

Görüntü Eşleştirme Kaynaklı Nokta Bulutu Üzerinden Otomatik Bina Çıkarımı ve Düzgünleştirme

Buray Karşlı*¹, Ferruh Yılmaztürk²

¹Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği A.B.D., Aksaray,, Türkiye

²Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Fotogrametri
Nokta Bulutu
Bina Çıkarımı
I-Octree
Sayısallaştırma

ÖZ

Harita bileşeni bina katmanı sınırlarının klasik veya uzaktan algılama verilerinden manuel olarak belirlenmesi zaman alıcı ve çaba gerektiren önemli bir işlemdir. Görüntülerden eşleştirme yöntemiyle üretilen nokta bulutları, yoğun ve doğruluğu yüksek üç boyutlu (3B) konum bilgisi içermektedir. Binaların 3B nokta bulutlarından otomatik olarak çıkarılması geometrik düzensizlikleri, çıkarılacakları nokta bulutu yoğunluğu ve hassasiyeti açısından zor bir problemdir. Bu çalışmada, voksel temelli sekizdal (Octree) veri organizasyon metodu otomatikleştirilerek iyileştirilmiş Octree (I-Octree) yaklaşımı geliştirilmiş ve görüntülerden üretilen nokta bulutları üzerinde bina detaylarının otomatik çıkarımı ve düzgünleştirilmesi amaçlanmıştır. Elazığ bölgesinde seçilen çalışma alanında 3B nokta bulutu görüntülerden üretilmiş, zemin ve zemin üstü objeler SMRF metodu ile ayıklanmış, DBSCAN algoritması ile bina objeleri görüntülerden ayıklanarak sınıflandırılmış ve sekizdal ile I-Octree yöntemlerinin sınıflandırılan objelere uygulanması ile ortaya çıkarılan bina detaylarına ABORE metodu ile kenar düzgünleştirme işlemi uygulanmıştır. Otomatik olarak çıkarılan bina verileri çalışma alanını içeren 1/1000 ölçekli hâlihazır harita referans verisi desteğiyle piksel tabanlı tamlik (Cp), doğruluk (Cr), kalite (Q) ve F-skor (F-1) metrikleri ile doğrulanmıştır. Doğrulama sonuçları her bir metrik için maksimum değer olarak %94 üzerinde elde edilmiştir. Görüntülerden üretilmiş nokta bulutları üzerinden, geliştirilen I-Octree yaklaşımı ile bina detayı çıkarılması noktasında hızlı ve ucuz bir harita üretimi sürecine katkıda bulunabileceği sonucuna varılmıştır.

Automatic Building Extraction and Regularization from Image Matching Based Point Cloud

Keywords:

Photogrammetry
Point Cloud
Building Extraction
I-Octree
Digitalization

ABSTRACT

Manually determining building layer boundaries with classical or remote sensing data is a time-consuming and effort-intensive process. Point clouds produced by matching from images contain dense and high-accuracy 3D information. Automatic extraction of buildings from 3D point clouds is a difficult problem in terms of geometric irregularities and the density and precision of the point cloud. In this study, the improved Octree (I-Octree) approach was developed by automating the voxel-based octree method, and automatic extraction and regularization of building details on point clouds produced from images are aimed. Point clouds were produced in study area (Elazığ region), ground and above ground objects were sorted by SMRF, building objects are classified by removing noise with DBSCAN algorithm, and Octree and I-Octree methods were applied to the classified objects, then the edges of the building details are smoothed with the ABORE method. Automatically extracted building data were validated with pixel-based completeness, accuracy, quality, and F-score metrics with the support of reference map containing the study area. Validation results were obtained for each metric above 94%. It was concluded that the I-Octree approach developed can contribute to a fast and inexpensive map production process at the point of extracting the building details.

*Sorumlu Yazar

Kaynak Göster (APA);

(buray8@gmail.com) ORCID ID 0000-0003-1229-0300
(yilmazturk@aksaray.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-8347-664X

Karşlı, B., Yılmaztürk F. (2022). Görüntü Eşleştirme Kaynaklı Nokta Bulutu Üzerinden Otomatik Bina Çıkarımı ve Düzgünleştirme. Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 4(1), 25-35.

Geliş Tarihi: 04/04/2022; Kabul Tarihi: 11/04/2022

Araştırma Makalesi/DOI: 10.51489/tuzal.1098240

1. GİRİŞ

Uzaktan algılama teknolojileri objeler hakkında fiziksel kontak oluşturmadan bilgi edinilen teknolojilerdir. Geçmişten günümüze çok farklı alıcılarla uzaktan algılama verisi üretilerek uygulamalar yapılmıştır. Konumsal ve zamansal çözünürlüğün artması ile bu veriler detay çıkarımı, kıyı çizgisi belirleme ve yol çıkarımı gibi çalışmaların ana kaynağını oluşturmaya başlamışlardır (Lai vd., 2019; Marullo vd., 2018). Özellikle kentsel alanların ana bileşeni bina detaylarının uzaktan algılama teknolojileri ile çıkarımı ilgili teknolojinin hızlı, etkin ve ekonomik olduğundan ana çalışma konusu olarak ön plana çıkmıştır. Bina çıkarma ve düzleştirme, şehir planlama ve arazi yönetimi gibi farklı uygulama alanları için bilgi edinmenin en önemli yoludur. Çeşitli uzaktan algılama teknolojileri arasında, LiDAR ve görüntülerden eşleştirme teknikleri ile üretilerek üç boyutlu (3B) özellikler sağlayan nokta bulutları bina çıkarımı için en önde gelen önemli araçlardır (Lai vd., 2019). Görüntü eşleştirme teknolojilerinin gelişmesi ile 3B bilgi üretimi araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. 3B bilgi çıkarımı uygulamaları sayısal yükseklik modeli üretimi ile arkeoloji, topoğrafik izleme, kültürel mirası koruma, orman ve tarımsal modelleme gibi birçok alanda gerçekleştirilmiştir (Christian Rose vd., 2015; Shao vd., 2016). Lazer tarama ile doğru, yoğun ve bütünleşmiş 3B veri üretilebildiğinden, bu teknoloji son yirmi yıldır tercih edilmektedir. Son yıllarda, fotogrametri ve bilgisayarla görüş alanındaki önemli gelişmeler, görüntü tabanlı eşleştirme ile 3B veri üretimi, lazer teknolojisi için önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Rau vd., 2015; Shao vd., 2016).

Literatürde veri tipine göre bina çıkarımı ve düzenleme için kullanılan metotlar genel olarak üç grupta toplanmaktadır. Birinci grup metotlar, direkt fotoğrafik görüntülerden 2B veya 3B bilgi çıkarımına dayanmaktadır. İkinci grup yöntemler sadece LiDAR verisi kullanırlar. Üçüncü grup yöntemler ise karma içerikli olup, LiDAR ve fotogrametrik görüntüleri entegre biçimde kullanarak bina çıkarımı gerçekleştirir (Siddiqui vd., 2016). Veri işleme stratejisine göre de bina çıkarım metotları veri tabanlı (data-driven), model tabanlı (model-driven) ve her iki metodu kullanan hibrit metot olmak üzere üç kategoriye ayrılır (Hermosilla vd., 2011; Siddiqui vd., 2016; Lai vd., (2019), nokta bulutundan bina çıkarımı için, LiDAR nokta bulutu ve görüntülerden alınan doku özelliklerinin birlikte kullanımından oluşan bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem kullanılarak %87'yi aşan tatmin edici bir bina çıkarımı doğruluğu elde edilmiş olup, verimli ve geçerli bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır. Siddiqui vd., (2016), küçük ve şeffaf bina çatılarının tespitinde yaşanan sınırlama zorluklarını gidermek adına eğim tabanlı bina çıkarımı yöntemini önermişlerdir. Önerilen yöntemin performansı, nesne ve piksel tabanlı metrikler kullanılarak iki

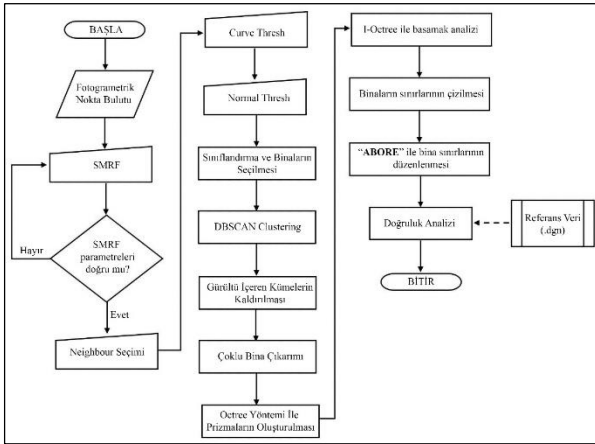
referans veri seti üzerinde değerlendirilmiş ve ağaçları ortadan kaldırmada, her büyüklükteki binayı çıkarmada ve şeffaf çatılı ve çatısız bina çıkarımında etkinliğini göstermektedir. Gilani vd., (2016), nokta bulutu ve ortofoto özellikleri kullanılarak binaları çıkarmak ve düzenlemek için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Dal Poz ve Yano Ywata, (2020), LiDAR verilerinde binaların çatı düzlemlerini bölümlere ayırmak için üç aşamalı bir yöntem önermişlerdir. LiDAR bina noktalarının tutarlılığını kontrol etmek için Random Sample Consensus (RANSAC) algoritmasını kullanmışlardır. Sonuçlar, önerilen yöntemin düzgün çalıştığını göstermektedir. Sun ve Wang, (2018), bina sınırının çıkarılmasında yaygın olarak kullanılan, ancak genellikle ağaç ve arka plan karışıklıkları nedeniyle kısmen önyargılı bina sınırı çıkarılmasıyla sonuçlanan bir segmentasyon yöntemi olan aktif kontur modelini (ACM) kullanmışlardır. Önerilen yöntemlerin iki veri setinden beş test alanında bina sınırlarını verimli bir şekilde çıkarabileceğini göstermektedir. Bulatov vd., (2014), binaları etiketleyerek vejetasyon ve hatalı noktaları normalize edilmiş sayısal yükseklik modelinden çıkarmış ve bina sınırlarını etiketli pikseller ile grafik tabanlı ortofoto segmentasyonu ile ortaya çıkarmışlardır. Li vd., (2016) grafik kesme tabanlı Markov modeli ile farklı açılardan çekilmiş görüntülerden üretilen noktaları sınıflandırmak suretiyle bina, ağaç ve zemini ayırmışlardır. Ardından RANSAC ile bina çatı düzlemlerini ortaya çıkarmışlardır. Yan vd., (2017) rastgele doku segmentasyon yöntemini kullanarak sayısal yükseklik modeli üzerinden bina ayak izlerini ortaya çıkarmışlardır. Bina çıkarımı amaçlı olarak derin öğrenme tabanlı görüntü segmentasyon yöntemleri de geleneksel yöntemleri ile birlikte kullanılmıştır (Z. Cao vd., 2019; Ji vd., 2019). 3B bina çıkarımı için farklı yazarlar tarafından literatüre yeni çalışmalar da kazandırılmıştır (F. Alidoost ve Arefi, 2015; Jayaraj ve Ramiya, 2018; Malihi vd., 2016; Nan ve Wonka, 2017). Fotogrametrik yoğun eşleştirme metotları ile nokta bulutu üretimindeki gelişmeler son yıllarda bina çıkarımı için makine öğrenme tabanlı tekniklerin geleneksel tekniklerin yerini aldığını ortaya koymaktadır (Kendall vd., 2017; Liu ve Ji, 2020; Wu vd., 2019; F. Zhang vd., 2019). Literatürde bina çatı yüzeylerini ayrı ayrı olarak çıkarabilen algoritmalar da mevcuttur (Fateme Alidoost vd., 2019; Gilani vd., 2016).

Bu çalışmada, fotogrametrik görüntülerden eşleştirme metodu ile üretilen yoğun nokta bulutları içerisinde mevcut bina ayak izlerinin, vokal kaynaklı sekizdal veri organizasyon metodunun basamak sayısı otomatikleştirilerek çıkarılması için geliştirilen yeni bir yaklaşım (iyileştirilmiş Octree, I-Octree) önerilmiştir. Yaklaşım, 3B nokta bulutlarının fotoğraflardan eşleştirme ile üretilmesi, zemin ve zemin üstü objelerin çıkarılması ve bina objelerinin görüntülerden ayıklanarak sınıflandırılması, sekizdal ve I-Octree yaklaşımının sınıflandırılan objelere

uygulanması ile bina detaylarının çıkarılması ve literatürde mevcut ABORE (Otomatik Bina Sınır Düzgünleştirme Yaklaşımı) metodu ile bina kenarlarının düzgünleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Elâzığ bölgesinde seçilen test alanında üretilen sonuçlar literatürde mevcut doğruluk analizi metotları ile değerlendirilerek tatmin edici sonuçlar üretilmiştir. Üretilen bina kenar detaylarının direkt olarak harita katmanı biçiminde kullanılıp kullanılmayacağı da 1/1000 ölçekli referans harita verileri ile test edilmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, dijital hava kamerası ile çekilmiş yüksek çözünürlüklü fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutundan SMRF (Simple Morphological Filtering) ve Octree yöntemleri ile binaların çıkarılması ve ardından ABORE ile bina sınırlarının düzenlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. SMRF yöntemi ile nokta bulutu ağaç, bina ve zemin sınıflarına genel olarak ayrılmış, Octree yaklaşımını esas alan ve otomatik basamak sayısını tespit eden I-Octree ile yaklaşık bina sınıfı içinden net bir biçimde bina çatı noktaları otomatik olarak tespit edilmiştir. Bina kenar noktaları üzerinden düzgünleştirme işlemi ise ABORE yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.

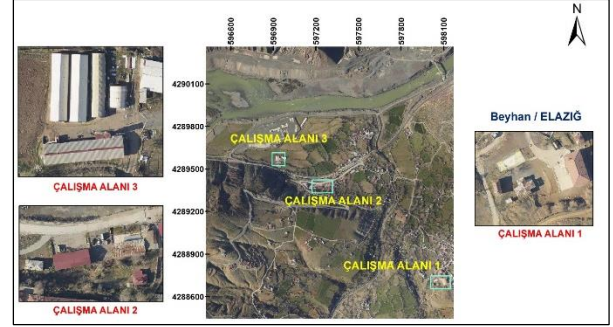


Şekil 1. Önerilen yöntemin genel akış şeması

2.1. Çalışma Alanı

Önerilen yaklaşımın uygulaması seçilen uygulama alanına ait veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test alanında tekli, ikili, üçlü ve çoklu bina kombinasyonları oluşturacak şekilde alt veri grupları oluşturulmuştur. Test alanında klasik dijital fotogrametrik kamera ile görüntü almı yapılmış olup, bu görüntülerden seçilen örnekler üzerinde eşleştirme işlemi ile nokta bulutu üretilmiştir. Test alanı Elâzığ ili, Palu İlçesi, Beyhan Belde sınırlarını içeren alan olarak seçilmiştir (Şekil 2). Belde, Palu, Bingöl ve Diyarbakır arasında bulunan Ak Dağlar tarafından çevrelenmektedir. Belde'nin alanı 1050 km² olup, merkezinin denizden

yüksekliği 840 metredir. Belde tipik doğu Anadolu belde karakterini yansıtmakta, alanda seyrek sayıda binalar ve yeşil alanların mevcudiyeti söz konudur. İlgili test alanında 1/1000 ölçekli Sayısal Fotogrametrik Harita Üretimi amacıyla 2021 yılı Nisan ayında fotogrametrik uçuşlar yapılmış, 1/1000 ve 1/5000 ölçekli vektör ve raster haritalar üretilmiştir. Test alanı için dijital hava fotoğrafları araziden ortalama 1175 m yükseklikten %65 boyuna ve %25 enine bindirme oranı ile Phase One iXM-RS150F kamerası ile çekilmiştir. Çekilen görüntüler çok bantlı (RGB) olup, yer örnekleme aralığı (YÖA) 9 cm civarındadır.



Şekil 2. Test Alanı (Beyhan/Palu/Elâzığ)

2.2. Kamera ve Veri

Çalışma kapsamında uygulama alanı içerisinde farklı bina adedi kapsayacak şekilde seçilen alt çalışma alanları belirlemek suretiyle veri setleri üretilmiştir. Ana veri seti temini için dijital hava kamerası kullanılmıştır. Sözü edilen kamera sistemine ilişkin özellikler Tablo 1’de detaylı bir biçimde sunulmuştur.

Tablo 1. Kamera sistemi özellikleri

Ölçü Sistemi/Özellik	Dijital Hava Kamerası
Sensör/Alıcı	Phase One iXM-RS150F
Piksel Boyutu (µm)	3,76
Çözünürlük	14204×10652
Kamera Sabiti (mm)	51,78
YÖA (cm)	9
Uçuş Yüksekliği	1175
Bindirme Oranları	65/25

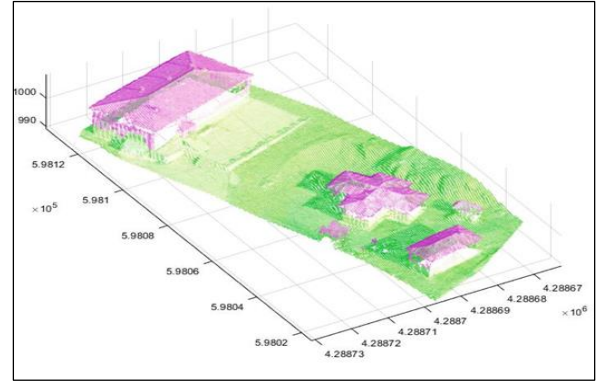
Dijital hava kamerası kullanmak suretiyle renkli hava fotoğrafları çekilmiştir. Bu hava fotoğrafları içinden seçilen her biri 5 fotoğraftan oluşan 5 kolonda mevcut görüntülere (25 fotoğraf) görüntü eşleştirme metodu uygulanarak yoğun nokta bulutları üretilmiştir. Fotogrametrik eşleştirme yöntemi ile üretilen nokta bulutu yoğunluğu 49,50 nokta/m²'dir. Test alanında üretilen toplam nokta sayısı ise 186.894.974 adettir.

2.3. Eşleştirme Metodu ile Yoğun Nokta Bulutu Üretimi

Çalışma için seçilen test alanına ait dijital hava fotoğrafları üzerinde bina detaylarının nokta bulutundan çıkarımı için ilk aşama, bu fotoğraflardan görüntü eşleştirme teknikleri kullanılarak nokta bulutu verisinin üretilmesidir. Bu sebeple çalışma bölgesine ait veri seti Agisoft Metashape Profesyonel Yazılımı ile detay eşleştirme işlemine tabi tutularak yoğun nokta bulutu üretimi gerçekleştirilmiştir. İlgili yazılım, literatürde yaygın olarak bilinen ve detay çıkarma amaçlı kullanılan SIFT (Scale Invariant Feature Transform) eşleştirme algoritması matematik temeline dayalı olarak eşleştirme yapılabilir. Eşleştirme için görüntülerin dış yöneltme elemanları ve kamera iç yöneltme elemanları girdi verisi olarak kullanılmıştır. Üretilen nokta bulutu doğruluğu, detay yüzeyi kalitesine, bindirme oranı ve yöneltme parametrelerinin doğruluğuna direkt bağlıdır. Bu açıdan mümkün olduğunca yüksek bindirmeli görüntülerin kullanımı hem birim alana düşecek nokta sayısını hem de koordinatı hesaplanacak noktaların mutlak doğruluğunu ciddi düzeyde etkilemektedir.

2.4. Zemin ve Zemin Üstü Sınıfların Çıkarılması

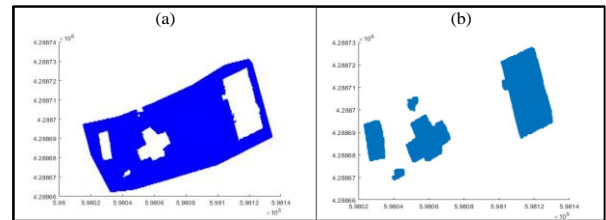
Fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutu üzerinden zemin çıkarım işlemi için öncelikle veri seti 3B olarak MATLAB ortamında görsel hale getirilmiştir. Bu işlemi takiben SMRF algoritması ile nokta bulutu zemin ve zemin üstü noktalar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Şekil 3). SMRF algoritması MATLAB yazılımında mevcut *"segmentGroundSMRF"* fonksiyonu ile çalıştırılmıştır. Bu algorithmada dört adet parametre yer almaktadır. Bu parametreler, *"Max Window Radius"* (yapılandırma elemanı maksimum yarıçapı), *"Slope Threshold"* (eğim eşiği), *"Elevation Threshold"* (yükseklik eşiği) ve *"Elevation Scale"* (yükseklik eşiği ölçekleme faktörü) şeklinde tanımlanmaktadır. Bu parametreler kullanıcı tarafından değerlendirilerek arazi topoğrafyasına göre en uygun seçim yapılır. Çalışmada sadece *"Elevation Scale"* değişkeni sabit bırakılmış, diğer parametreler farklı olacak şekilde veri setine göre seçilmiştir. Şekil 3'te mor renkli bölgeler zemin üstü noktaları gösterirken, yeşil renkli bölgeler zemin noktalarını temsil etmektedir.



Şekil 3. SMRF ile zemin ve zemin üstü noktaların ayrımı

2.5. Yeşil Alanların Nokta Bulutundan Ayıklanması

SMRF metodu ile iki sınıfa ayrılan nokta bulutuna ait geometrik özellikler (eğrilik, normal ve komşuluk) MATLAB ortamında mevcut *"helperExtractFeatures"* fonksiyonu kullanılarak çıkarılmıştır. Sözü edilen fonksiyonla her bir nokta için eğrilik, normal ve komşuluk indeksleri belirlenmiştir. Uygulama aşamasında komşu nokta sayısı (neighbors points) 15 olarak alınmıştır. Bu aşamada normaller ve eğrilikleri kullanarak SMRF sonucu üretilen zemin üstü noktalar, bina ve bitki örtüsü olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Zemin üstü noktalarını, bitki örtüsü ve bina noktası olarak ayırabilmek için *"helperClassify"* fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyonun çalışabilmesi için *"curveThresh"* ve *"normalThresh"* eşik değerleri belirlenmelidir. Gerçekleştirilen uygulamada normal eşik değeri 0,85 sabit değeri ile çalışırken, eğrilik eşiği ise değişiklik gösterebildiği tespit edilmiştir. Sınıflandırılan zemin noktaları Şekil 4a'da, *"helperClassify"* fonksiyonu ile çıkarılan bina noktaları ise Şekil 4b'de gösterilmektedir. Şekil 4'ten görüldüğü üzere, sınıflandırma işlemi için belirlenen eşik değerleri uygun sonuca ulaşmasını engelleyebilmektedir. Ayrıca bitki örtüsüne veya diğer bina dışı nesnelere ait olabilecek noktaları (gürültü) da bina noktası olarak etiketlemektedir.

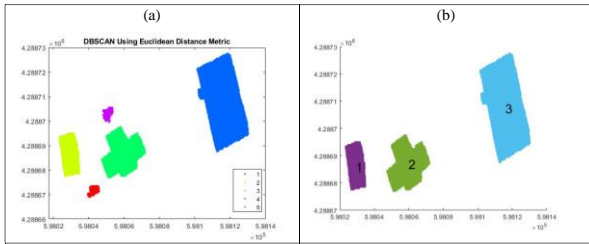


Şekil 4. Zemin ve bina noktalarının sınıflandırılması (a ve b)

2.6. DBSCAN ile Binaların Sınıflandırılması

Sınıflandırılan bina noktaları içinde belirlenen eşik değerine göre çeşitli gürültülerle karışabilmektedir. Bu gürültüleri gidermek için öncelikle DBSCAN kümeleme algoritması ile bina noktaları kümelenir

(Şekil 5a). DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) kümelemesi için “Epsilon” ve “Minpts” parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Uygulamada “Minpts” parametresi veri setinin nokta yoğunluğu ile eşleştirilmiştir ve hesaplanan nokta yoğunluğu en yakın tam sayıya yuvarlanıp otomatik olarak o değışkene atanmıştır. “Epsilon” parametresi ise genellikle 1, 2 veya 3 değerleri seçildiğinde kümeleme sorunsuz bir biçimde çalışmaktadır. DBSCAN algoritması bitişik sınır nesnelere kümelendirmesinde kararsız hale gelebilmektedir (Ester vd., 1996; T. N. Tran vd., 2013). Bu durum kümeleme algoritmasının tam otomatik olmadığını ve veri setine göre değışiklik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Fakat uygulamada genellikle sabit değęerler ile sonuca ulaşılabildiğı de gözlemlenmiş ve tespit edilmiştir.

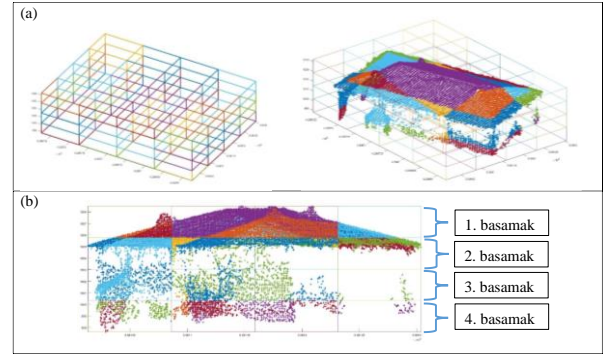


Şekil 5. DBSCAN algoritması ile bina nokta kümelendirmesi (a ve b)

DBSCAN algoritması ile gerçekleştirilen kümeleme sonucu gürültü oluşturabilecek kümelerin tespit edilip ayıklanması gerekmektedir. Bu durumda veri setinin nokta yoğunluğu, bir binanın oluşturabileceğı minimum alan ile çarpılır. Uygulama için minimum bina alanı 70 m² olarak seçilmiştir. Çarpım sonucu çıkan sayısal değęer, DBSCAN tarafından belirlenen bütün kümeler ile karşılaştırılarak sadece binalara ait nokta kümeleri üretilmiştir (Şekil 5b).

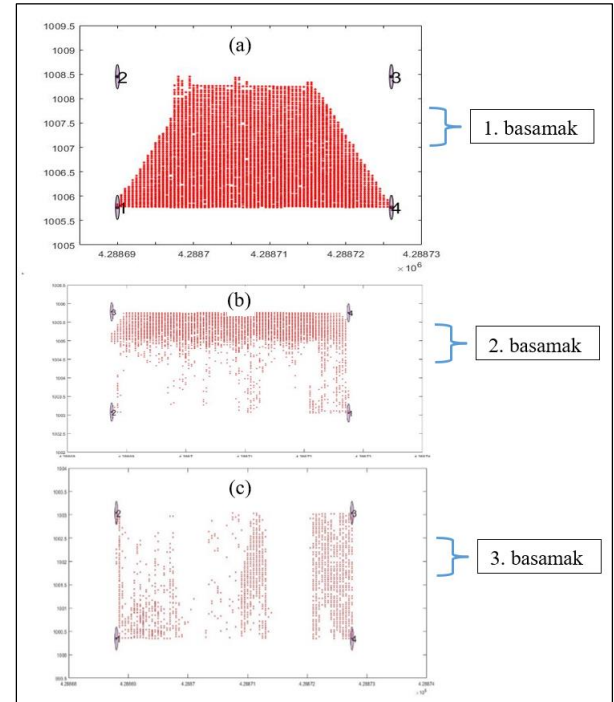
2.7. İyileştirilmiş Octree (I-Octree) ile Bina Çatı Detaylarının Çıkarılması

Bu aşamaya kadar uygulanan yöntemlerle üretilen üç boyutlu bina noktaları incelendiğinde, bina çatı noktalarının dışında duvara ait noktaların da varlığı tespit edilmiştir. Belirlenen bina kümelerinden sadece çatıya ait noktaların seçilmesi ve duvar noktalarının olabildiğince ayıklanması gerekmektedir. Bu problemin çözümü için literatürde mevcut “Octree” metodu iyileştirilmek suretiyle I-Octree adıyla yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Octree yönteminin temeli binaya ait nokta bulutunun farklı sayıda eş prizmalar ile temsil edilmesine dayanmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Octree yöntemi ile prizma oluşturma; a) Prizmalar, b) Octree için oluşturulan basamak sayısı

Şekil 6’daki örneğe göre, Octree yöntemi ile nokta bulutu 4 basamak ve her basamakta 16 prizma olmak üzere 64 eşit prizmaya bölünmüştür. Basamak sayısı “Depths” parametresi ile doğru orantılıdır. Uygulamada bu değęer 3 olarak seçilmiştir. MATLAB ortamında yazılan kod ile her bir prizmanın içindeki ve her bir basamaktaki noktalar otomatik olarak kümelere ayrılmıştır. Fakat belirlenen basamakların hepsi çatı noktalarını içermediğı için tüm basamaklar arasında bir karar mekanizması oluşturulması gerekmektedir. Özetle, her bina için Octree yöntemi uygulanır. Oluşan her binada hangi basamağın çatıya ait olabileceğı tespit edilmesi gerekmektedir. Buna çözüm üretebilmek için ifade edilen İyileştirilmiş Octree yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yeni yaklaşımda, nokta bulutu Y-Z düzlemi, X-Z düzleminde analiz edildiğı çatı profillerinin iki boyutta çıkardığı gözlemlenmiştir. Bunun için her basamağın profili incelenmiştir. Sonra her bir basamak için MBR (Minimum Bounding Rectangle) algoritması ile basamak profillerinin köşe noktaları tespit edilmiştir (Şekil 7).

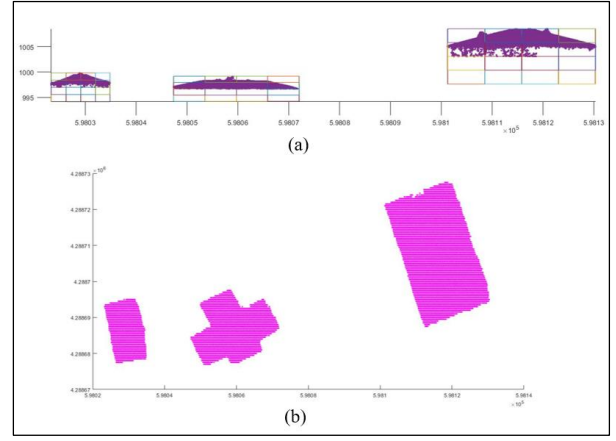


Şekil 7. MBR algoritması ile basamak analizi; a) 1. basamak, b) 2. basamak, c) 3. basamak

Şekil 7’de binanın ilk üç basamağına ait (X-Z) düzleminde profil gösterilmiştir. Şekillerdeki 1, 2, 3 ve 4 numaralı köşe noktaları MBR algoritmasının ilgili nokta bulutunun (2 boyutta) minimum alana sahip olacak dörtgenin köşe noktalarını göstermektedir. Bu köşe noktalarından “polybuffer” fonksiyonu ile 0,1 m yarıçapında buffer zonları geçirilmiştir. Her bir basamaktaki buffer’lardan sadece en üstteki iki buffer ele alınmıştır. Bu iki buffer içinde nokta bulunmuyorsa, ilgili basamak ele alınan binanın çatı noktalarını içermektedir. Eğer ilgili basamağın üstünde bulunan iki buffer içinde de nokta bulunuyorsa, incelenen bu basamak binanın duvarını temsil etmektedir. Genellikle binaların 1. basamaklarındaki profiller üçgen, ters yamuk, eğrisel veya çatısı olmayan bina tipinde ortaya çıkmaktadır. Üçgen, ters yamuk ve eğrisellik içeren çatılarda ilk birkaç basamak bu koşulu sağlar iken, çatısız binalarda daha ilk basamak dahil tüm basamakları duvar olarak algılanmaktadır. Bu yüzden eğer ilk basamakta buffer içinde kalan nokta var ise bu durumda ilgili binanın 1. veya ilk 2 basamağı alınması gereklidir. Çatısı olmadığı için profilden tüm basamaklar aşağıya doğrusal bir şekilde inmektedir. Tüm bu koşulların dışında göz ardı edilmemesi gereken bir diğer husus ise uygulamada hangi düzlemin doğru sonucu verebileceğine karar verebilmektir. Eğrisel bir bina tipi (X-Z) düzleminde profili incelendiğinde, üçgene yakın sonuç vereceği için koşullandırma doğru çalışabilecektir. Fakat (X-Z) eksenini binanın çatısındaki eğriselliği gösteremediği durumda sonuç doğru olmayacaktır. Kısacası oluşturulan algoritma (X-Z) veya (Y-Z) düzlemlerinden birini temel alarak koşullandırmasını tamamlamalıdır. I-Octree yaklaşımının temelini oluşturan düzlem belirleme koşulları aşağıda sıralanmıştır.

- Her iki düzlem sonucunda da binanın, ilk basamağının üstteki iki buffer’ında da nokta bulunmuyorsa iki düzlemden herhangi bir tanesi seçilebilir,
- (X-Z) düzleminin ilk basamağının üstteki iki buffer’ında nokta bulunuyor ve (Y-Z) düzleminde nokta bulunmuyorsa, ilgili bina (Y-Z) düzleminde işleme devam eder,
- (Y-Z) düzleminin ilk basamağının üstteki iki buffer’ında nokta bulunuyor ve (X-Z) düzleminde nokta bulunmuyorsa, ilgili bina (X-Z) düzleminde işleme devam eder,
- Her iki düzlemde de buffer içinde nokta bulunuyorsa bu bina çatısız bina tipindedir, herhangi bir düzlem seçilebilir

Düzlem koşulları ve basamak analizleri tamamlandıktan sonra her bir binanın çatısına ait olabilecek noktalar I-Octree yaklaşımı ile otomatik bir şekilde belirlenmektedir (Şekil 8). Böylece Octree ile üretilen eş prizma ve basamak sayısının otomatizasyonunu sağlayan I-Octree yaklaşımı ortaya konmuştur.



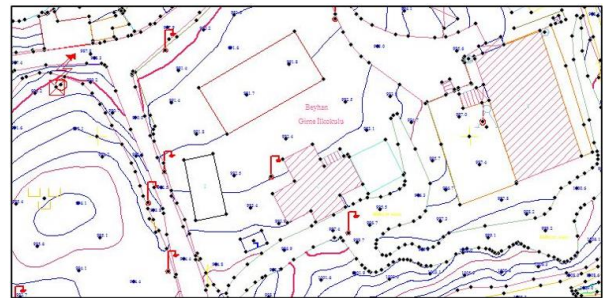
Şekil 8. I-Octree ile basamak analizi sonuçları; a) Y-Z düzlemi, b) Y-X düzlemi

2.8. Bina Kenarlarının Düzgünleştirilmesi

I-Octree yöntemi ile bina çatısına ait noktalar çıkarılmıştır. Bu noktalar içerisinden seçilecek noktalar ile bina çatısının dış sınırının çıkarılması ve ardından düzenlenmesi gerekmektedir. Bu işlem için öncelikle “boundary” fonksiyonu ile bina çatısının dış sınırı çizdirilmiştir. Bu sınır düzensiz bir yapıya sahiptir. Temel harita katmanı olan binanın dış sınırının zikzaklı ya da düzgün olmayan bir yapıda temsil edilmesi yanlıştır. Bu sebeple bina sınırının düzensiz yapıdan ortogonal (dik) yapıya dönüşümü sağlanmalıdır. Bina çatı sınırının regülasyonu ya da düzgünleştirilmesi için literatürde mevcut ABORE metodu kullanılmıştır (Özdemir vd., 2021).

2.9. Referans Verisi (Halihazır Harita)

Bu çalışma için kullanılan Beyhan (Palu/Elazığ) veri seti 1/1000 ölçekli vektör haritası (hâlihazır) Şekil 9’da sunulmuştur. Söz konusu halihazır harita çalışma bölgesinde 2021 yılında gerçekleştirilen fotogrametrik proje sonucu üretilmiştir. Önerilen yöntem için mevcut bulunan vektör harita, referans olarak kabul edilmiştir ve uygun değerlendirme ölçütleri ile doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma amacı gereği hâlihazır haritadaki ilgili binalar, Global Mapper programında poligon (alan) şeklinde manuel olarak çıkartılmış ve doğruluk değerlendirmesine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 9. Veri seti referans (vektör) haritası

2.10. Doğruluk Analizi

Düzenlenen bina sınırları referans altlıklar ile ilişkilendirilerek doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Doğruluk analizi ile, etiketlenen verilerle gerçek etiketlerin karşılaştırılması üzerine başarı ölçülmektedir. Bu çalışmada doğruluk değerlendirmesi için tamlık (1), doğruluk (2), kalite (3) ve F-skor (4) piksel tabanlı metrikleri kullanılmıştır. Doğruluk metriklerinin hesaplanması için referans ve tespit edilen bina sınırları için Doğru Pozitif (TP), Yanlış Pozitif (FP) ve Yanlış Negatif (FN) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. F-skor değeri, recall (geri çağırma) ve precision (doğruluk) metriklerinin harmonik ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Doğru pozitif (TP), bir ön plan nesnesi olarak sınıflandırılan referans verilerindeki bir nesneye karşılık gelen pikselleri gösterir. Yanlış negatif (FN), referansta arka plan olarak sınıflandırılan bir ön plan nesnesine karşılık gelen pikselleri temsil eder ve yanlış pozitif (FP) ise, bir ön plan nesnesi olarak sınıflandırılan referans verilerinde bir ön plan nesnesine karşılık gelmeyen pikselleri gösterir (Karsli vd., 2016; Rutzinger vd., 2009).

$$C_p = \frac{|TP|}{|TP|+|FN|} \quad (1)$$

$$C_r = \frac{|TP|}{|TP|+|FP|} \quad (2)$$

$$Q = \frac{|TP|}{|TP|+|FN|+|FP|} \quad (3)$$

$$F - 1 = \frac{|TP|}{|TP|+1/2(|FN|+|FP|)} \quad (4)$$

3. BULGULAR

Çalışmada seçilen test alanında, yöntem bölümünde detayları anlatılan I-Octree yöntemi ile bina detayları otomatik olarak çıkarılmış, çıkarılan bina kenarları ABORE yöntemi ile düzgünleştirilmiştir. Bu bölümde öncelikle, veri setine yönelik nokta bulutundan çıkarılan bina detaylarına ilişkin nicel ve nitel sonuçlar sunulmuştur. Nicel analiz literatürde genel geçer ve kabul görmüş piksel tabanlı değerlendirme tamlık (Cp), doğruluk (Cr), kalite (Q) ve F-skor (F-1) metrikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, nitel değerlendirme ise çalışma alanı için temin edilen 1/1000 ölçekli halihazır harita ile yapılmıştır. İkinci olarak, nitel sonuç bağlamında bina kenar detayı çıkarımı ya da vektörleştirme sonuçları değerlendirilmiştir. Test alanı verilerini oluşturan fotogrametrik nokta bulutu, fotogrametrik görüntülerden yoğun eşleştirme yöntemi ile elde edilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için görüntülerin yönlendirilmesi ve eşleştirme aşamalarına ihtiyaç vardır. Özellikle eşleştirme aşamasında, özellik seçimi, karşılıklı eşleşmeler, yama eşleşmesi

ve yöneltme parametrelerinin hassas tespiti gibi birçok faktör nokta bulutunu kalitesini etkilemektedir. Test verisi fotogrametrik yöntemle hâlihazır harita üretimi için çekilen görüntüler üzerinde fotogrametrik eşleştirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Çalışma alanı nokta bulutu üretimi Agisoft Metashape Profesyonel programı yardımıyla bölgeye ait bindirmeli görüntüler ile gerçekleştirilmiştir. Proje sahası için yöneltme bilinmeyenleri temin edilerek 3B nokta bulutuna ait her noktanın ilgili datum ve projeksiyonda koordinatları üretilmiştir. Test alanı farklı sayıda ve geometrik yapıda binaları içerecek şekilde üç alt çalışma alanına bölünmüştür. Bu alt alanlarda binalar "A1-A3", "B1-B5" ve "C1-C5" harfleri ile gösterilmektedir. 1/1000 ölçekli halihazır harita nicel doğrulama metrikleri hesabı için kullanılmış, ayrıca üretilen bina sınırları bu harita ile aynı referansa getirilmek suretiyle de görsel yorumlama ve değerlendirme yapılmıştır.

Test alanında seçilen alt çalışma bölgeleri için yapılan nicel değerlendirmede Cp, Cr, Q ve F-1 değerleri elde edilmiştir (Tablo 2). Tablo 2'de yersel doğrulama verisi kullanılarak dört farklı metrik sonuç üretilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, 1/1000 ölçekli doğrulama haritası kullanılarak yapılan değerlendirmede, bütün bina gruplarının mevcut olduğu alt çalışma alanlarında, tamlık metriğinin maksimum 0.9949, ortalama değer ise 0.9324, doğruluk metriğinin maksimum 0.9818, ortalama değer 0.9021, kalite metriği için maksimum 0.9470, ortalama değer 0.8471, F-1 metriğinin ise maksimum 0.9728, ortalama değer 0.9158 olduğu tespit edilmiştir. Doğrulama haritası ve tüm bina alt gruplarının seçimi ile yapılan değerlendirmelerde önerilen I-Octree yaklaşımı sonuçları literatürle karşılaştırıldığında ideal düzeyde olduğu görülmektedir (Tablo 2). Seçilen bina grupları arasında A ile temsil edilen grubun geometrik olarak düzgün oluşu ve binaları temsil eden noktaların özellikle kenar bölgelerde mevcut oluşu doğruluk düzeyini artıran önemli bir etkidir.

Tablo 2. Test alanı doğruluk analizi sonuçları

Çalışma Alanı- Bina No	1/1000 Ölçekli Referans			
	Cp	Cr	Q	F-1
A-1	0.9266	0.9689	0.8998	0.9473
A-2	0.9949	0.8684	0.8645	0.9273
A-3	0.9640	0.9818	0.9470	0.9728
B-1	0.9311	0.9451	0.8833	0.9380
B-2	0.9295	0.9662	0.9002	0.9475
B-3	0.9254	0.8573	0.8019	0.8901
B-4	0.9097	0.9506	0.8686	0.9297
C-1	0.9398	0.9302	0.8778	0.9349
C-2	0.9877	0.8818	0.8722	0.9317
C-3	0.8789	0.8702	0.7771	0.8745
C-4	0.8633	0.8080	0.7163	0.8347
C-5	0.9374	0.7970	0.7567	0.8615
Ortalama	0.9324	0.9021	0.8471	0.9158

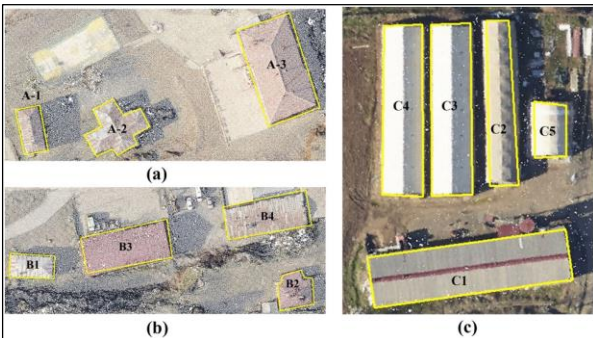
Klasik sekizdal veri organizasyon yönteminde veri içerisinde binayı temsil eden noktaların

otomatik çıkarımı mümkün olmamakta ve basamak sayısı bu sebeple tespit edilememektedir. Önerilen yöntemin temel özelliği Tablo 2’te sunulan doğruluk düzeylerine ulaşmada binaya ait noktaların kaçınıcı basamak ya da seviyede olabileceğini otomatik tespit etmesidir. Çalışmada önerilen yaklaşımla test alanı için seçilen binaların hangi basamakta tespit edildiği Tablo 3’te sunulmaktadır. Tablo 3’e göre bina çatı en üst noktası esas alınmak suretiyle üretilen basamak sayısı A ve B ile temsil edilen binalarda maksimum 3 iken C ile temsil edilen binalarda ise maksimum 4 basamak olarak belirlenmiştir. Böylece klasik sekizdal yönteminde nokta bulutu içerisinde binaya ait noktaların tespiti için sınırlandırılmayan basamak seviyesi de önerilen yöntemle otomatize edilerek sınırlandırılmıştır.

Tablo 3. Test alanı bina sınır tespiti basamak sayıları

Bina No	Bina Çatı Çıkarımı Basamak Sayısı (<i>t-Octree</i>)
A-1	1-2
A-2	1-2
A-3	1-3
B-1	1-2
B-2	1-3
B-3	1-2
B-4	1-2
C-1	1-2
C-2	1-2
C-3	1-4
C-4	1-4
C-5	1-4

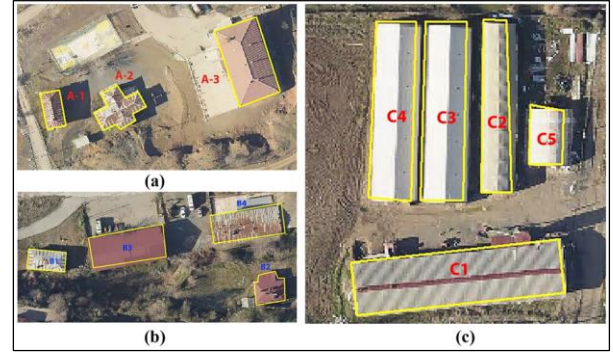
Nitel değerlendirme açısından test alanında seçilen alt çalışma alanlarında mevcut binalar için üretilen sınırlar sırasıyla nokta bulutu, ortofoto ve 1/1000 ölçekli vektörel harita ile aynı referans sisteminde temsil edilmiştir. İlgili sonuçlar nokta bulutu için Şekil 10, ortofoto için Şekil 11 ve referans harita için Şekil 12’te sunulmuştur. Üç farklı sonuç ürün görsel yorumlandığında, nicel sonuçları destekler nitelikte sonuç değerlere ulaşıldığı net bir biçimde görülmektedir.



Şekil 10. Test alanı bina kenar bilgileri ve nokta bulutu; a) A1-A3 alt bölgesi, b) B1-B4 alt bölgesi, c) C1-C5 alt bölgesi

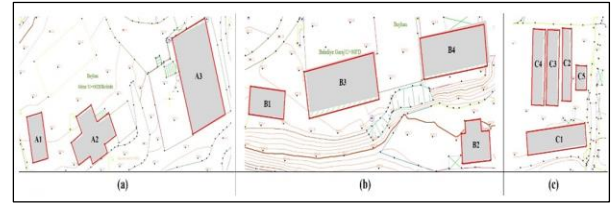
Şekil 10 incelendiğinde özellikle B ve C ile temsil edilen binaların çıkarımının A ile temsil edilen binalara göre nispeten daha düşük doğrulukta olduğu görülmektedir. Buna sebep, nokta bulutu

verisinin hem yoğunluğu hem de ilgili bölgede özellikle eşleşme problemlerinin varlığı gösterilebilir.



Şekil 11. Test alanı bina kenar bilgileri ve ortofoto; a) A1-A3 alt bölgesi, b) B1-B4 alt bölgesi, c) C1-C5 alt bölgesi

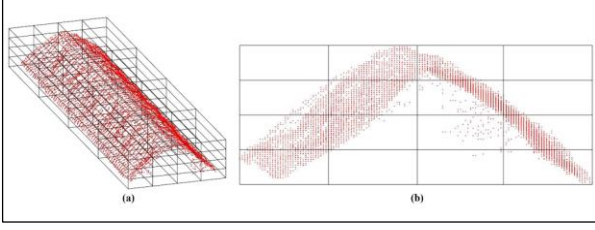
Şekil 11’den de görüldüğü üzere nicel analizlerle hesaplanan metriklere göre en ideal bina çıkarımının A ile temsil edilen binalarda olmaktadır. Ortofoto ile önerilen yaklaşım ile üretilen bina detaylarının kusursuz çakışması teorik olarak mümkün değildir. Dolayısıyla görselde belli miktar çakışmama hatası ortofoto doğruluğundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 12. Test alanı bina kenar bilgileri ve halihazır harita; a) A1-A3 alt bölgesi, b) B1-B4 alt bölgesi, c) C1-C5 alt bölgesi

Şekil 12’de referans harita 1/1000 üzerinde üretilen bina sınırlarının konumu gösterilmektedir. Referans haritada, nicel analizlerle hesaplanan metriklere göre en ideal bina çıkarımının A ile temsil edilen binalarda olduğu görülmektedir. Ortofoto harita üzerindeki gösterime göre daha yüksek doğrulukta önerilen yaklaşım ile üretilen bina detaylarının çakıştığı ortadadır.

Test alanındaki her bina grubu için önerilen yöntemle otomatik tespit edilen basamak sayıları Tablo 3’te sunulmuştur. Şekil 13’ten örnek olarak C3 binasının sekizdal objelerinin yerleşimi sonucu kaçınıcı basamakta tespit edildiği net bir biçimde görülmektedir. Bu değerlendirme ışığında, test alanında seçilen örnek binalardan A2 ve B1 için önerilen yöntemin bina sınır noktalarını 2. basamakta (Tablo 3), C3 binası için ise sınırları 4. basamakta (Şekil 13a-13b) tespit ettiği görülmektedir. Test alanında her bina için farklı basamak seviyelerinde tespit yapıldığı görülmektedir ki bu durum önerilen yöntemin ayrıca örnek ve her bina tipine göre sonuç üretebildiğini de ortaya koymaktadır.



Şekil 13. Test alanı bina kenar bilgileri ve basamak durumları; a, b) C3 binası

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, uzaktan algılanmış verilerden bina sınırlarını çıkarmak için görüntülerin fotogrametrik teknikle eşleştirme ile üretilmiş nokta bulutu kullanılmıştır. Çalışmanın temeli, voksel mantığı ile çalışan sekizdal veri organizasyon metodunun otomatize edilmesi sonucu geliştirilen I-Octree yaklaşımına dayanmaktadır. Fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutu kullanılarak bina detay bilgilerinin önerilen yöntemle otomatik çıkarımı ve düzleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutundan zemin ve zemin üstü objeler SMRF metodu ile ayrılmış ve DBSCAN algoritması ile bina objeleri gürültülerden ayıklanarak sınıflandırılmıştır. Sekizdal ve iyileştirilmiş sekizdal (I-Octree) veri organizasyonunun sınıflandırılan objelere uygulanması ile bina detaylarına ait sınır veya kenar bilgileri çıkarılmasını takiben ABORE metodu ile bina kenarlarının düzleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Önerilen I-Octree yaklaşımı ile, seçilen test bölgesi için alt çalışma alanlarına ait nokta bulutu üzerinden bina detayları çıkarılmış ve doğrulama amaçlı olarak kullanılan referans hâlihazır harita verisi ile nicel ve nitel açıdan doğruluk analizi işlemi gerçekleştirilmiştir. Piksel tabanlı doğrulama için, Cp, Cr, Q ve F-1 metrikleri kullanılmıştır. Nicel değerlendirme aşamasında, fotogrametrik görüntülerden eşleştirme yöntemi ile üretilen yoğun nokta bulutu için doğrulama sonuçları her bir metrik için maksimum değer olarak %94 üzerinde elde edilmiştir. Görsel açıdan yapılan değerlendirmelerde ise, önerilen yöntemle çıkarılan bina sınırlarının çalışma bölgelerine ait ortofoto, nokta bulutu ve 1/1000 ölçekteki referans harita verisi ile karşılaştırılması sonucu üst düzeyde eşleşmenin olduğu tespit edilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, referans verisi ile yapılan doğrulama sonucunda, önerilen yaklaşımın test alanında farklı sayıda ve kombinasyonda seçilen tüm binaları yüksek doğrulukla çıkarabildiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen bu çalışma ile nokta bulutundan özellikle harita temel katmanı bina detayının etkin, otomatik ve hızlı bir biçimde çıkarılabileceği ortaya konmuştur. Son yıllarda görüntü tabanlı sistemlerdeki gelişmeler ve İHA tabanlı optik veri üretimindeki kolaylıklar, bu platformlardan alınan görüntülerden üretilecek nokta bulutları üzerinden bina çıkarım işlemi daha

da önemli konuma getirmiştir. Bu bağlamda günümüz ve yakın gelecekte 3B veri üzerinden ölçüm ve analiz işleminin öneminin çalışma sonuçları dikkate alındığında artacağı değerlendirilmektedir. Çalışma sonuçlarını desteklemesi bakımından da gelecekte daha çok bina içeren veri setleri üzerinde önerilen yöntemin uygulanması öngörülmektedir.

Sonuç olarak bir değerlendirme yapmak gerekirse, herhangi bir otomasyon işleminin %100 doğruluk ve bütünlük sağlaması olası değildir. Bu nedenle, veri denetimi ve düzenlenmesinin operatör desteğiyle yapılması mutlaka gereklidir. Rutin üretim için, bu düzenleme görevini kolaylaştırmak ve hızlandırmak için yöntemler veya araçların geliştirilmesi bilimsel açıdan her zaman değerli olacaktır.

Araştırmacıların katkı oranı beyan özeti

Yazarlar: Veri temini, literatür taraması, veri analizleri ve sorgulama, geliştirilen yöntemle ilişkin analizlerin yapılması için kodlama işlemi, makalenin yazımı ve kontrol gibi bütün aşamalarda ortaklaşa yer almışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale ile ilgili olarak, herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKÇA

- Alidoost, F., Arefi, H. (2015). An image-based technique for 3d building reconstruction using multi-view UAV images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* (C. 40).
- Alidoost, Fatemeh, Arefi, H., Tombari, F. (2019). 2D image-to-3D model: Knowledge-based 3D building reconstruction (3DBR) using single aerial images and convolutional neural networks (CNNs). *Remote Sensing*, 11(19).
- Bulatov, D., Häufel, G., Meidow, J., Pohl, M., Solbrig, P., Wernerus, P. (2014). Context-based automatic reconstruction and texturing of 3D urban terrain for quick-response tasks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93.
- Cao, Z., Fu, K., Lu, X., Diao, W., Sun, H., Yan, M., Yu, H., Sun, X. (2019). End-to-End DSM Fusion Networks for Semantic Segmentation in High-Resolution Aerial Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(11).
- Christian Rose, J., Paulus, S., Kuhlmann, H. (2015). Accuracy analysis of a multi-view stereo approach for phenotyping of tomato plants at the organ level. *Sensors* (Switzerland), 15(5).

- Dal Poz, A. P., Yano Ywata, M. S. (2020). Adaptive random sample consensus approach for segmentation of building roof in airborne laser scanning point cloud. *International Journal of Remote Sensing*, 41(6).
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 96(34).
- Gilani, S. A. N., Awrangjeb, M., Lu, G. (2016). An automatic building extraction and regularisation technique using LiDAR point cloud data and orthoimage. *Remote Sensing*, 8(3).
- Hermosilla, T., Ruiz, L. A., Recio, J. A., Estornell, J. (2011). Evaluation of automatic building detection approaches combining high resolution images and LiDAR data. *Remote Sensing*, 3(6).
- Jayaraj, P., Ramiya, A. M. (2018). 3D CityGML building modelling from lidar point cloud data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* (C. 42).
- Ji, S., Wei, S., Lu, M. (2019). A scale robust convolutional neural network for automatic building extraction from aerial and satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 40(9).
- Karsli, F., Dihkan, M., Acar, H., Ozturk, A. (2016). Automatic building extraction from very high-resolution image and LiDAR data with SVM algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(14).
- Kendall, A., Martirosyan, H., Dasgupta, S., Henry, P., Kennedy, R., Bachrach, A., Bry, A. (2017). End-to-End Learning of Geometry and Context for Deep Stereo Regression. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (C. 2017-October).
- Lai, X., Yang, J., Li, Y., Wang, M. (2019). A building extraction approach based on the fusion of LiDAR point cloud and elevation map texture features. *Remote Sensing*, 11(14).
- Li, X., Ling, F., Foody, G. M., Du, Y. (2016). A superresolution land-cover change detection method using remotely sensed images with different spatial resolutions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(7).
- Liu, J., Ji, S. (2020). A novel recurrent encoder-decoder structure for large-scale multi-view stereo reconstruction from an open aerial dataset. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Malihi, S., Valadan Zoej, M. J., Hahn, M., Mokhtarzade, M., Arefi, H. (2016). 3D Building Reconstruction Using Dense Photogrammetric Point Cloud. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3.
- Marullo, S., Patsaeva, S., Fiorani, L. (2018). Remote sensing of the coastal zone of the European seas. *International Journal of Remote Sensing*, 39(24).
- Nan, L., Wonka, P. (2017). PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (C. 2017-October).
- Ozdemir, E., Karsli, F., Kavzoglu, T., Bahadir, M., Yagmahan, A. (2021). A novel algorithm for regularization of building footprints using raw LiDAR point clouds. *Geocarto International*, 1-23.
- Rau, J. Y., Jhan, J. P., Hsu, Y. C. (2015). Analysis of oblique aerial images for land cover and point cloud classification in an Urban environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(3).
- Rutzinger, M., Rottensteiner, F., Pfeifer, N. (2009). A Comparison of Evaluation Techniques for Building Extraction from Airborne Laser Scanning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2(1).
- Shao, Z., Yang, N., Xiao, X., Zhang, L., Peng, Z. (2016). A multi-view dense point cloud generation algorithm based on low-altitude remote sensing images. *Remote Sensing*, 8(5).
- Siddiqui, F. U., Teng, S. W., Awrangjeb, M., Lu, G. 2016. A robust gradient based method for building extraction from LiDAR and photogrammetric imagery. *Sensors*, 16(7).
- Sun, W., Wang, R. (2018). Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation of Very High Resolution Remotely Sensed Images Combined with DSM. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(3).
- Tran, T. N., Drab, K., Daszykowski, M. (2013). Revised DBSCAN algorithm to cluster data with dense adjacent clusters. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 120.
- Wu, Z., Wu, X., Zhang, X., Wang, S., Ju, L. (2019). Semantic stereo matching with pyramid cost

volumes. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (C. 2019-October).

Yan, Y., Gao, F., Deng, S., Su, N. (2017). A hierarchical building segmentation in digital surface models for 3D reconstruction. *Sensors*, 17(2).

Zhang, F., Prisacariu, V., Yang, R., Torr, P. H. S. (2019). GA-net: Guided aggregation net for end-to-end stereo matching. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (C. 2019-June).



© Author(s) 2022.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>