



Havasal LiDAR Nokta Bulutlarından Kentsel Yol Ağlarının Çıkarımı, Bergama Test Alanı

Mustafa Zeybek^{ID}

¹Selçuk Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Havasal LiDAR,
Nokta bulutu,
Yol,
Kentsel yol,
Segmentasyon,
Akıllı ulaşım.

ÖZ

Kentsel alanlarda ulaşımın en temel faktörü karayoludur. Karayolları kent içinde sürekli bir kullanım alanı olduğundan sürdürülebilir ve izlenebilir bir yapıda olmalıdır. Kentsel alanlarda yer alan yolların envanteri, proje ve planlarının temin edilmesi akıllı şehirlerin üretilmesi açısından önemli bir altyapıyı oluşturur. Navigasyon amaçlı kullanımın yanında kent planlarının üretilmesinde güncel durum tespiti açısından yol ağlarının haritalandırılması gerekir. Yersel ölçmelerle yol ağı ölçmeleri zahmetli, zaman alıcı ve ekonomik külfeti yüksektir. Gelişen teknolojiyle geleneksel ve yersel ölçme tekniklerine alternatif etkili ve geniş alanların haritalandırılmasına katkı sağlayan ölçme tekniklerinin kullanılması işlemleri kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada yol ağlarının yarı otomatik çıkarımı için bir metodoloji önerilmiştir. Önerilen metodolojide, ham Havasal LiDAR nokta bulutlarının ön işleme, yükseklik sapmalarının hesaplanması, düzlemsellik ve bağlantılı bileşen analizlerinden faydalanılmıştır. Bazı parametrelerin kullanıcı tarafından deneme yanılma yöntemiyle girilmesi nedeniyle yöntem yarı otomatik olarak çalışmaktadır. Çalışma alanı Harita Genel Müdürlüğü tarafından Havasal LiDAR ölçümlerinin gerçekleştirildiği Bergama test alanıdır. Elde edilen sonuçlar manuel çizimlerle görsel olarak karşılaştırılmış ve önemli oranlarda örtüşme sağlayan sonuçlar elde edilmiştir.

Extraction of urban road networks from aerial LiDAR point clouds, Bergama test site

Keywords

Airborne LiDAR,
Point cloud,
Road,
Urban road,
Segmentation,
Smart transportation.

ABSTRACT

The essential factor of transportation in urban areas is the highway. Since the highways are a continuous usage area in the city, they should be in a sustainable and traceable structure. Providing the inventory, projects, and plans of the roads in urban areas constitutes a substantial infrastructure for producing smart cities. Besides being used for navigation purposes, road networks should be mapped in order to determine the current situation in the production of city plans. Road network measurements with traditional measurements are laborious, time-consuming, and economically burdensome. With the developing technology, using measurement techniques that contribute to mapping effective and large areas as an alternative to traditional and terrestrial measurement techniques makes procedures more straightforward. In this study, a methodology for the semi-automatic extraction of road networks is proposed. The proposed methodology uses preprocessing of raw Aerial LiDAR point clouds, calculation of height deviations, planarity, and connected component analysis. The method works semi-automatically because the user enters some parameters through trial and error. The study area is the Bergama test area, where Aerial LiDAR measurements are carried out by the General Directorate of Mapping. The results obtained were compared visually with the manual drawings, and results were obtained with considerable overlap.

1. GİRİŞ

Karayolları hakkındaki bilgiler genellikle araç navigasyonu, geometrik standartlar ve akıllı ulaşım sistemleri hakkında konumsal uygulamalarda temel bilgi kaynaklarıdır (Sameen & Pradhan, 2016). Karayolunun yarı otomatik veya tam otomatik olarak çıkarılması ise yerel yönetimlerin kontrolündeki yolların belirli düzeyde güncellenmesi, bakım ve onarım işlemlerinde kritik bir öneme sahiptir.

Otoyolların haritalandırılması; geometrik standartlara uygun olup olmamasının test edilmesi, trafik kazaları, karayolu tasarımı proje ve yakın gelecekteki otoyol planlamaları gibi çeşitli amaçlara hizmet eden önemli bir yer edinmiştir (Gargoum vd., 2022). Işık Tespiti ve Mesafe ölçme veya kısa adıyla LiDAR teknolojisi (Vosselman & Maas, 2010), yol geometrisinin çıkarımında diğer tekniklere göre çok yüksek çözünürlüklü lazer tarama verileri sağlar (Antah vd., 2022; Gargoum vd., 2018). Özellikle Havasal (Airborne) LiDAR sistemleri, bağıl konumlandırması yüksek ve yoğun nokta bulutuna sahip topoğrafik verilerin üretilmesinde en yaygın ve yenilikçi bir teknolojidir (McManamon, 2019). LiDAR sistemlerinin temel bileşenleri, lazer tarama, Küresel Konum Belirleme Sistemi (GNSS) ve atalet ölçüm birimi (IMU) entegrasyonu ile tanımlanır (Vosselman & Maas, 2010). Havasal platformlar sayesinde çok geniş alanların haritalanması, temel koordinat ve karakteristik sinyal yansıma bilgilerinin toplanmasını çok kısa sürede gerçekleştirir (Zeybek, 2021). LiDAR sistemleri, diğer uzaktan algılama ve ölçme tekniklerine göre daha yüksek çözünürlüğe ve daha düşük maliyete sahiptir (Sameen & Pradhan, 2016).

Yolların çıkarımında yalnızca uzaktan algılama sensörlerinden değil aynı zamanda farklı sensör verilerinin entegrasyonu ile de geliştirilmiş algoritmalar literatürde görülmektedir (Liu & Lim, 2016; Sameen & Pradhan, 2016). Genellikle bu yöntemler otomatik ve yarı otomatiktir. Havasal LiDAR, geniş kapsamda ve yüksek doğrulukta karayolu envanter verilerinin kazandırılmasında önemli katkılar sunmaktadır. Bu tür veriler, karmaşık üç boyutlu (3B) nokta bulutlarından otomatik olarak hazırlanması planlanan çalışmalarda; geometrik standartların testi, kaza kör nokta analizi, yol bakım ve güncelleme çalışmalarında ve diğer uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir.

Yolların çıkarımı için çok sayıda yöntem önerilmiştir (Ma vd., 2022; J. Wang vd., 2017; Zhu vd., 2021). Geleneksel yöntemler kullanarak karayolu etüt, proje ve haritalama faaliyetleri, karayollarının halihazırdaki basılı haritalar üzerinde manuel olarak sayısallaştırılarak da yorumlanmaktadır. Aynı zamanda uydu/hava görüntüleri yardımıyla karakteristik detaylar entegre edilmektedir (Wei vd., 2022). Geleneksel yöntemlerin en önemli dezavantajı, yorumlayıcı ve teknik elemanın yoğun işgücüne, zamana ve maliyete ihtiyaç duymasındır. Farklı çalışmalarda bu durum kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, teknik insan hatalarının ortaya çıktığı da bilinmektedir.

Güncel durumun tespitinde arazi ölçmeleri de yaygın kullanılan, özellikle gelişmekte olan ülkelerde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde genellikle GNSS alıcıları ve total station gibi yersel ölçme teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknik de üstte bahsedilen geleneksel yöntemle benzer hem zaman alıcı, maliyetli ve yoğun iş gücüne ihtiyaç duymaktadır. Bu yaklaşımların yanında LiDAR teknolojisi de gelişmeye devam etmiş ve gelişmiş ülkelerde uygulamaya konulmuştur (Yermo vd., 2022). Başlangıçta yersel (statik) lazer tarama ile başlayan teknoloji, mobil ve havasal platformlara da entegre edilebilir hale gelmiştir (Wang vd., 2018). Literatürde geliştirilen algoritma ve ticari yazılımlar sayesinde de pratikte uygulanabilir bir teknik olmuştur. Bu konuda mobil LiDAR sistemlerinin yol çalışmalarında kullanılması için bazı standartlar da çıkarılmıştır (Olsen vd., 2013). Bu nedenle LiDAR teknolojisiyle geliştirilen her çalışma yol çıkarımına önemli katkılar sunmaktadır.

Literatürde genel yol ağlarının çıkarımında, yersel teknikler, uydu ve hava fotoğrafları, mobil LiDAR, yersel LiDAR ölçme teknikleri kullanılmıştır (Biçici & Zeybek, 2021; Cao vd., 2021; Yadav vd., 2021).

Bu çalışma, yüksek çözünürlüklü havasal kaynaklı LiDAR nokta bulutu verilerini kullanan bir metodoloji önerilmiş ve konumsal bilgilerden karayollarına ait bilgilerin çıkarılması için bir yöntem sunmaktadır.

2. YÖNTEM

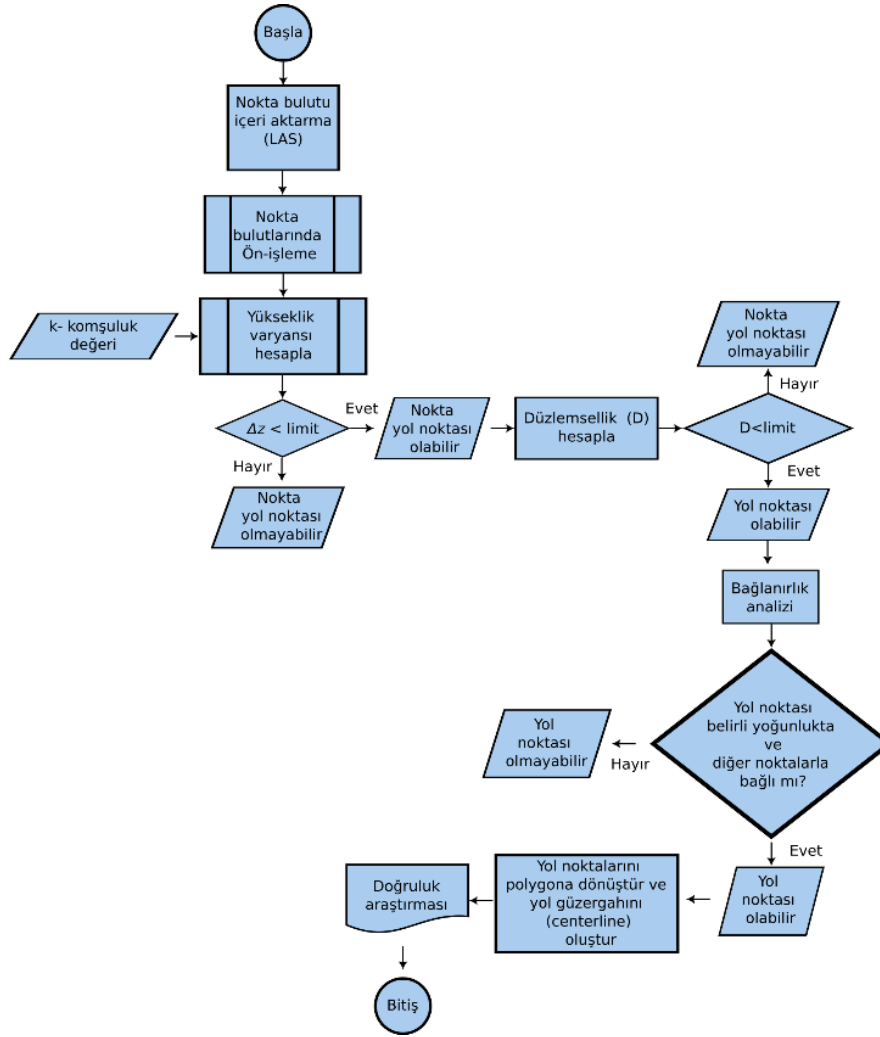
Bu çalışmada önerilen metodoloji için izlenen yol Şekil 1’de verilmiştir. Metodolojide yer alan detaylara ise aşağıdaki bölümlerde yer verilmiştir.

2.1. Çalışma Bölgesi ve Test Verisi

Bu çalışmada önerilen yöntemin test edilmesi amacıyla Bergama LiDAR verisi kullanılmıştır. Test verisi ölçmelerinde iki farklı sensör ve iki farklı uçuşu yüksekliğinden veri toplanmıştır (Kayı vd., 2015). Riegl firmasına ait LMS-Q1560 LiDAR sensörü kullanılarak 13 Ekim - 07 Kasım 2014 tarihleri arasında ölçüm yapılmıştır. Uçuş yüksekliği 1200 m ve sonucunda nokta yoğunluğunun metrekarede en az 8 nokta olacak şekilde, %25 bindirmeli 32 kolona göre yapılmıştır (Kayı vd., 2015). Daha detaylı bilgiye, Kayı vd. (2015) makalesinden erişim sağlanabilir. Bu test alanı içinde “riegl_1200_140.las” bölümü kullanılmıştır.

Koordinat referans sistemi WGS 84 / UTM zone 35N projeksiyon sisteminde tanımlanmıştır. Sınırlar ise 515482.8, 516482.8, 4330306, 4331306 (xmin, xmaxs, ymin, ymaks) şeklindedir. 1 km² alanda 21.94 milyon nokta, 21.85 nokta/m² yoğunluktadır. Bu alan içinde bir de değerlendirme bölgesi (100x200 m) belirlenmiş ve metodoloji sonuçları manuel çizimlerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma alanı, çeşitli arazi özelliklerini barındırmaktadır ve test alanına uygun özellikler sahip (tepelik ve düzlük) bir bölge olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Önerilen metodoloji iş akış diyagramı

2.2. Metodoloji

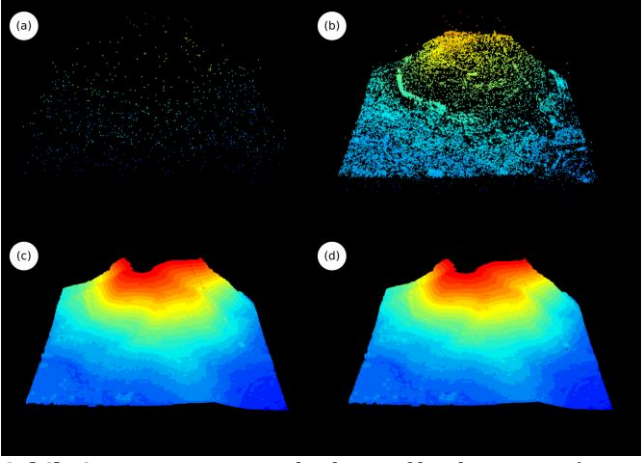
Elde edilmiş nokta bulutlarının işlem akışında ilk aşama, verilerin ön işlenmesidir. Bu aşamada çift nokta (duplikasyon) ve yer/yer üzeri nokta sınıflandırmaları yapılmıştır. Nokta bulutlarında koordinatların birbirine çok yakın olduğu durumlarla karşılaşılabilir. Bu durumda veri işleme aşamalarının performansı düşmekte ve işlem süresi uzamaktadır. Bu nedenle çift noktaların tespit edilip silinmesi gerekmektedir. Bu aşamadan sonra uyumsuz noktalarda (gürültü-noise) tespit edilmelidir. Bunun için yaygın kullanılan iki algoritma bu aşamada incelenmiştir. İzole vokselleme (IVF) dayalı uyumsuz noktalar (gürültü) segmentasyon için Lastools programı lasnoise fonksiyonuna benzer bir algoritmadır ve çevresindeki $3 \times 3 \times 3 = 27$ vokselde yalnızca birkaç başka nokta bulunan noktaları bulur (Isenburg, 2021; Roussel & Auty, 2019). İstatistiksel uyumsuzluk silme (SOR) ise diğer filtreleme algoritmasıdır (Rusu & Cousins, 2011). Her nokta için, k-en yakın tüm komşularına olan ortalama mesafeyi hesaplar. Ortalama mesafeden daha uzak noktalar belirli bir katta (çarpan) standart sapmayı gürültü olarak kabul eder ve sınıflandırır. IVF ve SOR filtrelemeleri için farklı parametreler uygulanmaktadır. Bu çalışmada IVF için optimum; çözünürlük değeri 5 ve nokta sayısı 6 olarak belirlenmiştir. SOR için komşuluk değeri 10, standart sapma değer katsayısı 3 olarak

girilmiş ve Şekil 2'deki gibi veriler temizlenmiştir. IVF algoritması detay kayıplarını minimumda tuttuğu için tercih edilmiştir.

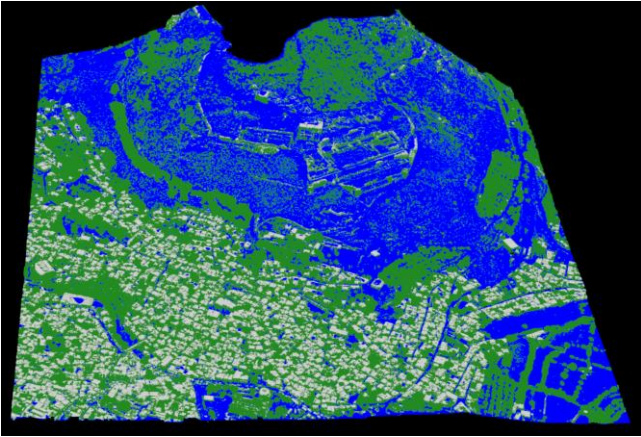
Gürültü temizlenmesi sonrası Bez Simülasyon Filtreleme (CSF) algoritması (Zhang vd., 2016) ile yer ve yer üzeri noktalar tespit edilmiştir. Aynı zamanda yer üzeri noktalar geometrik karakteristiğine göre (saçılım ve düzlemsellik kriterleri) bitki örtüsü ve binalar olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3). Bu aşamadan sonra yoğunluk (intensity) değerleri incelenmesi yapılmıştır. Bu aşamada ise yoğunluk düzeltilmesi yapılmalıdır, ancak test verisinde ölçüm izi (trajectory) bulunmadığından mesafe bazlı düzeltme yapılamamıştır. Bunun yerine uygun bir limit değeri belirlenmiş ve özellikle kent dışı noktaların (zemin, kayalık ve bitki örtüsü vb.) yüksek yansıma değerine sahip olan noktalar tespit edilerek silinmiştir (Şekil 4).

İşlem akışının ön-işleme sonrası standart sapma değerlerini aşan noktaların filtrelenmesi aşamasıdır. Standart sapma aşağıdaki Denklem 1'deki gibi hesaplanmıştır.

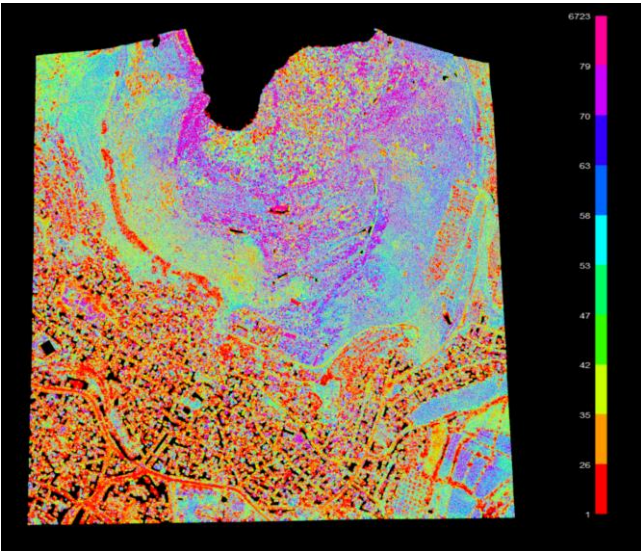
$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x - \bar{x})^2}{k}} \quad (1)$$



Şekil 2. Uyuşumsuz noktaların filtrenmesi a) IVF filtreleme sonrası uyuşumsuz noktalar, b) SOR filtreleme sonrası uyuşumsuz noktalar, c) IVF sonrası temiz nokta bulutları, d) SOR filtreleme sonrası temiz nokta bulutları.



Şekil 3. Yer ve yer üzeri noktaların sınıflandırılması



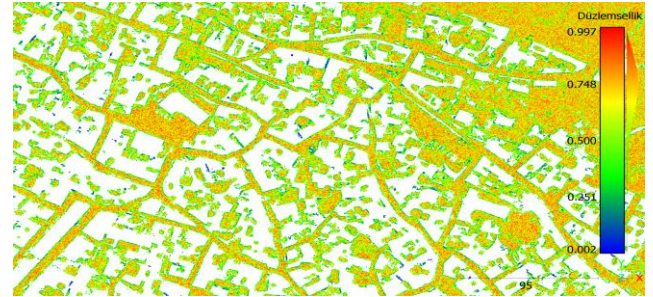
Şekil 4. Yer noktalarının sinyal yoğunluk (intensity) değerleri

Burada σ standart sapma ve x her bir nokta bulutundaki nokta yüksekliğini ve k , nokta sayısını \bar{x} ise k noktanın yükseklik ortalamasını belirtir.

Yer noktalarının filtrenmesi mükemmel olmadığından özellikle nokta bulutlarının kenar bölgelerinde oluşacak sapmalar ve yol yüzeyinde duran

araçların da filtrenmesi amacıyla Denklem 1'deki standart sapma filtrenmesi noktaların Z bileşenine uygulanmıştır. İş akışındaki standart sapma için limit değeri ise 0.5 m olarak seçilmiştir. Bu parametre farklı veri ortamlarında yenilenmesi gerekebilir.

Düzlemsellik değerinin hesaplanması, özdeğerlere göre noktaların komşu noktalarla ilişkisine bakılarak yapılmıştır. Bu amaçla temel bileşenler analizi (PCA) kullanılmıştır. Armadillo princomp fonksiyonu bu işlemi R programlama diline göre daha hızlı hesapladığından R Armadillo ilişkisi oluşturularak C++ programlama dili ile cebirsel çözüm yapılmıştır (Eddelbuettel & Sanderson, 2014; Roussel & Auty, 2019; Team, 2021). PCA sayesinde bileşenler arasındaki korelasyon en aza indirilir ve tekrarlanabilirlik artırılmaya çalışıldığından düzlemselliği sağlayan noktalar 1 değerine yaklaşırken düzlemsellikten uzaklaşan noktalar ise 0'a yaklaşmaktadır (Şekil 5). Bu sayede standart sapma farkı sonrası elemine edilen noktalar haricinde hala düzlemsellikten uzak noktalar bu sayede filtrelenebilmektedir.



Şekil 5. Düzlemsellik analizi sonrası nokta bulutlarının 0-1 aralığındaki düzleme yakınlığının tespit edilmesi.

Bu aşamadan sonra, 0.7 ve üzeri düzlemsellik değerine sahip veriler için eşik değeri uygulanmış (Şekil 6), yol sınırları ve diğer noktaların filtrenmesi sağlanmıştır.



Şekil 6. Düzlemsellik analizi sonrası limit uygulaması 0.7 ve üzeri düzlemselliğe sahip noktalar.

Metodolojide son aşama olarak önerilen, yol dışında kalan artık noktaların filtrenmesi çalışmasıdır. Bunun için yol noktalarının birbirine yol dışındaki noktalara göre daha yakın olması varsayılır. Bunun içinde bağlanabilirlik (connectivity) analizi yapılmıştır (Şekil 7). Ücretsiz bir yazılım olan CloudCompare yazılımı bu amaçla kullanılmıştır (Girardeau-Montaut, 2019). Bağlanabilirlik analizinde iki temel parametre vardır bunlar komşuluk mesafesi ve küme içindeki minimum nokta sayısıdır. Cloudcompare yazılımı noktalar

arasındaki mesafe için Octree algoritmasını kullanır ve 8 komşuluk bölgesini uygulayarak gruplandırmayı yapar. Gruplandırmanın ikinci parametresi ise minimum nokta sayısıdır. Minimum nokta sayısını sağlamayan her bir nokta en yakın gruba entegre edilir. Eğer mesafe kriterini ve minimum nokta sayısını sağlamayan nokta var ise nokta bulutlarında bu noktalar uyumsuz noktalar ve gruplandırma yapılmadan silinmektedir. Test alanındaki uygulama sonunda Şekil 8'deki sonuç elde edilmiştir.



Şekil 7. Bağlanabilirlik analizi etiketlemesi (connected component labelling)



Şekil 8. Çıkarılan yollar

Yolların sınırlarına dayalı kapalı poligon üretimi mümkündür. Bunun için QGIS (Team, 2022) açık kaynak yazılımı kullanarak veya R *concaveman* paketi kullanılarak alpha-shapes algoritması temelli poligonlar üretilmektedir (Vaidyanathan, & Agafonkin, 2020).

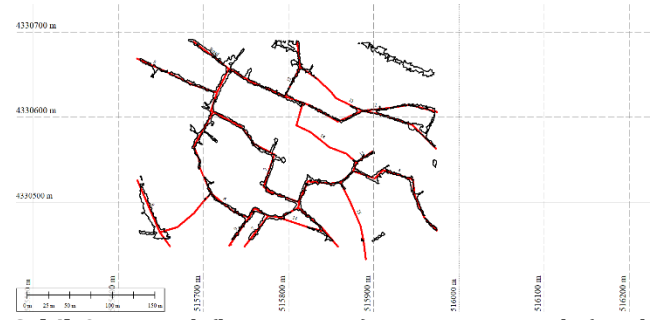
3. BULGULAR

Sonuç olarak doğruluk incelemesi ve değerlendirilmesi amaçlı çalışılan 100x200 m boyutlarındaki bir alanda manuel olarak, yaklaşık sınırlarıyla çizilmiş yol orta hatları ile poligonların uyumları görsel olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan yöntem ve elde edilen sonuçlarla önerilen metodoloji yarı otomatik bir yöntemdir.

LiDAR verilerinin kullanılması sebebiyle bazı açık kaynaklı hava fotoğrafları ve uydu fotoğrafları gibi düşük çözünürlüklü uzaktan algılama verilerine göre daha yüksek çözünürlük barındırması sebebiyle avantajlıdır. Bunun da ötesinde elde edilen bilgiler yalnızca 2B değil 3B bilgilerdir.

Test alanında 16 farklı yol güzergahı tespit edilmiştir. Bunlar manuel olarak hem World Image verisinden hem de ham LiDAR verisinden çizilmiştir (Şekil 9). Diğer yandan otomatik olarak elde edilen yol verileri de aynı koordinat sisteminde üretilmiştir. Tüm

veriler UTM projeksiyonunda ve 35 derece Kuzey Dilim Orta Meridyeninde üretilmiştir.



Şekil 9. Manuel (kırmızı çizgi) ve yarı otomatik (siyah poligon) çıkarılan yollar

Otomatik yöntemin avantajlarından bahsedilirse, açık erişimli programlamaya müsait basit bir metodolojidir. Verilerin daha verimli ve doğru kullanılmasında etkili sonuçlar üretmiştir. Özellikle kullanılan temel nokta bulutları analizleri ile erişilebilir ve tekrarlanabilir bir metodolojidir. Farklı programlama dillerinde uygulanabilir ve iyileştirmeye açıktır.

Dezavantajlarına değinilirse, LiDAR nokta bulutlarının ölçümünde kullanılan tüm ham verilerin olması önemlidir. Aksi halde yoğunluk verilerinin düzeltilmesi mümkün değildir. Bu çalışmada her ne kadar yoğunluk (intensity) verilerinin filtrelenmesinde limit değeri kullanılsa da yeterli ve istenildiği gibi sonuç alınamamıştır. Bazı bölgelerde veri kayıplarına yol açmaktadır. Ölçüm açısı ve bloklardaki zamansal farklılıklar ve güneş ışınları kaynaklı yoğunluk değerleri aynı objelerde dahi farklı değerlerde yoğunluk değeri üretebilmektedir.

Yolların sınıflandırılmasında önemli bir kaynağın etkili kullanılması diğer kaynaklara olan ihtiyacı azaltmaktadır. Nokta bulutlarının RGB değerlerinin olmaması da önemli bir dezavantajdır. RGB tabanlı filtrelemelerin uygulanamaması da önemli bir eksiklik oluşturmıştır. Nokta bulutlarının geometrik karakteristiklerinin hesaplanmasında veri işleme süresi oldukça uzun olabilmektedir. Teknolojik gelişmelerle veya ağ tabanlı (bulut) çoklu işlemcilerle veri işleme süresi kısaltılmalıdır. Sonuçları daha doğru verilerle kontrol edilmesi önemlidir. Burada insansız hava araçları gibi ölçme teknikleri kullanılarak güncel ortofotolarla sonuçlar desteklenmelidir.

4. SONUÇ

Günlük hayatımızda yollar kentsel ulaşımında önemli bir yer edinmiştir. Kentsel planlama ve uygulamacılar akıllı şehirlerde altyapıların oluşturulmasında havasal platformlardan elde edilen ölçme verilerinin hızlı toplanmasına ihtiyaç duymaktadır. LiDAR ölçme teknikleri kullanılarak karayolu ağı bilgilerinin yarı otomatik olarak çıkarılması, özellikle kentsel alanlarda, nokta bulutlarındaki yoğun detaylardaki karmaşıklıklarla manuel çıkarımlarda temel bazı problemlere çözüm üretmektedir.

Bu çalışmada görüldüğü üzere, yalnızca geometrik nokta karakteristiklerinden yola çıkılarak mevcut literatürde kabul görmüş algoritmalar yardımıyla kentsel yol ağının verimli bir şekilde yüksek

çözünürlüklü LiDAR verilerinden çıkarılması için bir yaklaşım sunulmuştur. Burada, karayollarının çıkarımında verilerin ön işlenmesi ile gürültü ve duplikasyonlar giderilmiş, yer/yer üzeri noktalar sınıflandırılmış, yükseklik standart sapması yaklaşımıyla filtreleme yapılmış, düzlemsellik yardımıyla da yol dışındaki nesnelere sınıflandırılmış, bağlantılı nesne etiketleme ile yol dışındaki objeler elemine edilmiş ve son olarak yol noktaları kapalı alanlar (poligon) haline getirilmiştir.

Sonuç olarak, yolların yarı otomatik çıkarılması ve tespit edilmesinde verimli ve etkili bir metodoloji ortaya koyulmuştur. Metodoloji, yol tespitini gerçekleştirerek yüksek oranda kentsel yol ağlarını ortaya çıkarmıştır. Fakat yol olmayan bazı alanlarında yol olarak tespit edildiği görülmüştür. Bunun temel nedeni ise yol karakteristiğine benzer meydan, park alanları gibi yol ile geometrik ayrımı mümkün olmayan alanlar olduğu görülmüştür. Bölgede bulunan 16 yol güzergahından 4 güzergâh önerilen metodoloji ile çıkarılamamıştır. Bunun temel nedeni ise yol genişliklerinin oldukça dar olması, nokta yoğunluğunun yeterli olmaması ve filtrelemelerin veri yoğunluğunun az olduğu yerlerde noktaları elemine etmesidir. Genel anlamda bakıldığında ise yüksek çözünürlüklü LiDAR verilerinden yarı otomatik olarak kentsel alanlarda yol ağlarının çıkarılabileceği değerlendirilmiştir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Makalede kullanılan test verisi Harita Genel Müdürlüğü'nün Bergama test verisinin bir bölümünü içermektedir. Bu çalışmanın ortaya çıkarılmasında veri paylaşımında bulunan kuruma teşekkürlerimi sunarım.

Yazarların Katkısı

Veri toplama ve ham veri analizi dışındaki tüm analizler ve makalenin yazımı yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Antah, F. H., Khoiry, M. A., Maulud, K. N. A. & Ibrahim, A. N. H. (2022). Factors Influencing the Use of Geospatial Technology with LiDAR for Road Design: Case of Malaysia. *Sustainability*, 14(15).

Biçici, S. & Zeybek, M. (2021). An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud. *Automation in Construction*, 122, 103475. doi:10.1016/j.autcon.2020.103475

Cao, L., Wang, Y. & Liu, C. (2021). Study of unpaved road surface erosion based on terrestrial laser

scanning. *Catena*, 199. doi:10.1016/j.catena.2020.105091

Eddelbuettel, D. & Sanderson, C. (2014). RcppArmadillo: Accelerating R with high-performance C++ linear algebra. *Computational Statistics & Data Analysis*, 71, 1054-1063. doi:10.1016/j.csda.2013.02.005

Gargoum, S. A., El-Basyouny, K., Froese, K. & Gadowski, A. (2018). A Fully Automated Approach to Extract and Assess Road Cross Sections From Mobile LiDAR Data. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(11), 3507-3516. doi:10.1109/Tits.2017.2784623

Gargoum, S., Karsten, L., El-Basyouny, K. & Chen, X. (2022). Enriching Roadside Safety Assessments Using LiDAR Technology: Disaggregate Collision-Level Data Fusion and Analysis. *Infrastructures*, 7(1). doi:10.3390/infrastructures7010007

Girardeau-Montaut, D. (2019). Cloudcompare GPL software version 2.10. Erişim Linki <https://www.danielgm.net/cc/>. Erişim tarihi: 08 December 2020

Gombin, J., Vaidyanathan, R. & Agafonkin, V. (2020). concaveman: A Very Fast 2D Concave Hull Algorithm (Version R package version 1.1.0). Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=concaveman>

Isenburg, M. (2021). LAStools—Efficient tools for LiDAR processing.

Kayı, A., Erdoğan, M. & Eker, O. (2015). OPTECH HA-500 ve RIEGL LMS-Q1560 ile Gerçekleştirilen LiDAR Test Sonuçları. *Harita Dergisi*, 153.

Liu, L. & Lim, S. (2016). A framework of road extraction from airborne lidar data and aerial imagery. *Journal of Spatial Science*, 61(2), 263-281. doi:10.1080/14498596.2016.1147392

Ma, H. C., Ma, H. C., Zhang, L., Liu, K. & Luo, W. J. (2022). Extracting Urban Road Footprints from Airborne LiDAR Point Clouds with PointNet plus plus and Two-Step Post-Processing. *Remote Sensing*, 14(3).

McManamon, P. F. (2019). LiDAR Technologies and Systems.

Olsen, M. J., Roe, G. V., Glennie, C., Persi, F., Reedy, M., David Hurwitz, ... Knodler, M. (2013). Guidelines for the Use of Mobile LIDAR in Transportation Applications. Retrieved from <https://www.qgis.org/>

Roussel, J. R., Auty, D., De Boissieu, F., Meador, A. S. & Bourdon, J. F. (2018). lidR: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. *R package version*, 1(1).

Rusu, R. B. & Cousins, S. (2011). Point cloud library (pcl). 2011 IEEE international conference on robotics and automation.

Sameen, M. I. & Pradhan, B. (2016). A Simplified Semi-Automatic Technique for Highway Extraction from High-Resolution Airborne LiDAR Data and Orthophotos. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45(3), 395-405. doi:10.1007/s12524-016-0610-5

Team, Q. D. (2022). QGIS Geographic Information System

- Team, R. C. (2021). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Erişim Linki <https://cran.r-project.org/>. Erişim tarihi: 13/10/2021
- Vosselman, G. & Maas, H. G. (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning: Whittles Publishing.
- Wang, J., Hu, Z. Q., Chen, Y. Y. & Zhang, Z. Q. (2017). Automatic Estimation of Road Slopes and Superelevations Using Point Clouds. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 83(3), 217-223. doi:10.14358/Pers.83.3.217
- Wang, R. S., Peethambaran, J. & Chen, D. (2018). LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models: A Review. Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(2), 606-627. doi:10.1109/Jstars.2017.2781132
- Wei, C. T., Tsai, M. D., Chang, Y. L. & Wang, M. C. J. (2022). Enhancing the Accuracy of Land Cover Classification by Airborne LiDAR Data and WorldView-2 Satellite Imagery. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(7).
- Yadav, M., Khan, P., Singh, A. K. & Lohani, B. (2021). An automatic hybrid method for ground filtering in mobile laser scanning data of various types of roadway environments. Automation in Construction, 126.
- Yermo, M., Rivera, F. F., Cabaleiro, J. C., Vilarino, D. L. & Pena, T. F. (2022). A fast and optimal pathfinder using airborne LiDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 183, 482-495.
- Zeybek, M. (2021). Inlier Point Preservation in Outlier Points Removed from the ALS Point Cloud. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 49(10), 2347-2363. doi:10.1007/s12524-021-01397-4
- Zhang, W. M., Qi, J. B., Wan, P., Wang, H. T., Xie, D. H., Wang, X. Y. & Yan, G. J. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. Remote Sensing, 8(6), 501. doi:10.3390/rs8060501
- Zhu, J. F., Sui, L. C., Zang, Y. F., Zheng, H., Jiang, W., Zhong, M. Q. & Ma, F. (2021). Classification of Airborne Laser Scanning Point Cloud Using Point-Based Convolutional Neural Network. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(7).



© Author(s) 2022.

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