

# NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN ENERJİ NAKİL HATLARININ ÇIKARILMASI VE BÉZIER EĞRİLERİYLE MODELLENMESİ

Murat BAHADIR<sup>1</sup>, Fevzi KARSLI<sup>2</sup>, Mustafa DİHKAN<sup>2</sup>, Emirhan ÖZDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Öğr. Gör., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 24700, İliç, Erzincan, murat.bahadir@erzincan.edu.tr

<sup>2</sup>Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, fkarqli@ktu.edu.tr

<sup>3</sup>Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, mdihkan@ktu.edu.tr

<sup>3</sup>Öğr. Gör. Dr., Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, emirhan.ozdemir@igdir.edu.tr

## ÖZET

Endüstriyel faaliyetleri ve günlük yaşamımızı etkileyen enerji nakil hatları (ENH), modern toplumların enerji ihtiyacını kesintisiz ve güvenilir bir şekilde karşılamak amacıyla oluşturulan kritik ve önemli yapılardır. Bu hatlar yüksek voltajda elektrik iletimi sağladığı için hattın üzerinde bulunan tellerin hareketinin periyodik olarak izlenmesi ve potansiyel risklerin (bitki örtüsü, hava durumu, fırtına vb.) önlenmesi gerekmektedir. Son yıllarda, gelişen uzaktan algılama teknolojisi vasıtasıyla enerji nakil hatlarının hızlı ve etkin bir şekilde modellenmesi ve denetilmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada, Işık Algılama ve Uzaklık Ölçümü (LiDAR) ile üretilen nokta bulularından yüksek voltaj enerji taşıyan enerji nakil hatlarındaki tel ve pilonların segmentlere ayrılması ve ilgili tellerin üç boyutlu (3B) eğrilerle modellenmesi üzerine bir metodoloji geliştirilmesini amaçlanmıştır. Bu metodoloji amacınayönelik olarak öncelikle açık kaynak Dayton Annotated LiDAR Earth Scan (DALES) nokta bulutu veri setinden seçilen alt veri seti Basit Morfolojik Filtre (SMRF) algoritması ile zemin ve zemin üstü olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Ardından Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekânsal Kümelmesi (DBSCAN) algoritması yardımıyla tel ve pilon dışındaki gürültü noktaları elimine edilmiştir. Tel ve pilon noktalarının birbirinden ayrılması için genişletilmiş Minimum Sınırlayıcı Dikdörtgen (MBR) yöntemi kullanılmıştır. Çıkarılan tel noktalarının 3B olarak modellenmesi için gridleme yöntemine dayalı olarak temsili kontrol (tohum) noktaları belirlenmiş ve 3B Bézier eğrisi kullanılmıştır. Önerilen yöntem pilon ve tel noktalarının birbirinden ayrılması için alternatif bir çözüm sağlamaktadır. Önerilen yaklaşımda, Bézier eğrisi ile enerji nakil hatlarındaki bütün teller, nokta kümesi yerine tek bir eğri ile temsil edilerek gerçeğe en uygun biçimde 3B modeller üretilmiştir. Böylece, kullanımı yaygınlaşan 3B nokta bulutu verilerinden elektrik tellerinin çıkarılması, modellenmesi ve çevredeki diğer risk faktörleriyle denetiminin gerçekleştirilmesi süreçlerinde, geleneksel yöntemlere istinaden hızlı ve kolay bir çözüm sağladığı ortaya konulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Bézier eğrisi, enerji nakil hatları, LiDAR, 3B modelleme, nokta bulutu.

## ABSTRACT

### EXTRACTION OF POWER TRANSMISSION LINES FROM POINT CLOUD DATA AND MODELLING WITH BÉZIER CURVES

Power transmission lines (PTLs) are critical and essential infrastructures designed to meet the energy demands of modern societies reliably and continuously. Since these lines transmit electricity at high voltages, periodic monitoring of the movement of wires and prevention of potential risks such as vegetation growth, weather conditions, storms, and more is necessary. In recent years, with the advancement of remote sensing technologies, the rapid and efficient modeling and monitoring of power transmission lines have become an important research topic. This study aims to develop a methodology for segmenting wires and pylons from high-voltage power transmission lines in LiDAR-generated point clouds and modeling the relevant wires with three-dimensional (3D) curves. To achieve this objective, a subset of the open-source Dayton Annotated LiDAR Earth Scan (DALES) point cloud dataset was initially classified into two categories, ground and above-ground, using the Simple Morphological Filter (SMRF) algorithm. Subsequently, noise points unrelated to wires and pylons were eliminated with the assistance of the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) algorithm. The separation of wire and pylon points was achieved using the extended Minimum Bounding Rectangle (MBR) method. To model the extracted wire points in 3D, representative control (seed) points were determined based on a gridding method, and 3D Bézier curves were employed. The proposed method provides an alternative solution for distinguishing pylon and wire points. In the proposed approach, all wires in the power transmission lines were represented by a single curve rather than a point cloud, resulting in more accurate 3D models. Thus, this method demonstrates a fast and convenient solution, compared to traditional methods, for the extraction, modeling, and monitoring of electrical wires from increasingly widespread 3D point cloud data, as well as for assessing potential risks in the surrounding environment.

**Keywords:** Bézier curve, LiDAR, point cloud, power transmission lines, 3D modelling.

## 1. GİRİŞ

ENH'lar, elektrik enerjisinin üretim noktalarından tüketim alanlarına güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde taşınmasını sağlayarak modern toplumların ekonomik kalkınmasını ve günlük yaşamın sürekliliğini sağlamaktadır. Elektrik şebekeleri, ulusal ve bölgesel dağıtım düzeylerinde, ovalar, dağlar ve tepeler gibi çeşitli araziler üzerinde uzanan yoğun bir iletim altyapı sistemini içermektedir (Matikainen vd., 2016). Buhatlar, kuvvetli rüzgâr ve fırtına (Zhao vd., 2023; Shen vd., 2024) gibi şiddetli hava koşullarına maruz kaldığında, iletimi sağlayan hatların pilonlar

arasında sarkması ve yükselenbitki örtüsü ile temas etmesi sonucunda yangın riski (Ortega vd., 2019; Guan vd., 2016) oluşturabilmektedir. Bu sebepten dolayı iletim hatlarını yeniden yapılandırmak ve olası ihlalleri tespit etmek amacıyla, güç iletim hatlarının periyodik olarak izlenmesi ve denetlenmesi, kamu hizmeti sağlayan kurum ve şirketler için önem arz etmektedir (Guan vd., 2016). Elektrik iletim hatlarının güvenliğini sağlamak amacıyla, ilgili birimler her yıl hatların denetimi için önemli ölçüde insan kaynağı ve mali yatırım bütçesi ayırmaktadır (Matikainen vd., 2016; Liu vd., 2023; Hao vd., 2023). İnsan gücü ile yapılan iletim hattı kontrolü, hayati risk içermekle birlikte zaman ve iş gücü maliyetini arttırmaktadır.

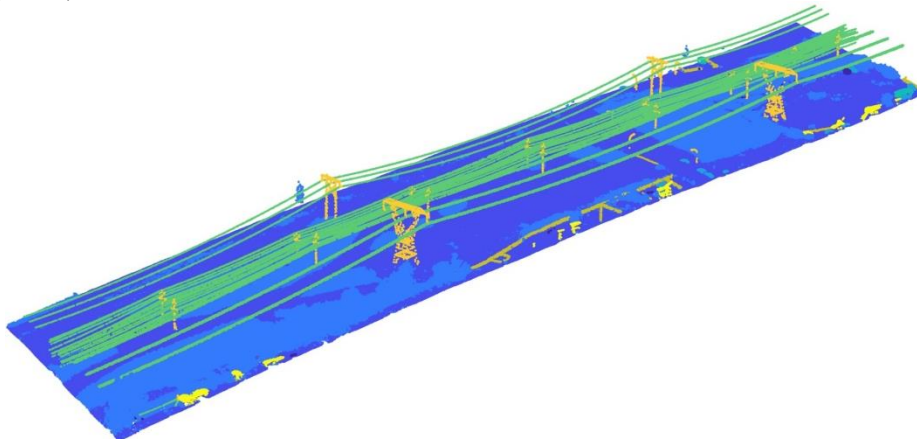
Hızlı ve kesintisiz enerji tedariki sağlamak amacıyla, gelişmiş enerji dağıtım sistemlerinin yüksek otomasyon seviyesine sahip ileri teknolojik yöntemlerle izlenmesi gerekmektedir (Li ve Guo, 2018; Dihkan ve Mus, 2021). Son yıllarda Uzaktan Algılama (UA) teknolojisinin gelişmesi ile birlikte ENH'ların kontrolü daha hızlı ve ekonomik olarak yapılmaya başlanmıştır. Enerji nakil hatlarının denetiminin yapılabilmesi için yüksek hassasiyetli konumsal bilgiye ve 3B modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için araştırmacılar en yaygın olarak LiDAR teknolojisi ile üretilmiş 3B nokta bulutu verisi kullanımını tercih etmektedir (Ortega vd., 2019). LiDAR sistemleri tarafından elde edilen nokta bulutu verileri, yüksek hassasiyet ve yoğunluklu 3B koordinat, spektral intensite, dönüş numarası, GNSS zaman bilgisi ve RGB renk değerleri gibi çok değerli öznelik bilgilerini içermektedir (Widyaningrum vd., 2020). Özellikle LiDAR nokta bulutları tarafından sağlanan üç boyutlu konumsal bilgiler, elektrik tellerinin geometrik formunu, tel ve pylon dışındaki yakın doğal veya yapay nesnelere ile konumsal ilişkisini ve söz konusu nesnelere ile temas veya yaklaşma sonucu meydana gelebilecek potansiyel riskleri belirlemeye olanak tanımaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar genellikle nakil hatlarının çıkarılması, segmentasyonu ve modellenmesine üzerine odaklanmaktadır. Enerji nakil hatlarının ve pylon yerlerinin çıkarılması için kural tabanlı (Zhou vd., 2019; Munir vd., 2021; Awrangjeb, 2019), makine öğrenmesi (Shokri vd., 2021; Kim ve Sohn, 2012) ve derin öğrenme (Zhao vd., 2023; Jameela ve Sohn, 2023) tabanlı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Ayrıca Hough Dönüşümü (HT), En Küçük Kareler Uydurma (LSF) ve Rastgele Örneklem Konsensüsü (RANSAC) gibi çeşitli algoritmalar ile enerji hatlarının doğrusal geometrik özelliklerine dayalı çıkarım yapılabilmektedir (Shen vd., 2024). Bu hatların bireysel segmentasyonunu gerçekleştirebilmek için çeşitli kümeleme algoritmaları kullanılmaktadır. Bireysel olarak elde edilen bu tellerin/hatların modellenmesi için ise genellikle zincir eğrisi olarak adlandırılan “*Catenary Curve*” eğrileri tercih edilmektedir (Ortega vd., 2019; Kyuroson vd., 2023; Guan vd., 2016; Xi vd., 2023; Jwa vd., 2012).

Bu çalışmada LiDAR nokta bulutlarından yüksek voltaj enerji taşıyan enerji nakil hatlarındaki tel ve pylonların çıkarılıp segmentlere ayrılması ve ilgili tellerin 3B eğrilerle modellenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma kapsamında tellerin segmente edilebilmesi için Gürültülü Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekânsal Kümelmesi (DBSCAN) algoritması; modellenmesi için ise temeli Bernstein polinomlarına ve de Casteljou algoritmasına dayanan Bézier Eğrisi kullanılmaktadır. Üç boyutlu olarak sayısallaştırılan tellerin, doğruluk analizini gerçekleştirebilmek için literatürde enerji nakil hatlarının modellenmesi üzerine kabul görmüş ve önemli bir referans olan Catenary Eğrisi ile karşılaştırılması yapılmış ve alternatif yeni bir enerji nakil hattı modelleme yöntemi sunulmuştur.

## 2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

Bu çalışmada veri seti olarak açık kaynaklı Dayton Annotated LiDAR Earth Scan (DALES) nokta bulutu kullanılmıştır. DALES veri seti genel olarak 10 km<sup>2</sup>'lik alan içerisinde yaklaşık yarım milyar noktadan oluşmaktadır. Enerji nakil hatlarının çıkarılması için bu veri setinden 55.337,45 m<sup>2</sup>'lik alt çalışma alanı seçilmiştir. Test bölgesinde 2.446.013 nokta bulunmakta olup, veri setinin yoğunluğu 44,20 nokta/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Çalışma alanı kırsal bir bölge olmakla birlikte yüksek ve düşük voltaj seviyesinde enerji nakil hatlarını ve çeşitli doğal/yapay nesnelere içermektedir (Şekil 1).



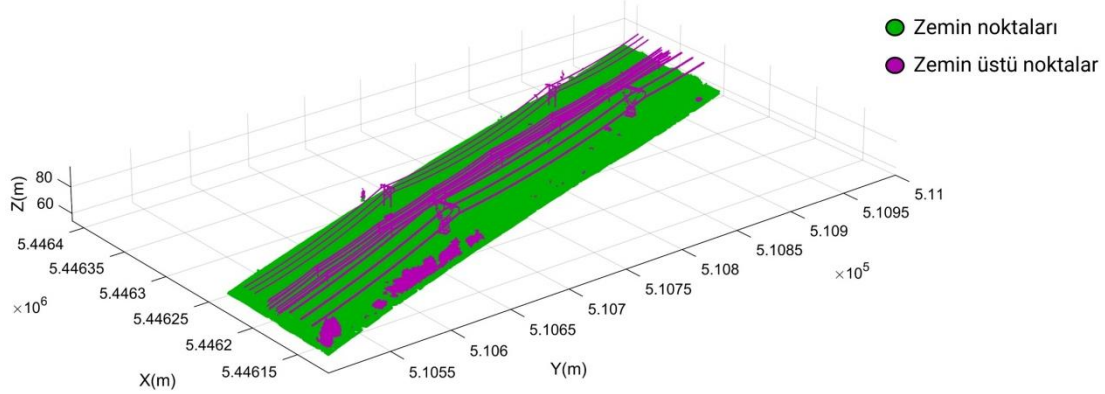
Şekil 1. Kullanılan veri seti.

### 3. YÖNTEM

Bu çalışmada, seçilen veri setindeki yüksek voltaj iletim sağlayan enerji nakil hatları üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmanın genel iş akışı, (1) zemin ve zemin üstü noktaların filtrelenmesi, (2) gürültü içerikli noktaların temizlenmesi, (3) tel ve pylon noktalarının çıkarılması, (4) tel ve pylon noktalarının segmentasyonu, (5) tel noktalarının 3B modellenmesi ve (6) doğruluk analizi olmak üzere altı adet alt başlık altında değerlendirilecektir.

#### 3.1. Zemin ve Zemin Üstü Noktaların Filtrelenmesi

Çalışmanın ön hazırlık aşaması olarak veri seti içerisindeki noktaların zemin ve zemin üstü olmak üzere iki gruba ayrılması için Basit Morfolojik Filtre (SMRF) algoritması (Pingel vd., 2013) kullanılmıştır (Şekil 2). SMRF, basit ve hesaplama açısından verimli bir algoritmadır, bu da büyük ölçekli veri setlerinde bile hızlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.



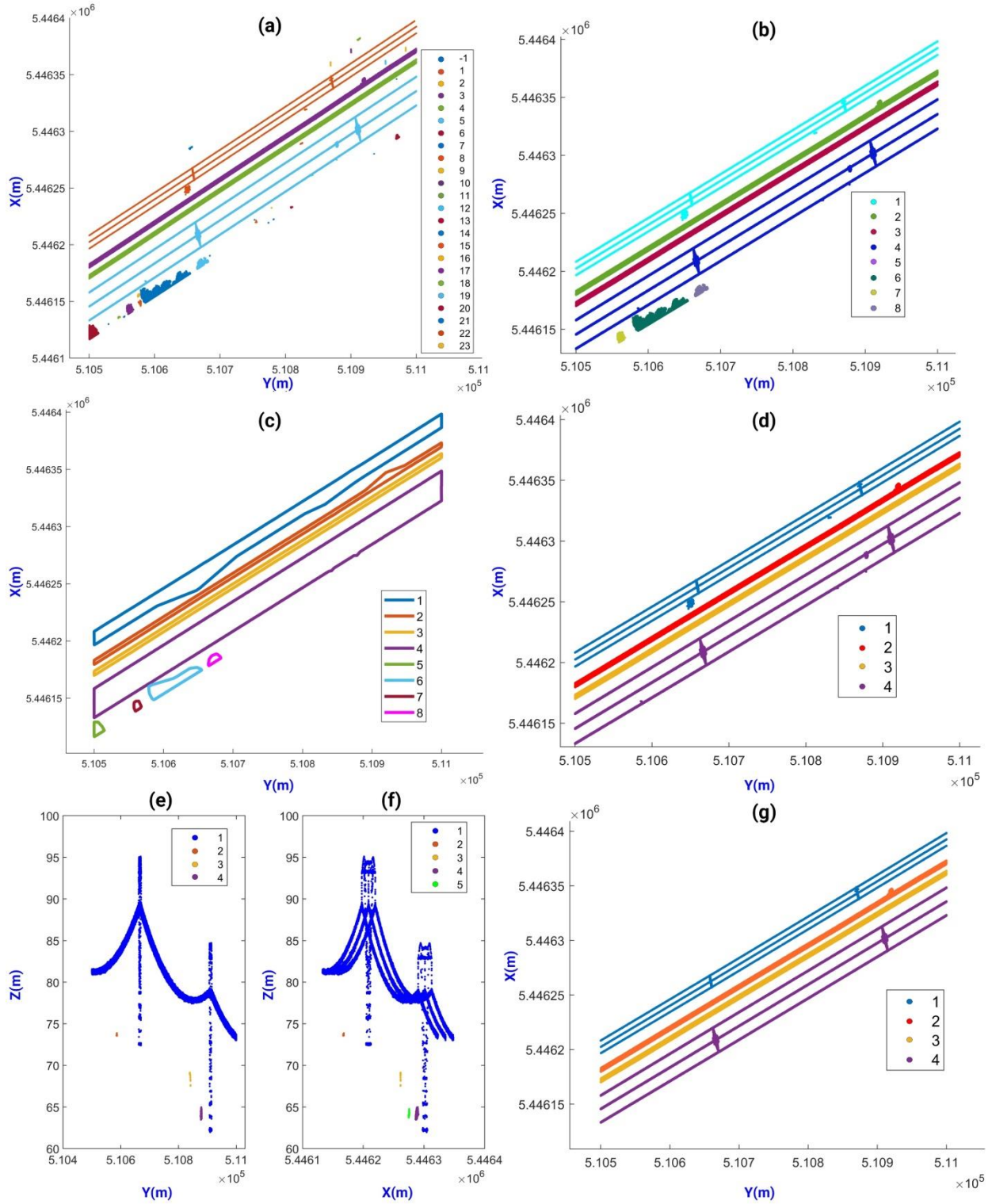
Şekil 2. SMRF algoritması ile çıkarılan zemin ve zemin üstü noktalar.

#### 3.2. Gürültü İçerikli Noktaların Temizlenmesi

Çalışmanın amacı kapsamında pylon yeri ve tel noktalarının dışındaki tüm noktalar, gürültü içerikli nokta özelliği taşımaktadır. Yöntemin hazırlık aşamasında SMRF algoritması ile bulunan zemin üstü noktalar girdi verisi olarak ele alınmaktadır. Zemin üstü noktaların içerisinde bitki örtüsü, pylon ve enerji nakil hatları yer almaktadır. Nakil hatları ve pylonların çıkarılması için çalışma alanı içerisinde yer alan diğer doğal ve yapay yer üstü objelerin kaldırılması gerekmektedir. Ayrıca kullanılan filtreleme algoritmasında kullanıcı girişi parametreler bulunduğu için bazı zemin noktalarının da zemin üstü olarak yanlış etiketlenme ihtimali bulunmaktadır.

Gürültülü noktaların kaldırılması için öncelikle XY düzleminde DBSCAN (Ester vd., 1996) kümeleme algoritması kullanılmıştır (Şekil 3). DBSCAN algoritması öncül bilgi gereksizdir, herhangi bir noktanın yoğunluk tabanlı kümelenmesini sağlamaktadır. *Epsilon*( $\epsilon$ ) ve *MinPts* isimli iki adet parametre girişi bulunmaktadır. *Epsilon*, bir noktanın etrafındaki komşu noktaları belirlemek için oluşturulacak kümenin yarıçap mesafesini temsil etmektedir. *MinPts*, bir bölgenin yoğun/küme olarak nitelendirilebilmesi için *epsilon* komşuluğunda bulunması gereken en az nokta sayısıdır. DBSCAN algoritması iki temel parametresi ile her bir nokta için çekirdek (core), sınır (border) ve gürültü (aykırı değer) nokta olmak üzere üç tür etiket atayarak kümelemeyi gerçekleştirir. Uygulama aşamasında *Epsilon* ve *MinPts* parametreleri sırasıyla 2 ve 10 olarak seçilmiştir.

Şekil 3a'da görüldüğü üzere DBSCAN kümelemesi sonucu 23 adet küme oluşmaktadır. Oluşturulan bu kümelerin içinde nokta sayısı 1000'den küçük olan kümeler seçilerek kabaca gürültülü noktalar giderilmeye çalışılmıştır (Şekil 3b). Daha sonra bu kümelerdeki noktalardan bir dış sınır geçirilerek her bir kümenin çevresi hesaplanmıştır (Şekil 3c). Sekiz adet kümenin dış sınırı için ortalama mesafe eşiği belirlenmiş ve bu değerden büyük olanlar seçilmiştir (Şekil 3d). Bu aşama ile birlikte enerji nakil hatlarının çıkarılması için gürültülü noktaların büyük ölçüde temizlendiği gözlemlenmektedir. Fakat XY düzleminde yapılan işlemler düşey yönde oluşabilecek gürültüler için yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu sebepten dolayı elde edilen nihai nokta kümeleri YZ (Şekil 3e) ve XZ (Şekil 3f) düzleminde tekrardan DBSCAN algoritmasına tabi tutulmuştur. Düzlemlerin oluşturduğu nokta kümelerinde, en yüksek nokta sayısını içeren ilgili kümelerin enerji nakil hatlarını ve pylon yerlerini temsil eden noktalar olabileceği değerlendirilmiştir. Bunun dışındaki kümeler düşey yöndeki gürültülü kümeler olarak nitelendirilerek nokta bulutundan kaldırılmıştır. Tüm bu gürültü giderme yöntemleri uygulandıktan sonra enerji nakil hattını temsil eden pylon ve tel noktaları elde edilmiştir (Şekil 3g).

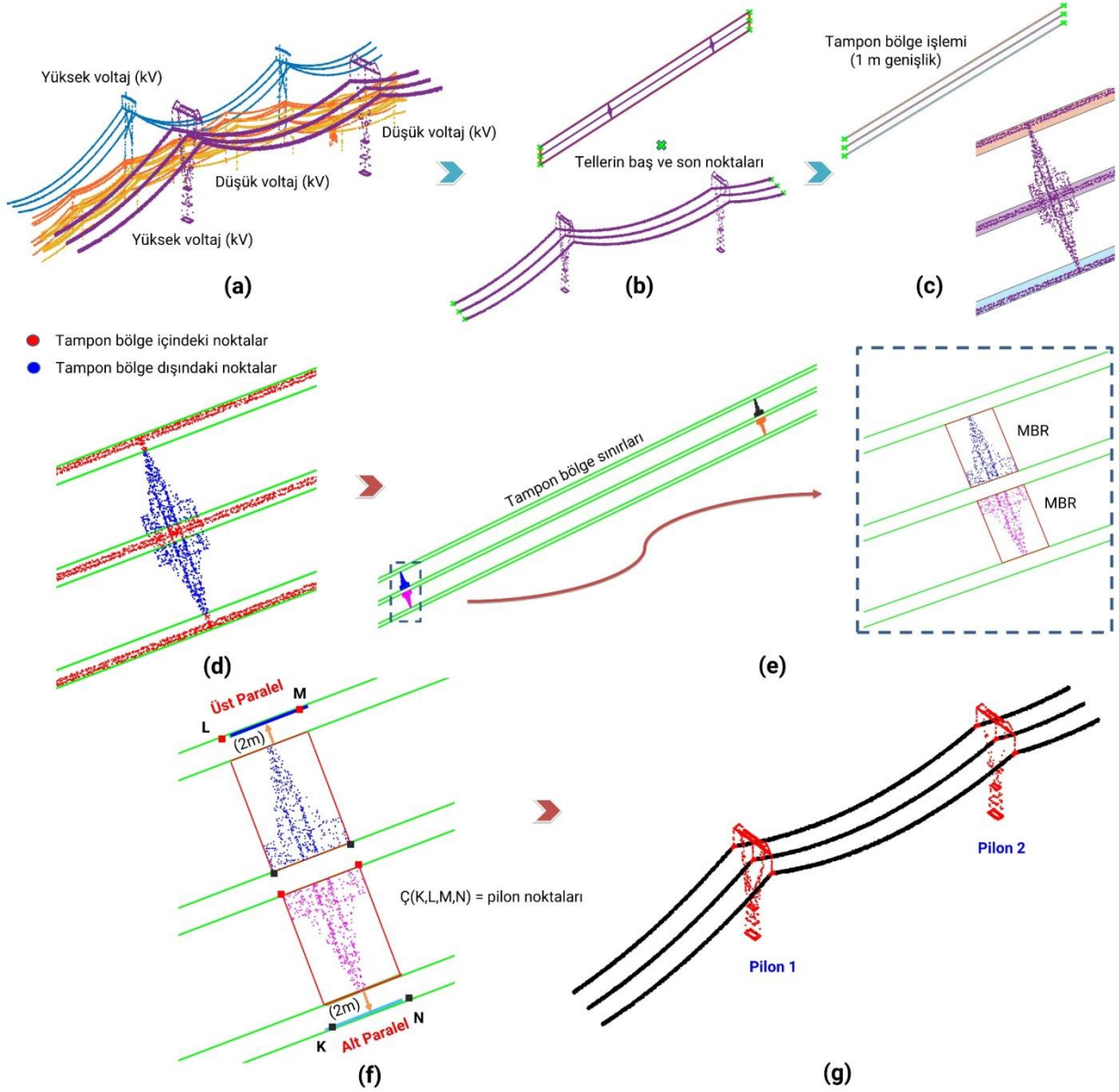


**Şekil 3.** Gürültülü özellikli noktaların temizlenmesi: a) XY düzleminde DBSCAN uygulaması, b) nokta sayısı 1000'den büyük olan kümeler, c) kümelerin dış sınırını çıkarma, d) dış sınırı ortalama çevre eşiği mesafesinden büyük olan kümeler, e) YZ düzleminde gürültülerin tespiti, f) XZ düzleminde gürültülerin tespiti ve g) nihai temizlenmiş nokta kümesi.

### 3.3. Tel ve Pilon Noktalarının Çıkarılması

Çalışma kapsamında yüksek voltaj enerji taşıyan nakil hatlarının çıkarılması hedeflendiği için bundan sonraki işlemler Şekil 3g'de gösterilen 1 ve 4 numaralı nakil hatları üzerinden uygulanacaktır. Tel ve pylon noktalarının çıkarılması için öncelikle XY düzlemi üzerinden bir sınır geçirilir. Ardışık sınır noktaları arasındaki mesafe değerlerinde yüksek sapma yapan noktalar enerji nakil hattı için telin baş ve son noktalarını temsil etmektedir (Şekil 4b). Telin baş ve son noktaları arasında 1 m genişliğinde çizgi tabanlı buffer (tampon bölge) geçirilmiştir (Şekil 4c). Ardından tampon bölge

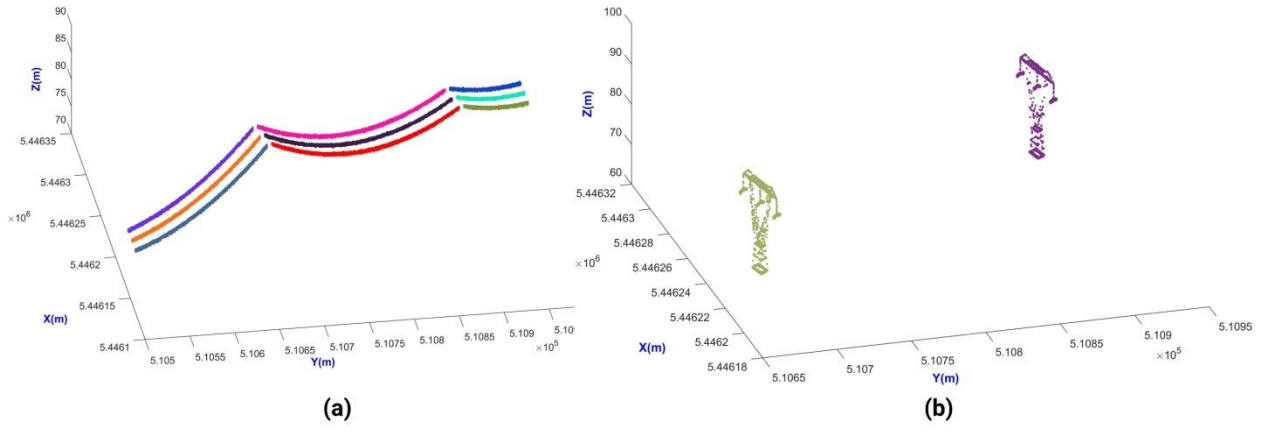
içinde ve dışında kalan noktalar tespit edilmiştir (Şekil 4d). Tampon bölge dışındaki noktalardan Minimum Sınırlayıcı Dikdörtgen (MBR) algoritması ile nokta kümesini çevreleyen en küçük dörtgenler oluşturulmuştur (Şekil 4e). Çizdirilen dörtgenlerin kısa kenarları otomatik tespit edilerek alt ve üst bölgesine 2 m aralıklarla paralel doğrular üretilmiştir (Şekil 4f). Paralel doğruların MBR ile çizilen dörtgenlerin uzun kenarları ile arasındaki kesişim noktaları hesaplanarak (örnek: K, L, M, N noktaları) pylon yerine ait nokta kümesi tespit edilmiştir (Şekil 4g). Kesişim noktalarının oluşturduğu alanın dışında kalan noktalar ise enerji nakil hattındaki tel noktalarını temsil etmektedir.



**Şekil 4.** Tel ve pylon noktalarının çıkarılması: a) gürültüsü temizlenmiş 3B nokta kümesi, b) nakil hattının ve baş ve son noktasının tespiti, c) tampon bölge, d) bölge içindeki ve dışındaki noktaların tespiti, e) MBR ile en küçük alanı veren dörtgenlerin oluşumu, f) pylon yerlerinin çıkarma yöntemi ve g) pylon ve tel noktalarının tespiti.

### 3.4. Tel ve Pylon Noktalarının Segmentasyonu

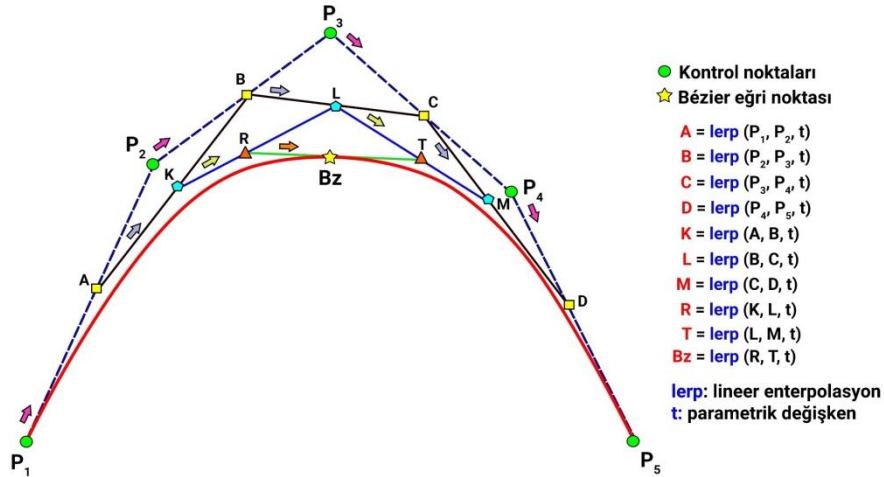
Çıkarılan tel ve pylon noktalarının bireysel segmentasyonu için XY düzleminde DBSCAN algoritması kullanılmıştır. *Epsilon* ve *Minpts* parametresi sırasıyla 2 ve 5 olarak seçilmiştir. Çıkarılan pylon ve tel noktaları bir önceki aşamada iki sınıfa ayrıldığı için segmentasyon işlemi için her sınıf kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Uygulama kapsamında gerçekleştirilen segmentasyon yönteminin 3B ürünü Şekil 5'te gösterilmektedir. Segmentasyon yapılarak enerji nakil hatlarını oluşturan her bir tel ve pylonun bireysel olarak kümelenmesi sağlanmıştır.



Şekil 5. Tel ve pilon noktalarının segmentasyonu: a) tel segmentasyonu, b) pilon segmentasyonu.

### 3.5. Tel Noktalarının Üç Boyutlu Modellenmesi

Çıkarılan enerji nakil hatlarının nokta kümesi yerine ideal bir yapıda temsil edilebilmesi için 3B eğri geçirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tellerin modellenmesi için 1959'da Paul de Casteljaou tarafından ortaya çıkarılan ve Pierre Bézier tarafından geliştirilen Bézier eğrileri kullanılmıştır (Riškus, 2006). Bézier eğrileri, kontrol noktaları vasıtasıyla doğrusal enterpolasyon sonucu oluşmaktadır (Şekil 6). Bézier eğrilerinin koordinatları, temeli binom açılımına dayanan Bernstein polinomu ve De Casteljaou algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır. Bernstein polinomunun  $n$  dereceli genel formu ise (1), (2) ve (3) numaralı denklemlerde gösterilmektedir (Baydas ve Karakas, 2019).



Şekil 6. Bézier eğrisinin çalışma prensibi.

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad 0 \leq t \leq 1(1)$$

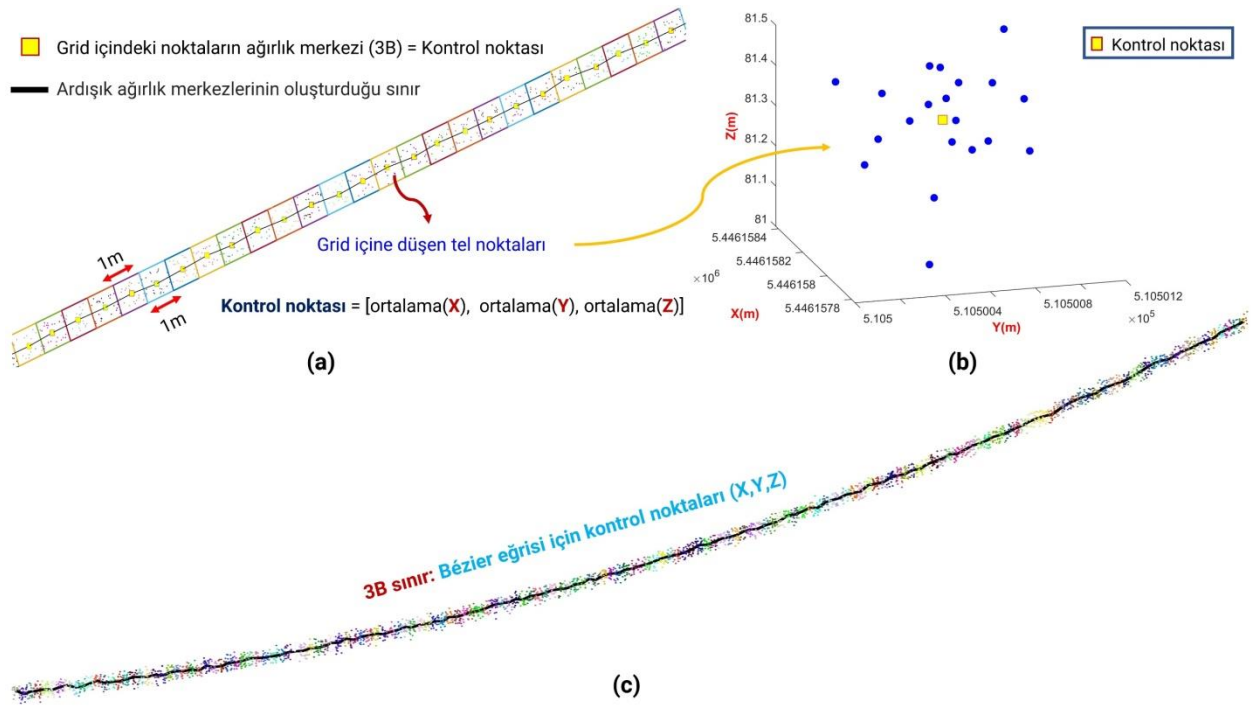
$$B_n(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t)(2)$$

$$\text{burada } B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$$

$$Bz(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} P_i \quad 0 \leq t \leq 1(3)$$

burada  $P_i$ , Bézier eğrisinin kontrol noktalarıdır.

Bézier eğrisinin oluşumu iç içe geçmiş doğrusal/lineer enterpolasyonlara bağlıdır. Her bir  $t$  değeri  $[0,1]$  için başlangıç ve bitiş kontrol noktaları arasından eğri üzerindeki noktaların koordinatları elde edilmektedir. Çalışma kapsamında bézier eğrisinin oluşturulması için öncelikle ardışık olarak kontrol noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple ilk olarak çıkarılıp segmente edilen tel noktaları MBR algoritması ile dörtgenlerle çevrilmiştir. Bu dörtgen kullanılarak tel noktaları 1m aralıklarla ardışık bir biçimde gridlere bölünmüştür. Grid içine düşen noktalar tespit edilip bu noktaların 3B koordinatları dikkate alınarak ağırlık merkezleri hesaplanmıştır. Tel güzergahı boyunca oluşturulan her bir grid için bir adet kontrol noktası oluşturulmaktadır (Şekil 7). Bu şekilde her tel için kendi nokta yoğunluğuna ve dağılımına göre temsili kontrol noktaları elde edilmiştir. Bu noktaların X, Y ve Z koordinatları girdi verisi olarak kullanılarak enerji nakil hatlarının modellenmesi sağlanmıştır.



Şekil 7. Bézier eğrisi için kontrol noktalarının seçimi: a) MBR ile tel güzergahı boyunca oluşturulan gridler, b) grid içindeki noktaların 3B ağırlık merkezinin hesaplanması ve c) Bézier için seçilen kontrol noktalarının 3B modeli.

### 3.6. Doğruluk Analizi

Çalışmada uygulanan metodolojinin enerji nakil hatlarını çıkarım ve 3B modelleme performansını değerlendirmek için obje/nesne tabanlı doğruluk analizi uygulanmıştır. İlave olarak elde edilen modelleme sonuçları arasındaki benzerliği test edebilmek için *Chamfer distance* ve *Hausdorff distance* metrikleri kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan DALES nokta bulutu veri seti, sınıflandırılmış veri seti olduğu için ENH çıkarım performansını değerlendirirken referans veri hazır bulunmaktadır. Önerilen yöntemde tellerin modellenmesini değerlendirirken literatürde yaygın olarak kullanılan zincir eğrisi (catenary curve) ile performansları test edilmiştir. Nesne tabanlı doğruluk değerlendirmesi için Completeness (Cp), Correctness (Cr), Quality (Q), ve F-skor (F1) metrikleri kullanılmıştır. Bu ölçütlerin formülleri (4) ile (7) numara arasındaki eşitliklerde verilmektedir. *Chamfer distance* ve *Hausdorff distance* benzerlik ölçütlerinin genel formu ise (8) ve (9) numaralı eşitliklerde sunulmaktadır.

$$Cp = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$Cr = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

$$Q = \frac{TP}{TP + FN + FP} \quad (6)$$

$$F1 = \frac{2 \times Cp \times Cr}{Cp + Cr} \quad (7)$$

**Chamfer distance (CD):** Chamfer mesafesi, iki nokta bulutu arasındaki geometrik yakınlığı ve benzerliği ölçer. Chamfer mesafesi, her bir noktadan diğer noktaya olan en kısa mesafeyi bulur ve tüm bu mesafelerin ortalama değerlerinin toplamını hesaplar. Örneğin, iki nokta bulutu (P ve G) arasındaki CD metriği (8) numaralı eşitlikteki gibi tanımlanır. P ve G nokta bulutu için çift yönlü olarak (P→G ve G→P) en yakın noktanın mesafelerinin ortalama değerleri toplanarak benzerlik değeri hesaplanır. Eğer Chamfer mesafesi küçükse, bu iki nokta kümesinin birbirine çok yakın olduğu anlamına gelmektedir.

$$d_{CD}(P, G) = \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} \min_{g \in G} \|p - g\| + \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \min_{p \in P} \|g - p\| \quad (8)$$

**Hausdorff distance (HD):** İki nokta bulutu arasındaki benzerliği ölçer ve özellikle doğruluk ve hassasiyetin önemli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Hausdorff mesafesi bir kümedeki noktanın karşılaştırılmak istenen diğer kümedeki en yakın noktaya olan maksimum mesafeleri ele almaktadır. HD metriğini hesaplamak için yine çift yönlü işlem (P→G ve G→P) yapılır. İki yönlü bulunan mesafe değerlerinden maksimum olanı HD metriğini temsil etmektedir. HD değeri küçükse, iki veri kümesi birbirine geometrik olarak daha çok benzediği anlamına gelmektedir.

$$d_{HD}(P, G) = \max(\max_{p \in P} \min_{g \in G} \|p - g\|, \max_{g \in G} \min_{p \in P} \|g - p\|) \quad (9)$$

Genel olarak hausdorff mesafesi (HD), iki nokta kümesi arasındaki en uzak noktalara odaklanır, aykırı değerlere karşı duyarlıdır ve maksimum mesafeyi hesaplar. Bu özellikleriyle, en kötü durum analizleri için uygundur ve küme çiftleri arasındaki büyük sapmaları yakalamada etkilidir. Öte yandan, Chamfer mesafesi (CD) ortalama mesafeyi dikkate alır, aykırı değerlere karşı daha dayanıklıdır ve kümeler arasındaki genel benzerliği ölçer. Bu nedenle, daha dengeli ve ortalama temelli karşılaştırmalar için tercih edilir.

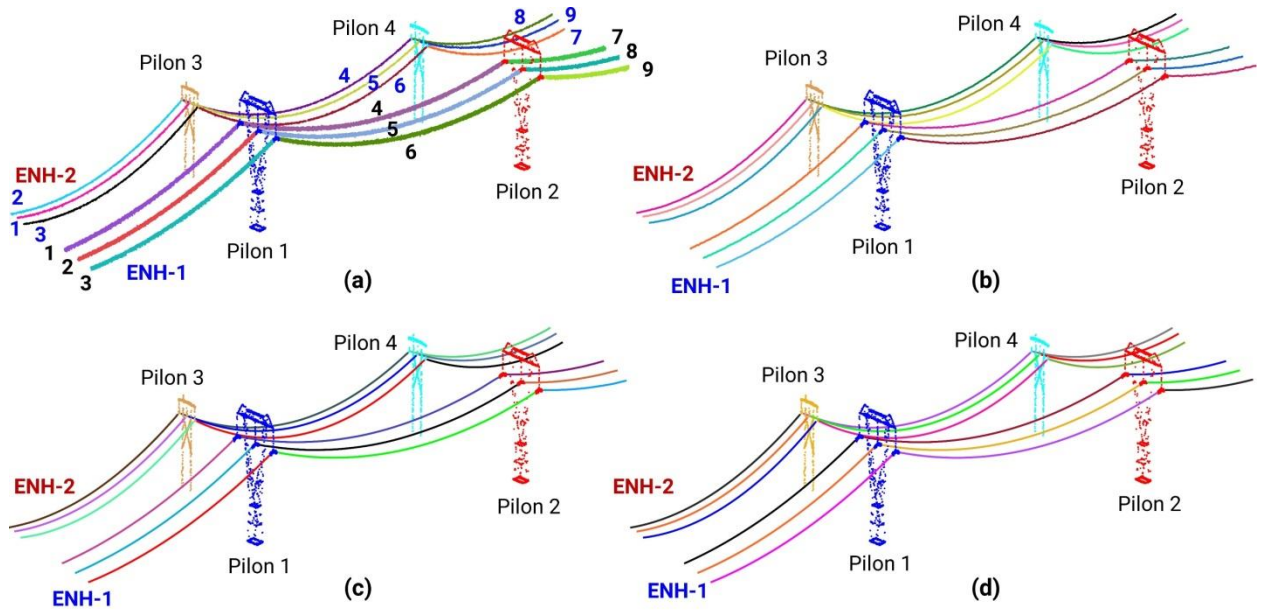
#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada DALES veri seti içerisinde seçilen yüksek voltaj enerji taşıyan enerji nakil hatlarının çıkarımı, segmentasyonu ve üç boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). İlave olarak nakil hatlarının modellenmesi için önerilen Bézier Eğrisi, literatürdeki köprü kabloları ve elektrik hatları gibi yapılar için yaygın olarak kullanılan Zincir Eğrisi (catenary curve) ile karşılaştırılmıştır. Catenary, iki ucu sabit bir noktadan asılı olan bir telin davranışını temsil eden ideal eğridir. Bu eğrinin denklemi ilk olarak 1691 yılında Huygens tarafından ifade edilmiştir (Ortega vd., 2019). Catenary Eğrisi'nin genel formu (10) numaralı eşitlikte verilmektedir.

$$y(x) = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (10)$$

Burada  $y(x)$ , eğrinin  $x$  konumundaki dikey yüksekliği;  $a$  parametresi ise Catenary parametresi olup telin gerilimini ve şeklini belirleyen sabiti ifade etmektedir.

Denklemden  $a$  parametresi telin yatay gerilimini ve birim uzunluk başına düşen ağırlığı içerir ve bu değer bilinmediği için en küçük kareler yöntemine dayalı bir optimizasyon ile gerçek verilerle uyumlu hale getirilmiştir. Catenary Eğrisi ile 3B enerji nakil hattı oluşturabilmek için Bézier Eğrisi'nde olduğu gibi yine üretilen gridler içerisinde elde edilen kontrol noktaları, girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca modelleme için catenary eğrisi XZ ve YZ düzleminde iki kez uygulanarak üç boyutlu eğri noktaları hesaplanmıştır. Bütün elektrik telleri için hem önerilen bézier, hem de karşılaştırma için kullanılan catenary eğrisi için eğri üzerinde 100 adet nokta üretilmiştir. Uygulama kapsamında elde edilen görsel sonuçlar aşamalı bir biçimde Şekil 8'de sunulmaktadır. Önerilen yöntemin çıkarım ve modelleme performansı nicel olarak Çizelge 1, 2 ve 3'te paylaşılmaktadır.



**Şekil 8.** Önerilen yöntemin aşamalı sonuçları ve karşılaştırması: a) Segmente edilen nokta kümesi, b) eğri geçirmek için seçilen kontrol noktaları, c) Bézier Eğrisi ile tellerin 3B modellenmesi ve d) Zincir Eğrisi (catenary curve) ile 3B modelleme.

Çizelge 1'de yer alan metrikler için referans olarak etiketlenilmiş veri kullanılmıştır. Önerilen ENH çıkarım yönteminin çıkarım performansları dikkate alındığında nakil hatlarında %99'luk bir başarı sergilendiği görülmektedir. Fakat ENH çıkarım öncesinde kullanılan SMRF algoritmasında yükseklik eşiği parametresinin seçiminden kaynaklı zemine yakın pylon noktalarının eksikliği görülmektedir. Bu durum pylon çıkarım doğruluğunu %91 seviyelerine kadar düşürmektedir. CD ve HD mesafeleri dikkate alındığı yine tel noktalarının çıkarım doğruluğu, pylon noktalarına göre daha iyi olduğu görülmektedir.

**Çizelge 1.**Pilon ve tel noktalarını çıkarım performansı.

ID	Cp (%)	Cr (%)	Q(%)	F-skor (%)	CD	HD
ENH-1	97,15	99,99	98,55	98,55	0,0342	4,1100
ENH-2	99,86	99,87	99,86	99,86	0,0009	0,6829
<b>Ortalama</b>	98,51	99,93	99,20	99,21	0,0175	2,3964
Pilon 1	97,92	78,48	87,12	87,13	0,4220	4,2795
Pilon 2	92,91	78,07	84,84	84,85	0,5597	4,4271
Pilon 3	93,40	99,87	96,53	96,53	0,1436	4,6465
Pilon 4	99,34	98,99	96,61	99,16	0,1151	3,3467
<b>Ortalama</b>	95,89	88,85	91,28	91,92	0,3101	4,1749

**Çizelge 2.**Enerji nakil hattı 3B modelleme performansının değerlendirilmesi.

ID	Yöntem	Cp (%)	Cr (%)	Q(%)	F-skor (%)	CD	HD
ENH-1	Bézier	97,36	100	98,33	98,66	0,7647	1,3003
ENH-2	Bézier	98,86	100	99,27	99,43	0,7290	1,1688
<b>Ortalama</b>		98,11	100	98,80	99,04	0,7468	1,2345
ENH-1	Catenary	97,42	100	98,37	98,69	0,7722	1,2830
ENH-2	Catenary	98,54	99,89	99,03	99,21	0,7275	1,1373
<b>Ortalama</b>		97,98	99,95	98,70	98,95	0,7498	1,2101

Çizelge 2’de yer alan metrikler için referans olarak Bézier ve CatenaryEğrisi için girdi kabul edilen kontrol noktalarının oluşturduğu 3B sınır ele alınmaktadır (Şekil 8b). Nicel sonuçlardan görüldüğü üzere önerilen BézierEğrisi, literatürde kabul görmüş catenary eğrisine göre yaklaşık %0,10’luk bir iyileştirme sağladığı değerlendirilmektedir. CD ve HD benzerlik ölçütü metrikleri sonuçlarına göre her iki yöntem de referans veriye göre benzer geometrik ilişkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir. CD ve HD mesafelerinin sıfırdan çok uzaklaşmasının ana sebebi ise referans verideki nokta sayısı ile uygulama sonucu üretilen eğri üzerindeki nokta sayısının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 3.**3B BézierEğrisi ile ZincirEğrisi’nin (CatenaryEğrisi) benzerlik ölçütü.

ENH-1			ENH-2		
ID	CD	HD	ID	CD	HD
1	0,0712	0,0688	1	0,1462	0,2033
2	0,1044	0,1002	2	0,1641	0,1844
3	0,0857	0,0687	3	0,0951	0,0949
4	0,0795	0,0839	4	0,4339	0,4761
5	0,1108	0,1145	5	0,0855	0,1127
6	0,0702	0,0860	6	0,6524	0,8360
7	0,1912	0,1638	7	0,5469	0,6829
8	0,1327	0,0792	8	0,1403	0,1101
9	0,1463	0,1126	9	0,1633	0,1406
<b>Ortalama</b>	0,1102	0,0975	<b>Ortalama</b>	0,2697	0,3157

Çizelge 3’te referans olarak CatenaryEğrisi ile üretilen eğri noktaları ele alınmıştır. Her iki eğri geçirme yöntemi için eşit sayıda nokta (100 adet) üretildiği için CD ve HD mesafe değerleri sıfıra daha çok yaklaştığı görülmektedir. Bézier Eğrisi ile CatenaryEğrisi’nin benzerlikleri karşılaştırıldıklarında ENH-1’in ENH-2’ye göre daha yüksek geometrik benzerlik gösterdiği değerlendirilmiştir. Genel olarak önerilen yöntem, literatürde kabul görmüş enerji nakil hattı modelleme yöntemine göre alternatif bir çözüm olanağı sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda farklı türdeki enerji nakil hatlarının çıkarımı ve modellenmesi üzerine yoğunlaşılması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Awrangjeb, M.** (2019). Extraction of power line pylons and wires using airborne lidar data at different height levels. *Remote Sensing*, 11(15), 1798.
- Baydas, S., & Karakas, B.** (2019). Defining a curve as a Bezier curve. *Journal of Taibah University for Science*, 13(1), 522-528.
- Dihkan, M., & Mus, E.** (2021). Automatic detection of power transmission lines and risky object locations using UAV LiDAR data. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-13.
- Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X.** (1996, August). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd* (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).

- 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.
- Hao, J., Li, X., Wu, H., Yang, K., Zeng, Y., Wang, Y., & Pan, Y.** (2023). Extraction and analysis of tree canopy height information in high-voltage transmission-line corridors by using integrated optical remote sensing and LiDAR. *Geodesy and Geodynamics*, 14(3), 292-303.
- Jameela, M., & Sohn, G.** (2023). PAN-SUNET: UTILITY CORRIDOR UNDERSTANDING USING SPATIAL LAYOUT CONSISTENCY. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 129-136.
- Jwa, Y., & Sohn, G.** (2012). A piecewise catenary curve model growing for 3D power line reconstruction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(12), 1227-1240.
- Kim, H. B., & Sohn, G.** (2012). Random forests based multiple classifier system for power-line scene classification. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 253-258.
- Kyuroson, A., Koval, A., & Nikolakopoulos, G.** (2023). Autonomous Point Cloud Segmentation for Power Lines Inspection in Smart Grid. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 11754-11761.
- Liu, J., Wang, S., Zhu, Q., Zhao, C., Zhang, G., Zhao, Z., & Lu, X.** (2023). Overhead transmission line condition assessment based on intention classification and slot filling using optimized BERT model. *Energy Reports*, 9, 838-846.
- Liu, Y., Zhao, X., Jiao, Y., Yang, X., & Xu, H.** (2023). Method for real-time reconstruction of a transmission line based on the LiDAR point cloud data of a partial line segment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103180.
- Li, X., & Guo, Y.** (2018, July). Application of LiDAR technology in power line inspection. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 382, No. 5, p. 052025). IOP Publishing.
- Matikainen, L., Lehtomäki, M., Ahokas, E., Hyypä, J., Karjalainen, M., Jaakkola, A., ... & Heinonen, T.** (2016). Remote sensing methods for power line corridor surveys. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 119, 10-31.
- Munir, N., Awrangjeb, M., & Stantic, B.** (2021, November). Extraction of forest power lines from LiDAR point cloud data. In *2021 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)* (pp. 01-06). IEEE.
- Ortega, S., Trujillo, A., Santana, J. M., Suárez, J. P., & Santana, J.** (2019). Characterization and modeling of power line corridor elements from LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 24-33.
- Pingel, T. J., Clarke, K. C., & McBride, W. A.** (2013). An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 77, 21-30.
- Riškus, A.** (2006). Approximation of a cubic Bézier curve by circular arcs and vice versa. *Information Technology and control*, 35(4).
- Shen, Y., Huang, J., Wang, J., Jiang, J., Li, J., & Ferreira, V.** (2024). A review and future directions of techniques for extracting powerlines and pylons from LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104056.
- Shokri, D., Rastiveis, H., Sheikholeslami, S. M., Shahhoseini, R., & Li, J.** (2021). Fast extraction of power lines from mobile LiDAR point clouds based on SVM classification in non-urban area. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 5(2), 63-73.
- Widyaningrum, E., Fajari, M. K., Lindenbergh, R. C., & Hahn, M.** (2020). Tailored features for semantic segmentation with a DGCNN using free training samples of a colored airborne point cloud. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 339-346.
- Xi, S., Zhang, Z., Niu, Y., Li, H., & Zhang, Q.** (2023). Power Line Extraction and Tree Risk Detection Based on Airborne LiDAR. *Sensors*, 23(19), 8233.
- Zhao, W., Dong, Q., & Zuo, Z.** (2023). A point cloud segmentation method for power lines and towers based on a combination of multiscale density features and point-based deep learning. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 620-644.
- Zhou, M., Li, K. Y., Wang, J. H., Li, C. R., Teng, G. E., Ma, L., ... & Chen, L. S.** (2019). Automatic extraction of power lines from UAV lidar point clouds using a novel spatial feature. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 227-234.