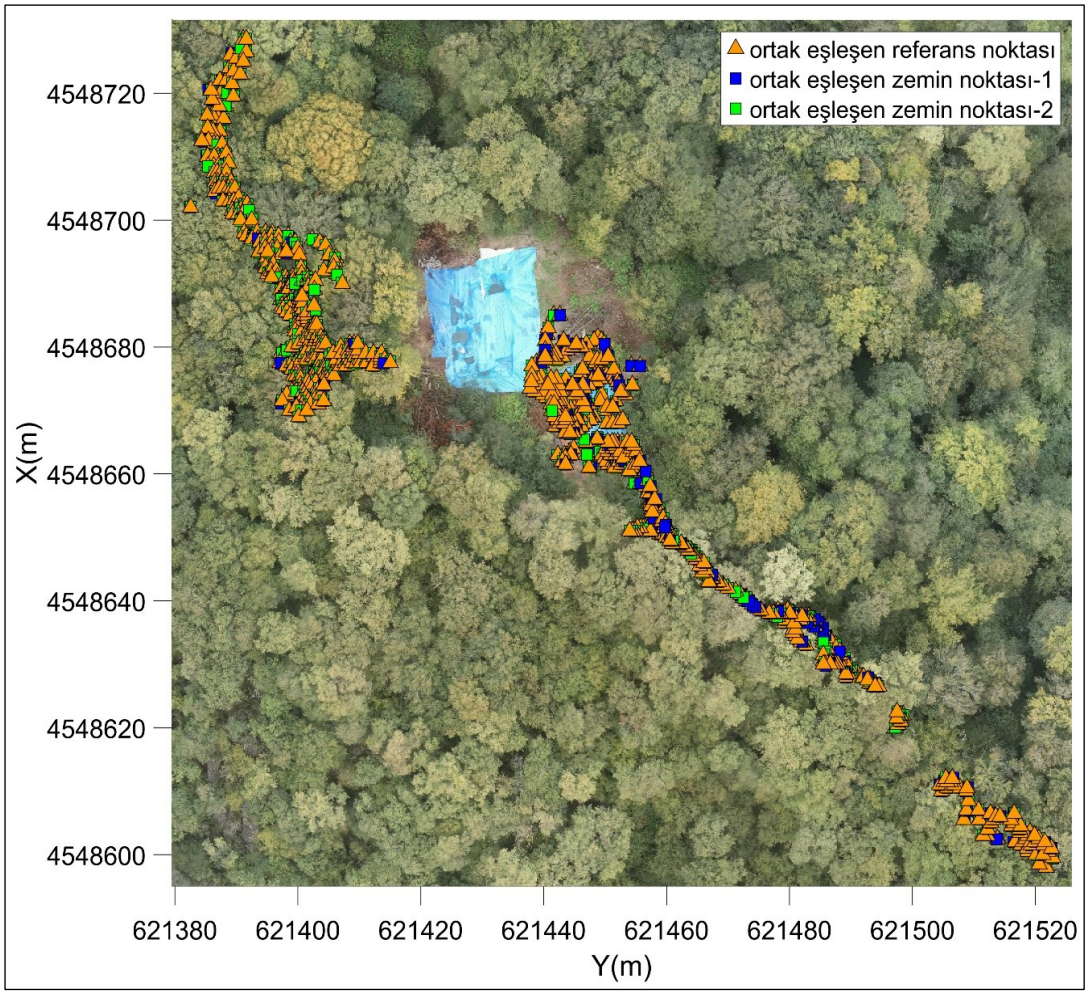


Şekil 45. CSF üçüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

Üçüncü denemede, arazi üzerindeki referans noktaların zemin noktaları ile yine yüksek oranda eşleşebildiği ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, üçüncü denemede seçilen parametreler kullanılarak elde edilen nesne tabanlı doğruluk değerlendirme performansının, DJI Terra tarafından üretilen performans değerine yakın olmakla birlikte daha düşük olduğu ortaya konmuştur. Aynı zamanda performans olarak ikinci denemeninde gerisinde kalmıştır.

CSF yönteminin üçüncü denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 843 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 46). Bu ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, CSF yöntemi ile 11,3 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,2 cm hata değerine ulaşılmıştır. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise hata değerleri sırasıyla 6,9 cm ve 7,8 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 843 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, CSF yönteminin zemin

filtreleme performansının DJI Terra'ya göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda nicel olarak üçüncü deneme, ikinci deneme ile üretilen bulguların gerisinde kaldığı tespit edilmiştir.



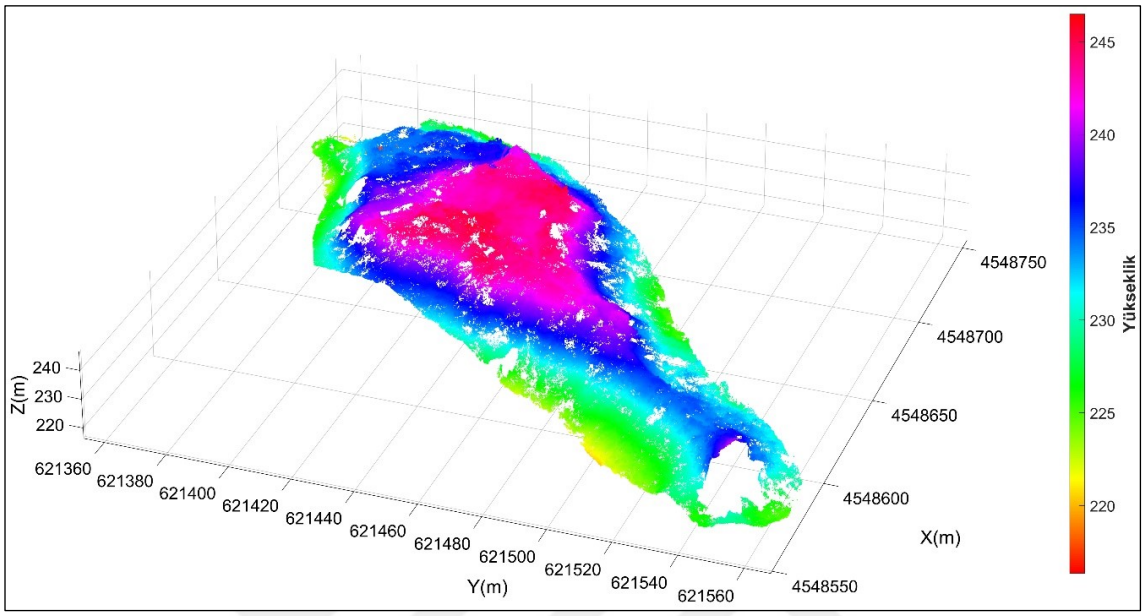
Şekil 46. CSF üçüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 46'da gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla CSF ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

3.2.4. CSF Dördüncü Deneme Sonuçları

Dördüncü denemede CSF modülü içerisinde yer alan "*Cloth resolution*", "*Max iterations*" ve "*Classsification threshold*" parametreleri sırasıyla 0,25, 500 ve 0,5 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 47'de sunulmaktadır.

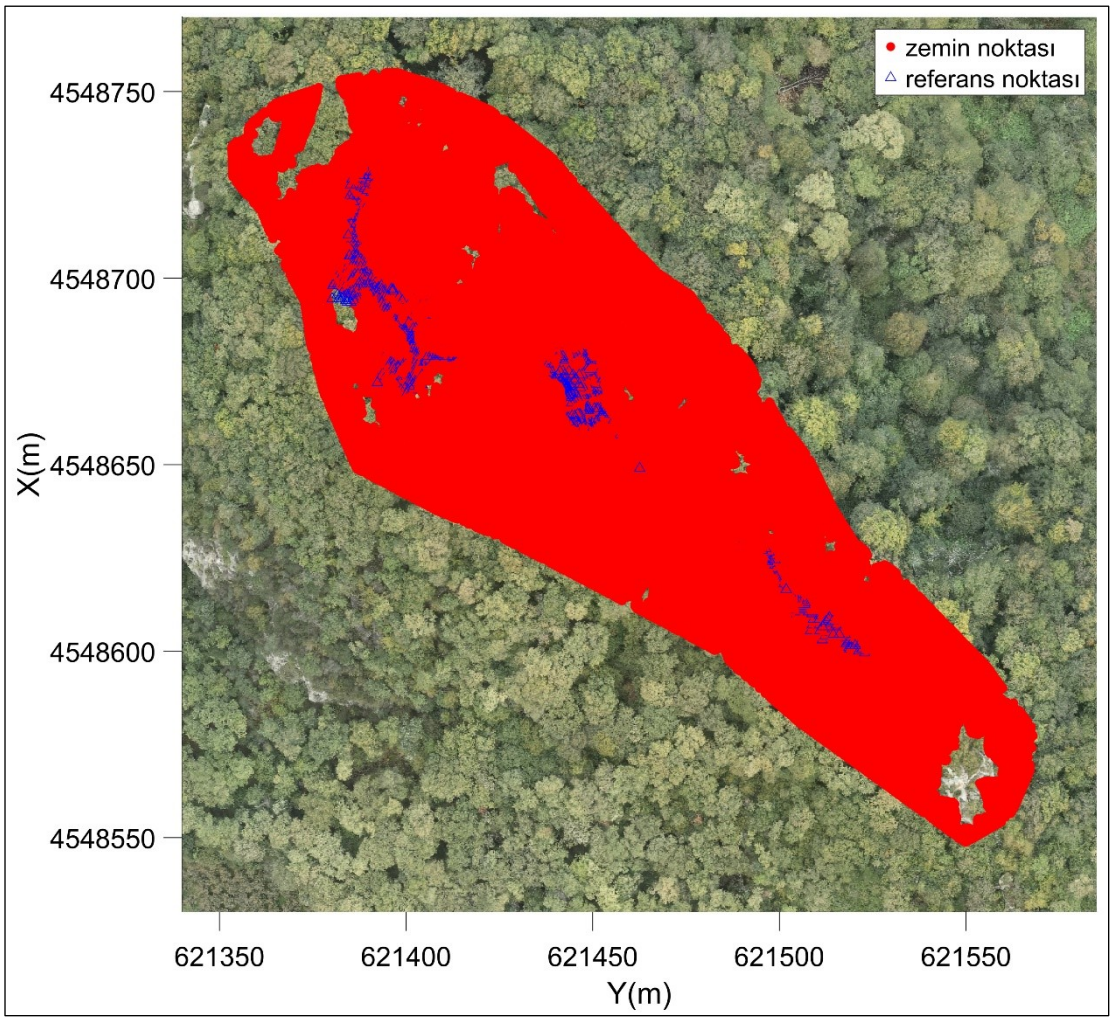
Üretilen zemin nokta sayısı 4.841.767 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 805 adet nokta düşmektedir.



Şekil 47. CSF dördüncü denemede üretilen zemin noktaları

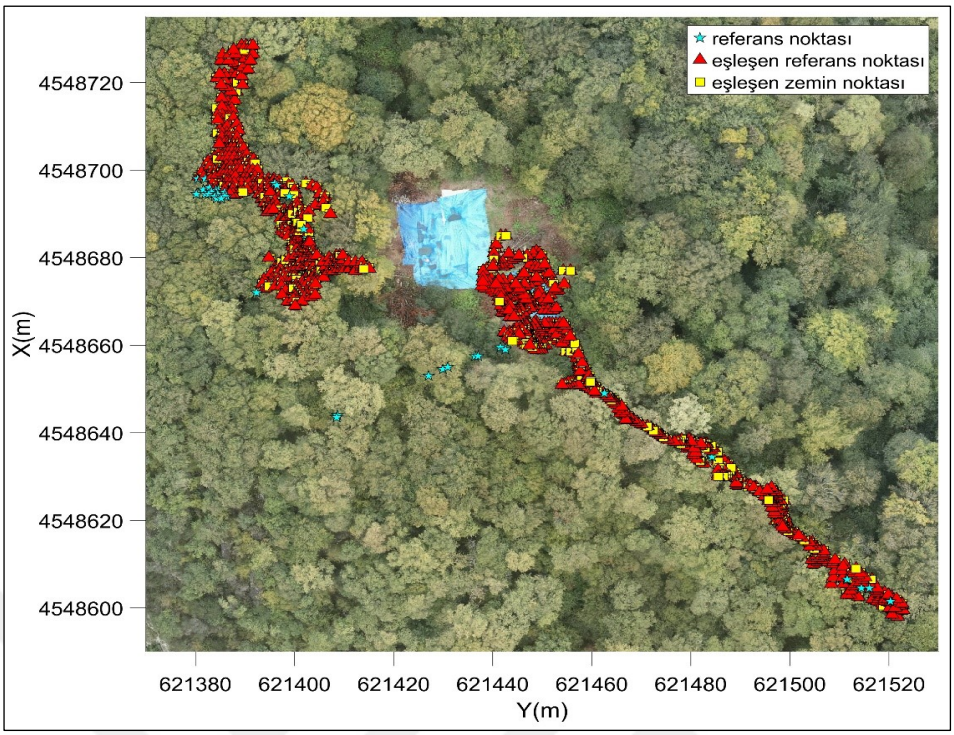
Şekil 47'de görüldüğü üzere dördüncü parametre kombinasyonu ile üretilen veride üçüncü denemeye göre daha yüksek seviyede zemin noktası üretilmektedir. Bu denemede kayalık kısım için birkaç zemin noktası üretilse de yeterli düzeyde olmadığı düşünülmektedir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi Şekil 48'de paylaşılmaktadır.

Şekil 48'de görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1112 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece dördüncü denemede 1112 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 49). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1112 adet Doğru Pozitif (DP) ve 47 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %97,93 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1112 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 6,2 cm'lik bir hata oluştuğu tespit edilmiştir.

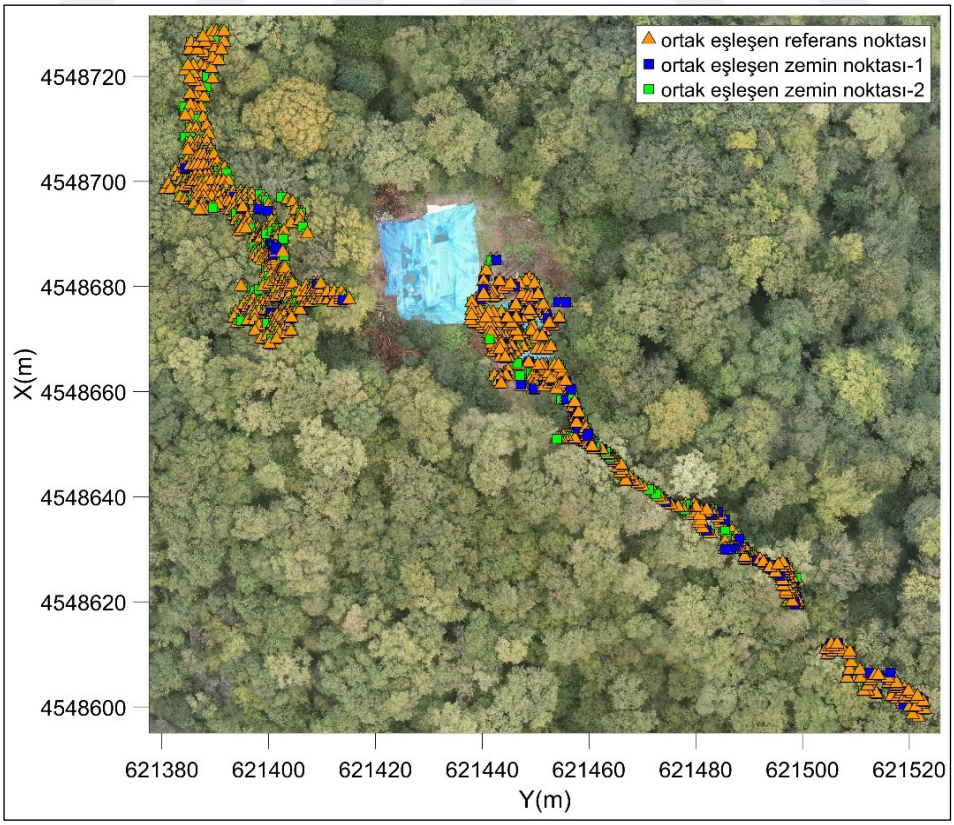


Şekil 48. CSF dördüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Dördüncü denemede, arazi üzerindeki referans noktaların zemin noktaları ile diğer yöntemlere nazaran daha yüksek oranda eşleşebildiği ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, dördüncü denemede seçilen parametreler kullanılarak elde edilen nesne tabanlı doğruluk değerlendirme performansının, DJI Terra tarafından üretilen performans değerine göre daha üstün olduğu ortaya konmuştur. CSF yönteminin dördüncü denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 1004 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 49). Bu ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, CSF yöntemi ile 9,6 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,7 cm hata değerine ulaşılmıştır. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise hata değerleri sırasıyla 6 cm ve 7,8 cm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 49. CSF dördüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

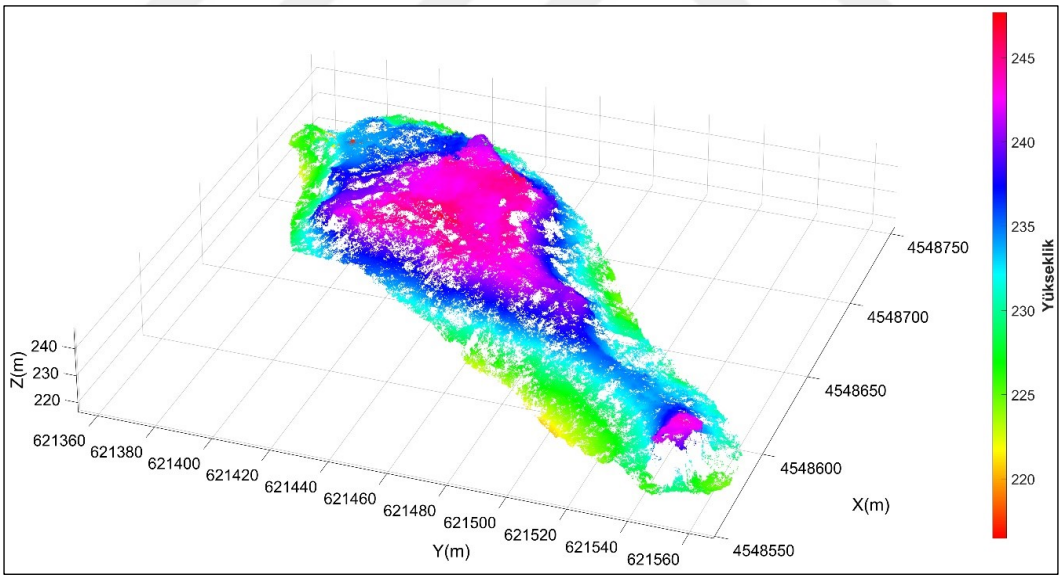


Şekil 50. CSF dördüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile *eşleşen noktalar*

Şekil 50'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla CSF ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 1004 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, CSF yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda nicel olarak dördüncü deneme, ilk üç deneme ile üretilen bulguların üstünde bir performans sergilemiştir.

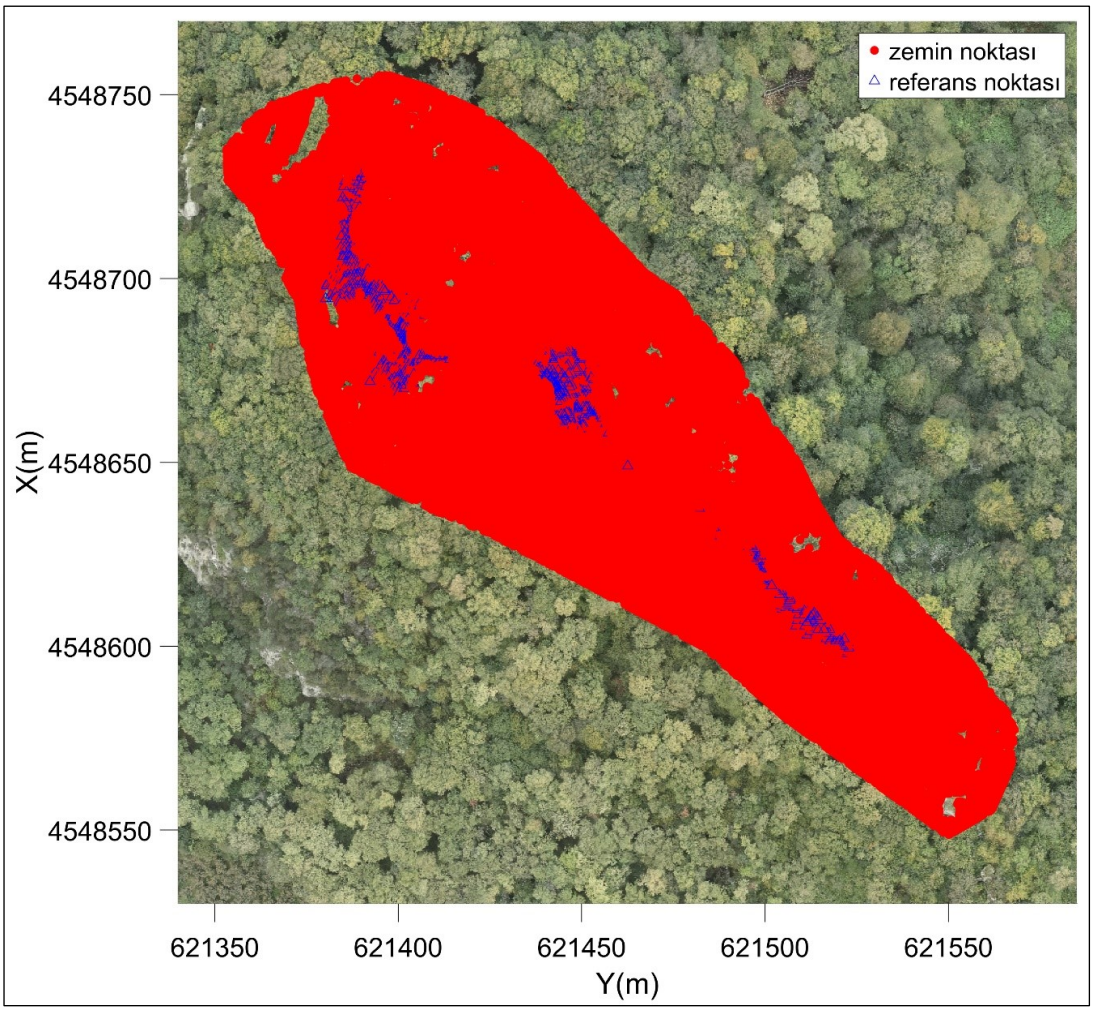
3.2.5. CSF Beşinci Deneme Sonuçları

Beşinci denemede CSF modülü içerisinde yer alan "*Cloth resolution*", "*Max iterations*" ve "*Classsification threshold*" parametreleri sırasıyla 0,15, 500 ve 0,15 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 51'de sunulmaktadır. Üretilen zemin nokta sayısı 3.863.259 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 813 adet nokta düşmektedir.



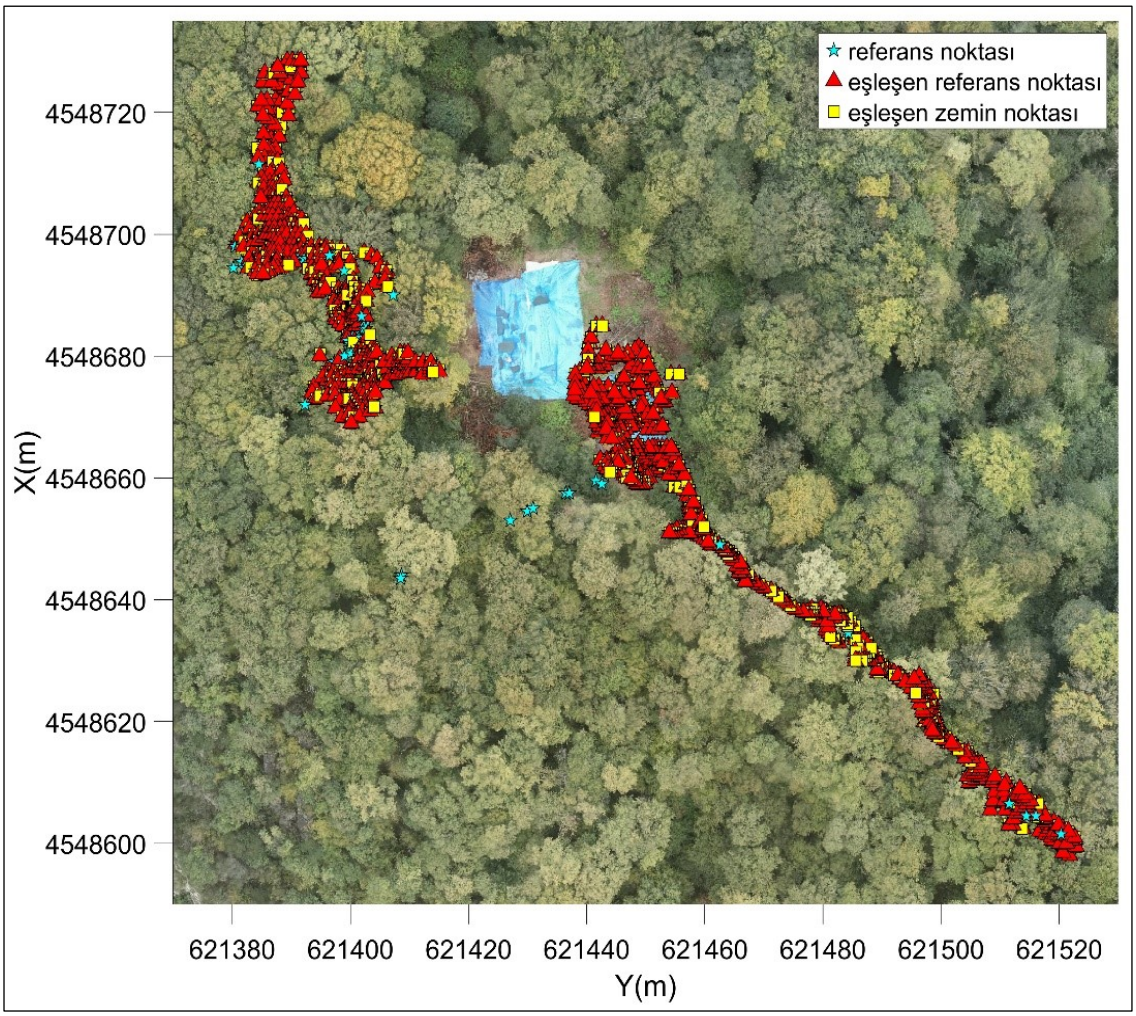
Şekil 51. CSF beşinci denemede üretilen zemin noktaları

Şekil 51'de görüldüğü üzere beşinci parametre kombinasyonu ile üretilen veriye göre yüksek seviyede zemin noktası üretilmektedir. Bu denemede kayalık kısım diğer yöntemlere göre çok daha iyi bir şekilde ortaya çıkarılmış ve zemin noktası olarak etiketlenmiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 52'de sunulmaktadır.

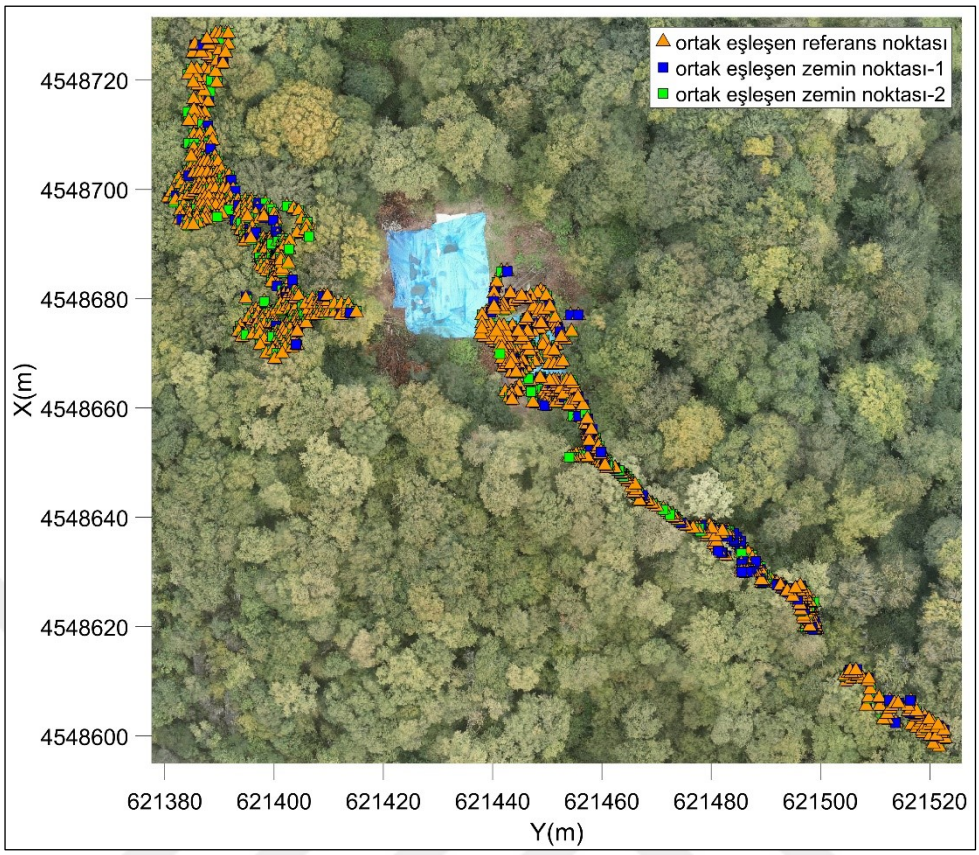


Şekil 52. CSF beşinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Şekil 52'de görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1106 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece beşinci denemede 1106 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 53). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1106 adet Doğru Pozitif (DP) ve 53 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %97,66 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1106 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 6,3 cm'lik bir hata oluştuğu tespit edilmiştir. CSF yönteminin beşinci denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 997 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 54).



Şekil 53. CSF beşinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi



Şekil 54. CSF beşinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, CSF yöntemi ile 10,6 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,7 cm hata değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise hata değerleri sırasıyla 6,2 cm ve 7,9 cm olarak hesaplanmıştır. Şekil 54'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla CSF ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 997 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, CSF yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda nicel olarak beşinci deneme, ilk üç deneme ile üretilen bulguların üstünde, dördüncü denemenin altında bir performans sergilemiştir. Fakat kayalık alanla ilgili zemin noktası üretebilen tek parametre kombinasyonu beşinci denemede olduğu gözlemlenmiştir.

CSF filtreleme algoritması için seçilen parametreler Tablo 12'de özetlenmiştir. Ayrıca beş farklı deneme sonucunda üretilen zemin noktalarının performansları ise Tablo 13'de paylaşılmaktadır.

Tablo 12. CSF parametre seçimi özet bilgileri

Yöntem	Cloth resolution	Max iterations	Classification threshold	Zemin Nokta Sayısı	Nokta Yoğunluğu (nokta/m^2)
CSF-1	1	500	0,50	1.516.552	667
CSF-2	0,50	500	0,50	3.955.342	740
CSF-3	0,50	500	0,20	2.788.809	735
CSF-4	0,25	500	0,50	4.841.767	805
CSF-5	0,15	500	0,15	3.863.259	813

Tablo 13. CSF yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi

Yöntem	Ortalama Yükseklik Farkı	Eşleşen Nokta Sayısı (DP)	Eşleşmeyen Referans Nokta (YN)	Eşleşmeyen Zemin Noktası (DP)	Cr (%)	Cp (%)	F-Skor (%)
CSF-1	0,080	257	902	0	100	22,17	36,29
CSF-2	0,065	961	198	0	100	82,92	90,66
CSF-3	0,071	898	261	0	100	77,48	87,31
CSF-4	0,062	1112	47	0	100	95,94	**97,93**
CSF-5	0,063	1106	53	0	100	95,43	**97,66**
DJI	0,078	1023	136	**0**	100	88,26	93,76

Tablo 13'de yer alan nicel sonuçlara göre CSF yönteminin zemin gerçeği verisine göre ortalama yükseklik farkı 6,8 cm olarak tespit edilmiştir. Beş deneme sonucunda ortalama 867 adet referans nokta, elde edilen zemin noktaları ile 50 cm eşik mesafesine göre doğru eşleştiği hesaplanmıştır. Bu durum ortalama olarak yaklaşık %75 referans noktasının DP olarak etiketlenmesini sağlamıştır. Eşleşmeyen referans noktalarına bakıldığında 5 adet deneme sonucunda ortalama 292 adet YN etiketli nokta üretilmektedir. Değerlendirme kriteri olarak F-skor metriği tamlık ve doğruluk metriğin harmonik ortalaması olduğu için yorumlama esnasında bu ölçüt ele alınmıştır. Tüm parametre kombinasyonları değerlendirildiğinde obje tabanlı olarak %81,97 F-skor değerine ulaşılmıştır. En yüksek nicel doğruluk değeri +%4'lük bir iyileştirme ile CSF-4 denemesinde gerçekleşmiştir. En kötü sonuç ise %36,29 ile CSF-1 yönteminde gerçekleşmiştir. Bu denemede sabit değerli parametreler kullanılarak çalıştırılmış ve diğer denemelere göre çok düşük zemin nokta sayısı çıkmıştır. Böylece diğer denemelere göre çok daha düşük yoğunluklu zemin nokta bulutu oluşmuştur. Nicel olarak en iyi performansı göstermesede DJI Terra tarafından üretilen zemin noktalarına göre daha iyi nicel sonuç üreten CSF-5, kayalık alanla ilgili doğru filtreleme yapabilen en iyi deneme olarak değerlendirilmektedir.

CSF denemelerinin DJI terra programındaki zemin filtreleme algoritması ile karşılaştırılması Tablo 14'te özetlenmiştir. Değerlendirme için hem CSF hemde DJI Terra programında eşleşen ortak referans nokta sayısı baz alınmıştır.

Tablo 14. CSF yöntemi ortak referans noktalarına göre doğrulukların değerlendirilmesi

Yöntem	Ortak Nokta Sayısı	Öklid mesafe Ortalaması (m)	DJI Öklid Mesafe Ortalaması (m)	Yükseklik Farkı Ortalaması (m)	DJI Yükseklik Farkı Ortalaması (m)
CSF-1	209	0,125	0,141	0,083	0,113
CSF-2	897	0,098	0,113	0,062	0,077
CSF-3	843	0,113	0,112	0,069	0,078
CSF-4	1004	0,096	0,117	0,060	0,078
CSF-5	997	0,106	0,117	0,062	0,079
Ortalama	790	0,108	0,120	0,067	0,085

Ortak referans noktaları incelendiğinde, beş farklı deneme sonucunda hem CSF hem de DJI Terra tarafından ortalama 790 adet nokta ortak bir şekilde eşleşmiştir. CSF ve DJI Terra tarafından 3B Öklid mesafe hatası ortalama olarak sırasıyla 10,8 ve 12 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değerlendirme yalnızca yükseklik koordinatı ile yapıldığında ise sırasıyla ortalama 6,7 ve 8,5 cm olarak belirlenmiştir. Tablo 14'te yapılan değerlendirme ortak referans noktalarına göre yapıldığı için her iki yöntem içinde DP olarak eşleştirilen zemin noktalarının ne kadar doğru bir şekilde tespit edilebileceğini gösterebilmektedir. Yapılan nicel değerlendirmeye göre en fazla ortak nokta sayısına sahip olmasına rağmen, en düşük mesafe ve yükseklik değerini veren CSF-4 yöntemi en iyi sonucu verdiği düşünülmektedir. CSF-1 yöntemi ise ortak eşleşen referans nokta sayısı 209 ile en düşük olduğu için en kötü performansı gösterdiği değerlendirilmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde ortak referans noktaları için CSF yöntemi DJI-Terra'ya göre daha doğru bir şekilde zemindeki noktayı eşleştirmiştir.

3.3. PTIN Çıktıları

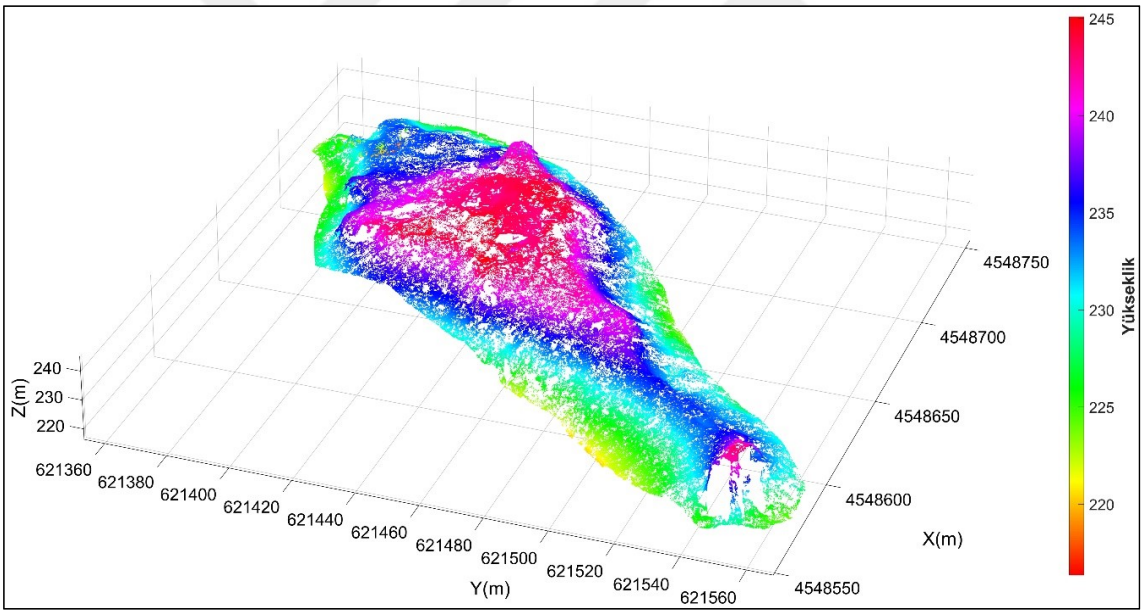
PTIN algoritması ile Çıngırt Kalesi LiDAR nokta bulutunu filtreleyebilmek için 5 farklı parametre kombinasyonu ile testler yapılmıştır. Bu algoritma LAStools yazılımı bünyesinde çalıştırılmıştır. Zemin çıkarımı için seçilen parametreler Tablo 15'de özet bir şekilde sunulmaktadır.

Tablo 15. PTIN parametre seçimi özet bilgileri

Yöntem	Arazi örtüsü/tipi	Filtreleme türü	Zemin nokta sayısı	Nokta Yoğunluğu (nokta/m^2)
PTIN-1	Nature	Extra	1.708.970	408
PTIN-2	Nature	Hyper	1.708.349	402
PTIN-3	Nature	Ultra	1.728.639	402
PTIN-4	Wilderness	Hyper	1.926.674	464
PTIN-5	Wilderness	Ultra	1.928.356	468

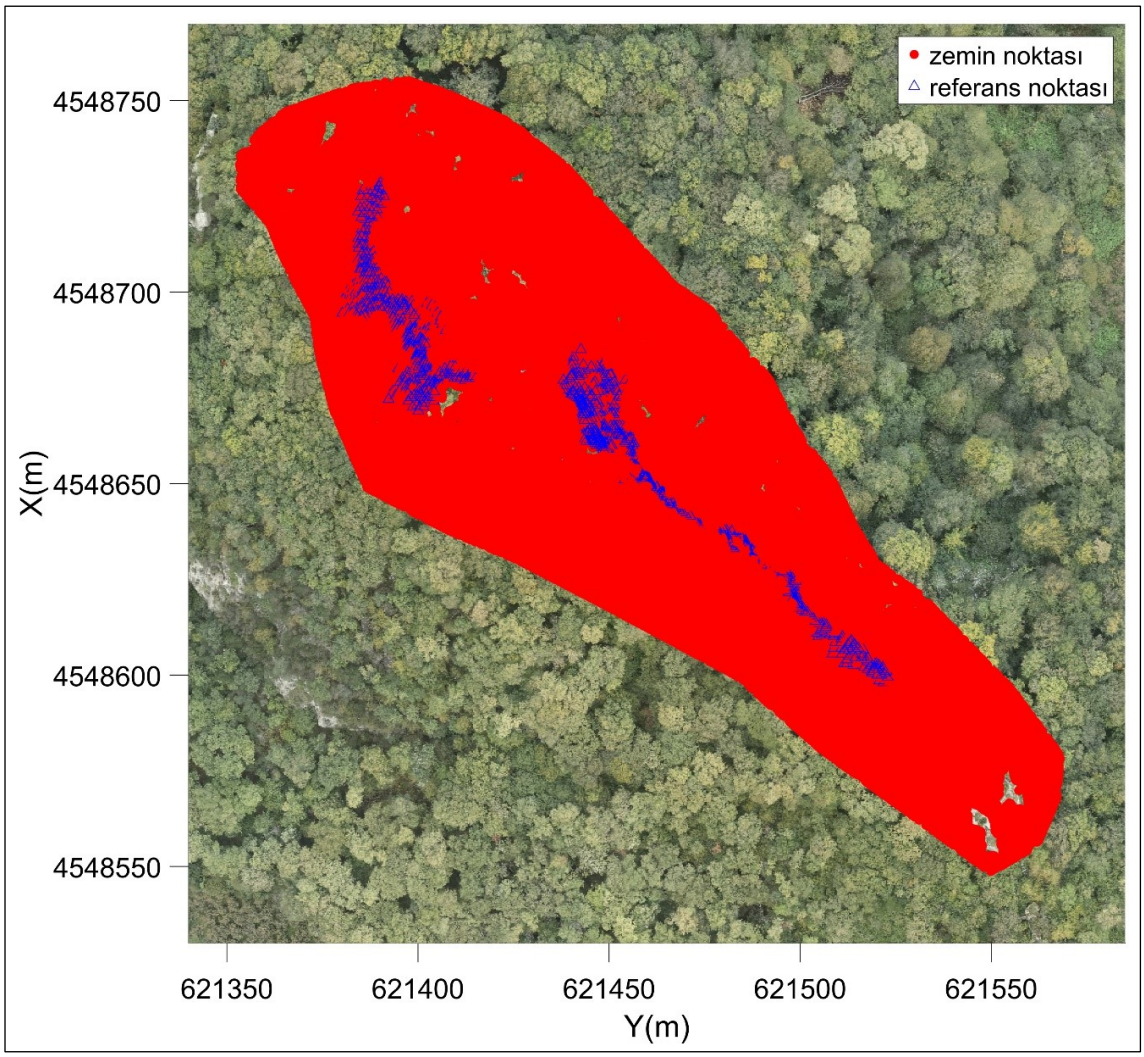
3.3.1. PTIN Birinci Deneme Sonuçları

Birinci denemede LAStools yazılımındaki *lasground.new* modülü içerisinde yer alan "*Nature*" ve "*Extra*" parametreleri seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 55'de sunulmaktadır. Üretilen zemin nokta sayısı 1.708.970 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 408 adet nokta düşmektedir.



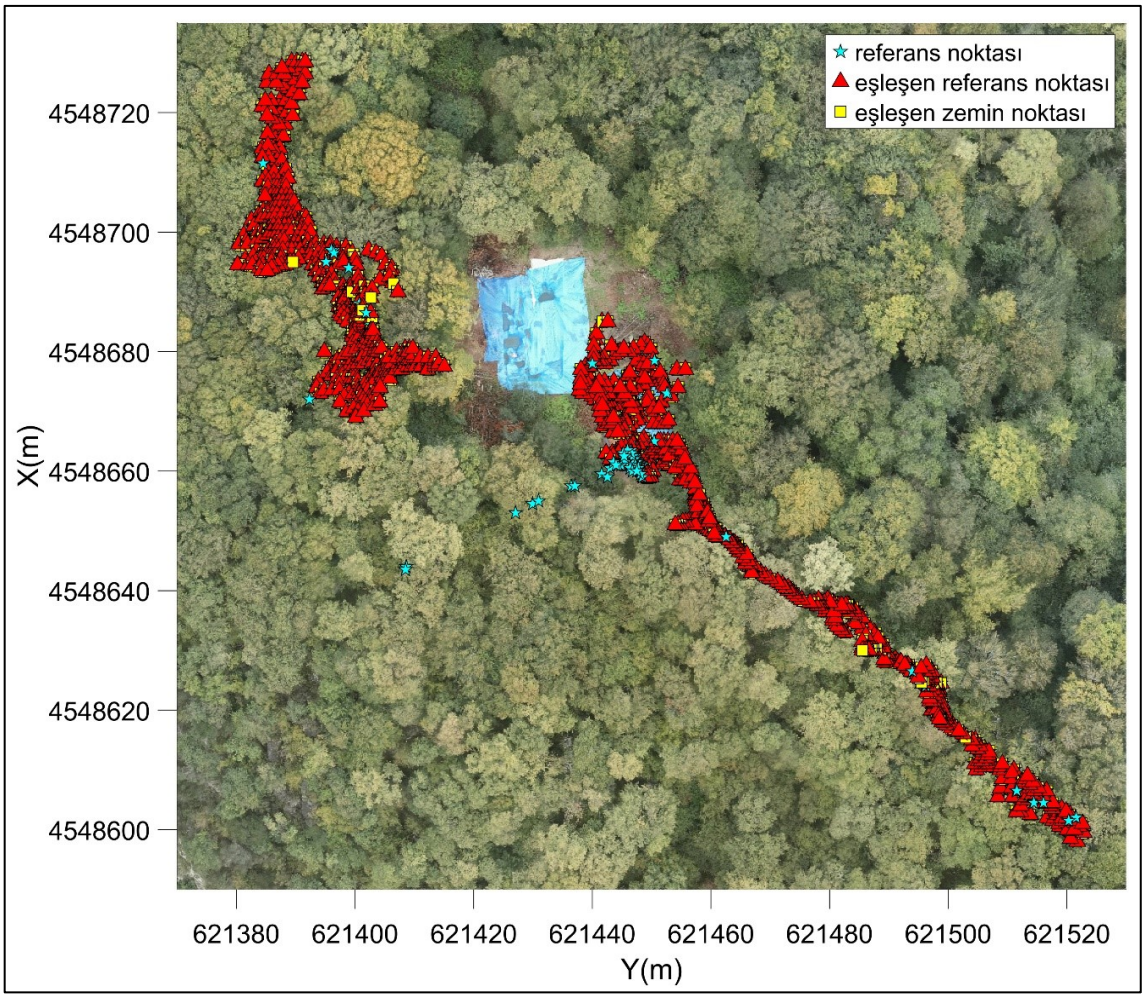
Şekil 55. PTIN birinci denemede üretilen zemin noktaları

Şekil 55'de görüldüğü üzere birinci parametre kombinasyonu ile üretilen veride zemin noktası genel olarak düzenli dağılıma sahiptir. Bu denemede kayalık kısım, CSF denemelerine göre daha iyi bir şekilde ortaya çıkarılmış ve zemin noktası olarak etiketlenmiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 56'da sunulmaktadır.



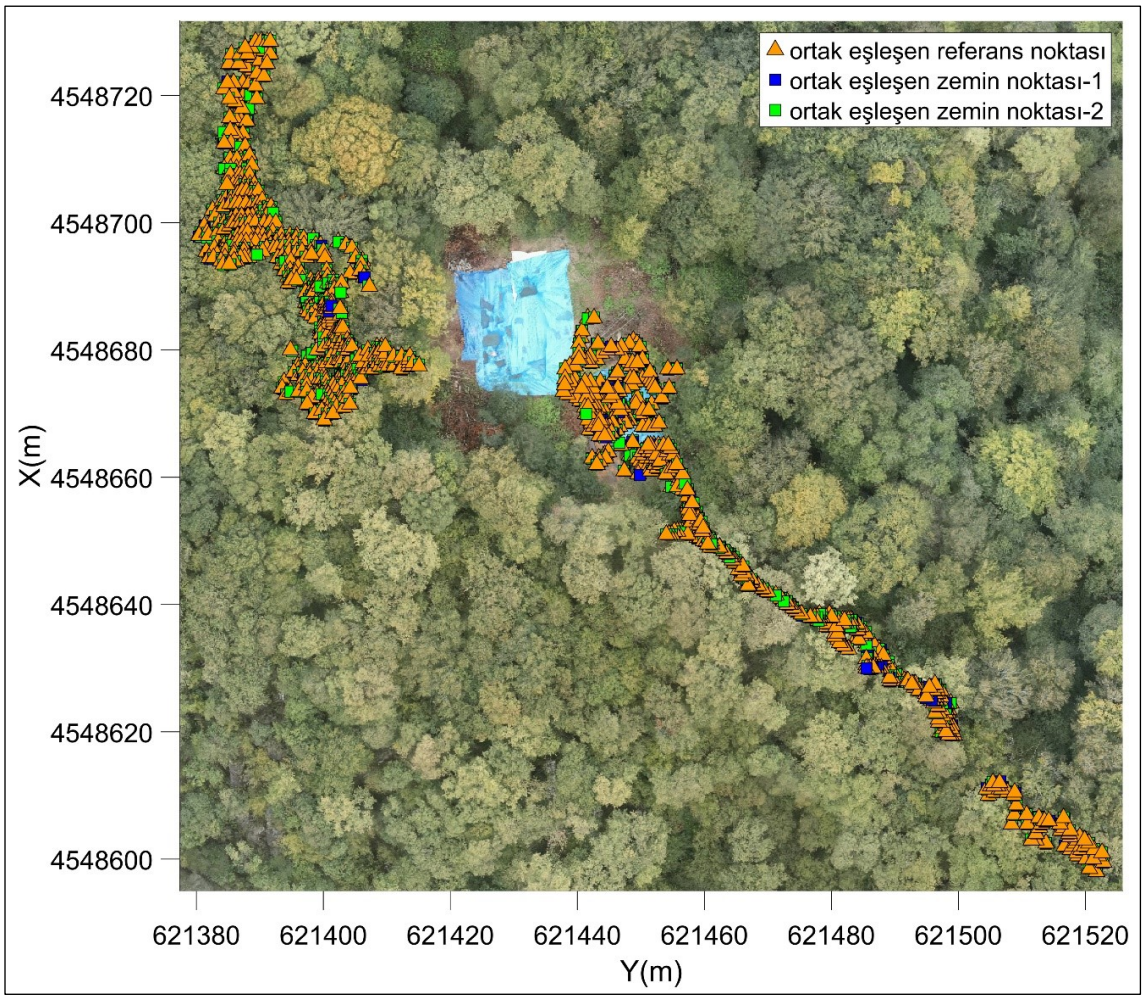
Şekil 56. PTIN birinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Şekil 56'da görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1073 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece birinci denemede 1073 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 57). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1073 adet Doğru Pozitif (DP) ve 86 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %96,15 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1073 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 12 cm'lik bir fark oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 57. PTIN birinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

PTIN yönteminin birinci denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 1009 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 58). Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, PTIN yöntemi ile 17,1 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,5 cm fark değerine ulaşılmıştır. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise fark değerleri sırasıyla 12 cm ve 7,6 cm olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 1009 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, PTIN yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 58. PTIN birinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

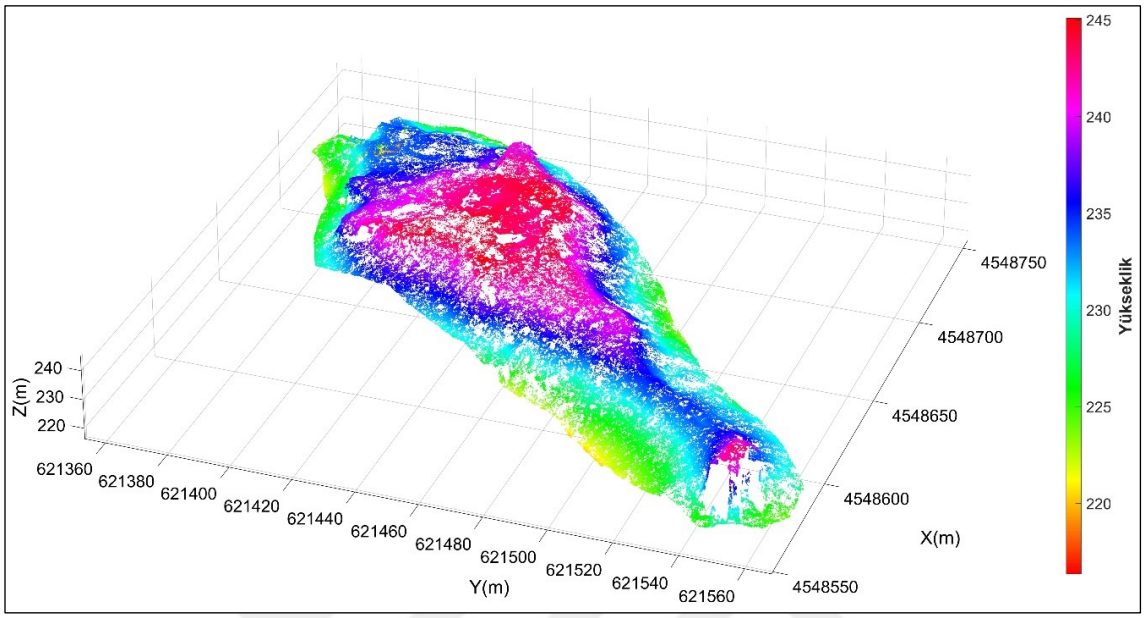
Şekil 58'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla PTIN ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

3.3.2. PTIN İkinci Deneme Sonuçları

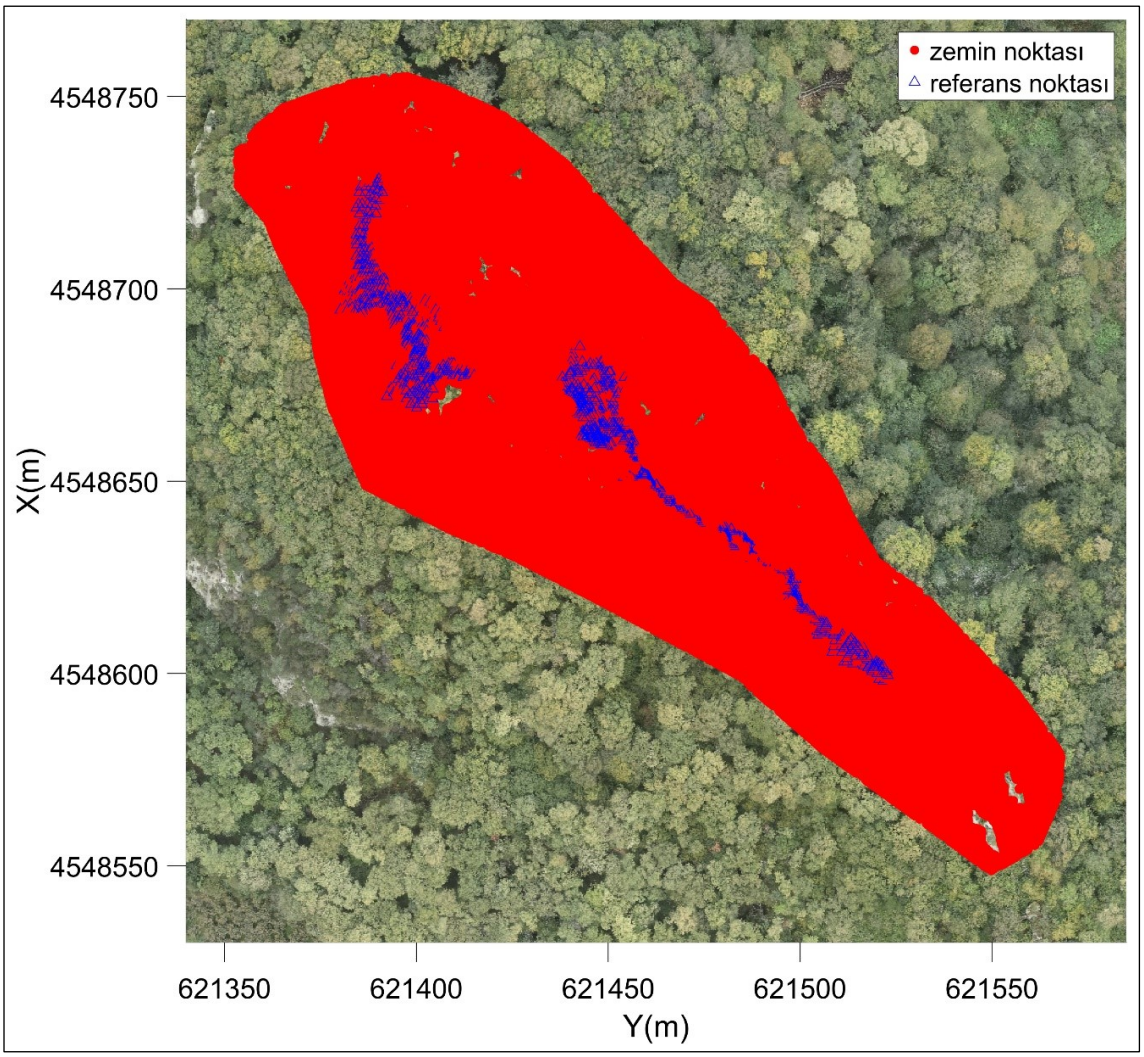
PTIN ikinci denemede *lasground.new* modülü içerisinde yer alan "*Nature*" ve "*Hyper*" parametreleri seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 59'da sunulmaktadır. Üretilen zemin nokta sayısı 1.708.349 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 402 adet nokta düşmektedir.

Şekil 59'da görüldüğü üzere ikinci parametre kombinasyonu ile üretilen veride zemin noktası birinci denemede olduğu gibi genel olarak düzenli dağılıma sahiptir. Bu denemede kayalık kısım, CSF denemelerine göre daha iyi bir şekilde ortaya çıkarılmış ve

zemin noktası olarak etiketlenmiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 60'da sunulmaktadır.

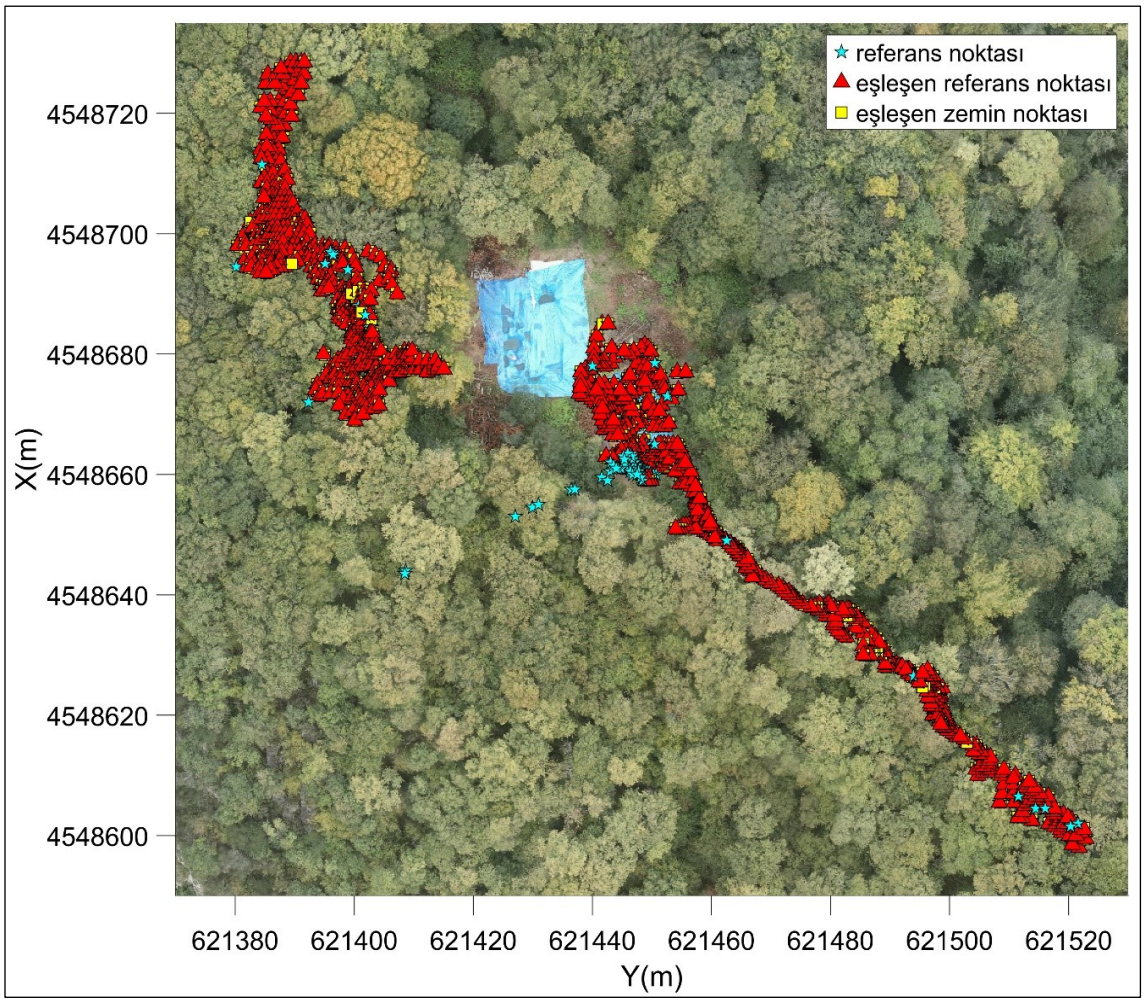


Şekil 59. PTIN ikinci denemede üretilen zemin noktaları



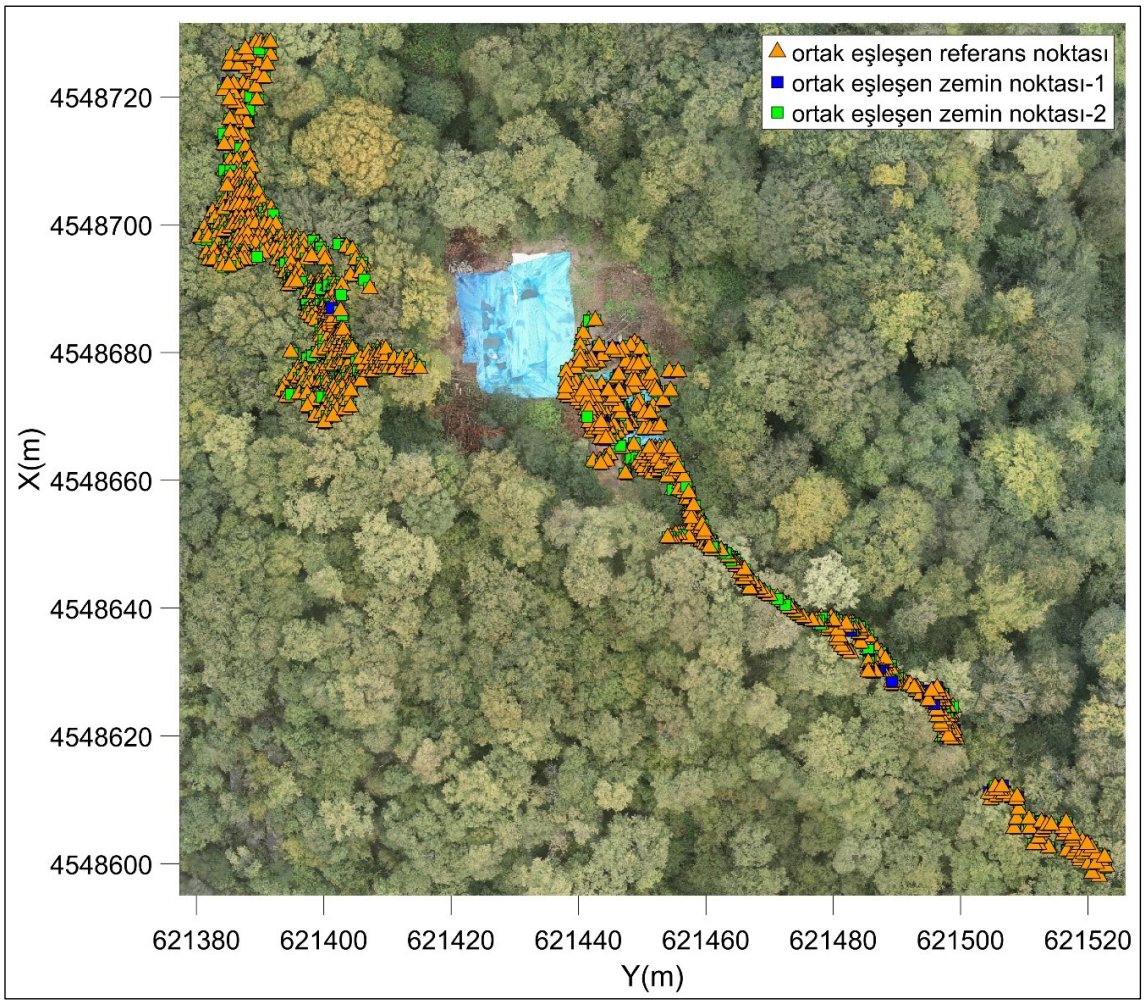
Şekil 60. PTIN ikinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

Şekil 60'da görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1068 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece beşinci denemede 1068 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 61). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1068 adet Doğru Pozitif (DP) ve 91 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %95,91 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1068 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 12,2 cm'lik bir fark oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 61. PTIN ikinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

PTIN yönteminin ikinci denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 1008 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 62). Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, PTIN yöntemi ile 17,2 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,5 cm fark değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise ortalama fark değerleri sırasıyla 12,2 cm ve 7,6 cm olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 1008 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, PTIN yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre yine daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca birinci deneme ile elde edilen performansın çok küçük gerisinde kaldığı değerlendirilmektedir.

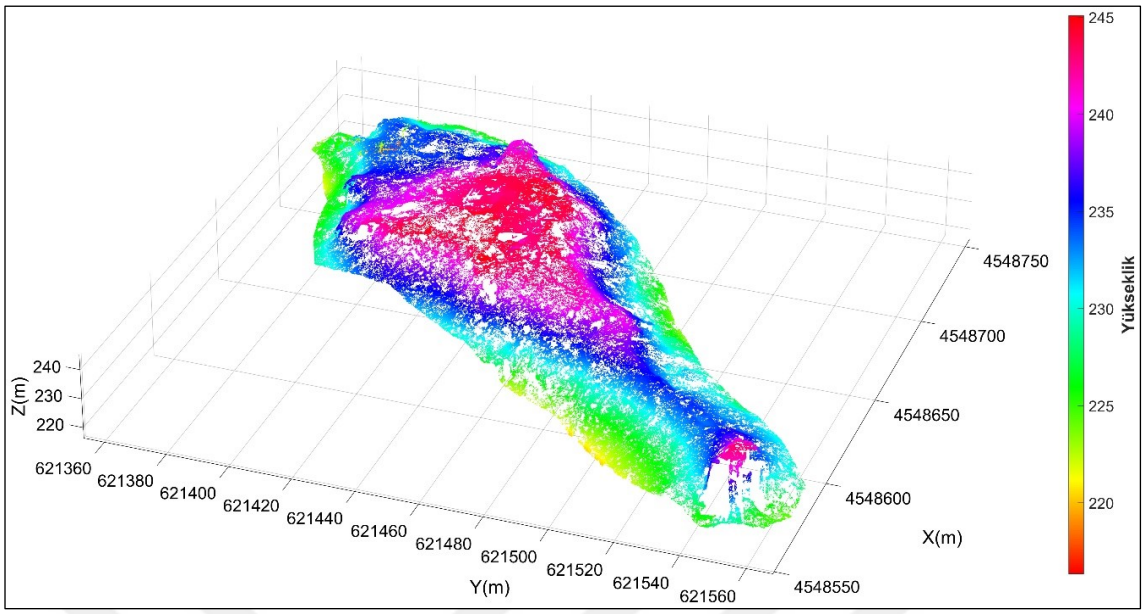


Şekil 62. PTIN ikinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 62'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla PTIN ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

3.3.3. PTIN Üçüncü Deneme Sonuçları

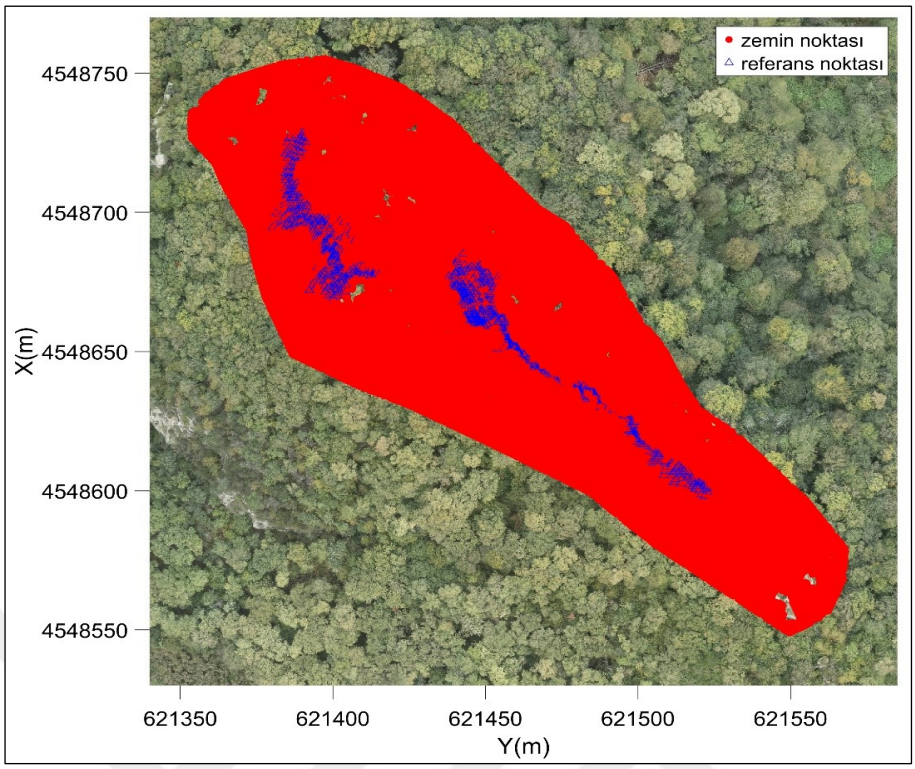
Üçüncü denemede *lasground.new* modülü içerisinde yer alan "*Nature*" ve "*Ultra*" parametreleri seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 63'de gösterilmektedir. Üretilen zemin nokta sayısı 1.728.639 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 402 adet nokta düşmektedir.



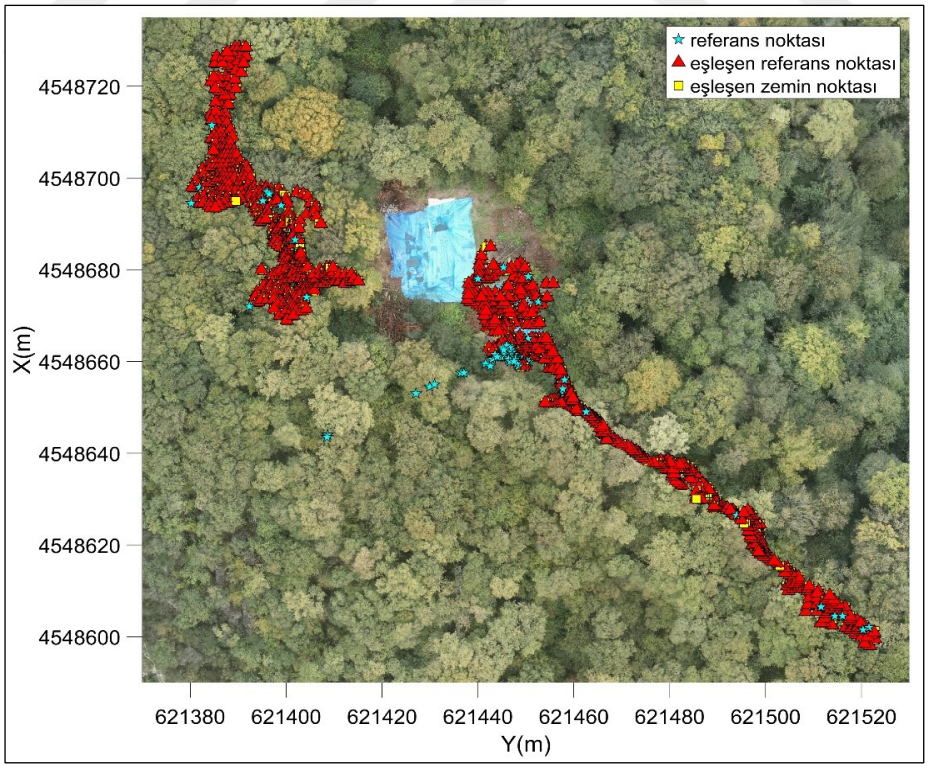
Şekil 63. PTIN üçüncü denemede üretilen zemin noktaları

Şekil 63'te görüldüğü üzere üçüncü parametre kombinasyonu ile üretilen veride zemin noktası birinci denemede olduğu gibi genel olarak düzenli dağılıma sahiptir. Bu denemede de kayalık kısım, iyi bir şekilde ortaya çıkarılmış ve zemin noktası olarak etiketlenmiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 64'te sunulmaktadır.

Şekil 64'te görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1063 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece beşinci denemede 1063 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 65). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1063 adet Doğru Pozitif (DP) ve 96 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %95,68 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1063 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 12,2 cm'lik bir fark oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum ikinci denemedeki sonuçlar ile yüksek benzerlik göstermektedir.

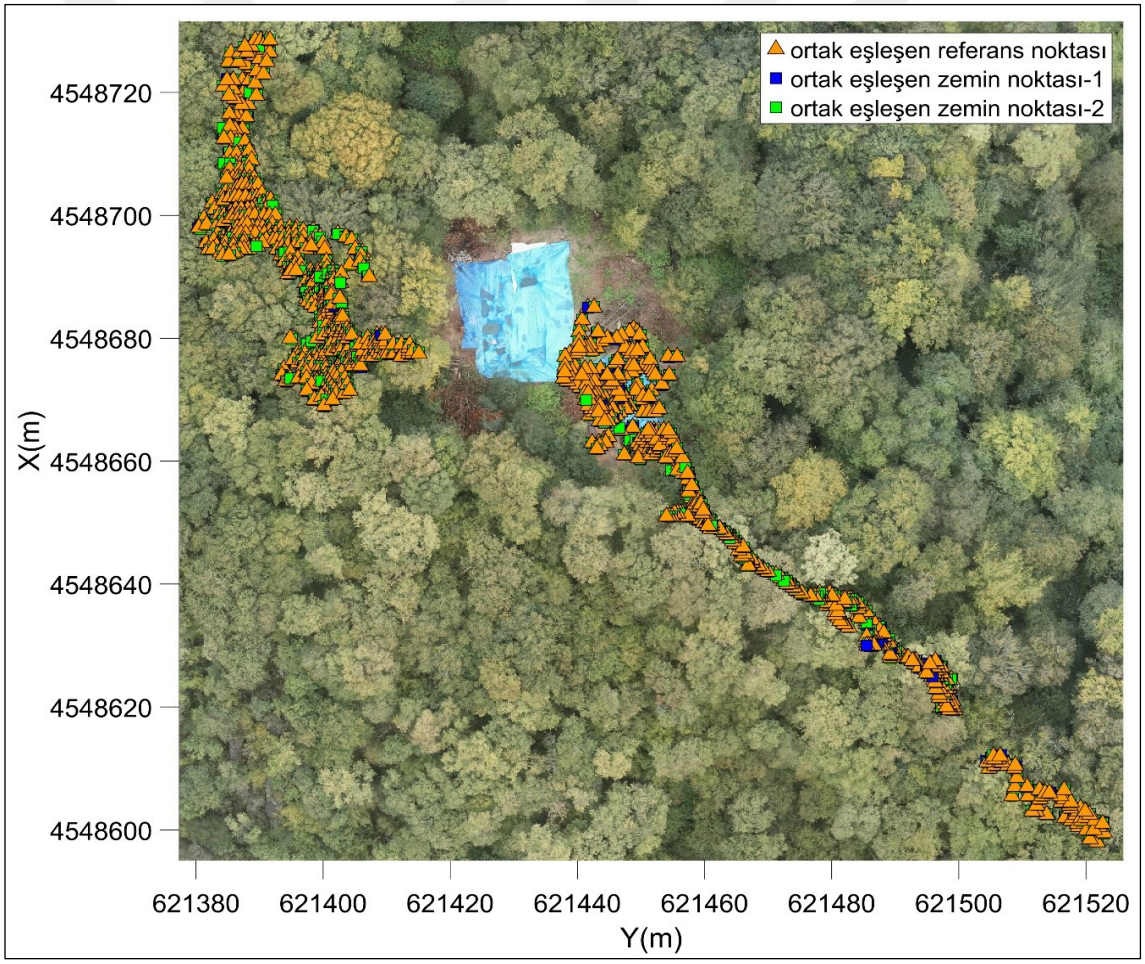


Şekil 64. PTIN üçüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları



Şekil 65. PTIN üçüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

Üçüncü deneme ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 1002 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 66). Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, PTIN yöntemi ile 17,3 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,4 cm fark değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise fark değerleri sırasıyla 12,2 cm ve 7,5 cm olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 1002 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, PTIN yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre yine daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca nicel olarak ilk iki deneme ile elde edilen performansın gerisinde kaldığı tespit edilmiştir.

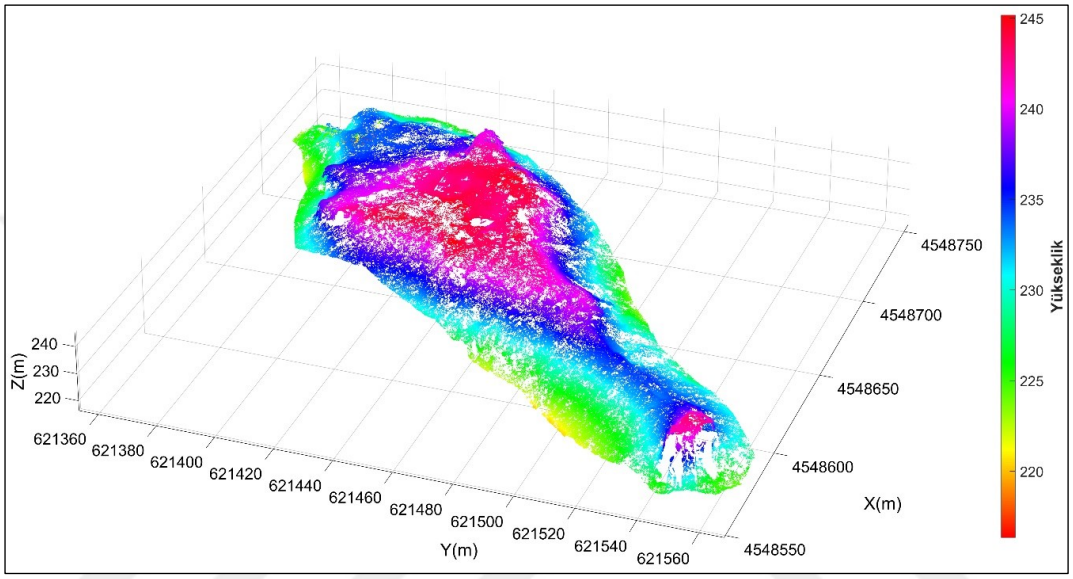


Şekil 66. PTIN üçüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 66'da gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla PTIN ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

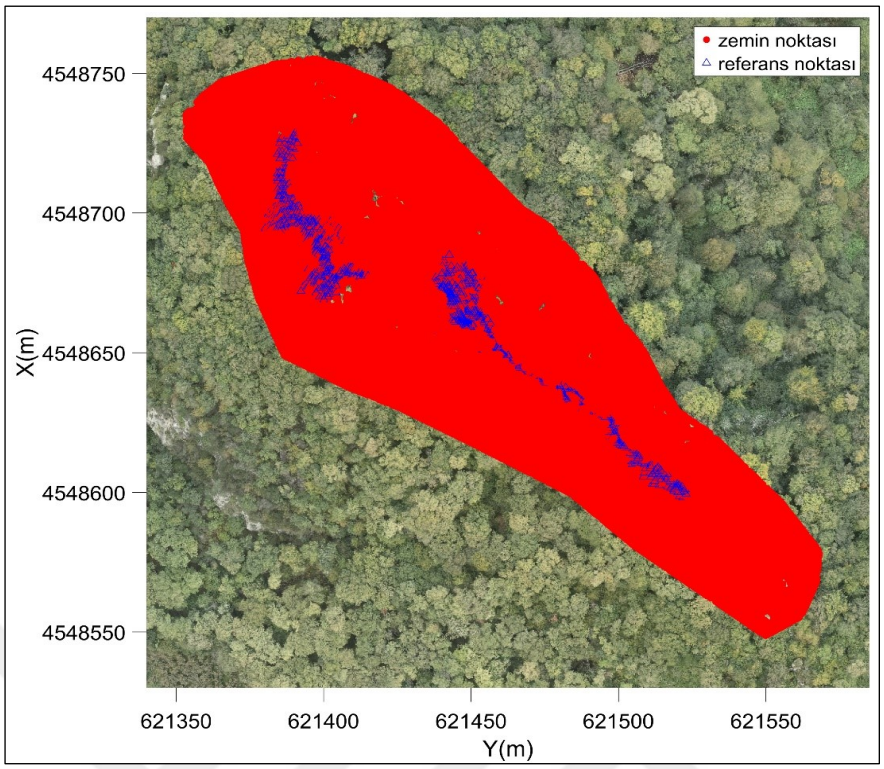
3.3.4. PTIN Dördüncü Deneme Sonuçları

Dördüncü denemede *lasground.new* modülü içerisinde yer alan "*Wilderness*" ve "*Hyper*" parametreleri seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 67'de gösterilmektedir. Üretilen zemin nokta sayısı 1.926.674 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 464 adet nokta düşmektedir.

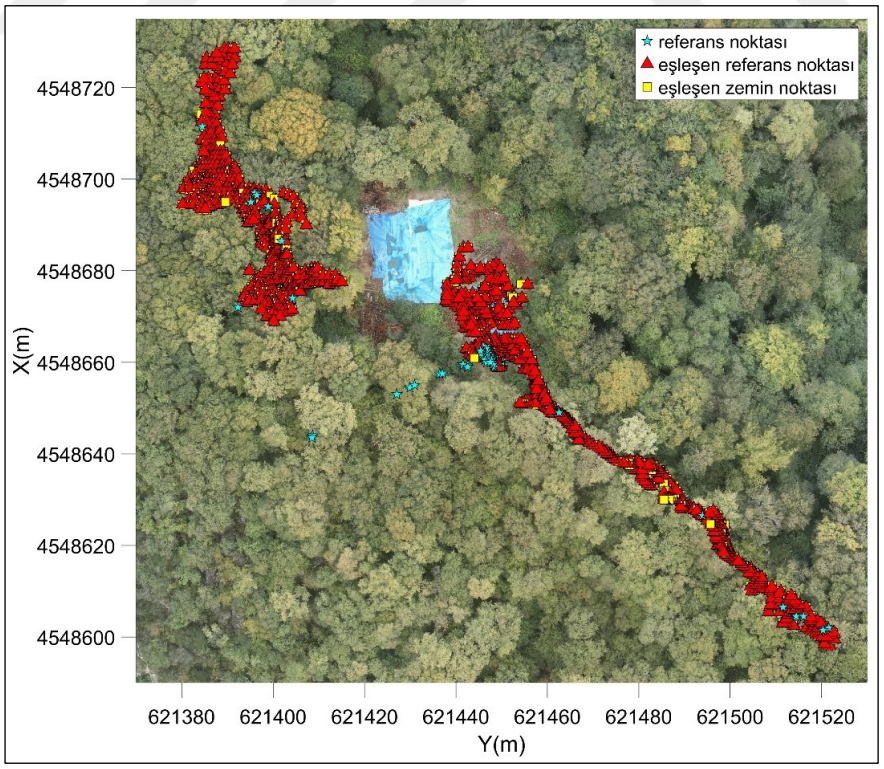


Şekil 67. PTIN Dördüncü denemede üretilen zemin noktaları

Şekil 67'de görüldüğü üzere dördüncü parametre kombinasyonu ile üretilen veride zemin noktası genel olarak düzenli dağılıma sahiptir. Bu denemede de kayalık kısım, iyi bir şekilde ortaya çıkarılmış ve ağaçlık alanlarda zemin nokta sayısının arttığı görülmektedir. Nokta yoğunluğu ilk üç denemeye göre arttığı görülmektedir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 68'de sunulmaktadır. Şekil 68'de görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1087 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece beşinci denemede 1087 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 69). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1087 adet Doğru Pozitif (DP) ve 72 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %96,80 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1087 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 10,9 cm'lik bir fark oluştuğu tespit edilmiştir.

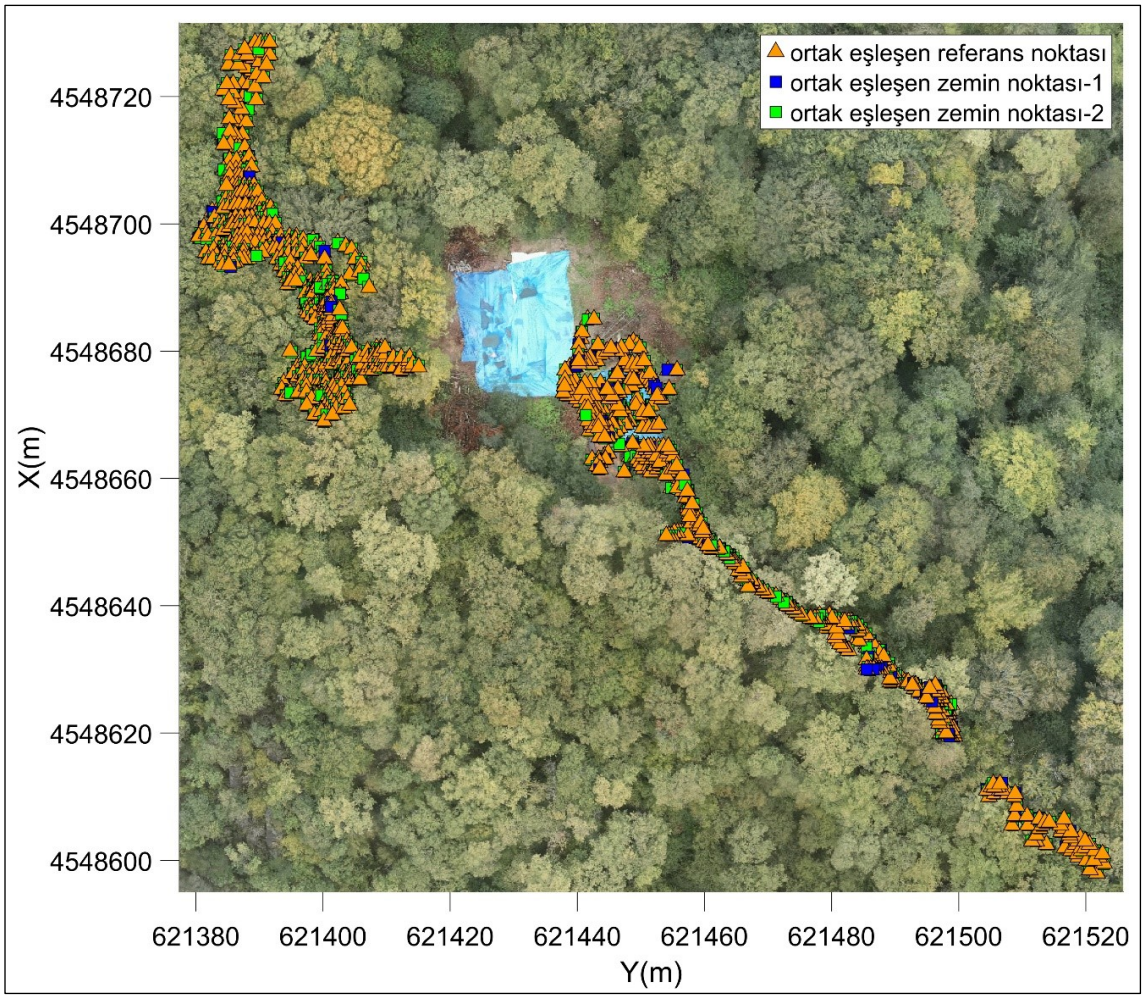


Şekil 68. PTIN dördüncü deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları



Şekil 69. PTIN dördüncü deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi

PTIN yönteminin dördüncü denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 1017 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 70). Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, PTIN yöntemi ile 15 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,7 cm fark değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise fark değerleri sırasıyla 10,7 cm ve 7,5 cm olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 1017 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, PTIN yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre yine daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

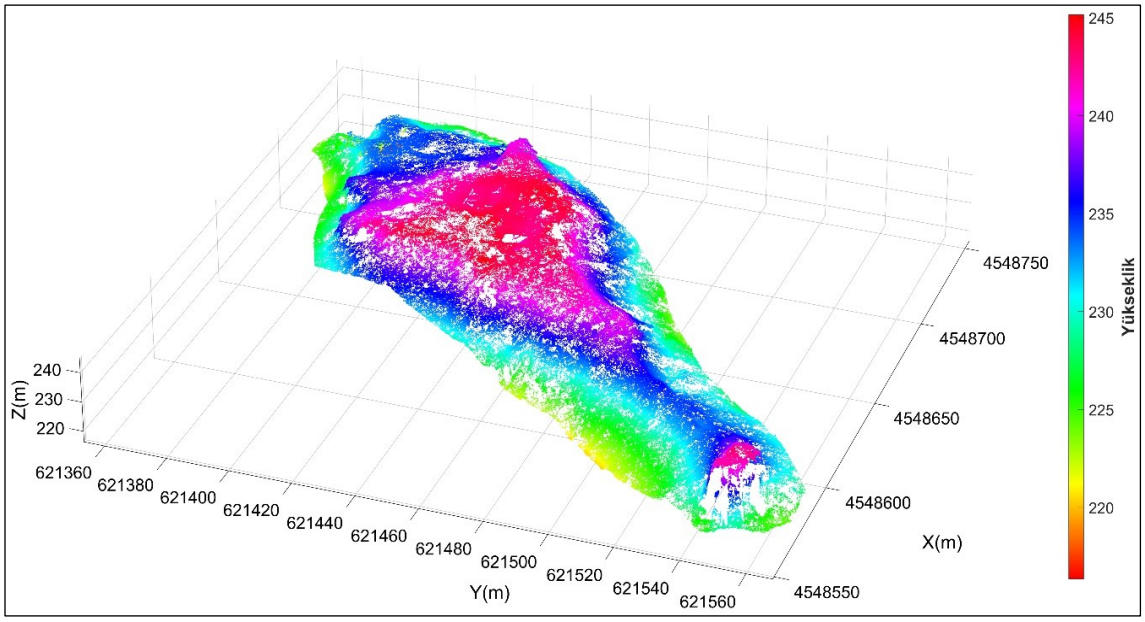


Şekil 70. PTIN dördüncü deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 70'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla PTIN ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir.

3.3.5. PTIN Beşinci Deneme Sonuçları

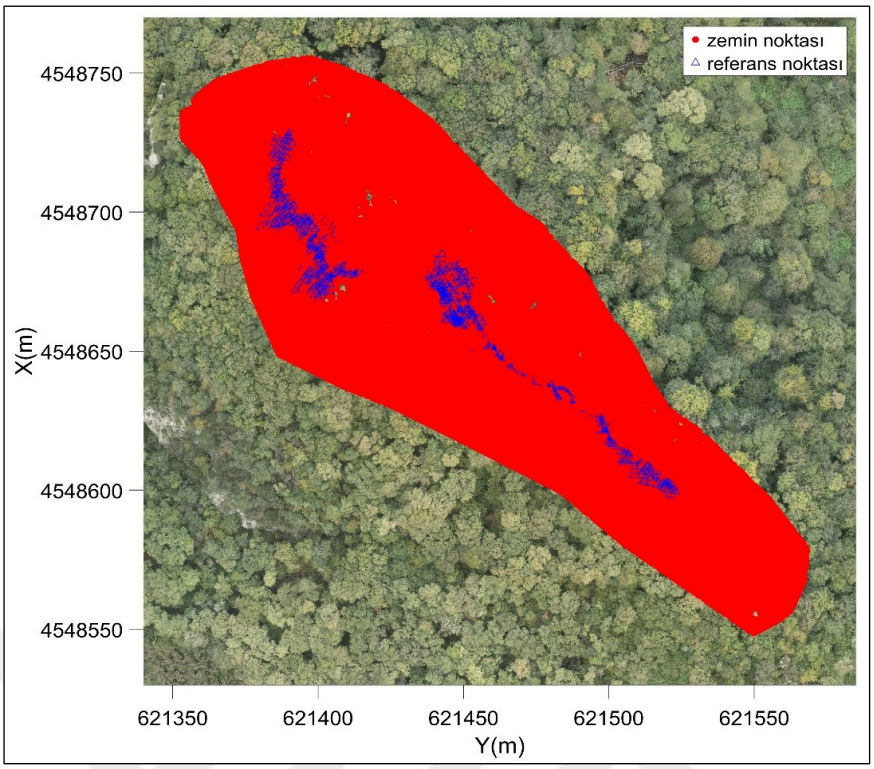
Beşinci denemede *lasground.new* modülü içerisinde yer alan "*Wilderness*" ve "*Ultra*" parametreleri seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen zemin noktaları Şekil 71'de gösterilmektedir. Üretilen zemin nokta sayısı 1.928.356 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 468 adet nokta düşmektedir.



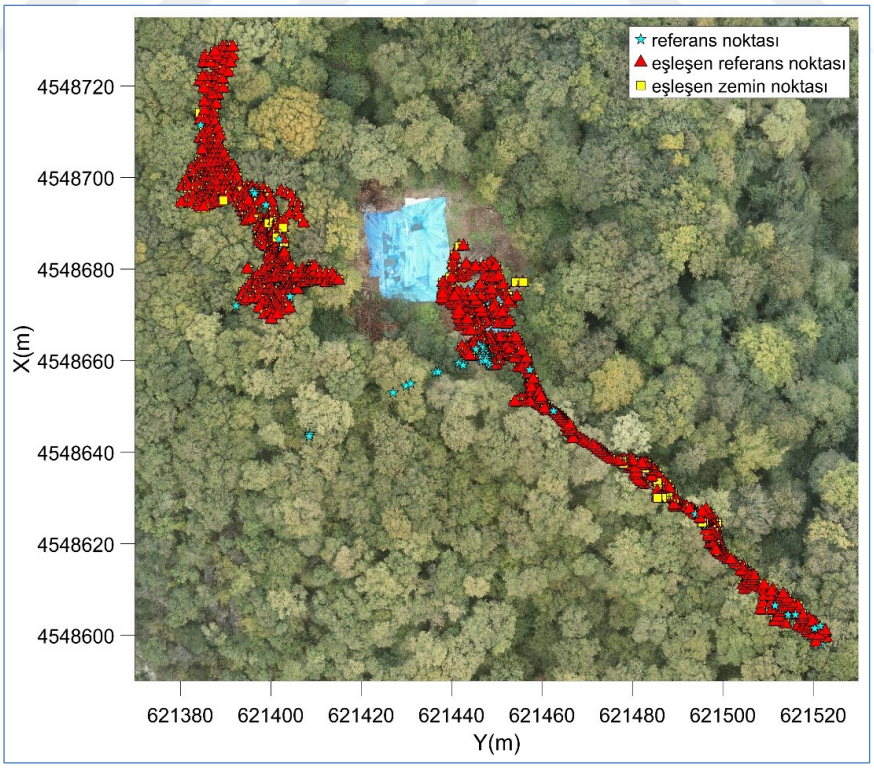
Şekil 71. PTIN beşinci denemede üretilen zemin noktaları

Şekil 71'de görüldüğü üzere beşinci parametre kombinasyonu ile üretilen veride zemin noktası genel olarak düzenli ve daha yoğun dağılıma sahiptir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 72'de sunulmaktadır.

Şekil 72'de görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta yine yüksek düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 1087 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece beşinci denemede 1087 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 73). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 1087 adet Doğru Pozitif (DP) ve 72 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu durumda %96,80 F-Skor değeri ile çok yüksek bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 1087 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 10,9 cm'lik bir fark oluştuğu tespit edilmiştir. Bu filtreleme performansı ile dördüncü deneme ile aynı sonuçları vermektedir.

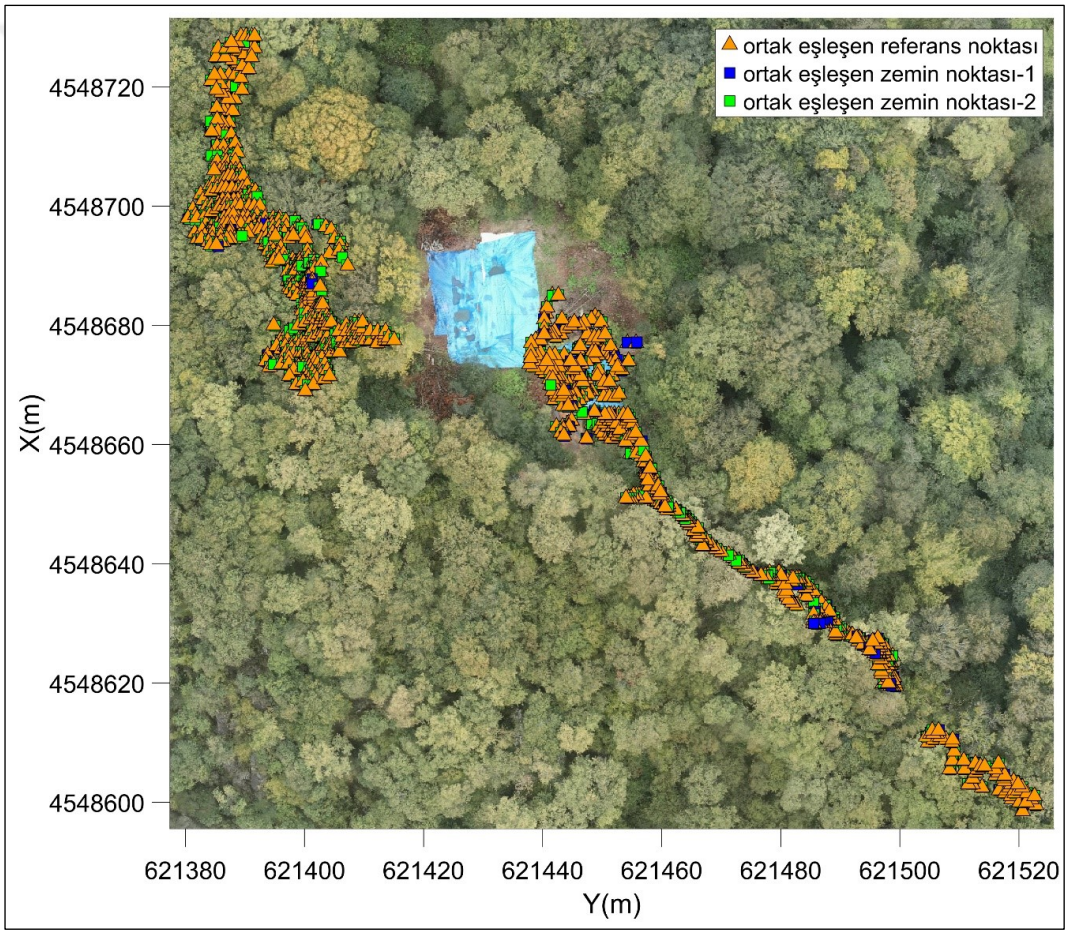


Şekil 72. PTIN beşinci deneme ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları



Şekil 73. PTIN beşinci deneme ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi.

PTIN yönteminin beşinci denemesi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 1017 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 74). Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, PTIN yöntemi ile 15 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 11,7 cm fark değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise fark değerleri sırasıyla 10,7 cm ve 7,5 cm olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 1017 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, PTIN yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre yine daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 74. PTIN beşinci deneme ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar

Şekil 74'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla PTIN ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir. Beş farklı deneme sonucunda üretilen zemin noktalarının performansları ise Tablo 16'da paylaşılmaktadır.

Tablo 16. PTIN yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi

Yöntem	Ortalama Yükseklik Farkı	Eşleşen Nokta Sayısı (DP)	Eşleşmeyen referans nokta (YN)	Eşleşmeyen zemin noktası (DP)	Cr (%)	Cp (%)	F-Skor (%)
PTIN-1	0,120	1073	86	0	100	92,58	96,15
PTIN-2	0,122	1068	91	0	100	92,15	95,91
PTIN-3	0,122	1063	96	0	100	91,72	95,68
PTIN-4	0,109	1087	72	0	100	93,79	96,80
PTIN-5	0,109	1087	72	0	100	93,79	96,80
DJI	0,078	1023	136	**0**	100	88,26	93,76

Tablo 16'da yer alan nicel sonuçlara göre PTIN yönteminin zemin gerçeği verisine göre ortalama yükseklik farkı 11,6 cm olarak tespit edilmiştir. Beş deneme sonucunda ortalama 1076 adet referans nokta, elde edilen zemin noktaları ile 50 cm eşik mesafesine göre doğru eşleştiği hesaplanmıştır. Bu durum ortalama olarak yaklaşık %93 referans noktasının DP olarak etiketlenmesini sağlamıştır. Eşleşmeyen referans noktalarına bakıldığında 5 adet deneme sonucunda ortalama 83 adet YN etiketli nokta üretilmektedir. Tüm parametre kombinasyonları değerlendirildiğinde obje tabanlı olarak ortalama %96,27 F-skor değerine ulaşılmıştır. En yüksek nicel doğruluk değeri +%3'lük bir iyileştirme ile PTIN-4 ve PTIN-5 denemesinde gerçekleşmiştir. En kötü sonuç ise %95,68 ile PTIN-3'te gerçekleşmiştir. PTIN denemeleri DJI Terra tarafından üretilen zemin noktalarına göre daha iyi nicel sonuç üretmiştir. Ayrıca tüm denemelerde kayalık alanla ilgili doğru filtreleme yapabilen en iyi metod olarak değerlendirilmektedir. PTIN algoritması mavi brandalı alanları ise CSF kadar iyi bir şekilde zemin olarak çıkaramamasına rağmen obje tabanlı doğruluk analizinde en yüksek ortalama F-skor değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

PTIN denemelerinin DJI terra programındaki zemin filtreleme algoritması ile karşılaştırılması Tablo 17'de özetlenmiştir. Değerlendirme için hem PTIN hemde DJI Terra programında eşleşen ortak referans noktalar baz alınmıştır.

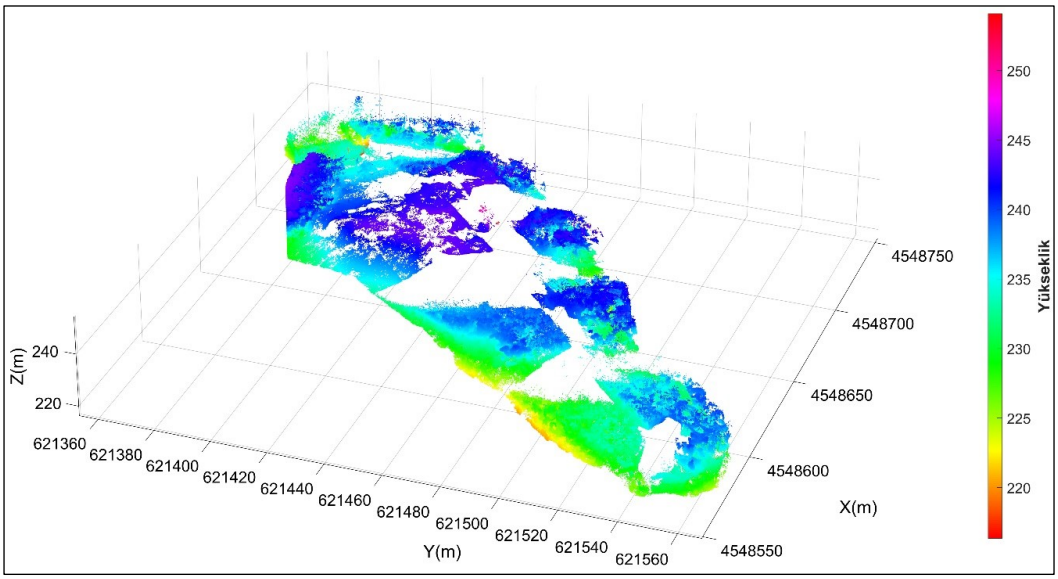
Tablo 17. PTIN yöntemi ortak referans noktalarına göre doğrulukların değerlendirilmesi

Yöntem	Ortak Nokta Sayısı	Öklid mesafe Ortalaması (m)	DJI Öklid Mesafe Ortalaması (m)	Yükseklik Farkı Ortalaması (m)	DJI Yükseklik Farkı Ortalaması (m)
PTIN-1	1009	0,171	0,115	0,12	0,076
PTIN -2	1008	0,172	0,115	0,122	0,076
PTIN -3	1002	0,173	0,114	0,122	0,075
PTIN -4	1017	0,15	0,117	0,107	0,077
PTIN -5	1014	0,151	0,116	0,107	0,076
Ortalama	1010	0,163	0,115	0,116	0,076

Beş farklı deneme sonucunda, PTIN ve DJI Terra yöntemleri arasında ortalama 1010 ortak referans noktasının eşleştiği belirlenmiştir. 3B Öklid mesafe farkı açısından, PTIN yöntemi için ortalama 16,3 cm, DJI Terra yöntemi için ise 11,5 cm olarak hesaplanmıştır. Yalnızca yükseklik koordinatı dikkate alındığında, bu farklar sırasıyla 11,6 cm ve 7,6 cm olarak belirlenmiştir. Tablo 17'de sunulan analiz, ortak referans noktaları temel alınarak yapıldığı için, her iki yöntemin de DP olarak eşleştirilen zemin noktalarını ne ölçüde doğru tespit edebildiğini göstermektedir. Genel olarak, obje tabanlı doğruluk analizinde DJI Terra'ya kıyasla daha iyi performans sergileyen PTIN yöntemi, ortak referans noktalarına dayalı fark analizinde birkaç santimetre daha yüksek değerler üretmiştir. Bunun temel nedeni, PTIN yönteminin nispeten düşük nokta yoğunluğuna ve homojen bir dağılıma sahip olması nedeniyle referans veri ile kıyaslandığında ortalama fark değerlerinin diğer algoritmalara göre daha yüksek çıkmasıdır. Ancak, nokta sayısı ve yoğunluğu düşük olmasına rağmen, tüm denemelerde kayalık alanları zemin olarak algılama konusunda tutarlı ve başarılı bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

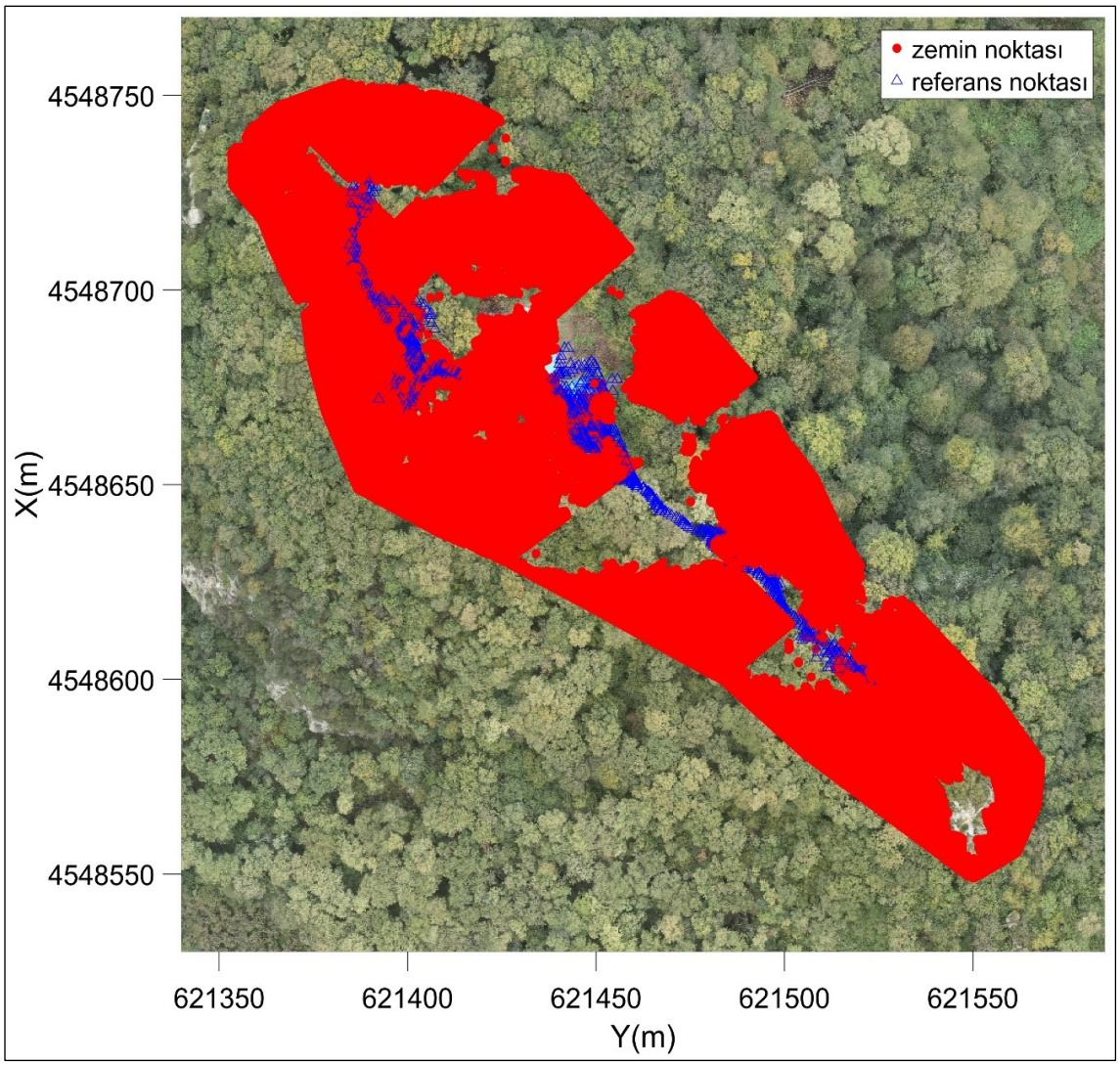
3.4. DVM Çıktıları

Destek Vektör Makinesi kullanılarak yapılan filtreleme işleminde üretilen zemin nokta sayısı 4.457.702 olup bu modelde m^2'ye yaklaşık olarak 616 adet nokta düşmektedir (Şekil 75).



Şekil 75. DVM üretilen zemin noktaları

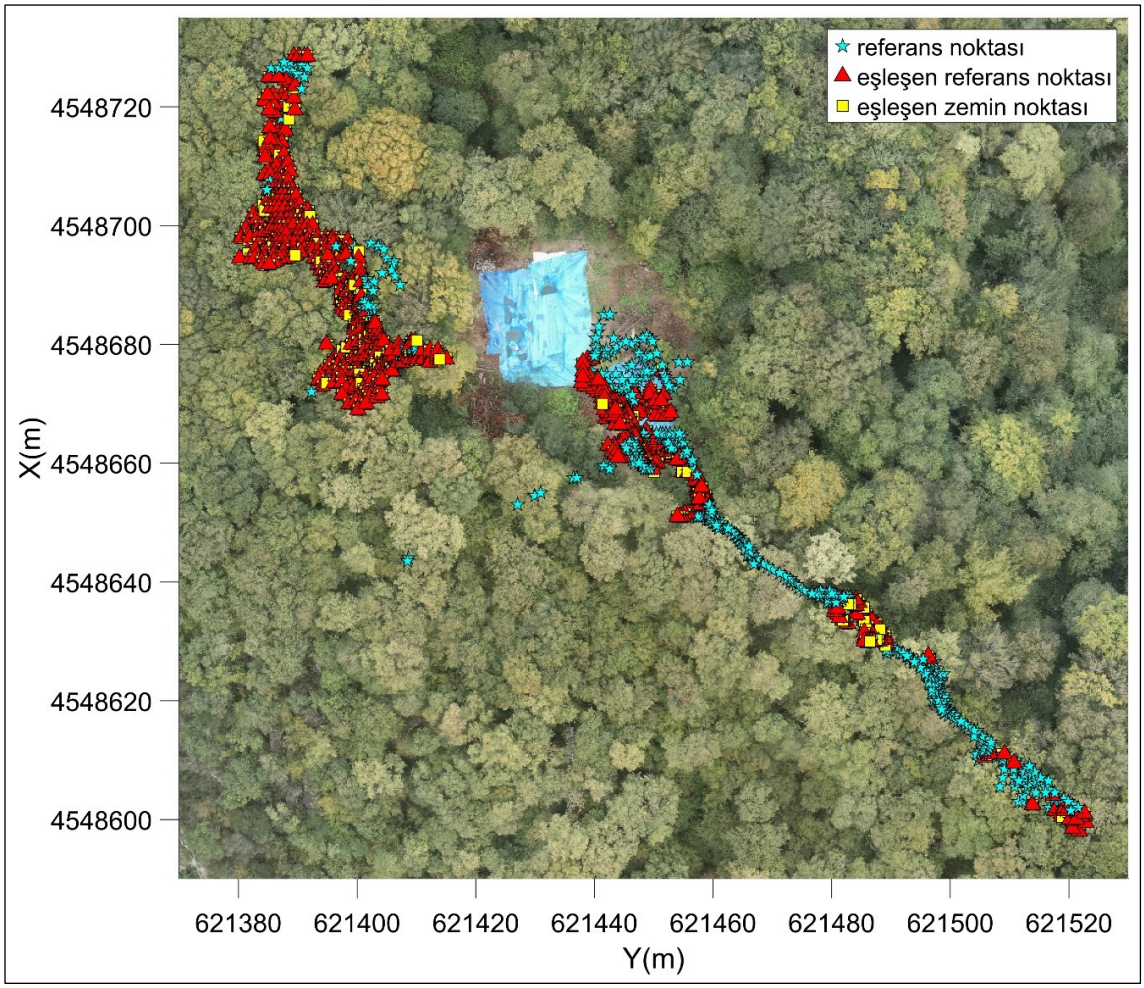
Şekil 75'de görüldüğü üzere üretilen veride zemin noktası genel olarak düzensiz nokta dağılımına sahiptir. Ham veri 10 blok halinde eğitime girdiği için birçok bölgede zemin noktasını tespit edememiştir. Referans noktalarının üretilen zemin nokta bulutu üzerinde görselleştirilmesi ise Şekil 76'da sunulmaktadır.



Şekil 76. DVM ile üretilen zemin noktaları ve referans zemin noktaları

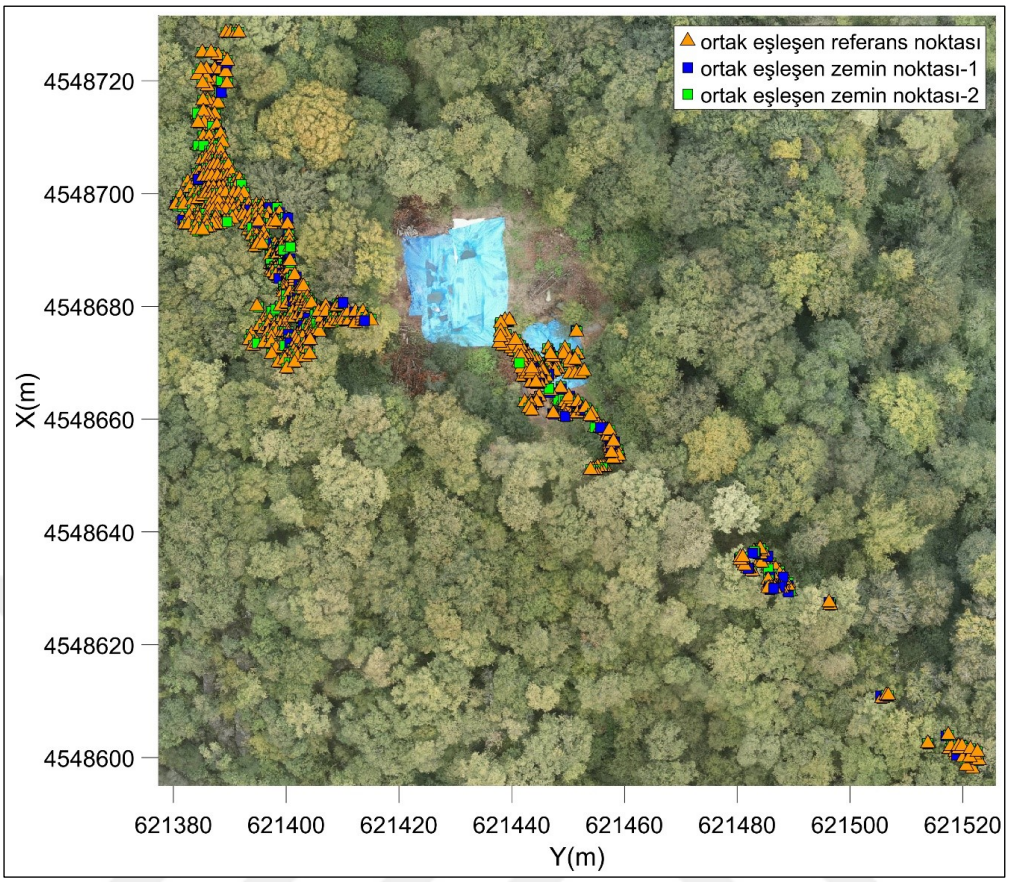
Şekil 76'dan görülebileceği üzere 1159 adet referans nokta düşük düzeyde örtüşmektedir. 3B öklid mesafesi baz alınarak 672 adet 50 cm eşik değerinden küçük olan zemin noktası tespit edilmiştir. Böylece 672 adet referans noktanın zemin noktası ile eşleşebildiği ortaya konulmuştur (Şekil 77). Değerlendirme ölçütü için obje tabanlı doğruluk analizi yöntemi esas alındığında, zemin gerçeği verisine göre 672 adet Doğru Pozitif (DP) ve 487 adet Yanlış Negatif (YN) etiketli zemin noktası üretilmiştir. Bu

durumda %73,40 F-Skor değeri ile düşük bir zemin filtreleme performansına sahip olduğu değerlendirilmiştir. Eşleşen 672 adet zemin ve referans noktaların yükseklik değerleri karşılaştırıldığında ise ortalama 7,7 cm'lik bir fark oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 77. DVM ile üretilen zemin noktalarının referans noktalar ile eşleştirilmesi.

DVM yöntemi ile DJI Terra tarafından üretilen zemin noktaları karşılaştırıldığında, her iki yöntemde de ortak olarak eşleşen 640 referans noktası tespit edilmiştir (Şekil 78). Ortak referans noktaları için hesaplanan 3B Öklid mesafeleri incelendiğinde, DVM yöntemi ile 14,9 cm, DJI Terra yöntemi ile ise 10,9 cm fark değerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Karşılaştırma yalnızca yükseklik bileşeni üzerinden yapıldığında ise fark değerleri sırasıyla 7,3 cm ve 6,8 cm olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen nicel sonuçlar, ortak olarak tespit edilen 640 referans noktasına dayalı olarak değerlendirildiğinde, SVM yönteminin zemin filtreleme performansının DJI Terra'ya göre daha düşük doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 78. DVM ile DJI Terra tarafından ortak referans noktası ile eşleşen noktalar.

Şekil 78'de gösterilen mavi ve yeşil renkli noktalar sırasıyla DVM ve DJI Terra tarafından ortak eşleşen zemin noktalarını temsil etmektedir. Destek vektör makinesi ile yapılan obje tabanlı doğruluk analizi Tablo 18'de özetlenmiştir.

Tablo 18. DVM yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi

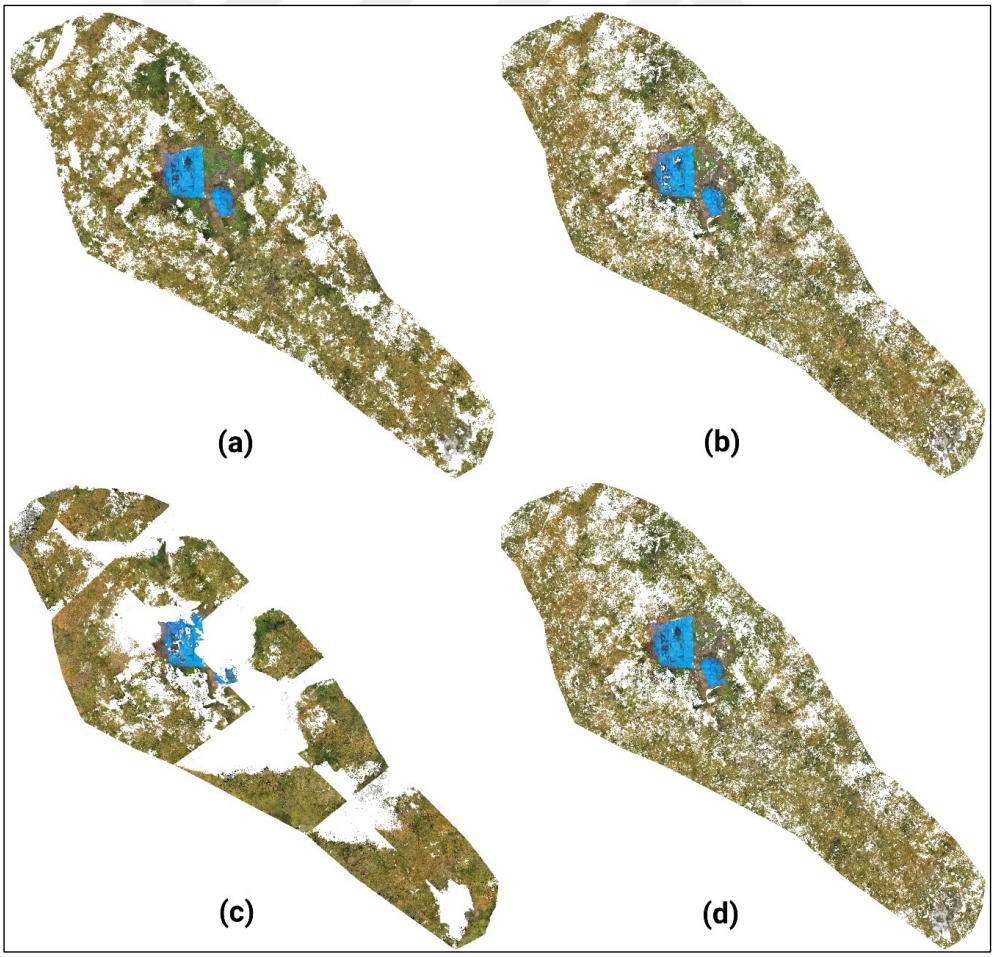
Yöntem	Ortalama Yükseklik Farkı	Eşleşen Nokta Sayısı (DP)	Eşleşmeyen referans nokta (YN)	Eşleşmeyen zemin noktası (DP)	Cr (%)	Cp (%)	F-Skor (%)
DVM	0,077	672	487	0	100	57,98	73,40
DJI	0,078	1023	136	**0**	100	88,26	93,76

Tablo 18'de yer alan nicel sonuçlara göre DVM zemin gerçeği verisine göre ortalama yükseklik farkı 7,7 cm olarak tespit edilmiştir. 672 adet referans nokta, elde edilen zemin noktaları ile 50 cm eşik mesafesine göre doğru eşleştiği hesaplanmıştır. Bu durum ortalama olarak yaklaşık %58 referans noktasının DP olarak etiketlenmesini sağlamıştır. Eşleşmeyen referans noktalarına bakıldığında 487 adet YN etiketli nokta

üretilmektedir. Obje tabanlı olarak %73,40 F-skor değerine ulaşılmıştır. DVM yöntemi DJI Terra'nın yöntemine göre %20 daha düşük performans sergilemiştir.

3.5. Zemin Filtreleme Performanslarının İrdelenmesi

Tez çalışması kapsamında ele alınan CSF, PTIN ve DVM yöntemleri, görsel ve nicel değerlendirmeler doğrultusunda karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin nicel karşılaştırılmasında öncellikle referans zemin verisine en yakın sayıda zemin noktası bulunma durumu obje tabanlı doğruluk analizi (F-skor) ile kritik edilmiş, ardından kıyaslanan yöntemlerin tespit ettiği ortak zemin noktaları ile referans verisi arasındaki yükseklik farkları irdelenmiştir. En iyi sonuçları veren yöntem kombinasyonları, iki boyutlu olarak Şekil 79'da sunulmaktadır. Ayrıca görsel karşılaştırmayı kuvvetlendirebilmek için üç boyutlu görseller Şekil 80'de verilmektedir.



Şekil 79. Zemin filtreleme sonuçlarının iki boyutlu karşılaştırılması: a) CSF, b) PTIN, c) DVM ve d) PTIN+CSF.

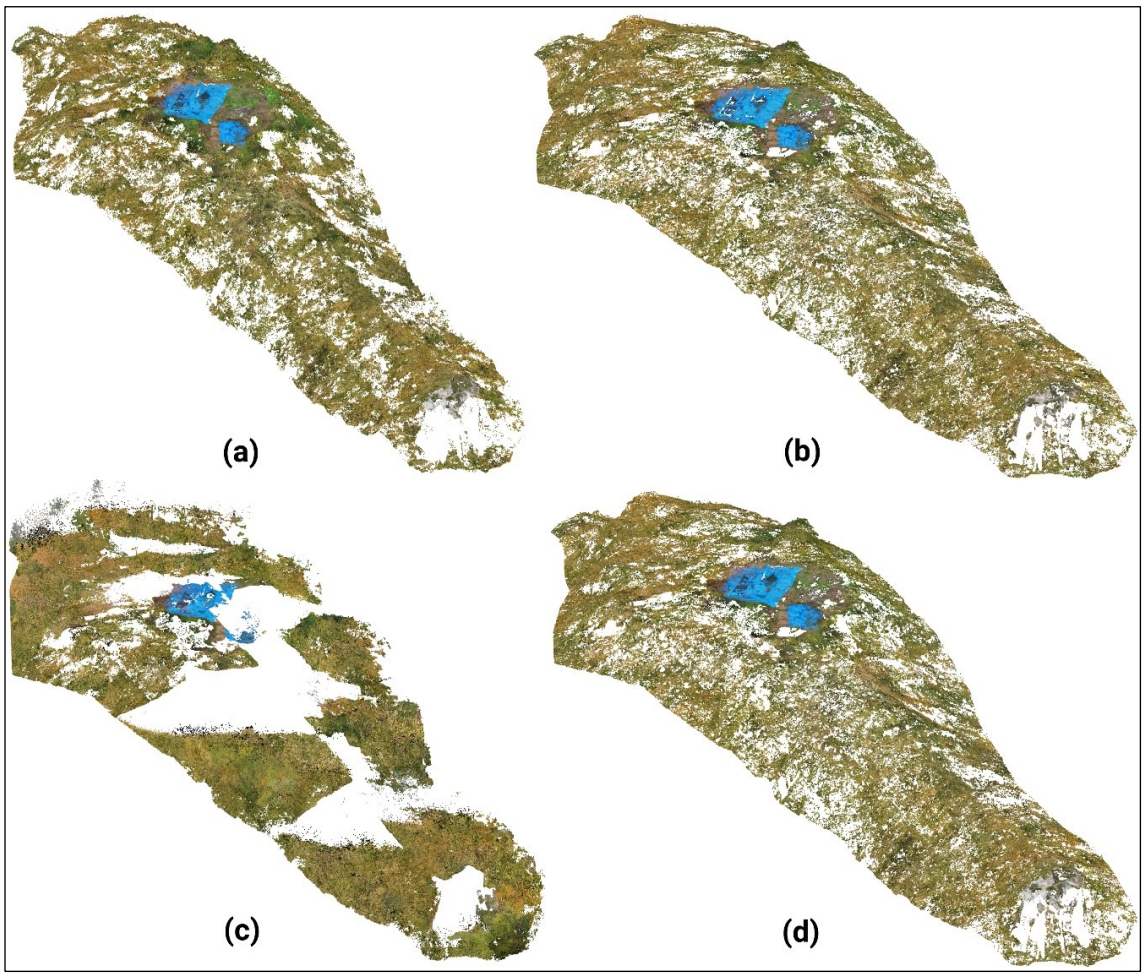
Şekil 79a'da gösterilen filtreleme sonucu CSF-5 denemesi ile üretilen zemin noktalarını temsil etmektedir. Genel olarak mavi brandalı alanı ve kayalık alanı iyi derecede ortaya çıkarabildiği gözlemlenmektedir. CSF yönteminde genel olarak zemin nokta sayısının fazla çıktığı ve özelliklede bazı bölgelerde bitki örtüsünü istenilen düzeyde çıkaramadığı tespit edilmiştir. Zemin nokta sayısı fazla olduğu için referans verilerle kıyaslama yaparken 50 cm mesafe eşik değeri içerisinde çok daha yakın noktalar üretebilmektedir. Böylece hesaplanan fark değeri diğer yöntemlere göre daha düşük çıkmaktadır.

Şekil 79b'de gösterilen zemin filtreleme sonucu PTIN-5 kombinasyonu ile üretilmiştir. Gerek nicel gerekse de kayalık bölgedeki zemin çıkarma performansı nedeniyle seçilen zemin noktaları genel anlamıyla homojen şekilde dağılım göstermektedir. PTIN yöntemiyle elde edilen bulgular CSF algoritmasına göre çok daha az zemin noktası içerse de bitki örtüsü üzerindeki filtreleme performansı PTIN yöntemini öne çıkarmaktadır. Ancak mavi branda ile kaplı alanda CSF kadar doğru bir zemin çıkarımı gerçekleştirememiştir.

Şekil 79c'de gösterilen filtreleme sonucu ise DVM ile üretilen zemin noktalarını temsil etmektedir. Şekil üzerinden görülebileceği üzere seçilen hiperparametreler birçok zemin üstü noktayı, zemin noktası olarak yanlış bir şekilde filtrelemiştir. Özellikle 10 parça halinde eğitime dahil edilen ham veri, parçaların sınırlarına yakın yerlerde hiçbir zemin noktası tespit edememiştir. Makine öğrenme tekniği ile üretilen zemin noktaları seçilen hiperparametre değerlerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca eğitim için verisetinin az olması sebebiyle istenilen düzeyde başarı elde edilememiştir. Hem nitel hem de nicel değerlendirme yapıldığında tez kapsamında en düşük performansı DVM göstermiştir.

Genel olarak yorumlandığında bu üç algoritma/yöntem ile elde edilen sonuçlar arazi türüne, eğime, veri setine, parametre seçimine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Tez çalışması kapsamında yersel olarak elde edilen referans zemin noktaları genel olarak mavi brandanın iç kısmına ve kayalık alana isabet etmemiştir. Bu durum zemin çıkarma performansını nicel olarak etkilemese de arazi keşfi ile edilen tecrübe ile ilgili alanların doğru bir şekilde ortaya çıkarılması ve arazi modelinin oluşturulması önem arz etmektedir. Bu yüzden tez kapsamı içerisinde bitki örtüsünü en iyi çıkaran PTIN ve mavi brandalı alanları en iyi çıkaran CSF algoritması birleştirilerek yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur (Şekil 79d).

Önerilen yaklaşım PTIN-5 kombinasyonu ile elde edilen zemin noktalarını esas almaktadır. CSF-5 denemesi ile elde edilen zemin noktalarındaki kayalık ve mavi brandalı alanların sınırları manuel çevirilerek, poligon içindeki zemin noktaları PTIN-5 verisi ile birleştirilmiştir. Bu yaklaşımda toplam 2.677.709 zemin noktası elde edilmiştir. Önerilen hibrit zemin filtreleme yaklaşımının nicel sonuçları Tablo 19 ve Tablo 20'de gösterilmektedir.



Şekil 80. Zemin filtreleme sonuçlarının üç boyutlu karşılaştırılması: a) CSF, b) PTIN, c) DVM ve d) PTIN+CSF

Tablo 19. PTIN5+CSF5 birleştirme yöntemi obje tabanlı doğruluk analizi

Yöntem	Ortalama Yükseklik Farkı	Eşleşen Nokta Sayısı (DP)	Eşleşmeyen referans nokta (YN)	Eşleşmeyen zemin noktası (DP)	Cr (%)	Cp (%)	F-Skor (%)
PTIN5+CSF5	0,107	1089	70	0	100	93,96	96,89
DJI	0,078	1023	136	**0**	100	88,26	93,76

Tablo 20. PTIN yöntemi ortak referans noktalarına göre doğrulukların değerlendirilmesi

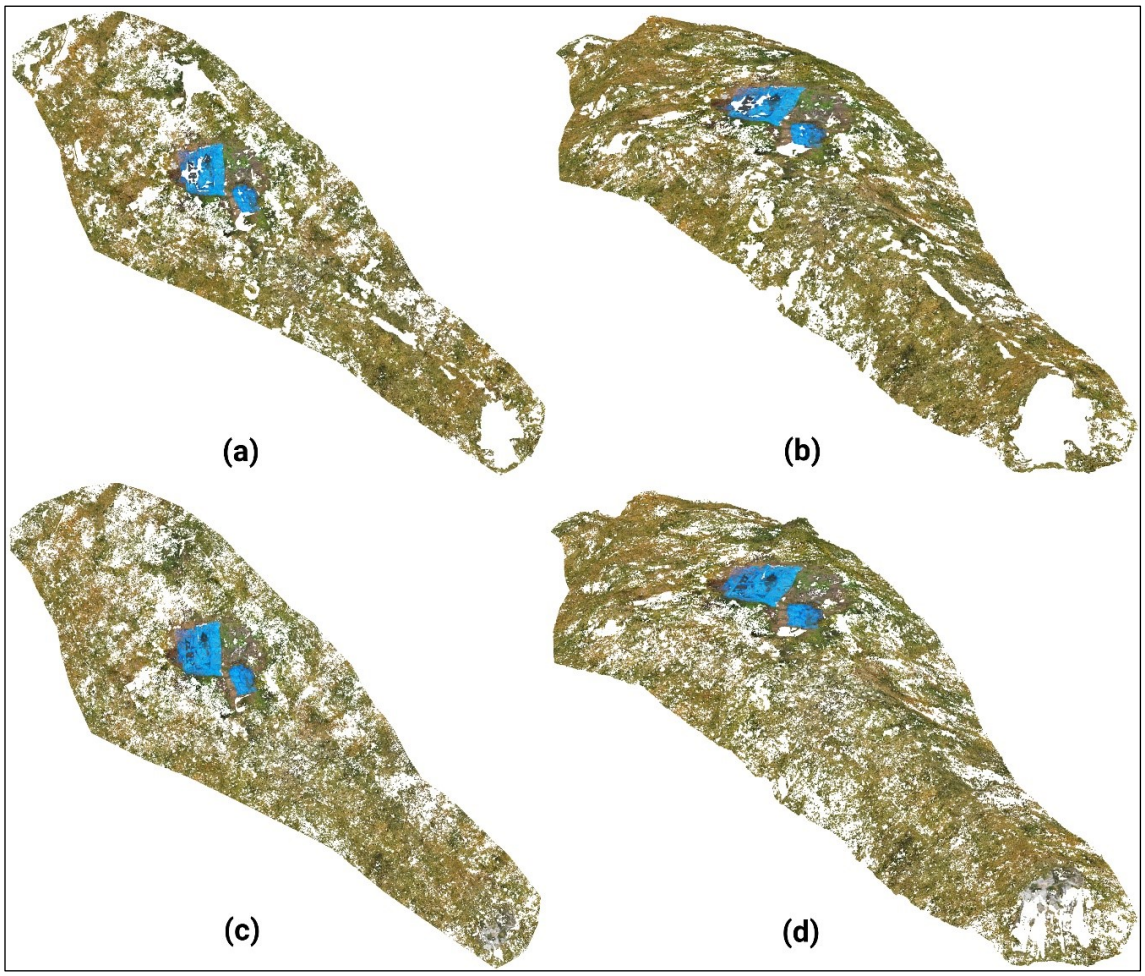
Yöntem	Ortak Nokta Sayısı	Öklid mesafe Ortalaması (m)	DJI Öklid Mesafe Ortalaması (m)	Yükseklik Farkı Ortalaması (m)	DJI Yükseklik Farkı Ortalaması (m)
PTIN5+CSF5	1014	0.149	0.116	0.106	0,076

Önerilen hibrit yaklaşım 50 cm mesafe eşik değeri içinde 1159 adet referans noktanın %93,96'sı ile doğru bir şekilde eşleşebilmiştir. Böylece obje tabanlı doğruluk analizinde %96,89 F-skor değeri ile DJI Terra programında üretilen zemin filtreleme performansına %3,13'lük bir iyileştirme uyguladığı belirlenmiştir.

Referans noktalar ile eşleştirilen zemin noktaları kıyaslandığında DJI Terra'ya göre 2,9 cm yükseklik farkı bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum PTIN yönteminin daha az zemin noktası içermesinden kaynaklanmaktadır.

Hem önerilen hibrit yaklaşım hem de DJI Terra tarafından ortak eşleşen 1014 referans nokta baz alındığında ise önerilen yaklaşım 3B öklid mesafesinde 3,3 cm, ortalama yükseklik farkı değerinde ise 3 cm fark olduğu gözlemlenmiştir.

Referans noktalara göre yapılan değerlendirmede önerilen hibrit yaklaşım PTIN yönteminde olduğu gibi birkaç cm kötü sonuçlar üretse de, doğru arazi modeli için dikkate alınan zemin, brandalı alan ve kayalıkla örtülü zemin hibrit yöntemde iyi bir şekilde oluşmaktadır. Önerilen hibrit yaklaşımın DJI Terra ile karşılaştırılması ise Şekil 81'de paylaşılmaktadır. Şekil 81' den görüldüğü üzere DJI Terra tarafından eksik kalan birçok zemin noktası hibrit yaklaşım ile giderilmiştir



Şekil 81. Hibrit yaklaşımın DJI Terra ile karşılaştırılması: a-b) DJI Terra, c-d) PTIN5+CSF5

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında arkeolojik kazı alanı olarak tescillenen Çıngırt Kalesine ait hava LiDAR verisi kullanarak hassas arazi modelinin ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Zemin ve zemin üstü noktaların birbirinde ayrılabilmesi için literatürde mevcut CSF, PTIN ve DVM yöntemleri ele alınarak performansları irdelenmiştir. Zemin çıkarma performansının özellikle nesne tabanlı yapılabilmesi için yersel LiDAR teknolojisi ile elde edilen 1159 adet referans nokta baz alınmıştır.

Farklı parametre kombinasyonlarına göre en yüksek doğruluk değerine ulaşan CSF, PTIN ve DVM yöntemlerinin zemin çıkarım performansları sırasıyla %97,66, %96,80 ve %73,40 F-skoru ile sonuçlanmıştır. Aynı veri seti ile DJI Terra tarafından gerçekleştirilen zemin çıkarma işlemi için ise %93,76 F-skor değeri hesaplanmıştır. Bağımsız bir şekilde elde edilen en yüksek CSF, PTIN ve DVM performansları DJI Terra ile karşılaştırıldığında sırasıyla +%3,90, +%3,04 ve -%20,36 bir fark oluştuğu gözlemlenmiştir. Nesne tabanlı yapılan doğruluk analizinde CSF ve PTIN zemin çıkarma performansına olumlu bir katkı sağlasa da DVM ise doğruluk değerini ciddi oranda düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bölgedeki arazi modelinin daha iyi çıkarılabilmesi için PTIN ve CSF yöntemleri bölgesel bazda birleştirilerek %96,89 F-skoru değerine ulaşılmıştır. Bu durum önerilen bütünleşik yöntemin DJI Terra'ya göre %3,13'lük bir iyileştirme sağladığını kanıtlamaktadır.

CSF yönteminde ele alınan 5 farklı parametre kombinasyonu ile elde edilen en düşük ve en yüksek F-skor değeri sırasıyla %36,29 ve %97,66 olarak hesaplanmıştır. En düşük değer CSF-1 denemesinde ele alınan sabit parametre değerinden kaynaklanmaktadır. CSF denemelerine göre kumaş çözünürlüğü ve sınıflandırma eşiği parametresinin düşürülmesi zemin çıkarma performansını arttırdığı gözlemlenmiştir. Maksimum iterasyon sayısı genel olarak sabit alınsa da zemin çıkarım performansını çok fazla etkilemediği düşünülmektedir. CSF sonucu üretilen zemin noktaları 1159 adet referans veri ile karşılaştırıldığında ortalama 6-7 cm yükseklik farkını oluşturmaktadır.

PTIN yönteminde ele alınan 5 farklı parametre kombinasyonu ile elde edilen en düşük ve en yüksek F-skor değeri sırasıyla %95,68 ve %96,80 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar PTIN yönteminde elde edilen sonuçların birbirine göre daha tutarlı olduğunu kanıtlamaktadır. Çıkarılan zemin nokta sayısı genel olarak CSF yönteminde elde edilen zemin noktalarının çok gerisinde kalsa da genel olarak zemin noktalarını homojen olarak

üretebilmektedir. Referans verilerle karşılaştırıldığında yaklaşık 11 cm yükseklik farkı oluşmaktadır.

Genel olarak bakıldığında CSF yönteminde üretilen zemin nokta sayısının fazla olmasından dolayı tez kapsamında önerilen 50 cm eşik değeri içerisinde daha fazla referans nokta ile eşleşme gerçekleşmiş ve yükseklik farkı daha düşük çıkmıştır. PTIN yönteminde ise nokta sayısı daha az çıkmasına rağmen kayalık alan ve bitki örtüsü ile kaplı alanlarda yüksek başarı sergilenmiştir. CSF yöntemi özellikle branda ile kaplı alanlarda girinti-çıkıntılı bölgeleri ideal bir şekilde oluşturmuştur. Bu iki yöntemin güçlü olan özellikleri birleştirildiğinde ise optimum arazi modeline ulaşılmıştır. Bu durumda ortalama 10 cm yükseklik farkı oluşmuştur. Fakat DJI Terranın oluşturduğu yükseklik farkına göre 2-3 cm daha yüksek çıkmaktadır. Referans noktaya göre daha yüksek fark çıkmasının ana sebebi branda ve kayalık bölge ile ilgili referans noktaların çıkarılamamasından kaynaklanmaktadır. Özellikle branda ve kayalık üzerinde referans nokta sayısı ideal çerçevede olduğu zaman DJI Terra tarafından üretilen obje tabanlı doğruluk analizindeki performans ölçütlerinin değeri ciddi oranda azalışa geçmesi beklenilmektedir.

DVM tarafından elde edilen sonuçlar ise hiperparametre seçimi ve eğitim veri setinin eksikliğinden kaynaklı olmak üzere diğer yöntemlere göre daha düşük değerler üretmektedir. İlgili eksiklikler giderildikten sonra makine öğrenmesi yöntemlerinden biri olan DVM'nin de daha yüksek zemin çıkarma performansına erişebileceği öngörülmektedir.

Tez kapsamında önerilen doğruluk değerlendirme yöntemi 50 cm eşik mesafesi içerisinde üretilen zemin noktasını referans noktalarla eşleştirebilmeye çalıştığı için ideal bir analiz gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bu mesafe arttırıldığı zaman doğruluk ölçütleri de yükselecektir. Genel olarak yapılan eşleştirme arazi üzerinde elde edilen referans noktalarına bağlı yapılsa da kritik bölgelere ait daha fazla nokta alımına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle branda ve kayalık ile kaplı alanlarda zemin gerçeği verisinin daha fazla olması yapılacak analizin gerçeğe yaklaşmasını sağlayacaktır.

Zemin çıkarım performansının irdelenmesi aşamasında zemin nokta sayısından ziyade çıplak araziyi daha iyi modelleyebilecek ve homojen dağılıma sahip çıktılar ideal arazi modelini temsil edebilmektedir. Zemin nokta sayısının gereğinden fazla olması bazı bitki örtüsü veya zemin üstü noktaların zemin nesnesi olarak yanlış filtrelenmesi sebep olmaktadır. Zemin nokta sayısı fazla olduğu için daha fazla nokta eşleşir ve DP etiketli nokta artacağı için doğruluk değeri gerçek dışı yükselebilmektedir.

Bu tez çalışmasında genel olarak literatürde kullanılan zemin filtreleme algoritmalarının performansları değerlendirilmiştir. Her yöntemin parametre seçimi, arazi tipi, eğim vb. faktörlerden dolayı farklılıklar oluşturabileceği gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek eğimli, yoğun bitki örtüsü ile kaplı arkeolojik kazı alanında bu filtreleme algoritmalarının hibrit bir şekilde kullanılması doğru arazi modelinin ortaya çıkarılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca DVM yönteminde donanım ihtiyacı ve eğitim süresi gibi parametreler zaman alacağı için PTIN ve CSF gibi filtreleme yöntemlerinin daha çok tercih edilmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

Acar, A. (2018). LiDAR teknolojileri ve uygulamaları. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri, 24(2), 35-48.

Acar, A. ve Karslı, F. (2019). Kentsel alanlarda gerçek ortofoto üretimi ve değerlendirilmesi. Harita Dergisi, 161, 46-56.

Alptekin, A. (2010). Türkiye'de fotogrametri çalışmalarının tarihsel gelişimi. Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayını.

Arkeoloji ve Sanat Dergisi. (2015). Çıngırt Kalesi kazı çalışmaları. Arkeoloji ve Sanat Dergisi, 148, 110-118.

Awrangjeb, M. (2016). Using LiDAR data for automatic building detection and modeling in urban areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 128, 170-191.

Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B4), 110-117.

Bahadır, M. (2023). İnsansız hava araçları ile LiDAR entegrasyonu ve uygulamaları. Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 15(1), 1-12.

Baltsavias, E.P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 199-214.

Bitelli, G., Girelli, V.A., Remondino, F. ve Vittuari, L. (2004). The potential of 3D techniques for cultural heritage object documentation. Proc. of SPIE, 5665, 85-96.

Cai, Z., Ma, H. ve Zhang, L. (2019). A modified cloth simulation filter for extracting DTM from airborne lidar point clouds. Remote Sensing, 11(22), 2615.

Chen, Z., Gao, B. ve Devereux, B. (2021). Improved cloth simulation filtering algorithm for dense point cloud ground filtering. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 173, 49-67.

Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D. ve Rinaudo, F. (2020). UAV and LiDAR data integration in archaeology and cultural landscape surveys. Remote Sensing, 12(17), 2829.

Dong, P. ve Chen, Q. (2017). LiDAR remote sensing and applications. CRC Press.

Doneus, M., Briese, C., Fera, M. ve Janner, M. (2013). Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. Journal of Archaeological Science, 35(4), 882-893.

Doneus, M., Iglseder, R., Doneus, N. ve Briese, C. (2020). Multi-scalar observation of strain-fields at the rock village of Dara in Turkey with 3D-visualizations based on multi-technique data. Remote Sensing, 12(19), 3210.

Erdem, M. (2020). Arkeolojik alanlarda dijital dokümantasyon teknikleri. Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi, 5(1), 93-108.

Hartley, R. ve Zisserman, A. (2004). Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press.

Hirschmüller, H. (2011). Semi-global matching: Motivation, developments and applications. Photogrammetric Week, 11, 173-184.

Huang, X. ve Zhang, L. (2012). An SVM ensemble approach combining spectral, structural, and semantic features for the classification of high-resolution remotely sensed imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(1), 257-272.

Jin, S., Su, Y., Wu, F., Pang, S., Gao, S., Hu, T., Liu, J. ve Guo, Q. (2022). Stem segmentation based on the hybrid point-voxel convolutional neural network from terrestrial LiDAR data. Remote Sensing, 14(4), 950.

Jimenez, J., Aburumman, N., Orjuela-Quintana, J.B. ve Farid, H. (2021). LiDAR segmentation with graph convolution networks. arXiv preprint arXiv:2104.00478.

Karasaka, L. ve Keleş, G. (2020). Havadan lazer tarama verilerinden zemin filtreleme yöntemlerinin karşılaştırılması. Geomatik, 5(3), 204-213.

Karslı, F. (2018). Digital photogrammetry and remote sensing for cultural heritage documentation. Journal of Cultural Heritage, 23, 212-221.

Karslı, F. (2022). LiDAR teknolojileri ve uygulamaları. Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.

Karslı, F., Akçay, Ö. ve Tonbul, H. (2016). Obje-tabanlı sınıflandırma yaklaşımı ile ortofoto görüntülerden detay çıkarımı. Harita Dergisi, 155, 78-93.

Karslı, F., Dihkan, M. ve Öztürk, A. (2021). Arkeolojik alanlarda havadan lazer tarama verilerinin kullanımı. Geomatik, 6(1), 32-45.

Karslı, F. ve Özdemir, E. (2022). Fotogrametrik yöntemlerle yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli üretimi. Geomatik, 7(2), 118-129.

Kavzoğlu, T. ve Çölkesen, İ. (2019). Uzaktan algılama teknolojileri ve uygulama alanları. Geomatik, 4(1), 36-48.

Kirchner, A. ve Signorino, C.S. (2018). Using support vector machines for survey research. Survey Practice, 11(1), 1-10.

Kraus, K. (2007). Photogrammetry: geometry from images and laser scans. Walter de Gruyter.

Lee, I.S. ve Lee, J.O. (2016). Orthophoto production and use in disaster management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41, 195-198.

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G. ve Harding, D.J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies. BioScience, 52(1), 19-30.

Li, Y., Yong, B., Wu, H., An, R. ve Xu, H. (2022). Automatic detection of ground points from airborne LiDAR point clouds based on deep learning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 184, 32-45.

Liu, K., Boehm, J. ve Alis, C. (2018). Change detection of mobile LiDAR data using cloud computing. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 42(3), 106-111.

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.

Moudry, V., Urban, R., Stroner, M., Komarek, J., Brouček, J. ve Melis, M. (2020). Comparison of vegetation classification methods using UAV-based photogrammetric point clouds and LiDAR for land cover mapping. Remote Sensing, 12(11), 1818.

Opitz, R. ve Cowley, D.C. (2013). Interpreting archaeological topography: airborne laser scanning, 3D data and ground observation. Oxbow Books.

Özbalmumcu, M. (2022). Yüksek çözünürlüklü LiDAR verilerinin işlenmesi ve analizinde yeni yaklaşımlar. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Provot, X. (1995). Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In Graphics Interface (pp. 147-154). Canadian Information Processing Society.

Rashidi, P. ve Rastiveis, H. (2018). Ground filtering LiDAR point cloud using a new adaptive multi-scale 3D slope algorithm. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 46, 1835-1843.

Rehak, D. (2018). A brief history of aerial photography: From pigeons to the drone era. The Conversation, 05 May 2018.

Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote Sensing, 3(6), 1104-1138.

Renfrew, C. ve Bahn, P. (2016). Archaeology: Theories, methods, and practice (7th ed.). Thames & Hudson.

Rizaldi, A., Persello, C., Gevaert, C.M. ve Oude Elberink, S.J. (2018). Fully convolutional networks for ground classification from LiDAR point clouds. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4(2), 231-238.

Shan, J. ve Toth, C.K. (2018). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. CRC press.

Sheng, Y., Gong, P. ve Biging, G.S. (2003). Orthoimage production for forest regions using airborne lidar data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(3), 259-266.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2012). Çıngırt Kalesi arkeolojik kazı çalışmaları raporu. Ankara.

Vapnik, V. (1998). Statistical learning theory. John Wiley & Sons.

Vosselman, G. ve Maas, H.G. (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. CRC press.

Wehr, A. ve Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 68-82.

Wu, T.F., Lin, C.J. ve Weng, R.C. (2022). Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling. Journal of Machine Learning Research, 5(Aug), 975-1005.

Zeybek, M. ve Şanlıoğlu, İ. (2019). Point cloud filtering on UAV based point cloud. Measurement, 133, 99-111.

Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X. ve Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. Remote Sensing, 8(6), 501.

Zheng, M., Hui, B. ve Zhou, S. (2018). High performance true orthophoto generation method using a new strategy of optimized semi-global matching algorithms. IEEE Access, 6, 66864-66882.

ÖZGEÇMİŞ

Murat AYGÜN, ilk, orta ve lise eğitimini tamamladıktan sonra 1994 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 1998 yılında mezun oldu. Mezuniyetinin ardından 1998-2002 yılları arasında Köy Hizmetleri Iğdır İl Müdürlüğü'nde Etüt-Proje Şube Müdürlüğü'nde Yol, İçmesuyu ve İskan Projelerinde Proje Mühendisi, Yol Şube Müdürlüğü'nde Kontrol Mühendisi ve İçmesuları Şube Müdürlüğü'nde Kontrol Mühendisi ve Şube Müdürü olarak görev yaptı.

2002-2005 yılları arasında Köy Hizmetleri Giresun İl Müdürlüğü'nde Etüt-Proje Müdürlüğü'nde Yol, İçmesuyu ve İskan Projelerinde Proje Mühendisi ve Yol Şube Müdürlüğü'nde Teknik Eleman (Bölge Şefliği) görevlerinde bulundu.

2005-2008 yılları arasında Giresun İl Özel İdaresi Genel Sekreterliği'nde Plan Proje Yatırım ve İnşaat Müdürlüğü'nde Yol, İçmesuyu, İskan ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Projelerinde Proje Mühendisi olarak çalıştı.

2008-2014 yılları arasında Ordu İl Özel İdaresi Genel Sekreterliği'nde Plan ve Proje Müdürlüğü'nde Yol, İçmesuyu ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Projelerinde Proje Mühendisi olarak görev aldı.

2014 yılından itibaren Ordu Büyükşehir Belediyesi İmar ve Şehircilik Daire Başkanlığı'nda Harita ve Kamulaştırma Şube Müdürlüğü'nde çalışmalarını sürdürmektedir.

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

Mesleki kariyeri boyunca İnsansız Hava Araçlarının Harita/Geomatik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı, Coğrafi Bilgi Sistemleri uygulamaları ve fotogrametrik değerlendirme teknikleri konularında çeşitli seminerlere katılmış ve bildiriler sunmuştur.