

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN ÇIKARILAN BİNA ÇATI GEOMETRİSİNİN
DÜZGÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK YENİ BİR ALGORİTMA VE ARAYÜZ GELİŞTİRME**

DOKTORA TEZİ

Emirhan ÖZDEMİR

**HAZİRAN 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN ÇIKARILAN BİNA ÇATI GEOMETRİSİNİN
DÜZGÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK YENİ BİR ALGORİTMA VE ARAYÜZ GELİŞTİRME**

Emirhan ÖZDEMİR

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (HARİTA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 / 07 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 07 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fevzi KARSLI
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Nokta Bulutu Verilerinden Çıkarılan Bina Çatı Geometrisinin Düzgünleştirilmesine Yönelik Yeni Bir Algoritma ve Arayüz Geliştirme” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmalarım süresince danışmanlığımı üstlenen, değerli fikirleri ve önerileriyle çalışmalarına yön veren ve her türlü desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Sayın Fevzi KARSLI’ya sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmasının tez izleme komitesinde görev alan, özellikle algoritmaların programlanması ve geliştirilmesi kısmında önemli destek sağlayan, değerli hocalarım Prof. Dr. Erhan Coşkun ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DİHKAN’a, tez çalışması süresince yöntem ve tez içeriğinin geliştirilmesinde desteklerini esirgemeyen Harita Yüksek Müh. Murat BAHADIR ve Harita Müh. Feride Seçil YILDIRIM’a teşekkür ederim.

Tez jürimde yer alan Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU’na ve Prof. Dr. Cevdet Coşkun AYDIN’a yapmış oldukları değerlendirmelerden ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında kullandığım veri setlerinin bir kısmını sağlayan ATAY MÜHENDİSLİK’e ve GNSS TEKNİK’e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde bana daimî destek olan, maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan değerli aileme, anlayışını ve desteğini kalbimde hissettiğim sevgili eşim Kevser ZENGİN ÖZDEMİR’e ve canım oğlum Emir Asaf ÖZDEMİR’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emirhan ÖZDEMİR
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Nokta Bulutu Verilerinden Çıkarılan Bina Çatı Geometrisinin Düzgünleştirilmesine Yönelik Yeni Bir Algoritma ve Arayüz Geliştirme” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Fevzi KARSLI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri kendim yaptığımı, 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. 21/07/2023

Emirhan ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
TABLolar DİZİNİ	IX
SEMBOLLER DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.1.1. Çalışmanın Motivasyonu.....	4
1.1.2. Tezin Ana Hattı.....	4
1.1.3. Literatür Taraması.....	4
1.1.4. Çalışmanın Amacı.....	13
1.2. Çalışmada Kullanılan Teknolojiler	13
1.2.1. Fotogrametri	13
1.2.1.1. Dijital Hava Kameraları ve Özellikleri.....	16
1.2.2. Hava Lazer Tarama Teknolojisi	17
1.2.3. Nokta Bulutu Üretim Yöntemleri	18
1.2.3.1. LiDAR Teknolojisi ile Nokta Bulutu Üretimi	19
1.2.3.2. Görüntü Eşleştirme ile Nokta Bulutu Üretimi	20
1.2.4. Nokta Bulutu Filtrelenmesi	22
1.2.4.1. Nokta Bulutundan Zemin (Arazi Modeli) Çıkarımı	22
1.2.4.2. Nokta Bulutundan Bitki Örtüsü Çıkarımı.....	24
1.2.4.3. Nokta Bulutundan Bina Çatı Detay Çıkarımı.....	25

1.2.5.	DBSCAN Kümeleme Algoritması	29
1.2.6.	Bézier Eğrileri.....	30
1.2.7.	Doğruluk Değerlendirmesi	31
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	37
2.1.	Çalışma Alanları	38
2.1.1.	Ortogonal Geometrilik Binaları İçeren Çalışma Alanları.....	38
2.1.2.	Eğrisel Geometrilik Binaları İçeren Çalışma Alanları.....	40
2.1.3.	Karma Geometrilik Binaları İçeren Çalışma Alanları	42
2.2.	Kullanılan Kamera/LiDAR Sistemleri ve Üretilen Veriler.....	45
2.3.	Çalışma Alanlarına Ait 3B Nokta Bulutlarının Üretilmesi.....	46
2.4.	Zemin Çıkarımı	47
2.5.	Bitki Örtüsü Çıkarımı	49
2.6.	Binaların Sınıflandırılması	50
2.7.	Binalara Ait Çatı Detaylarının Sınıflandırılması	52
2.8.	Bina Sınır Düzgünleştirilmesine Yönelik Geliştirilen Yöntemler	53
2.8.1.	Ortogonal (Dik) Kenarlı Bina Düzgünleştirme	53
2.8.2.	Eğrisel Kenarlı Bina Düzgünleştirme.....	64
2.8.3.	Karma Kenarlı Bina Düzgünleştirme	66
2.9.	Arayüz Tasarlama	72
2.10.	Referans (Doğrulama) Verileri	74
3.	BULGULAR	77
3.1.	Ortogonal Geometrilik Bina Çatı Sınırlarının Değerlendirmesi.....	77
3.2.	Eğrisel Geometrilik Bina Çatı Sınırlarının Değerlendirmesi	84
3.3.	Karma Geometrilik Bina Çatı Sınırlarının Değerlendirmesi.....	86
4.	TARTIŞMA	92
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	98
6.	KAYNAKLAR	101

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN ÇIKARILAN BİNA SINIR GEOMETRİSİNİN OTOMATİK DÜZGÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK YENİ BİR ALGORİTMA VE ARAYÜZ GELİŞTİRME

Emirhan ÖZDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Fevzi KARSLI
2023, 105 Sayfa

Lazer tarama teknolojisi (LiDAR) veya fotoğraflar ile görüntü eşleştirme tekniği kullanılarak üretilen 3B nokta bulutu verisi, yeryüzündeki doğal ve beşerî unsurlar hakkında üç boyutlu bilgiye ulaşmanın en popüler yollarından biri olarak görülmektedir. Özellikle vektör harita üretim sürecinde temel harita katmanlarının hızlı ve etkin bir biçimde çıkarılması için, 3B nokta bulutlarının kullanımı yaygın bir hale gelmiştir. Kentsel çevrenin ortak unsurları dikkate alındığında, haritanın temel katmanları arasında yer alan bina katmanının en önemli detay olduğu açıktır. Bu katmanın uzaktan algılanmış verilerden çıkarılması sonucu ölçüm prensibinden kaynaklı düzensiz (alfa şekil) bir sınır geometrisi oluşmaktadır. Harita üzerinde bina sınırlarının temsil edilebilmesi için düzgün ve anlamlı bir sınır düzgünleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutlarından çıkarılan ortogonal, eğrisel ve karma geometrili düzensiz bina sınırlarının otomatik düzgünleştirilmesini/sayısallaştırılmasını sağlayan matematiksel bir model geliştirilmiş ve uygulama arayüzü tasarlanmıştır. Geliştirilen algoritma, ortogonal geometrili bina kenarlarını bu tez kapsamında üretilen ABORE (Otomatik Bina Anahat Düzgünleştirme) yöntemiyle, eğrisel bina kenarlarını ise Bézier eğrileri ile düzgünleştirmektedir. Sonuç olarak, çalışma kapsamında önerilen algoritma, özellikle eğrisel ve karma (ortogonal+eğrisel) geometrili bina sınırlarını otomatik düzgünleştirme yönüyle literatürdeki diğer bina sınır düzgünleştirme yöntemlerine göre üstünlük sağlamaktadır. Önerilen yöntemin piksel bazlı doğruluk değerlendirmesi ortalama %95, çalışmada geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirmesinde ise karesel ortalama hata değeri 0,456 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen yöntem, ilgili yönetmelik kapsamında büyük ölçekli harita üreten kurum ve kuruluşlara operatör desteği gerektirmeden otomatik bina sayısallaştırılması için katkı sağlayacağı açıktır.

Anahtar Kelimeler: Fotogrametri, LiDAR, Nokta Bulutu, Düzgünleştirme, ABORE, Bézier Eğrisi

PhD. Thesis

SUMMARY

A NOVEL ALGORITHM AND INTERFACE FOR AUTOMATIC REGULARIZATION OF BUILDING BOUNDARY GEOMETRY EXTRACTED FROM POINT CLOUD DATA

Emirhan ÖZDEMİR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geomatics Engineering Department
Supervisor: Prof. Dr. Fevzi KARSLI
2023, 105 Pages

The use of 3D point cloud data generated through Laser Scanning Technology (LiDAR) or image matching techniques is widely regarded as one of the most popular ways to obtain three-dimensional information about natural and man-made features on the Earth's surface. In particular, the process of producing vector maps, the use of 3D point clouds has become widespread for extracting fundamental map layers quickly and efficiently. Considering the common elements of the urban environment, it is evident that the building layer is the most important detail among the basic map layers. The extraction of this layer from remotely sensed data results in an irregular boundary geometry due to the principle of measurement. In order to represent building boundaries on the map, a regularize and meaningful boundary regularization is necessary. In this thesis, a novel mathematical model has been developed and an application interface has been designed to automatically regularize/digitize orthogonal, curvilinear, and mixed-geometry irregular building boundaries extracted from LiDAR and photogrammetric point clouds. The proposed algorithm regularize orthogonal-geometry building edges using the developed ABORE (Automatic Building Outline Regularization) algorithm, and curvilinear building edges using Bézier curves. As a result, the proposed algorithm provides superiority over other building regularization methods in the literature, especially regarding automatic regularization of curvilinear and mixed geometric building boundaries. The proposed method achieved an average pixel-based accuracy evaluation of 95% and an average root mean square error (RMSE) value of 0,456 in the developed point-based accuracy evaluation. It is clear that the developed method will contribute to the institutions and organizations that produce large-scale maps within the scope of the relevant regulation for automatic building digitization without requiring operator support.

Key Words: Photogrammetry, LiDAR, Point Cloud, Regularization, ABORE, Bézier Curve

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Resim ve nesne koordinatları arasındaki ilişki (Abdalkadhum, 2012).	15
Şekil 2. Kameranın yapısı; A- mercek, B- diyafram, C- obturatör, D- odaklama, E- görüntüleme sistemi, F- film, G- film nakil sistemi ve H- kamera gövdesi (Limandal, 2019).	16
Şekil 3. ALS tarayıcı ile yüzey taraması (URL-1, 2014).....	18
Şekil 4. LiDAR ile üretilen nokta bulutu (URL-2, 2018).....	19
Şekil 5. Stereo fotogrametri tekniği (Surmen, 2022).....	20
Şekil 6. Stereo görüntüde eşlenik noktalar (URL-3, 2023).....	21
Şekil 7. SMRF morfolojik işlemler (Chen vd., 2021).	23
Şekil 8. SMRF sınıflandırma sonucu.....	24
Şekil 9. Yer üstü noktaların sınıflandırılması	25
Şekil 10. Octree yöntemi ile vokselleme	26
Şekil 11. Octree yöntemi ile basamaklara ayırma	26
Şekil 12. I-Octree yöntemi ile basamak analizi	27
Şekil 13. I-Octree yöntemi ile farklı profillerden inceleme: a) Bina nokta bulutu b)Y-Z profili c) X-Z profili	28
Şekil 14. DBSCAN algoritması çalışma prensibi.....	29
Şekil 15. Farklı λ i değerlerinde Bézier eğrileri	31
Şekil 16. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde açısal değerlerin irdelenmesi	33
Şekil 17. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde paralellik durumunun irdelenmesi .	34
Şekil 18. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde ağırlık merkezine olan öklid mesafelerin irdelenmesi.....	35
Şekil 19. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde en uzun doğru parçasına olan mesafelerin irdelenmesi kriteri	36
Şekil 20. Önerilen yöntem şeması	37
Şekil 21. Ortogonal geometrili binalar için LiDAR veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Kaliforniya ve b) İstanbul.....	39
Şekil 22. Ortogonal geometrili binalar için fotogrametrik veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Elâzığ, b) Erzurum	39
Şekil 23. Eğrisel geometrili binalar için LiDAR veri setlerini içeren çalışma alanları: a, b ve c) Toronto ve d) Minnesota.....	41

Şekil 24. Eğrisel geometrili binalar için fotogrametrik veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Samsun b) Rize.....	41
Şekil 25. Karma geometrili binalar için LiDAR veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Toronto, b) Sao Paulo ve c) Minnesota	43
Şekil 26. Karma geometrili binalar için fotogrametrik veri setlerini içeren çalışma alanları: a-b) Samsun, c) Rize ve d) Iğdır.....	44
Şekil 27. Fotogrametrik nokta bulutu: a) Elâzığ, b) Erzurum	47
Şekil 28. SMRF sonucu yer ve yer üstü sınıflandırma: a) Kaliforniya çalışma alanı (LiDAR) ve b) Erzurum çalışma alanı (fotogrametrik).....	49
Şekil 29. Yer üstü noktalardan bitki örtüsünün ayıklanması	50
Şekil 30. Yer üstü noktalarında gürültü nokta kümeleri	51
Şekil 31. DBSCAN algoritması ile bina sınıflandırılması.....	51
Şekil 32. Bina nokta bulutu verisi	52
Şekil 33. I-Octree ile çıkarılan bina çatı detayları a, b) Kaliforniya çalışma alanı (LiDAR) ve c, d) Erzurum çalışma alanı (fotogrametrik).....	53
Şekil 34. Farklı sınır değerlerinde çizdirilen başlangıç değerleri: a) sınır değeri: “0,3” ve b) sınır değeri: “0,8”	54
Şekil 35. Başlangıç sınırı üzerindeki ardışık noktalardan geçen doğruların çizimi	55
Şekil 36. Mp değerine göre kesişim açısı hesaplama ($Mp=4$)	56
Şekil 37. Açı koşulunu sağlayan aday köşe noktaları.....	57
Şekil 38. DBSCAN kümeleme sonucu.....	58
Şekil 39. DBSCAN kümeleme sonucunda oluşan aday köşe noktaları	58
Şekil 40. İdeal köşe noktası tespiti: a) en uzun doğru parçası ve b) başlangıç sınır noktalarının en uzun doğru parçasına öklid mesafeleri.....	59
Şekil 41. İdeal köşe nokta seçimi	60
Şekil 42. İdeal köşe nokta seçimi (uzaklıklar sürekli artan ve azalan).....	61
Şekil 43. İdeal köşe noktaları	62
Şekil 44. Kesin köşe noktası belirleme: a) ideal köşe noktaları arasına tampon bölge geçirme ve b) tampon bölge içine düşen noktalar	63
Şekil 45. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırı.....	63
Şekil 46. Eğrisel geometrili bina başlangıç sınırı	64
Şekil 47. Eğrisel geometrili binalar için açi koşulu.....	65
Şekil 48. Düzgünleştirilmiş eğrisel bina sınırı	65
Şekil 49. Karma geometrili bina başlangıç sınırı	66
Şekil 50. Açı koşunu sağlayan aday köşe noktaları.....	67
Şekil 51. İdeal köşe noktaları	68

Şekil 52. İdeal köşe noktalarından tampon bölge geçirme.....	68
Şekil 53. Kesin köşe noktaları	69
Şekil 54. Karma geometrili binalarda kenar tipi belirleme: a) mesafelerin çizdirilmesi ve b) mesafelerin grafiksel gösterimi	70
Şekil 55. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırı.....	71
Şekil 56. Yarı otomatik bina sınır düzgünleştirme arayüzü tasarımı	73
Şekil 57. Otomatik bina sınır düzgünleştirme arayüzü tasarımı.....	74
Şekil 58. Kaliforniya çalışma alanı referans verisi.....	75
Şekil 59. Elâzığ çalışma alanı referans verisi	76
Şekil 60. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırları: a) Kaliforniya ve b) İstanbul.....	78
Şekil 61. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırları: a) Elâzığ ve b) Erzurum	79
Şekil 62. Düzgünleştirilmiş eğrisel bina sınırları: a) Toronto ve b) Minnesota.....	84
Şekil 63. Düzgünleştirilmiş eğrisel bina sınırları: a) Samsun ve b) Rize	85
Şekil 64. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırları: a) Toronto, b) Sao Paulo ve c) Minnesota	87
Şekil 65. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırları: a-b) Samsun, c) Rize ve d) Iğdır	88
Şekil 66. Fotogrametrik nokta bulutunda gölgelik alanlardan kaynaklı nokta eksiklikleri: a) Elâzığ ve b) Erzurum çalışma alanı.....	93
Şekil 67. Hatalı köşe noktası tespiti.....	93
Şekil 68. Kesişim noktalarının sınır düzgünleştirme üzerine etkisi (Ozdemir vd., 2022)...	95

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Türkiye’de aktif kullanılan dijital kameraları ve özellikleri.....	17
Tablo 2. Ortogonal geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri	40
Tablo 3. Eğrisel geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri	42
Tablo 4. Karma geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri	45
Tablo 5. Kamera ve LiDAR sistem özellikleri	45
Tablo 6. Veri türlerine göre SMRF algoritmasının girdi parametreleri	48
Tablo 7. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırlarının piksel bazlı değerlendirme sonuçları	80
Tablo 8. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırlarının nokta bazlı değerlendirme sonuçları	82
Tablo 9. Düzgünleştirilmiş eğrisel geometrili bina sınırlarının piksel bazlı değerlendirme sonuçları	85
Tablo 10. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırlarının piksel bazlı değerlendirme sonuçları	89
Tablo 11. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırlarının nokta bazlı değerlendirme sonuçları	90
Tablo 12. Önerilen yöntemin literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslanması.....	97

SEMBOLLER DİZİNİ

ABORE	: Otomatik Bina Anahat Düzgünleştirme
ALS	: Havadan Lazer Taraması (Airbone Laser Scanning)
CAD	: Bilgisayar Destekli Grafik-Tasarım (Computer Aided Design)
CNN	: Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network)
DCPA	: En Yakın Yaklaşım Nokta Mesafesi
DBSCAN	: Yoğunluk Tabanlı Uzamsal Kümeleme
DL	: Derin Öğrenme (Deep Learning)
FN	: Referansta Olup Algoritma Tarafından Bulunamayan Detaylar
FP	: Algoritmanın Otomatik Bulduğu Fakat Referansta Olmayan Detaylar
GAN	: Çekişmeli Üretici Ağ (Generative Adversarial Network)
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
IMU	: İnersiyal ölçme aleti (Inertial Measurement Unit)
INRIA	: Ulusal Dijital Bilim ve Teknoloji Araştırma Enstitüsü
ISPRS	: Uluslararası Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği
İHA	: İnsansız Hava Aracı
KDE	: Çekirdek Yoğunluğu Tahmini (Kernel Density Estimation)
LiDAR	: Işık Tespiti ve Ölçümü (Light Detection and Ranging)
MBR	: Minimum Sınırlayıcı Dikdörtgen (Minimum Bounding Rectangle)
MDL	: Minimum Tanımlama Uzunluğu (Minimum Description Length)
ML	: Makine Öğrenmesi (Machine Learning)
MLS	: Mobil LiDAR Sistem (Mobil LiDAR system)
PDF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
RANSAC	: Rastgele Örneklem Konsensüsü (Random Sample Consensus)

RTK	: Gerçek Zamanlı Kinematik (Real Time Kinematic)
SMRF	: Basit Morfolojik Filtre (Simple Morphological Filter)
SIFT	: Ölçek Değişmeyen Özellik Dönüşümü
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TIN	: Üçgenleştirilmiş düzensiz ağlar (Triangulated Irregular Network)
TLS	: Yersel LiDAR Sistem (Terrain LiDAR System)
TP	: Referans görüntüde olan ve otomatik bulunan detaylar
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda uzaktan algılama ve fotogrametri, farklı disiplinler tarafından çeşitli jeodezik çalışmalarda, coğrafi bilgi sistemlerinin oluşturulması ve güncelleştirilmesi, kentsel planlama, akıllı ulaşım sistemleri, arazi örtüsü, tarım ve ormancılık, afet yönetimi ve üç boyutlu (3B) deformasyon analizi gibi coğrafi bilgi gerektiren uygulamalarda klasik ölçüm yöntemlerinin yerini almaya başlayan önemli teknolojilerdir. Bu teknolojiler, yeryüzündeki nesnelerin uzaktan sensörler (uydu, hava aracı, dron vb.) tarafından toplanan elektromanyetik radyasyon verilerinin analizi yoluyla yeryüzü özelliklerinin tespit edilmesi ve haritalanmasında kullanılmaktadır. Uzaktan algılama teknolojileri aktif ve pasif sistemler olmak üzere kendi içerisinde iki başlıkta incelenmektedir. Aktif uzaktan algılama, bir nesnenin ya da ortamın özelliklerini ölçmek için kendi enerji kaynağını kullanmaktadır. Genellikle lazer veya radar olarak adlandırılan bu sistemlerde, ölçüm prensibi sensörden çıkan elektromanyetik sinyalin nesneye çarptıktan sonra kaynağa geri dönme süresini esas alarak, sensör ile nesne arasındaki mesafenin belirlenmesine dayanmaktadır. Aktif sistemlerin en önemli avantajları, güneş gibi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları ve büyük ölçüde hava koşullarından bağımsız olarak ölçümler gerçekleştirmeleridir (Dong ve Chen, 2017). Pasif uzaktan algılama sistemleri ise nesnelerin yüzey özelliklerini, ısı dağılımlarını, spektral karakteristiklerini ve diğer özelliklerini ölçmek için elektromanyetik radyasyonu kullanmaktadır. Bu sistemler çevreden gelen doğal veya yapay elektromanyetik radyasyonu uydu, hava aracı veya yeryüzüne yerleştirilmiş sensörler gibi farklı platformlardan algılama yapmaktadır. Pasif uzaktan algılama, özellikle yüzey sıcaklıklarının ölçülmesinde kullanılan termal görüntüleme meteorolojik gözlem, hidrolojik gözlem, yer bilimleri, çevre gözlemi ve askeri istihbarat gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Dünyadaki nüfus artışı ve hızlı kentleşmeye bağlı olarak şehir (kent) alanları ve içerikleri zamanla dinamik bir şekilde değişim göstermektedir. 2018 yılı itibari ile dünyadaki kentsel nüfus oranı 1960 yılına göre iki kat artış göstererek %55 seviyesine ulaşmıştır.

Nüfus artış hızı, doğrusal bir trend ile temsil edilirse, kentsel nüfusun 2050 yılında %68, 2100 yılında ise %85 olacağı tahmin edilmektedir (Schlosser vd., 2020). Barınma gereksinimi ile birlikte bu süreç, kentsel yayılım ve yapılaşma hızı, yerleşim alanları artışı ve genişlemesi, ayrıca kentsel alanlar ile nüfus arasındaki ilişkinin incelenmesi bakımından şehir ve bölge planlamasında önemli bir rol oynamaktadır. Hızlı kentsel büyüme, dinamik bir denetim gerektirir ve buna bağlı olarak klasik yöntemlerle kentsel büyüme etkilerinin takip edilmesi verimsiz olabilmektedir (Maktav vd., 2005). Kentsel gelişimin otomatik olarak gözlemlenmesi uzaktan algılanmış verilerin işlenmesiyle mümkün olmaktadır (Chen vd., 2018).

Dünya yüzeyini üç boyutta en iyi şekilde temsil edebilmek için Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. SYM verileri yüzeyde milyonlarca noktada yapılan hassas üç boyutlu (3B) konum ölçümleri sonrasında üretilmektedir (Acar, 2018). Yeryüzündeki doğal ve beşerî unsurlar hakkında üç boyutlu bilgiye ulaşmanın en popüler yollarından biri nokta bulutlarıdır. Nokta bulutları, konumsal analizler için gereken doğru, güvenilir ve yoğun üç boyutlu bilgi üretimini hızlandırmaktadır. Son dönemlerde özellikle temel harita bilgisini üreten ve kullanan haritacılık sektörü başta olmak üzere, harita bilgisine ihtiyaç duyan diğer disiplinlere mensup sektörler için 3B veri kullanımı ciddi biçimde yaygınlaşmış ve hatta bir gereklilik haline gelmiştir. Uzaktan algılama teknolojileri arasında yer alan ve doğrudan nokta bulutu verisi üreten LiDAR ile görüntü eşleştirme bazlı dolaylı olarak üretilen fotogrametrik nokta bulutları, söz konusu veri setlerini üretebilmektedir (Acar, 2018). Bu nokta bulutları, yoğun ve doğruluğu yüksek 3B konum bilgisi sağlamaktadır. Bu bağlamda farklı teknolojilerle üretilmiş nokta bulutları içerisinde harita katmanı özelliği taşıyan detayların (bina, yol, ağaç, vb.) çıkarımına yönelik çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. LiDAR teknolojisi ile doğrudan fotogrametrik görüntülerden ise eşleştirme sonucu dolaylı olarak üretilen nokta bulutları içerisindeki mevcut bütün detaylar, tek bir sınıfta temsil edilmektedir. Genel olarak detaylar yeryüzü, bitki örtüsü ve insan yapımı objeler olarak tanımlanmaktadır. Detay çıkarımı için öncelikle nokta bulutu içerisinde yer ve yer üstü olmak üzere farklı sınıflara ait noktaların birbirinden ayrılması gerekmektedir. Ardından yer üstü sınıfa ait noktalar da bitki örtüsü ve bina alt sınıflarına atanarak bina detaylarının çıkarımı gerçekleştirilmektedir.

Kentsel çevrenin ortak unsurları dikkate alındığında, binaların en önemli nesneler olduğu açık ve aşikardır (Lai vd., 2019). İnsan yapımı objeler arasındaki binalar, yüksek konumsal doğruluk ile otomatik bir şekilde tespit edilmesi zor detaylardır. Çeşitli

uygulamalar için bina detaylarının çıkarılması ve düzgünleştirilmesi; kentsel planlama ve arazi yönetimi gibi şehirleşme alanında bilgi edinilmesi hususunda büyük önem arz etmektedir. 3B nokta bulutlarından otomatik olarak çıkarılan bina sınırları, bina geometrik yapısından (çok köşeli/çokgen, eğrisel ve karma) ve nokta bulutu üretim tekniğinden kaynaklı, düzgün bir geometrik şekle sahip olmayıp, alfa şekil (düzgün olmayan geometri) yapıdadırlar. Gerçekte düzgün (anlamalı) bir geometrik şekle sahip bina objesinin nokta bulutu içerisinde çıkarılan sınır noktaları, düzensiz bir geometrik yapıda olduğu için harita üzerinde bu haliyle doğrudan bina katmanı olarak temsil edilmesi mümkün değildir. Bundan dolayı bina sınırını temsil eden alfa şeklin otomatik bir biçimde düzgünleştirilmesi ve haritada, gerçekteki sınırı ile uygun hale getirilmesi son derece önemlidir.

Bu tez çalışmasında, farklı nokta yoğunluğundaki LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutlarında yer alan ortogonal, eğrisel ve karma (ortogonal+eğrisel) yapıdaki binalara ait sınırları iki boyutlu olarak sayısallaştıran/düzgünleştiren otomatik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutu verilerinde öncelikle Simple Morphological Filter (SMRF) algoritması uygulanarak yer ve yer üstü noktalar iki sınıf olarak filtrelenmiştir. SMRF sonucu üretilen yer üstü noktalar ise bina ve bitki örtüsü olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bina noktaları genellikle düzlemsel olduğu için eğrilik değişimi ve komşu noktalar arasındaki normallerin bağlı farkı oldukça azdır. Bitki örtüsüne ait noktalar ise herhangi bir düzlem ya da bilinen geometrik şekil belirtmeksizin dağınık bir yapıya sahiptir. Bu bilgiler doğrultusunda yardımcı fonksiyonlar ile binalara ait noktalar elde edilmiştir. Ardından bina çatısı ve duvarlarına ait noktaların otomatik olarak çıkarılması için İyileştirilmiş Sekizdal Veri Organizasyonu (I-Octree) algoritması (Karlı ve Yılmaztürk, 2022) kullanılmıştır. Böylece söz konusu yöntemle düşey yönde bölütleme yapılarak binaya ait çatı ve duvar noktaları birbirinden ayrılmıştır. Çalışmanın amacına uygun bir biçimde her bir pilot bölge için I-Octree yaklaşımı ile çıkarılan ortogonal binaların kenarları, tez çalışması kapsamında geliştirilen ABORE (Otomatik Bina Anahat Düzgünleştirme) yöntemi ile düzgünleştirilmiştir. Eğrisel ve karma geometriye sahip düzensiz bina sınırı düzgünleştirme işlemi ise ABORE yöntemi ile Bézier fonksiyonlarının entegre edilmesi sonucu hibrit bir yöntem olarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen sınır düzgünleştirme yaklaşımının farklı tipte ve özellikteki veri setlerinde ortogonal, eğrisel ve karma yapıdaki binalara ait çatı sınırlarının iki boyutlu olarak düzgünleştirilmesinin otomatize edilmesi amacıyla, geliştirilen algoritma için MATLAB ortamında bir arayüz tasarlanmıştır.

1.1.1. Çalışmanın Motivasyonu

Ülkemizde kamu/özel kurum ve kuruluşlar tarafından üretilen vektör haritalarda en temel katman, bina detaylarını temsil eden katmandır. Çeşitli uygulamalar için bina detaylarının çıkarılması ve düzgünleştirilmesi; kentsel planlama ve arazi yönetimi gibi şehirleşme alanında bilgi edinilmesi hususunda büyük önem arz etmektedir. Ancak nokta bulutundan çıkarılan bina geometrilerini temsil eden sınır noktaları, düzgün bir geometrik şekle sahip değildirler. Bina sınırını temsil eden alfa şeklin otomatik bir biçimde düzgünleştirilmesi ve haritada, gerçekteki sınırı ile uygun hale getirilmesi son derece önemlidir. Bu çalışmanın motivasyonu, nokta bulutu dışında ek bir veriye ihtiyaç duyulmaksızın, önerilen yöntem ve tasarlanan arayüz ile ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina sınır düzgünleştirme işleminin tam otomatik olarak yapılabilmesi üzerine kurulmuştur.

1.1.2. Tezin Ana Hattı

Tez Bölüm 1, genel bilgiler başlığı altında, 3B veri temsilleri, hava LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutlarının özellikleri ve çalışma prensibi, bu verilerin avantaj ve dezavantajlarının irdelenmesi, nokta bulutları üzerindeki filtreleme ve öznetelik çıkarma işlemleri, literatür taraması ve geliştirilen nokta bazlı doğruluk analizi kısımlarından oluşmaktadır. Bölüm 2’de, kullanılan veri setlerine ait detaylı bilgiler sunulmuş ve geliştirilen yaklaşımlar tanıtılmıştır. Bölüm 3 bulgular kısmında, her bir veri setine dair elde edilen sayısal ve görsel sonuçlar sunulmuştur. Tartışma bölümü olan Bölüm 4’te tez çalışması kapsamında ele alınan varsayımlar değerlendirilmiş ve geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar literatürde yer alan benzer çalışmalara ait sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Son olarak Bölüm 5’te ise çalışmanın sonuçları verilmiştir.

1.1.3. Literatür Taraması

Nokta bulutu verilerinden yer ve yer üstü objelerin sınıflandırılması, bitki örtüsünün filtrelenmesi ve bina detaylarının çıkarılması çalışmanın ön hazırlık aşamasını oluşturuyorken ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina sınırlarının düzgünleştirilmesi

tez çalışmasının temel hedefini içermektedir. Tez çalışmasında ön hazırlık kısmını içeren aşamalar ile esas hedefi oluşturan nokta bulutu içerisindeki bina sınır noktalarından elde edilen düzensiz geometrik şekillerin düzgünleştirilmesi işlemi ile ilgili literatür detayı aşağıda özet bir şekilde paylaşılmaktadır.

Son yıllarda fotogrametri ve dijital hava kamerası alanındaki gelişmeler sonucunda görüntü tabanlı eşleştirme ile 3B veri üretim tekniği, lazer tarama teknolojisine önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Rau vd., 2015; Shao vd., 2016). Literatürde veri tipine göre bina çıkarımı ve düzgünleştirme için kullanılan yöntemler genel olarak üç grupta toplanmaktadır. Birinci grup yöntemler, direkt yüksek çözünürlüklü görüntülerden 2B veya 3B bilgi çıkarımına dayanmaktadır. İkinci grup yöntemlerde, sadece nokta bulutu verisi kullanılıyorken, karma içerikli olan üçüncü grup yöntemlerde ise, nokta bulutu ve fotogrametrik görüntüler entegre biçimde kullanılarak, bina çıkarımı ve düzgünleştirilmesi gerçekleştirilmektedir (Siddiqui vd., 2016).

Literatürde nokta bulutlarından bina çıkarımı için kullanılan yöntemler, filtreleme ve anahat (sınır) çizimi olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Awrangjeb, 2016). Nokta bulutu verilerinden çıkarılan ilk bina sınırı düzensiz şekilde olduğundan, mevcut birçok çalışmada düzensiz bina geometrilerinden iki boyutlu anlamlı ve ortogonal bina sınırlarının düzgünleştirilmesine odaklanılmaktadır (Awrangjeb ve Fraser, 2014b; Albers vd., 2016; Awrangjeb, 2016).

Maas ve Vosselman (1999), çatı düzlemleri arasındaki kesişme doğrularının yönlerinden elde edilen bina yönelimine dayalı bir düzgünleştirme yaklaşımı önermektedirler. Ancak yaklaşım, yalnızca ortogonal çatı kenarlarına sahip binalar için etkilidir. Farklı yüksekliğe sahip çatı düzlemlerinde ana bina yönelimi olarak kabul edilebilecek yatay kesişme doğrusu elde edilemediği için, tam anlamıyla doğru sonuçlara ulaşılamamaktadır.

Forlani vd. (2006), ham LiDAR nokta bulutu verileri içerisindeki bina, zemin ve bitki örtüsü detaylarını otomatik bir şekilde sınıflandıran ve ardından binaların 3B modellerinin yeniden oluşturulması için üç aşamalı bir yöntem önermektedir. İlk aşamada, ham veriler bir grid üzerinde filtrelenir ve enterpolasyona tabi tutulur. İkinci aşamada, önce ham veri bölütleme yapılır ve ardından bölütleme sonucu bölgeler arasındaki geometrik ve topolojik ilişkiler hesaplanarak bir bilgi tabanında saklanır. Üçüncü aşamada ise bölgelerin sınıflandırılması için kural tabanlı bir şema uygulanır. Sonuç olarak bina ana hatları, çatı

eğimleri ve saçak çizgilerinin topolojisi analiz edilerek, çokyüzlü bina modelleri yeniden inşa edilmektedir.

Sampath ve Shan (2007), ham LiDAR nokta bulutlarından bina sınırlarının düzgünleştirilmesine yönelik bir yaklaşım sunmaktadırlar. Yaklaşımın temeli, dört adımdan oluşur; i) LiDAR noktalarını bina ve bina dışı olarak segmente eder, ii) bina sınır noktalarını düzenli hale getirir, iii) Ayırma için eğim tabanlı 1D çift yönlü filtreme kullanır, iv) düzenli doğrusal bina sınırı belirlemek için tüm sınır noktaları dikeylik kısıtlamaları olan hiyerarşik bir en küçük kareler çözümüne dahil edilir. Çalışmada LiDAR verilerindeki nokta yoğunluklarının az olması ve nokta bulutu filtreleme süreçlerindeki hatalar, nihai düzgünleştirilen bina sınırında bozulmalara neden olmaktadır. Sonuç olarak, önerilen yöntem LiDAR verilerini kullanarak çatı düzlemlerini ve düzlem sınırlarını eş zamanlı olarak tespit edebilmektedir.

Jwa vd. (2008), LiDAR nokta bulutu verilerinden çıkarılan gürültülü bina ana hatlarını düzgünleştirmek için yeni bir yaklaşım önerir. Çalışma kapsamında, yerel bir şekil konfigürasyonunda bina kenar eğimleri dinamik olarak yeniden düzenlenir ve Minimum Tanımlama Uzunluğu (MDL) ilkelerine dayalı olarak en uygun ana hatlar seçilerek gürültülü bina sınırları düzgünleştirilir. Yaklaşım, binaya ait başlangıç sınırını belirlemek için Douglas-Peucker algoritmasını kullanır ve bina geometrisini temsil eden doğru parçalarını belirler. Ancak her bina kenarı daima birbirine paralel veya dik olmayacağından, yöntem tam anlamıyla doğru sonuçlar vermemektedir. Sonuç olarak önerilen yaklaşım, sadece ortogonal bina kenarlarında etkin sonuçlar üretmektedir.

Jarzabek-Rychard (2012), yoğun yerleşim alanlarındaki bina ana hatlarının otomatik olarak çıkarılması ve düzgünleştirilmesi için kapsamlı bir yöntem sunar. Yöntem bina çıkarımı, sınır çizdirme ve düzgünleştirme olarak üç adımdan oluşur. LiDAR nokta bulutundaki bina kenarlarını tespit etmek için RANSAC (Random Sample Consensus) algoritmasını kullanır. Ardından paralel doğru parçalarını birleştirir ve en uzun doğru parçalarından hesaplanan ortalama yöne göre sınır düzgünleştirme işlemi yapılır. Bu yöntem de önceki çalışmalarda olduğu gibi sadece dik ve paralel kenarlı binalarda test edilmektedir.

Siddiqui vd. (2016), LiDAR nokta bulutu verisinden homojen ve küçük bina çatılarının çıkarımına yönelik eğim tabanlı bir yöntem önerir. Bu yöntem, küçük bina çatılarının çıkarımı üzerindeki sınırlamaların önüne geçebilmek için Gradyan Tabanlı Bina Çıkarma yöntemini içerir. Önerilen yöntem, LiDAR verisi içerisindeki noktaların yükseklik bilgileri

olmadan yoğunluk görüntüsüne dönüştürür ve ardından görüntüdeki gradyan bilgisini analiz eder.

Gilani vd. (2016), nokta bulutu seyrekliği, yüksek spektral değişkenlik, kentsel nesne farklılıkları, çevredeki karmaşıklık ve verilerin yanlış hizalanması nedeniyle ortaya çıkan birçok zorluğun üstesinden gelebilmek için nokta bulutu ve ortofotolardan elde edilen özellikleri kullanarak binaların çıkarımı ve düzgünleştirilmesi için bir metodoloji geliştirir. İlk olarak bina tanımlama işlemi, aday bina bölgelerinin belirlenmesi ve bunların gridlere bölünmesiyle gerçekleştirilir. Tespit edilen bina sınırları, spektral bilgilerden yararlanılarak düzgünleştirilir. Önerilen yaklaşımın, bina sınır düzgünleştirme doğruluğu %95'in üzerinde hesaplanmaktadır.

Ghaffarian vd. (2016), LiDAR nokta bulutu verilerinden, çatı sınırlarını çıkarabilmek için Hızlı Bağımsız Bileşen Analizi (PFICA) algoritmasını temel alan yeni bir yaklaşım önerir. Çalışma kapsamında, yeni bir tohumlama yöntemi ile PFICA algoritması, nokta bulutu verilerinden bina çatılarına ait köşe noktalarını tespit etmek için uygulanır. Ardından bina çatılarının iç ve dış sınırlarını çıkarmak için morfolojik filtreleme ve inceltme algoritmaları kullanılır. LiDAR nokta bulutu üzerinde elde edilen sonuçlar, geliştirilen yöntemin çeşitli özelliklere sahip bina çatılarını otomatik bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir.

Awrangjeb (2016), içbükey bir şekil boyunca ayrıntıların belirlenmesi, şeklin içindeki bir boşluğun ayrı olarak tanımlanması, uygun sınır izleme ve düzenli bir bina taslağı boyunca ayrıntılı bilgilerin korunması üzerine karşılaşılan problemler için yeni çözümler içeren bir yaklaşım önerir. Önerilen yaklaşım sınır kenarlarını parçalara ayırır, her parça için nokta dizisini doğru bir şekilde elde eder ve gerekirse her şekil için tek bir sınır oluşturmak üzere bunları birleştirir. Düzgünleştirme adımı ise geliştirilmiş köşe ve kenar çıkarma algoritması ile elde edilen kenarlar, otomatik olarak belirlenen binaların ana yönlerine göre ayarlanır. Performansı değerlendirmek için, çıkarılan bir bina sınırı ile referans sınır arasında köşe denkleştirmeleri yapan bir değerlendirme sistemi önermektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen yaklaşımın bina sınırı boyunca ayrıntıları koruyabildiğini ve düşük yoğunluklu girdi verilerinde yüksek doğruluk değerlerinin elde edildiğini gösterir. Ancak önerilen yaklaşım sadece ortogonal binalar üzerinde uygulanır ve sonuçlar elde edilir.

Jung vd. (2017), LiDAR verilerinden şehir ölçeğinde 3B çatı modellerini yeniden oluşturmak için veriye dayalı bir modelleme yaklaşımı önerir. Bina etiketli nokta bulutlarına yükseklik ve düzlem benzerliği uygulanarak homojen gruplar halinde kümelenir. Parçalı

kümelere dayalı olarak, dış sınırlar ve kesişme çizgileri dahil olmak üzere doğrusal modeller oluşturulur. Bina çatı modeli, Minimum Tanımlama Uzunluğu (MDL) çerçevesinde düzgünleştirme süreci ile elde edilir. MDL optimizasyon parametreleri, Min-Maks ve Entropi tabanlı ağırlıklandırma yöntemine göre otomatik olarak tahmin edilir.

Mahphood ve Arefi (2017), ortogonal geometrili bina çatılarının 3B modellenmesi için veriye dayalı yeni bir yöntem önerir. İlk olarak bölge büyütme yöntemi kullanılarak çatı bölütlemesi gerçekleştirilir. Çatı noktaları arasındaki mesafe ve noktaların yükseklik farkı bu adımda dikkate alınır ve bina kenar noktaları tespit edilir. Ardından düz kenar yaklaşımı kullanılarak çatı kenarları düzgünleştirilir. Bu adımda her kenar için ağırlık merkezi noktası ve yönü tahmin edilir. Son olarak çatı ve duvar modelleri entegre edilerek, 3B model yeniden oluşturulur. Önerilen yöntem, LiDAR verisi kullanılarak yalnızca ortogonal az sayıda bina üzerinde referans veri ile test edilmektedir.

Saud Azeez vd. (2018), binaların 3B modellemesi ve yeniden inşası amacıyla nesne sınırlarını iyileştirmek için bir düzgünleştirme yaklaşımı önerir. Normalleştirilmiş Dijital Yüzey Modeli (nDSM) görüntü katmanı, ilk olarak klasik çok çözünürlüklü bölümleme ve ardından spektral fark bölümleme kullanılarak parçalara ayrılır. Segmentasyon sonucu oluşan geometrik distorsiyonları ortadan kaldırmak ve dış sınırları iyileştirmek için Dinamik Çoklu Çizgi Sıkıştırma (DCPA) algoritması uygulanmaktadır. Bu algoritma 3B modellerin yeniden oluşturulması amacıyla daha yüksek kaliteli görüntü nesneleri sağlamaktadır. Çalışma kapsamında sadece LiDAR verisi kullanılır ve düzenlenen bina sınırları, manuel olarak sayısallaştırılan hava fotoğraflarından (10 cm çözünürlükte) elde edilen bina sınırları ile karşılaştırılarak doğruluk değerlendirmesi yapılır. Piksel tabanlı yapılan doğruluk değerlendirmesinde genel doğruluk ortalama %94 olarak hesaplanır.

Xie vd. (2018), LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutlarından ortogonal bina sınırlarının düzgünleştirilmesi için yerel ve küresel olmak üzere iki aşamalı hiyerarşik düzgünleştirme yöntemi önerir. Yerel düzgünleştirme aşamasında normal vektörler ve nokta kaydırma işlemleri uygulanırken, küresel düzgünleştirmede ise sanal yönlendirme açıları yardımıyla çizgi parçaları arasındaki paralel ve dikey ilişkiler belirlenerek daha düzgün ortogonal bina kenarlarının oluşturulması sağlanır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin bina sınırı düzgünleştirmedeki genel doğruluğunun %90 seviyelerinde olduğunu gösterir.

Feng vd. (2020), ortogonal kenarlı bina geometrisi oluşturmak için ağaç ve bina sınırları arasındaki uzamsal topolojik ilişkiyi kullanır ve bina sınırı ana hattının doğru bir şekilde oluşturulmasını engelleyebilecek durumları da göz önünde bulundurarak, bina

sınırlarının düzgünleştirilmesi üzerine yeni bir yaklaşım önerir. Yaklaşımın temeli Yinelemeli Minimum Sınırlayıcı Dikdörtgen (RMBR) algoritmasına dayanmaktadır. Önerilen yaklaşım sadece dik kenarlı binalar üzerinde test edilir ve bu durum yaklaşımın literatürdeki eksikleri karşılama noktasında zayıf kaldığını gösterir.

Rottmann vd. (2022), yersel veya mobil platform kullanarak yakın mesafe algılama yoluyla elde edilen 3B nokta bulutundan 2B bina sınırı çıkarmaya yönelik bir yaklaşım sunar. Önerilen yaklaşım, tek boyutta (z-yönünde) Çekirdek Yoğunluğu Tahmini (KDE) ile yatay bir enine kesit doğrultusunda yükseklik konumunu otomatik bir şekilde belirler. Ardından çok sayıda noktaya karşılık gelen bir yüksekliği bulmak üzere Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) yaklaşımını kullanır. Ardışık kenarlar arasında mesafe ve açı eşliğine dayalı yaklaşım kullanılarak yalnızca ortogonal bina sınırları düzgünleştirilir. Çalışma kapsamında düzgünleştirme başarısına ilişkin herhangi bir doğrulama işlemi yapılmamaktadır.

Kong vd. (2022), LiDAR nokta bulutu verileri kullanarak parametrelerden bağımsız Çekişmeli Üretici Ağlar (GAN) algoritmasına dayalı bina anahat (sınır) çıkarım yöntemi önerir. Bu yöntem ile başlangıç sınırı otomatik bir şekilde elde edilerek parametre seçim problemi sorunu aşılar. Önerilen yöntem basit geometriye ortogonal binalarda sınır düzgünleştirmesinden ziyade alfa şekil yöntemine alternatif köşe noktalarının bulunmasını sağlamaktadır. İlgili yöntem, ABORE yönteminin ilk aşamasındaki bina başlangıç sınırı belirleme kısmı ile benzerlik göstermektedir.

Li vd. (2022), LiDAR nokta bulutu verilerinden ortogonal bina sınırlarını düzgünleştirmek için, sinyal tabanlı bir algoritma geliştirir. Sinyal analizi neticesinde köşelerin konumları belirlenir ve düzgünleştirilmiş bina sınırı oluşturulur. Ancak önerilen yöntemin, çoğu zaman binaları temsil eden LiDAR nokta bulutu verilerinin homojen dağılmaması ve bitki örtüsünün binalara yakın olduğu durumlarda bina sınırlarını düzgünleştirmede başarısız olduğu gözlemlenir.

Chen ve Yao (2022), otomasyon derecesini iyileştirmek ve doğruluğu sağlamak için 3B'dan 2B'a indirgeyerek boyut azaltma tekniğine dayalı köşe noktası algılama yöntemi önerir. Çalışmada alfa şekil ile çıkarılan bina sınırları 2B görüntüye dönüştürülür ve görüntü kenarlarını yumuşatmak ve zikzaklı sınırı düzgünleştirmek için yüksek düzeyde otomasyonla yinelemeli Gauss filtreleme yöntemi kullanılır. Ardından, görüntü morfolojisi yöntemi kullanılarak düzgünleştirilmiş basit ortogonal bina sınırları elde edilir. Deneysel

sonuçlar önerilen yöntemin yalnızca sınır çıkarmanın doğruluğunu değil, aynı zamanda veri işlemenin verimliliğini de geliştirdiğini gösterir.

Genel olarak, mevcut düzgünleştirme yöntemlerinin büyük çoğunluğu ortogonal bina sınırlarının düzgünleştirilmesi üzerine yoğunlaşır. Ancak teknolojinin gelişimi ve mimari tasarımların farklılıkları dikkate alındığında eğrisel ve karma kenarlı binaların sayısı göz ardı edilemeyecek kadar fazladır. Geliştirilen birçok metoda rağmen yöntemlerin hiçbiri kentsel bir ortamdaki tüm karmaşıklıkları zebilecek nitelikte değildir. Bu nedenle, karmaşıklık derecelerinden bağımsız olarak eğrisel ve karma bina sınırlarını modelleyebilen bir metodun geliştirilmesi büyük önem taşıtmaktadır. Eğrisel ve karma bina sınır geometrisini içeren nokta bulutu verisinin düzgünleştirilmesi açısından literatürde yapılan benzer çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Dos Santos vd. (2020), alfa şekil ve Douglas-Peucker algoritmaları ile başlangıç sınırını ve kritik noktaları elde edebilen aı tabanlı bir genelleme yöntemi önerir. Yöntemin temeli bina sınırlarının düzgünleştirilmesi için yinelemeli CD-Spline'a (Değiştirilebilir Gradyan Eğrisi) dayanmaktadır. Önerilen yöntem, eğrisel bina kenarlarını polinom fonksiyonunun derecesine göre modelleyerek dzgnleştirir. Ancak bitki örtüsünün neden olduğu kapanıklıklar ve başlangıç sınırının yanlış belirlenmesi, bina sınır düzgünleştirme aşamasını etkileyen temel faktörler olarak görülmektedir. Ayrıca, hangi dereceli eğrinin kullanılacağının deneme yanılma metodu ile tespit edilmesi, yöntemin manuel giriş verileri sonrası çalışması ve otomatik olmaması, karma geometrili binalarda ortogonal kenarların eğrisel, eğrisel kenarların ise ortogonal biçimde yanlış düzgünleştirilmesi ve her bir bina köşe noktalarının kesin nokta olacak şekilde belirlenememesi, yöntemin düzgünleştirme prosedürü açısından en önemli eksiklikleridir. Ayrıca, bütüncül olarak eğrisel ya da karma yapıdaki binaların üzerinde modelin uygulanmamış olması da önemli bir eksiklik olarak görülmektedir (Dos Santos vd., 2022).

Song vd. (2021), 3B eğrisel bina rekonstrüksiyonu için yeni bir yaklaşım önerir. Önerilen yaklaşım, kontur kümeleme algoritması ve deformasyon (Embedded Deformation-ED) grafiğini temel almaktadır. Yöntem, LiDAR verisi kullanılarak çok sayıda eğrisel bina üzerinde doğrulanır. Ancak yöntem karışık ve çokyüzlü eğrisel bina türlerini ayırmakta başarılı bir şekilde uygulanamamaktadır.

Bina sınır dzgnleştirmesine yönelik olarak literatürde özellikle makine ğrenmesi (ML) ve derin ğrenme (DL) temelli çalışmalar, tümüyle içinde basit ortogonal geometrili binaların bulunduğu optik görüntüleri kullanmaktadır. Ancak bu yöntemlerle birlikte nokta

bulutu verisinin kullanıldığı bir çalışma henüz literatürde mevcut değildir. Bu kapsamda literatür detayı aşağıda özetlenmiştir.

Reda ve Kedzierski (2020), geliştirdikleri Hızlı Kenar Bölgesi Evrişimli Sinir Ağları (FER-CNN) algoritması ile uydu görüntülerinden binaları tespit ederek kritik noktaları belirleyebilmek için Ramer–Douglas Peucker (RDP) algoritmasının kullanıldığı bir yöntem önerir. Önerilen yöntem ile çıkarılan bina sınırları dik açı koşullandırması ile düzgünleştirilir. Eğitim için kullanılan maskelerin kalitesi ve görüntü üzerinden bina sınırlarının tespit edilmesini zorlaştıracak teknik ve fiziki koşullar sebebiyle bina sınırlarını düzgünleştirme aşamasında önerilen yöntem, harita üzerinde temsil edebilecek seviyede bina sınırları üretememektedir.

Zorzi vd. (2021), açık kaynak olarak sunulan üç farklı veri seti (INRIA, SpaceNet ve CrowdAI) kullanarak görüntüler üzerinden R2U-Net ağı ile bina detaylarını çıkarmayı hedefleyen yeni bir yaklaşım önerir. Çalışma kapsamında, bina sınır düzgünleştirilmesi için bir CNN ağı kullanır. Deneysel sonuçlar, çalışmada optik veri seti üzerinden ortogonal binalara ilişkin üretilen sonuçların doğruluk değerlerinin %90 düzeyinde olduğunu göstermiştir.

Zhu vd. (2022), binaları gerçek şekilleri ile tam olarak gösterebilmek için bina köşeleri dizisi olarak parametreleştirilmiş uyarlanabilir bir çokgen oluşturma algoritması (APGA) sunar. Yöntem, bina köşelerinin aday konumlarını tahmin eder ve bu köşelerin yerleşimini bina sınırının konumu ve yönü yardımıyla belirler. Ayrıca, yerel bağlam özelliklerini tanıtmak, tahmin edilen bina poligonunun gelişmiş performansını elde etmek ve konumlarını iyileştirmek için aday köşe noktalarının etrafındaki ince yapıları entegre eder. Deney sonuçları, ilgili algoritmanın çoğunluğu ortogonal ve az köşeli binaların bulunduğu test alanında %90 seviyelerinde başarı sağladığını göstermiştir.

Li vd. (2022), ISPRS ve INRIA veri setlerini kullanarak bina ayak izi haritalarının kalitesini artırmak ve anlamsal segmentasyon ile ortogonal sınır düzgünleştirmesini gerçekleştirmek amacıyla iki modülden oluşan RegGAN ağını önerir. Çalışmada girdi verisinin ayırt edilebilmesi için çok ölçekli bir ayırıcı önerilir ve daha gerçekçi bina ayak izleri oluşturmak için ayırmacının değerleri göz önünde bulundurularak bir üreteç kullanılır. Çalışma sonucunda %85 seviyesinde başarı elde edilmiştir.

Tez çalışmasında, ortogonal bina sınır geometrilerinin düzgünleştirilmesine yönelik geliştirilen ABORE (Otomatik Bina Anahat Düzgünleştirme) yöntemi (Ozdemir vd., 2022) genelleştirilerek, eğrisel ve karma geometrik yapıya sahip bina sınırlarının tam otomatik

olarak düzgünleştirilmesi için Bézier eğrileri ile entegre edilmiştir. ABORE yönteminde ek bir veriye ihtiyaç duyulmadan sadece nokta bulutu verileri girdi olarak kullanılır ve bina sınır geometrisinin düzgünleştirilmesi sağlanır. Girdi verisi olarak hem LiDAR hem de fotogrametrik nokta bulutu verileri kullanılmaktadır. Mevcut yöntemlerin kısıtlama ve yetersizliklerinin üstesinden gelebilmek adına, eğrisel kenarlara sahip binalar için Bézier eğrilerini içeren matematiksel modeli, karma kenarlı binalar için ise Bézier + ABORE hibrit modeli esas alan yöntem kullanılmaktadır. Bu genel açıklamaların ışığında çalışma konusu;

- LiDAR ve fotogrametrik görüntülerden eşleştirme yöntemi ile üretilmiş nokta bulutu verisinden çıkarılan düzensiz bina sınırlarının otomatik düzgünleştirilmesini (regülerize edilmesi) sağlayacak yeni bir algoritma geliştirilmesi,
- Geliştirilecek algoritmaya yönelik arayüz tasarlanması ve MATLAB platformunda prototip bir arayüz modülü ortaya konulması,
- Literatürde ilk defa, eğrisel ve karma geometrik yapıdaki bina sınırlarının tam otomatik olarak Bézier eğrisini temsil eden fonksiyonlar ile düzgünleştirilmesi,
- Harita üretim sektöründe popüler olan nokta bulutu verilerinden tam otomatik sayısallaştırma/ düzgünleştirme yapabilen bir arayüzün geliştirilmesi,
- Farklı kaynaklardan üretilmiş homojen bir nokta bulutu veri seti kullanılarak ortogonal, eğrisel ve karma bina sınır geometrilerinin tam otomatik düzgünleştirme işleminin gerçekleştirilmesi,
- Önerilen yöntemin literatürde halen çözümü noktasında sonuç üretilmemiş problemlere inovatif/yenilikçi yaklaşım getirmesi,
- Önerilen yaklaşımın kural tabanlı istatistiksel koşullandırmalara bağlı olarak eğitime gerek duymadan farklı mimarideki bina sınır geometrisinin düzgünleştirilmesini hedeflemesi,
- Önerilen yaklaşımın klasik/yersel ve fotogrametrik harita üretim teknikleriyle hız, ekonomi, doğruluk ve operatör desteği gerektirmemesi açısından karşılaştırıldığında bina katmanını düzgün biçimde haritaya aktarma noktasında yenilikçi yönünün olması,
- Dijital büyük ölçekli harita üretimi için gerekli olan bina sınırı/kenarı sayısallaştırılmasında operatör desteğinin minimize edilmesi ile birlikte harita üretiminde kalite ve hızın artırılması,
- Geliştirilecek yaklaşımın otomatize bir biçimde kullanımını sağlayacak arayüz ya da modülün hem akademik hem de ticari anlamda ülkemizde ve dünyada farklı amaçlarla

üretilebilen büyük ölçekli harita çalışmalarına altlık olması bağlamında özgün değerler taşımaktadır.

1.1.4. Çalışmanın Amacı

Çalışmanın ana amacı, LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilmiş nokta bulutu verilerinden, geleneksel ve bilinen detay çıkarım yöntemleriyle tespit edilmiş ortogonal eğrisel ve karma geometriye sahip binaların ana hatlarının/sınırlarının herhangi bir ek veriye ihtiyaç duyulmadan düzgünleştirilmesi için yeni bir yaklaşım geliştirilerek, bu yaklaşımı kullanıcı dostu bir arayüze dönüştürmektir. Çalışmanın diğer amaçları; i) literatürde halen tam anlamıyla çözümü sağlıklı bir biçimde üretilememiş özellikle eğrisel ve karma geometrili binaların tam otomatik sınır düzgünleştirme problemine inovatif/yenilikçi bir yaklaşım getirilmesi, ii) bina sınırı/kenarı sayısallaştırılmasında operatör desteğinin minimize edilmesi, iii) piksel bazlı doğruluk değerlendirmesine alternatif olarak nokta bazlı doğruluk değerlendirmesinin geliştirilmesi, iv) harita üretiminde kalite ve hızın artırılması ve geliştirilen yaklaşımın otomatize bir biçimde kullanımını sağlayacak arayüz ya da modülün ülkemizde farklı amaçlara hizmet eden büyük ölçekli harita yapım yönetmeliğini esas alan harita çalışmalarına altlık olmasıdır.

1.2. Çalışmada Kullanılan Teknolojiler

1.2.1. Fotogrametri

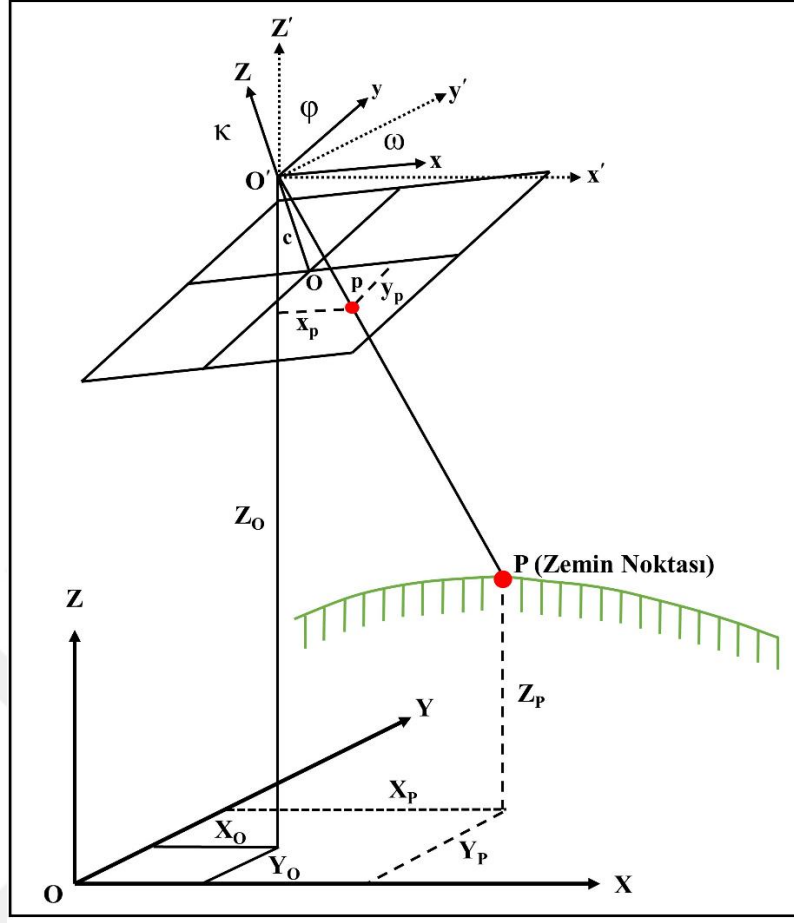
Fotogrametri, havadan veya karadan çekilen fotoğrafların açısını, yüksekliğini ve diğer özelliklerini hesaplayarak, matematiksel modeller yardımıyla yeryüzündeki nesnelerin boyutlarını ve konumlarını hesaplayabilen ve yorumlanmasına imkân sağlayan teknolojidir. Fotogrametri biliminin temeli 18. Yüzyılın başlarında bilim insanlarının perspektif ilkesinin harita yapımında kullanılabilirliğini öne sürmesiyle atılır (Linder, 2016). Ancak fotogrametrinin tam olarak aktif olması, 1827'de Fransız Joseph Niepce'nin heliografi olarak adlandırdığı ilk fotoğrafı ürettiği tarihe dayanmaktadır. Topoğrafik haritalama için fotogrametri kullanımına ilişkin ilk gerçek deneyler ise, 1849'da Fransız Ordusu Mühendisler Birliği'nden Albay Aimé Laussedat'ın yönetiminde gerçekleşir. Albay

Laussedat'ın deneylerinde hava fotoğrafları çekmek için uçurtmalar ve balonlar kullanılır. Ancak hava fotoğrafı elde etmede yaşanan güçlükler nedeniyle bu araştırma alanını daraltarak, çalışmalarını yer fotoğrafları ile haritalama üzerine yoğunlaştırır. 1903 yılında Wright kardeşler tarafından uçağın icadı, modern hava fotogrametrisinin ortaya çıkması için büyük bir itici güç olur ve uçak ilk olarak 1913 yılında haritalama amacıyla fotoğraf elde etmek için kullanılır. Hava fotoğrafları, Birinci ve İkinci Dünya Savaşı sırasında özellikle keşif amacıyla yoğun bir şekilde kullanılır. Teknoloji alanında ve fotogrametri tekniklerindeki gelişmeler, 20. yüzyılın geri kalanında ve 21. yüzyılda hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bu gelişmeler günümüzde fotogrametrinin haritaları derlemek ve topoğrafik bilgi üretmek için mevcut en doğru ve verimli yöntemler arasında yerini almasını sağlamaktadır (Linder, 2016).

Fotogrametri, genel olarak uydu, hava ve yersel fotogrametri olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar verilerin toplanış biçimindeki farklılıklar ve veri işleme yöntemlerine göre adlandırılmaktadır. Uydu uzaktan algılama teknolojisinde temel olarak veriler dünyanın etrafında gezen ve yere oldukça uzak olan uydulara sabitlenmiş sensörler ile yapılmaktadır. Hava fotogrametrisinde insanlı/insansız hava araçlarına monte edilen görüntü toplama teknik ve teknolojileri ile veriler toplanmaktadır. Yersel fotogrametri ise yeryüzünde bulunan algılayıcılar ile verilerin toplanmasına imkân sağlayan teknolojilerdir (Sevgen, 2018).

Fotogrametrinin ilk uygulamaları topoğrafik haritalamadır ve günümüzde hala yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Büyükten küçüğe değişen ölçekteki bu haritalar; otoyollar demiryolları, hızlı ulaşım sistemleri, köprüler, boru hatları, su kemerleri, isale hatları, hidroelektrik barajlar, taşkın kontrol yapıları, nehir ve liman iyileştirmeleri, kentsel yenileme projeleri vb. planlama ve projelendirmede etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca coğrafi bilgi sistemleri için mekânsal veri sağlama açısından, çok sayıda topoğrafik harita hazırlanmaktadır.

Fotogrametrinin matematiksel modeli izdüşüm (kolinearite) denklemlerine dayanmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi izdüşüm denklemleri bir sensörün izdüşüm merkezini, görüntü noktasını ve yerdeki bir nesneyi birbirine bağlayan bir ışın demetinin geometrisini vermektedir.



Şekil 1. Resim ve nesne koordinatları arasındaki ilişki (Abdalkadhum, 2012).

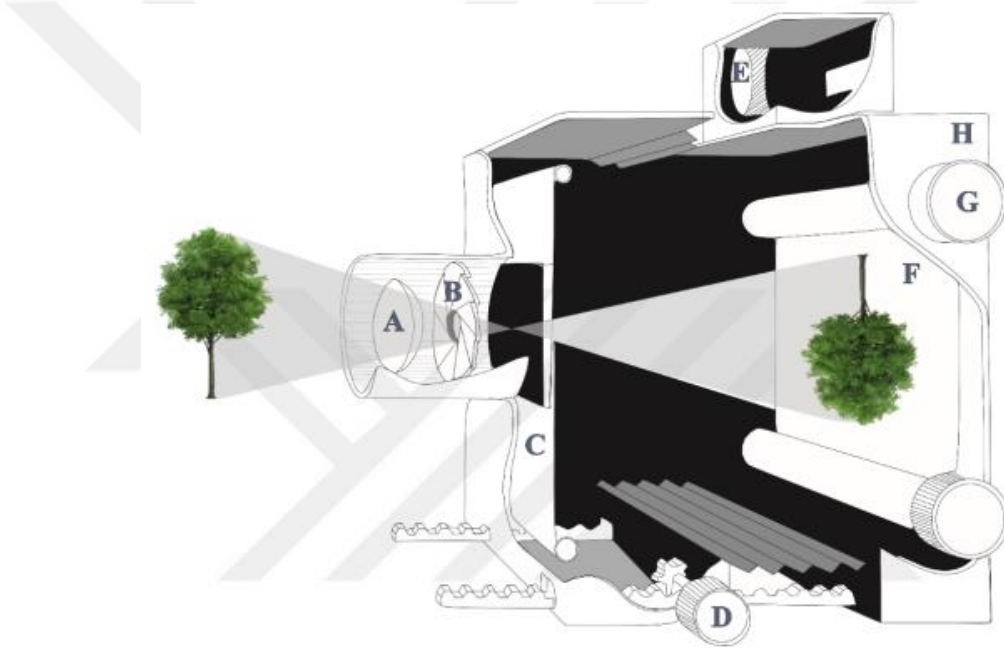
Fotoğraf düzlemindeki koordinatları nesne koordinatlarıyla ilişkilendirmek için iç (x_0, y_0, c) ve dış $(\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$ yöneltme parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Noktalar arası üç boyutlu vektörler ile ortogonal dönüşüm matrisi belirlenir. Böylece fotoğraf uzayı ile nesne uzayı arasındaki açısal bağlantılar elde edilir. Bulunan değerler ve (1) numaralı izdüşüm (kolinearite) denklemleri kullanılarak fotoğraf ve nesne düzlemleri arasındaki ilişki kurulur (Kraus, 2011).

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 - c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\
 y &= y_0 - c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Burada, x ve y görüntü koordinatlarını, x_0 ve y_0 asal nokta koordinatlarını, c asal uzaklığı, m_{ij} dönüklük matrisi elemanlarını, X_0 , Y_0 ve Z_0 izdüşüm merkezinin koordinatlarını ve X , Y ve Z hesaplanacak olan nesnenin arazi koordinatlarını temsil etmektedir.

1.2.1.1. Dijital Hava Kameraları ve Özellikleri

Dijital ortamda, piksellerden oluşan ve her bir piksele bir renk tonunun atanması ile oluşan veriye dijital görüntü adı verilir (Limandal, 2019). Bu görüntüleri fotogrametrik amaçlı kullanılmak üzere dijital hava kameraları ile üretmek mümkündür.



Şekil 2. Kameranın yapısı; A- mercek, B- diyafram, C- obtüratör, D- odaklama, E-görüntüleme sistemi, F- film, G- film nakil sistemi ve H- kamera gövdesi (Limandal, 2019).

Kameralar; kamera gövdesi, mercek, taşıyıcı (CCD; Charge Couple Device), diyafram ve obtüratör kısımlarından oluşmaktadır (Şekil 2). Dijital görüntü için en önemli kamera bölümü olan CCD'nin hassasiyetine bağlı olarak, obtüratör kontrolünde diyaframdan geçen ışık, CCD tarafından mercekte toplanılarak elektronlara çevrildikten sonra manyetik ortama kaydedilir. CCD sensörler, elektronları sensör üzerinden herhangi bir deformasyona uğramadan aktarabilmeleri için üretimlerinde özel bir teknik kullanılır ve bu sayede yüksek

kaliteli ve yoğun pikselli görüntüler elde edilir. Tablo 1’de Türkiye’de aktif olarak kullanılan bazı dijital hava kameralarının özellikleri ve bu kameraların 1000 m uçuş yüksekliğinde ürettikleri yer örneklemler aralığı (YÖA/GSD) değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye’de aktif kullanılan dijital kameraları ve özellikleri

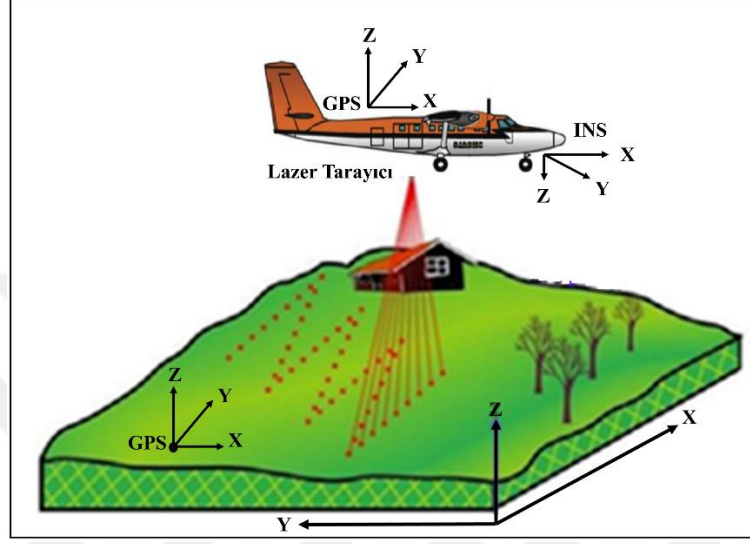


	Piksel Boyutu	Görüş Alanı Açısı	Piksel Adedi	Odak Uzaklığı	A/D Bant Başına Çözünürlük	Veri Depolama Kapasitesi	Yer Örnekleme Aralığı (GSD)
DMC I	12 µm	69,3° (dik) 42° (paralel)	13824 (satır) 7680 (sütun)	120 mm	12 bit	840 GB	10 cm
DMC II	5,6 µm	45,5° (dik) 38,6° (paralel)	16768 (satır) 14016 (sütun)	112 mm	14 bit	2 TB	5 cm
DMC III	3,9 µm	57,2° (dik) 34,4° (paralel)	25728 (satır) 14592 (sütun)	92 mm	14 bit	9,6 TB	4,24 cm
DMC-4S	3,76 µm	58° (dik) 34,4° (paralel)	31520 (satır) 13440 (sütun)	107 mm	14 bit	15,36 TB	3,51 cm
UltraCam X	7,2 µm	55° (dik) 37° (paralel)	14430 (satır) 9420 (sütun)	120 mm	12 bit	1,7 TB	6 cm
UltraCam XP	6 µm	55° (dik) 37° (paralel)	17310 (satır) 11310 (sütun)	100 mm	12 bit	4,2 TB	6 cm
UltraCam Eagle	5,2 µm	66° (dik) 46° (paralel)	20010 (satır) 13080 (sütun)	80 mm	12 bit	3,3 TB	6,5 cm
UltraCam FP	6 µm	55° (dik) 37° (paralel)	17310 (satır) 11310 (sütun)	70 mm	12 bit	3,3 TB	8,5 cm
Ultracam Osprey	3,76 µm	51,5° (dik) 36,5° (paralel)	20544 (satır) 14016 (sütun)	50 mm	14 bit	16 TB	4,69 cm

1.2.2. Hava Lazer Tarama Teknolojisi

LiDAR algılayıcı sistemleri, lazer ışınlarının obje yüzeyine çarparak algılayıcıya geri dönmesi ile aradaki zaman farkı yardımıyla, algılayıcı ile obje arasındaki uzaklığın ölçülmesi ilkesine dayanmaktadır. Objeye yüzeylerinin konum bilgileri (X, Y ve Z), LiDAR sistemlerine entegre edilen GPS (Global Positioning System) ve IMU (Inertial Measurement Unit) sistemleri ile ölçülen konum ve dönüklük parametreleri yardımıyla elde edilmektedir.

Ayrıca LiDAR sistemleri fotogrametrik sistemlerin aksine kendi enerjilerini üretebilen aktif sensörlerdir. Bu sistemler yersel (TLS), mobil (MLS) ve hava LiDAR sistemleri (ALS) olarak gruplandırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan hava LiDAR sistemi ile yüzey taraması Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. ALS tarayıcı ile yüzey taraması (URL-1, 2014).

Son yıllarda insansız hava araçları kullanımının artması ile hava LiDAR sistemi daha aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Kent alanlarına ait verilerin toplanması, bina çatılarının ve yolların çıkarılması, enerji nakil hatlarının tespiti, alan ve hacim hesabı gibi birçok uygulamada bu sistemden etkin bir şekilde faydalanılmaktadır.

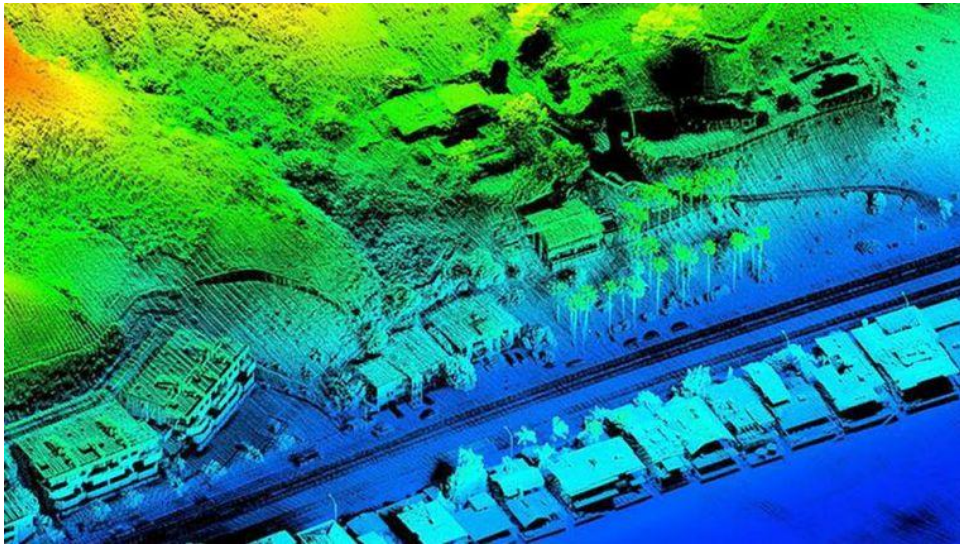
1.2.3. Nokta Bulutu Üretim Yöntemleri

Son zamanlarda teknolojinin gelişimiyle farklı algılayıcı ve yöntemlerle üretilen 3B nokta bulutları, bir alanın içindeki nesnelerin koordinatlarını X, Y ve Z eksenleri boyunca belirleyen bir veri türüdür. Bu veri türü genellikle bir lazer tarayıcısı ya da fotogrametrik araçlar gibi sensörler aracılığıyla toplanan büyük veri kümelerini temsil etmek için kullanılmaktadır. 3B nokta bulutları nesnelerin boyutları, şekilleri, dokuları ve konumları hakkında ayrıntılı bilgi sağladıklarından dolayı üretim, tasarım, bakım, keşif ve navigasyon gibi birçok uygulamada girdi verisi olarak tercih edilmektedir.

Nokta bulutu üretim aşamasında LiDAR algılayıcı sensörler nokta bulutu verilerini direkt üretirken, fotogrametrik yöntem ile görüntülerin stereo değerlendirilmeleri yapılarak nokta bulutu verileri dolaylı bir şekilde üretilmektedir.

1.2.3.1. LiDAR Teknolojisi ile Nokta Bulutu Üretimi

LiDAR algılayıcı sistemleri fotogrametrik sistemlerin aksine kendi enerjilerini üretebilen aktif sistemlerdir ve güneşin enerjisine bağımlı olmadan çalışabilmektedirler. Bu sayede gece veya gündüz veri toplama işlemi gerçekleştirilebilir. LiDAR sistemi fotogrametrinin aksine 3B nokta bulutu verisini çok hızlı bir şekilde toplar ve dengeleme aşamasından geçmeden direkt üretir. LiDAR sistemlerinde; tarayıcı tarafından bir lazer ışını gönderilir ve gönderilen ışın zemin yüzeyindeki bir hedefe çarpar ve dağınık olarak yansıtılır. Bu ışının hedefe çarparak geri dönüp alıcı tarafından kaydedilmesi arasında geçen süreden, tarayıcı ile yer noktası arasındaki mesafe belirlenir. Bu mesafe tarayıcı tarafından gönderilen ve ışık hızından yaklaşık %0,03 daha hızlı olan ışının atım hızı ve ışının yolculuğu boyunca geçen süre ile çarpılarak hesaplanır. Ancak tarayıcı ile hedef arasındaki mesafe, ışının hem gidiş hem de dönüş süresinin hesaba dahil edilmesinden dolayı gerçek mesafe değerinin iki katıdır. Bu mesafe değerinin yarıya bölünmesiyle tarayıcı ile hedef arasındaki mesafe hesaplanır. Bu şekilde hesaplanan mesafeler ile 3B nokta verisi üretilerek kaydedilir (Şekil 4).



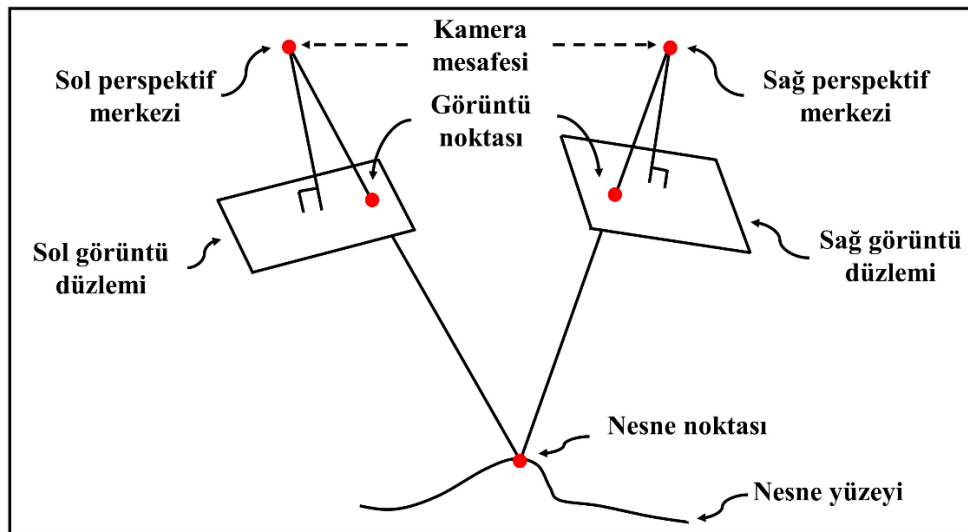
Şekil 4. LiDAR ile üretilen nokta bulutu (URL-2, 2018).

LiDAR ile taranan nesnelerin kutupsal koordinatlarını X, Y ve Z koordinatlarına dönüştürmek için lazer tarayıcının konum bilgisi ve yönlendirme açıları gereklidir. Sürekli değişen bu değerler, GPS ve IMU'dan oluşan dinamik sistem vasıtasıyla uçuş boyunca kayıt altına alınır. Tarama işlemi sürecinde tarayıcı, GPS ve IMU kendi aralarında mikrosaniye hızında senkronize olarak çalışmaktadır.

LiDAR tarayıcısı tarafından gönderilen bir lazer ışını, yansımalarından dolayı tarayıcı ile hedef arasındaki yolculuğu farklı şekillerde olabilir. LiDAR tarayıcısı tarafından gönderilen bir lazer ışını doğrultusu boyunca bulunan bitki örtüsü gibi bazı hedeflerin içerisinde sızabilir/geçebilir ve gönderilen lazer ışını alıcıya birçok farklı nesneden yansıyarak geri döner. Bu durumda gönderilen bu ışın için alıcı tarafından birçok geri dönüş kaydedilir.

1.2.3.2. Görüntü Eşleştirme ile Nokta Bulutu Üretimi

Görüntü eşleştirme yöntemi ile 3B nokta bulutu üretim mantığı, insan beyninin farklı derinliklere sahip cisimleri sağ ve sol gözlerden gelen ışınları birlikte değerlendirip üç boyutlu (stereoskopik) görüntüye dönüştürmesi ile aynı mantığa dayanmaktadır. Çift görüntü fotogrametrisi olarak da bilinen stereo fotogrametri, farklı konumlardan alınan, iki veya daha fazla fotoğraf görüntüsünde yapılan ölçümleri kullanarak bir nesne üzerindeki noktaların 3B koordinatlarını tahmin etmeye yarayan bir tekniktir (Şekil 5).



Şekil 5. Stereo fotogrametri tekniği (Surmen, 2022).

Görüntü eşleştirme yöntemi ile 3B nokta bulutu üretimi, aynı objeye ait farklı açılardan çekilmiş iç (x_0, y_0, c) ve dış ($\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$) yöneltme parametreleri bilinen bindirmeli görüntülere stereo değerlendirme yapılarak, derinlik bilgisinin elde edilmesi ve o görüntülerdeki eşlenik noktalara izdüşüm (Kolinearite) denklemleri kullanılarak 3B konum bilgisi (X, Y ve Z) hesaplanmasıyla gerçekleşmektedir. Görüntüler üzerindeki eşlenik noktaların tespit edilebilmesi için epipolar çizgi üzerindeki cisimlerden aynı noktayı temsil eden noktaların bulunması gerekmektedir (Acar, 2018). Stereo görüntü çifti arasındaki epipolar geometri esasen, iki kamera arasındaki göreceli konum ve yön farklılıklarını açıklar ve her bir kamera görüntüsündeki bir noktanın, diğer kamera görüntüsündeki eşleniği için epipolar doğrular oluşturur. Böylece eşlenik nokta tespiti için iki boyutlu olan arama uzayı tek boyuta indirgenebilmektedir. Aynı objeye ait epipolar çizgi ile tespit edilen eşlenik noktalara ilişkin bir örnek Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Stereo görüntüde eşlenik noktalar (URL-3, 2023).

Stereo görüntü çiftlerinin her biri yardımıyla derinlik haritaları oluşturulur ve bu haritaların birleştirilmesiyle 3B obje elde edilir. Görüntü eşleştirme yöntemi ile elde edilen

nokta bulutu, arazi haritaları, mimari modeller, sanal tur, simülasyonlar, endüstriyel tasarım ve üretim süreçleri gibi birçok farklı uygulamada yaygın olarak kullanılır. Ayrıca bu nokta bulutları, lazer tarama ve radar gibi farklı veri kaynağından elde edilen nokta bulutu verileri ile entegre edilerek daha ayrıntılı ve doğru bir nesne modeli oluşturulabilir.

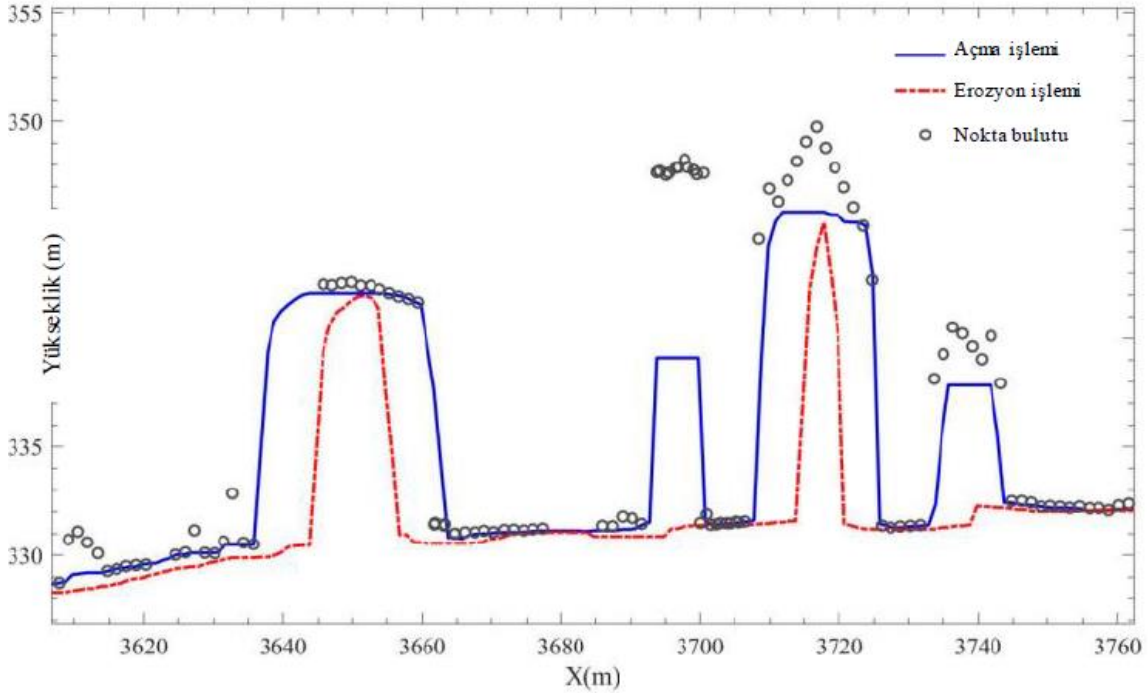
1.2.4. Nokta Bulutu Filtrelenmesi

Nokta bulutu verileri, yeryüzündeki doğal ve yapay nesneler hakkında üç boyutlu konumsal bilgiye ulaşmanın en popüler yollarından biridir. Son dönemlerde özellikle temel harita bilgisini üreten ve kullanan haritacılık sektörü başta olmak üzere, harita bilgisine ihtiyaç duyan diğer disiplinlere mensup sektörler için 3B veri kullanımı ciddi biçimde yaygınlaşmıştır. Nokta bulutları kendi içerisinde birçok detay barındırmaktadır. Başlangıçta üretilen nokta bulutları içerisindeki mevcut bütün detaylar tek bir sınıfta temsil edilmektedir. Ancak detaylar sınıflandırılarak yeryüzü, bitki örtüsü ve insan yapımı objeler olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda farklı teknolojilerle üretilmiş nokta bulutları içerisinde harita katmanı özelliği taşıyan detayların çıkarımına yönelik çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Öncelikle nokta bulutu içerisinde yer ve yer üstü olmak üzere farklı sınıflara ait noktaların birbirinden ayrılması gerekmektedir. Günümüzde, bu ayrışım için kullanılan pek çok filtreleme yöntemi bulunmaktadır (Parrot ve Ramírez Núñez, 2016; Han vd., 2017). Nokta bulutu verisi, yer ve yer üstü olmak üzere iki sınıfa ayrıldıktan sonra, yer üstü sınıfına ait noktalar da kendi içerisinde bitki örtüsü ve bina katmanı olarak alt sınıflara atanacaktır. Böylece hem nokta bulutu verisi yeryüzü, bitki örtüsü ve insan yapımı objeler olmak üzere üç ana katmana ayrışacaktır.

1.2.4.1. Nokta Bulutundan Zemin (Arazi Modeli) Çıkarımı

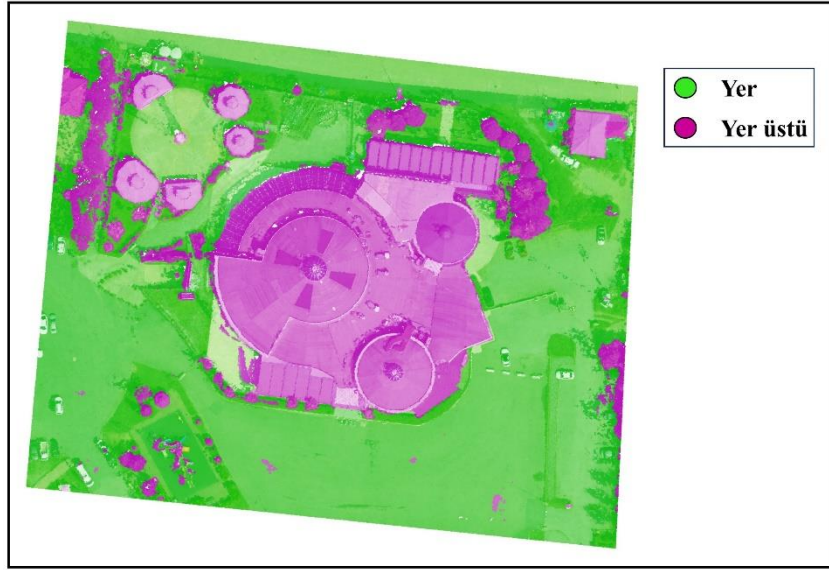
LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutu verilerinden zemin/yer noktalarının çıkarımı amacıyla kullanılan filtreleme yöntemleri; yüzey tabanlı, kümeleme ve bölütleme tabanlı, minimum blok tabanlı ve eğim tabanlı filtreleme olmak üzere dört kategoriye ayrılmaktadırlar. Bu tez çalışmasında yer noktalarının çıkarımı amacıyla SMRF (Simple Morphological Filter) algoritması kullanılmıştır. SMRF algoritması dört temel aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, nokta bulutu içerisinde minimum yüzeyin

tanımlanmasıdır. İkinci aşama, raster veriden elde edilen grid hücrelerinin çıplak arazi ya da nesneler içerdiği bilgisinin minimum yüzeye işlenmesidir. Bu aşamada minimum yüzeye görüntü açma işlemi (erozyon ve genişleme) uygulanır (Şekil 7). Üçüncü aşama, bu gridlenmiş noktalar yardımıyla bir SYM verisinin oluşturulmasıdır. Son aşamada ise, orijinal 3B noktalar ile enterpolasyonlu SYM verisi ilişkilendirilir.



Şekil 7. SMRF morfolojik işlemler (Chen vd., 2021).

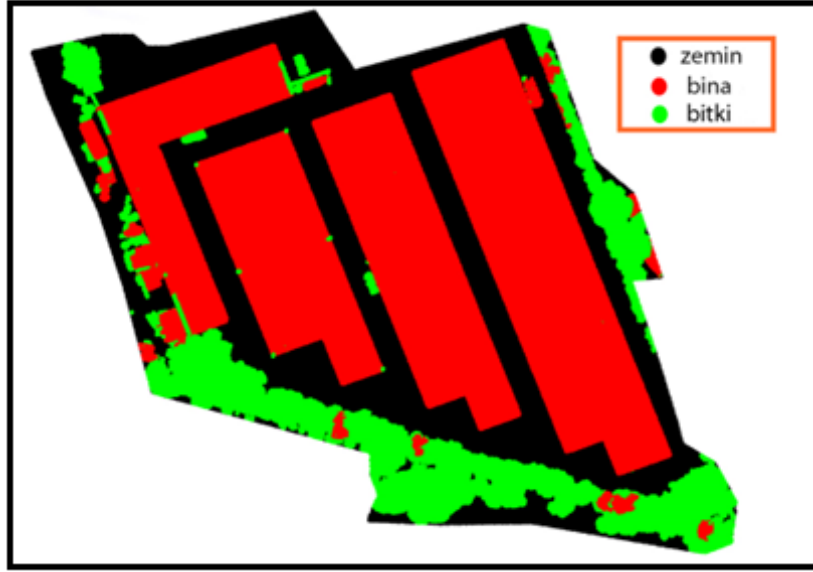
Sonuç olarak SMRF algoritması kullanılarak nokta bulutu verisi, yer ve yer üstü (bitki örtüsü ve bina) noktalar olmak üzere iki sınıfa ayrıştırılır (Şekil 8).



Şekil 8. SMRF sınıflandırma sonucu

1.2.4.2. Nokta Bulutundan Bitki Örtüsü Çıkarımı

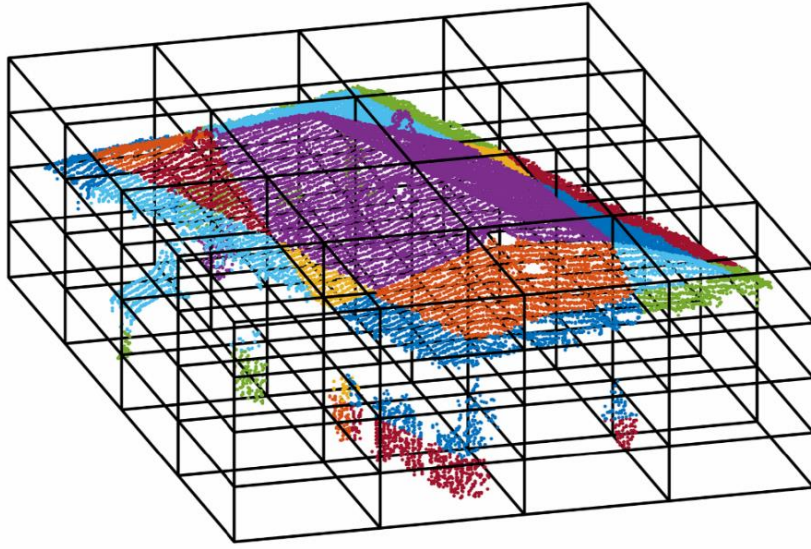
Nokta bulutu verilerine SMRF algoritması uygulandıktan sonra üretilen yer üstü noktaları, bina ve bitki örtüsü olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bina noktaları genellikle düzlemseldir. Bu sebeple binaya ait olabilecek noktalarda eğrilik değişimi ve komşular arasındaki normallerin bağıl farkı oldukça azdır. Bitki örtüsüne ait noktalar ise herhangi bir düzlem ya da bilinen geometrik şekil belirtmeksizin dağınık bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla bitki örtüsü noktalarının eğriliklerinde bina noktalarına göre daha yüksek bir değişim söz konusudur. Yer üstü noktalarını, bitki örtüsü ve bina noktaları olarak ayırabilmek için SMRF algoritmasıyla birlikte MATLAB ortamında “*helperClassify*” adlı bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu fonksiyonun çalışma prensibi nokta bulutu içerisinden hesaplanacak eğrilik (*curveThresh*) ve yüzey normali (*normalThresh*) eşik değerlerine dayanmaktadır. Bu fonksiyona göre, eğer bir noktanın eğriliği, belirlenen eğrilik eşik değerinden küçük ve komşu noktaların normalleri arasındaki kosinüs benzerlik değeri, belirlenen normal eşikten daha büyük ise ilgili nokta, bina noktası olarak etiketlenir. Bu kriterlerin dışında kalan yer üstü noktalar ise bitki örtüsü olarak tespit edilir. Bütün bu işlemler sonucunda nokta bulutu verisi; zemin, bitki örtüsü ve bina noktaları olmak üzere üç sınıfa ayrılır (Şekil 9).



Şekil 9. Yer üstü noktaların sınıflandırılması

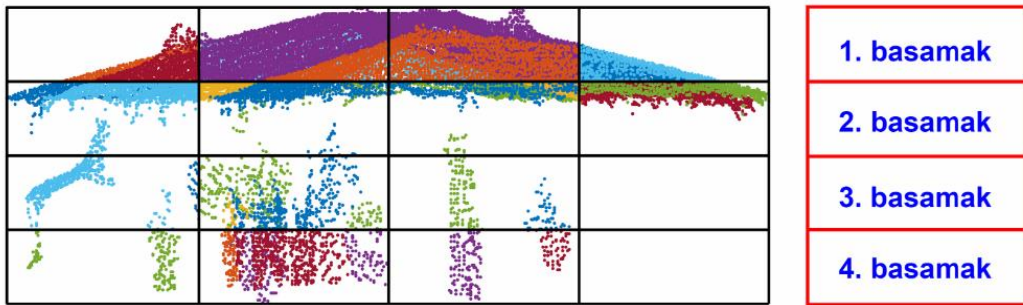
1.2.4.3. Nokta Bulutundan Bina Çatı Detay Çıkarımı

Bina başlangıç sınır geometrisinin çıkarılması için ortogonal görünüşte binayı temsil eden noktaların belirlenmesi gerektiğinden, düşey yönde segmentasyon yapmak suretiyle binaya ait çatı ve yan duvar noktalarının birbirlerinden ayrıştırılarak sadece bina çatısına ait noktaların otomatik olarak elde edilmesi için I-Octree yöntemi (Karşlı, 2022) kullanılmaktadır. Bu yöntemin temeli, girdi olarak kullanılan binalara ait nokta bulutu verilerini sınırlayan ve farklı sayıda eş prizmalar ile bölümlere ayıran bir vokselleme yöntemine dayanmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Octree yöntemi ile vokselleme

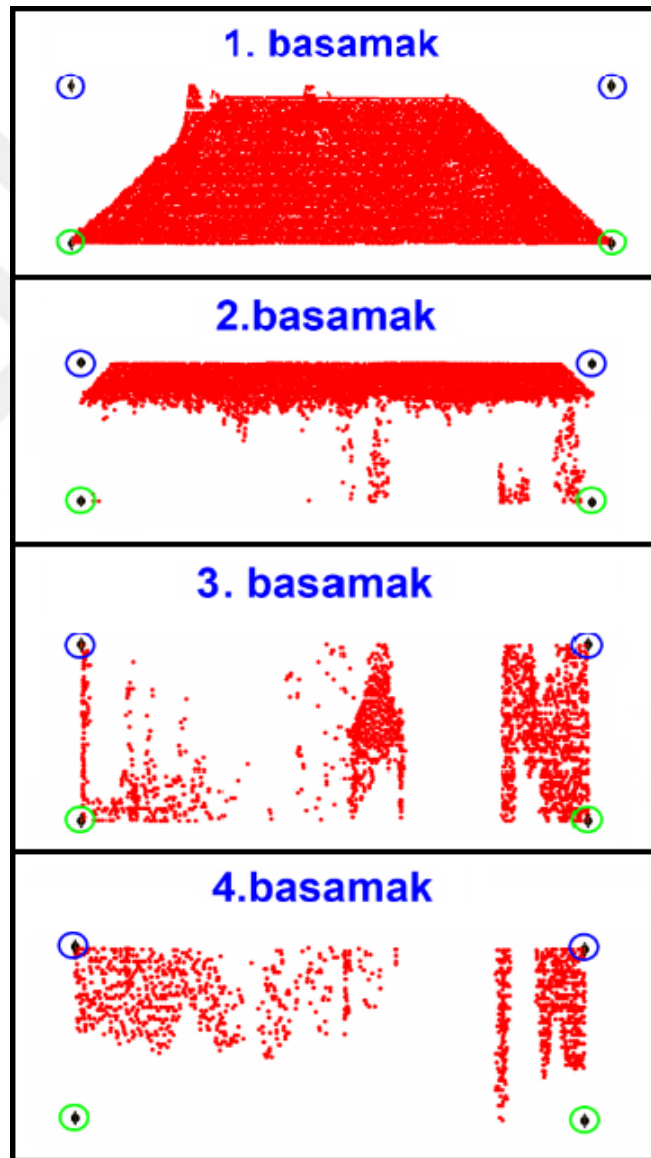
I-Octree yöntemi ile voksellenen nokta bulutu 4 basamağa bölünmektedir (Şekil 11). I-Octree yönteminin kullanılmasındaki temel amaç, girdi olarak kullanılan binaya ait nokta bulutu verisinden sadece bina çatısına ait noktaların çıkarılmasını sağlamaktır. Böylece düzgünleştirme aşamasında çatı dışındaki binaya ait gürültü noktalarının (balkon, klima vb. çıkıntılar) temizlenmesi sağlanacaktır.



Şekil 11. Octree yöntemi ile basamaklara ayırma

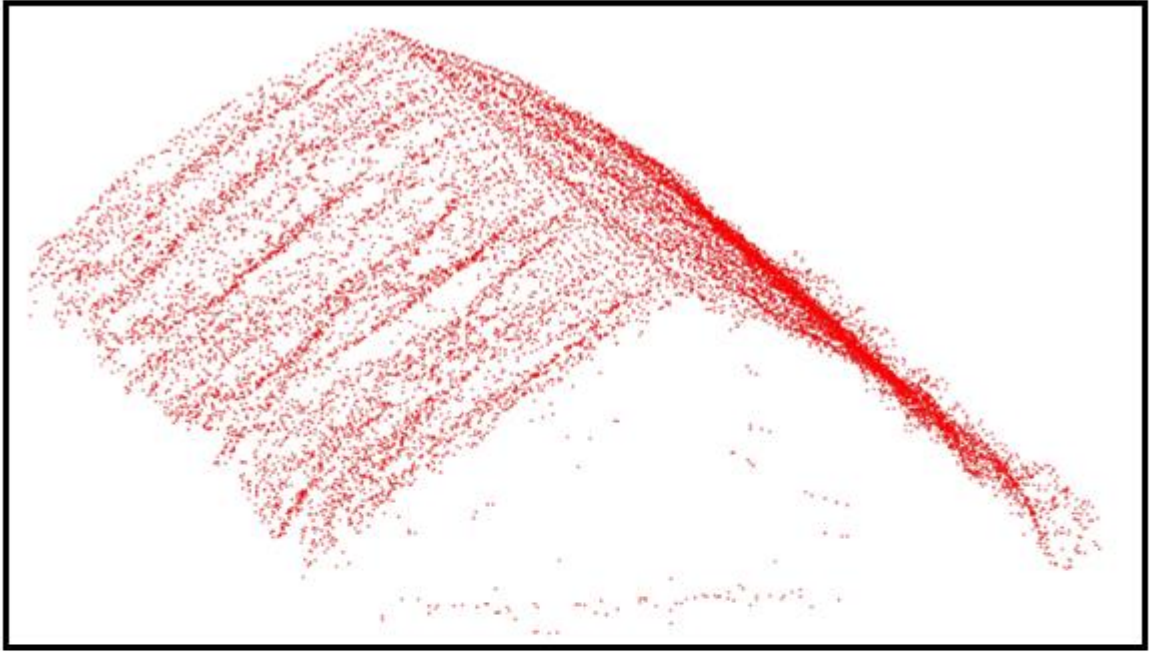
Öncelikle her basamakta bulunan noktaları içeren ve onları sınırlayan en küçük alanlı dörtgen çizdirilir. Bu dörtgenin köşe noktalarını merkez kabul eden 0,1 m yarıçapında çemberler çizdirilir (Şekil 12). İlk basamaktan başlayarak dörtgenin üst iki köşesindeki iki çemberin içinde nokta olup olmadığına bakılır. Eğer nokta bulunmuyorsa bir sonraki

basamağa geçilir ve işlem bu iki çember içinde nokta olana kadar devam ettirilir. Üst iki çember içerisinde noktanın olmaması demek, çatı profilleri de göz önünde bulundurulduğunda çatının belli bir eğimle devam ettiğini göstermektedir. Aksi taktirde üst iki çember içinde noktanın olması, çatının eğiminin sona erdiği ve bina duvarının başladığını göstermektedir. Böylece çemberler içerisinde nokta bulunan basamaktan önceki değerlendirilen basamaklardaki noktalar, çatıya ait noktalar olarak alınır ve düzgünleştirilme aşamasına geçilir.

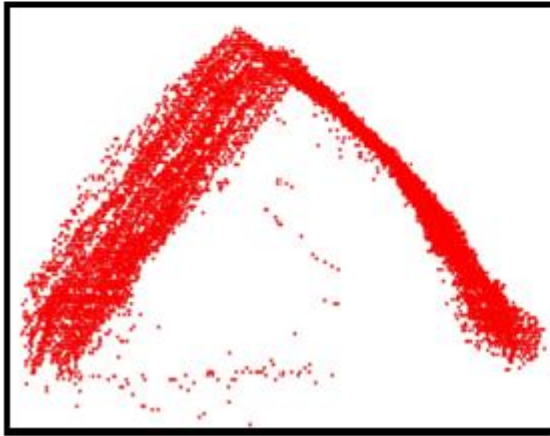


Şekil 12. I-Octree yöntemi ile basamak analizi

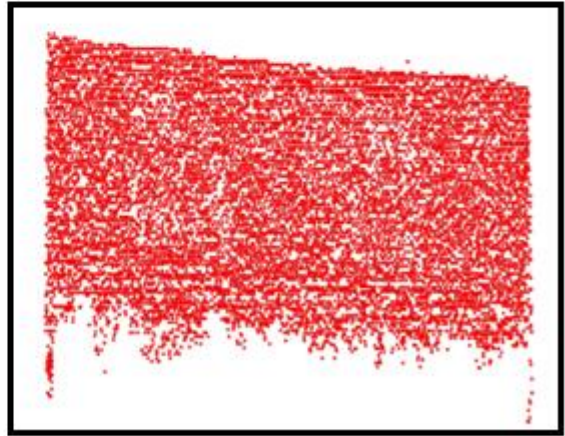
Bina çatılarına uygulanan bu koşullar ile hatalı tespitler yapmamak için binaları farklı cephelerden (X-Z ve Y-Z) ele almak gerekmektedir. Örneğin X-Z profilinden ilk basamakta bina duvarı olarak algılanan basamak, Y-Z profilinden bakıldığında ise çatıya ait noktaları içerebilmektedir (Şekil 13). Bundan dolayı yukarıda belirtilen koşullar, girdi olarak kullanılan binaya ait nokta bulutu verilerine hem X-Z hem de Y-Z profillerine ayrı ayrı uygulanarak çatı noktaları tespit edilebilmektedir.



(a)



(b)

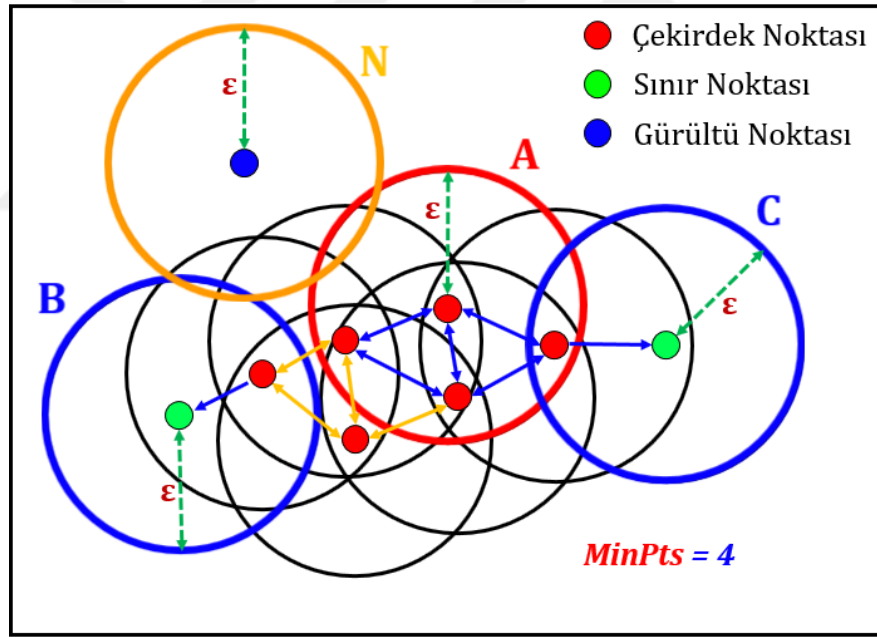


(c)

Şekil 13. I-Octree yöntemi ile farklı profillerden inceleme: a) Bina nokta bulutu b)Y-Z profili c) X-Z profili

1.2.5. DBSCAN Kümeleme Algoritması

DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) algoritması bir noktanın komşuları ile olan mesafelerini hesaplayarak önceden belirlenmiş “*Epsilon*” ve “*Minpts*” parametrelerine göre bu noktanın hangi kümeye ait olduğunu belirlemektedir. *Epsilon* parametresi, bir veri nesnesinin komşularını belirlemek için gerekli olan yakınlık mesafesidir. Algoritma kapsamında bir bölgenin yoğun (küme) olarak adlandırılabilmesi için, epsilon komşuluğunda bulunması gereken en az komşu nokta sayısı ise *MinPts* parametresi ile belirlenir. Algoritma ilk olarak veri setindeki herhangi bir noktanın *Epsilon* mesafesindeki komşu noktalarını bulur. Eğer komşu nokta sayısı önceden algoritmaya girilen *MinPts* değerinden fazla ise bu nokta ve komşu noktaları yeni bir küme oluşturur. DBSCAN algoritmasının çalışma prensibi Şekil 14’te gösterilmiştir.



Şekil 14. DBSCAN algoritması çalışma prensibi

Şekil 14’te görüldüğü üzere epsilon yarıçapındaki çemberler içerisinde, noktanın kendisi de dâhil en az *Minpts* değeri kadar nokta bulunuyorsa ilgili nokta çekirdek noktası olarak tanımlanır. Eğer nokta, çekirdek nokta olma özelliğini sağlamaz ancak herhangi bir çekirdek noktaya erişim sağlayabilirse sınır noktası olarak belirlenir ve birbirlerine göre komşuluk ilişkileri incelenerek çekirdek ve sınır noktaları ortak bir kümeye atanır. Eğer ilgili

noktanın herhangi bir küme ile komşuluk ilişkisi bulunmuyorsa, bu nokta gürültü olarak ayrı bir kümeye atanmaktadır (Ester vd., 1996; T. N. Tran vd., 2013). Böylece veri seti içerisindeki her nokta bir kümeye dahil edilmiş olur.

1.2.6. Bézier Eğrileri

Bézier eğrileri iki boyutlu grafik uygulamalarında, serbest biçimli eğri ve yüzeyleri oluşturmak için farklı amaçlara yönelik kullanılan bir fonksiyondur. Özellikle animasyon, demiryolu güzergahı, otoyol tasarımı, çevre tasarımı, CAD sistemi ve diğer birçok disiplinde oldukça etkin kullanılmaktadır (Maqsood vd., 2021).

Başlangıç, bitiş ve ara noktalar olmak üzere en az 3 nokta ile tanımlanan bu eğriler ilk ve son noktalar arasındaki kontrol noktalarıyla enterpolasyon yapılarak belirlenir (Hussain vd., 2014). Bundan dolayı bu eğrinin şekli, kontrol noktaların hareketiyle değişkenlik gösterebilir. Bézier eğrilerini esas alan eğrilerin temelinde Bernstein polinomu yer almaktadır. Bu polinomun katsayıları, Bézier eğrilerinin kontrol noktalarını oluşturmaktadır. Bernstein polinomu aşağıda gösterildiği gibidir (Eşitlik 2-6).

$$b_0^n(t) = (1 - t)^n(1 - \lambda_1 t) \quad (2)$$

$$b_i^n(t) = t^i(1 - t)^{n-i} \left(\binom{n}{i} + \lambda_i - \lambda_i t - \lambda_{i+1} t \right), \quad i = 1, \dots, \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor - 1 \quad (3)$$

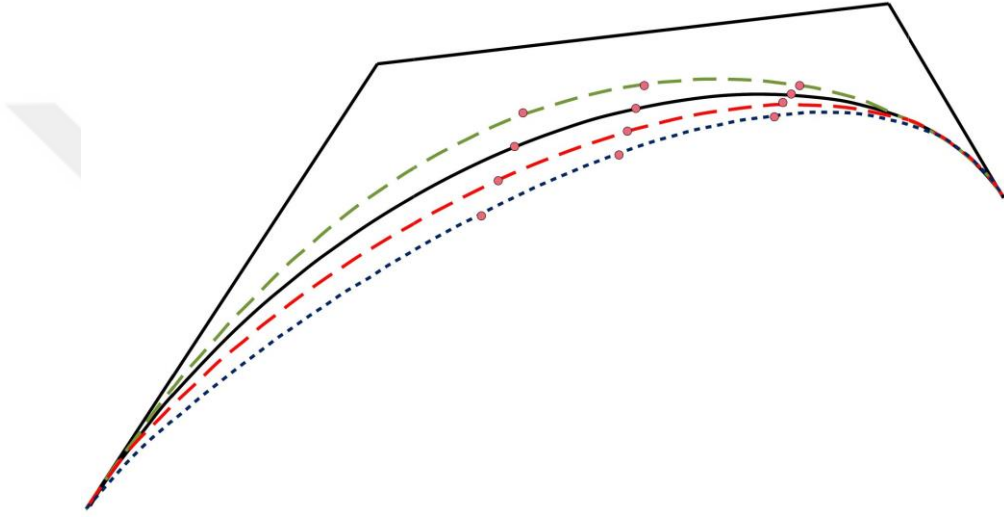
$$b_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor}^n(t) = t^{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} (1 - t)^{n - \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} \left(\binom{n}{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} + \lambda_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} - \lambda_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} t + \lambda_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + 1} t \right) \quad (4)$$

$$b_i^n(t) = t^i(1 - t)^{n-i} \left(\binom{n}{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} + \lambda_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} - \lambda_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor} t + \lambda_{\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + 1} t \right), \quad i = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + 1, \dots, n - 1 \quad (5)$$

$$b_n^n(t) = t^n(1 - \lambda_n + \lambda_n) \quad (6)$$

Burada n ($n \geq 2$, $n \in \mathbb{N}$) Bernstein polinomunun derecesini, λ_i ($i=1, 2, \dots, n$) şekil parametresini ifade etmektedir. Bernstein polinomunun derecesi (n), başlangıç ve bitiş noktası arasında geçirilecek eğrinin nokta sayısını belirlerken, λ_i ($\{\lambda_i\}_{i=1}^n$) şekil parametresi ise polinomun derecesine göre belirlenir ve noktalara en uygun eğrinin geçirilmesini sağlar (Han vd., 2008). Eğer Bernstein polinomunun derecesi 3 olarak seçilirse, başlangıç ve bitiş noktaları arasında 3 noktadan geçecek eğri belirlenir. Bu polinomun derecesine bağlı olarak

λ_i şekil parametresi λ_1 , λ_2 ve λ_3 değerleri ile sınırlandırılır. Şekil 15’de Bernstein polinomunun derecesi 3 ve $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ seçilerek sırasıyla $\lambda_3 = 0$ (düz mavi renkli eğri), $\lambda_3 = -1$ (kesikli kırmızı renkli eğri), $\lambda_3 = -2$ (noktalı mavi renkli eğri) ve $\lambda_3 = 1$ (kesikli yeşil renkli eğri) değerlerinde Bézier eğrisi çizdirilmiştir. Seçilen farklı λ_i şekil parametresine göre ara noktalardan enterpolasyonla geçirilen bu eğriler değişkenlik göstermektedir. Bunun yanı sıra Bézier, sınır noktaları üzerinden geçirilecek en uygun eğrinin derecesine otomatik karar verebilme yeteneğine sahip hızlı ve pratik bir eğri geçirme yaklaşımıdır.



Şekil 15. Farklı λ_i değerlerinde Bézier eğrileri

1.2.7. Doğruluk Değerlendirmesi

Bina sınır düzgünleştirme yöntemlerinin doğruluk değerlendirilmesi için çalışma alanlarını kapsayan LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu verisinden düzgünleştirilen ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina sınırları ile aynı bölgeyi içeren referans verilerinin piksel ve nokta bazlı yöntem ile karşılaştırılması gerekmektedir. Karşılaştırmada yöntemlerin uygulanması sonucu üretilen geometrik sınırların gerçek sınırlara hangi ölçekteki harita doğruluğu nispetinde uyum sağladığı incelenecektir. Doğruluk değerlendirilmesi için literatürde yaygın olarak kullanılan piksel bazlı doğruluk ölçütleri ve geliştirilen nokta tabanlı doğruluk analizi yöntemleri kullanılacaktır.

Piksel tabanlı doğruluk analizi için tamlık (6), doğruluk (7) kalite (8) ve F-skor (9) metrikleri kullanılacaktır. Bu doğruluk analizi yönteminde girdi verisi olarak, önerilen

yöntemden elde edilen sonuç ve referans bina alanları için piksel boyutu ve çözünürlüğü aynı olacak şekilde üretilen ikili (binary) formatta görüntü verileri kullanılmaktadır. Doğruluk analizi için Doğru Pozitif (DP), Doğru Negatif (DN), Yanlış Pozitif (YP) ve Yanlış Negatif (YN) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. F-skor değeri ise doğruluk ve tamlık metriklerinin harmonik ortalaması olarak tanımlanmaktadır.

$$\text{Tamlik} = \frac{|DP|}{|DP|+|YN|} \quad (6)$$

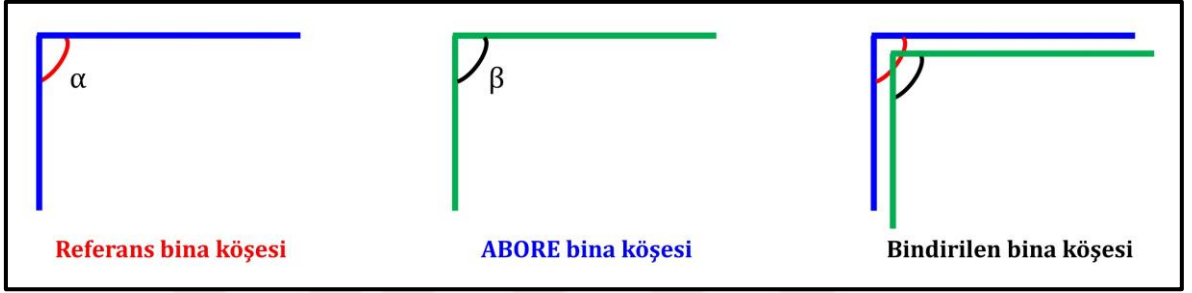
$$\text{Doğruluk} = \frac{|DP|}{|DP|+|YP|} \quad (7)$$

$$\text{Kalite} = \frac{|DP|}{|DP|+|YN|+|YP|} \quad (8)$$

$$\text{F - skor} = \frac{|DP|}{|DP|+\frac{1}{2}(|YN|+|YP|)} \quad (9)$$

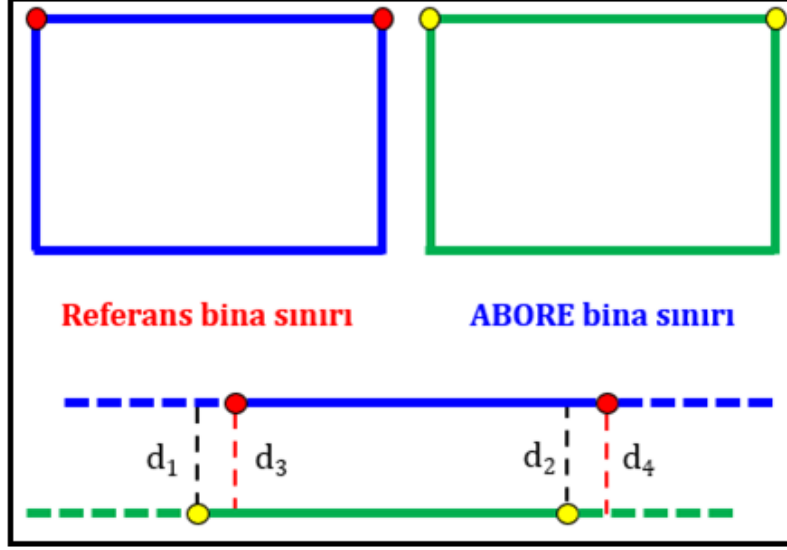
İyileştirilmiş nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesi piksel tabanlı doğruluk değerlendirmesine alternatif olarak tez çalışma kapsamında geliştirilmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde temel alınan kriter, noktaların X ve Y koordinatları için RMSE değerleridir. Bu değer ile bulunan bina köşe noktası ile referans verideki aynı köşeye denk gelen nokta arasındaki uzaklığın incelenmesi amaçlanmaktadır. Ancak bulunan RMSE değeri köşe noktası ile referanstaki noktanın birbirlerine göre konumları hakkında bilgi içermemektedir. Dey ve Awrangjeb (2020), nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde daha fazla bilginin değerlendirmeye katılarak daha doğru sonuçların elde edilebilmesi için X ve Y koordinatların RMSE değerlerine ek olarak, düzgünleştirilen binalara ait köşelerin açısallık değerleri ve kenarların paralellik durumlarını da değerlendirme aşamasına dahil etmişlerdir. Ancak önerilen yaklaşım incelendiğinde dahil edilen bu kriterlerin yeterli olmayacağı düşünülmektedir. Örneğin önerilen yaklaşımda referans veride bulunan ortogonal bina köşeleri 90° esas alınarak değerlendirme yapılmaktadır. Bu durumda referans verideki ölçümden kaynaklı hataların veya planda ortogonal olarak tasarlanan köşenin gerçekte ortogonal olarak yapılamaması durumları göz önünde bulundurulmamaktadır. Bu ve benzeri durumlar düşünülerek, tez çalışması kapsamında Dey ve Awrangjeb (2020), tarafından önerilen yaklaşım revize edilmiş ve doğruluk değerlendirmesine dahil edilecek bazı kriterler eklenerek doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. İlk olarak Dey ve Awrangjeb (2020),

tarafından önerilen yaklaşımdaki köşe noktalarının açısal değerleri kıyaslama aşamasında olduğu gibi referanstaki köşe noktasının açı değeri 90° olarak alınması yerine tekrardan köşe noktasındaki kırılma açısı hesaplanmış ve bulunan değer ile düzgünleştirme sonrasındaki elde edilen köşe noktasındaki kırılma açı değeri ile kıyaslanmıştır (Şekil 16). Böylece gerçekte var olan bina sınırı ile kıyaslama yapılarak daha etkili sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 16. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde açısal değerlerin irdelenmesi

Sonraki aşama olarak düzgünleştirilen bina sınırlarındaki kenarların referans veride karşılık geldiği kenarlara göre paralellik durumları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle düzgünleştirilen bina sınırından alınan herhangi bir kenarın iki ucundaki köşe noktalarının referans veride karşılık geldiği kenara olan uzaklıkları hesaplanır. Aynı işlem referanstaki kenarın iki ucundaki köşe noktalarının düzgünleştirilmiş bina sınırındaki karşılık geldiği kenara olan mesafeleri hesaplanır (Şekil 17).

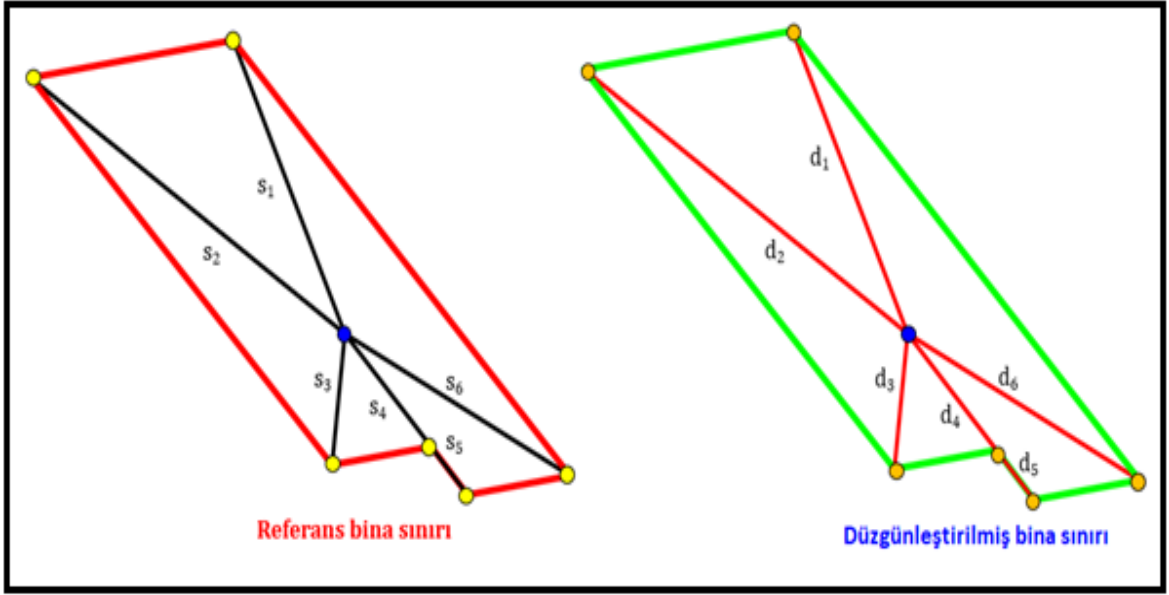


Şekil 17. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde paralellik durumunun irdelenmesi

Düzgünleştirilen bina sınırlarında karşılıklı olarak hesaplanan bu uzunluk değerlerinin birbirlerine eşit veya çok yakın olması beklenir. Aksi taktirde karşılıklı olarak hesaplanan bu değerlerin birbirlerinden oldukça farklı çıkması düzgünleştirilen o kenarın gerçeğe uygun olmadığını göstermektedir.

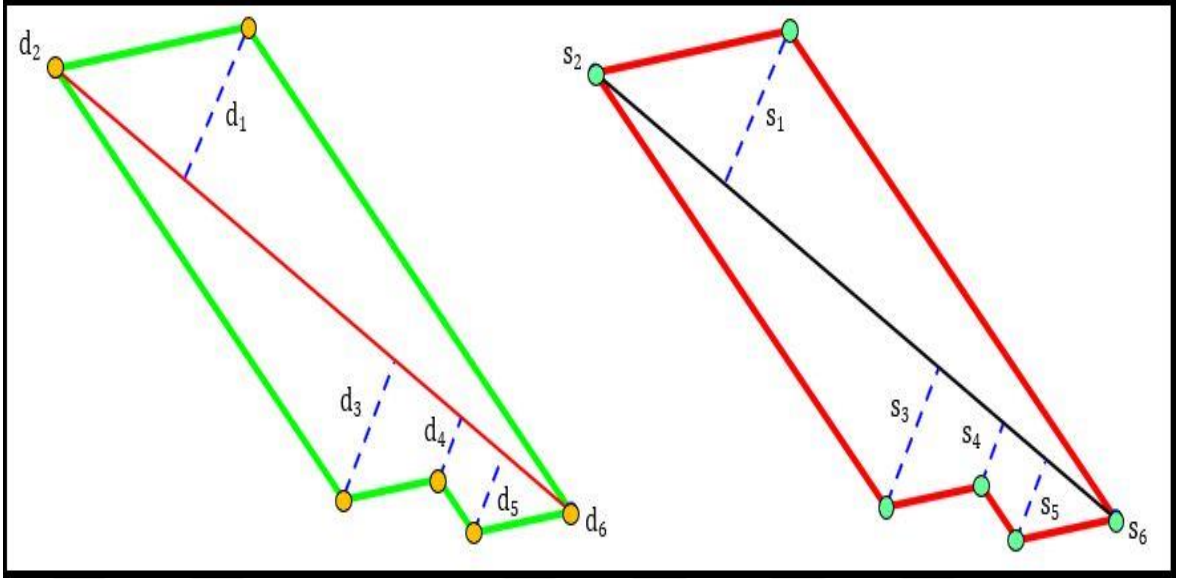
Kenarların paralellik kriterinden sonra incelenecek bir diğer durum, kenarların uzunluk değerlerinin irdelenmesidir. Bu amaçla düzgünleştirilen bina sınırından alınan herhangi bir kenarın uzunluğu ile referans veride karşılık geldiği kenarın uzunluk değerleri kıyaslanır. Eğer bu kenarların uzunluk değerleri birbirlerine eşit veya çok yakın olursa düzgünleştirilen kenar yüksek doğrulukta temsil edilmektedir. Düzgünleştirilen kenarın uzunluğu referanstaki kenara göre büyük ya da küçük olması sadece kenar hakkında değil, aynı zamanda o kenarı temsil eden iki köşe noktasının konumları hakkında da bilgi vermektedir.

Nokta bazlı doğruluk değerlendirmesinde noktaların konumları hakkında daha fazla bilgi elde etmek için düzgünleştirilen bina ile referans veride karşılık gelen binanın köşe noktalarının, referanstaki binanın ağırlık merkezi noktasına olan mesafeleri ayrı ayrı hesaplanır (Şekil 18).



Şekil 18. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde ağırlık merkezine olan öklid mesafelerin irdelenmesi

Ağırlık merkezi noktasının köşe noktaları dışında bir nokta olması ve geometrik olarak köşe noktalarından belirli bir uzaklıkta bulunması köşe noktalarının irdelenmesine yeni bir koşul olarak eklenmiştir. Son olarak düzgünleştirilen bina ve referans veride karşılık gelen binanın köşe noktalarının, referanstaki binanın sınır noktalarından birbirine en uzak olan iki nokta belirlenerek çizdirilen doğru parçasına olan öklid mesafeleri ayrı ayrı hesaplanır (Şekil 19). Bu doğru parçasına olan öklid mesafelerin birbirlerine eşit veya çok yakın çıkması beklenmektedir.

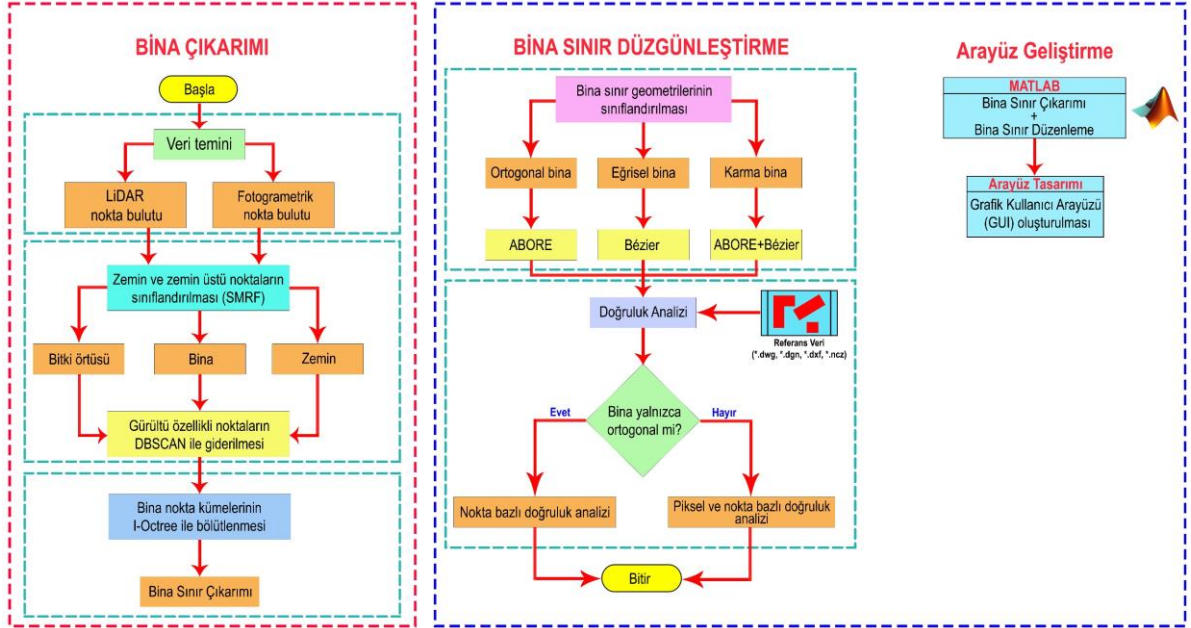


Şekil 19. Nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde en uzun doğru parçasına olan mesafelerin irdelenmesi kriteri

Sonuç olarak çalışma kapsamında kritize edilen tüm koşullar irdelenerek her bir adım sonucunda RMSE değerleri hesaplanır ve noktaların konumları değerlendirmeye dahil edilerek nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesi yapılmaktadır. Elde edilen değerler bulgular kısmında ayrıntılı bir şekilde irdelenecektir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında, LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilmiş nokta bulutu verilerinden, geleneksel ve bilinen detay çıkarım yöntemleriyle tespit edilmiş ortogonal, eğrisel ve karma geometrili binaların ana hatlarının/sınırlarının nokta bulutu harici herhangi bir ek veriye ihtiyaç duyulmadan, otomatik olarak düzgünleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca düzgünleştirme için yeni bir yaklaşım önerilmiş ve bu yaklaşım kullanıcı dostu bir arayüze dönüştürülmüştür. Önerilen yaklaşım ile gerçekleştirilen çalışmaya ait yöntem şeması Şekil 20’de gösterilmektedir.



Şekil 20. Önerilen yöntem şeması

Tez çalışması Şekil 20’de gösterildiği üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada çalışma alanlarına ait nokta bulutu verilerinden bina detaylarının çıkarılması yer almaktadır. İkinci aşama tez çalışmasının ana hedefi olan ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina çatı sınırlarının düzgünleştirilmesi aşamasıdır. Son aşama ise, çalışma kapsamında önerilen yöntemin kullanıcı dostu bir arayüze dönüştürülmesidir.

2.1. Çalışma Alanları

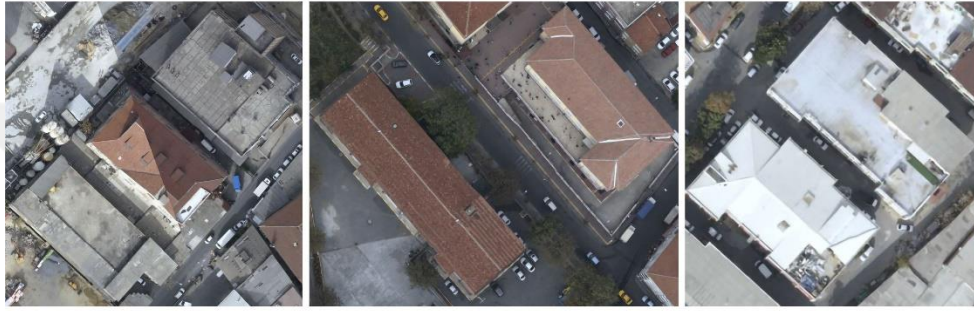
Çalışma kapsamında geliştirilen yöntemin test edilebilmesi için içerisinde kendilerine özgü mimari ve geometrik yapıda ortogonal, eğrisel ve karma geometrili binaların yer aldığı farklı veri türü ve yoğunluğa sahip nokta bulutu verilerinin olduğu, on farklı çalışma alanı seçilmiştir. LiDAR veya fotogrametrik veri setlerinden bir kısmı kamu/özel kurum veya kuruluşlardan tedarik edilmiştir. Bazı çalışma alanlarına ait fotogrametrik nokta bulutu verileri halihazırda mevcut İHA ile fotoğraf çekimleri yapılarak üretilmiştir. LiDAR nokta bulutu verileri direkt elde ediliyorken, fotogrametrik nokta bulutu üretimi için ticari nokta bulutu üretim yazılımlarından faydalanılmıştır. Her iki sistem ile üretilen nokta bulutu verileri analiz edilmek üzere *.las veya *.laz formatına çevrilmiştir. Önerilen yöntemin iki farklı veri setinde ve içerdikleri farklı geometriye sahip binalarda etkili sonuçlar elde ettiğinin gösterilmesi amacıyla, çalışma alanları farklı yerlerde ve sayı olarak fazla seçilmiştir. Özellikle karma yapıdaki binaların bulunduğu çalışma alanı içinde farklı geometri ve planlama ilkelerine göre inşa edilmiş binaların varlığı, önerilen yaklaşımın doğruluğu ve başarısının test edilebilmesi açısından önem arz etmektedir. Bundan dolayı, çalışma alanları içerisinde mevcut olan ortogonal, eğrisel ve karma (ortogonal+eğrisel) bina geometrilerine göre veri setleri sınıflandırılarak üç başlık altında gruplandırılmıştır.

2.1.1. Ortogonal Geometrili Binaları İçeren Çalışma Alanları

Tez çalışması kapsamında, ortogonal geometrili binalarda önerilen düzgünleştirme yöntemini test etmek için Kaliforniya (ABD), İstanbul (Türkiye), Elâzığ (Türkiye) ve Erzurum (Türkiye) olmak üzere dört farklı çalışma alanı seçilmiştir (Şekil 21-22). Kaliforniya ve İstanbul çalışma alanları için hava LiDAR ile direkt toplanan nokta bulutu verisi kullanılırken, Elâzığ ve Erzurum çalışma alanlarında sırasıyla klasik dijital fotogrametrik kamera ve İHA tabanlı dijital kamera ile görüntüler tedarik edilmiş ve görüntü eşleştirme yöntemiyle 3B nokta bulutu verisi üretilerek kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 21. Ortogonal geometrili binalar için LiDAR veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Kaliforniya ve b) İstanbul.



(a)



(b)

Şekil 22. Ortogonal geometrili binalar için fotogrametrik veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Elâzığ, b) Erzurum

Ortogonal geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri ile ilgili bilgiler Tablo 2’de gösterilmektedir. Bu çalışma alanlarındaki LiDAR veri setlerinin nokta yoğunlukları 3,58-36,96 (nokta/m²) arasında iken, fotogrametrik veri setlerinin nokta yoğunlukları 49,50-171,81 (nokta/m²) arasında değişmektedir.

Tablo 2. Ortogonal geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri

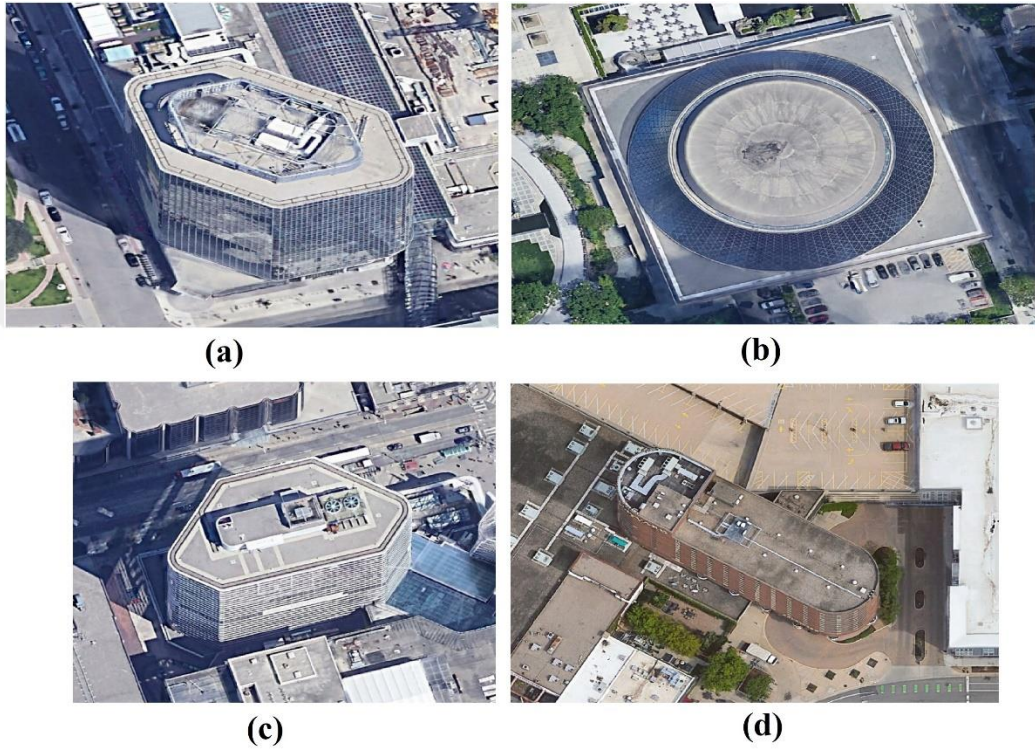
Çalışma Alanı	Nokta Yoğunluğu (nokta/m ²)	Veri Türü (nokta bulutu)	Bina Sayısı	Enlem	Boylam
Kaliforniya	3,58	LiDAR	15	38° 0'2.93"K	122° 2'28.01"B
İstanbul	36,96	LiDAR	7	41° 3'7.95"K	28°54'32.31"D
Elâzığ	49,50	Fotogrametrik	12	38°43'34.01"K	40° 7'40.35"D
Erzurum	171,81	Fotogrametrik	6	40° 2'35.48"K	42°10'21.40"D

Kaliforniya çalışma alanında seçilen binalar birbirlerine yakın konumlarda ve dört ila yirmi iki arasında değişkenlik gösteren köşe sayısına sahiptirler. Bu çalışma alanında iki farklı bölgeden seçilen bazı binaların kenar uzunlukları yaklaşık olarak 110 m iken bazılarının kenar uzunluğu yaklaşık 3 m olarak ölçülmüştür. İstanbul çalışma alanında aynı veri setinde üç farklı bölgeden bina tipleri seçilmiştir. Bu veri seti için seçilen binaların köşe sayısı dört ila on iki arasında değişkenlik gösterir. Ayrıca seçilen bu binalar 1-2 m arasında değişen kısa kenarlara sahiptirler. Elâzığ çalışma alanında, üç farklı bölgeden binalar yer almakta olup, binaların yükseklikleri 3-4 m arasında değişen alçak binalardan oluşmaktadır. Bu bölge, az katlı binaları içeren eğimli bir bölgedir. Erzurum çalışma alanında ise iki farklı bölgeden binalar yer almaktadır. Seçilen dört farklı çalışma alanı, geliştirilen yöntemin farklı veri türlerinde, değişken bina yüksekliği ve kenar uzunluklarına sahip binalarda etkin sonuçlar üretebildiğini test etmek için seçilmiştir.

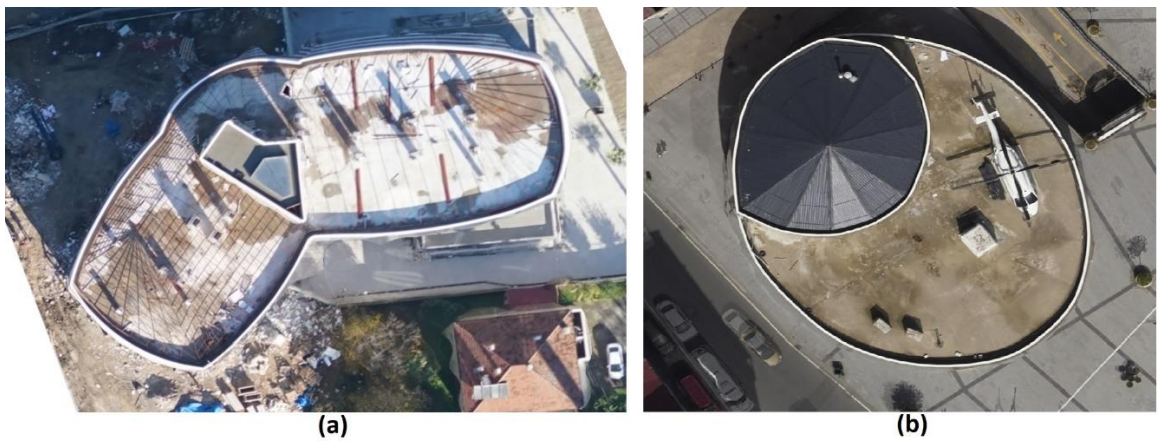
2.1.2. Eğrisel Geometrili Binaları İçeren Çalışma Alanları

Tez çalışması kapsamında, eğrisel geometrili binalarda önerilen düzgünleştirme yöntemini test etmek için Toronto (Kanada), Minnesota (ABD), Samsun (Türkiye) ve Rize (Türkiye) olmak üzere dört farklı çalışma alanı seçilmiştir (Şekil 23-24). Toronto ve

Minnesota çalışma alanları için hava LiDAR ile doğrudan elde edilen nokta bulutu verisi kullanılırken, Samsun ve Rize çalışma alanlarında İHA tabanlı dijital kamera ile görüntüler tedarik edilmiş ve görüntü eşleştirme yöntemiyle dolaylı olarak nokta bulutu verisi üretilmiş ve kullanılmıştır.



Şekil 23. Eğrisel geometrili binalar için LiDAR veri setlerini içeren çalışma alanları: a, b ve c) Toronto ve d) Minnesota



Şekil 24. Eğrisel geometrili binalar için fotogrametrik veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Samsun b) Rize

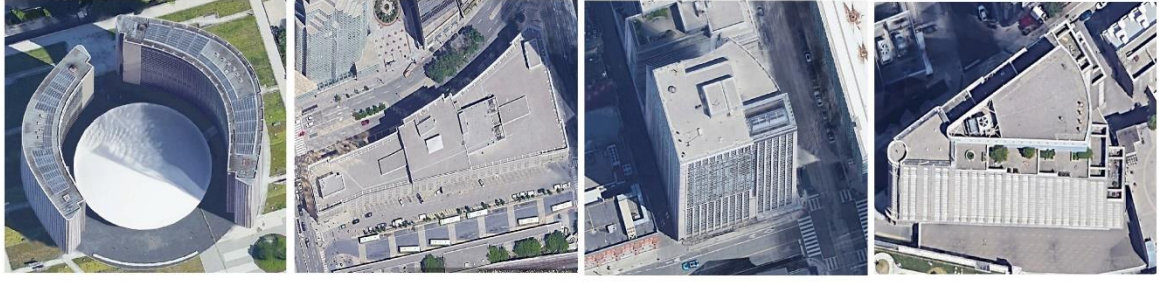
Eğrisel geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri ile ilgili bilgiler Tablo 3'te gösterilmektedir. Bu çalışma alanlarındaki LiDAR veri setlerinin nokta yoğunlukları 3,45-10,66 (nokta/m²) iken fotogrametrik veri setlerinin nokta yoğunlukları 22,32-63,82 (nokta/m²) arasında değişmektedir.

Tablo 3. Eğrisel geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri

Çalışma Alanı	Nokta Yoğunluğu (nokta/m ²)	Veri Türü (nokta bulutu)	Bina Sayısı	Enlem	Boylam
Toronto	3,45	LiDAR	3	43°38'47.83"K	79°23'10.93"B
Minnesota	10,66	LiDAR	1	44°58'24.93"K	93°14'51.07"B
Samsun	22,32	Fotogrametrik	1	41°21'53.65"K	36°13'46.54"D
Rize	63,82	Fotogrametrik	1	41° 1'32.46"K	40°30'57.49"D

2.1.3. Karma Geometrili Binaları İçeren Çalışma Alanları

Tez çalışması kapsamında, karma geometrili binalarda önerilen düzgünleştirme yöntemini test etmek için Toronto (Kanada), Sao Paulo (Brezilya), Minnesota (ABD), Samsun (Türkiye), Rize (Türkiye) ve Iğdır (Türkiye) olmak üzere altı farklı çalışma alanı seçilmiştir (Şekil 25-26). Toronto, Sao Paulo ve Minnesota çalışma alanlarında hava LiDAR ile doğrudan elde edilen nokta bulutu verisi kullanılırken, Samsun, Rize ve Iğdır çalışma alanlarında İHA tabanlı dijital kamera ile görüntüler tedarik edilmiş ve görüntü eşleştirme yöntemiyle 3B nokta bulutu verisi üretilmiş ve kullanılmıştır.



(a)

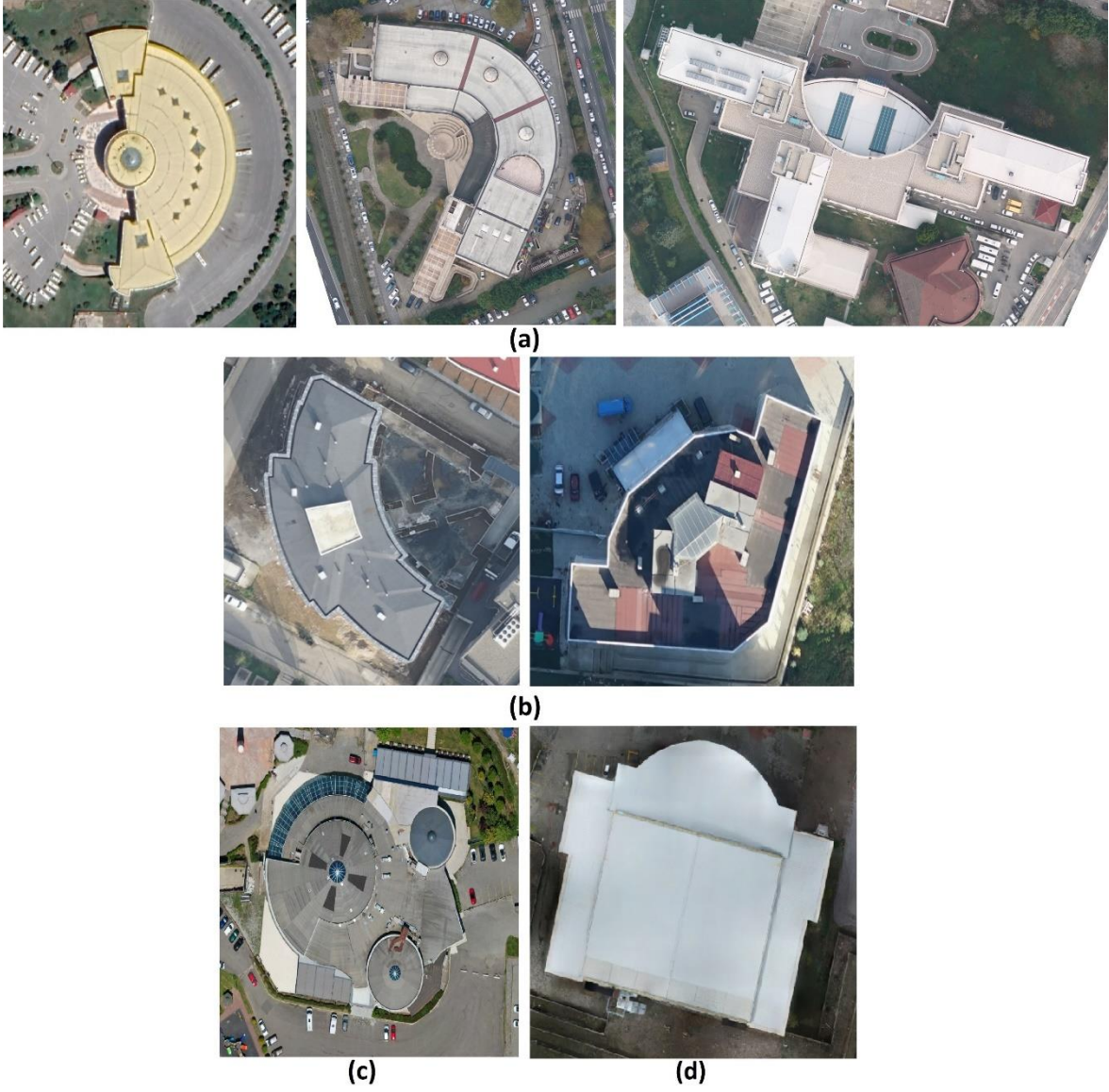


(b)



(c)

Şekil 25. Karma geometrili binalar için LiDAR veri setlerini içeren çalışma alanları: a) Toronto, b) Sao Paulo ve c) Minnesota



Şekil 26. Karma geometrili binalar için fotogrametrik veri setlerini içeren çalışma alanları:
a-b) Samsun, c) Rize ve d) Iğdır

Karma geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri ile ilgili bilgiler Tablo 4’te gösterilmektedir. Bu çalışma alanlarındaki, LiDAR veri setlerinin nokta yoğunlukları 3,45- 10,83 (nokta/m²) iken fotogrametrik veri setlerinin nokta yoğunlukları 22,32-150,93 (nokta/m²) arasında değişmektedir. Eğrisel ve karma geometrili binalar ortogonal geometrili binalara nazaran daha az sıklıkta inşa edildiğinden binalar çalışma alanlarının farklı bölgelerinden seçilmiştir.

Tablo 4. Karma geometrili binaların bulunduğu çalışma alanlarına ait veri setleri

Çalışma Alanı	Nokta Yoğunluğu (nokta/m ²)	Veri Türü (nokta bulutu)	Bina Sayısı	Enlem	Boylam
Toronto	3,45	LiDAR	4	43°39'12.48"K	79°23'2.36"B
Sao Paulo	9,15	LiDAR	3	22° 6'58.21"G	51°24'25.69"B
Minnesota	10,83	LiDAR	3	44°58'41.99"K	93°13'43.73"B
Samsun	22,32	Fotogrametrik	5	41°17'14.09"K	36°17'21.74"D
Rize	63,82	Fotogrametrik	1	41° 1'35.78"K	40°31'35.66"D
Iğdır	150,93	Fotogrametrik	1	39°48'7.90"K	44° 4'21.59"D

2.2. Kullanılan Kamera/LiDAR Sistemleri ve Üretilen Veriler

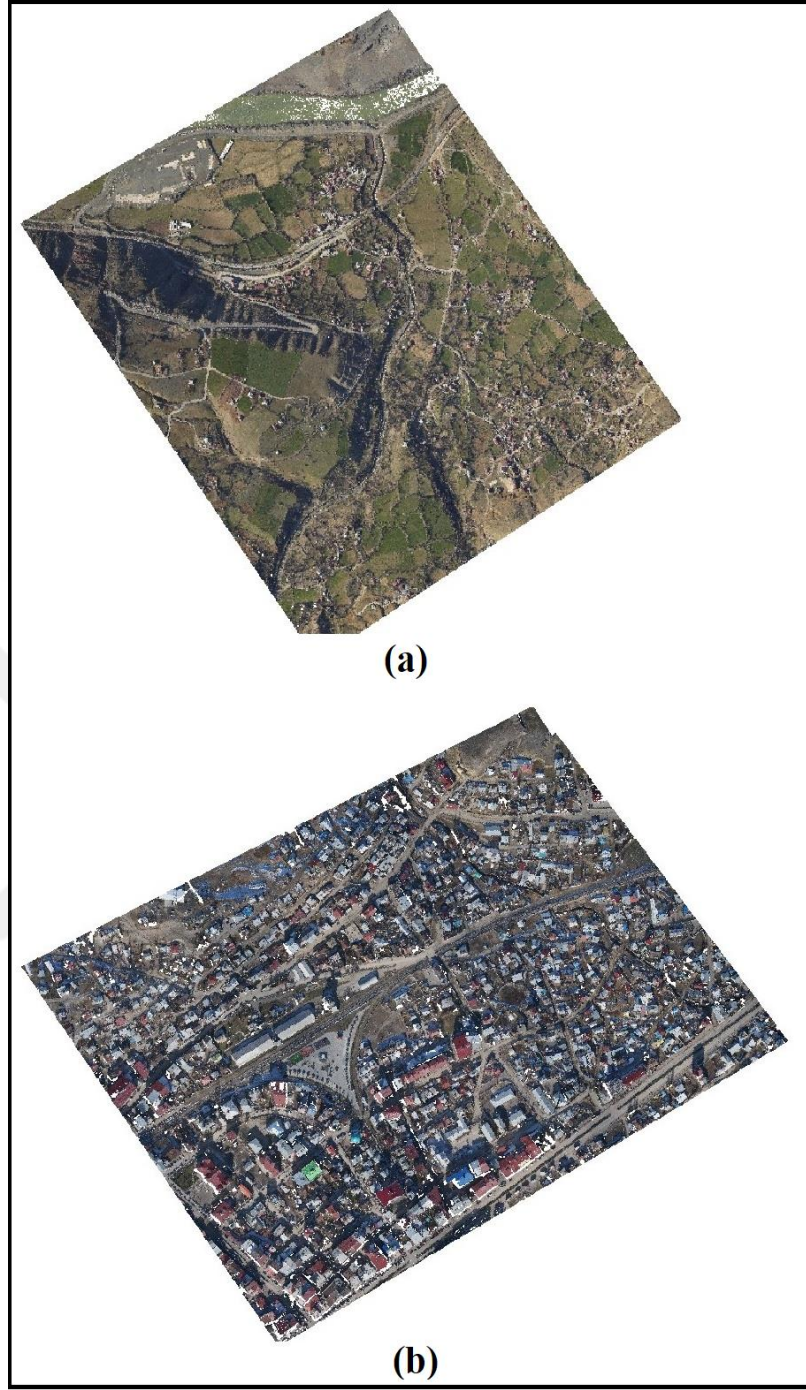
Tez çalışmasında on farklı test alanı için kullanılan nokta bulutu veri setleri, hava ve İHA tabanlı dijital kameralar ve LiDAR sistemleri kullanılarak üretilmiştir. Sözü edilen kamera ve LiDAR sensörleri ile uçuşa ilişkin bilgiler Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Kamera ve LiDAR sistem özellikleri

Ölçü Sistemi/Özellik	Sensör	Piksel Boyutu (µm)	YÖA (cm)	Uçuş Yüksekliği (m)	Bindirme Oranları
Kaliforniya	OPTECH Galaxy T1000	-	-	1400	-
Minnesota	Leica Geo. ALS50	-	-	500	-
Toronto	ALTM-Orion M	-	-	650	-
Sao Paulo	RIEGL LMS-Q680i	-	-	550	-
İstanbul	RIEGL LMS-Q680i	-	-	500	-
Elâzığ	Phase One iXM-RS15	3,76	9	1175	65/25
Erzurum	Sony RX1R II	4,50	5	400	80/70
Samsun	Sony RX1R II	4,50	6,85	500	80/70
Rize	Phase One iXM-100	3,76	4,70	450	70/60
Iğdır	Sony FC6310R	2,41	1,15	45	80/70

2.3. Çalışma Alanlarına Ait 3B Nokta Bulutlarının Üretilmesi

Tez kapsamında seçilen çalışma alanlarındaki veri setleri LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutlarından oluşmaktadır. LiDAR sistemleri ham 3B nokta bulutu verilerini direkt olarak üretebilmektedirler. Bundan dolayı ilave bir işlem adımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Çalışma kapsamında Elâzığ, Erzurum, Samsun, Rize ve Iğdır illerindeki çalışma alanlarını kapsayan bölgelerde fotogrametrik 3B nokta bulutu ve ortofoto üretilmiştir. 3B nokta bulutu üretim yöntemleri kısmında bahsedildiği üzere, nokta bulutu üretimi amacıyla açık kaynak/ticari olmak üzere birçok yazılım mevcuttur. Çalışma kapsamında, görüntü eşleştirme tabanlı nokta bulutu üretimi için Agisoft Metashape yazılımı kullanılmıştır. İlgili yazılımın matematiksel modeli, detay çıkarma yaklaşımı Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) eşleştirme algoritmasına dayanmaktadır. Nokta bulutu üretim aşamasında klasik dijital fotogrametrik kameralar kullanılan Elâzığ ve Rize çalışma alanlarında iç ve dış yöneltme parametrelerinin programa manuel girişi sağlanırken, İHA tabanlı dijital kameralar kullanılan Erzurum, Samsun ve Iğdır çalışma alanlarında bu parametreler görüntüler ile birlikte programa otomatik olarak yüklenmiştir. Ardından en yüksek doğruluk ayarlarında nokta seçimi ve nokta eşleştirme aşamaları uygulanarak çalışma alanlarına ait yüksek yoğunlukta fotogrametrik nokta bulutları üretilmiştir (Şekil 27).



Şekil 27. Fotogrametrik nokta bulutu: a) Elâzığ, b) Erzurum

2.4. Zemin Çıkarımı

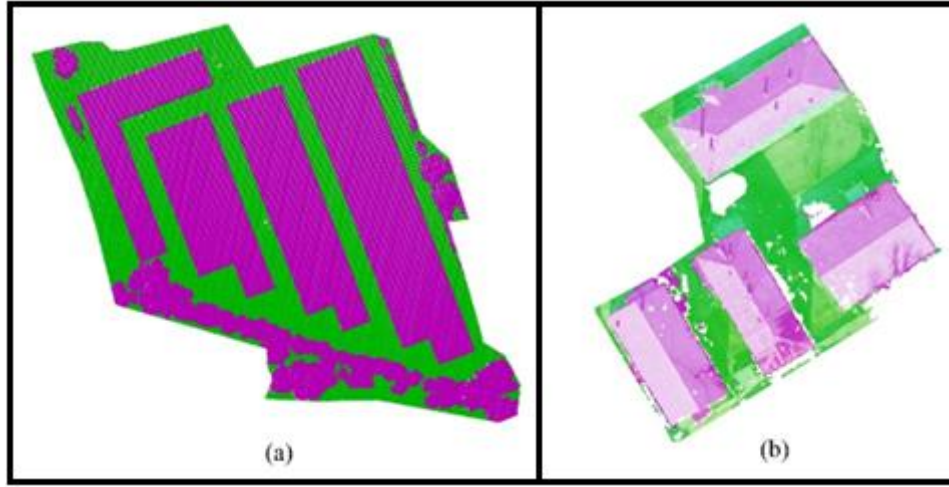
Tez çalışması kapsamında, LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutu verilerini yer ve yer üstü (bitki örtüsü ve bina) noktalar olarak sınıflandırmak için SMRF algoritması kullanılmıştır. Yer ve yer üstü sınıflandırma işlemi için öncelikle nokta bulutu

veri setleri MATLAB ortamında üç boyutlu olarak görsel hale getirilmiştir. Ardından MATLAB yazılımında bulunan ve SMRF algoritmasını esas alan “*segmentGroundSMRF*” fonksiyonu kullanılarak nokta bulutu, yer ve yer üstü noktalar olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Bu fonksiyon girdi parametresi olarak; yapılandırma elemanının maksimum yarıçapı (Max Window Radius), zemin dışı elemanları tanımlamak için eğim eşiği (Slope Threshold), zemin dışı noktaları belirlemek için yükseklik eşiği (Elevation Threshold) ve yükseklik eşiği ölçekleme faktörü (Elevation Scale) olan bu dört farklı parametreyi kullanmaktadır. Bu parametreler girdi olarak kullanılan veri setlerinin türleri, yoğunlukları, yükseklik farkları vb. kriterlere göre değişkenlik göstermektedir. Çalışma kapsamında, her iki veri türünde yükseklik eşiği ölçekleme faktörü sabit tutulmuş, yapılandırma elemanının maksimum yarıçapı, eğim eşiği ve yükseklik eşiği parametreleri LiDAR ve fotogrametrik veri setlerine göre farklı değerler olarak belirlenmiştir. Değişkenlik gösteren bu parametrelerin veri seti türlerine göre ortalama değerleri Tablo 6’da gösterilmektedir.

Tablo 6. Veri türlerine göre SMRF algoritmasının girdi parametreleri

Veri Türü (nokta bulutu)	Yapılandırma elemanının maksimum yarıçapı (cm)	Eğim eşiği	Yükseklik eşiği (m)	Yükseklik eşiği ölçekleme faktörü
LiDAR	20-30	0,05-0,15	3-6	1,25
Fotogrametrik	20-50	0,05-0,3	3-6	1,25

Tablo 6’da gösterilen bu değerler, sabit tutulan yükseklik eşiği ölçekleme faktörü dışındaki diğer değerlerin kombinasyonlu denemeleri yapılarak çalışma alanlarına en uygun değerler olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak SMRF algoritmasında belirlenen bu dört parametre girdi olarak kullanılmış, LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutu verileri yer ve yer üstü (bitki örtüsü ve bina) noktalar olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Şekil 28’de veri setlerindeki yeşil renkli bölgeler yer noktalarını gösterirken, mor renkli noktalar yer üstü noktalarını temsil etmektedir. Ön hazırlık aşamaları olan zemin, bitki örtüsü ve bina çatı detay çıkarım aşamalarında LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu içeren çalışma alanlarından örnek teşkil etmesi için sadece birer çalışma alanı seçilecek ve uygulama sonuçları gösterilecektir.



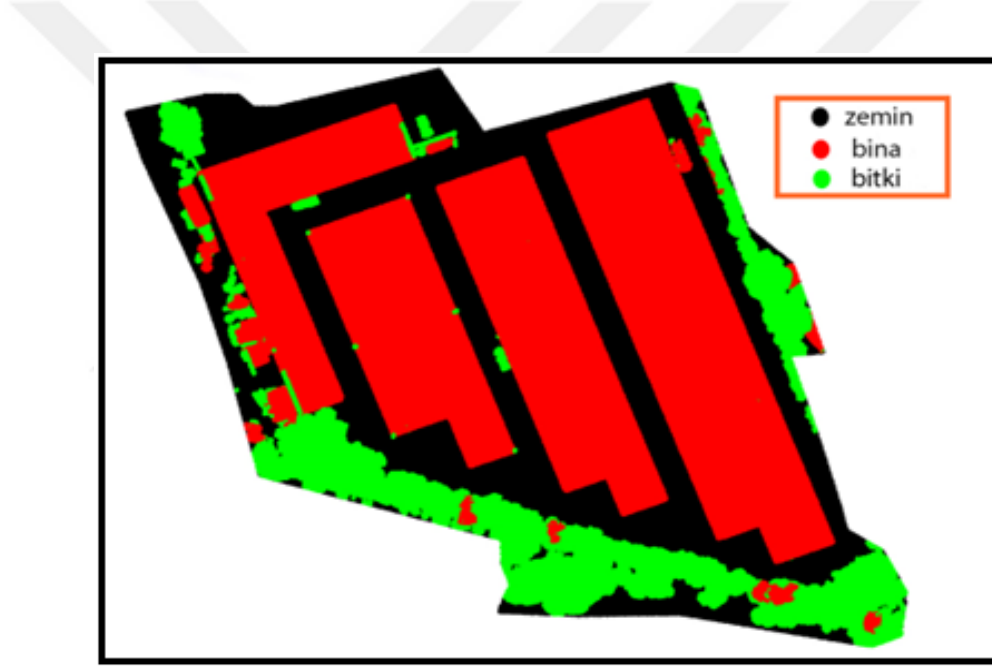
Şekil 28. SMRF sonucu yer ve yer üstü sınıflandırma: a) Kaliforniya çalışma alanı (LiDAR) ve b) Erzurum çalışma alanı (fotogrametrik)

2.5. Bitki Örtüsü Çıkarımı

Tez çalışması kapsamında seçilen çalışma alanları için üretilen LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı nokta bulutu verilerini yer ve yer üstü (bitki örtüsü ve bina) noktalar olarak SMRF algoritması ile iki sınıfa ayırdıktan sonra, aynı bölgeler için bitki örtüsü çıkarımı aşamasına geçilmiştir. İlk olarak MATLAB ortamında bulunan ve nokta bulutuna ait geometrik özelliklerin çıkarılmasında kullanılan “*helperExtractFeatures*” fonksiyonu uygulanmıştır. Bu fonksiyon, veri seti içerisindeki her bir nokta için eğrilik, komşuluk ve normal indekslerini hesaplayarak, noktaları birbiri ile ilişkilendirmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan veri setlerinde bu fonksiyonun etkin bir şekilde çalışması için seçilen bir noktanın kaç adet komşu nokta ile ilişkilendirilmesi gerektiği girilen “komşu nokta sayısı (neighbors points)” parametresiyle belirlenmektedir. Çalışma alanlarını kapsayan her iki tür veri seti içinde bu değer 15 olarak seçilmiştir.

Yapı grubuna giren binalar, bitki örtüsüne göre daha düzlemseldir. Bundan dolayı binalara ait olabilecek noktalarda hesaplanan eğrilik değişim değeri ve seçilen komşu noktalar arasındaki normallerin bağıl fark değerleri, bitki örtüsüne göre oldukça küçüktür. Çünkü bitki örtüsüne ait noktalar herhangi bir geometrik şekle ve düzleme ait olmaksızın dağınık bir düzene sahiptir. Bu değerler ile sınıflandırılan veri setlerini tam olarak bitki örtüsü ve bina olarak ayırabilmek için MATLAB ortamında bulunan “*helperClassify*” fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon girdi olarak “*curveThresh*” ve “*normalThresh*” eşik

değerlerini kullanmaktadır. Fonksiyonun çalışma prensibine göre, seçilen bir noktanın eğrilik değeri, girdi olarak belirlenen eğrilik eşik değerinden küçük ve aynı noktanın komşu noktaların normalleri arasındaki kosinüs benzerlik değeri de girdi olarak belirlenen normal eşik değerinden daha büyük ise bu nokta bina noktası olarak kabul edilir (Şekil 29). Bu iki kriteri uymayan noktalar bitki örtüsüne ait nokta olarak etiketlenir. Çalışma kapsamında kullanılan her iki veri türünde de normal eşik değeri 0,85 sabit değeri seçilirken, eğrilik eşik değeri LiDAR veri setleri için 0,002, fotogrametrik veri setleri için 0,08 olarak belirlenmiştir. Böylece veri setlerinden bitki örtüsü çıkartılarak bina detayları elde edilmiştir. Ancak bazı veri setlerinde nadirde olsa belirlenen eşik değerlerinden dolayı bitki örtüsü veya bina dışı nesneler bina detayı olarak yanlış etiketlendiği görülmüştür (Şekil 30).

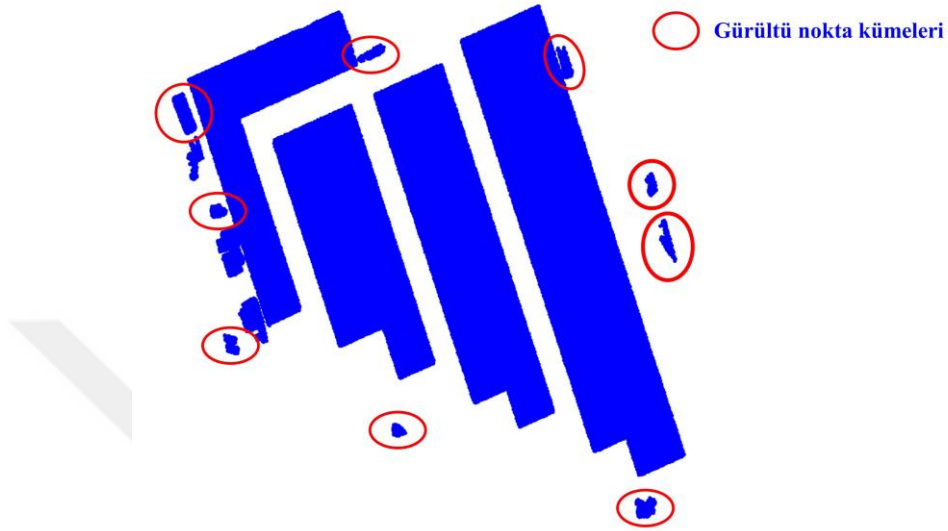


Şekil 29. Yer üstü noktalardan bitki örtüsünün ayıklanması

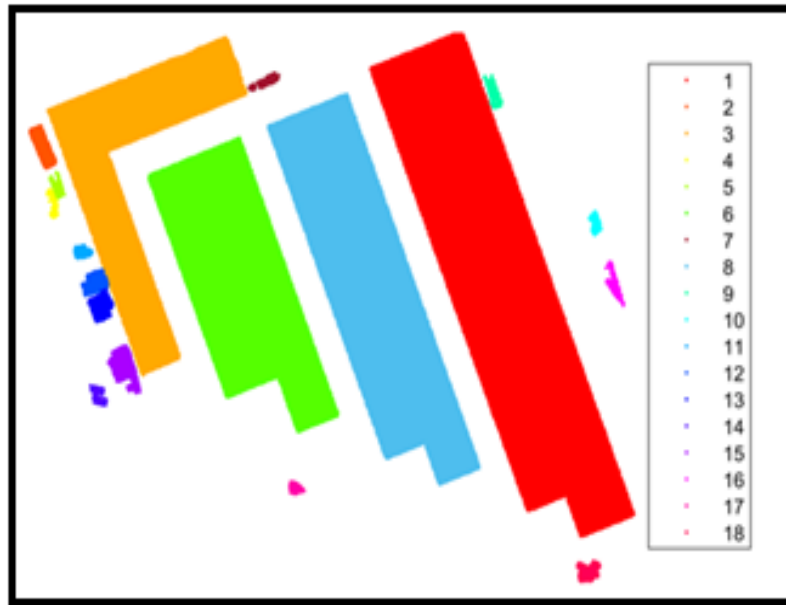
2.6. Binaların Sınıflandırılması

Tez çalışması kapsamında sınıflandırma aşamalarından geçen veri setlerinde, bina detayı olarak etiketlenen ancak hatalı olduğu gözlemlenen çeşitli gürültü noktaları bulunmaktadır (Şekil 30). Bu gürültü noktalarını veri setleri içerisinde temizlemek için DBSCAN algoritması ile bina noktaları kümelenebilir (Şekil 31). DBSCAN kümeleme algoritması girdi olarak *Epsilon* ve *MinPts* parametrelerini kullanmaktadır. *MinPts* değeri,

Çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşım ile nokta yoğunluğuna göre otomatik olarak seçilmesi sağlanmıştır. *Epsilon* değeri ise 1, 2 ve 3 değerlerinden herhangi biri seçildiğinde kümeleme aşaması sorunsuz olarak çalışmaktadır.



şekil 30. Yer st noktalarında gürültü nokta kümeleri



şekil 31. DBSCAN algoritması ile bina sınıflandırılması

DBSCAN algoritması ile elde edilen kümeleme sonuçlarından gürültü noktalarını oluşturan kümelerin tespit edilip ayıklanması gerekmektedir. Bu aşamada kullanılacak veri

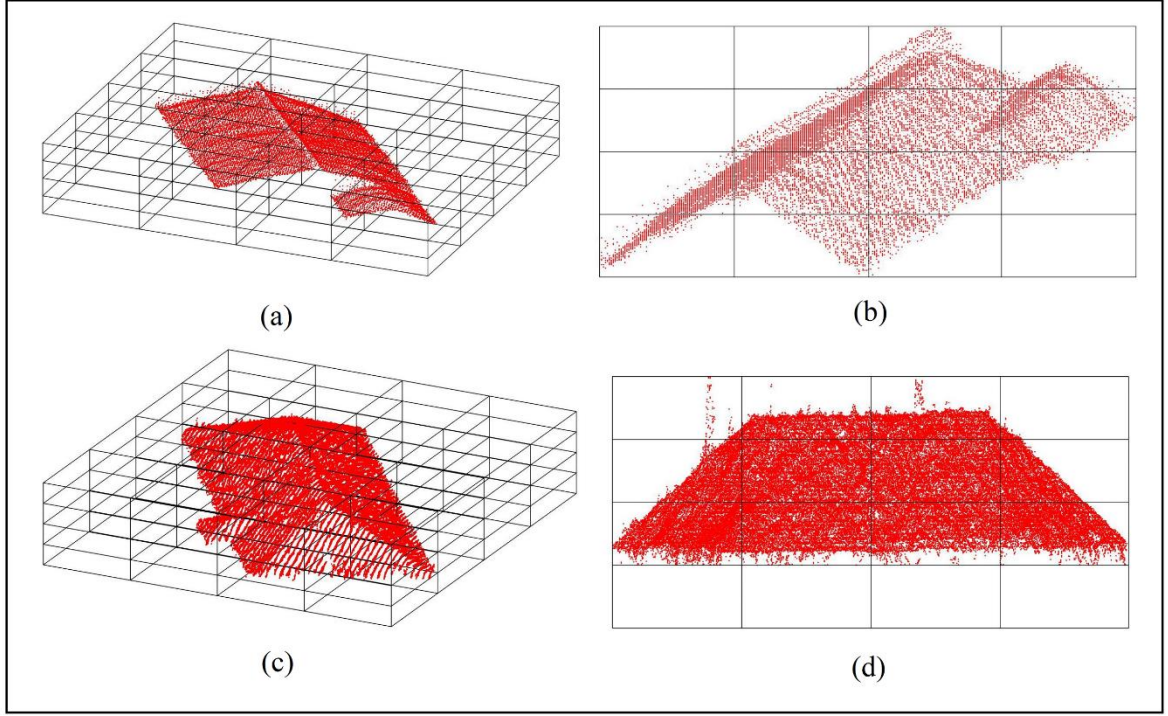
setlerinin nokta yoğunlukları, bir binanın kaplayacağı minimum alan (70 m^2) ile çarpılır. Böylece veri setindeki bir binaya ait minimum nokta sayısı hesaplanır. Ardından DBSCAN algoritması ile elde edilen tüm kümeler bu sayısal değer ile karşılaştırılır ve bu değerden daha az nokta bulunan küme gürültü, aksine büyük ise o küme bina detayı olarak belirlenir. Sonuç olarak çalışma alanlarını kapsayan veri setleri içerisinde sadece bina detaylarını içeren nokta bulutu verileri elde edilmiştir (Şekil 32).



Şekil 32. Bina nokta bulutu verisi

2.7. Binalara Ait Çatı Detaylarının Sınıflandırılması

Tez çalışması kapsamında belirtilen ön hazırlık kısmının son aşaması, binalara ait nokta bulutu verilerinden sadece o binaya ait çatıyı temsil eden noktaların elde edilmesidir. Bu aşamaya kadar uygulanan yöntemler ile binalara ait 3B nokta bulutları elde edilmiştir. Bu nokta bulutları incelendiğinde bina çatı noktaları dışında çıkıntıların (duvar, balkon vb.) olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı çalışma alanlarını kapsayan veri setlerinde Karslı ve Yılmaztürk (2022), tarafından geliştirilen I-Octree yöntemi kullanılmıştır (Şekil 33). Böylece çalışma alanlarında bulunan binalara ait nokta bulutlarından sadece çatıları temsil eden noktalar belirlenmiş ve tez çalışmasının temel amacı olan düzgünleştirme aşamasına geçilmiştir.



Şekil 33. I-Octree ile çıkarılan bina çatı detayları a, b) Kaliforniya çalışma alanı (LiDAR) ve c, d) Erzurum çalışma alanı (fotogrametrik)

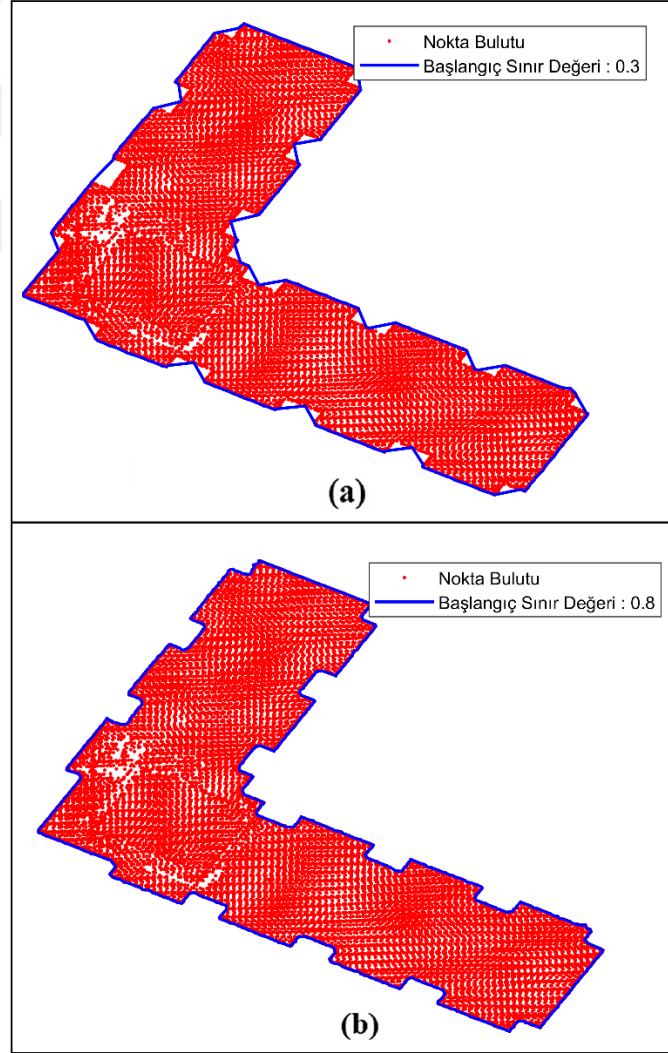
2.8. Bina Sınır Düzgünleştirilmesine Yönelik Geliştirilen Yöntemler

Ön hazırlık aşamalarından geçen veri setleri sadece binalara ait çatı noktalarını temsil etmektedir. Bu aşamadan sonra tez çalışmasının temel amacı olan düzgünleştirme aşamasına geçilecektir. Düzgünleştirme aşaması binaların sahip oldukları geometrilere göre ortogonal, eğrisel ve karma olmak üzere üç başlıkta incelenecektir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen ABORE yöntemi (Ozdemir vd., 2022), bina sınırı düzgünleştirme işleminin temelini oluşturmaktadır. Çünkü ABORE yönteminin ilk amacı bina çatı köşe noktalarını tespit etmektir. Ardından ardışık köşe noktaları arasındaki kenarın geometrisine (ortogonal veya eğrisel) karar verir ve bina sınırı çizdirilir. Bundan dolayı ortogonal, eğrisel ve karma geometrili binaların tespitinde ABORE yöntemi öncelikli olarak kullanılacaktır.

2.8.1. Ortogonal (Dik) Kenarlı Bina Düzgünleştirme

Tez çalışması kapsamında veri setlerinden çıkarılan bina çatı detaylarının düzgünleştirilmesi için öncelikle, bina çatısının dış sınırının (başlangıç sınırı) çizdirilmesi

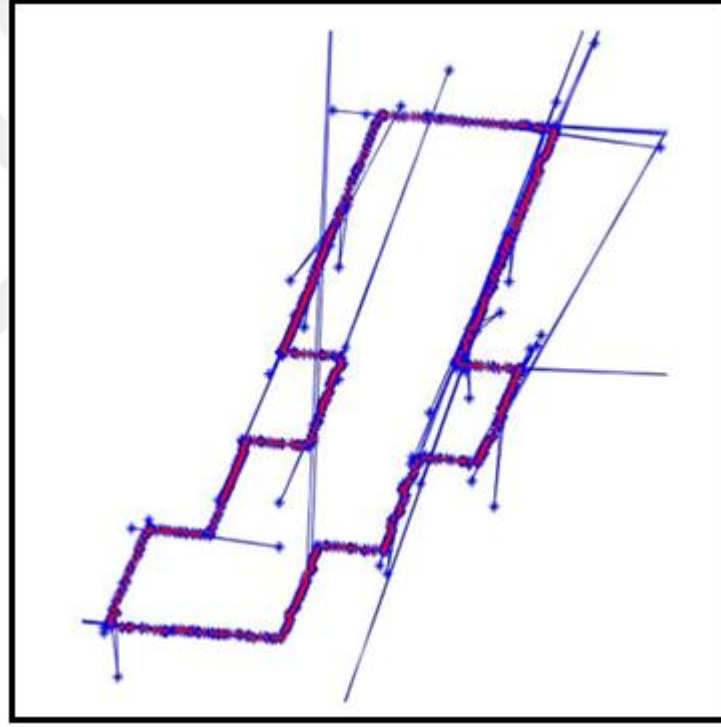
gerekmektedir. Başlangıç sınırı olarak adlandırılan bu düzensiz sınırın düzgünleştirilmesiyle bina sınırı elde edilmektedir. Başlangıç sınırı MATLAB ortamında mevcut “*Boundary*” fonksiyonu ile çizdirilmiştir. Bu fonksiyon, girdi olarak kullanılan nokta bulutu verisinin en dış noktalarını birleştirmesiyle başlangıç sınırını elde etmektedir. Oluşturulacak bu düzensiz bina sınırı, küçültme faktörüne (k) bağlı olarak değişmektedir. Bu değer 0 ile 1 arasında değişkenlik göstermektedir. Eğer k değeri sıfıra yakınsa küçültme yok denilecek kadar azdır. Yani veri setini sınırlayan en kaba başlangıç sınırı çizdirilir. Eğer k değeri bire yakınsa küçültme çoktur ve en dıştaki bina çatı noktalarını en iyi temsil eden bina başlangıç sınırı çizdirilir (Ozdemir vd., 2022). Şekil 34’te farklı sınır değerlerinde (0,3 ve 0,8) çizdirilen başlangıç bina sınırları gösterilmektedir.



Şekil 34. Farklı sınır değerlerinde çizdirilen başlangıç değerleri: a) sınır değeri: “0,3” ve b) sınır değeri: “0,8”

Sınır fonksiyonu için varsayılan küçültme faktörü 0,5'tir. Ancak çalışma kapsamında kullanılan veri setlerinin türü, nokta yoğunluğu ile veri setinde bulunan binaların içbükeylik ve dışbükeylik durumlarına göre bu değer değişkenlik göstermektedir. Sonuç olarak ilk aşamada çalışma alanlarındaki binaların en uygun küçültme değerleri belirlenmiş ve başlangıç sınırları çizdirilmiştir.

Düzensiz başlangıç sınır geometrisi çizdirildikten sonra köşe noktalarını bulmak için ilk aşama açı koşulunu kritize etme aşamasıdır. Bu aşamada düzensiz başlangıç bina geometrisini temsil eden ardışık noktalardan doğrular geçirilmiş ve yine ardışık olarak bu doğruların kesişim açıları hesaplanmıştır (Şekil 35).

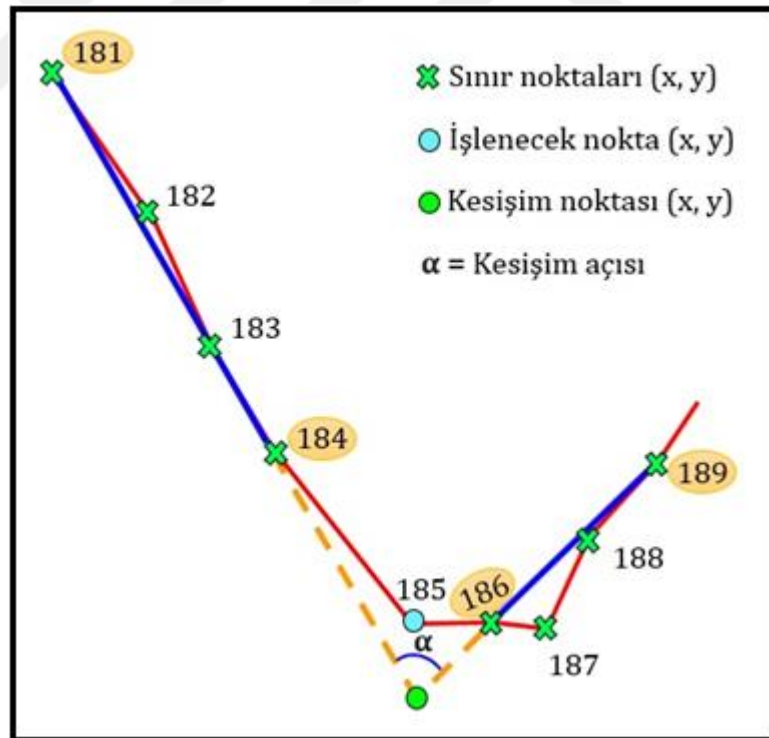


Şekil 35. Başlangıç sınırı üzerindeki ardışık noktalardan geçen doğruların çizimi

Böylece elde edilen tüm sınır noktalarının açı değerleri, ortogonal geometrili binalarda belirlenen köşe açı değerine (Koşul 1) göre kıyas edilerek aday köşe noktaları belirlenecektir.

$$find((\alpha > 70^\circ \ \& \ \alpha < 110^\circ) \mid (\alpha > 250^\circ \ \& \ \alpha < 290^\circ)) \quad (\text{Koşul 1})$$

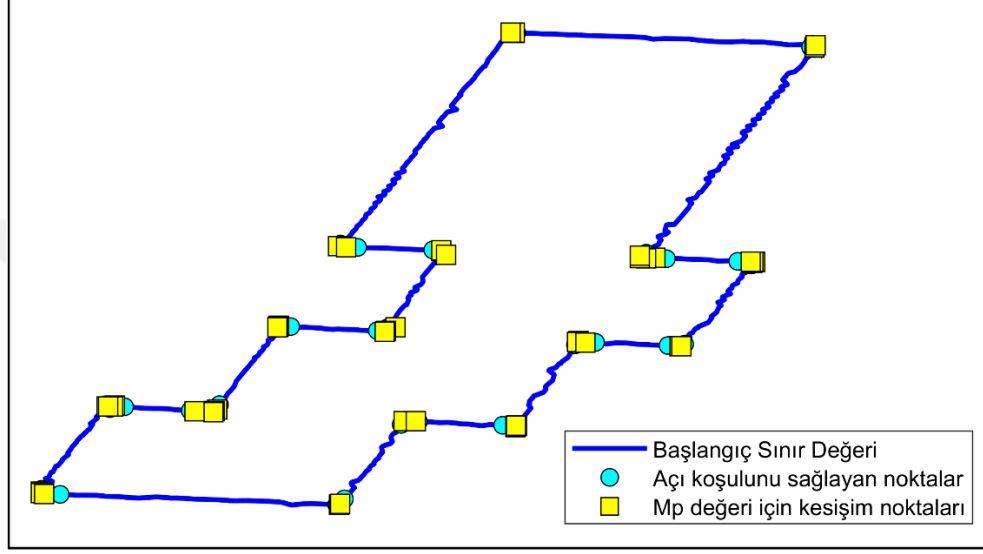
Ardışık iki doğru ile hesaplanan kesişim açı değerlerinden bu koşulu sağlayan birçok nokta bulunmuştur. Uygulamalar sonucunda bulunan her noktanın aday köşe noktasını temsil etmediği görülmüştür. Bu durum veri setinin nokta yoğunluğu az ve dağılımı iyi olmadığında gözlemlenmiş ve bina çatı köşe noktalarının hatalı bulunmasına neden olmuştur. Bundan dolayı çalışma kapsamında geliştirilen algorithmada “ mp ” adında bir parametre belirlenmiştir. Bu parametre açı kriteri değerlendirmesi yapılırken, düzensiz başlangıç bina sınır noktalarından seçilen herhangi bir noktanın, öncesi ve sonrasındaki kaç adet noktanın işleme tabi tutulacağını belirlemektedir. Yani düzensiz başlangıç bina geometrisini temsil eden noktaların her biri için mp değerine göre öncesinde ve sonrasında alınan noktaların hepsi ile kesişim açıları hesaplanacaktır. Böylelikle sadece iki doğru ile hesaplanan kesişim açısı ile açı koşulunu sağlanarak aday köşe noktası özelliği taşımayan sınır noktalarının ayıklanması sağlanmıştır. Şekil 36’da “ $mp=4$ ” değerine göre kesişim açısının tespiti ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 36. Mp değerine göre kesişim açısı hesaplama ($Mp=4$)

“*Mp*” değeri yapılan uygulamalar sonucunda veri setinin yoğunluğu ve düzgünleştirilecek binanın kenar uzunluklarına göre 3-6 arasında seçilebileceği

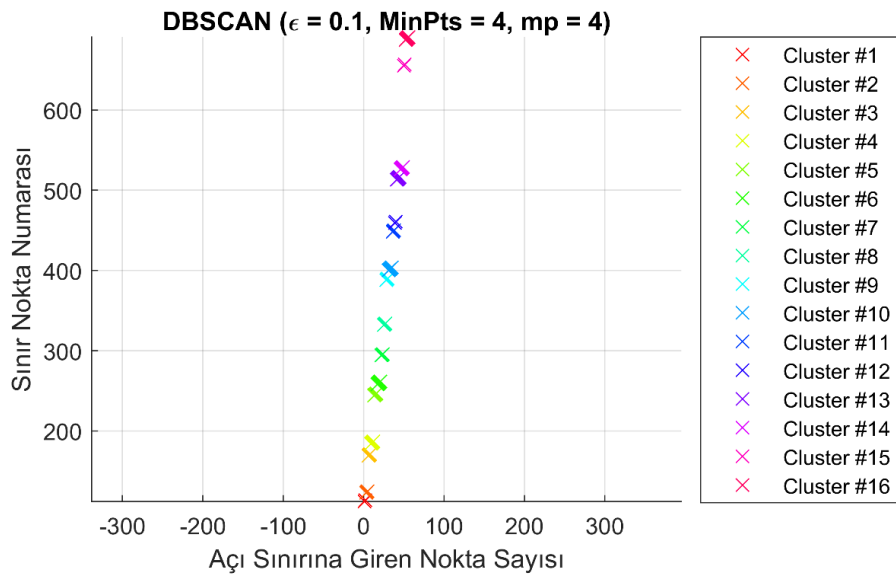
gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında bu değer 4 olarak seçilmiş ve açı koşulunu sağlayan aday köşe noktaları tespit edilmiştir (Şekil 37). Geliştirilen model kapsamında tüm sınır noktaları için kesişim açısı ve koordinatı üretilmiştir (Şekil 36). Aday köşe noktalarını belirlerken kesişim açısı, ideal köşe noktası tespiti için ise üretilen kesişim koordinatları kullanılacaktır.



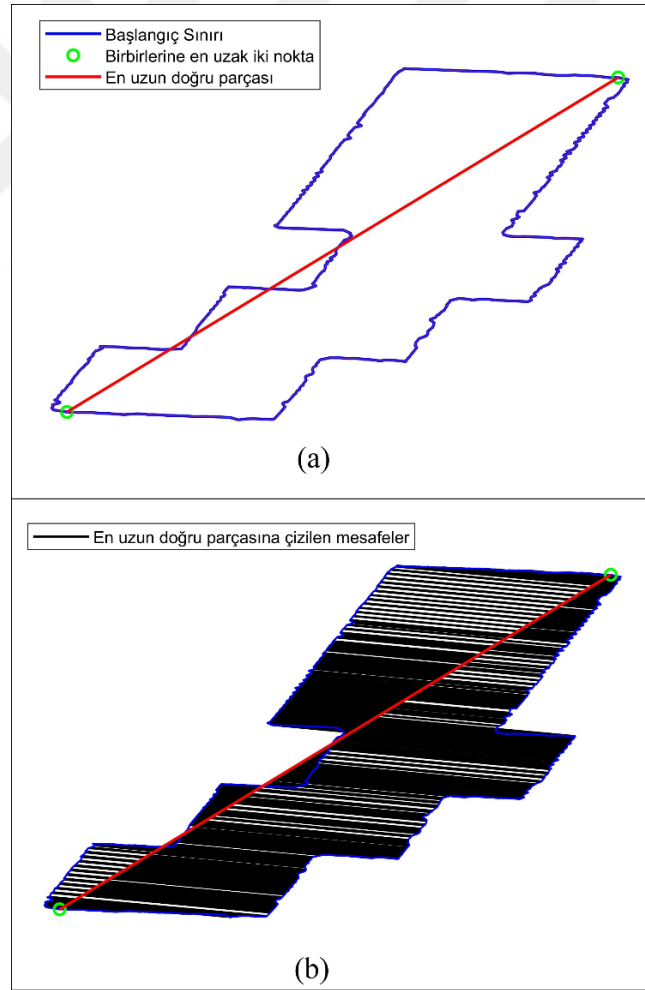
Şekil 37. Açı koşulunu sağlayan aday köşe noktaları

Bu aşamada karşılaşılan bir diğer sorun ise ortogonal binaların düzensiz başlangıç sınırı ile hesaplanan iç açıları bulmaktır. Ortogonal binaların iç açıları yaklaşık olarak 90° ya da 270° derece olarak kabul edilmektedir. Ancak literatürde iki doğrunun kesişim açılarını hesaplayan formül, bazen iç bazen de dış açıyı hesaplamaktadır. Bu durum geliştirilen algoritmanın bu aşamada otomatikleşmesine ve açı koşuluna uyan kesişim açılarını tespit etmeye engel olmaktadır. Bundan dolayı bu soruna çözüm olarak kesişim açı değeri hesaplayan formül yerine haritacılıkta kullanılan semt açı farkından kırılma açıları hesaplanmıştır. Yapılan bu işlem ile birlikte tüm sınır noktaları için binanın iç açısını gösterecek model geliştirilmiştir (Şekil 35).

Düzensiz bina sınırını oluşturan noktalardan aynı köşeye ait açı koşulunu sağlayan birden çok nokta bulunmuştur. Bulunan bu noktalardan aynı bina köşesini temsil eden sınır noktaları, DBSCAN algoritması ile kümelendirilmiştir (Şekil 39). Bu aşamada elde edilen kümelerin sayısı aynı zamanda binanın köşe sayısını temsil etmektedir (Şekil 38).

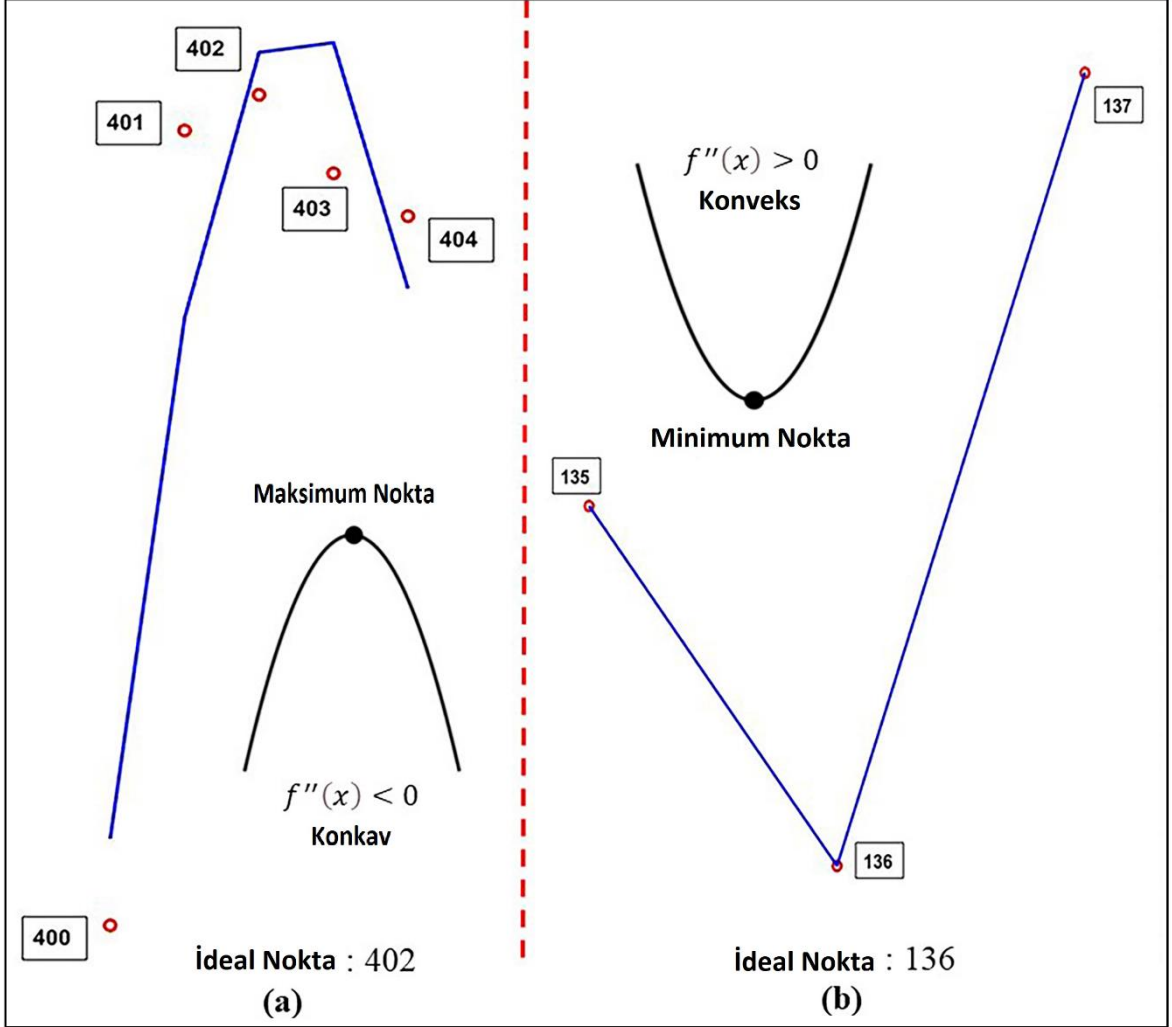


belirlemek için öncelikle eğri fonksiyonlarının ikinci türevleri hesaplanır. Eğer türevin değeri sıfırdan küçük oluyorsa ($f''(x) < 0$) eğri içbükey, eğer türevin değeri sıfırdan büyük oluyorsa ($f''(x) > 0$) eğri dışbükey eğri olarak belirlenir. Bu yaklaşımla DBSCAN algoritması ile kümeleme sonucu oluşan bu kümelerdeki aday köşe noktalarından geçen eğri tipleri belirlenmektedir. Aday köşe noktalarından ideal köşe noktasına karar vermek için öncelikle düzensiz başlangıç bina geometrisini temsil eden noktaların birbirlerine olan mesafeleri hesaplanmıştır. Buradaki temel amaç birbirine en uzak olan iki sınır noktasını bulmak ve bu noktaları birleştiren doğru parçasını çizmektir. Böylece aday köşe noktalarından ideal köşe noktasını belirlemede kullanılacak en uzun doğru parçası oluşturulacaktır (Şekil 40a). Ardından DBSCAN algoritması sonucu oluşan kümelerdeki aday köşe noktalarının doğru parçasına olan öklid mesafeleri hesaplanmıştır (Şekil 40b).



Şekil 40. İdeal köşe noktası tespiti: a) en uzun doğru parçası ve b) başlangıç sınır noktalarının en uzun doğru parçasına öklid mesafeleri

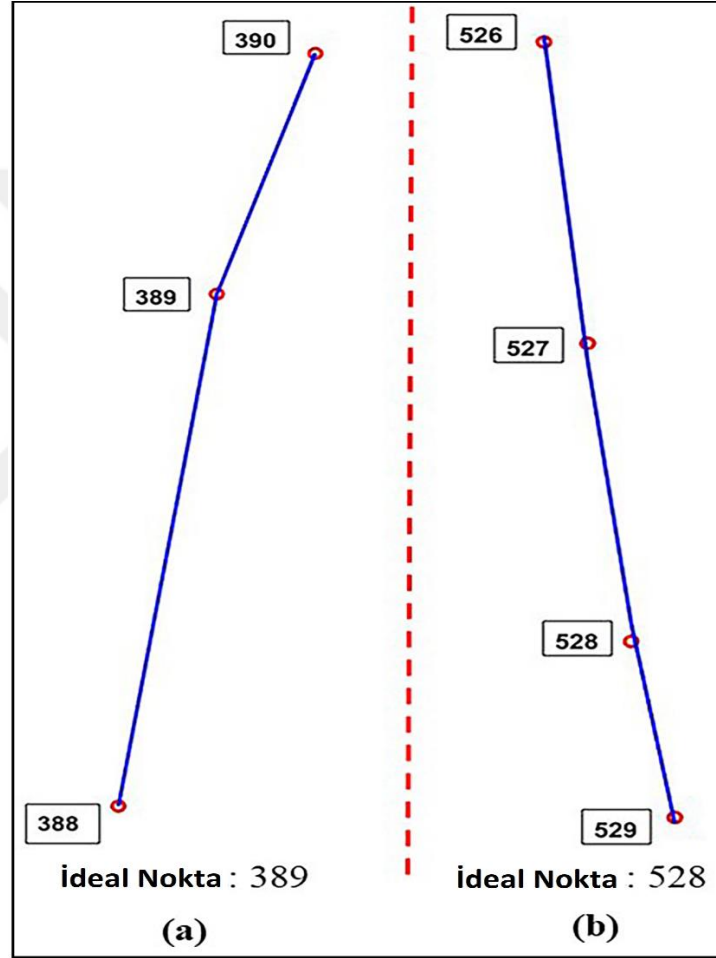
Hesaplanan mesafeler ile aday köşe noktalarından geçirilen eğri tiplerine göre ideal köşe noktaları belirlenecektir. Bu aşamada, eğer eğri içbükey ise aday noktalarından maksimum mesafeye sahip olan nokta, ideal köşe noktası olarak seçilirken eğer eğri dışbükey ise minimum mesafeye sahip olan aday nokta, ideal köşe noktası olarak seçilmiştir (Şekil 41).



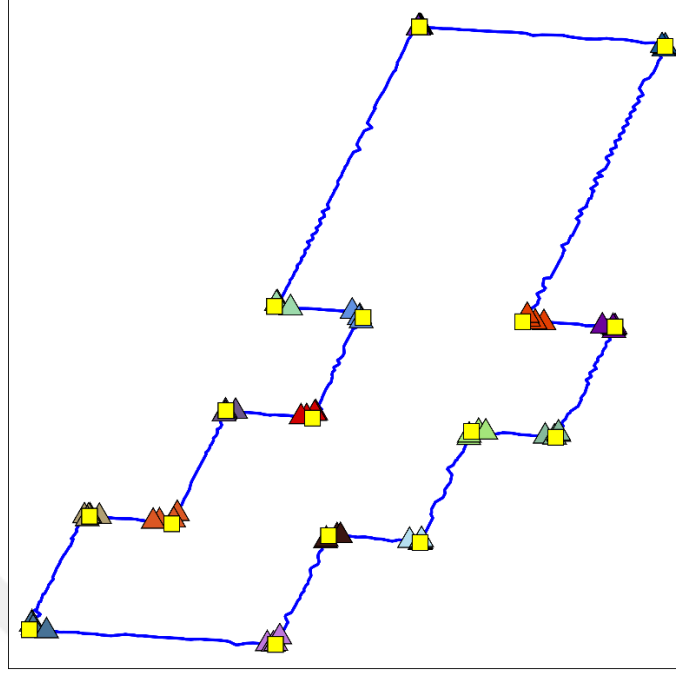
Şekil 41. İdeal köşe nokta seçimi

Sonuç olarak ilk aşamada aday köşe noktalarından ikinci dereceden eğriler geçirilerek türev yardımıyla eğrinin tipleri belirlenmiştir. Ardından aday köşe noktalarının en uzun doğru parçasına olan mesafeleri hesaplanarak eğri tipine göre aday köşe noktalarından hangisinin ideal köşe noktaları olduğuna karar verilmiştir. Ancak DBSCAN algoritması ile kümeleme sonucu oluşan kümelerdeki aday köşe noktalarının en uzun doğru parçasına olan

mesafelerin sürekli arttığı veya sürekli azaldığı durumlar da gözlemlenmiştir. Bu durumun olduğu kümelerde ideal köşe noktası belirlenirken küme içerisindeki aday nokta sayısı tek ise ortanca nokta, çift ise ortanca noktadan bir sonraki nokta, ideal köşe noktası olarak seçilmiştir (Şekil 42). Bu aşamalardan sonra aday köşe noktaları arasından ideal köşe noktalarının üretilmesi için önceki aşamalarda bahsi geçen kesişim koordinatları kullanılmıştır (Şekil 43).

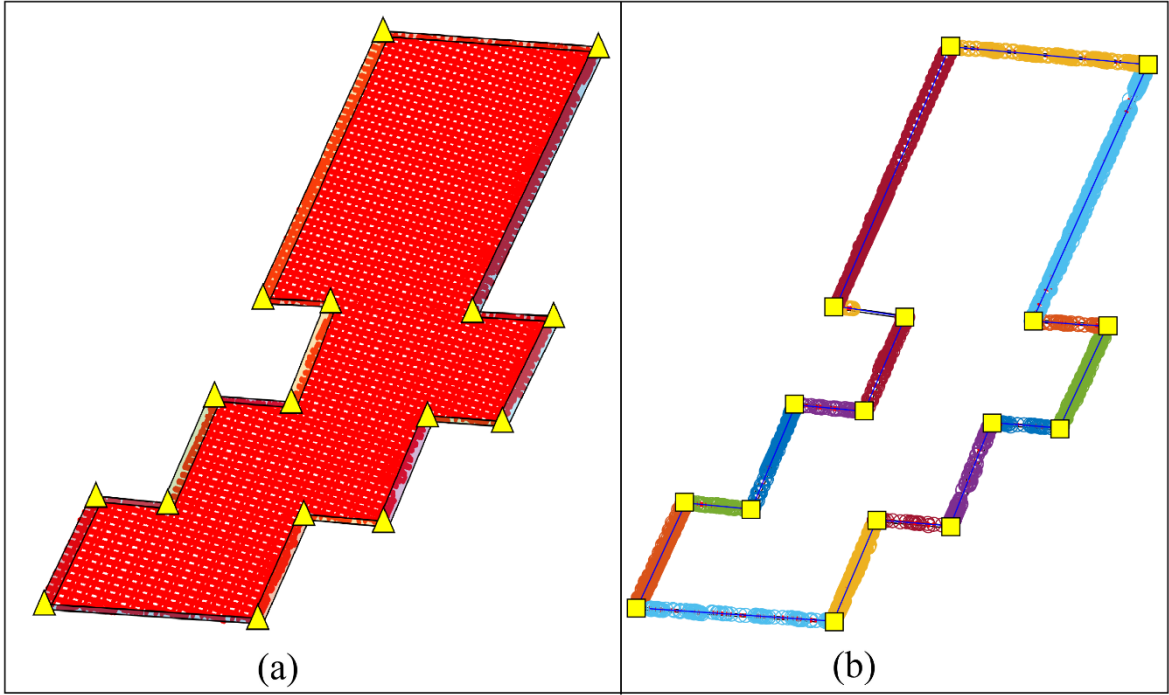


Şekil 42. İdeal köşe nokta seçimi (uzaklıklar sürekli artan ve azalan)



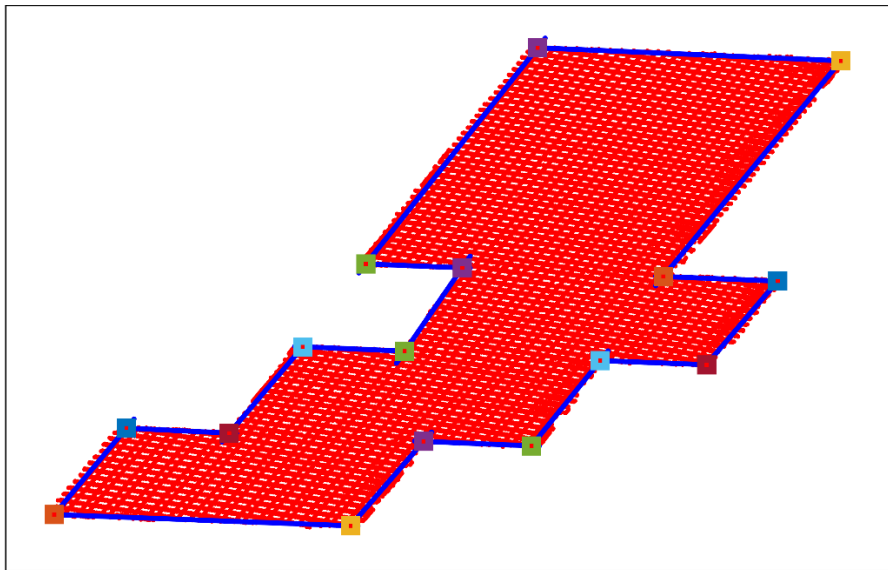
Şekil 43. İdeal köşe noktaları

İdeal köşe noktaları bulunduktan sonra daha güvenilir bir sonuç elde edilmesi amacıyla, binaların kenarlarına ait noktalar da sınır düzgünleştirilmesi aşamasına dahil edilmiştir. Tüm bina için bulunan ardışık iki ideal köşe noktası arasından genişliği 0,5 m olan bir tampon bölge geçirilmiştir (Şekil 44a). Ardından binaya ait nokta bulutu verisinden bu tampon bölge içerisine düşen noktalar belirlenmiştir (Şekil 44b). Bu noktaları en iyi temsil eden birinci dereceden doğrular MATLAB programında bulunan “*polyfit*” fonksiyonu ile çizdirilmiştir.



Şekil 44. Kesin köşe noktası belirleme: a) ideal köşe noktaları arasına tampon bölge geçirme ve b) tampon bölge içine düşen noktalar

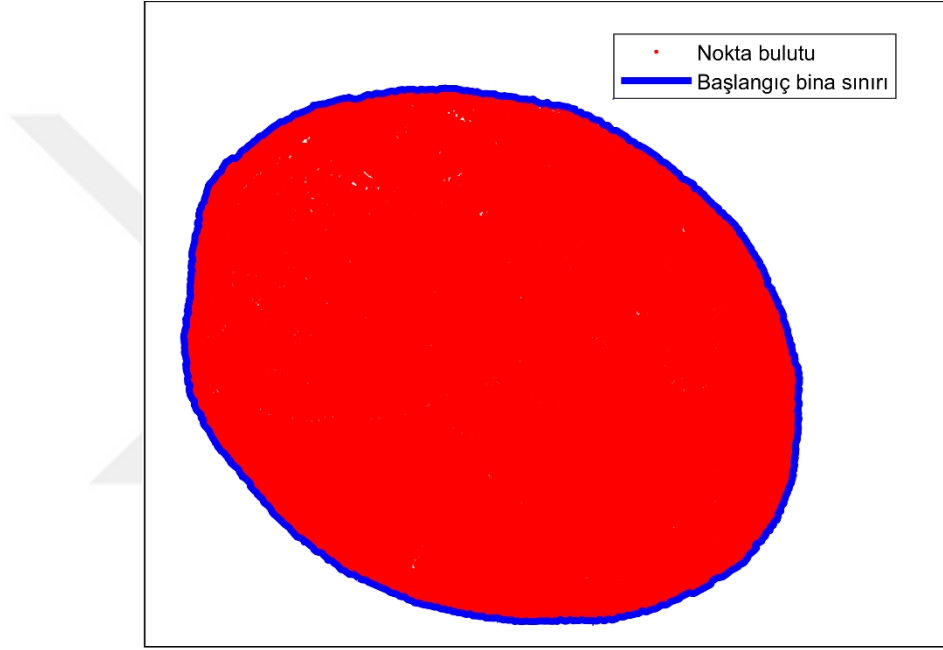
Şekil 44'te gösterilen tampon bölge geçirme işlemi tüm kenarlar için yapılmış ve ardından bu doğruların kesişim noktaları hesaplanarak ilgili noktalar binaların kesin köşe noktası olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kesin köşe noktaları birleştirilerek nihai ortogonal bina sınırı elde edilmiştir (Şekil 45).



Şekil 45. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırı

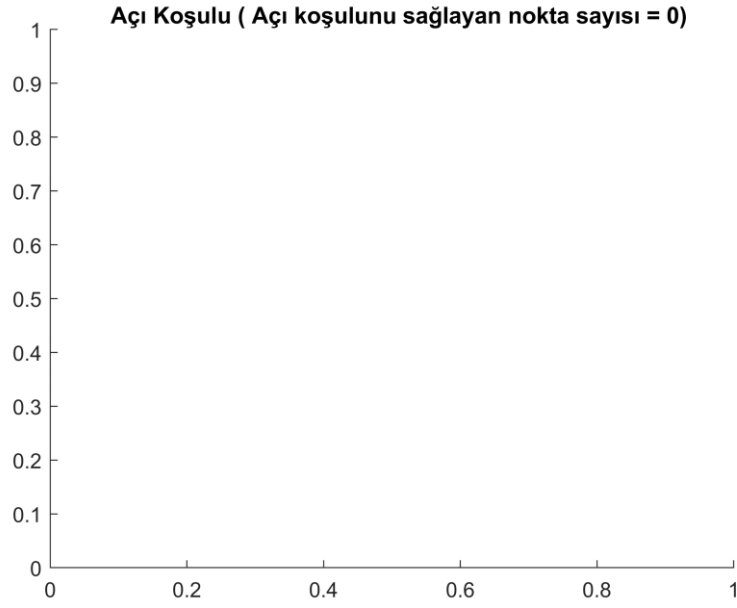
2.8.2. Eğrisel Kenarlı Bina Düzgünleştirme

Tez çalışması kapsamında veri setlerinden çıkarılan eğrisel geometrili bina çatı detaylarının düzgünleştirilmesi için başlangıç olarak ABORE yöntemi kullanılacak, sonrasında ise Bézier eğrileri yardımıyla düzensiz bina sınırı düzgünleştirilecektir. İlk olarak ortogonal binalarda olduğu gibi *boundary* fonksiyonu ile düzensiz başlangıç bina sınırı çizdirilmiştir (Şekil 46).



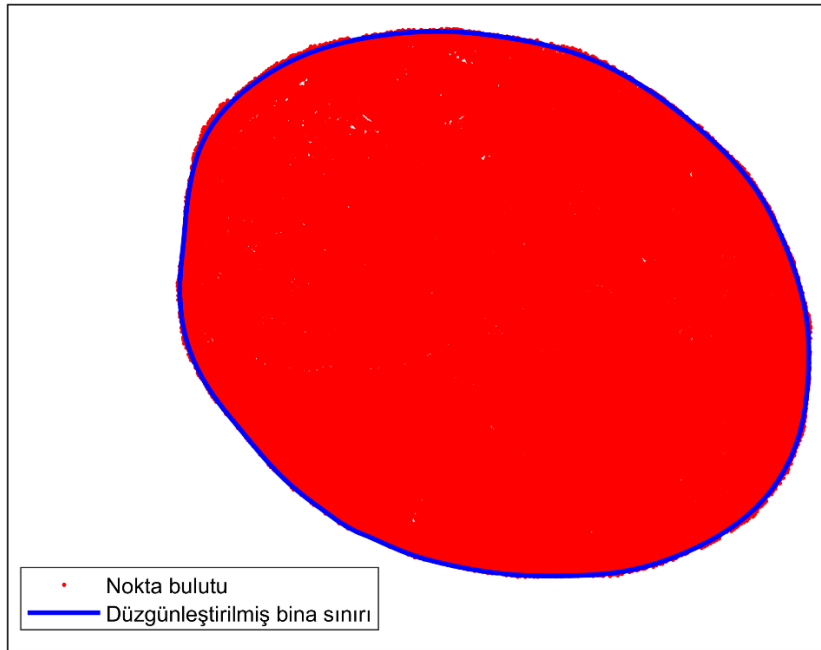
Şekil 46. Eğrisel geometrili bina başlangıç sınırı

Düzensiz başlangıç bina geometrisini temsil eden ardışık noktalardan doğrular geçirilmiş ve yine ardışık olarak bu doğruların kesişim açıları hesaplanmıştır. Hesaplanan kesişim açı değerleri ABORE yönteminde belirlenen açı koşuluna (Koşul 1) göre değerlendirilmiştir. Kritize edilen bina geometrisi eğrisel olduğundan, hesaplanan kesişim açı değerleri belirlenen açı koşulunu sağlamayacaktır. Yani DBSCAN ile kümeleme işleminde küme sayısı sıfır olarak görünecektir (Şekil 47). Geliştirilen algoritma bu durumda düzensiz bina sınırının tamamen eğrisel yapıda olduğuna karar verecektir. Böylece ABORE yönteminin ilk aşamasındaki açı kriteri ile bina geometrisinin ortogonal veya eğrisel olup olmadığına karar verilmiştir.



Şekil 47. Eğrisel geometrili binalar için açı koşulu

ABORE yöntemi ile bina geometrisinin eğrisel olduğu otomatik bir şekilde belirlendikten sonra, düzensiz bina sınırını oluşturan noktalar Bézier eğrilerine girdi olarak tanıtılmıştır. Ardından o noktalara en uygun eğri çizdirilerek eğrisel geometrili düzensiz bina sınırı düzgünleştirilmiştir (Şekil 48).

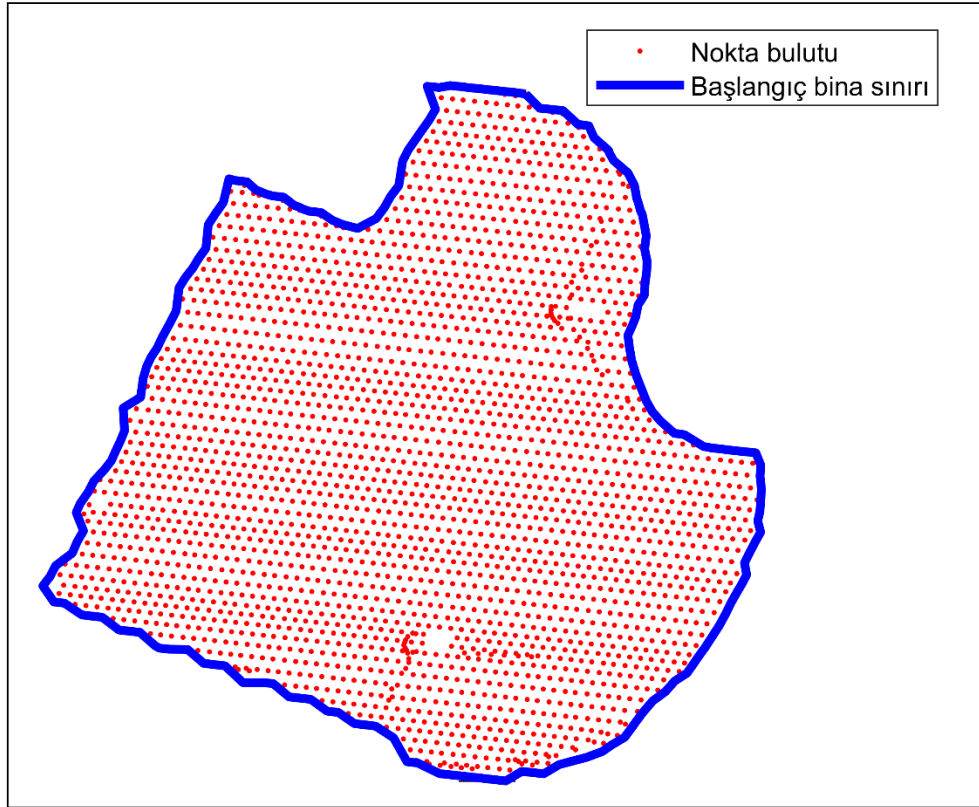


Şekil 48. Düğüleştirilmiş eğrisel bina sınırı

Eğrisel geometrili binaların düzgünleştirilmesindeki en önemli adım ABORE yöntemi ile köşe noktası tespitidir. Bu aşamada oluşabilecek herhangi bir hatada bina ortogonal olarak algılanarak bina sınır düzgünleştirilmesi hatalı olabilecektir.

2.8.3. Karma Kenarlı Bina Düzgünleştirme

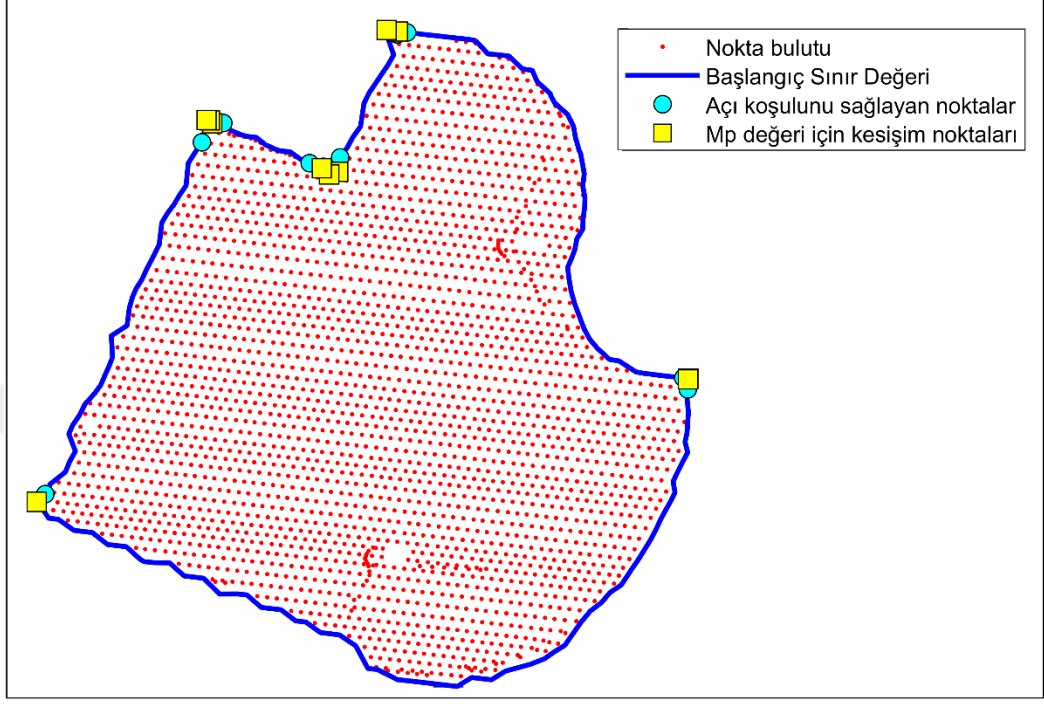
Tez çalışması kapsamında veri setlerinden çıkarılan karma (ortogonal + eğrisel) geometrili bina çatı detaylarının düzgünleştirilmesi için hem ABORE yöntemi hem de Bézier eğrileri birlikte kullanılarak düzensiz bina sınırı düzgünleştirilecektir. İlk olarak ortogonal binalarda olduğu gibi *boundary* fonksiyonu ile düzensiz başlangıç bina sınırı çizdirilmiştir (Şekil 49).



Şekil 49. Karma geometrili bina başlangıç sınırı

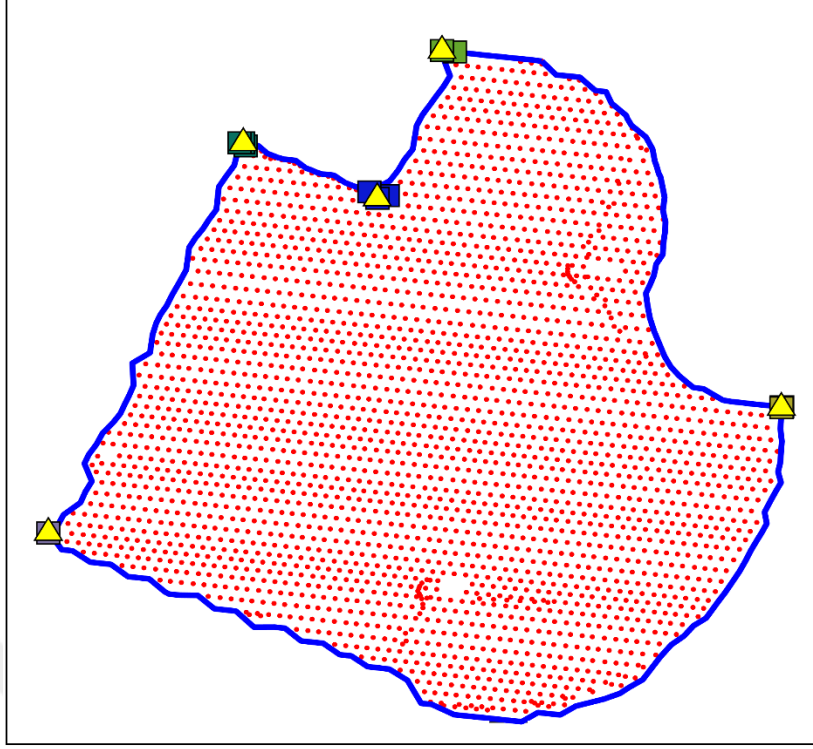
Düzensiz başlangıç bina geometrisini temsil eden ardışık noktalardan doğrular geçirilmiş ve yine ardışık olarak bu doğruların kesişim açıları hesaplanmıştır. Hesaplanan kesişim açı değerleri ABORE yönteminde belirlenen açı koşuluna (Koşul 1) göre

değerlendirilmiştir. Belirlenen mp değeri ile açılı koşulunu sağlayan düzensiz sınırı temsil eden noktalar, aday köşe noktaları olarak belirlenmiştir (Şekil 50).

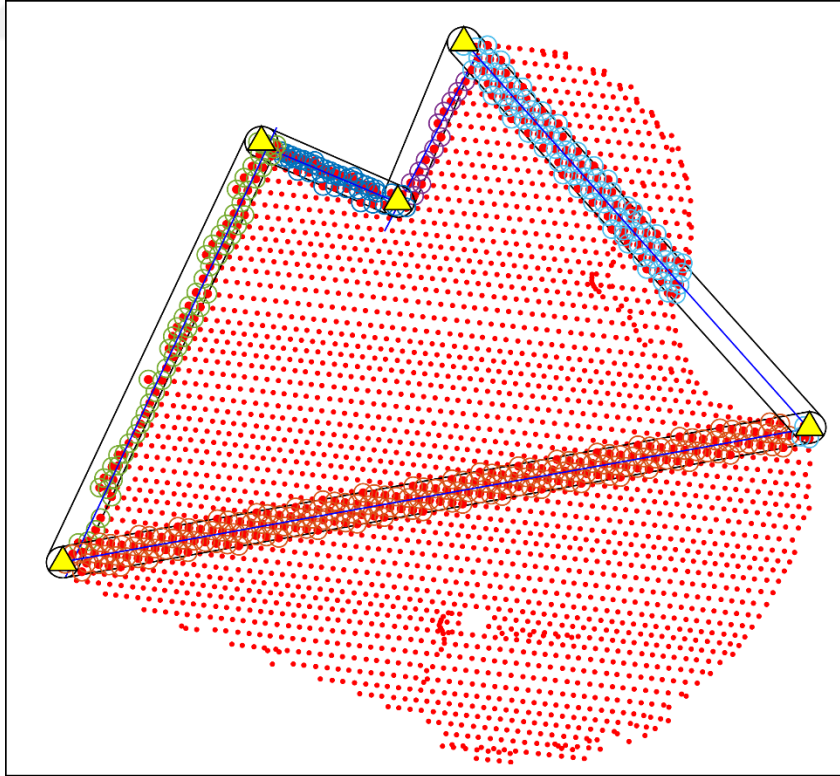


Şekil 50. Açılı koşulunu sağlayan aday köşe noktaları

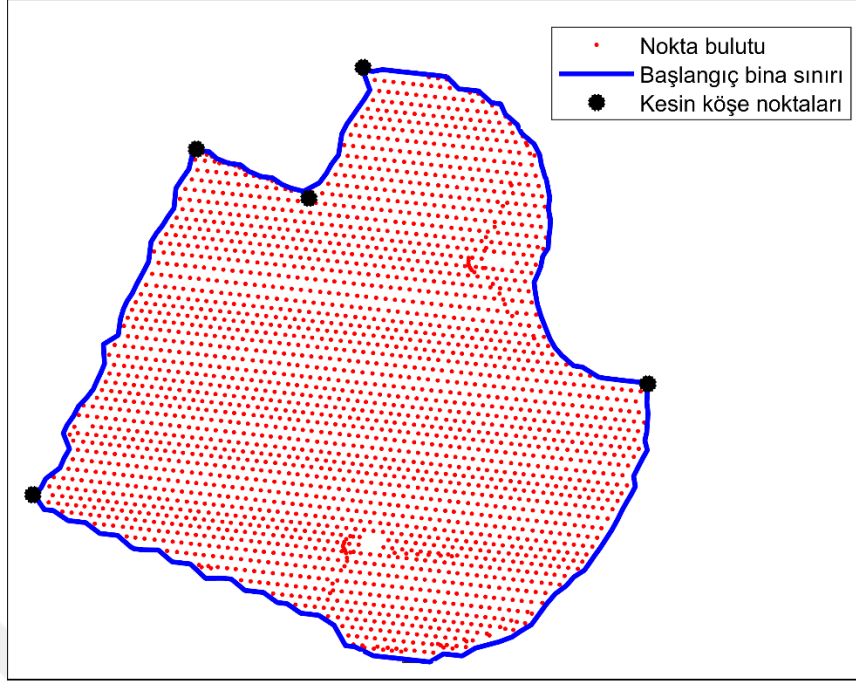
DBSCAN algoritması ile aynı bina köşesini temsil eden aday köşe noktaları kümelenmiştir. Bu kümeler üzerinde ABORE yönteminin diğer aşamaları da uygulanarak ideal köşe noktaları bulunmuş ve sonrasında ise tampon bölgeler geçirilerek kesin köşe noktaları tespit edilmiştir (Şekil 51, 52 ve 53).



Şekil 51. İdeal köşe noktaları

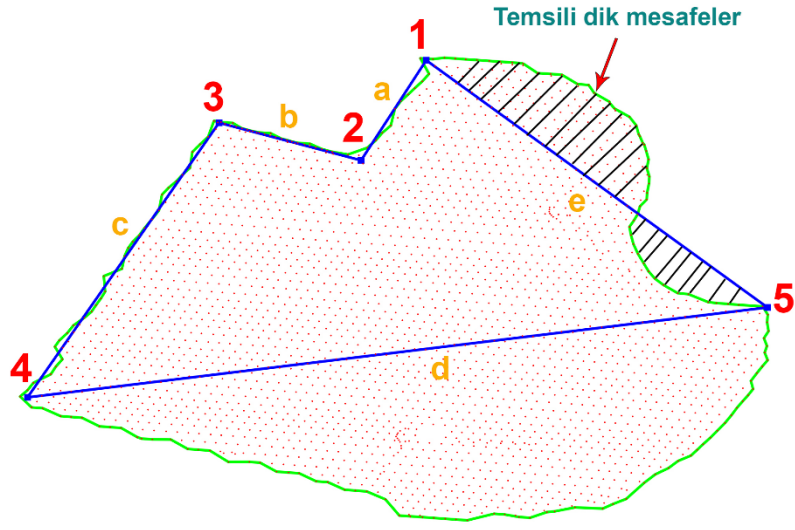


Şekil 52. İdeal köşe noktalarından tampon bölge geçirme



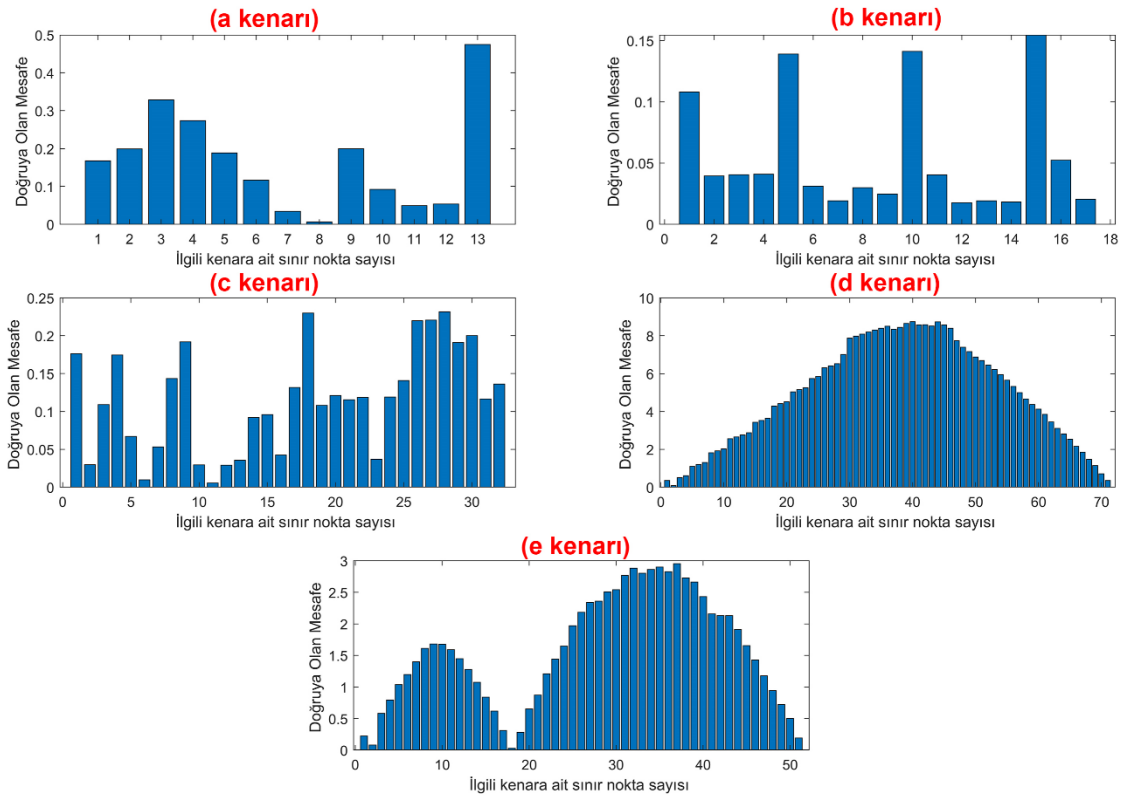
Şekil 53. Kesin köşe noktaları

Karma geometrili bina çatısının kesin köşe noktaları bulunduğundan sonraki aşama, çatıya ait kenar tiplerinin (ortogonal/eğrisel) otomatik olarak belirlenmesidir. Bu amaçla ilk olarak ardışık tüm köşe noktalarından birinci dereceden doğrular geçirilmiştir. Ardından bu köşe noktaları arasında kalan ve başlangıç sınırını temsil eden noktaların ilgili kenara olan öklid mesafeleri hesaplanmıştır (Şekil 54a).



ABORE sonucu oluşturulan köşe noktaları : 1-5
Bina kenar segmentleri : a-e

(a)



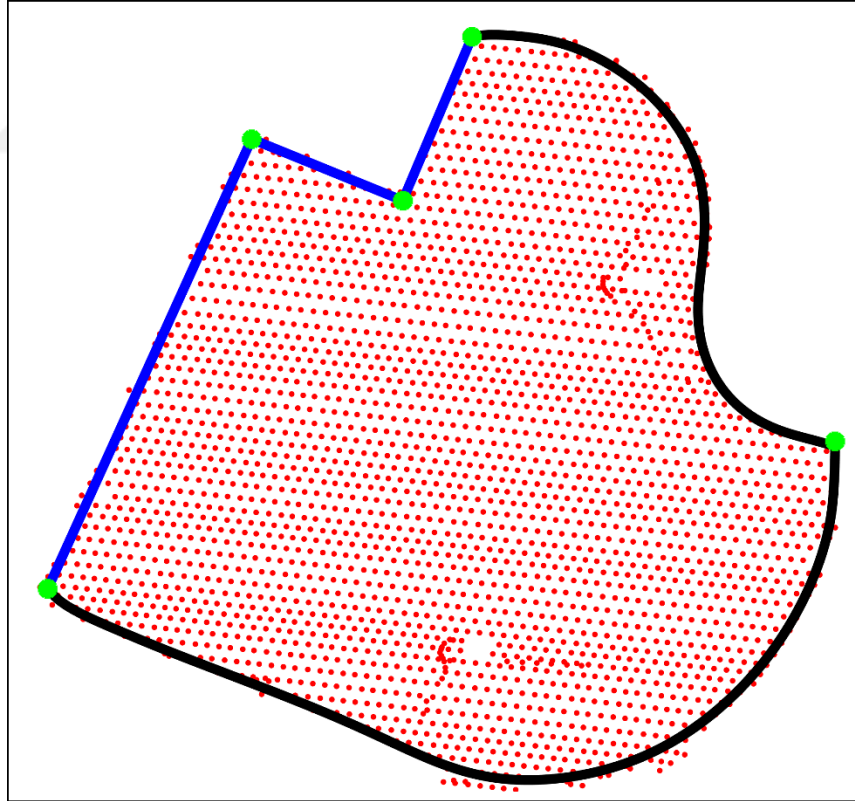
(b)

Şekil 54. Karma geometrili binalarda kenar tipi belirleme: a) mesafelerin çizdirilmesi ve b) mesafelerin grafiksel gösterimi

Hesaplanan mesafeler yardımıyla ilgili aralıktaki ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir (Şekil 54b). Eğrisel kenarları temsil eden başlangıç sınırı üzerindeki

noktaların ilgili kenara olan mesafeleri azalıp artacak veya artıp azalacağı için ilgili aralıktaki standart sapma değeri, doğrusal olan bir kenara göre daha büyük değere sahip olacaktır. Çünkü doğrusal kenar üzerindeki düzensiz bina sınırını temsil eden noktaların, ilgili aralıktaki doğruya olan mesafeleri yaklaşık olarak aynı olacağından standart sapma değeri daha küçük bir değer olacaktır. Uygulamalar sonucunda ortogonal ile eğrisel kenar arasındaki farklılığı tespit edebilmek için ortalama değer 0,40, standart sapma eşik değeri ise 0,25 alınarak karma geometrili binalarda çatı kenar tiplerinin tespiti yapılmıştır.

Sonuç olarak karma geometrili binalarda ilk olarak ABORE yöntemiyle bina çatısına ait kesin köşe noktaları bulunmuş, ardından çalışma kapsamında geliştirilen algoritma ile bina çatısına ait kenarların tipleri belirlenmiştir. Son aşamada ortogonal olarak tespit edilen kenarlar için ilgili köşe noktalarından geçen birinci dereceden doğrular çizdirilirken, eğrisel olarak tespit edilen kenarlar Bézier eğrileri yardımıyla çizdirilerek karma geometrili bina sınırı düzgünleştirilmiştir (Şekil 55).

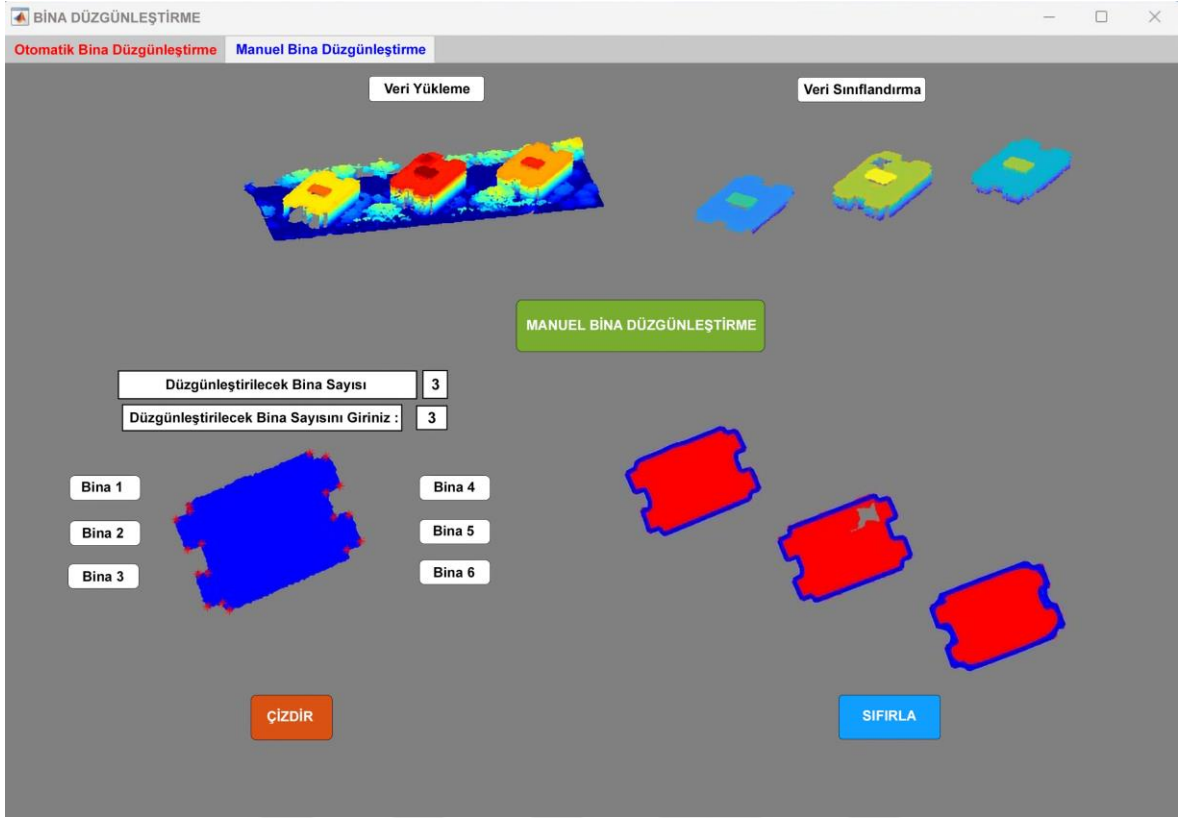


Şekil 55. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırı

2.9. Arayüz Tasarlama

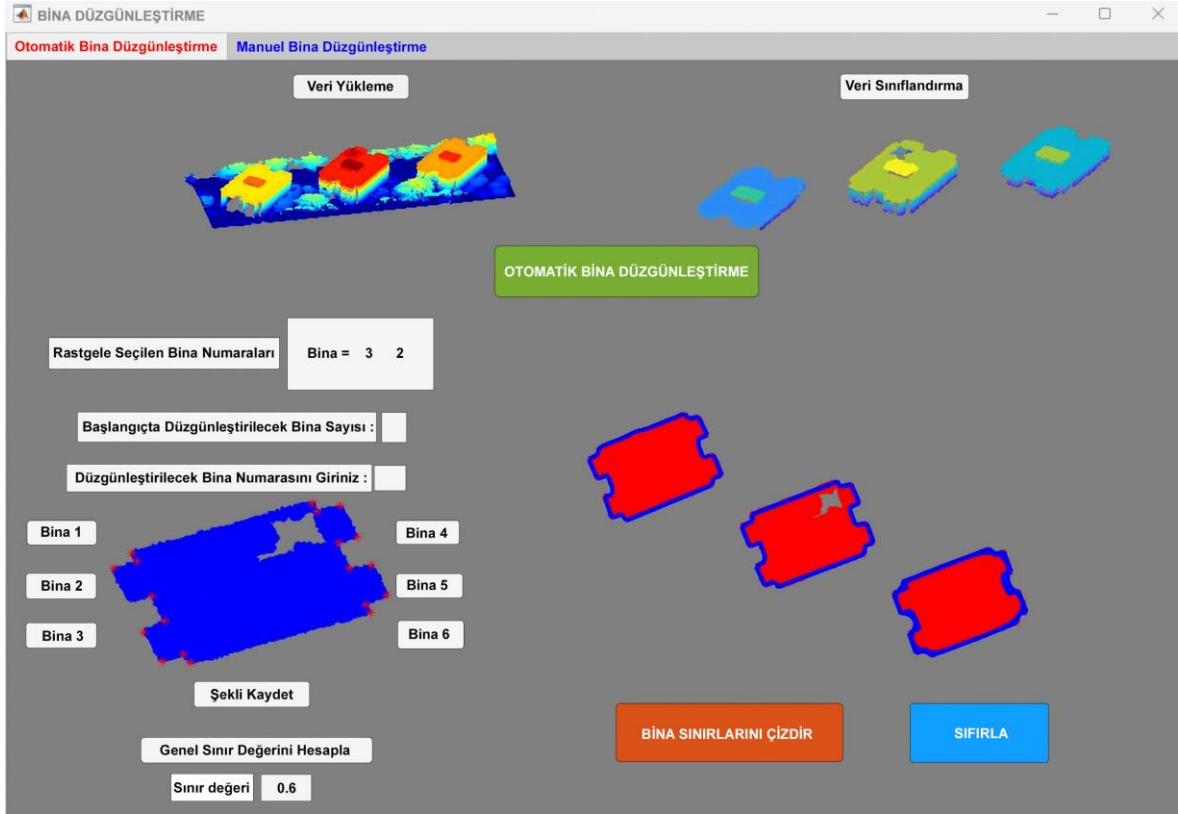
Tez çalışması kapsamında geliştirilen yaklaşımın farklı veri setleri üzerinde uygulanması ve bu işlemlerden elde edilen sonuçların kullanıcıya aktarılması amacıyla bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel yaklaşımın bağımsız bir biçimde analiz edilmesi ve veri setinin ortama transferi noktasında kullanım kolaylığı açısından MATLAB ticari yazılımı tercih edilmiştir. MATLAB hem program hem de programlama dili olma özelliği ile her türlü formatta veriyi bünyesine dahil edebilen ve hazır araç kutuları sayesinde çeşitli fonksiyonların kullanılabildiği mühendislik alanındaki önemli bir platformdur. Bu yönüyle geliştirilen algoritmanın hızlı biçimde sonuçlarının elde edilmesi ve çeşitli analizlerin yapılabilmesi için MATLAB yazılımına ek olarak bulunan “*AppDesigner*” arayüz modülü kullanılmıştır.

Tasarlanan arayüzde kullanıcıya yarı otomatik ve otomatik bina düzgünleştirme olmak üzere iki farklı kullanım imkânı sunulmaktadır. Bu kullanımların her ikisinden de ilk olarak “veri yükleme” kısmı ile arayüze *.las, *.xyz, *.laz ve *.txt uzantılı fotogrametrik veya LiDAR nokta bulutu aktarımı sağlanacaktır. Ardından veri setleri içerisindeki tüm binalar arayüz tarafından sınıflandırılarak bina detayları çıkartılacak ardından I-Octree ile binaların sadece çatı kısımlarına ait nokta bulutu verileri elde edilerek düzgünleştirme aşamasına geçilecektir. Düzgünleştirme aşamasında öncelikle kullanıcı tarafından düzgünleştirilmek istenilen bina numarası girişi sağlanmalıdır. Ardından kullanıcı tarafından seçilen binaya ait farklı başlangıç sınır değerleri (0,3-0,8) ile hesaplanarak bulunmuş kesin köşe noktalarını içeren altı farklı görsel sunulmaktadır. Böylece ön hazırlık aşamasında manuel olarak belirlenen başlangıç sınır değeri, artık kullanıcı tarafından binayı en iyi temsil eden köşe noktalarının olduğu görsel seçilerek gerçekleştirilecektir. Son olarak arayüz üzerinde konumlandırılan “Çizdir” butonu ile bina sınırı düzgünleştirilecektir (Şekil 56).



Şekil 56. Yarı otomatik bina sınır düzgünleştirme arayüzü tasarımı

Otomatik bina düzgünleştirme aşamasında ise veri yükleme, nokta bulutunun sınıflandırılması, binaların çıkarılması ve I-Octree yaklaşımı ile bina detaylarının elde edilmesi yarı otomatik düzgünleştirme kısmındaki aşamalar ile aynıdır. Bina sayısının fazla olduğu veri setlerinde her bina için tek tek görsel seçmek zorlayıcı bir aşamadır. Bu yüzden kullanıcı tarafından altı farklı görsel üzerinden en uygun bina seçme aşamasını otomatikleştirmek için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sadece bina çatı detaylarının girdi olarak kullanıldığı bu aşamada, tasarlanan arayüz, bina sayılarının %10'u olacak şekilde rastgele binalar seçmektedir. Ardından kullanıcı sadece seçilen bu binalar için ayrı ayrı en uygun altı farklı görseli seçecektir. Geliştirilen yaklaşım ile seçilen binaların başlangıç sınır değerleri irdelenerek ortalama sınır değeri hesaplanacaktır. Böylece geriye kalan binaların çatı detayları, belirlenen bu başlangıç sınır değeri ile otomatik bir şekilde çizdirilecektir (Şekil 57).



Şekil 57. Otomatik bina sınır düzgünleştirme arayüzü tasarımı

Sonuç olarak ortogonal, eğrisel ve karma geometrili binaların düzgünleştirilmiş nihai sınırları elde edilerek, vektör formatlı olarak kaydedilmiştir. Geliştirilen her iki aşamada da düzgünleştirilen bina sınırları *.shp, *.dgn, *.dxf ve *.dwg gibi formatlarda grafik veri olarak çıktı alınabilmektedir. Böylelikle günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan nokta bulutu verilerinden bina sınır geometrilerinin düzgünleştirilmesi bir yazılım ortamında otomatik olarak gerçekleştirilecektir. Günümüzde kullanılan veri setleri içerisindeki binaların sayısı göz önünde bulundurulduğunda geliştirilen arayüzün etkin bir şekilde kullanılabileceği öngörülmektedir.

2.10. Referans (Doğrulama) Verileri

Tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntemlerin doğruluk analizi işlemi, seçilen çalışma alanlarından elde edilecek LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu verisinden düzgünleştirilen ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina sınırları ile aynı bölgeyi içeren referans verilerinin karşılaştırılması sonucu gerçekleştirilecektir. Çalışma alanlarına ait

referans veriler, nokta bulutu verilerinin temin edildiği kamu/özel kurum veya kuruluşlardan tedarik edilmiştir. Ayrıca İHA ile görüntü alımı yapılarak nokta bulutu elde edilen çalışma alanlarından üretilen raster veriler üzerinden sayısallaştırma yapılarak bina sınırlarının referans verisi elde edilmiştir. Kaliforniya (LiDAR) ve Erzurum çalışma alanlarına ait referans veriler Şekil 58 ve Şekil 59’da gösterilmiştir.



Şekil 58. Kaliforniya çalışma alanı referans verisi



Şekil 59. Elâzığ çalışma alanı referans verisi

Çalışma alanlarından otomatik olarak düzgünleştirilen bina çatılarının piksel bazlı doğruluk analizi testleriyle incelenebilmesi için referans verilerdeki ilgili binalar, Global Mapper programında poligon (alan) yapısında manuel olarak çıkartılmış ve doğruluk değerlendirmesine hazır hale getirilmiştir. Nokta bazlı doğruluk değerlendirmesinde ortogonal ve karma binaların sadece köşe noktaları değerlendirileceği için aynı binaya ait hem çalışma kapsamında elde edilen hem de referans veri üzerindeki köşe noktaların olması yeterlidir. Sonuç olarak hem piksel hem de nokta bazlı karşılaştırmalarda yöntemlerin uygulanması sonucu üretilen geometrik sınırların gerçek sınırlara hangi ölçekteki harita doğruluğu nispetinde uyum sağladığı incelenecektir.

3. BULGULAR

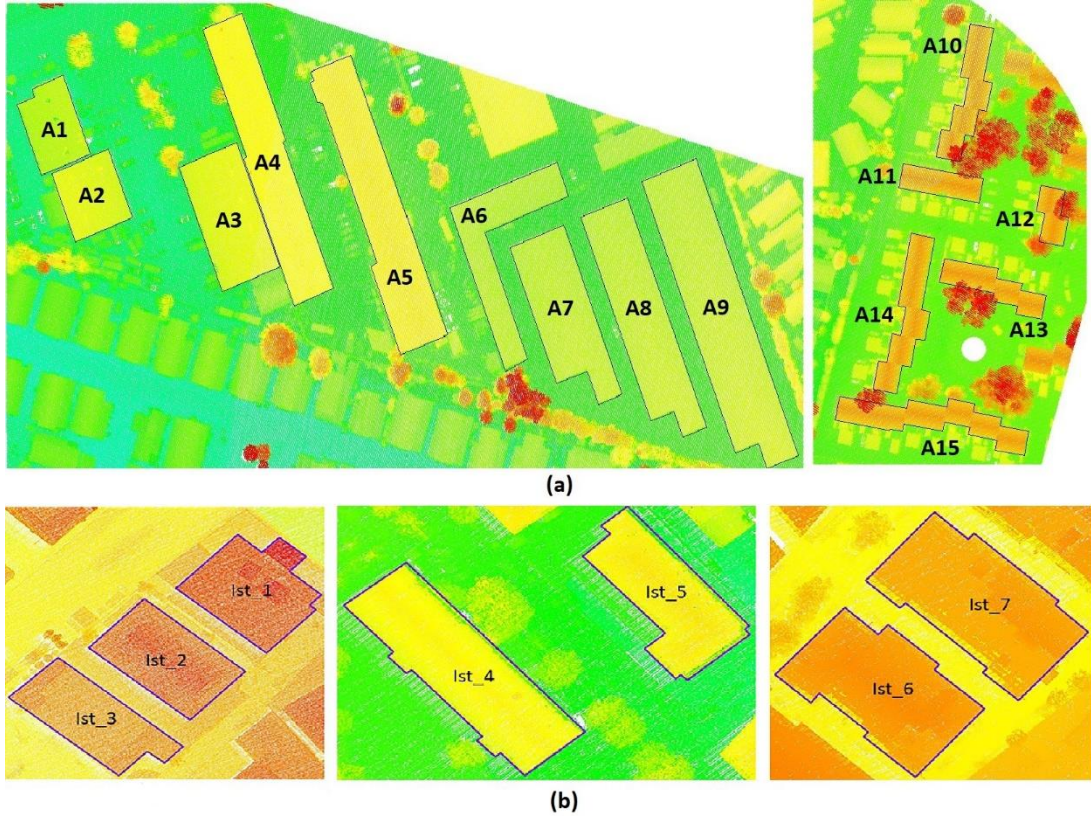
Çalışma kapsamında, LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutlarında ortogonal, eğrisel ve karma (ortogonal+eğrisel) geometrili bina sınırlarını otomatik sayısallaştıran/düzgünleştiren bir yaklaşım önerilmektedir. Çalışmada öncelikle LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilmiş nokta bulutu verileri SMRF algoritması ile yer ve yer üstü olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Ardından yer üstü noktalarını, bitki örtüsü ve bina noktaları olarak ayırabilmek için MATLAB ortamında bulunan “*helperClassify*” fonksiyonu kullanılmıştır. Sınıflandırma sonucunda elde edilen binalara ait detaylardaki gürültü noktalarının ayıklanabilmesi için DBSCAN algoritması ile bina detayları sınıflandırılmıştır. Düzgünleştirme aşamasına geçilmeden önce bina duvar ve/veya binaya ait çıkıntılarının elimine edilebilmesi için tüm binalara I-Octree yöntemi uygulanmıştır. Böylece ön hazırlık aşaması olarak adlandırılan bu aşamalar tamamlanmış ve düzgünleştirme aşamasında girdi olarak kullanılacak olan sadece bina çatısına ait noktalar tespit edilmiştir. Çalışmanın ana amacı olan bina sınırlarını düzgünleştirme aşamasında farklı kriterler ile nokta bulutu verileri irdelenmiş ve bina çatılarına ait sırasıyla aday, ideal ve kesin köşe noktaları tespit edilerek bina sınırları düzgünleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında geliştirilen yöntemin test edilebilmesi için farklı bina çatı geometrilerini içeren değişken nokta yoğunluklarına sahip LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu verileri bulunan çalışma alanları seçilmiştir. Seçilen çalışma alanlarında bulunan bina çatı geometrileri her türlü kısıtlamaların (kenar uzunluğu ve köşe sayısı) test edilebilmesi için özellikle seçilmiştir. Ayrıca eğrisel ve karma çatı geometrili binaların dağılımları ortogonal geometrili binalara nazaran daha seyrek olduğu için bu tip binalar çalışma alanlarına ait nokta bulutu verilerinden ayrı ayrı seçilerek önerilen yöntem test edilmiştir. Tez çalışması kapsamında tüm çalışma alanlarına ait sonuçlar nitel ve nicel olarak Bulgular ana başlığı altında irdelenerek yorumlanacaktır.

3.1. Ortogonal Geometrili Bina Çatı Sınırlarının Değerlendirmesi

Çalışma kapsamında önerilen yöntemin ortogonal geometrili bina çatıları üzerinde test edilebilmesi için LiDAR veri seti içeren Kaliforniya ve İstanbul, fotogrametrik nokta bulutu

veri seti içeren Elâzığ ve Erzurum çalışma alanları seçilmiştir. Kaliforniya ve İstanbul çalışma alanlarında düzgünleştirme işlemi sonucunda elde edilen nihai ortogonal bina sınırları Şekil 60'da, Elâzığ ve Erzurum çalışma alanlarına ait nihai ortogonal bina sınırları ise Şekil 61'de aynı çalışma alanlarını içeren nokta bulutu üzerine süper impoze edilerek gösterilmektedir.



Şekil 60. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırları: a) Kaliforniya ve b) İstanbul



Şekil 61. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırları: a) Elâzığ ve b) Erzurum

Çalışma kapsamında elde edilen düzgünleştirilmiş ortogonal geometrili bina sınırları referans olarak kullanılan aynı çalışma alanına ait 1/1000 ölçekli vektör haritalar ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama amacıyla yapılan değerlendirme hem piksel hem de nokta bazlı olarak gerçekleştirilmiştir. Piksel bazlı elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 7’de, nokta bazlı elde edilen değerlendirme sonuçları ise Tablo 8’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırlarının piksel bazlı değerlendirme sonuçları

Çalışma Alanı	Bina No	Cp	Cr	Q	F-Skor
Kaliforniya	A1	0,9974	0,9967	0,9941	0,9971
	A2	0,9985	0,9904	0,9889	0,9944
	A3	0,9916	0,9946	0,9863	0,9931
	A4	0,9859	0,9892	0,9754	0,9875
	A5	0,9854	0,9928	0,9785	0,9891
	A6	0,9964	0,9852	0,9822	0,9910
	A7	0,9910	0,9874	0,9786	0,9892
	A8	0,9857	0,9906	0,9766	0,9881
	A9	0,9921	0,9842	0,9766	0,9882
	A10	0,9955	0,9906	0,9862	0,9931
	A11	0,9942	0,9884	0,9827	0,9913
	A12	0,9889	0,9890	0,9781	0,9889
	A13	0,9978	0,9913	0,9891	0,9945
	A14	0,9958	0,9905	0,9863	0,9931
	A15	0,9947	0,9932	0,9879	0,9939
Ortalama		0,9927	0,9903	0,9832	0,9915
İstanbul	İst_1	0,9968	0,9961	0,9930	0,9965
	İst_2	0,9963	0,9948	0,9912	0,9956
	İst_3	0,9953	0,9868	0,9822	0,9910
	İst_4	0,9960	0,9960	0,9920	0,9960
	İst_5	0,9902	0,9853	0,9755	0,9876
	İst_6	0,9948	0,9902	0,9851	0,9925
	İst_7	0,9956	0,9882	0,9839	0,9919
Ortalama		0,9950	0,9911	0,9861	0,9930
Elâzığ	C1	0,9740	0,9482	0,9453	0,9558
	C2	0,8738	0,9952	0,8701	0,9305
	C3	0,9804	0,9612	0,9431	0,9707
	C4	0,9530	0,9409	0,8992	0,9469
	C5	0,9668	0,9306	0,9017	0,9483
	C6	0,8938	0,9456	0,8731	0,9190
	C7	0,9449	0,8997	0,8748	0,9117
	C8	0,9285	0,9383	0,8950	0,9333
	C9	0,8281	0,9811	0,8150	0,8981
	C10	0,8811	0,8891	0,7983	0,8851
	C11	0,8627	0,9041	0,7904	0,8829
	C12	0,8413	0,9529	0,8077	0,8936
Ortalama		0,9107	0,9406	0,8678	0,9229
Erzurum	D1	0,9844	0,9795	0,9646	0,9820
	D2	0,9717	0,9699	0,9433	0,9708
	D3	0,9276	0,9758	0,9067	0,9511
	D4	0,9924	0,9491	0,9422	0,9702
	D5	0,9867	0,9775	0,9648	0,9821
	D6	0,8669	0,9821	0,8534	0,9209
Ortalama		0,9549	0,9723	0,9292	0,9629

Tablo 7’de dört bölgeye ait toplamda kırk adet farklı kenar uzunluğu ve köşe sayısına sahip düzgünleştirilmiş ortogonal geometrili bina sınırlarının piksel bazlı doğruluk değerlendirme sonuçları görülmektedir. LiDAR nokta bulutu içeren Kaliforniya ve İstanbul çalışma alanları ayrı ayrı incelendiğinde ortalama tamlık (Cp), doğruluk (Cr), kalite (Q), ve F-skor değerleri Kaliforniya çalışma alanı için sırasıyla 0,9927, 0,9902, 0,9831 ve 0,9831, İstanbul çalışma alanı için sırasıyla 0,9950, 0,9911, 0,9861 ve 0,9930 olarak hesaplanmıştır. Nokta bulutunun bina çatı sınırlarında homojen bir şekilde dağılması önerilen yöntemin köşe noktalarını bulmasında büyük kolaylık sağlamış ve sonuç olarak Kaliforniya ile İstanbul çalışma alanlarında bulunan ortogonal bina sınırları Şekil 60’da görüldüğü üzere gerçeğe uygun bir şekilde düzgünleştirilmiştir.

Fotogrametrik nokta bulutu içeren Elâzığ ve Erzurum çalışma alanları ayrı ayrı incelendiğinde Elâzığ için ortalama Cp, Cr, Q ve F-skor değerleri sırasıyla 0,9550, 0,9723, 0,9217 ve 0,9629, Erzurum için sırasıyla 0,9935, 0,9905, 0,9841 ve 0,9920 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma alanları için piksel bazlı doğruluk değerlendirmesi sonucunda hesaplanan değerler incelendiğinde, Kaliforniya ve İstanbul çalışma alanları için hesaplanan doğruluk değerlerine göre belirli bir oranda düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Elâzığ ve Erzurum çalışma alanlarında gözlemlenen bu düşüşün başlıca nedeni, kullanılan veri setinin türüdür. Çünkü fotogrametrik nokta bulutunun dezavantajlarından olan gölgelik alanlarda noktaların üretilmemesi ve seçilen eşleştirme yönteminin doğruluğu/eşleştirme kalitesi bina çatı sınırlarındaki nokta dağılımını büyük ölçüde etkilemiş ve önerilen yöntemin köşe noktalarını konumsal olarak doğru bulamamasına neden olmuştur. Ancak önerilen yöntem, farklı veri setleri içeren dört bölge içerisindeki ortogonal geometrili bina sınırlarını eksiksiz bir şekilde bularak gerçeğe yakın bina sınırlarını otomatik bir şekilde düzgünleştirmiştir.

Tablo 8. Düzgünleştirilmiş ortogonal bina sınırlarının nokta bazlı değerlendirme sonuçları

Çalışma Alanı	Bina No	RMSE _x	RMSE _y	RMSE Açı	RMSE Paralellik	RMSE Kenar Uzunluk	RMSE Ağırlık Merkezi	RMSE En Uzun Doğru	$\sum$ RMSE	$\sum$ Oran
Kaliforniya	A1	0,0895	0,1296	0,2465	0,0089	0,2068	0,4276	0,1725	0,2126	0,9964
	A2	0,0843	0,1716	0,2104	0,0045	0,0429	0,3754	0,1083	0,1711	0,9968
	A3	0,1170	0,0780	0,3401	0,0019	0,1905	0,4608	0,2356	0,2356	0,9959
	A4	0,5541	0,4535	0,6870	0,0087	0,7649	0,6791	0,4908	0,5397	0,9877
	A5	0,3882	0,3444	0,7665	0,0057	0,4287	0,3723	0,3455	0,3780	0,9756
	A6	0,1779	0,1847	0,6731	0,0020	0,2736	0,0156	0,0336	0,1720	0,9893
	A7	0,3178	0,2663	1,6685	0,0057	0,3350	0,2928	0,2308	0,4262	0,9807
	A8	0,1791	0,2426	1,4508	0,0056	0,3984	0,2647	0,2050	0,3764	0,9871
	A9	0,3799	0,4216	0,9665	0,0076	0,5689	0,3571	0,3571	0,4270	0,9741
	A10	0,5541	0,4535	0,6870	0,0087	0,7649	0,6791	0,4908	0,5397	0,9778
	A11	0,0636	0,2192	0,6304	0,0044	0,2136	0,2321	0,2948	0,2363	0,9915
	A12	0,0789	0,4938	0,3234	0,0031	0,3167	0,2648	0,1075	0,1654	0,9955
	A13	0,0112	0,1396	0,1272	0,0018	0,0559	0,0174	0,1893	0,0655	0,9959
	A14	0,6005	0,2655	8,7979	0,0052	0,7010	0,4007	0,2170	1,4236	0,9769
	A15	0,7844	0,5726	9,5230	0,0618	0,7713	0,7783	0,4001	1,7587	0,9283
Ortalama		0,2920	0,2957	1,8065	0,0091	0,4022	0,3745	0,2585	0,4751	0,9833
İstanbul	İst-1	0,1058	0,0375	1,2060	0,0022	0,1213	0,0832	0,0929	0,2158	0,9777
	İst-2	0,0198	0,1229	0,2213	0,0005	0,1038	0,0023	0,0871	0,0810	0,9878
	İst-3	0,0557	0,1230	1,0520	0,0013	0,1305	0,0906	0,0636	0,2009	0,9793
	İst-4	0,0921	0,1351	0,9266	0,0047	0,1793	0,1338	0,0732	0,2098	0,9774
	İst-5	0,1364	0,1540	2,5370	0,0103	0,2502	0,1603	0,1148	0,3404	0,9422
	İst-6	0,0576	0,1321	2,3260	0,0036	0,1251	0,1265	0,1227	0,3075	0,9541
	İst-7	0,1093	0,1201	3,7890	0,0042	0,1455	0,1457	0,1171	0,4721	0,9233
Ortalama		0,0823	0,1178	1,7225	0,0038	0,1508	0,1060	0,0959	0,2611	0,9632
Elâzığ	C1	0,3184	0,1423	0,807	0,0053	0,3663	0,2724	0,3445	0,3622	0,9227
	C2	0,4450	0,3839	5,863	0,0257	0,4618	0,3320	0,4445	1,1150	0,8583
	C3	0,2984	0,2809	1,032	0,0052	0,2501	0,4660	0,2234	0,3611	0,9326
	C4	0,3055	0,3504	2,253	0,0078	0,3034	0,1084	0,2613	0,5120	0,8889
	C5	0,3037	0,3223	2,176	0,0042	0,2293	0,2037	0,2493	0,4983	0,8991
	C6	0,4893	0,3587	1,989	0,0313	0,2758	0,2242	0,3183	0,5312	0,8703
	C7	0,4307	0,3522	2,104	0,0119	0,2444	0,2299	0,3827	0,5337	0,8672
	C8	0,2676	0,4080	1,769	0,0155	0,3054	0,2247	0,4750	0,4950	0,8937
	C9	0,4442	0,4470	5,533	0,0323	0,3124	0,3633	0,4715	1,1180	0,8002
	C10	0,4462	0,4698	5,749	0,0341	0,4473	0,3880	0,4282	1,1380	0,7827
	C11	0,4715	0,4613	5,773	0,0335	0,4098	0,4002	0,4462	1,1420	0,7734
	C12	0,4626	0,4504	5,213	0,0315	0,3904	0,3624	0,4249	1,0470	0,8013
Ortalama		0,3903	0,3689	3,3550	0,0197	0,3330	0,2979	0,3724	0,7347	0,8575
Erzurum	D1	0,2440	0,1122	0,9560	0,0170	0,3432	0,2819	0,1985	0,3070	0,9455
	D2	0,2237	0,1331	1,1240	0,0280	0,2707	0,3224	0,1608	0,3230	0,9257
	D3	0,4284	0,2072	1,6210	0,0570	0,7083	0,1796	0,2203	0,4891	0,8997
	D4	0,1444	0,2803	1,6890	0,0120	0,2923	0,1489	0,1387	0,3863	0,9134
	D5	0,1480	0,1429	0,9444	0,0090	0,2065	0,1417	0,2181	0,2687	0,9617
	D6	0,4123	0,3733	4,8170	0,0175	0,3618	0,3190	0,4045	0,9570	0,8217
Ortalama		0,2668	0,2082	1,8585	0,0234	0,3638	0,2322	0,2235	0,4551	0,9113

Tablo 8’de ortogonal geometrili bina çatıları içeren çalışma alanları için tez kapsamında geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirme sonuçları görülmektedir.

Kaliforniya çalışma alanı için hesaplanan $RMSE_X$ ve $RMSE_Y$ değerleri sırasıyla 0,232 m ve 0,261 m iken, İstanbul çalışma alanı için 0,082 m ve 0,118 m olarak hesaplanmıştır. LiDAR veri seti içeren bu iki çalışma alanı kendi aralarında kıyas edildiğinde İstanbul veri seti içerisinde düzgünleştirilen ortogonal geometrili bina çatılarına ait köşe noktalarının hata değeri daha düşüktür. Bunun nedeni Kaliforniya veri setindeki bazı bina sınırlarının ağaçlar tarafından engellenmiş olmasıdır. Dolayısıyla bu durum ortalama $RMSE_X$ ve $RMSE_Y$ hata değerlerinin yüksek çıkmasına neden olmuştur. Çalışma kapsamında geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirmesindeki diğer kriterlerinde değerlendirme aşamasına dahil edilmesi ile hesaplanan RMSE değerleri Kaliforniya çalışma alanı için 0,475, İstanbul çalışma alanı için 0,261 olarak hesaplanmıştır.

Fotogrametrik nokta bulutu içeren Elâzığ ve Erzurum çalışma alanları için ortalama $RMSE_X$ ve $RMSE_Y$ değerleri sırasıyla 0,252 m, 0,266 m, 0,267 m ve 0,208 m olarak hesaplanmıştır. Nokta bazlı doğruluk değerlendirmesindeki diğer kriterlerinde değerlendirme aşamasına dahil edilmesi ile hesaplanan RMSE değerleri Elâzığ çalışma alanı için 0,514, Erzurum çalışma alanı için 0,455 olarak elde edilmiştir. LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu veri seti için hesaplanan RMSE değerleri hem uzunluk hem de açısal hata miktarlarını içerisinde barındırmaktadır.

Ayrıca bu dört çalışma alanı için hesaplanan ortalama RMSE değerlerine karşılık olarak elde edilen doğruluk değerleri Kaliforniya, İstanbul, Elâzığ ve Erzurum için sırasıyla 0,9846, 0,9631, 0,9375 ve 0,9113 olarak hesaplanmıştır.

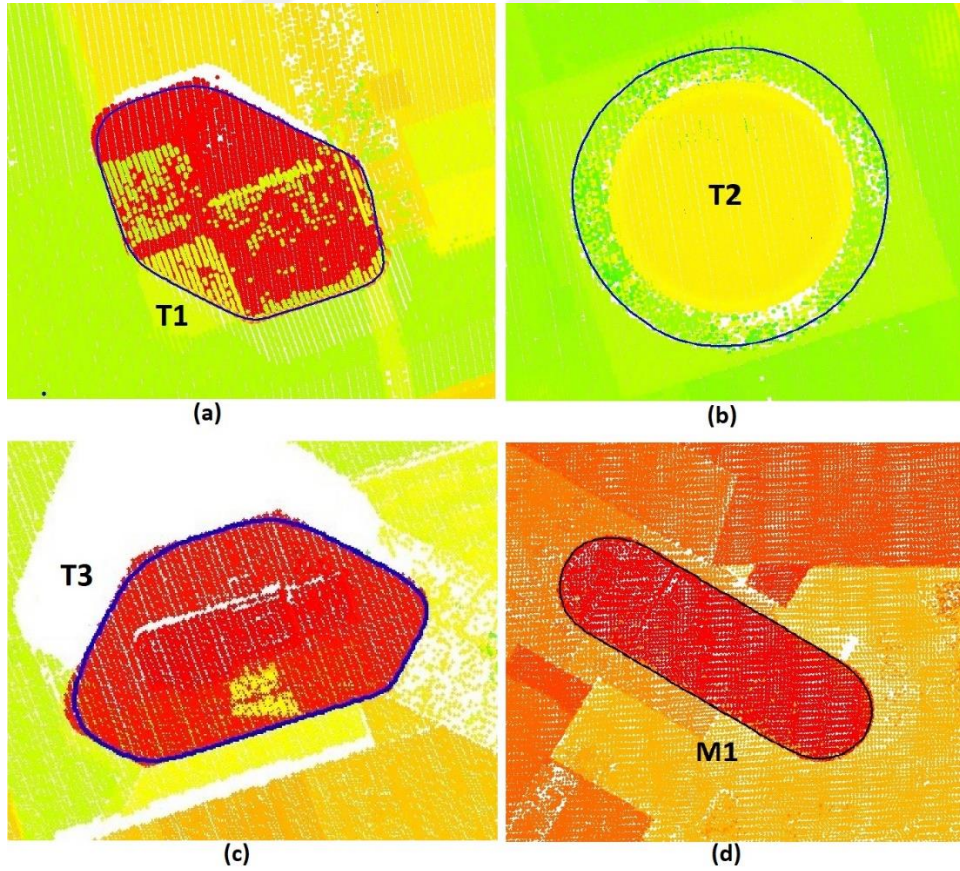
Tablo 8 incelendiğinde dört çalışma alanı içinde RMSE açı sütunundaki değerlerin yüksek olduğu görülmektedir. Referans ile düzgünleştirilen bina sınırlarındaki aynı köşeye ait açı değerleri kıyaslandığında farklılıkların büyük miktarda olmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirmesindeki açı kriterinin çok küçük değişimleri dahi hata olarak ele alabileceğini göstermektedir.

Çalışma alanları için hesaplanan nokta bazlı değerlendirme sonuçları incelendiğinde, LiDAR nokta bulutu verisi içerisindeki A15 binasının RMSE değerleri oldukça yüksektir. Bunun nedeni olarak binanın kenar sayısının fazla ve uzun olmaları, ayrıca bina çatı kenarlarından çok kısa olan bir kenarın önerilen yöntem ile tespit edilememesi olarak belirlenmiştir. Fotogrametrik nokta bulutu verisi içerisindeki C11 binası için gerçekleştirilen

nokta bazlı değerlendirme sonucunda ise gölgelik etkisinden dolayı en fazla RMSE değerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

3.2. Eğrisel Geometrilili Bina Çatı Sınırlarının Değerlendirmesi

Çalışma kapsamında önerilen yöntemin eğrisel geometrilili bina çatıları üzerinde test edilebilmesi için LiDAR veri seti içeren Toronto ve Minnesota, fotogrametrik nokta bulutu veri seti içeren Samsun ve Rize çalışma alanları seçilmiştir. Eğrisel geometrilili bina örnekleri ortogonal bina geometrilerine göre çalışma alanları içerisinde daha seyrek dağılım gösterdiği için bu çalışma alanlarından eğrisel çatı geometrilili binalar ayrı ayrı seçilerek önerilen yöntem test edilmiştir. Toronto ve Minnesota çalışma alanlarında düzgünleştirme işlemi sonucunda elde edilen nihai eğrisel bina sınırları Şekil 62’de, Samsun ve Rize çalışma alanlarına ait nihai eğrisel bina sınırları ise Şekil 63’te ilgili çalışma bölgelerini içeren nokta bulutu veri seti ile aynı referansta olacak şekilde gösterilmektedir.



Şekil 62. Düzgünleştirilmiş eğrisel bina sınırları: a) Toronto ve b) Minnesota



Şekil 63. Düzgünleştirilmiş eğrisel bina sınırları: a) Samsun ve b) Rize

Çalışma kapsamında elde edilen düzgünleştirilmiş ortogonal geometrili bina sınırları referans olarak kullanılan aynı çalışma alanına ait 1/1000 ölçekli vektör haritalar ile değerlendirilmeye alınmıştır. Değerlendirme sadece piksel bazlı olarak gerçekleştirilerek elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 9’da gösterilmektedir.

Tablo 9. Düzgünleştirilmiş eğrisel geometrili bina sınırlarının piksel bazlı değerlendirme sonuçları

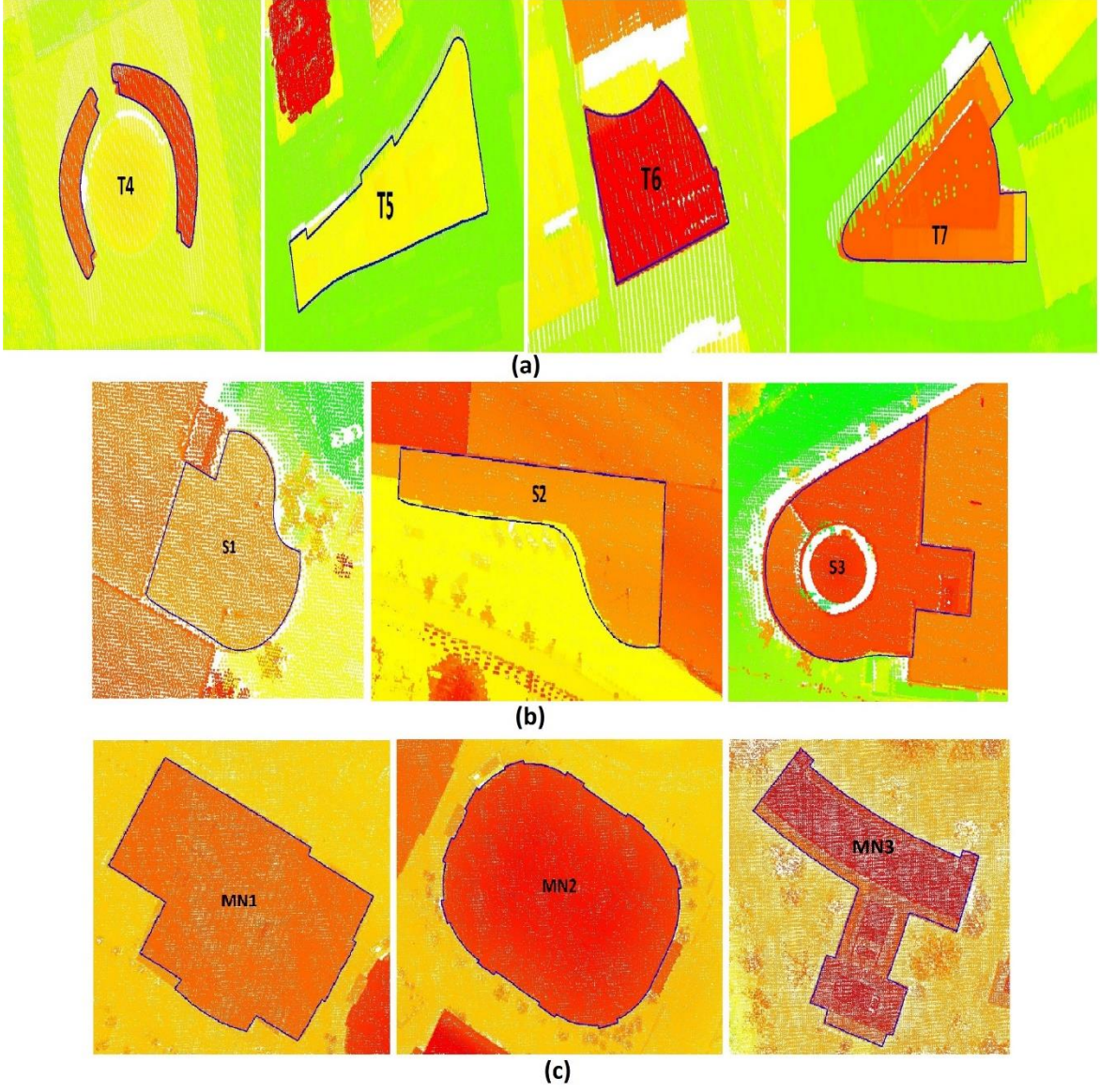
Çalışma Alanı	Bina No	Cp	Cr	Q	F-Skor
Toronto	T1	0,9772	0,9801	0,9791	0,9902
	T2	0,9908	0,9926	0,9951	0,9983
	T3	0,9815	0,9824	0,9809	0,9914
Ortalama		0,9832	0,9850	0,9852	0,9933
Minnesota	M1	0,9943	0,9888	0,9863	0,9919
Samsun	SM1	0,9679	0,9612	0,9703	0,9897
Rize	R1	0,9869	0,9831	0,9813	0,9909

Tablo 9’da dört bölgeye ait toplamda altı adet eğrisel geometrili bina sınırlarının önerilen yöntem ile düzgünleştirilmesinin piksel bazlı doğruluk değerlendirme sonuçları görülmektedir. Yalnızca eğrisel çatı geometrili binalarda belirgin köşe noktası olmadığından çalışma alanlarında seçilen bu binalar sadece piksel bazlı doğruluk değerlendirmesine tabi tutulmuştur.

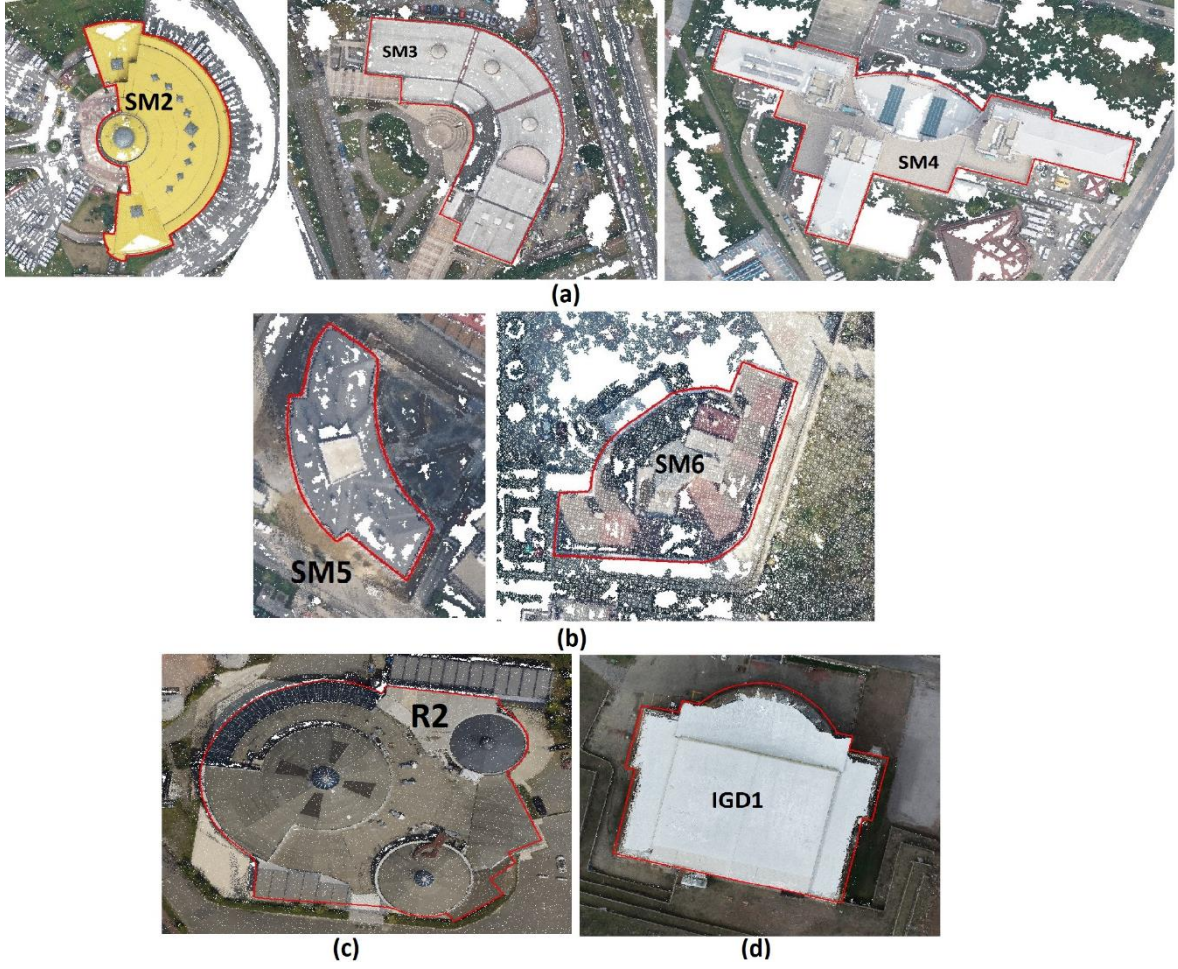
LiDAR nokta bulutu içeren Toronto ve Minnesota çalışma alanları ayrı ayrı incelendiğinde ortalama Cp, Cr, Q ve F-skor değerleri Toronto çalışma alanı için sırasıyla 0,9832, 0,9850, 0,9851 ve 0,9933, Minnesota çalışma alanı için sırasıyla 0,9943, 0,9888, 0,9863 ve 0,9919 olarak hesaplanmıştır. Fotogrametrik nokta bulutu içeren Samsun ve Rize çalışma alanları ayrı ayrı incelendiğinde Samsun için Cp, Cr, Q ve F-skor değerleri sırasıyla 0,9679, 0,9612, 0,9703 ve 0,9919, Rize için sırasıyla 0,9869, 0,9831, 0,9813 ve 0,9909 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma alanları için piksel bazlı doğruluk değerlendirmesi sonucunda her iki veri setinde de yüksek doğruluk değerleri elde edilmiştir. Eğrisel çatı geometrili binalarda köşe noktasının olmaması ve Bézier eğrileri ile sınırın doğrudan çizdirilmesi düzgünleştirme işlemini kolaylaştırmıştır. Ancak her iki veri setinde de nokta dağılımının homojen olmaması ve çatı sınırlarındaki noktaların eksik olması doğruluk değerlerini olumsuz etkileyebilecek durumlardır. Ayrıca eğrisel geometrili bina sınırlarının kullanıcı tarafından nokta bulutu veya ortofoto üzerinden manuel olarak düzgünleştirilebilmesi için geometriyi ideal bir biçimde temsil edecek çok sayıda noktaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak önerilen yöntem ile eğrisel geometrili bina sınırlarının düzgünleştirme işlemi kullanıcı desteği olmaksızın istenilen nokta adedince gerçeğe en yakın şekilde temsil edilmesi sağlanmıştır.

3.3. Karma Geometrili Bina Çatı Sınırlarının Değerlendirmesi

Çalışma kapsamında önerilen yöntemin karma geometrili bina çatıları üzerinde test edilebilmesi için LiDAR veri seti içeren Toronto, Sao Paulo ve Minnesota, fotogrametrik nokta bulutu veri seti içeren Samsun, Rize ve Iğdır çalışma alanları seçilmiştir. Karma geometrili bina örnekleri ortogonal bina geometrilerine göre çalışma alanları içerisinde daha seyrek dağılım gösterdiği için bu çalışma alanlarından binalar ayrı ayrı seçilerek önerilen yöntem test edilmiştir. Toronto, Sao Paulo ve Minnesota çalışma alanlarında düzgünleştirme işlemi sonucunda elde edilen nihai karma geometrili bina sınırları Şekil 64'te, Samsun, Rize ve Iğdır çalışma alanlarına ait nihai karma geometrili bina sınırları ise Şekil 65'de nokta bulutu üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 64. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırları: a) Toronto, b) Sao Paulo ve c) Minnesota



Şekil 65. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırları: a-b) Samsun, c) Rize ve d) Iğdır

Çalışma kapsamında elde edilen düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırları referans olarak kullanılan aynı çalışma alanına ait 1/1000 ölçekli vektör haritalar ile değerlendirilmeye alınmıştır. Karma geometriye sahip binalar eğrisel ve ortogonal kenar içerdiği için hem piksel hem de nokta bazlı doğruluk analizi ayrı ayrı irdelemiştir. Piksel bazlı elde edilen değerlendirme sonuçları Tablo 10’da, nokta bazlı elde edilen değerlendirme sonuçları ise Tablo 11’de gösterilmektedir.

Tablo 10. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırlarının piksel bazlı değerlendirme sonuçları

Çalışma Alanı	Bina No	Cp	Cr	Q	F-Skor
Toronto	T4	0,9734	0,9713	0,9689	0,9851
	T5	0,9815	0,9894	0,9859	0,9904
	T6	0,9886	0,9906	0,9893	0,9911
	T7	0,9849	0,9892	0,9764	0,9893
Ortalama		0,9821	0,9851	0,9801	0,9889
Sao Paulo	S1	0,9908	0,9921	0,9937	0,9955
	S2	0,9863	0,9848	0,9812	0,9906
	S3	0,9854	0,9767	0,9721	0,9912
Ortalama		0,9875	0,9845	0,9823	0,9924
Minnesota	MN1	0,9943	0,9895	0,9847	0,9878
	MN2	0,9919	0,9871	0,9824	0,9869
	MN3	0,9841	0,9792	0,9743	0,9868
Ortalama		0,9901	0,9853	0,9805	0,9872
Samsun	SM2	0,9649	0,9617	0,9547	0,9747
	SM3	0,9685	0,9689	0,9575	0,9801
	SM4	0,9881	0,9893	0,9753	0,9891
	SM5	0,9713	0,9811	0,9693	0,9817
	SM6	0,9693	0,9843	0,9634	0,9829
Ortalama		0,9724	0,9771	0,9641	0,9817
Rize	R2	0,9515	0,9673	0,9485	0,9833
Iğdır	IGD1	0,9985	0,9983	0,9951	0,9993

Tablo 10’da yedi bölgeye ait toplamda on yedi adet farklı kenar uzunluğu ve köşe sayısına sahip düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırlarının piksel bazlı doğruluk değerlendirme sonuçları görülmektedir. LiDAR nokta bulutu içeren Toronto, Sao Paulo ve Minnesota çalışma alanları ayrı ayrı incelendiğinde ortalama Cp, Cr, Q ve F-skor değerleri Toronto çalışma alanı için sırasıyla 0,9821, 0,9851, 0,9801 ve 0,9889, Sao Paulo çalışma alanı için sırasıyla 0,9875, 0,9845 0,9823 ve 0,9924, Minnesota çalışma alanı için ise sırasıyla 0,9901, 0,9853 0,9805 ve 0,9872 olarak hesaplanmıştır.

Fotogrametrik nokta bulutu içeren Samsun, Rize ve Iğdır çalışma alanları ayrı ayrı incelendiğinde Samsun için ortalama Cp, Cr, Q ve F-skor değerleri sırasıyla 0,9724, 0,9771, 0,9641 ve 0,9817, Rize için sırasıyla 0,9515, 0,9673, 0,9485 ve 0,9833, Iğdır için ise sırasıyla 0,9985, 0,9983, 0,9951 ve 0,9993 olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma alanları için piksel bazlı doğruluk değerlendirmesi sonucunda hesaplanan değerler incelendiğinde, en yüksek doğruluk değerlerinin Iğdır çalışma alanına, en düşük doğruluk değerinin ise Rize çalışma alanındaki binaya ait olduğu görülmektedir.

Tablo 11. Düzgünleştirilmiş karma geometrili bina sınırlarının nokta bazlı değerlendirme sonuçları

Çalışma Alanı	Bina No	RMSE _X	RMSE _Y	RMSE Açı	RMSE Paralellik	RMSE Kenar Uzunluk	RMSE Ağırlık Merkezi	RMSE En Uzun Doğru	$\sum$ RMSE	$\sum$ Oran
Toronto	T4	0,119	0,099	0,275	0,007	0,2463	0,3976	0,1921	0,1911	0,9613
	T5	0,094	0,171	0,240	0,005	0,1531	0,4114	0,1883	0,1805	0,9701
	T6	0,147	0,098	0,310	0,002	0,2104	0,1908	0,2156	0,1679	0,9763
	T7	0,184	0,212	1,523	0,061	0,6713	0,7783	0,4001	0,5473	0,9471
Ortalama		0,136	0,145	0,587	0,018	0,321	0,4445	0,2491	0,2717	0,9637
Sao Paulo	S1	0,115	0,047	1,206	0,005	0,1217	0,0901	0,0743	0,2369	0,9607
	S2	0,051	0,102	1,120	0,004	0,1011	0,1043	0,0971	0,2257	0,9633
	S3	0,099	0,110	2,144	0,005	0,1255	0,1091	0,1071	0,3858	0,9543
Ortalama		0,088	0,086	1,489	0,004	0,1161	0,1012	0,0928	0,2828	0,9594
Minnesota	MN1	0,194	0,122	1,015	0,027	0,3331	0,2729	0,1775	0,306	0,9614
	MN2	0,212	0,203	1,911	0,017	0,2618	0,3190	0,3804	0,4721	0,9516
	MN3	0,118	0,121	0,817	0,005	0,3663	0,2124	0,2445	0,2694	0,9644
Ortalama		0,175	0,149	1,247	0,016	0,3204	0,2681	0,2674	0,3492	0,9591
Samsun	SM2	0,174	0,145	0,673	0,007	0,7541	0,6681	0,3908	0,4019	0,9473
	SM3	0,123	0,119	0,730	0,005	0,1935	0,3321	0,3948	0,2713	0,9501
	SM4	0,107	0,133	0,423	0,004	0,3253	0,3648	0,2075	0,2237	0,9609
	SM5	0,099	0,106	0,427	0,002	0,2559	0,2174	0,1893	0,1855	0,9617
	SM6	0,170	0,146	1,011	0,005	0,3013	0,3007	0,1917	0,3038	0,9581
Ortalama		0,135	0,129	0,652	0,005	0,3660	0,3766	0,2748	0,2772	0,9566
Rize	R2	0,157	0,107	12,30	0,098	0,4503	0,7693	0,4123	0,4607	0,9365
Iğdır	IGD1	0,071	0,061	0,137	0,002	0,1241	0,1714	0,1021	0,0958	0,9829

Tablo 11’de karma geometrili bina çatıları içeren çalışma alanları için tez kapsamında geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirme sonuçları sunulmaktadır. LiDAR nokta bulutu verisi içeren Toronto çalışma alanı için hesaplanan RMSE_X ve RMSE_Y değerleri sırasıyla 0,136 m ve 0,145 m, Sao Paulo çalışma alanı için 0,088 m ve 0,086 m ve son olarak Minnesota çalışma alanı için 0,175 m ve 0,149 m değerleri hesaplanmıştır. LiDAR veri seti içeren bu dört çalışma alanı için düzgünleştirilen karma geometrili bina çatılarının köşe noktalarının referans verideki köşe noktalarına göre hata değerleri oldukça düşüktür. Çalışma kapsamında geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirmesindeki diğer kriterlerinde değerlendirme aşamasına dahil edilmesi ile hesaplanan RMSE değerleri

Toronto, Sao Paulo ve Minnesota çalışma alanları için sırasıyla 0,272, 0,283 ve 0,349 olarak elde edilmiştir.

Fotogrametrik nokta bulutu içeren Samsun çalışma alanı için ortalama $RMSE_x$ ve $RMSE_y$ değerleri sırasıyla 0,135 m, 0,129 m, Rize için 0,157 m, 0,107 m ve Iğdır için 0,071 m, 0,061 m olarak hesaplanmıştır. Nokta bazlı doğruluk değerlendirmesindeki diğer kriterlerinde değerlendirme aşamasına dahil edilmesi ile hesaplanan RMSE değerleri Samsun, Rize ve Iğdır çalışma alanları için sırasıyla 0,277, 0,461 ve 0,096 olarak elde edilmiştir. Çalışma alanları için elde edilen nokta bazlı doğruluk değerlendirme sonuçları ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde özellikle Rize çalışma alanında seçilen R-2 binasının sonuç RMSE değeri diğer çalışma alanları için hesaplanan RMSE değerlerine göre büyüktür. Seçilen R-2 binası için ortogonal kenarlarından eğrisele veya eğrisel kenarlarından ortogonal kenara geçme aşamalarında yer alan köşe noktalarında bazı kaymalar olmuştur. Bu durum RMSE değerinin büyük çıkmasına neden olmuştur. Diğer yandan çalışma alanları içerisinde en düşük ortalama RMSE değeri Iğdır çalışma alanında seçilen IGD-1 binası için hesaplanmıştır. Fotogrametrik nokta bulutunun yoğunluğu ve bina çatı sınırı kısımlarındaki nokta dağılımlarının homojen olması yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamıştır.

Ayrıca bu yedi çalışma alanı için hesaplanan ortalama RMSE değerlerine karşılık olarak elde edilen doğruluk değerleri Toronto, Sao Paulo, Minnesota, Samsun, Rize ve Iğdır çalışma alanları için sırasıyla 0,9637, 0,9594, 0,9591, 0,9566, 0,9365 ve 0,9829 olarak hesaplanmıştır. LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu veri setleri için elde edilen değerler kıyaslandığında her iki veri seti içinde birbirlerine yakın doğruluk değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni fotogrametrik nokta bulutu veri setinin yoğunluğunun yüksek ve dağılımının iyi olmasıdır.

4. TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında ön hazırlık ve çalışmanın temel hedefi olan bölümlerde bazı problemlerle karşılaşmıştır. Bu problemlerin bazıları veri setinden kaynaklı iken bazıları da geliştirilen algoritmadaki mevcut değişkenlere dışarıdan müdahale ile değer atanmasından dolayı oluşmaktadır. Ancak çalışma kapsamında geliştirilen yöntem ve ilave eklenen aşamalar ile bu problemler en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Veri setinden kaynaklı başlıca problem, LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilen nokta bulutu verilerinin yer ve yer üstü (bitki örtüsü ve bina) noktalar olarak filtrelenmesidir. Tez kapsamında, MATLAB yazılımında bulunan ve SMRF algoritmasını esas alan “*segmentGroundSMRF*” fonksiyonu kullanılarak nokta bulutu yer ve yer üstü noktalar olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Bu fonksiyon için girdi olarak kullanılan dört parametre, kullanılan veri setinin türü, yoğunluğu, yüksekliklerdeki ani değişiklik farkları, arazi topoğrafyası vb. kriterlere göre değişkenlik göstermektedir. Bu parametrelerin manuel seçilmesi yer ve yer üstü noktaların filtrelenmesinde yanlış sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır. Zemine ait noktaların, zemin üstü olarak etiketlenmesi ile binaya ait noktalarının göz ardı edilebilme ihtimali bulunmaktadır. Bu durumda yanlış bir şekilde bina noktalarının çıkarılması sağlanacağı için sınır düzgünleştirme işleminde hatalı başlangıç sınırı elde edilecektir.

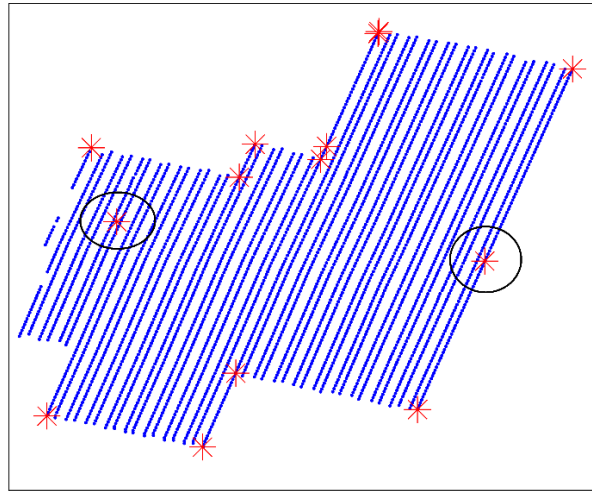
Literatürde mevcut zemin çıkarma algoritmaları arasında yer alan Cloth Simulation Filtering (CSF) ve Triangulated Irregular Network (TIN) metodu yerine SMRF algoritmasının tercih edilmesindeki ana sebep; bu algoritma ile birlikte kullanılan “*helperClassify*” adlı fonksiyonun yer üstü noktaları, bina ve bitki alt sınıflarına ayırabilme yeteneğinin olmasıdır. İlgili fonksiyon SMRF algoritması gibi değişken parametrelere bağlı olduğu için arazi üzerinde doğal ve yapay nesnelerin (ağaç ve bina) sınıflandırılması aşamasında sorun oluşabilmektedir. İlave olarak fotogrametrik nokta bulutu verilerinde gölgelerden kaynaklı nokta eksikliği, sınıflandırma konusunda LiDAR nokta bulutu verisine göre daha fazla sorun teşkil etmektedir (Şekil 66).



Şekil 66. Fotogrametrik nokta bulutunda gölgelik alanlardan kaynaklı nokta eksiklikleri: a) Elâzığ ve b) Erzurum çalışma alanı

Gölgelik alanlardan dolayı bina çatı sınırlarındaki noktaların eksik olması ve bunun sonucunda bina sınırlarının tam olarak düzgünleştirilememesi özellikle nokta bazlı doğruluk değerlerini etkilediği görülmektedir. Özellikle bu problemin etkili olduğu Elâzığ çalışma alanındaki bina geometrilerinde hesaplanan $RMSE_x$ ve $RMSE_y$ değerlerinin yüksek çıktığı görülmektedir.

Veri setlerinden kaynaklı bir diğer problem ise LiDAR nokta bulutu üretimi yapılırken yeterli bindirme oranları olmadan uçuş yapılarak taramaların gerçekleştirilmesidir. Bu durum binaları temsil eden nokta sayılarının az olmasına ve bina çatı kenarlarına gelen noktaların düzgün sıralanmamasına neden olmaktadır. Bundan dolayı ilk aşama olarak belirlenen başlangıç bina sınırı doğru bir şekilde elde edilemez ve bu durum sonraki aşamada köşe noktalarının yanlış bulunmasına neden olmaktadır (Şekil 67).



Şekil 67. Hatalı köşe noktası tespiti

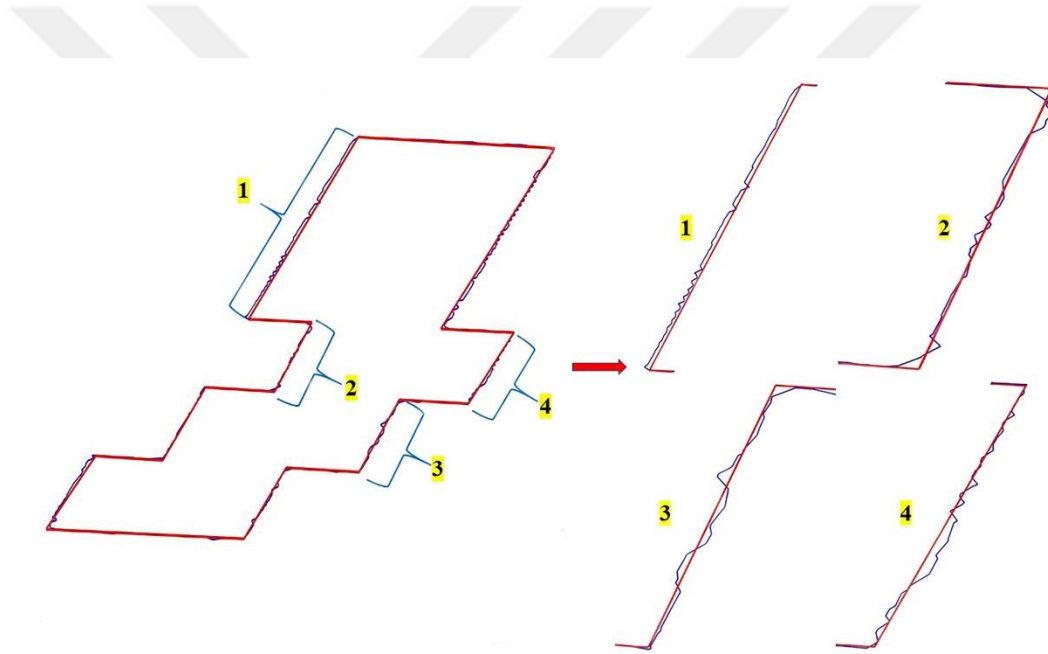
Ön hazırlık aşamasında karşılaşılan bir diğer problemde bina geometrisini temsil eden ancak çatıya ait olmayan kısımlarında çatı olarak etiketlenmesidir. Binaların çatı kısımlarından daha alçakta var olan balkon, klima vb. çıkıntılarında ortogonal bakışta çatıya aitmiş gibi algılanıp düzgünleştirilmesi sonucunda gerçeği yansıtmayan bina sınırı elde edilmektedir. Bu problemin giderilebilmesi için I-Octree yöntemi, tüm binalar üzerinde uygulanarak sadece bina çatılarına ait noktaların düzgünleştirilme aşamasında kullanılması sağlanılmıştır. Böylece bina çatı geometrilerini temsil eden gerçek sınırlar elde edilmiştir.

Çalışmanın ana hedef aşamasında bulunan ve ABORE yönteminin giriş kısmı olan bina geometrilerini temsil eden başlangıç sınırlarının çizdirilmesi aşamasında da bazı problemler ile karşılaşmıştır. Öncelikle *boundary* fonksiyonu ile elde edilen başlangıç bina sınırını belirleyen girdi parametre değerinin, veri türüne ve özellikle verilerin nokta yoğunluklarına göre değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumdan dolayı yanlış girdi olarak kullanılan bir değer sonucunda bina geometrisini temsil eden başlangıç bina sınırının gerçeği yansıtmadığı görülmektedir. Bu problemi giderebilmek için özellikle tez çalışması kapsamında tasarlanan ara yüz kısmında tüm veri setinden rastgele seçilen ve tüm bina sayısının %10'u kadar olan binanın başlangıç sınır değerleri kullanıcıya seçtirilerek, tüm binalara uygulanacak ortak sınır değer parametresi elde edilmiştir. Bu hesaplanan değer tüm veri setine uygulanarak, bina geometrilerini tam olarak temsil edebilen bina başlangıç sınırlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Ancak nokta bulutu verilerinin homojen olarak dağılmaması veya rastgele seçilen binaların aynı bölgeden olması başlangıç sınır değerinin yanlış hesaplanmasına neden olabilmektedir.

Başlangıç sınırını temsil eden noktalar ile kesişim açısı hesaplama aşamasında belirlenen açı koşulunu sağlayan birçok nokta bulunmuştur. Bulunan her noktanın aday köşe noktasını temsil etmediği görülmüştür. Bu durum veri setinin nokta yoğunluğu az ve dağılımı iyi olmadığında gözlemlenmiş ve bina çatı köşe noktalarının hatalı bulunmasına neden olmuştur. Bundan dolayı çalışma kapsamında geliştirilen algorithmada “*mp*” adında bir parametre belirlenmiştir. Bu parametre açı kriteri değerlendirmesi yapılırken, düzensiz başlangıç bina sınır noktalarından seçilen herhangi bir noktanın, öncesi ve sonrasındaki kaç adet noktanın işleme tabi tutulacağını belirtmektedir. Yani düzensiz başlangıç bina geometrisini temsil eden noktaların her biri için *mp* değerine göre öncesinde ve sonrasında alınan noktaların tümü ile kesişim açıları hesaplanmaktadır. Veri setinin yoğunluğu ve düzgünleştirilecek binanın kenar uzunluklarına göre *mp* değeri değişkenlik göstermektedir. Eğer bu değer küçük seçilirse (en az 2) aday köşe noktası olamayacak noktalarda açı

koşulunu sağladığı görülür. Aksine bu değer büyük seçilirse (6'dan fazla) kısa çatı kenarları içeren binalarda, aday köşe noktalarının bulunmasında problemler ortaya çıkmaktadır. Mp değeri yapılan uygulamalar sonucunda 3-6 arasında seçilebileceği gözlemlenmiştir. Tez kapsamında bu değer 4 olarak seçilmiştir.

Tez çalışması kapsamında tüm sınır noktaları için üretilen kesişim koordinatları, ideal köşe noktası tahmininde kullanılmıştır. Böylece ideal köşe noktalarının tespit edilmesi için sınır noktaları üzerinden işlemler gerçekleştirilerek ilgili noktaların etiket numaraları elde edilmiştir. Sınır noktalarının düzensiz dağılımda olmasından kaynaklı gerçek veri üzerinden ölçülemeyen bina köşe noktaları ilgili etiketlerin kesişim koordinatları kullanılarak daha uygun bir şekilde tahmin edilmektedir (Şekil 68).



Şekil 68. Kesişim noktalarının sınır düzgünleştirme üzerine etkisi (Ozdemir vd., 2022).

ABORE yönteminin geliştirilme aşamasında, ideal köşe noktaları ile düzgünleştirme işlemi yapıldığında bazı bina kenarlarının doğru bir şekilde temsil edilemediği gözlemlenmiştir. Bina sınırlarının gerçeğe daha uygun bir şekilde düzgünleştirilebilmesi amacıyla önerilen yöntem güncellenerek binaların kenarlarına ait noktalar da sınır düzgünleştirilmesi aşamasına dahil edilmiştir. Bu aşamada kenarı temsil eden ardışık iki ideal köşe noktası arasından genişliği 0,5 m olan bir tampon bölge geçirilmiştir. Ancak tampon bölge için belirlenen değer çok büyük olursa düzgünleştirilecek bina sınırı ana hattan

uzaklaşmış olacaktır. Tampon bölge geçirme işlemi sonrasında binaya ait nokta bulutu verisinden o bölge içerisine düşen noktalar belirlenmiş ve MATLAB programı içerisinde bulunan *polyfit* fonksiyonu ile bu noktaları en iyi şekilde temsil eden birinci dereceden doğrular geçirilmiştir. Bu aşama tüm kenarlar için yapılarak bu doğruların kesişim koordinatları bulunmuştur. Kesişim işlemi sonucunda bulunan noktalar, kesin köşe noktası olarak belirlenmiştir. Böylece bina kenarlarına ait noktalarda işleme dahil edilerek kesin köşe noktaları bulunmuş ve bina sınırları düzgünleştirilmiştir.

ABORE yöntemi ile karma geometrili bina çatısının kesin köşe noktaları bulunduğundan sonraki aşama, çatıya ait kenar tiplerinin (ortogonal/eğrisel) otomatik olarak belirlenmesidir. Bu amaçla ilk olarak ardışık tüm köşe noktalarından birinci dereceden doğrular geçirilmiştir. Ardından bu köşe noktaları arasında kalan ve başlangıç sınırını temsil eden noktaların ilgili kenara olan öklid mesafeleri hesaplanmıştır. Hesaplanan mesafeler yardımıyla ilgili aralıktaki ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. Karma geometrili bina çatılarında ortogonal ile eğrisel kenar arasındaki farklılığı tespit edebilmek için ortalama değer 0,40, standart sapma eşik değeri ise 0,25 alınmıştır.

Düzgünleştirme işlemi sonucu elde edilen ortogonal ve karma geometrili bina sınırları için hem piksel hem nokta bazlı; eğrisel sınırlardan oluşan bina geometrisi için sadece piksel bazlı doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Ortogonal ve karma geometrili binalara ait köşe noktaları, referans verideki ilgili bina köşe noktaları ile bire bir karşılaştırılmak suretiyle nokta bazlı doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Her iki değerlendirme sonuçları kıyaslandığında geliştirilen nokta bazlı değerlendirme sonuçları piksel bazlı hesaplanan ortalama kalite (Q) değerlerine göre daha düşük oldukları gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise nokta bazlı doğruluk değerlendirmesinde bina çatısına ait köşe noktalarının konumsal, açısal ve kenar uzunlukları gibi birçok kriter ile hataları çok yönlü test edebilmesinden kaynaklıdır. Literatürde kullanılan piksel bazlı doğruluk analizi ölçütleri alansal bazda kaba bir şekilde yalnızca doğruluk oranı belirlerken hatanın hangi köşe, açı veya kenardan kaynaklandığını belirleyememektedir.

Tez kapsamında önerilen algoritmanın nokta bulutu verisi kullanarak ortogonal ve karma geometrili bina sınırı düzgünleştirilmesi üzerine yapılan diğer çalışmalar ile kıyaslaması Tablo 12’de sunulmaktadır.

Tablo 12. Önerilen yöntemin literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslanması

Bina Geometrilere	Yöntemler	Cp (%)	Cr (%)	Q (%)	F-Skor (%)
Ortogonal	Awrangjeb (2015)	79,9	92,6	75,3	-
	Awrangjeb (2016)	90,1	99,7	89,6	-
	Jung vd. (2017)	91,5	97,4	89,2	-
	Dos Santos vd. (2020)	-	-	-	95,4
	Önerilen Algoritma	96,3	97,3	94,1	96,7
Karma	Dos Santos vd. (2020)	-	-	-	94,3
	Önerilen Algoritma	98,1	98,2	97,5	98,7

Tablo 12 incelendiğinde tez kapsamında önerilen yöntemin literatürdeki diğer yaklaşımlara göre ortogonal ve karma geometrili bina çatılarında hesaplanan tüm doğruluk değerlerinde üstün olduğu görülmektedir. Özellikle Brezilya/Sao Paulo çalışma alanında yer alan S1, S2 ve S3 etiketli karma geometrili binalar, Dos Santos vd. (2020) tarafından yapılan çalışma kapsamında önerilen yöntemi test etmek için kullanılmıştır. Aynı binalar (S1-S3) için sınır düzgünleştirme yöntemleri karşılaştırıldığında Dos Santos vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada düzgünleştirme doğruluğu ortalama %94 seviyelerinde iken tez kapsamında önerilen yöntemin düzgünleştirme doğruluğu ise yaklaşık %98 seviyelerinde olduğu gözlemlenmektedir. İlgili binalar için önerilen düzgünleştirme yöntemi Dos Santos vd. (2020)'nin geliştirdiği yöntemle göre %4'lük bir iyileştirme sağlayarak daha üstün performans göstermiştir. Ayrıca çalışma kapsamında önerilen Bézier eğrileri Dos Santos vd. (2020)'nin önerdiği CD-Spline yöntemine göre eğrisel kenarlı bina sınırlarını hem nicel hem de görsel olarak daha iyi temsil ettiği ortaya konulmuştur.

Önerilen yöntemin dijital büyük ölçekli harita üretimi için gerekli olan bina sınırı/kenarı sayısallaştırılmasında operatör desteğinin minimize edilmesiyle birlikte harita üretiminde kalite ve hızın artırılması açısından etkin bir şekilde kullanılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca önerilen yöntem, literatürde halen çözümü noktasında tam olarak sonuç üretilmemiş eğrisel ve karma geometrili bina sınırlarının düzgünleştirilmesi/sayısallaştırılması problemine karşılık inovatif/yenilikçi bir yaklaşım olarak sunulmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilmiş nokta bulutu verilerinden geleneksel detay çıkarım yöntemleriyle tespit edilmiş ortogonal, eğrisel ve karma geometriye sahip binaların ana hatlarının/sınırlarının nokta bulutu harici herhangi bir ek veriye ihtiyaç duyulmadan düzgünleştirilmesi/sayısallaştırılması için yeni bir yaklaşım geliştirilmiş ve bu yaklaşım kullanıcı dostu bir arayüze dönüştürülmüştür. Çalışmada öncelikle LiDAR ve görüntü eşleştirme tabanlı üretilmiş nokta bulutu verileri yer ve yer üstü olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Ardından yer üstü noktalarını, bitki örtüsü ve bina noktaları olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonucunda elde edilen binaya ait olmayıp dışında kalan gürültü noktaları ayıklanmıştır. Düzgünleştirilme aşamasına geçilmeden önce bina duvar ve/veya binaya ait çıkıntılar elimine edilerek sadece bina çatı noktaları elde edilmiştir. Böylece ön hazırlık aşaması tamamlanmış ve düzgünleştirme aşamasında girdi olarak kullanılacak olan sadece bina çatısına ait noktalar tespit edilmiştir.

Çalışmanın ana hedef kısmında öncelikle ortogonal ve karma geometrili binalarda çatı köşe noktalarını yüksek doğrulukta tespit edebilmek için çalışma kapsamında geliştirilen ABORE yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ortogonal ve/veya karma geometrili binalarda çalışma kapsamında belirlenen kriterlere uygun köşe noktası tespitinde kullanılmıştır. Ardından çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşım ile ortalama ve standart sapma değerleri için eşik değerleri belirlenerek karma geometrili binaların kenar geometrileri tespit edilmiştir. Son olarak karma geometrili binalarda eğrisel kenarlar Bézier eğriler yardımıyla çizdirilerek düzgünleştirilmiş bina sınırları elde edilmiştir. Eğrisel ve karma geometrili bina sınırlarının, önerilen hibrit (ABORE+Bézier) yöntem ile düzgünleştirilmesi/sayısallaştırılması büyük ölçekli harita üretimi için büyük avantaj sağlamaktadır.

Tez çalışmasında hem piksel hem de nokta bazlı doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Nokta bazlı doğruluk değerlendirmesi piksel tabanlı doğruluk değerlendirmesine alternatif olarak çalışma kapsamında geliştirilmiştir. Literatürdeki nokta bazlı değerlendirme yapan mevcut çalışmalar incelendiğinde başlıca temel alınan kriter, bulunan bina köşe noktası ile referans verideki eşlenik nokta arasındaki uzaklığa bağlı olan RMSE değeridir.

Ancak hesaplanan bu RMSE değeri sadece hatanın büyüklüğünü temsil edip, köşe noktası ile referanstaki noktanın birbirlerine göre konumları yani hatanın yönü hakkında bilgi içermemektedir. Bundan dolayı nokta tabanlı doğruluk değerlendirmesinde değişken sayıda kriterin değerlendirmeye katılmasıyla daha doğru sonuçların elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak X ve Y koordinatlarının RMSE değerlerine ek olarak, düzgünleştirilen binalara ait köşelerin açısallık, uzunluk, sabit noktaya uzaklık değerleri ve kenarların paralellik durumları da değerlendirme aşamasına dahil edilmiştir. Böylece literatürde kullanılan piksel bazlı doğruluk analizi ölçütleri alansal bazda kaba bir şekilde yalnızca doğruluk oranı belirlerken, geliştirilen nokta bazlı doğruluk değerlendirmesi ile hatanın hangi köşe, açı veya kenardan kaynaklandığı belirlenebilmektedir.

Düzgünleştirilen bina sınırları için yapılan piksel bazlı doğruluk değerlendirmesinde ortalama Tamlik (Completeness), Doğruluk (Correctness), Kalite (Quality), F-skor (F-score) metrikleri LiDAR nokta bulutu veri setinde ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina sınırları için sırasıyla %99,1, %98,7, %98,3 ve 99,1, fotogrametrik nokta bulutu veri setinde ise sırasıyla %94,2, %96,1, %91,5 ve %95,3 olarak hesaplanmıştır. Nokta bazlı doğruluk değerlendirmesinde ise ortalama RMSE değeri LiDAR nokta bulutu veri setinde ortogonal ve karma geometrili bina sınırları için 0,373, fotogrametrik nokta bulutu veri setinde ise 0,539 olarak elde edilmiştir. İki farklı veri türü karşılaştırıldığında ortogonal, eğrisel ve karma geometrili bina türlerinde fotogrametrik nokta bulutlarında karşılaşılan problemlerden (gölge, boşluk vb.) dolayı elde edilen sonuçlar LiDAR veri setlerine nazaran düşüktür. Ancak sonuçlar incelendiğinde fotogrametrik nokta bulutu verilerinin, bina düzgünleştirme işlemlerinde LiDAR veri türüne alternatif olarak kullanılabileceği sonuç ve kanaatine varılmıştır.

Önerilen yaklaşımın klasik/yersel harita üretim teknikleriyle karşılaştırıldığında dijital büyük ölçekli harita üretimi için gerekli olan bina sınırı/kenarı düzgünleştirilmesi/sayısallaştırılması için operatör desteğinin minimize edilmesi ile birlikte harita üretiminde hız, ekonomi ve doğruluk açısından yenilikçi yönleri bulunmaktadır. Özellikle eğrisel ve/veya karma geometrili bina çatı sınırlarında önerilen hibrit (ABORE+ Bézier) yaklaşım ile sınırlar kullanıcı desteği olmaksızın istenilen nokta adedince gerçeğe en yakın şekilde temsil edilebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında tasarlanan arayüz başta yerel yönetimler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü gibi haritacılık faaliyetleri ve bilgi edinme sistemlerini barındıran tüm kurum/kuruluş ve özel sektöre,

yönetimde karar vericilere ve yatırımcılara büyük ölçekli harita üretim aşamasında temel harita katmanı bina objesinin otomatik sayısal hale getirilmesi noktasında fayda sağlayacaktır. Geliştirilen yöntem farklı veri setlerine göre uyarlanabilir olmasından dolayı her türlü Akıllı Bina ve Kent (Şehir) oluşum ve çalışmalarına harita tabanlı destek verecektir. Önerilen yaklaşım, TUCBS altyapısının oluşturulmasında kullanılan temalardan “bina” temasına ilişkin geometrik sınırların üç boyutlu konumsal verilerden (nokta bulutu) otomatik bir biçimde elde edilmesi ve bina sınır geometrisinin düzgünleştirilmesine/sayısallaştırılmasına olanak sağlayacaktır. Bu yönüyle tez çalışmasında geliştirilen metodoloji ve doğruluk analizi yönteminin, özellikle büyük ölçekli harita üretim işlemini otomatize etmesi noktasında ciddi derecede yaygın etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Bina geometrisini temsil eden başlangıç sınırının yanlış çizdirilmesi bina sınır düzgünleştirme aşamasını etkileyen temel faktör olarak görülmektedir. Gelecekteki çalışmalar öncelikle bina sınırını düzgünleştirmesini/sayısallaştırmasını doğrudan etkileyen, düzensiz başlangıç bina sınırını çizdirme aşamasını her bir bina için değerlendirip otomatik bir şekilde karar verebilen bir yaklaşımın geliştirilmesi üzerine olacaktır. Ayrıca iki boyutta gerçekleştirilen düzgünleştirme işleminin üç boyutlu binaların hem yatay hem de düşey çatı sınırlarında gerçekleştirilmesi ve üretilen algoritma ile daha hızlı sonuçların elde edilebilmesi amacıyla paralel hesaplamaya uygun olacak şekilde değişimlerin yapılması amaçlanmaktadır. Ayrıca geliştirilen modül mevcut ticari yazılımlardan herhangi birine (ArcGIS, QGIS, GlobalMapper, NetCAD vb.) entegre edilmesi hedeflenmektedir. Entegre edilen arayüz, kullanıcı açısından verinin hazırlanması, ön işlenmesi ve temel süreç (process) kısımlarının aynı platformda yapılması noktasında önemli kolaylıklar sağlayacağı öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdalkadhum, A. J., 2012. Establishment of 3D Model with Digital Non-Metric Camera in Close Range Photogrammetry, Master's Thesis, Master of Science in Building and Construction Engineering, Baghdad, Irak.
- Acar, H., 2018. Bina Çatı Noktalarının Yüksek Çözünürlüklü Görüntülerden Üretilen 3B Nokta Bulutu Verileri ile Otomatik Tespit Edilmesi ve Gerçek Ortofoto Üretimi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Albers, B., Kada, M. ve Wichmann, A., 2016. Automatic Extraction and Regularization of Building Outlines from Airborne LiDAR Point Clouds, ISPRS The International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Temmuz, Prague, Çek Cumhuriyeti, XLI-B3, 555-560.
- Awrangjeb, M. ve Fraser, C., 2014. Automatic Segmentation of Raw LIDAR Data for Extraction of Building Roofs, Remote Sensing, 6, 5, 3716-3751.
- Awrangjeb, M., 2016. Using Point Cloud Data to Identify, Trace, and Regularize The Outlines of Buildings, International Journal of Remote Sensing, 37, 3, 551-579.
- Chen, C., Guo, J., Wu, H., Li, Y. ve Shi, B., 2021. Performance Comparison of Filtering Algorithms for High-Density Airborne LiDAR Point Clouds Over Complex Landscapes, Remote Sensing, 13, 14, 2663-2682.
- Chen, R., Li, X. ve Li, J., 2018. Object-Based Features for House Detection from RGB High-Resolution Images, Remote Sensing, 10, 3, 451-475.
- Chen, Y. ve Yao, W., 2022. Extraction of Orthogonal Building Boundary from Airborne LiDAR Data Based on Feature Dimension Reduction, ISPRS Annals of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Haziran, Nice, Fransa 5, 2, 351-358.
- Dey, E. K. ve Awrangjeb, M., 2020. A Robust Performance Evaluation Metric for Extracted Building Boundaries from Remote Sensing Data, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 4030-4043.
- dos Santos, R. C., Galo, M. ve Habib, A. F., 2020. Regularization of Building Roof Boundaries from Airborne LiDAR Data Using an Iterative CD-Spline, Remote Sensing, 12, 12, 1904-1925.
- dos Santos, R. C., Habib, A. F. ve Galo, M., 2022. Weighted Iterative CD-Spline for Mitigating Occlusion Effects on Building Boundary Regularization Using Airborne LiDAR Data, Sensors, 22, 17, 6440-6458.

- Dong, P. ve Chen, Q., 2017. LiDAR Remote Sensing and Applications, CRC Press, Florida, 1. Baskı.
- Ester, M., Kriegel, H.P., Sander, J. ve Xu, X. 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Ağustos, Portland, ABD, 226-231.
- Feng, M., Zhang, T., Li, S., Jin, G. ve Xia, Y., 2020. An improved minimum bounding rectangle algorithm for regularized building boundary extraction from aerial LiDAR point clouds with partial occlusions., International Journal of Remote Sensing, 41, 1, 300-319.
- Forlani, G., Nardinocchi, C., Scaioni, M. ve Zingaretti, P., 2006. Complete classification of raw LIDAR data and 3D reconstruction of buildings, Pattern Analysis and Applications, 8, 4, 357-374.
- Ghaffarian, S., Ghaffarian, S., el Merabet, Y., Samir, Z. ve Ruichek, Y., 2016. Automatic Building Roof Segmentation Based on PFICA Algorithm and Morphological Filtering From LiDAR Point Clouds, 37th Asian Conference on Remote Sensing, Ekim, Colombo, Sri Lanka, 3, 1, 1-8.
- Gilani, S., Awrangjeb, M. ve Lu, G., 2016. An Automatic Building Extraction and Regularisation Technique Using LiDAR Point Cloud Data and Orthoimage, Remote Sensing, 8, 3, 258-285.
- Han, X. A., Ma, Y. ve Huang, X., 2008. A Novel Generalization of Bézier Curve and Surface Journal of Computational and Applied Mathematics, 217, 1, 180-193.
- Han, X. F., Jin, J. S., Wang, M. J., Jiang, W., Gao, L. ve Xiao, L., 2017. A Review of Algorithms for Filtering the 3D Point Cloud, Signal Processing: Image Communication, 57, 103-112.
- Hussain, M. Z., Hussain, M. ve Waseem, A., 2014. Shape-Preserving Trigonometric Functions, Computational and Applied Mathematics, 33, 2, 411-431.
- Jarzabek-Rychard, M., 2012. Reconstruction of Building Outlines in Dense Urban Areas Based on LiDAR Data and Address Points, ISPRS The International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Eylül, Melbourne, Avustralya, XXXIX-B3, 121-126.
- Jung, J., Jwa, Y. ve Sohn, G., 2017. Implicit Regularization for Reconstructing 3D Building Rooftop Models Using Airborne LiDAR Data, Sensors, 17, 3, 621-648.
- Jwa, Y., Sohn, G., Tao, V. ve Cho, W., 2008. An Implicit Geometric Regularization of 3d Building Shape Using Airborne LiDAR Data, ISPRS The International Archives of Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Temmuz, Beijing, Çin, 37, B3a, 69-75.

- Karslı, B., 2022. Fotogrametrik Görüntü Tabanlı Nokta Bulutu Üzerinden Otomatik Bina Çıkarımı ve Sayısallaştırma, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Karslı, B. ve Yılmaztürk, F., 2022. Görüntü Eşleştirme Kaynaklı Nokta Bulutu Üzerinden Otomatik Bina Çıkarımı ve Düzgünleştirme, Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 4, 1, 25-35.
- Kong, G., Fan, H. ve Lobaccaro, G., 2022. Automatic Building Outline Extraction from ALS Point Cloud Data Using Generative Adversarial Network, Geocarto International, 37, 27, 15964-15981.
- Kraus, K., 2011. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans, Walter de Gruyter, 2. Baskı.
- Lai, X., Yang, J., Li, Y. ve Wang, M., 2019. A Building Extraction Approach Based on the Fusion of LiDAR Point Cloud and Elevation Map Texture Features, Remote Sensing, 11, 14, 1636-1654.
- Li, Q., Zorzi, S., Shi, Y., Fraundorfer, F. ve Zhu, X. X., 2022. RegGAN: An End-to-End Network for Building Footprint Generation with Boundary Regularization, Remote Sensing, 14, 8, 1835-1851.
- Limandal, P. Y., 2019. Dijital Hava Görüntülerinden Üretilen Nokta Bulutu ile Yarı Otomatik Bina Detayı Çıkarımı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Linder, W., 2016. Digital photogrammetry: A Practical Course, Springer, Berlin, 4. Baskı.
- Maas, H. G. ve Vosselman, G., 1999. Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, 2, 153-163.
- Mahphood, A. ve Arefi, H., 2017. A Data Driven Method for Flat Roof Building Reconstruction from LiDAR Point Clouds, ISPRS The International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Ekim, Tehran, İran, XLII-4/W4, 167-172.
- Maktav, D., Erbek, F. S. ve Jürgens, C., 2005. Remote sensing of urban areas, International Journal of Remote Sensing, 26, 4, 655-659.
- Maqsood, S., Abbas, M., Miura, K. T., Majeed, A., BiBi, S. ve Nazir, T., 2021. Geometric Modeling of Some Engineering GBT-Bézier Surfaces with Shape Parameters and Their Applications, Advances in Difference Equations, 2021, 1, 490-527.
- Ozdemir, E., Karsli, F., Kavzoglu, T., Bahadir, M. ve Yagmahan, A., 2022. A Novel Algorithm for Regularization of Building Footprints Using Raw LiDAR Point Clouds, Geocarto International, 37, 25, 7358-7380.

- Parrot, J. F. ve Ramírez Núñez, C., 2016. LiDAR DTM: Artifacts and Correction for River Altitudes, Investigaciones Geográficas, 90, 28-39.
- Rau, J. Y., Jhan, J. P. ve Hsu, Y. C., 2015. Analysis of Oblique Aerial Images for Land Cover and Point Cloud Classification in Urban Environment, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53, 3, 1304-1319.
- Reda, K. ve Kedzierski, M., 2020. Detection, Classification and Boundary Regularization of Buildings in Satellite Imagery Using Faster Edge Region Convolutional Neural Networks, Remote Sensing, 12, 14, 2240-2271.
- Rottmann, P., Haunert, J. H. ve Dehbi, Y., 2022. Automatic Building Footprint Extraction from 3D Laserscans, ISPRS Annals of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Ekim, Sydney, Avustralya, X-4/W2, 233-240.
- Saud Azeez, O., Kalantar, B., Al-Najjar, H. A. H., Halin, A. A., Ueda, N. ve Mansor, S., 2018. Object Boundaries Regularization Using The Dynamic Polyline Compression Algorithm, ISPRS The International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Ekim, Delft, Hollanda, XLII-4, 541-546.
- Sampath, A. ve Shan, J., 2007. Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne Lidar Point Clouds, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 73, 7, 805-812.
- Sevgen, C. S., 2018. LiDAR Verilerinden Çatı Düzlemi Otomatik Çıkarım Modeli Geliştirme, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Schlosser, A. D., Szabó, G., Bertalan, L., Varga, Z., Enyedi, P. ve Szabó, S., 2020. Building Extraction Using Orthophotos and Dense Point Cloud Derived from Visual Band Aerial Imagery Based on Machine Learning and Segmentation, Remote Sensing, 12, 15, 2397-2425.
- Shao, Z., Yang, N., Xiao, X., Zhang, L. ve Peng, Z., 2016. A Multi-View Dense Point Cloud Generation Algorithm Based on Low-Altitude Remote Sensing Images, Remote Sensing 8, 5, 381-397.
- Siddiqui, F., Teng, S., Awrangjeb, M. ve Lu, G. 2016. A Robust Gradient Based Method for Building Extraction from LiDAR and Photogrammetric Imagery, Sensors, 16, 7, 1110-1134.
- Song, J., Xia, S., Wang, J. ve Chen, D., 2021. Curved Buildings Reconstruction from Airborne LiDAR Data by Matching and Deforming Geometric Primitives, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59, 2, 1660-1674.
- Surmen, H., 2022. Fotogrametri ile Üç Boyutlu Tarama, Serüven, İzmir, 1. Baskı.
- Tran, T. H. G., Ressler, C. ve Pfeifer, N., 2018. Integrated Change Detection and Classification in Urban Areas Based on Airborne Laser Scanning Point Clouds, Sensors, 18, 2, 1-21.

URL-1, http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusion_overview.html. 11 Şubat 2014.

URL-2, <https://www.gim-international.com/content/news/point-clouds-photogrammetry-or-lidar>. 30 Mayıs 2018.

URL-3, <https://www.mathworks.com/help/gpu/coder/ug/feature-matching.html>. 19 Haziran 2023.

Xie, L., Zhu, Q., Hu, H., Wu, B., Li, Y., Zhang, Y. ve Zhong, R., 2018. Hierarchical Regularization of Building Boundaries in Noisy Aerial Laser Scanning and Photogrammetric Point Clouds, Remote Sensing, 10, 12, 1996-2018.

Zhu, Y., Huang, B., Gao, J., Huang, E. ve Chen, H., 2022. Adaptive Polygon Generation Algorithm for Automatic Building Extraction, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1-14.

Zorzi, S., Bittner, K. ve Fraundorfer, F., 2021. Machine-learned Regularization and Polygonization of Building Segmentation Masks, 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Ocak, Milan, İtalya, 3098–3105.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğretimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü'nde lisans eğitimi almaya hak kazandı. 2014 yılında lisans mezuniyetinin ardından aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda ve 2015 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimlerine 2017 ve 2018 yıllarında mezun olmuştur. 2018 yılında hem Avrasya Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü'nde lisans hem de Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı. 2019 yılında öğretim görevlisi olarak Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü'nde başladığı görevini sürdürmektedir.

Ozdemir, E., Karsli, F., Kavzoglu, T., Bahadir, M. ve Yagmahan, A., 2022. A Novel Algorithm for Regularization of Building Footprints Using Raw LiDAR Point Clouds, Geocarto International, 37, 25, 7358-7380.