

GÖRÜNTÜ EŞLEŞTİRME VE LİDAR TABANLI NOKTA BULUTU ÜZERİNDEN OTOMATİK BİNA ÇIKARIMI VE SAYISALLAŞTIRMA

Buray KARSLI¹, Ferruh YILMAZTÜRK², Murat BAHADIR³, Emirhan ÖZDEMİR⁴, Fevzi KARSLI⁵

¹Yük. Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar, Trabzon, buray8@gmail.com

²Prof. Dr., Aksaray Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 68100, Merkez, Aksaray, yilmazturk@aksaray.edu.tr

³Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar, Trabzon, muratbahadiir@gmail.com

⁴Öğr. Gör., Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama, 76000, Merkez, Iğdır, emirhan.ozdemir@igdir.edu.tr

⁵Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080 Ortahisar, Trabzon, fkarсли@ktu.edu.tr

ÖZET

Ülkemizde büyük ölçekli harita üretimi yersel, uydu ve uzay teknolojileriyle üretilen verilerin analizi sonucunda gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte harita üretiminde hız ve kalite artışına imkân verecek nokta bulutu verileri kullanılmaktadır. Nokta bulutu verilerinden harita üretimine altlık olacak şekilde çeşitli katmanlar çıkarılabilmektedir. Bu katmanlardan en önemlisi büyük ölçekli haritalarda mevcut temel bina katmanıdır. Bina sınır geometrilerini yersel ve/veya uzaktan algılanmış verilerden manuel olarak çıkarmak yoğun iş gücü ve emek gerektirmektedir. Fotogrametrik görüntülerden eşleştirme ve lazer tarama yöntemi ile üretilen nokta bulutları üç boyutlu (3B) konum bilgisi sağlamaktadır. Bu çalışmada, sekizdal (Octree) veri organizasyon metodu otomatikleştirilerek geliştirilen yeni bir yaklaşımla (I-Octree), fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutları ve LiDAR nokta bulutları kullanılarak bina detayının otomatik çıkarımı ve sayısallaştırılması amaçlanmıştır. Metodolojik olarak sırasıyla, 3B nokta bulutunun görüntülerden ve LiDAR teknolojisi ile üretilmesi, nokta bulutundan zemin ve zemin üstü sınıfların SMRF algoritması ile ayrılması, bina objelerinin DBSCAN algoritması ile sınıflandırılması, sekizdal ve iyileştirilmiş sekizdal (I-Octree) yönteminin sınıflandırılan objelere uygulanarak bina objelerinin çıkarılması ve ABORE düzgünleştirme yöntemi ile bina kenarlarının sayısallaştırılması işlem adımları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım Erzurum test alanında fotogrametrik, Kaliforniya test alanında ise LiDAR nokta bulutu üzerinde uygulanmıştır. Her iki test alanı için hâlihazır haritalardaki bina sınırları referans olarak kullanılmıştır. Piksel tabanlı doğruluk analizi gerçekleştirmek üzere tamlik (Cp), doğruluk (Cr) ve F-skor (F-1) metrikleri kullanılmıştır. Her iki test alanında doğrulama sonuçları fotogrametrik nokta bulutunda %95 üzerinde elde edilirken, LiDAR nokta bulutu test alanında ise bu değer %99 üzerinde olacak şekilde hesaplanmıştır. Doğrulama sonucunda, geliştirilen yaklaşımın test alanlarında seçilen binaları yüksek doğrulukla ortaya çıkarabildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen yaklaşımla farklı yoğunluk değerine sahip nokta bulutlarından otomatik bir biçimde bina detay çıkarımı ve sayısallaştırma işleminin gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca otomatik veri işleminin, harita üretiminde işlem süresi, maliyet ve operatör hatasının azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Fotogrametri, Nokta Bulutu, Bina Çıkarımı, I-Octree, Sayısallaştırma

ABSTRACT

IMAGE MATCHING AND AUTOMATIC BUILDING EXTRACTION AND DIGITALIZATION THROUGH THE LIDAR-BASED POINT CLOUD

Large-scale map production in our country is carried out as a result of the analysis of data produced by terrestrial, satellite and space technologies. With the developing technology in recent years, point cloud data is used in map production, which will allow for an increase in speed and quality. Various layers can be extracted from point cloud data as a basis for map production. The most important of these layers is the basic building layer available on large-scale maps. Manually extracting building boundary geometries from terrestrial and/or remotely sensed data is labor-intensive and labor-intensive. Point clouds produced by matching and laser scanning from photogrammetric images provide three-dimensional (3D) location information. In this study, it is aimed to automatically extract and digitize building details using point clouds and LiDAR point clouds produced from photogrammetric images, with a new approach (I-Octree) developed by automating the Octree data organization method. Methodologically, respectively, the generation of 3D point cloud from images and LiDAR technology, separation of ground and above ground classes from point cloud with SMRF algorithm, classification of building objects with DBSCAN algorithm, extraction of building objects by applying the eight-branch and improved eight-branch (I-Octree) method to the classified objects, and digitizing the building edges with ABORE smoothing method has been carried out. The developed approach was applied on photogrammetric point cloud in Erzurum test area and on LiDAR point cloud in California test area. The building boundaries on the current maps were used as a reference for both test areas. Completeness (Cp), Correctness (Cr), and F-score (F-1) metrics were used to perform pixel-based accuracy analysis. In both test areas, the verification results were obtained above 95% in the photogrammetric point cloud, while this value was calculated to be above 99% in the LiDAR point cloud test area. As a result of the validation, it has been determined that the developed approach can reveal the selected buildings in the test areas with high accuracy. As a result, it has been demonstrated that with the developed approach, building feature extraction and digitization can be performed automatically from point clouds with different density values. In addition, it has been determined that automatic data processing contributes significantly to reducing processing time, cost and operator error in map production.

Keywords: Photogrammetry, Point Cloud, Building Extraction, I-Octree, Digitizing

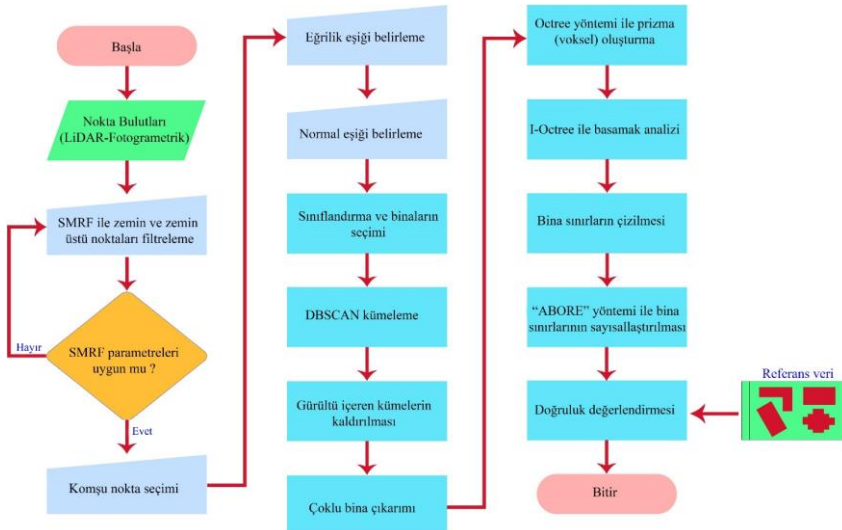
1. GİRİŞ

Binaların tanımlanması, çıkarılması ve düzenlemesi, üç boyutlu (3B) coğrafi bilgi sistemleri, kentsel planlama, afet yönetimi, dijital haritalama, ulaşım planlaması, kadaströ, turizm, mobil navigasyon, enerji çalışmaları ve telekomünikasyon ağ tasarımı gibi birçok uygulamada önemli konu haline gelmiştir (Awrangzeb vd., 2018; Guo vd., 2021; Zhixin Li, 2022). Yersel tekniklerle bina verilerinin elde edilmesi yoğun emek ve zaman gerektiren bir işlem olup, talepleri karşılamak üzere hızlı, ekonomik ve doğru bina çıkarımı son derece önemlidir. Günümüzde uzaktan algılanmış verilerden bina çıkarımı hızlı, uygun maliyetli ve büyük ölçeklerde etkili olması farklı araştırmalarda dikkati çekmektedir (Guo vd., 2021; Lai vd., 2019). Bununla birlikte bina geometrisinin çıkarılması, hem geometrik düzenlilik hem de anlamsal bilgi ile bina modellerinin otomatik olarak yeniden yapılandırılması noktasında zorluk derecesini halen korumaktadır (Cao vd., 2017; Zhixin Li, 2022). Uzaktan algılama teknolojileri arasında, LiDAR ve fotogrametrik görüntülerden eşleştirme teknikleri ile üretilen 3B nokta bulutları bina çıkarımı için önemli araçlardır (Lai vd., 2019). LiDAR ve görüntü eşleştirme teknolojilerinin gelişmesi, 3B bilgi üretimi açısından araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir (Christian Rose vd., 2015; Shao vd., 2016). Bina çıkarımı amaçlı, derin öğrenme tabanlı görüntü segmentasyon yöntemleri de geleneksel yöntemlerin yanında kullanılmış ve 3B bina çıkarımı için farklı yazarlar tarafından literatüre yeni çalışmalar kazandırılmıştır (Alidoost ve Arefi, 2015; Z. Cao vd., 2019). Fotogrametrik yoğun eşleştirme metotları ile nokta bulutu üretimindeki gelişmeler son yıllarda bina çıkarımı için geleneksel tekniklerin yerine makine öğrenme tabanlı tekniklerin yer aldığını ortaya koymaktadır (Kendall vd., 2017; Liu ve Ji, 2020; Zhang vd., 2019). Günümüzde derin öğrenme teknikleri, büyük miktarda özelliği otomatik kullanarak yüksek doğruluk elde edebildiği için yaygın olarak kullanılmaktadır (Abdollahi vd., 2020). Mevcut çalışmalar, derin öğrenmenin özellikle görüntülerden bina çıkarma doğruluğunu artırabileceğini göstermektedir.

Kamu ve özel kurumlar tarafından her türlü amaçla üretilen haritalarda temel katman bina objelerini içeren katmandır. Bu objelerin her türlü veri içerisinde çıkarılması ve sayısallaştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, fotogrametrik görüntülerden eşleştirme metodu ve LiDAR teknolojisi ile üretilen yoğun nokta bulutları içerisinde mevcut bina ayak izlerinin (sınırlar), vöksel tabanlı sekizdal veri organizasyon metodunun basamak sayısı otomatize edilerek çıkarılması için geliştirilen iyileştirilmiş Octree (I-Octree) adlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Yaklaşım, 3B nokta bulutlarının üretilmesi, zemin ve zemin üstü objelerin çıkarılması, bina objelerinin görüntülerden ayıklanarak sınıflandırılması, sekizdal ve iyileştirilmiş sekizdal (I-Octree) veri organizasyonunun sınıflandırılan objelere uygulanarak bina detaylarının çıkarılması ve literatürde mevcut ABORE metodu ile bina kenarlarının düzgünleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Hem fotogrametrik (Erzurum) hem de LiDAR (Kaliforniya) nokta bulutları ile farklı test alanlarında üretilen sonuçlar literatürde kabul görmüş piksel tabanlı doğruluk analizi metotları ile değerlendirilerek tatmin edici sonuçlar ortaya konmuştur. Çalışmanın literatüre katkısı, büyük ölçekli hava görüntülerinden I-Octree metodu kullanılarak LoD1 düzeyinde tam otomatik bina çıkarımı ve regülasyonunu gerçekleştirmektir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE YÖNTEM

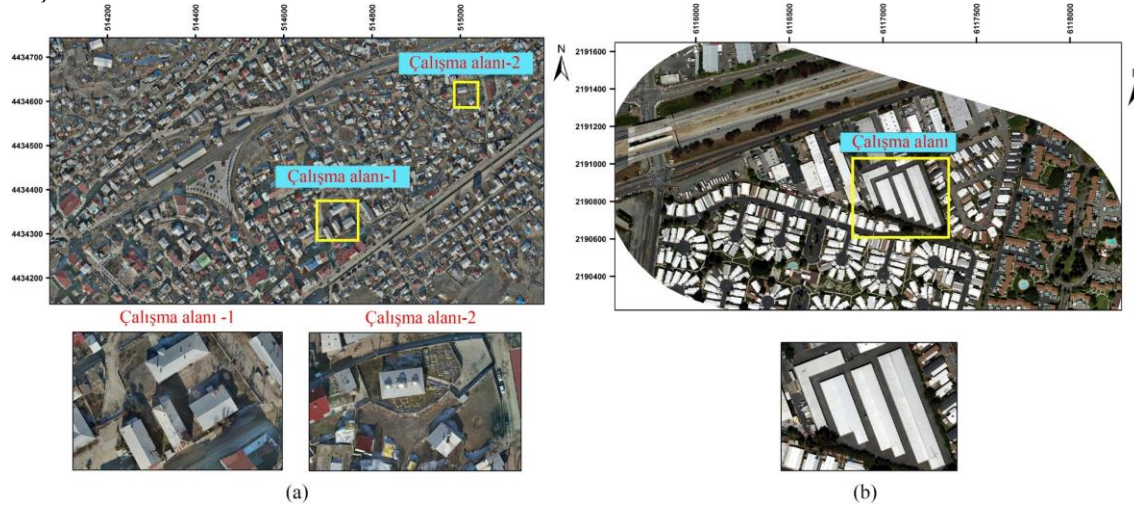
Bu çalışmada, İHA üzerine takılı kameralar ile elde edilmiş yüksek çözünürlüklü fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutu ve LiDAR nokta bulutundan SMRF (Simple Morphological Filter) ve Octree yöntemleri ile binalar çıkarılmış ve ardından Otomatik Bina Sınır Düzgünleştirme Yaklaşımı (ABORE) ile bina sınırları sayısallaştırılmıştır. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 1’de gösterilmiştir (Karşı, 2022).



Şekil 1. Yaklaşımın genel akış şeması

Önerilen yaklaşımın uygulaması iki farklı test/çalışma alanına ait veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test alanlarından biri için fotogrametrik nokta bulutu, diğeri için ise LiDAR nokta bulutu verisi kullanılmıştır. Her bir test alanında farklı bina kombinasyonlarında alt veri grupları oluşturulmuştur. Yaklaşımın performansını test etmek için Erzurum (Türkiye) ve Kaliforniya (ABD) olmak üzere sırasıyla *Test Alanı 1* ve *Test Alanı 2* adlı iki farklı test alanı seçilmiştir. *Test Alanı 1* için seçilen alanda İHA tabanlı dijital kamera ile görüntü alımı yapılmış, alınan görüntülerden seçilen örnekler üzerinde eşleştirme işlemi ile nokta bulutu üretilmiştir. *Test Alanı 2*'de ise hava LiDAR cihazı ile veri toplanmak suretiyle oluşturulan nokta bulutları kullanılmıştır.

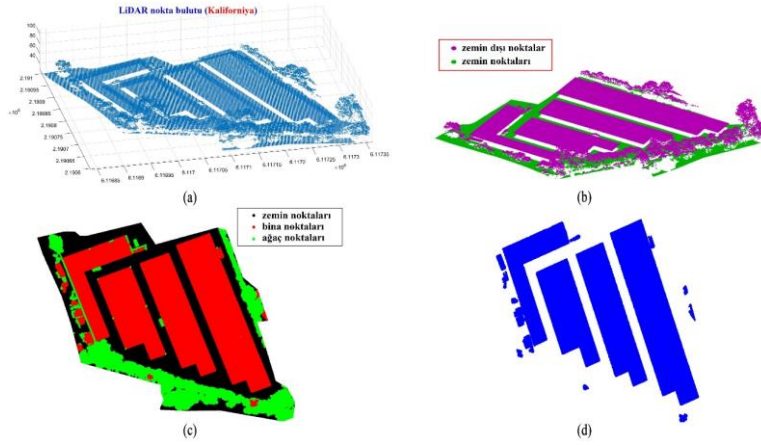
Test Alanı 1'de yoğun bir kentleşme içeren bölgede olduğu görülmektedir. (Şekil 2a). Bu test alanında İHA tabanlı dijital hava fotoğrafları, araziden ortalama 400 m yükseklikten 7952×5304 piksel çözünürlüklü Sony RX1R II kamerası (piksel boyutu: 4.5 µm) ile %80 boyuna ve %70 enine bindirme oranı ile çok bantlı (RGB) ve yer örnekleme aralığı (YÖA) 5 cm olacak şekilde çekilmiştir. *Test Alanı 2* yoğun yerleşim alanları ile kaplıdır (Şekil 2b). Bu test alanında büyük ölçekli çizgisel ve ortofoto harita üretimi için hem fotogrametrik hem de LiDAR verisi üretimi yapılmıştır. İlgili test alanı için LiDAR verisi ortalama 10 nokta/m² yoğunluğuna sahiptir. LiDAR nokta bulutu araziden yaklaşık olarak 1400 m yükseklikten Optech Galaxy T1000 cihazı ile elde edilmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı test alanında ve bu test alanları içerisinde farklı bina adedi kapsayacak şekilde seçilen alt test/çalışma alanları belirlemek suretiyle veri setleri üretilmiştir. Eşleştirme işlemi çok yoğun nokta bulutu üretecek şekilde planlanmıştır. Erzurum veri seti için m²'ye 171,81 nokta düşecek yoğunlukta ve toplamda 127.742.941 nokta üretilmiştir.



Şekil 2. Test Alanları; a) Erzurum, ve b) Kaliforniya

2.1. Zemin ve zemin üstü sınıfların filtrelenmesi

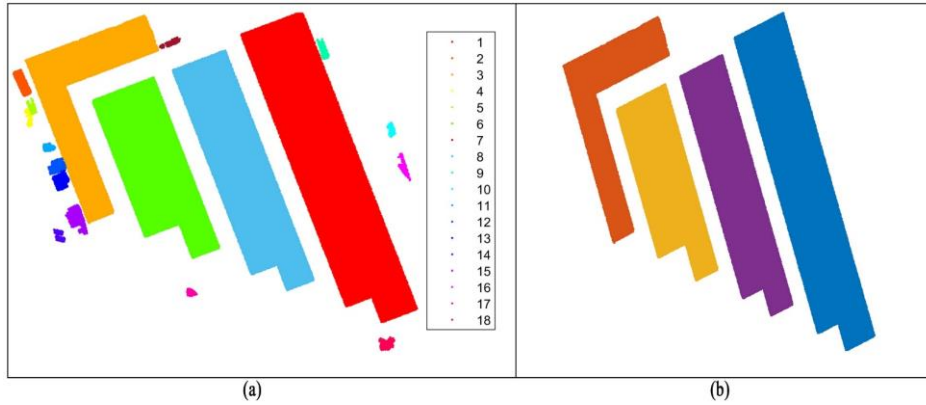
Fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutu ve LiDAR nokta bulutu üzerinden zemin çıkarım işlemi için öncelikle veri setleri üç boyutlu olarak MATLAB ortamında görsel hale getirilmiştir (Şekil 3a). Bu işlemi takiben SMRF algoritması ile nokta bulutu zemin ve zemin üstü noktalar olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Şekil 3b). Şekil 3b'de mor renkli bölgeler zemin üstü noktaları gösterirken, yeşil renkli bölgeler zemin noktalarını temsil etmektedir. SMRF metodu ile iki sınıfa ayrılan nokta bulutlarına ait geometrik özellikler (*eğrilik*, *normal* ve *komşuluk*) çıkarılmıştır. Her bir nokta için *eğrilik*, *normal* ve *komşuluk* indeksleri belirlenmiştir. Uygulama aşamasında komşu nokta sayısı (*neighbors points*) 15 olarak alınmıştır. Eğrilik ve normaller kullanılarak SMRF sonucu üretilen zemin üstü noktalar, bina ve bitki örtüsü olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Eğer bir noktanın eğriliği belirtilen eğrilik eşliğinden küçük ve komşu noktaların normalleri arasındaki kosinüs benzerliği, belirtilen normal eşikten daha büyük ise bu nokta bina noktası olarak kabul edilir ve etiketlenir. Bu kriterlerin dışındaki zemin üstü noktalar bitki örtüsü olarak etiketlenir. Sınıflandırılan zemin noktaları Şekil 3c'de, çıkarılan bina noktaları ise Şekil 3d'de gösterilmektedir.



Şekil 3. SMRF ile sınıflandırma; a ve b) zemin ve zemin üstü noktalar, c ve d) bina noktaları

2.2. Binaların sınıflandırılması

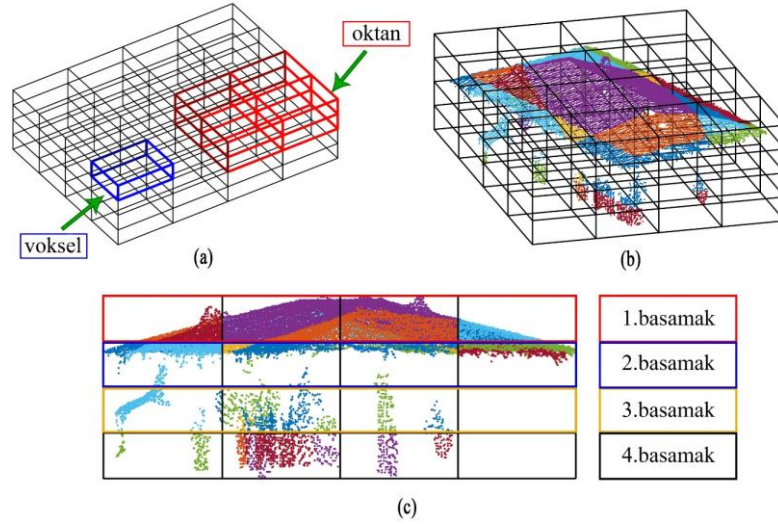
Sınıflandırılan bina noktaları içinde belirlenen eşik değerine göre ortaya çıkan gürültülerden kurtulabilmek için öncelikle DBSCAN kümeleme algoritması ile bina noktaları kümelendi (Şekil 4a). DBSCAN kümelemesi için “Epsilon” ve “Minpts” parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Uygulamada “Minpts” parametresi veri setinin nokta yoğunluğu ile eşleştirilmiştir ve hesaplanan nokta yoğunluğu en yakın tam sayıya yuvarlanıp otomatik olarak belirlenmiştir. “Epsilon” parametresi ise genellikle 1, 2 veya 3 değerleri seçildiğinde kümeleme sorunsuz bir biçimde gerçekleşmektedir. DBSCAN algoritması bitişik sınır nesnelerin kümeleneğinde kararsız hale gelebilmektedir (Ester vd., 1996).



Şekil 4. DBSCAN algoritması ile bina nokta kümeleme ve gürültü ayıklama; a) Nokta bulutu kümeleme, b) Nokta bulutu gürültü ayıklama

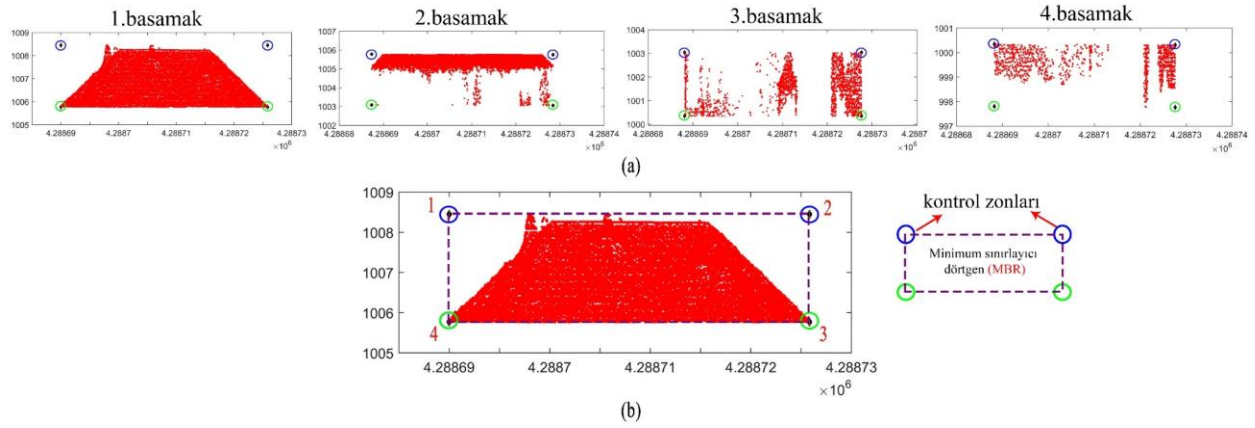
2.3. Geliştirilen yöntem (I-Octree) ile bina çıkarımı

Çalışma kapsamında, bu aşamaya kadar uygulanan yöntemlerle üretilen 3B bina noktaları incelendiğinde, binanın çatı noktalarının dışında duvar noktalarının da varlığı tespit edilmiştir. Belirlenen bina kümelerinden sadece çatıya ait noktaların seçilmesi ve duvar noktalarının olabildiğince bu kümelerden ayıklanmasını gerekmektedir. Bu problemin çözümü için literatürde mevcut “Octree” metodu iyileştirilmek suretiyle “İyileştirilmiş Octree” (I-Octree) adıyla yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Octree yönteminin temeli, binaya ait nokta bulutunun farklı sayıda eş prizmalar ile temsil edilmesine dayanmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Octree yöntemi ile prizmalara ayırma; a-b) Oluşturulan prizmalar, c) Octree için oluşturulan basamak sırası

Şekil 5'teki 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 değer 3 olarak seçilmiştir. MATLAB ortamında geliştirilen kod ile her bir prizmanın içindeki ve her bir basamaktaki noktalar otomatik olarak kümeler ayrıştırılmıştır. Fakat belirlenen basamakların hepsi çatı noktalarını içermediği için tüm basamaklar arasında bir karar mekanizması oluşturulması gerekmektedir. Özetle, her bina için Octree yöntemi uygulanır. Oluşan her binada hangi basamağın çatıya ait olabileceği tespit edilmesi gerekmektedir. İyileştirilmiş Octree (I-Octree) yaklaşımı, nokta bulutunun Y-Z ve X-Z düzlemlerinden analiz edildiği durumda, çatı profillerini iki boyutta farklı geometride ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Bunun için her basamağın profili ayrı ayrı incelenmiştir. Her bir basamak için MBR (Minimum Bounding Rectangle) algoritması ile basamak profillerinin köşe noktaları tespit edilmiştir (Şekil 6).



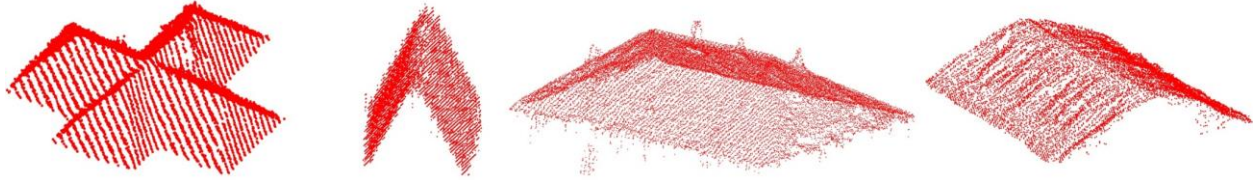
Şekil 6. MBR algoritması ile basamak analizi; a) buffer yöntemi, b) basamakların analizi

Şekil 6'da binanın basamaklandırılmasına yönelik (X-Z) düzleminde profiller gösterilmiştir. Şekillerdeki yeşil ve mavi renkli çemberler MBR algoritmasının ilgili nokta bulutunun (2 boyutta) minimum alana sahip olacak dörtgenin köşe noktalarını göstermektedir. Bu köşe noktalarından 0.1 m yarıçapında buffer zonları geçirilmiştir. Her bir basamaktaki bufferlardan sadece en üstteki iki buffer (mavi renkli) ele alınmıştır. Bu iki buffer içinde nokta bulunmuyorsa, ilgili basamak ele alınan bina 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 tüm basamaklar duvar olarak algılanacaktır. Çatısı olmadığı için profilden tüm basamaklar aşağıya doğrusal bir şekilde inmektedir. I-Octree yaklaşımının temelini oluşturan düzlem belirleme koşulları sıralanmıştır.

- Her iki düzlem sonucunda da ilk basamaktaki mavi renkli buffer'ların içinde nokta bulunmuyorsa iki düzlemde herhangi bir tanesi seçilebilir,
- (X-Z) düzleminin ilk basamağındaki mavi renkli buffer'ların içinde nokta bulunuyor ve (Y-Z) düzleminde nokta bulunmuyorsa, ilgili bina (Y-Z) düzleminde işleme devam eder,

- (Y-Z) düzleminin ilk basamağındaki mavi renkli buffer'ların içinde nokta bulunuyor ve (X-Z) düzleminde nokta bulunmuyorsa, ilgili bina (X-Z) düzleminde işleme devam eder,
- Her iki düzlemde de ilk basamaktaki mavi renkli 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 7).



Şekil 7. I-Octree basamak analizi sonucu ve çıkarılan bina çatı tipleri

2.4. Bina sınırlarının sayısallaştırılması

I-Octree yöntemi ile bina çatısına ait noktalar içerisinde seçilecek noktalar ile bina çatısının dış sınırının çizdirilmesi ve ardından düzenlenmesi gerekmektedir. Bu işlem için öncelikle MATLAB ortamında mevcut “boundary” fonksiyonu ile bina çatısının dış sınırı çizdirilmiştir. Bu sınır düzensiz bir geometriye sahiptir. Ancak 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 düzgünleştirilmesi için literatürde mevcut ABORE metodu kullanılmıştır (Ozdemir vd., 2021). ABORE metodu, nokta bulutundan çıkarılan ortogonal düzensiz bina sınırlarının otomatik bir şekilde sayısallaştırılmasını sağlayan iki aşamalı bir düzgünleştirme yöntemidir. Yöntemin ilk aşamasında, düzgünleştirme ile bina sınırının köşe noktaları yaklaşık olarak tespit edilirken, ikinci aşamada ise kesin köşe noktaları tespit edilmektedir.

2.5. Doğruluk analizi

Düğüleştirilen 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 piksel tabanlı tamlik (1), doğruluk (2), kalite (3) ve F-skör (4) metrikleri kullanılmıştır. Doğruluk metriklerinin hesaplanması için referans ve düğüleştirilen bina sınırları için Doğru Pozitif (TP), Yanlış Pozitif (FP) ve Yanlış Negatif (FN) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca literatürde kullanılan diğer değerlendirme ölçütü olan IoU (Intersection over Union) metriği Quality (kalite) metriği ile aynı anlama gelmektedir ve aynı formülü kullanmaktadır. F-skör değeri, Recall (geri çağırma) ve Precision (doğruluk) metriklerinin harmonik ortalaması olarak tanımlanmaktadır (Karşlı vd., 2016; Rutzinger vd., 2009).

$$\text{Tamlik } (Cp) = \frac{|TP|}{|TP| + |FN|} \quad (1)$$

$$\text{Doğruluk } (Cr) = \frac{|TP|}{|TP| + |FP|} \quad (2)$$

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

$$F - \text{skör } (F - 1) = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} = \frac{|TP|}{|TP| + \frac{1}{2}(|FN| + |FP|)} \quad (4)$$

3. UYGULAMA

Uygulama kapsamında seçilen iki farklı çalışma alanında ve belirlenen alt çalışma bölgelerinde, I-Octree yaklaşımı ile bina detayları otomatik olarak çıkarılmış, çıkarılan bina kenarları ABORE yöntemi ile düğüleştirilmiştir. Uygulama için seçilen test alanı verileri fotogrametrik nokta bulutu ile LiDAR nokta bulutundan oluşmakta olup, amaç farklı özellikleri yönüyle birbirine rakip olan verilerden üretilen sonuçların karşılaştırılmasıdır. Her bir veri setine yönelik nokta bulutlarından çıkarılan bina detaylarına ilişkin nicel ve nitel sonuçlar üretilmiştir. Nicel analiz literatürde genel geçer ve kabul görmüş piksel tabanlı doğruluk değerlendirme metrikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, nitel değerlendirmede ise her bir çalışma alanı için temin edilen büyük ölçekli (1/1000) halihazır harita ile

yapılmıştır. İkinci olarak, nitel sonuç bağlamında bina kenar detayı çıkarımı ya da vektörleştirme sonuçları değerlendirilmiştir. Son olarak ise, iki farklı veri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmak suretiyle değerlendirme tamamlanmıştır.

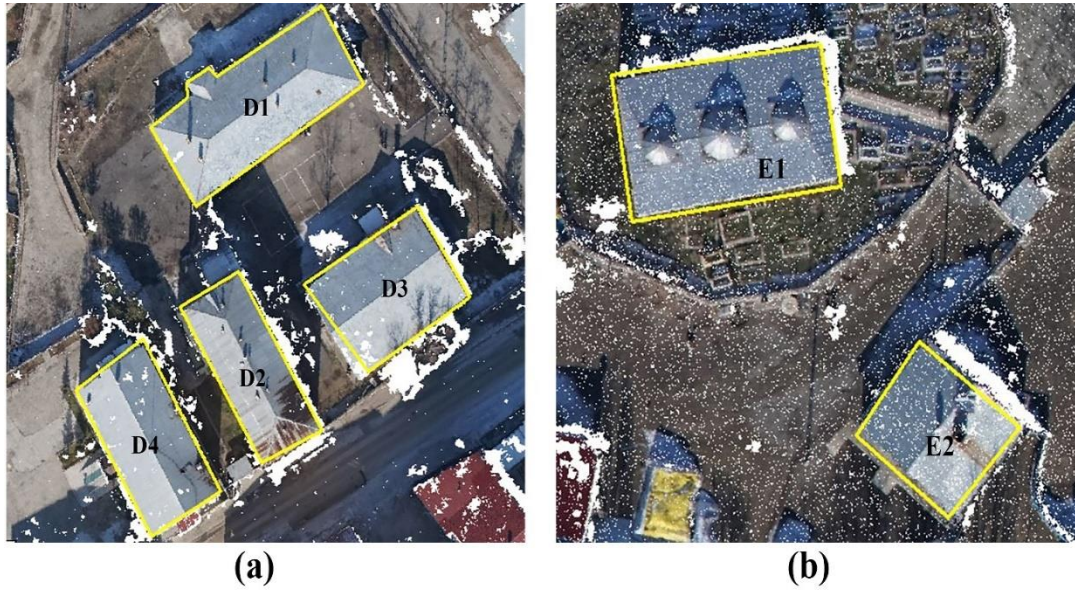
3.1. Fotogrametrik nokta bulutu sonuçları (Test_Alanı_1)

Bu test alanı verileri Erzurum bölgesine ait olup, fotogrametrik yöntemle halihazır harita üretimi için İHA ile çekilen görüntüler üzerinde görüntü eşleştirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. İlgili test alanı farklı sayıda ve geometrik yapıda binaları içerecek şekilde iki alt test alanına ayrılmıştır. Bu alt alana ait binalar D1-D4 ve E1-E2 harfleri ile gösterilmektedir. 1/1000 ölçekli referans harita nicel doğrulama metrikleri hesabı için kullanılmış, ayrıca üretilen bina sınırları bu harita ile aynı referansa getirilmek suretiyle de görsel yorumlama ve değerlendirme yapılmıştır. Bu test alanında seçilen alt çalışma bölgeleri için yapılan nicel değerlendirmede Cp, Cr, Q ve F-1 değerleri elde edilmiştir (**Çizelge 1**). Doğrulama haritası ve tüm bina alt gruplarının seçimi ile yapılan değerlendirmelerde önerilen iyileştirilmiş Octree (I-Octree) yaklaşımı sonuçları literatürle karşılaştırıldığında ideal düzeyde sonuçların elde edildiği görülmektedir (**Çizelge 1**). Seçilen bina grupları arasında D ve E ile temsil edilen grubun geometrik olarak düzgün oluşu ve binaları temsil eden noktaların özellikle bina kenar bölgelerinde mevcut oluşu doğruluk düzeyini artıran önemli bir etkidir.

Çizelge 1. Test_Alanı_1 doğruluk analizi sonuçları

Çalışma Alanı Bina No	1/1000 Ölçekli Referans			
	Cp	Cr	Q	F-1
D-1	0.9858	0.9892	0.9754	0.9875
D-2	0.9814	0.9825	0.9646	0.9820
D-3	0.9816	0.9442	0.9278	0.9625
D-4	0.9666	0.9951	0.9620	0.9807
E-1	0.9677	0.9809	0.9498	0.9743
E-2	0.9884	0.9103	0.9007	0.9478
Ortalama	0.9786	0.9670	0.9467	0.9725

Önerilen yöntemin temel özelliği **Çizelge 1**'de sunulan doğruluk düzeylerine ulaşmada binaya ait noktaların kaçınıcı basamak ya da seviyede olabileceğinin otomatik tespit edebilmesidir. Önerilen yaklaşımla Test_Alanı_1'de seçilen binaların hangi basamakta tespit edildiği ortaya konulmuştur. Buna göre, bina çatı en üst noktası esas alınmak suretiyle üretilen basamak sayısı D ve E ile temsil edilen binalarda sırasıyla maksimum 4 ve 3 basamak olarak belirlenmiştir. Böylece klasik sekizdal yönteminde nokta bulutu içerisinde binaya ait noktaların tespiti için sınırlandırılmayan basamak seviyesi de önerilen yöntemle bu çalışma alanında da otomatize edilmiştir. Nitel değerlendirme açısından Test_Alanı_1 alanında seçilen alt çalışma alanlarında mevcut binalar için üretilen sınırlar sırasıyla nokta bulutu, ortofoto ve 1/1000 ölçekli vektörel harita aynı referans sistemde temsil edilmiştir. İlgili sonuçlar nokta bulutu ve ortofoto için **Şekil 8**'de sunulmuştur. Üç farklı sonuç ürün görsel yorumlandığında, nicel sonuçları destekler nitelikte sonuç değerlerinin olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Test_Alanı_1 bina kenar bilgileri, ortofoto ve nokta bulutu; a) D1-D4 alt bölgesi, b) E1-E2 alt bölgesi

Şekil 8 incelendiğinde özellikle D ve E ile temsil edilen binaların çıkarımının yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir. Nokta bulutu verisinin hem yoğunluğu hem de ilgili bölgede özellikle eşleşme problemi olmadığı değerlendirilmektedir. Şekil 8’den de görüldüğü üzere nicel analizlerle hesaplanan metriklere göre D ve E ile temsil edilen binalarda ideal çıkarım mümkün olmaktadır. Ortofoto ile önerilen yaklaşımın ürettiği bina detaylarının kusursuz kesişmesi teorik olarak mümkün değildir. Dolayısıyla görselde belli miktar çakışmama hatası ortofoto doğruluğundan kaynaklanmaktadır.

3.2. LiDAR nokta bulutu sonuçları (Test_Alanı_2)

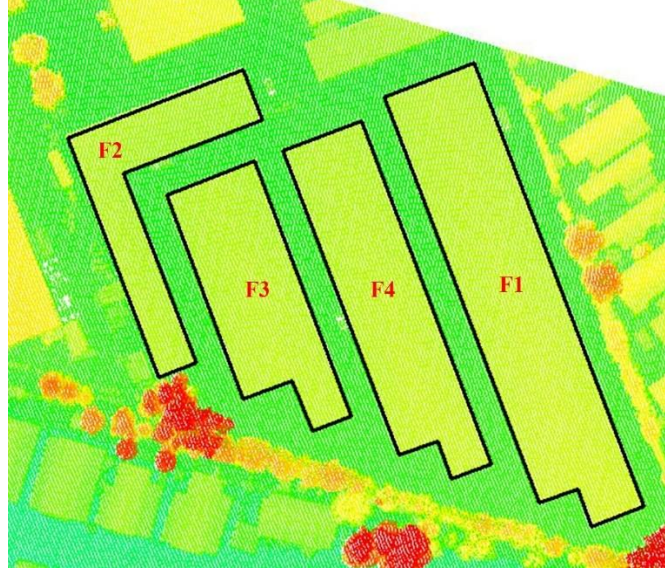
Bu test alanı verileri Kaliforniya bölgesine ait olup, LiDAR ile halihazır harita üretimi için elde edilen nokta bulutunu içermektedir. Bu test alanında seçilen binalar F1-F4 harfleri ile gösterilmektedir. 1/1000 ölçekli referans harita nicel doğrulama metrikleri hesabı için kullanılmış, ayrıca üretilen bina sınırları bu harita ile aynı referansa getirilmek suretiyle de görsel yorumlama ve değerlendirme yapılmıştır. Bu test alanı için yapılan nicel değerlendirmede Cp, Cr, Q ve F-1 değerleri elde edilmiştir (Çizelge 2). Veri setinin LiDAR verisi olması özellikle her metrik açısından üst düzey doğruluk elde edilmesini sağlamıştır. Fotogrametrik nokta bulutu verisine göre kalite açısından bu veri tipinin üstün olduğunu ifade etmek mümkündür. Doğrulama haritası ve tüm binaların seçimi ile yapılan değerlendirmelerde önerilen iyileştirilmiş Octree (I-Octree) yaklaşımı ile literatürdeki yöntemler karşılaştırıldığında ideal düzeyde sonuçların elde edildiği görülmektedir (Çizelge 2). Seçilen binaların geometrik olarak düzgün oluşu ve binaları temsil eden noktaların özellikle kenar bölgelerde mevcut oluşu doğruluk düzeyini artıran önemli bir etkidir.

Çizelge 2. Test_Alanı_2 doğruluk analizi sonuçları

Çalışma Alanı- Bina No	1/1000 Ölçekli Referans			
	Cp	Cr	Q	F-1
F-1	0.9977	0.9990	0.9967	0.9983
F-2	0.9999	0.9861	0.9861	0.9930
F-3	0.9945	0.9909	0.9855	0.9927
F-4	0.9945	0.9997	0.9942	0.9971
Ortalama	0.9966	0.9939	0.9906	0.9953

Önerilen yöntemin temel özelliği Çizelge 2’de sunulan doğruluk düzeylerine ulaşmada binaya ait noktaların kaçınıcı basamak ya da seviyede olabileceğinin otomatik tespit edebilmesidir. Önerilen yaklaşımla Test_Alanı_2’te seçilen binaların hangi basamakta tespit edildiği ortaya konulmuş olup, bina çatı en üst noktası esas alınmak suretiyle üretilen basamak sayısı F ile temsil edilen binalarda maksimum 4 basamak olarak belirlenmiştir. Nitel değerlendirme açısından Test_Alanı_2 alanında seçilen çalışma alanında mevcut binalar için üretilen sınırlar sırasıyla nokta bulutu, ortofoto ve 1/1000 ölçekli vektörel harita ile aynı referans sistemde temsil edilmiştir. İlgili sonuçlar nokta bulutu ve ortofoto için

Şekil 9’da sunulmuştur. Üç farklı sonuç ürünün görselleri yorumlandığında, nicel sonuçları destekler nitelikte sonuç değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 9. Test_Alanı_2 bina kenar bilgileri, ortofoto ve nokta bulutu (F1-F4 binaları)

Şekil 9 incelendiğinde özellikle F ile temsil edilen binaların çıkarımının yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir. Nokta bulutu verisinin nokta yoğunluğunun düşük olmasına rağmen, LiDAR tekniği ile üretilmiş olması en önemli etkidir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, uzaktan algılanmış verilerden bina detayları/sınırlarını çıkarmak için fotogrametrik teknikle eşleştirme ve LiDAR teknolojisi ile üretilmiş nokta bulutları kullanılmıştır. Fotogrametrik görüntülerden üretilen nokta bulutu ile LiDAR nokta bulutu kullanılarak bina detay bilgilerinin önerilen yöntemle otomatik çıkarımı ve sayısallaştırılması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım (I-Octree) kullanılarak referans verileri ile yapılan doğrulama sonucunda, önerilen yaklaşımın test alanlarında farklı sayıda ve kombinasyonda seçilen tüm binaları yüksek doğrulukla çıkarabildiği görülmüştür. Yaklaşımın fotogrametrik eşleştirme yöntemi ile üretilen nokta bulutundan elde edilen bina verilerine kıyasla, LiDAR verileri üzerinde daha yüksek doğruluk sağladığı sonucu ayrıca ortaya konulmuştur. Yaklaşımın gerçek kentsel alanların LiDAR ve fotogrametrik verilerine uygulanması sonucu bina detaylarının çıkarılmasındaki etkinliği niceliksel ve niteliksel olarak görülmüştür. Fotogrametrik nokta bulutlarının LiDAR bulutlarından daha düşük geometrik doğruluk sağladığına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, fotogrametrik nokta bulutlarının nokta yoğunluğu çok daha yüksektir ve çok daha fazla gereksiz veri içermektedirler.

Bu çalışma ile değişik kaynaklarca üretilmiş farklı yoğunluktaki nokta bulutlarından otomatik bir biçimde bina detay çıkarımı ve sayısallaştırma işleminin gerçekleştirilebileceği ortaya çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile nokta bulutlarından özellikle harita temel katmanı olan 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 üretilen nokta bulutları üzerinden bina çıkarım işlemini daha da önemli konuma getirmiştir. Bu bağlamda günümüz ve yakın gelecekte 3B veri üzerinden ölçüm ve analiz işlemlerinin önemi, çalışma sonuçları dikkate alındığında artacağı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, binaları 3B nokta bulutu veri kümelerinden çıkarırken, LiDAR verileri kullanılamıyorsa, fotogrametrik eşleştirme yöntemi ile üretilmiş nokta bulutlarının kullanımı iyi bir seçenek olarak değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, fotogrametrik nokta bulutlarına dayalı kentsel bina çıkarımı için çoklu görüntüler dikkate alınmalı ve gürültü giderme işlemi ciddi bir biçimde yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdollahi, A., Pradhan, B., Gite, S., Alamri, A. 2020. "Building Footprint Extraction from High Resolution Aerial Images Using Generative Adversarial Network (GAN) Architecture". *IEEE Access*, 8.
- Alidoost, F., Arefi, H. 2015. "An image-based technique for 3d building reconstruction using multi-view UAV images". İçinde *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* (C. 40).

- Awrangjeb, Mohammad, Gilani, S. A. N., Siddiqui, F. U.** 2018. "An effective data-driven method for 3-D building roof reconstruction and robust change detection". *Remote Sensing*, 10(10).
- Cao, R., Zhang, Y., Liu, X., Zhao, Z.** 2017. "Roof plane extraction from airborne lidar point clouds". *International Journal of Remote Sensing*, 38(12).
- Cao, Z., Fu, K., Lu, X., Diao, W., Sun, H., Yan, M., ... 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).
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X.** 1996. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise". İçinde *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*.
- Guo, L., Deng, X., Liu, Y., He, H., Lin, H., Qiu, G., Yang, W.** 2021. "Extraction of Dense Urban Buildings from Photogrammetric and LiDAR Point Clouds". *IEEE Access*, 9.
- Karsli, B., 2022.** "Fotogrametrik görüntü tabanlı nokta bulutu üzerinden otomatik bina çıkarımı ve sayısallaştırma". Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ss. 110.
- 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". İçinde *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).
- Liu, J., Ji, S.** 2020. "A novel recurrent encoder-decoder structure for large-scale multi-view stereo reconstruction from an open aerial dataset". İçinde *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- 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*.
- 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
- Zhang, F., Prisacariu, V., Yang, R., Torr, P. H. S.** 2019. "GA-net: Guided aggregation net for end-to-end stereo matching". İçinde *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (C. 2019-June)*.
- Zhixin Li, J. S.** 2022. "RANSAC-based multi primitive building reconstruction from 3D point clouds". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 185, 247–260.