



Mobil LiDAR Nokta Bulutlarından Enerji Nakil Hatlarının Doğrusal Olmayan Modellerle Kestirimi

Mustafa Zeybek^{ID}

Selçuk Üniversitesi, Güneysınır MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Tapu ve Kadastro Programı, Güneysınır, Konya/Türkiye.

Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 08100, Seyitler, Artvin/Türkiye.

Anahtar Kelimeler

Mobil LiDAR
Lazer Tarama
Nokta Bulutu
Enerji Nakil Hattı
Regresyon Model

ÖZ

Mobil LiDAR üç-boyutlu (3B) nokta bulutu verileri hareketli platformlar üzerinden tarama sistemleri ile temin edilmektedir. Özellikle koridor haritalama işlemleri için yoğun veriler önemli bir yer tutmaktadır. Enerji nakil hatları (ENH) ve güzergahlarının, kentsel alanlardaki dağıtım ve iletim hatlarının sürekli gözetim altında tutulması hem güvenlik hem de enerji kesintilerinin önüne geçilmesi açısından gereklidir. Mobil LiDAR nokta bulutları yoğun veri sağlayarak 3B ENH'yi tespit etme kabiliyetine sahip, ancak yoğun nokta bulutlarının işlenmesi ve enerji hatlarına yakın nesnelere gelen gürültülü noktalar gibi farklı nedenlerle istenilen hassas veri temininde zorluklar yaşanabilmektedir. Bu problemlerin minimize edilmesi amacıyla bu çalışmada, iki temel adım önerilmiştir. İlk aşamada nokta bulutlarının temsil edilmesinde yoğun nokta bulutu verilerinin voksel tabanlı algoritmayla seyreltilmesi, aday ENH noktalarının sınıflandırılması ve tespiti, ikinci aşamada ise tespit edilen bu aday hat noktalarının mesafe temelli algoritmayla kümelendirilerek her hat için doğrusal olmayan modellerin kestirilmesidir. Önerilen metodoloji ve mobil LiDAR teknolojisi, ülkemizdeki ENH'lerin envanter verisinin toplanması, yapılaşma ve bitki örtüsü risklerinin azaltılmasına katkı sağlayarak mühendislik maliyetlerinde ekonomik kazançlar sağlama potansiyeline sahiptir. ENH envanter yönetimi, iletim hatları altında kontrolsüz yapılaşmanın engellenmesi, bitki örtüsü risk azaltma ve mühendislik ölçmeleri açısından, mobil LiDAR teknolojisi yaklaşımı, özellikle kentsel alanlarda daha uygun ve yoğun veri ile daha az operatör ihtiyacına gerek duymaktadır.

Prediction of Power Transmission Lines from Mobile LiDAR Point Clouds with Nonlinear Models

Keywords

Mobile LiDAR
Laser Scanning
Point Cloud
Power Transmission Lines
Regression Model

ABSTRACT

Mobile LiDAR three-dimensional (3D) point cloud data is provided by scanning systems over mobile platforms. High-density data has a significant role, especially for corridor mapping operations. Continuous surveillance of power transmission lines (PTL) and routes, distribution, and transmission lines in urban areas is necessary for security and energy cuts prevention. Mobile LiDAR point clouds have the ability to detect 3D PTL by providing density data. Still, difficulties may be experienced in obtaining the desired precision for different reasons, such as processing dense point clouds with low accuracy and acquiring noisy points from objects close to power lines. To minimize these problems, two essential steps are proposed in this study. The first stage is the resampling of dense point cloud data with a voxel-based algorithm, the multi-class classification, and the detection of candidate PTL points. In the second stage, each line's nonlinear models are estimated by clustering these candidate line points with a distance-based algorithm. The proposed methodology and mobile LiDAR technology can provide economic gains in engineering costs by collecting inventory data on PTL, reducing construction and vegetation risks. In terms of PTL inventory management, prevention of uncontrolled construction under transmission lines, vegetation risk reduction, and engineering measurements, the mobile LiDAR technology approach requires more convenient and dense data and fewer operator needs, especially in urban areas.

1. GİRİŞ

Günlük hayatta elektrik enerjisinin iletim kalitesi, güvenilirliği ve kullanım güvenliğinin sağlanması için tüm ilgili enerji sektörüne yönelmektedir. Bu yönelim ise beraberinde iletim hatlarının, dağıtım ağının kullanıcılara erişimi adına genişletilmesini ve hatlardaki dayanımın artırılarak potansiyel arızaları en aza indirme gayretini getirmektedir.

Bu dağıtım ve havai iletim hatları sürekli atmosferik etkiye maruz kalmaktadır. Ortam değişimlerinin en belirgin etkileri hatların fiziksel yapısında değişime sebep olabilmektedir. Bu etkiler doğrultusunda kentsel alanlarda bitki örtüsünün ve yapılaşmanın varlığı da düşünüldüğünde, risk faktörünün artması kaçınılmazdır.

Enerji nakil hatlarının (ENH) diğer nesnelere mesafesinin korunması için belirli koşulları vardır (Demir, 2013). Bu koşulların yerine gelmesi için ve bir elektrik hattının güvenli bir ortam sağlayarak güvenilir bir şekilde çalışması, koridorların düzenli olarak izlenmesi, oluşan risklerin ortadan kaldırılması ve gerekli tedbirlerin alınmasıyla mümkündür.

Geleneksel yöntemler, enerji sistemleri tabanlı belirli katsayıların kullanılmasıyla belirli limitlerin sağlanması için sehim miktarlarının hesaplanmasına katkı sunar. Ancak bu tür analiz ve ölçümler kestirime dayalıdır veya güncelliğini kaybetmektedir. Diğer bir yöntem ise yersel ölçmelerdir ve sehim miktarlarının hesaplanmasında aktif bir rol üstlenir. Yersel ölçmeler, total station ölçmelerine dayalı trigonometrik yöntemlerle yükseklik ölçmeleriyle yapılmaktadır. Yersel ölçmeler genellikle yerinde arazi ölçmeleri zaman ve maliyet gerektiren işlemlerdir.

ENH'nin ve direk yerlerinin LiDAR nokta bulutu verileri yardımıyla kestirimi konusunda çalışmalar literatürde yer almaktadır. Genel olarak aşamalı yöntemler uygulanarak bu bilgilerin otomatik çıkarımı için farklı öneriler sunulmuştur. Yaygın olarak yükseklik farkı ve eğim kriterlerini uygulayarak noktaların sınıflandırılması yapılır. Ardından, yükseklik, konumsal yoğunluk, boyut ve şekil kombinasyonuna göre farklı filtrelemeler ile her tekil enerji iletim hattının çıkarımı yapılmaktadır. Çalışmalarda güzergah tespiti veya görüntü işleme temelli yöntemlerde kullanılmaktadır. Bunlar Hough dönüşümü ve Öklid mesafesi temelli kümeleme yöntemleriyle de desteklenir ve üç boyutlu (3B) bir ENH, düzlemsel ve düşey eksenlerde hiperbolik fonksiyonlar katener eğrisiyle de modellenmektedir (Guan vd., 2016).

Diğer bir çalışma da, nokta bulutlarının fiziksel şekillerine, geometrik özelliklerine ve aralarındaki topolojik ilişkilerle dayalı olarak demiryolu koridorunun temel bileşenlerinin tanımlanması amacıyla yapılmıştır (Arastounia, 2015). Geliştirilen algoritma ile iki ray hattı, direk, konsol, kontak hattı, katener hattı ve dönüş akımı hattı gibi demiryolu

altyapısının tüm temel bileşenlerinin tanımlanması üzerinedir. Sonuçlar hem nesne seviyesinde hem de nokta bulutu seviyesinde yüksek doğrulukla elde edildiğini göstermiştir.

Elektrik enerjisi iletimi ve bakımı, enerji endüstrisi için çok önemli olduğunu vurgulayan çalışmalardan bir diğeri de insansız hava araçları (İHA) tarafından elde edilen nokta bulutu verilerinden hesaplanan düzenli şebeke özelliklerine dayalı olarak elektrik enerjisi iletim tesislerinin üç boyutlu (3D) ve verimli bir şekilde çıkarılması ve sınıflandırılması için geliştirilmiş metodolojilerdir (Zhang vd., 2019).

Havasal LiDAR teknolojisi kullanılarak yüksek voltaj iletim hatlarının otomatik izlenmesine yardımcı olacak yöntemlerde literatürde yer almaktadır (McLaughlin, 2006). LiDAR verileri önce otomatik olarak iletim hattı, bitki örtüsü veya yüzey olarak sınıflandırılır. Çıkarılan iletim hattı veri noktaları daha sonra verilerin yerel afin modelleri kullanılarak ayrı aralıklara bölünür ve modelleme gerçekleştirilir.

Diğer bir havasal LiDAR çalışması (Sevgen & Canaz, 2016), nokta bulutu verilerinden elektrik nakil hatlarının modellenmesinde Temel Bileşenler Analizi, Random Sample Consensus (RANSAC) ve en küçük kareler yöntemi kullanılmış, bu sayede elektrik nakil hatları modellenmiştir.

Havasal LiDAR verilerinden ENH'nin otomatik olarak tespit edilmesi için geliştirilen diğer bir algoritma ise (Erbaş, 2016) ArcObject ve C# programlama ortamları ile ArcGIS yazılımı eklentisi (ArcGIS add-in) olarak geliştirilmiştir.

Lazer tarama sistemine sahip İHA sistemlerinden elde edilen veriler görsel, noktasal ve model bazlı mutlak ve rölatif doğruluk temelli istatistiksel incelemeler sonucunda büyük ölçekli harita üretimi (1/1000) gereksinimlerini karşıladıkları ve arazi bütünlemesi entegrasyonu ile rahatlıkla iki boyutlu haritalama çalışmalarında ve üretiminde kullanılabilecekleri literatürdeki çalışmalarda tespit edilmiştir (Sefercik vd., 2018). Bu ölçme teknikleri de alternatif veri toplama teknikleri olarak düşünülmelidir ve ENH modellerinde aktif rol alma potansiyeline sahiptir.

Enerji nakil hatları ve bu hatlara yakın nesnelere otomatik tespiti için potansiyel risk durumlarının konumsal analizi, enerji nakil hattı kontrol ve bakımlarının etkili bir biçimde yapılması için yapılan çalışmalar ve geliştirilen algoritmalar da konumsal doğruluk açısından umut vericidir (Muş, 2019).

Sonuç olarak LiDAR sistemlerinin yoğun nokta bulutu verilerinin elde edilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğu önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Ekercin & Üstün, 2004). Sistemin özellikle enerji nakil hatlarına ait detay alımı ve modellenmesinde, ormancılık ve yoğun bitki örtüsünün bulunduğu bölgelere ait pasif görüntülerden etkili verilerin temin edilemediği alanlarda alternatif ve avantajlı bir ölçme tekniği olduğu belirtilmiştir (Ekercin & Üstün, 2004).

Bu çalışmada önerilen yöntem, mobil LiDAR (MLT) sistemleriyle elde edilen verinin ENH sistemlerinin modellenmesinde kullanılmasını, istatistiksel yöntemlerle modellenmesini ve veri modellerinin hem daha doğru hem de yarı-otomatik bir şekilde yapılmasını amaçlamaktadır.

Bu makale aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Öncelikle temin edilen MLT verisi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra ölçme sistemi hakkında temel bilgiler verilmiştir. Verilerin işlenmesinde gerekli ön işleme adımlarından bahsedilmiştir. ENH sistemlerinin yer aldığı yer üzeri noktalarının filtrelenmesi ve sınıflandırılma aşamaları incelenmiştir. Verilerin daha hızlı işlenebilmesi ve stabil olması açısından seyreltme işlemi uygulanmıştır. ENH telleri teker teker çıkartılarak bu veriler farklı eğri algoritmaları ile matematiksel model fonksiyonlara uydurma işlemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar son bölümde verilmiş ve tartışma bölümüyle çalışma sonlandırılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT

Konya'da yer alan bir kentsel alan içinde bulunan ENH'ler bu çalışmada test verisi olarak ele alınmıştır.

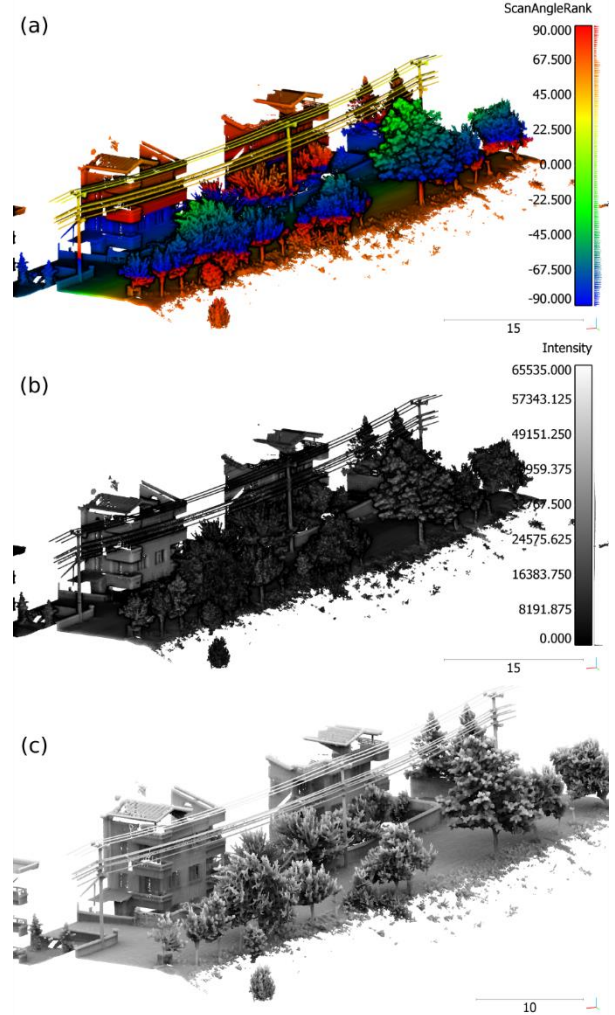
Bu çalışmada RIEGL VMX-450 MLT sistemi kullanılmıştır. Bu ölçme cihazı ile yüksek sürüş hızlarında dahi yoğun ve yüksek doğrulukta nokta bulutları elde etmek mümkündür. Bunun yanında, nokta bulutları, yüksek ölçme hızında sağlanır ve farklı özelliklere sahiptir. Küresel konumlandırma uydusu sistemi ve ataletsel konumlandırma sistemi, ölçü birimi (GNSS/INS/IMU) ile araç izi bilgisini de sunmaktadır.

Araç üzerine monte edilen ölçüm sistemi, aerodinamik yapıya uygun olarak dizayn edilmiş bir koruyucu kapağın altına yerleştirilmiş iki adet Riegl VQ-450 lazer tarayıcısını barındırır. Komple sistem, atalet ölçümü ve GNSS ekipmanı ile bütünleşiktir. Opsiyonel olarak tasarlanmış bir kamera platformu, altı adede kadar dijital kameranın kolay entegrasyonuna ve kurulumuna da müsaade eder.

Pratikte ve bilimsel çalışmalarda yüksek doğruluk ve yüksek çözünürlüğe ihtiyaç duyulan işlemlerde hızlı 3D veri toplama sayesinde, koridor haritalama amaçlı, yol ve demiryolu koridorlarının, suyollarının, limanların ve falezlerin haritalanması gibi çeşitli uygulamalar için kullanılan bir ölçme sistemidir. Bunun yanı sıra hali hazır, kentsel alanların haritalandırılması, sokak sağlıklaştırması gibi işlemlerde bu sistemler kullanılabilir.

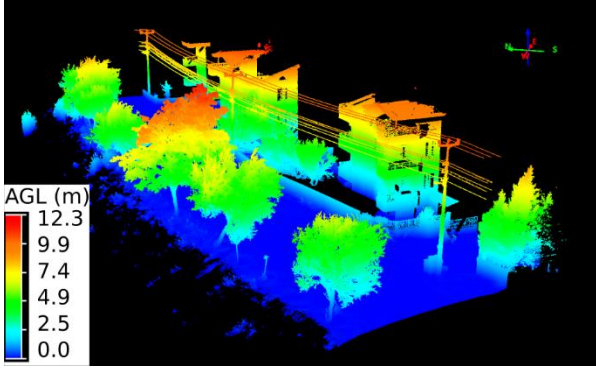
Özetle, RIEGL VMX-450 araç üzeri MLT sistemi, tam entegre ve kalibre edilmiş lazer tarayıcılar, IMU/GNSS ekipmanı, isteğe bağlı kamera alt sistemi ve ilgili RIEGL yazılım paketlerinden oluşmaktadır. Entegre IMU/GNSS, sistemi sayesinde Global koordinat sisteminde doğrudan georeferanslamayla nokta bulutlarını istenilen projektif düzlemsel koordinat sistemine dönüştürülmesine de imkan sağlar.

Sistem kalibrasyonu, bütünleşik bir sistem olduğundan sistem çıkarıldığında dahi bir sonraki çalışmalar için değerlerini koruyabilir şekilde tasarlanmıştır. Üzerindeki VQ-450 tarayıcıları, 550.000 ölçüm hızında düşük gürültülü, boşluksuz 360° profil ölçümüne imkan sağlar (Şekil 1). Sinyal işleme teknolojisiyle her noktaya ait kalibre edilmiş genlik ve yansıma değerlerini de kaydedebilir.

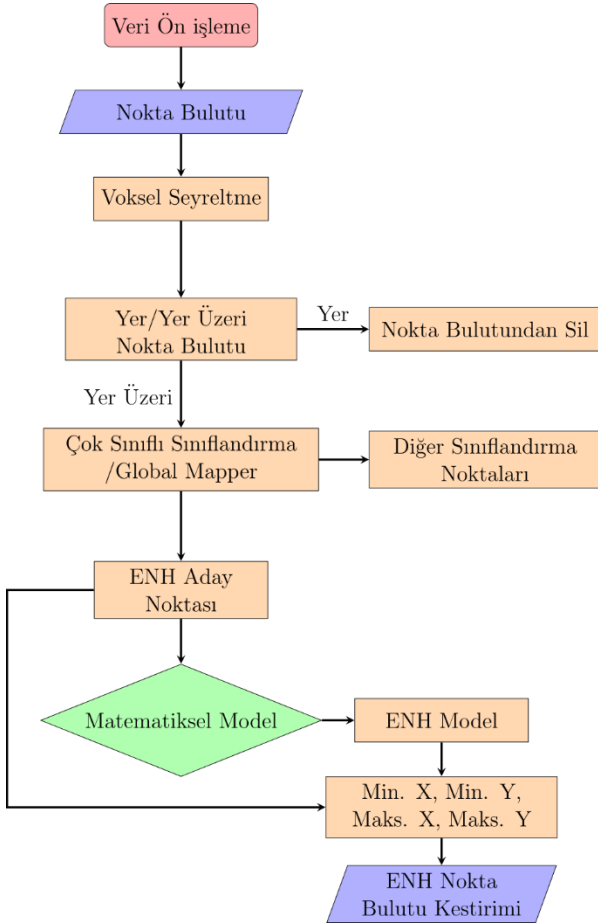


Şekil 1. MLT verisi, a) tarama açısı, b) yoğunluk (intensity) değerli veri, c) görselliği artırılmış nokta bulutu

RIEGL VMX-450 MLT sistemi kamera entegrasyonunu zaman damgalama işlemini yüksek hassasiyette uygulamaktadır. Veri toplama sistemi ölçme anında operatör kontrolü ile sağlanır. Arazi ölçmeleri tamamlandıktan sonraki aşamada, depolanan ham veriler RIEGL yazılımları ile sonra işleme (post-process) yapılarak referans koordinatlı global veya lokal koordinatlarla farklı yazılımlara uygun formatta aktarma yapılabilir ve 3. parti yazılımlarda bu nokta bulut verileri işlenebilir. Çalışma alanına ait elde edilmiş bir veri örneği sunulmuştur (Şekil 2). Bu çalışmada önerilen işlem adımları ise Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. MLT sistemi ile elde edilmiş nokta bulutları örneği, (Yükseklik değeri, yer üzeri yüksekliklerini ifade etmektedir.)



Şekil 3. Önerilen metodoloji iş akışı diyagramı

Bu çalışmanın temelini oluşturan hatların modellenmesi aşamasında ise istatistik yazılımı istatistiksel hesaplama için R dilinde yer alan lineer olmayan 3 farklı yöntem uygulanmıştır. Bu amaçla, regresyon çerçevesi içinde polinom regresyon, kübik eğri (spline) ve toplam ekleme model (GAM) fonksiyonlarını içeren farklı paketler kullanılmıştır. ENH'ler, MLT nokta bulutu verileri kullanılarak, doğrusal olmayan fonksiyonlarla modellenmesine uygunluğu ve farklı fonksiyonlara genel bir bakış sağlanmıştır.

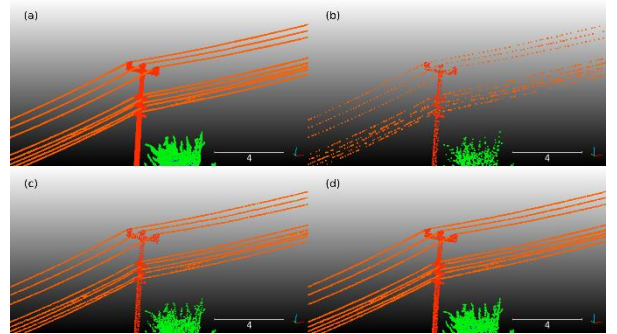
2.1. Veri Ön İşleme

Nokta bulutu verileri yüzey yansımaları ve üst üste bindirmeli noktaları barındırabilir. Bunun temel nedeni yüzey yansımaları ve oluşturduğu gürültülü noktalar ve aynı bölgeden ikinci geçiş sebebiyle oluşan bindirmeli noktalardır. Bu verilerin öncelikle nokta bulutlarından temizlenmesi gerekir. Bunun yanı sıra bilgisayar donanımlarının gücü sonsuz değildir. Bu nedenle bilgisayar performansının en iyimser şekilde değerlendirilmesi için nokta bulutlarında seyreltmelerin yapılması veri işlemede zamandan tasarruf sağlar. Gürültülü noktaların temizlenmesi için istatistiksel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da istatistiksel yöntem kullanılmıştır (Rusu & Cousins, 2011). Üst üste bindirme noktaları için de tanımlanan minimum komşuluk mesafesi 0.0001 olarak tanımlanmış ve aynı koordinat değerine sahip noktalar filtrelenmiştir.

2.2. Voksel Seyreltme

Voksel tabanlı seyreltme işlemi, orijinal nokta bulutlarını geçici olarak, nokta bulutu içinde mevcut olan önemli detayları koruyarak veri boyutunu önemli ölçüde azaltan düzenli mesafeye sahip (Hücre genişliği: X, Y, Z eksenlerinde) alt örneklenmiş noktaların oluşturulmasıdır. Voksel seyreltme işleminde iki yöntem mevcuttur: birincisi voksel (hücre) merkezinin hücre içine düşen noktaların momentleri hesaba katılır ve hesaplanan hücre merkezinde yeni bir nokta oluşturulur. Diğer yöntem ise ilk yönteme benzer ancak yeni nokta üretmek yerine momente yakın en yakın komşu noktayı *knn* komşuluk yöntemine göre atar ve hücre merkezini temsil eden nokta oluşturulur.

Voksel seyreltme algoritması ile hem noktalar seyreltilmiş hem de objelerin karakteristik yapısı diğer algoritmalara göre korunmuştur (Şekil 4). Nokta bulutu seyreltme işlemi nokta bulutlarının veri işleme performansını arttırmaktadır. Seyreltme işlemlerinde uygulanan algoritmalar için PDAL kütüphanesinde yer alan fonksiyonlardan faydalanılmıştır (Şekil 5) (Contributors, 2018).



Şekil 4. Nokta bulutlarının seyreltilmesi, a) orijinal nokta bulutları, b) rastgele seyreltme, c) poisson dağılımı ile seyreltme, d) voksel temelli seyreltme.

Voksel Seyreltme	<pre>["girdi.las", { "type":"filters.voxelcentroidnearestneighbor", "cell":0.03 }, "cikti.las"]</pre>
Rastgele Seyreltme	<pre>[{ "type": "readers.las", "filename": "girdi.las" }, { "type":"filters.decimation", "step": 10 }, { "type":"writers.las", "filename":"cikti.las" }]</pre>
Poisson Seyreltme	<pre>["girdi.las", { "type":"filters.sample", "radius":0.1 }, "cikti.las"]</pre>

Şekil 5. Seyreltme amaçlı kullanılan PDAL komutları (Ubuntu 18.04, PDAL v. 2.0.0)

2.3. Sınıflandırma

Veri ön işleme sonrasında elde edilen nokta bulutlarından ENH güzergâhlarının tespit edilmesinde kolaylık sağlayan yer ve yer üzeri noktaların bulunması, sınıflandırma aşamasını oluşturmaktadır (Şekil 6). ENH geçiş güzergahları, dağıtım hatlarına göre farklı yüksekliklerde olabilir. Bu nedenle belirli limit değerlerinin nokta bulutlarında ön parametre olarak tespit edilmesi önemlidir.

ENH'lerin nokta bulutlarından çıkarımı için öncelikle yer ve yer üzeri noktalar olarak sınıflandırılması gerekmektedir. Bu amaçla literatürde yaygın sınıflandırma yöntemleri bulunmaktadır. Günümüzde ayrıca etkili filtreleme algoritmaları farklı araştırma gruplarınca uygulanmakta ve geliştirilmektedir. Bu çalışmada sınıflandırma amaçlı yer noktaları ve yer üzeri noktalar Global Mapper yazılımı ile sınıflandırılmıştır. Eğrilik sapmalarına bağlı temel yer sınıflandırma algoritması, noktaları küçük bir yerel alan içindeki komşularıyla karşılaştırma tekniğine dayanarak sınıflandırma gerçekleştirilir. Temel çerçeve boyutu parametresi ile sınıflandırma penceresi ve bu alanın boyutu tanımlanarak kestirim ve sınıflandırma bu alan içinde yapılır. Bu parametreler için daha küçük mesafe değerleri yüksek çözünürlük sağladığında daha yüksek doğruluk sağlar, ancak daha yüksek çözünürlüklü

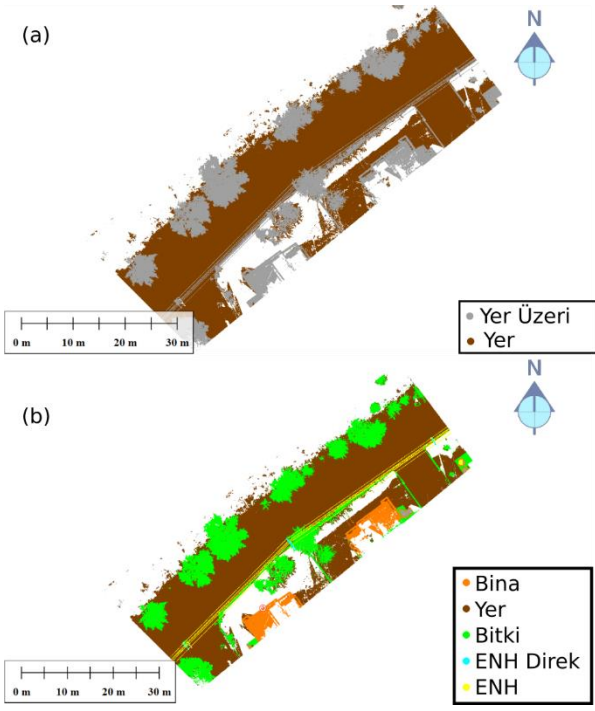
LiDAR verileri ve daha uzun işlem süresi gerektirir. Düşük çözünürlüklü verilerle çalışanlar daha yüksek bir değer tanımlanmalıdır. Her bir çerçeve içine en az 3 LiDAR noktasını içeren bir değer önerilir; daha büyük bölme boyutları işleme hızını artırır, ancak aynı zamanda doğruluğu da azaltır. Veri düşük yoğunlukluysa (metrekare başına 1.5 noktadan az) varsayılan değer 2 metre veya 3 nokta aralığıdır. Nokta arasındaki mesafe, yüklenen nokta bulutu verilerinden hesaplanır. Hesaplanan ortalama nokta çözünürlüğü, *las* formatının meta veri istatistiklerinde görüntülenebilir. Daha sonra yine Global Mapper yazılımı kullanılarak ENH aday noktaları ve direk noktaları tespit edilmiştir. Yazılım yüksek oranda sınıflandırma doğruluğu yüksek olsa da özellikle direklerin tellerle birleşim noktasında veya ağaçların yoğun olarak bulunduğu noktalarda yanlış sınıflandırma uygulama potansiyeline sahiptir. Bu durum özellikleri benzer olan karmaşık özellikler için kaçınılmaz bir durumdur. Günümüzde henüz bu sınıflandırma işlemleri mükemmel bir sonuçla üretebilecek bir algoritmanın bulunmaması nedeniyle manuel müdahaleler her zaman gerekli görülmüştür. ENH modellerinin maksimum doğrulukta tespit edilmesi için sonuç verileri ayrıca düşey kesitler alınarak manuel işlemlerle iyileştirilmiştir. Bu sayede ENH tel ve direkleri %100 doğruluğa yakın bir sonuçla sınıflandırılmıştır.

Enerji hattı sınıflandırma algoritması, nokta bulutlarında uygun hat tespiti için minimum mesafede olan noktaları enerji hattı olarak sınıflandırmak için veri segmentlerini (bölmeler) en uygun çizgi değerleriyle karşılaştırır. Bu verilerin en az 20 nokta/m² noktalı nokta bulutlarında uygulanması önerilir. MLT bu verilerin yüksek yoğunlukta elde edilmesine uygun bir tekniktir.

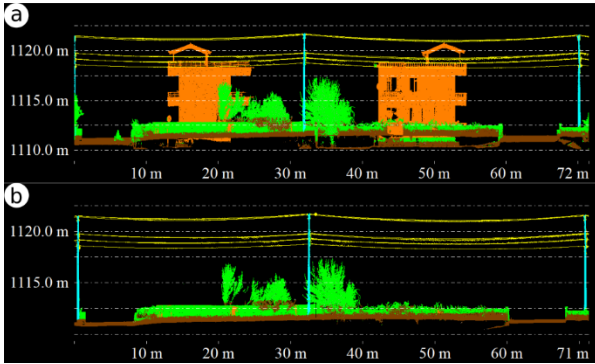
2.4. ENH Kestirimi

ENH koridoru profil kesit yöntemiyle manual olarak çıkarılmıştır. Global Mapper programı yardımıyla sınıflandırılan nokta bulutları, direk noktalarının yerlerinin tespitini kolaylaştırmıştır. Bu sayede 2.5 m genişlikte yer alan ENH güzergahı belirlenmiştir. ENH hatları ise manual olarak tespit edilen güzergah üzerinde kesit alınarak, ENH hat adayları Global Mapper yazılımında tespit edilmiştir (Şekil 7).

Hat aday noktalarının belirlenmesinden sonra tellerin tek tek sınıflandırılması ve aralarda kesinti var ise bu kesintilerin modelleme ile doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir. Bunun için mesafe temelli sınıflandırma algoritmaları bu tür sınıflandırma işlemi için uygun sonuçlar vermektedir. Gürültülü yoğunluk tabanlı konumsal kümelenmesi uygulamaları (DBSCAN) algoritması bu çalışmada ENH'lerin tekil olarak çıkarılmasında kullanılmıştır (Ester vd., 1996).



Şekil 6. Sınıflandırma işlemi, a) yer/yer üzeri sınıflandırma, b) çok sınıflı sınıflandırma işlemi



Şekil 7. ENH kestirimi, çok sınıflı sınıflandırma, a) sınıflandırılmış ham veri, b) ENH güzergahı kesiti

ENH'lerin modellenmesi için hassas bir şekilde birbirinden ayrılması ve direklerle bağlantısının olmaması önemlidir. Bu nedenle hatların sınıflandırılması ve direklerden ayrılması yüksek doğrulukla yapılması gerekir. Bunun yanında hatların yoğunluklarının düzenli olması hem DBSCAN parametrelerinin farklı çalışmalarda benzer kullanılmasını hem de sonuçların anlamlı çıkmasında etkilidir. Voksel seyreltme aşamasının katkısı yine bu noktada önemlidir.

3. HATLARIN MODELLENMESİ

İstatistiksel olarak doğrusal olmayan regresyon modelleri, en küçük kareler yöntemiyle elde edilemeyen modeller için kullanılan yöntemlerdir. Bunun yanında, doğrusal olmayan bu modeller, kestirim modellerinin doğrusal bir kombinasyonunun olmaması ya da farklı dönüşüm

yöntemleriyle ifade edilemeyen modelleri kapsamaktadır.

Doğrusal olmayan bu modeller, sayısal optimizasyon gerektirdiğinden dolayı daha zor ve hesaplama açısından daha yoğundur. Bu nedenle, standart regresyon modellerinde en son tercih edilen modeller bu modellerdir. ENH modellerinin bu tür fonksiyonlara benzemesi nedeniyle bu algoritmaların kullanılması ise zorunludur. Doğrusal olmayan ve yaygın olarak kullanılan üç farklı algoritma (polinom, spline ve GAM) burada uygulanmıştır.

3.1. Polinom regresyon

Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki, bu çalışmada da bahsedildiği üzere mutlak suretle doğrusal olması gerekmez. ENH modelleri bu modellere örnek olarak verilebilir. Yatay (X, Y) bileşenlerin artışı ile veya azalışı Z bileşenini her zaman pozitif veya negatif yönde etkilemez. Bu doğrusal olmayan modellerin geçerli olduğu pek çok alan bulunabilir.

Polinom regresyon, bir regresyon denkleminde polinom terimleri dahil etmeyi içerir (Bruce vd., 2020). Polinom regresyon, 1815'te Gergonne tarafından yazılan bir makale ile regresyonun gelişimine dayanır (Bruce vd., 2020). Aşağıdaki eşitliğe göre, Y bağımlı değişkeni ile bağımsız X değişkenleri arasındaki ikinci dereceden bir regresyon aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + e \quad (1)$$

Polinom regresyonun doğrudan ENH modellerinde kullanılabilmesi için her bir telin sınıflandırılması ve belirli bir sınıfa atanmış olması gerekmektedir.

3.2. Kübik Eğriler (Spline)

Polinom regresyon, doğrusal olmayan bir modelde yalnızca belirli bir miktarda eğrilğe sahip model üretebilir. Kübik, kuadratik polinom gibi yüksek dereceli terimlerde, genellikle regresyon denkleminde istenmeyen "dalgalanmaların" oluşmasına yol açabilir (Bruce vd., 2020). Doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde alternatif bir yaklaşım, spline'ların kullanılmasıdır. Spline'lar, sabit noktalar arasında sorunsuz bir şekilde enterpolasyon modelini kurmak için çözüm üretebilir. Bir diğer spline tanımı ise bir dizi parçalı sürekli polinom olarak değerlendirilmesidir.

Spline'ların formülasyonu, polinom regresyonundan çok daha karmaşıktır; istatistiksel yazılımlar genellikle bir spline yerleştirmenin ayrıntılarını ele alır (Bruce vd., 2020). R paketi "splines", regresyon modelinde bir *b-spline* (temel spline) terimi oluşturmak için *bs* fonksiyonunu içerir (Team, 2019). Spline fonksiyonu için iki parametrenin belirtilmesi gerekir: eğrinin derecesi

ve düğüm noktalarının (knots) konumu (Perperoglou vd., 2019). Bu durumda, tahmin edici modele kübik spline (derecesi, 3) kullanılarak dahil edilir. Varsayılan olarak, bs fonksiyonu sınırları düğüm olarak kabul eder; bu çalışmada ise düğümler (knots), alt çeyrek (lower quartile, 0.25), orta çeyreklik (median quartile, 0.5) ve üst çeyreklikler (upper quartile, 0.75) tanımlanmıştır.

3.3. Genelleştirilmiş Toplamsal Model (GAM)

Katmanlı (Toplamsal) modeller, regresyon problemleri için esnek modelleme araçları olarak sunulmaktadır (Bruce vd., 2020). Bu modeller regresyon ilişkisinin doğrusal olduğu varsayıldığı genelleştirilmiş doğrusal modeller ile regresyon ilişkisinin belirtilmemiş kaldığı rastgele ormanlar gibi daha karmaşık modeller arasında yer almaktadır (Bruce vd., 2020). Eş değişkenlerin (kovaryant) sonuçlar üzerindeki etkisini açıklayan sürekli (smooth) fonksiyonlar kolaylıkla yorumlanabilir (Şenel vd., 2014). Değişken seçimi, bu model sınıflarında teknik olarak bir sorundur; artırma (boosting) yöntemleri, bu sorunu çözmek için alternatif bir yöntemdir (Everitt & Hothorn, 2010).

Aşağıdaki denklemde gösterilen çoklu doğrusal regresyon modeli incelendiğinde, burada bağımlı değişken (y) ve bir dizi açıklayıcı değişken ($x_1 \dots x_n$) vardır, artık hatalar (ε) ve varsayılan model,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2)$$

olarak ifade edilir.

Toplam modeller, doğrusal fonksiyonun ($\beta_i x_i$) yerine pürüzsüz parametrik olmayan bir fonksiyon (g) eklenir ve aşağıdaki gibi gösterilir,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n g_i x_i + \varepsilon \quad (3)$$

burada g_i dağılım grafiği düzleştiricilerinden biri olabilir veya araştırmacının seçmesi halinde, belirli açıklayıcı değişkenler için doğrusal bir fonksiyon da olabilir (Everitt & Hothorn, 2010).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

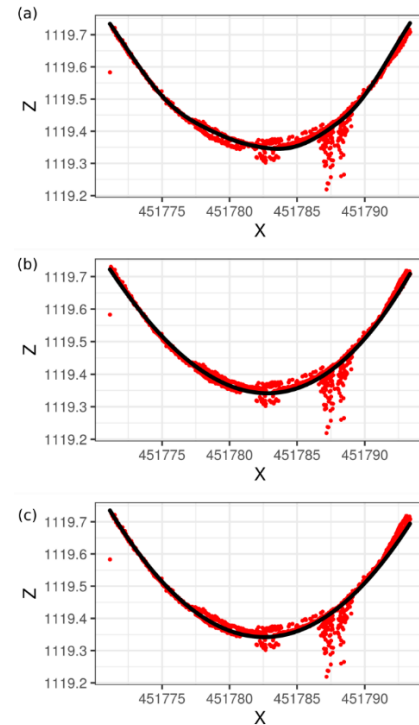
Yoğun nokta bulutu verisi üzerine yapılan analizler sonucunda ENH hatlarının kestirimi kolaylaşmış ve yoğun veriler üzerinden yüksek doğrulukta kestirimler yapılmıştır. MLT sistemi veya yüzeylerden kaynaklı doğrusal olmayan hatlar üzerindeki gürültülü noktalar temizlenerek daha iyi kestirimler yapılmıştır (Şekil 8).

Uygulanan seyreltme algoritması da bilgisayar performansını iyimser hale getirmiş, daha uzun koridor ve bölgelerin haritalandırılmasına katkıda bulunmuştur (Tablo 1).

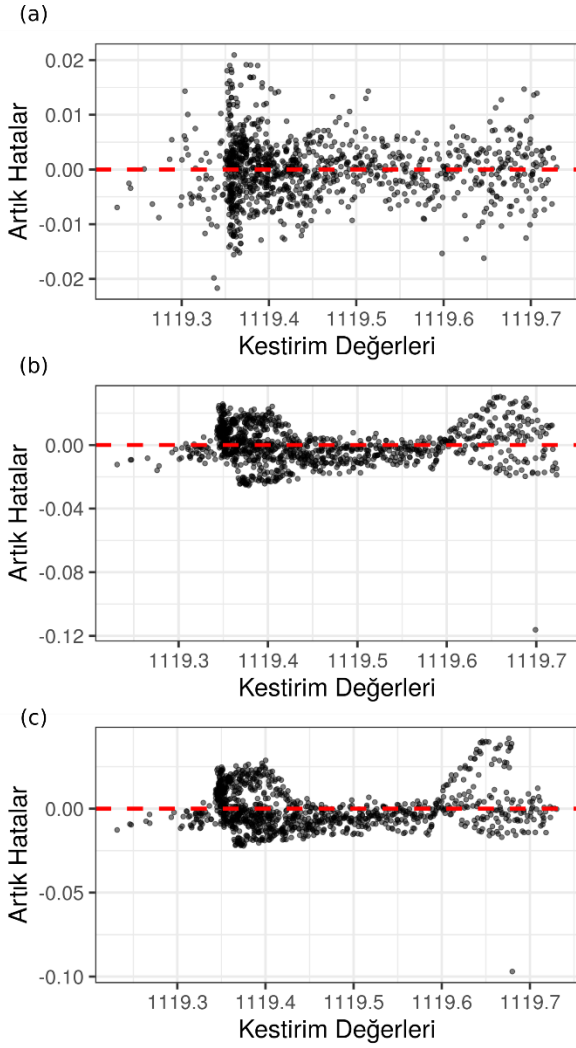
Tablo 1. Kestirim modellerinde zamansal performans (Dosya okuma/yazma ve grafik çıktılarının elde edilmesi dâhil)

Matematiksel Model	Zaman (sn)
GAM	6.46
Kübik Eğriler (Spline)	4.25
Polinomal	4.29

Uydurulan (kestirilen) modeller sonucunda elde edilen artık hatalar incelendiğinde yüksek uyumsuz ölçüler olduğu tespit edilmiştir. Bu hem atmosferik koşullar, hem de çevresel etki ve obje yapısının yansıtma özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Uygulanan modellerin gerekli olduğu buradaki sonuçlardan anlaşılmaktadır. $\pm 10-12$ cm dolaylarında maksimum seviyelerde artık hataların varlığı tespit edilmiştir. Ancak, belirli sistematik artık hatalar tespit edilmemiştir. Raslantısal artık hatalar ve lokal bazı yüksek uyumsuz noktaların varlığı gözlemlenmiştir (Şekil 9). Artık hataların yanı sıra modelin uyum seviyesi için R^2 , veri noktalarına uyan model hattı etrafındaki dağılım değerlendirilmiştir. Aynı veri seti için farklı model uygulanan, daha yüksek R^2 değerleri, gözlemlenen veriler ile uydurulan değerler arasındaki daha küçük farklılıkları temsil eder. Bu durumda üretilen modelin veri ve gözlemlerle uyumlu olduğunu gösterir. R^2 ayrıca bir modelin açıkladığı bağımlı değişken varyasyonunun yüzdesini ifade etmektedir.

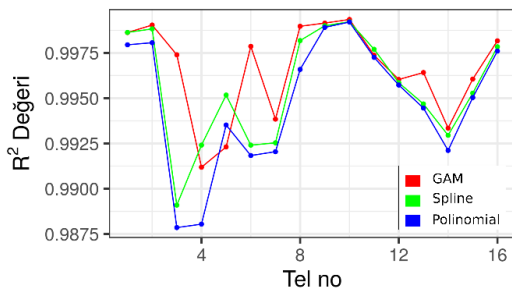


Şekil 8. Tek tel modeli kestirimi (kırmızı noktalar ölçü, siyah çizgi kestirimi ifade etmektedir.), a) GAM, b) kübik eğrisel, c) polinom (2. derece)



Şekil 9. Artık hatalar a) GAM, b) Spline, c) Polinom

Uygulanan farklı fonksiyonlara ait R^2 değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Bu grafikten de anlaşılabilir üzere 3 fonksiyon birbirine oldukça yakın R^2 değerlerine sahiptir. GAM, R^2 değerlerinin diğer fonksiyonlardan elde edilen R^2 değerlerine göre daha yüksek yüzdeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu durum GAM modellerinin ENH'leri çok iyi temsil ettiği anlamı taşımamaktadır. Yalnızca modelin gözlemlenen nokta verilerine iyi uyum sağladığı söylenebilir. Diğer fonksiyon ise spline modelinin polinomal fonksiyona göre verilere daha iyi uyum sağladığı söylenebilir.



Şekil 10. Her bir tel kestirim modelindeki R^2 uyum değeri

Sonuç olarak, ENH modellenmesinde MLT, yüksek yoğunlukta ve doğrulukta veri üretebilmiştir. Versatil bir teknoloji olarak farklı departmanlara ve kullanıcılara hizmet etme potansiyeli olan bir teknolojidir. Ancak, nokta bulutu verilerinden anlamlı bilgilerin çıkarılmasında sofistike yöntem ve algoritmaların kullanılması gereklidir. Bunun yanında tecrübeli ve kalifiyeli personelin görev alması elzemdir. Ayrıca ileri sınıflandırma tekniklerinin gerçekleştirilmesi ile sınıflandırma işlemlerinin otomatikleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın kısıtlı bölümü bu noktadır ve gelecek çalışmalarda bu modüllerin üretilmesi çalışmaları devam etmektedir. Gelecek çalışmalar arasında da noktasal seyreltme işlemlerinin etkileri ayrıca araştırılabilir. Ancak bu konuda genel görüş metrekarede 20 nokta ve üzeri LiDAR noktalarının olması yeterli görülmektedir. MLT sistemi bu konuda oldukça yeterli ve yüksek yoğunlukta veriyi üretmiştir. Ancak bu nokta bulutlarının efektif bir şekilde işlenmesi için donanım özelliklerinin de aynı oranda iyi kapasitede olması beklenir. Bu çalışmada ise eğri parametrelerinin nokta seyreltme işlemlerinin kestirim doğruluğuna etki etmediği varsayılmıştır.

Önerilen yöntemin enerji kurumlarına olumlu bir katkı ve bakış açısı sağlayacağına inanılmaktadır. Ancak sistemi oluşturan donanımların ve sonradan işleme yapılacak bilgisayar donanımlarının ilk maliyetleri oldukça yüksek olduğu reddedilemez. Ancak, bu durumun, enerji ile ilgilenen kurumların MLT teknolojisine bakış açısını olumsuz etkilememelidir.

Bu makale, MLT'nin kentsel alanlarda ENH modellerinin karmaşık yapıda sağladığı ve yoğun detay barındıran nokta bulutlarından çıkarılabilmesi için bir metod sunmaktadır.

Önerilen yöntem özellikle kentsel alanlarda enerji iletim hatlarının envanterinin oluşturulmasına, bitki örtüsü risk analizinin yapılmasına ve ENH altlarında kontrolsüz yapılaşmanın tespitine yönelik katkılar sunmuştur.

5. SONUÇLAR

Bu makalede, kentsel alanlarda bulunan enerji nakil hattı iletim koridor noktalarının MLT nokta bulutu verilerinden hızlı bir şekilde çıkarılması ve lineer olmayan modellerle kestirimi üzerine bir yapılmış bir araştırmayı içermektedir. Önerilen metodolojinin verimliliği ve doğruluğu test verisi üzerinde araştırılmıştır ve iyi uygulama sonuçlarının elde edildiği görülmüştür. Özellikle modelleme aşamasında üç farklı doğrusal olmayan yöntem incelenerek modelleme doğruluğu araştırılmıştır. Yapılan uygulama sonucunda ve analizler sayesinde burada önerilen algoritmanın aşağıdaki yönlere daha da iyileştirilmesi, geliştirilmesi ve optimize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir;

1) Uygulamada kullanılan nokta bulutu verilerinin sınıflandırılmasının daha da iyileştirilmesi için geometrik ve topolojik

algoritmaların entegre edilmesi, modelleme doğruluğunu arttırabileceği, bölgesel ENH hat noktalarının olmadığı durumlarda kestirimin iyileştirilmesi gerekmektedir,

2) ENH noktalarının düşey düzlemde izdüşümü belirli dereceden modellerle elde edilmiştir. Uzun mesafe iletim koridorundaki güç hattının nokta bulutu veya havasal LiDAR verileri için hala daha fazla analiz edilmesi gerekebilir ve bazı hataları içinde barındırabilir. Bu nedenle gelecek çalışmalarda mesafe ve nokta sayısından bağımsız sağlam (robust) yöntemlerin geliştirilmesi önemlidir. Son olarak bu çalışmada yersel herhangi bir ölçme (total station) kullanılmamıştır ve gelecek çalışmalarda model doğruluklarının araştırılması için bu ölçmelerin yapılması kestirim modellerinin mutlak doğruluk değerlendirilmesinde önem teşkil etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde arazide ölçme asistanlığını ve RIEGL VMX-450 sistemini sağlayan Koyuncu LiDAR Harita Firmasına (<http://www.lidarharita.com/>) desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada kullanılan R kodlarına ve test verisine (<https://github.com/mzeybek583/ENHR>) sayfasından erişilebilir.

KAYNAKÇA

- Arastounia M (2015). Automated Recognition of Railroad Infrastructure in Rural Areas from LIDAR Data. *Remote Sensing*, 7 (11).
- Bruce P, Bruce A & Gedeck P (2020). *Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python*: O'Reilly Media.
- Contributors P (2018). PDAL Point Data Abstraction Library. doi:10.5281/zenodo.2556738
- Demir S (2013). *Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı*: Anadolu Üniversitesi Yayını No: 2786.
- Ekercin S & Üstün B (2004). Uzaktan Algılamada Yeni Bir Teknoloji: Lidar. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 91, 34 - 38.
- Erbaş M (2016). LiDAR Verilerinden Enerji Nakil Hatlarının Otomatik Tespit Edilmesi Çalışmaları. *Harita Dergisi*, (156).
- Ester M, Kriegel H-P, Sander J & Xu X (1996). *Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise*. Paper presented at the Kdd
- Everitt B S & Hothorn T (2010). *A Handbook of Statistical Analyses Using R*: CRC.

Guan H, Yu Y, Li J, Ji Z & Zhang Q (2016). Extraction of power-transmission lines from vehicle-borne lidar data. *International Journal of Remote Sensing*, 37 (1), 229-247.

McLaughlin R A (2006). Extracting transmission lines from airborne LIDAR data. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3 (2).

Muş E (2019). Lidar Verileri Kullanılarak Enerji Nakil Hatlarının ve Hatlara Risk Oluşturan Yüksek Obje Konumlarının Otomatik Olarak Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon.

Perperoglou A, Sauerbrei W, Abrahamowicz M & Schmid M (2019). A review of spline function procedures in R. *BMC Med Res Methodol*, 19 (1), 46.

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

Sefercik U G, Karakiş S & Atalay C (2018). Yüksek Konum Doğruluklu Nokta Bulutu Sağlayan Hava Kaynaklı Lazer İHA Üretimi ve Veri Kalitesinin Değerlendirmesi. Paper presented at the VII. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2018), Eskişehir.

Sevgen E & Canaz S (2016). Elektrik Nakil Hattının Hava LiDAR Verilerinden Çıkarılması. Paper presented at the 6. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2016), Adana.

Şenel T, Cengiz M, Savaş N & Terzi Y (2014). Çoklu Doğrusal Regresyonda Model Seçiminde Genelleştirilmiş Toplamsal Modellerin Kullanımı. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2, 217 - 227.

Team R C (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Zhang R Z, Yang B S, Xiao W, Liang F X, Liu Y & Wang Z M (2019). Automatic Extraction of High-Voltage Power Transmission Objects from UAV Lidar Point Clouds. *Remote Sensing*, 11 (22).



© Author(s) 2020. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>