



## Demiryolu Elektrifikasyonunda Katener Sistem Tasarımı

Şule KUŞDOĞAN<sup>\*1</sup>, Ömür DOĞRUEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup> TCDD 1. Bölge Müdürlüğü, Demiryolu Modernizasyon Müdürlüğü, İstanbul, Türkiye

\*kusdogan@kocaeli.edu.tr

(Alınış/Received: 30.01.2021, Kabul/Accepted: 22.06.2021, Yayımlama/Published: 31.07.2021)

**Öz:** Kentlerde oluşan hızlı nüfus artışı hareketliliğin de artmasına neden olmuştur. Hareketliliğin sağlanması için insanların ve insanlara ait yüklerin taşınması çeşitli ulaşım araçlarıyla yapılmaktadır. Gerek şehir içi gerekse şehirlerarası ulaşımında raylı sistemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüz modern demiryolu hatlarında hem ucuz hem de çevreye duyarlılığı nedeni ile elektrikli demiryolu hatları tercih edilmektedir. Bir demiryolu hattından elektrikli tren geçebilmesi için mevcut hattın elektrifikasyon sistemleriyle donatılmış olması gerekmektedir. Demiryolu hattının elektrifikasyon sistemlerinin yapım maliyeti yüksektir. Buna rağmen günümüz teknolojinde enerjiye olan ihtiyaç ve elektrikli trenlerdeki yakıt tasarrufu göz önüne alındığında elektrifikasyon sistemlerinin uygulanabilir bir yöntem olduğu görülmektedir. Bu çalışmada şehirlerarası ulaşımında tercih edilen 25 kV AC 50 Hz elektrifikasyon sistemleri detaylı olarak incelenmiş ve bu sisteme ait tasarım aşamaları ve yöntemleri ortaya konulmuştur. TCDD'ye ait 42,46 kilometrelik hızlı tren hattı ( $V_{max}=200$  km/h) ile 29,22 kilometrelik konvansiyonel hattın ( $V_{max}=120$  km/h) tasarımı yapılmış, tasarım hızları farklı olan bu hatların yapım maliyetleri çıkartılarak analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Elektrifikasyon sistemi, Elektrikli demiryolu hatları, Katener sistemi

### Design of Catenary System in Railway Electrification

**Abstract:** The rapid population growth in cities has also increased the mobility. In order to ensure mobility, the transportation of people and their cargo is carried out by various means of transportation. The importance of rail systems in urban and intercity transportation is increasing day by day. In today's modern railway lines, electric railway lines are preferred because of their cheap and environmental sensitivity. In order for an electric train to pass through a railway line, the existing line must be equipped with electrification systems. The cost of the electrification systems of the railway line is high. However, considering the need for energy and fuel saving in electric trains in today's technology, it is seen that electrification systems are a viable method. In this study, 25 kV AC 50 Hz electrification systems which are preferred in intercity transportation have been examined in detail and the design stages and methods of this system have been presented. The 29.22-kilometer conventional line ( $V_{max}=120$  km/h) were designed with the 42.46-kilometer high-speed train line ( $V_{max}=200$  km/h) belonging to TCDD and the construction costs of these lines with different design speeds were calculated and analyzed.

**Keywords:** Electrification system, Electric railway lines, Catenary system

### 1. Giriş

Demiryolu hatlarında trenlerin elektrikli olarak işletilmesi için tesis edilen sistemlere elektrifikasyon sistemleri adı verilir. Elektrikli demiryolu hatlarında besleme sistemleri akımın tipine göre AC ve DC olarak ikiye ayrılmaktadır. Şehir içi ulaşımında genellikle DC gerilim, şehirlerarası ulaşımında ise AC gerilim kullanılmaktadır. Seri komütatörlü motorlar düşünüldüğünde; DC gerilim AC gerilime göre daha uygun, hiperbolik güç/hız eğrilerine sahiptir.

Dünyada çoğunlukla DC sistemler hala tercih edilmesine rağmen, düşük gerilim kullanımı mevcut sistemlerde yüksek güç talebini karşılamak adına en büyük dezavantajını oluşturmaktadır.

Atıf için/Cite as: Ş. Kuşdoğan, Ö. Doğruer, "Demiryolu elektrifikasyonunda katener sistem tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no.14 ,pp. 130-142, July. 2021.doi: 10.47072/demiryolu.871106

20. yüzyıl başlarında seri motorları, AC gerilimin dönüştürülebilme yeteneğinden yararlanılarak geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Burada amaç tek fazlı seri AC motoru, tek fazlı AC gerilimde ve şebeke frekansında sürmektir. Güç elektroniği alanındaki büyük gelişmelere paralel olarak 25 kV AC-50 Hz'lik güç, birçok ülkenin demiryolu elektrifikasyonunda tercih edilmesine yol açmıştır. Temel olarak yukarıda bahsi geçen nedenlerden dolayı; cer gücü sistemlerinde kullanım amacına göre farklılık gösteren gerilim ve frekans değerleri bulunmaktadır. TS EN 50163 standardına göre demiryollarındaki gerilim seviyeleri Tablo 1'de gösterilmiştir [1-2].

**Tablo 1.** EN 50163'e göre demiryolu elektrifikasyonu gerilim seviyeleri

	Un	Umin2	Umin1	Umax1	Umax2	Umax3
DC 600 V	600	-	400	720	800	1015
DC 750 V	750	-	500	900	1000	1270
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2540
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15 kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24300
AC 25 kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38759

Un: Nominal gerilim

Umin1: En düşük kalıcı gerilim

Umax1: En yüksek kalıcı gerilim

Umin2: En düşük geçici gerilim (maksimum 2 dakika)

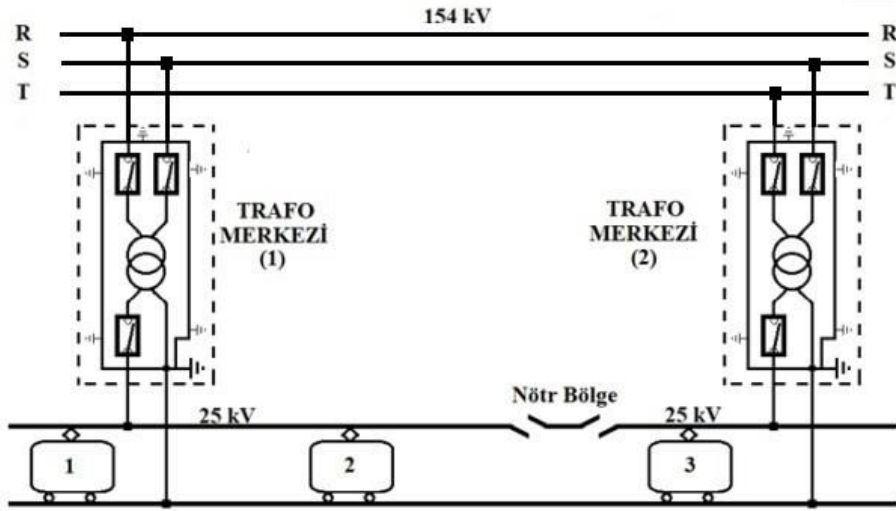
Umax2: En yüksek geçici gerilim (maksimum 5 dakika)

Umax3: Aşırı gerilim (20ms'den uzun süreli)

Ülkemizin tamamında ve Dünya'da büyük oranda şehirlerarası demiryolu hatlarında 25 kV 50 Hz AC Elektrifikasyon sistemleri kullanılmaktadır. Elektrifikasyon sistemleri ile ilgili yapılan akademik çalışmalar genelde şehir içi metro hatları ile sınırlı olmuştur. Şehirlerarası hatlarda kullanılan elektrifikasyon sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar da sistemin tanımına ve besleme sistemine yönelik olmuştur. Bu makalede 154 kV AC hatlardan katener sistemine 25 kV enerji verilecek şekilde sistemin tasarım aşamaları ortaya konmuştur. Elektrifikasyon projelerinde özellikle katener direğine etkiyen yük hesaplamaları ele alınmış, bu alanda katkı sağlamak amaçlanmıştır.

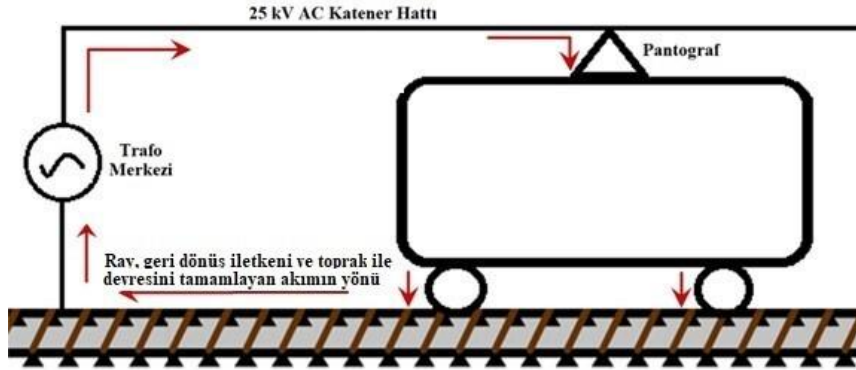
25 kV 50 Hz Elektrifikasyon sistemleri; trafo merkezi, katener sistemi ve SCADA sistemi olmak üzere 3 ana kısımdan oluşur. Trafo merkezi; enerji iletim hattından gelen üç faz 50 Hz 154 kV enerjinin, tek faz 25 kV 50 Hz enerjiye dönüştürülüp katener hattına verildiği sistemin bütünüdür. Katener sistemi; trafo merkezi ile pantograf arası enerji iletimini sağlayarak 25 kV enerjiyi pantografa ulaştıran havai hat sistemlerdir. Telekomand ve haberleşme sistemleri ise hat üzerindeki cer postalarında ve trafo merkezinde bulunan bütün ayırıcı ve kesicilerin iletişimini ve kontrolünü sağlayan sistemlerdir [3].

Şekil 1'de iki trafo merkezi, katener hattı ve elektrikli trenler görülmektedir. TEİAŞ 154 kV enerji hattından alınan 3 faz gerilim trafo merkezlerine iletilir. Burada her bir trafoda elde edilen 25 kV faz katener hattına, nötr ise geri dönüş iletkeninin de bağlandığı eş potansiyel topraklama barasına bağlanır. Komşu trafo merkezlerinde, trafo merkezlerinin faz bağlantı sırası farklı olabileceğinden faz çakışmasını önlemek amacıyla iki trafo merkezinin enerji kapsamalarının kesiştiği yere nötr bölge tesis edilir. 1 ve 2 nolu trenler Trafo Merkezi (1)'den beslenirken 3 nolu tren Trafo Merkezi (2)'den beslenmektedir. Şehirler arası 25 kV hatlarda ortalama 50-60 km aralıklarla trafo merkezi bulunmakta bunların orta noktalarında ve trafo merkezi önünde ise nötr bölge tesis edilmektedir. Trafo merkezlerinin bir tanesinde oluşacak arızada nötr bölgede bulunan ayırıcılar kapatılarak uzun beslemeye geçilir ve işletmeciliğin devamı sağlanır.



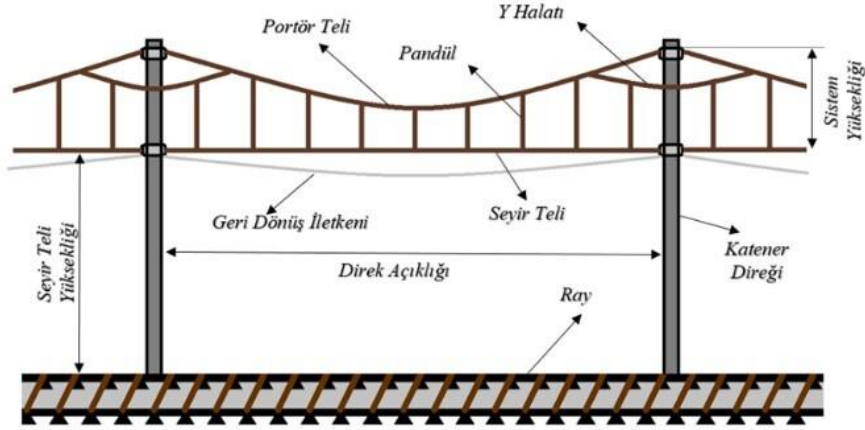
Şekil 1. 25 kV 50 Hz elektrifikasyon sistemi

25 kV AC Katener sistemlerinde nominal gerilim olarak 25 kV gerilim değeri seçilmesi hem izole mesafe hem de gerilim düşümü olarak uygun değerde olmasıdır. Gerilim değerinin yüksek seçilmesi yalıtım için daha büyük malzemelerin kullanılması gerekliliğini beraberinde getirmekte, gerilim değerinin düşük olması ise trafo merkezi sayısındaki ihtiyacı artırmaktadır.



Şekil 2. 25 kV 50 Hz elektrifikasyon sistemi akım döngüsü

Katener sistemleri 25 kV gerilimin taşındığı enerji dağıtım hatlarına benzeyen bir sistemdir. Şekil 3'te katener sisteminin bileşenleri görülmektedir. Katener sistem bileşenlerindeki ekipmanların çeşidini ve sayısını, hattın güzergâhı ve hangi hıza göre dizayn edileceği belirler. Buradaki tüm ekipmanların ana amacı seyir teli yüksekliğini sabit tutarak pantografin seyir teline temasının sürekliliğini sağlamaktır. İletken teller doğrudan katener direklerine bağlı olmayıp bu tellerin taşınması katener direklerinin üzerine tesis edilen konsol-hoban donanımları ile olur. Açık hatta müstakil katener direkleri kullanılırken, ikiden fazla yolun olduğu bölgelerde portal yapılar da kullanılabilir. Portallar; üzerinden geçtikleri yolları besleyecek şekilde tesis edilmiş, yolu dikey olarak kesen çelik yapılardır. Katener hatlarında statik (esnek olmayan) bir seyir teli pantograf kömürünün gereğinden fazla aşınmasına ve pantograf kömüründe kırılmalara yol açar. Bu yüzden portör teli ve pandüller; seyir teli üzerindeki rijit hali absorbe edip pantografin seyir teline yaptığı baskıyı azaltacak bir salınım oluşturur [4].

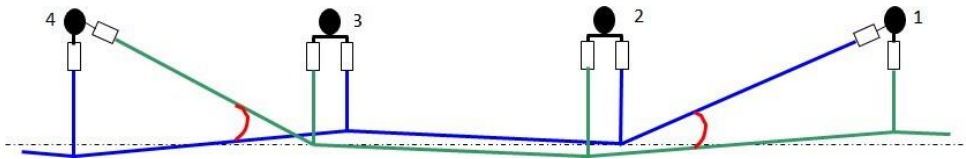


Şekil 3. Katener sistemi bileşenleri

Katener hattı yol boyunca uzanan etaplardan meydana gelir. Bu etaplar hattın durumuna göre yaklaşık 1400m'ye kadar uzamakta olup her etabın bir diğer etaba bağlandığı bölgeler bulunmaktadır. Bu bölge iki etabı mekanik olarak ayırıyorsa buna ekipman bölge adı verilir. Ekipman bölgeler trenler bir etaptan diğer etaba geçerken pantografin elektriksel olarak devamlılığını sağlamaya ve mekanik yumuşak bir geçiş sağlamaya yarar.

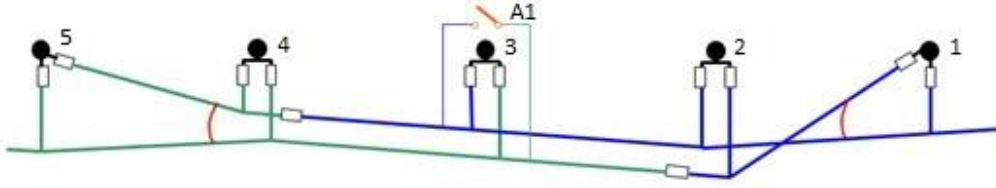
Ekipman bölgeler genelde 3 veya 4 açıklık olarak tesis edilir. Genel olarak konvansiyonel hatlarda 3 açıklıklı sistem, hızlı tren hatlarında ise 4 açıklıklı sistemler tercih edilir. Hızlı tren hatlarında açıklık sayısının fazla olmasının nedeni, hız yüksek olduğundan ekipman bölgelerde daha yumuşak bir geçişin sağlanmasıdır.

Şekil 4'te verilen 3 açıklıklı ekipman bölgede görüldüğü gibi sol taraftan gelen ve mavi ile gösterilen teller bir etap, sağ taraftan gelen ve yeşil ile gösterilen teller ise diğer etabı belirtmektedir. Şekildeki kırmızı ile gösterilen besleme iletkenleri sayesinde etaplar arasındaki elektriksel devamlılık sürdürmektedir. Şekil 4'te sağ taraftan gelen bir elektrikli trenin pantografı, 1 nolu katener direğinden yeşil tele temas ederek geçer, 2 nolu direğe geldiği zaman yeşil ile gösterilen tel yükselmeye başlar. 2 ve 3 numaralı direklerin tam ortasında pantograf aynı anda iki tele birden temas eder. Bu noktadan itibaren pantograf mavi telden enerji alır. Yeşil tel ise yükselerek 4. direkte sonlanır.



Şekil 4. 3 Açıklıklı ekipman bölge

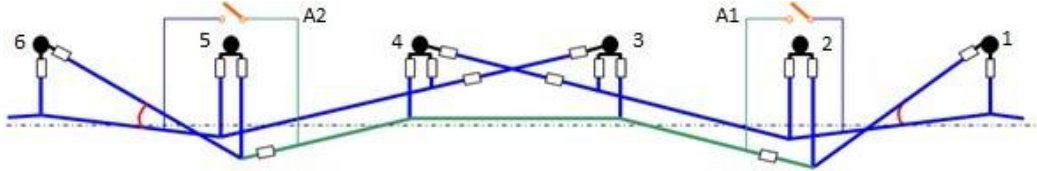
Seksiyonman bölge ekipman bölge gibi iki ayrı etabı birbirine bağlarlar. Seksiyonman bölgenin ekipman bölgeden farkı ise iki etabı mekanik olarak ayırmasının yanı sıra elektriksel olarak da ayırmasıdır. Bakım ve arıza gibi durumlarda enerjisiz olması istenen bölgeyi seksiyoner (ayırıcı) kullanarak enerjisiz bırakan elektrik izolasyon bölgeleridir. Seksiyonman bölgeler genellikle istasyonların giriş ve çıkışlarına konulmaktadır.



Şekil 5. Seksiyonman bölge

Şekil 5'te 4 direk açıklığı olarak tasarlanmış seksiyonman bölge örneği görülmektedir. Burada yeşil ve mavi seyir telleri aynı fazdan beslenmektedir. Pantografin mekanik hareketi tıpkı ekipman bölgede olduğu gibi 1-2 nolu direkler arasında mavi tele, 2-4 nolu direklerin ortasında her iki tele ve 4-5 nolu direkler arasında yeşil tele temas etmektedir. Sistemde bulunan A1 ayırıcısı ile hat elektriksel olarak ayrılmaktadır. Normal koşullarda A1 ayırıcısı kapalı konumdadır. Hatta arıza meydana gelmesi veya bakım sırasında bir tarafın enerjisiz bırakılması istenildiği takdirde A1 ayırıcısı açılarak iki etap elektriksel olarak ayrılır. Buradaki ayırıcıların konumu besleme planına göre belirlenir.

Elektrifikasyon sistemlerinde yol boyunca uzanan enerjiye ihtiyaç olduğu için sistemin enerjisi ortalama 50-60 km aralıklarla tesis edilmiş trafo merkezlerinden sağlanır. Komşu trafo merkezlerinde, trafo merkezlerinin faz bağlantı sırası farklı olabileceğinden katener verilen gerilimin de fazları farklı olur. Demiryolu hattı boyunca uzanan katener sistemlerinde iki trafo merkezinin enerji kapsamalarının kesiştiği yerde oluşturulan sisteme nötr bölge adı verilmektedir. Nötr bölgeler farklı trafo merkezlerinden gelen enerjide faz çakışmasını önlemek amacıyla tesis edilirler. Bu bölgeler enerjisiz bölge olup trenler nötr bölgeden geçerken kendi hızıyla geçerler. Bu yüzden sistem tasarlanırken nötr bölgeler eğim ve kurp olmayan bölgeler arasından seçilir. TEİAŞ'tan 3 faz alınarak tasarlanan trafo merkezlerindeki güç trafoları da farklı fazlardan beslendiği için trafo merkezi önlerine de nötr bölge tesis edilir.



Şekil 6. Nötr bölge

Şekil 6'da nötr bölge örneği görülmektedir. Mavi ile gösterilen teller enerjili yeşil ile gösterilen teller ise enerjisizdir. Trenler 3 ve 4 nolu direkler arasından geçerken kendi hızları ile geçer [5].

Seyir teli pantograftan enerjiyi aynı noktadan aldığı takdirde pantograf arşe kömürünün (karbon şeridinin) çabuk aşınmasına ve kısa zamanda işlevini yitirmesine neden olur. Bu yüzden seyir teli pantografin her bölgesine temas ederek pantograf yüzeyinde gezinmelidir. Elektrikli tren üzerindeki pantograf sabit olup yatay ekseninde yer değiştirme imkânı bulunmadığından bu gezinme işlemi pantograf ile yapılamaz. Bu yüzden seyir telini yatay düzlem üzerinde sağa-sola sürekli yer değiştirecek şekilde konumlandırılıp dezeksman uygulaması yapılır [6-7].

## 2. Metot

25 kV Elektrifikasyon sistemlerinde; aşağıda belirtilen tasarım aşamaları uygulanarak 42,46 kilometrelik Büyükkarıştıran (Km 115+500) – Babaeski (Km 157+960) istasyonları arasında tasarım hızı 200 km/h olan hızlı tren hattı ve 29,22 kilometrelik Pamukova (Km 167+433)-Osmaneli Km (196+658) istasyonları arasında tasarım hızı 120 km/h olan konvansiyonel hattın katener projeleri ve temel karneleri oluşturulmuştur. Projeler ve temel karnelerine bağlı olarak iki hatta ait maliyetler ortaya çıkartılmıştır.

Elektrifikasyon sistemi tasarlanmadan önce hat güzergâhı, yol plan-profil, istasyon yerleri, sanat yapıları, makaslar, kurp ve dever bilgileri elde edilmiştir. Konvansiyonel hat 120 km/h, hızlı tren hattı ise 200 km/h olacak şekilde düşünülerek sırasıyla piketaj planı, derülaj planı, temel karnesi ve montaj karnesi oluşturulmuştur. Tasarım yapılırken aşağıda sıralanan aşamalar uygulanmıştır.

### **2.1. Sistem prensipleri**

Tasarlanacak hattın hızı belirlendikten sonra sistemde kullanılacak tüm ekipmanların özellikleri ve sistemin ne şekilde tasarlanacağı ortaya çıkarılmış bunların tek tek tanımları yapılmıştır. Bu noktada maliyet karşılaştırılması yapılacağı için, hızlı tren hattında da konvansiyonel hatta da birer nötr bölge ve üç adet istasyon öngörülmüştür. Hızlı tren hattında Büyükkarıştıran, Lüleburgaz ve Babaeski istasyonları bulunmaktadır. Konvansiyonel hatta ise Pamukova, Mekece ve Osmaneli istasyonları yer almaktadır.

Sistemlerde trafo ve SCADA merkezlerinin var olduğu düşünülerek bu tesisler maliyet hesabında öngörülmemiştir. Besleme türü ise her iki projede de 25 kV AC 50 Hz olarak belirlenmiştir.

### **2.2. Besleme planı**

Elektrifikasyon tesis edilecek hatlarda, istasyon ve depo yollarında elektrikleştirilecek hatlar belirlenmiştir. Hattın trafik ve kapasite durumuna göre istasyon içi yollarda enerjilendirilecek hatlar belirlenmiştir. Burada tasarımı yapılan iki hattın da aynı olması için istasyonlar üç yollu olarak tasarlanmıştır. Hızlı tren hattında seyir teli kesiti 120 mm<sup>2</sup> konvansiyonel hatta ise 107 mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Tren işletmeciliği ve bakım açısından en uygun senaryo düşünülerek yol planları üzerinden nötr bölgeler, cer postaları ve sistemde kullanılacak kesici-ayırıcıların yerleri ve sayıları belirlenmiştir.

### **2.3. Piketaj ve derülaj planı**

Besleme planı hazırlandıktan sonra bu plan üzerinden ekipman bölge, seksiyonman bölge, direk ve ankraj yerleri belirlenmiştir. Piketaj planı hazırlanırken ilk etapta nötr bölge ve istasyon giriş-çıkışlarındaki seksiyonman bölgeler yerleştirilmiş, makas merkezlerinden başlayarak ilk direk yerleri tespit edilmiştir. Buradaki amaç elektrikli tren pantografının makastan geçerken her iki yolun teline de aynı anda temas etmesi ve yumuşak bir geçiş sağlamasıdır. Makaslardaki katener geçişleri, projedeki makas türlerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Tasarım şekli ve hattın geometrik yapısına göre ekonomik olarak en uygun olacak şekilde gerekli yerlerde portal kullanılmış, buna göre her iki projede de istasyon içleri 3 yollu portal diğer bölgeler ise müstakil direk olacak şekilde tasarlanmıştır.

Katener sistem tasarımında direk açıklığı; pantograf genişliğine, rüzgâr hızına, iletken gerdirme kuvvetine, yol yerleşimi ve özellikleri ile yanal ivme sebebiyle araç sapması parametrelerine bağlıdır. Konvansiyonel hatlarda direk açıklıkları genelde 27 metre ve 63 metre olarak değişmektedir. UIC 799 standardına göre maksimum açıklık, açık hatta 65m tünellerde ise 50m olarak kabul edilir. Tünel ve viyadüklerde karşılıklı rüzgâr yükünün fazla olması düşünülerek bu bölgelerde direk açıklıkları daha kısa olabilir. Direk açıklıkları, tüm etkiyen bileşenler dikkate alınarak hazırlanan "Açıklık ve Dezeksmen Raporu"nda alıgman ve kurplar olmak üzere belirlenir.

Sistem tasarımı yapılırken UIC ve TS EN'de yer alan standartlar göz önüne alınarak piketaj planı oluşturulmuştur. Piketaj planında ilk direğin yeri belirlendikten sonra seksiyonman bölge, ekipman bölge ve nötr bölgenin yeri tespit edilmiş, direk açıklıklarına göre de kalan direklerin yerleri belirlenmiştir. Direk yerleri belirlendikten sonra geri dönüş iletkeni de piketaj planı üzerinde gösterilmiştir. Derülaj planında ise seyir teli, portör teli, geri dönüş iletkeni, fider teli,

seyir teli yüksekliği, sistem yüksekliği, IS'ler, dezeksman değerleri, anahtarlama elemanları ve etapların başlangıç ve bitiş kilometreleri gösterilmiştir.

#### 2.4. Katener direğine etkiyen yüklerin hesabı, temel tipleri ve temel karnesi

Katener direği büyüklük olarak üzerine gelen yüke göre değişmektedir. Direğe etkiyen yüklerin oluşturduğu moment birçok etkene bağlı olup momentler hesaplanırken şu parametreler kullanılmıştır: Hattın kurp yarıçapı, direk açıklığı, dezeksman değeri, açıklıklardaki yatay fleş, direk üzerindeki donatının ve iletkenlerin ağırlıkları toplamı, iletkenlerin rüzgâr yükü, iletkenlerin montaj ve radyal gerilmesi, iletkenlerin raydan ve temel üstünden yüksekliği, sistem yüksekliği, ray ile temel üst kotu arasındaki mesafe, emplantasyon.

Direklerin temel üstünde yer alan ankastraman noktasına (Şekil 7'deki A noktası) gelen momentlerin hesabında direğe gelen bütün yükler değerlendirilir. Toplamda 3 çeşit yük olup toplam moment aşağıdaki gibidir. Direğe etkiyen momentler "Moment= Kuvvet x Kuvvet Kolu" olacak şekilde hesaplanır. Bu şekilde direğe etkiyen momentler hesaplanır.

$$M_t = M_r + M_w + M_p \quad (1)$$

$M_t$ : Direğe gelen momentlerin toplamı

$M_r$ : Radyal gerilmeden dolayı oluşan moment

$M_w$ : Rüzgâr yüklerinden dolayı oluşan moment

$M_p$ : Düşey yüklerden dolayı oluşan moment

Radyal gerilmeden dolayı oluşan toplam moment TS EN 50119 standardına göre Formül (2) 'de verilmiştir [8].

$$M_r = (t_{rf} \times h_f) + (t_{rt} \times h_t) + (t_{rp} \times h_p) + (t_{rs} \times h_s) \quad (2)$$

Rüzgâr yüklerinden dolayı oluşan toplam moment Formül (3)'te verilmiştir [8-9].

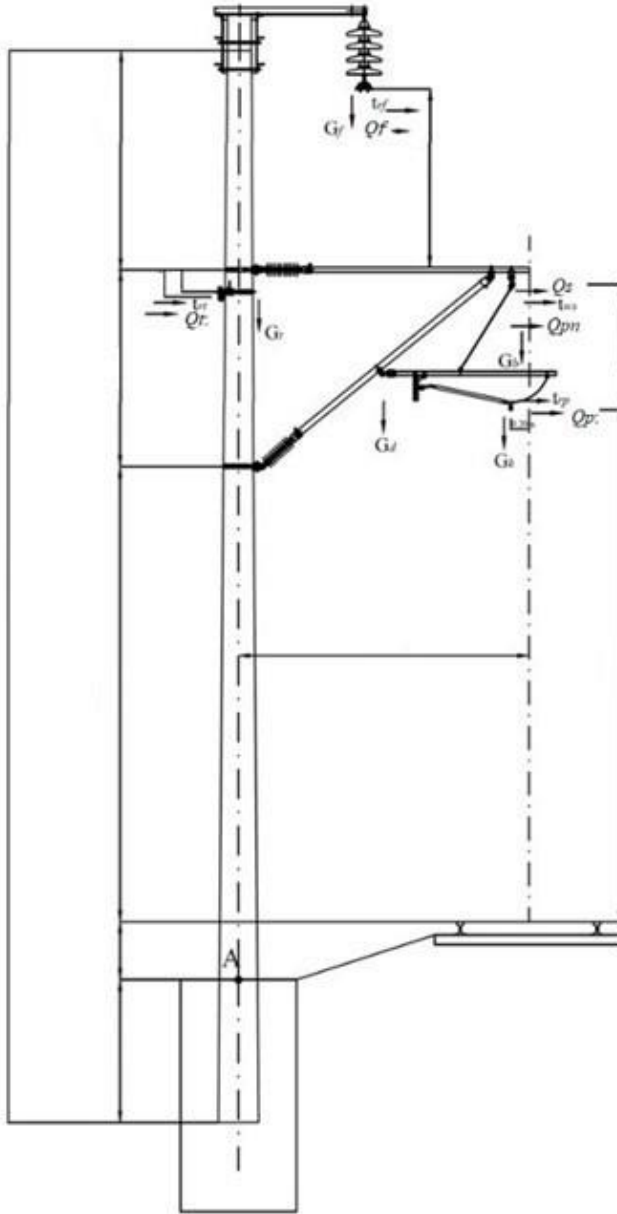
$$M_w = (Q_s \times h_s) + (Q_p \times h_p) + (Q_f \times h_f) + (Q_t \times h_t) + (Q_{pn} \times h_{pn}) + \left(Q_D \times \frac{h}{2}\right) \quad (3)$$

Düşey yüklerden dolayı oluşan toplam moment Formül (4)'te verilmiştir.

$$M_p = [G_k \times (I - f)] + [G_d \times (I/2)] + [G_f \times I_f] + [G_t \times D] + [G_b \times I] \quad (4)$$

Direğe etkiyen bu yükler tek tek hesaplandıktan sonra TS EN 50119 standardına göre bazı emniyet katsayıları uygulanır. Bu standarda göre radyal gerilmeden ve düşey yüklerden oluşan momentlerde emniyet katsayısı 1,5 alınır. Rüzgâr yüklerinden dolayı oluşan momentlerin emniyet katsayısı ise 1,3' tür. TS EN 50119 standardına göre bu katsayılar uygulandığında toplam moment Formül (5)'teki gibi olur [10].

$$M_t = [(M_r + M_p) \times 1,5] + (M_w \times 1,3) \quad (5)$$



- $G_f$  = Fider iletkeni, fider traversi ve izolatörün ağırlığı  
 $G_t$  = Geri Dönüş iletkeni ve bağlantılarının ağırlığı  
 $G_b$  = Personel ağırlığı ve buz yükü  
 $G_k$  = Katenerin ağırlığı  
 $G_d$  = Konsol-Hoban donanımının ağırlığı  
 $t_{rf}$  = Fider iletkenindeki radyal gerilme  
 $t_{rt}$  = Geri dönüş iletkenindeki radyal gerilme  
 $t_{rp}$  = Portör teli iletkenindeki radyal gerilme  
 $t_{rs}$  = Seyir teli iletkenindeki radyal gerilme  
 $Q_f$  = Fider iletkeninin rüzgar gerilmesi  
 $Q_t$  = Geri dönüş iletkeninin rüzgar gerilmesi  
 $Q_p$  = Portör teli iletkeninin rüzgar gerilmesi  
 $Q_s$  = Seyir teli iletkeninin rüzgar gerilmesi  
 $Q_{pn}$  = Pandül teli iletkeninin rüzgar gerilmesi

Şekil 7. Katener direğine etkiyen yükler

Bu formüllere göre toplam momentler hesaplanarak her bir katener direğine etkiyen yük elde edilmiştir. Direğe etkiyen toplam moment hesaplandıktan sonra o değere göre direk tipi ve beton hacmi belirlenmiş ve temel karnesi oluşturulmuştur [11].

### 3. Bulgular

Halkalı-Kapıkule Demiryolu Hattında Büyükkarıştıran (Km 115+500) – Babaeski (Km 157+960) istasyonları arasında tasarım hızı 200 km/h olan hızlı tren hattı ve Pamukova (Km 167+433)-Osmaneli Km (196+658) istasyonları arasında tasarım hızı 120 km/h olan konvansiyonel hattın projeleri oluşturulmuş buna bağlı olarak iki hatta ait maliyetler elde edilmiştir.

Büyükkarıştıran-Babaeski hızlı tren hattı çift hat olup toplamda 84,92 km'dir. Tasarım hızı 200 km/h olup buna göre 120 mm<sup>2</sup> seyir teli kesiti[12], 70 Bz II portör teli, 16 mm<sup>2</sup> Bz II pandül, 18



metrelik 35 mm<sup>2</sup> Bz II Y halatı[13], iletken teller için 120 mm<sup>2</sup>'lik katener irtibatı, 176,9 mm<sup>2</sup> geri dönüş iletkeni [14], 180 adet seyir teli ve portör teli ayrı ayrı regülarize olan otomatik gergi cihazı, 18 adet de seyir teli ve portör teli birlikte regülarize olan otomatik gergi cihazı kullanılmıştır[15].

Pamukova-Osmaneli konvansiyonel hattı çift hat olup toplamda 58,45 km'dir. Tasarım hızı 120 km/h olup buna göre 107 mm<sup>2</sup> seyir teli kesiti, 70 Bz II portör teli, 10 mm<sup>2</sup> Bz II pandül, iletken teller için 95 mm<sup>2</sup>'lik katener irtibatı, 176,9 mm<sup>2</sup> geri dönüş iletkeni, 180 adet seyir teli ve portör teli birlikte regülarize olan otomatik gergi cihazı kullanılmıştır. Tasarım yapılan hatta hızımız 120 km/h'ten düşük olduğu için Y halatı kullanılmamıştır.

**Tablo 2.** Büyükkarıştıran–Babaeski Hızlı Tren ve Pamukova-Osmaneli konvansiyonel demiryolu hatlarında katener direkleri ve katener direklerine bağlı kalemlere ait yapım maliyetleri

N o	İşin Adı	Birim	Birim Fiyat (TL)	HT Miktar	HT Toplam (TL)	Konv. Miktar	Konv. Toplam (TL)
1	1ST-1PT-1Dİ Direk	Adet	3.707	1458	5.405.754	1392	5161049
2	2ST-2PT-1Dİ Direk	Adet	3.929	324	1.273.220	232	911.688
3	1ST -1PT- 1Dİ - 1 Katener Ankrajı Taşıyan Direk	Adet	4.130	162	669.201	116	479.181
4	Hertz Taşıyan Direk	Adet	5.743	6	34.461	6	34.461
5	Portal Taşıyan Direk	Adet	5.932	240	1.423.680	300	1.779.600
6	Yükseltilmiş Ankraj Direği	Adet	4.194	32	134.236	32	134.236
7	Portallar İçin Şez Konstrüksiyonları	Adet	1.698	240	407.702	300	509.628
8	Santrifüj Betonarme Direkler İçin Temel (Malzeme)	m3	314	7.665	2.412.252	7.161	2.253.638
9	Santrifüj Betonarme Direkler İçin Temel Kazısı (İşçilik)	m3	53	8.760	471.551	8.184	440.545
10	Ankraj Temelleri	m3	619	1.440	892.742	928	575.323
11	Konsol-Hoban Takımı	Set	4.005	3.100	12.415.500	2.972	11.902.860
12	Topraklama İrtibatı 8 mm Alimünyum Filmaşın	Set	110	2.190	240.900	2.046	225.060
13	Çelik Konstrüksiyonlar	Kg	16	126.000	2.016.000	157.500	2.520.000
	Katener Direkleri ve Katener Direklerine Bağlı Kalemler (TOPLAM)				27.797.199 TL		26.927.269 TL
	Katener Direkleri ve Katener Direklerine Bağlı Kalemler (TL/Km)				327.333,95 TL/km		460.688,95 TL/km

Tablo 2'deki Büyükkarıştıran–Babaeski hızlı tren hattı ve Pamukova-Osmaneli konvansiyonel demiryolu hattında katener direkleri ve katener direklerine bağlı kalemlere ait yapım maliyetleri görülmektedir. Katener direği ve buna bağlı parametreler düşünüldüğünde hızlı tren hattında kilometre başına düşen maliyet 327.333,95 TL/km iken, konvansiyonel hatta kilometre başına düşen maliyet 460.688,95 TL/km olmuştur. Elde edilen veriler incelendiğinde konvansiyonel hattın hızlı tren hattına göre yapım maliyetinin yüksek olmasının ana nedeni konvansiyonel hatta kurp yarıçapının düşük olmasıdır. Hızlı tren hattında minimum kurp yarıçapı R=2000 metre iken konvansiyonel hatta bu yarıçap R=300 metrelere kadar düşmektedir. Konvansiyonel hatta kurp yarıçapına bağlı olarak direk sayısı ve buna bağlı olarak temel kazısı, beton, konsol-hoban gibi kalemler sayıca fazladır.

**Tablo 3.** Büyükkarıştıran–Babaeski hızlı tren ve Pamukova -Osmaneli konvansiyonel demiryolu hatlarında iletken teller ve iletken tellere bağlı kalemlere ait yapım maliyetleri

N o	İşin Adı	Birim	Birim Fiyat (TL)	HT Miktar	HT Toplam (TL)	Konv. Miktar	Konv. Toplam (TL)
1	Seyir Teli (107 mm <sup>2</sup> ) (Cu)	Metre	102	0	0	70.137	7.153.974
2	Seyir Teli(120 mm <sup>2</sup> Cu Ag 0,1)	Metre	127	106.944	13.581.888	0	0
3	Portör Teli 70 Bz II	Metre	110	106.944	11.763.840	70.137	7.715.070
4	Dönüş İletkeni 176,9 mm <sup>2</sup>	Metre	29	89.120	2.584.480	55.448	1.607.992
5	Y Halatı 35 mm <sup>2</sup> Bz II (18 m)	Set	1.123	1.542	1.731.666	0	0
6	Pandül 10 mm <sup>2</sup> Bz II	Set	187	0	0	12.276	2.295.612
7	Pandül 16 mm <sup>2</sup> Bz II	Set	228	15.288	3.485.664	0	0
8	Fider İletkeni 242/39 (280,84) mm <sup>2</sup> AL/ST HAWK	Metre	39	12.000	468.000	12.000	468.000
9	İki Katener Arası Elektriki İrtibat 95 mm <sup>2</sup>	Set	1.233	0	0	116	143.028
10	İki Katener Arası Elektriki İrtibat 120 mm <sup>2</sup>	Set	1.508	180	271.440	0	0
11	Fider ve Seksiyoner İçin Katener İrtibatı 95 mm <sup>2</sup>	Set	3.048	0	0	24	73.152
12	Fider ve Seksiyoner İçin Katener İrtibatı 120 mm <sup>2</sup>	Set	3.213	24	77.112	0	0
13	GDİ Paralellenmesi	Set	2.819	74	208.606	46	129.674
14	GDİ ray arası bağlantı iletkeni Al 1x95 mm <sup>2</sup>	Set	1.067	148	157.916	92	98.164
15	Topraklama İstasyonu	Set	2.870	80	229.600	52	149.240
16	Sabit Seyir Teli Ankraji	Set	2.373	180	427.140	0	0
17	Sabit Portör Teli Ankraji	Set	2.373	180	427.140	0	0
18	Katener (1ST-1PT) Ankraji	Set	3.067	18	55.206	116	355.772
19	Dönüş İletkeni Ankraji	Set	1.710	10	17.100	10	17.100
20	Fider Hattı Ankraji	Set	2.799	18	50.382	18	50.382
21	Açık Hat İçin Antişöminman Tesisi	Set	18.054	90	1.624.860	0	0
22	Ankraj Direği İçin Lente Otomatik Gergi Cihazı (PT ve ST Ayrı Ayrı Regülerize)	Adet	2.243	360	807.480	260	583.180
23	Otomatik Gergi Cihazı (PT ve ST Birlikte Regülerize)	Set	11.143	18	200.574	116	1.292.588
24	Ara İzolasyonlar	Adet	1.775	20	35.500	20	35.500
25	Seksiyon İzolatörü (IS) (120 Km/h)	Adet	15.203	0	0	10	152.030
26	Seksiyon İzolatörü (IS) (200 Km/h)	Adet	20.959	10	209.590	0	0
27	Fider Konsolu	Set	2.461	240	590.640	300	738.300
İletken Teller ve İletken Tellere Bağlı Kalemler (TOPLAM)					43.775.644 TL		23.058.758 TL
İletken Teller ve İletken Tellere Bağlı Kalemler (TL/Km)					515.492,75 TL/km		394.503,99 TL/km

Tablo 3'teki Büyükkarıştıran–Babaeski hızlı tren hattı ve Pamukova -Osmaneli konvansiyonel demiryolu hattında iletken teller ve iletken tellere bağlı kalemlere ait yapım maliyetleri görülmektedir. İletken teller ve buna bağlı parametreler düşünüldüğünde hızlı tren hattında kilometre başına düşen maliyet 515.492,75 TL/km iken, konvansiyonel hatta kilometre başına düşen maliyet 394.503,99 TL/km olmuştur. Elde edilen veriler incelendiğinde hızlı tren hattının konvansiyonel hatta göre yapım maliyetinin yüksek olmasının ana nedeni; hızlı tren hattında kullanılan iletken tellerin kesitlerinin daha kalın olması ve hıza bağlı olarak seyir teli ve portör teli ayrı ayrı regülarize olan otomatik gergi cihazı, Y halatı, 200 km/h hıza uygun IS gibi bileşenlerin kullanılmasıdır. 120 km/h hıza göre tasarlanan konvansiyonel hatta Y halatı hiç kullanılmamış, seyir teli ve portör teli birlikte regülarize olan otomatik gergi cihazı kullanılmış ve hızlı tren hattına göre iletken kesitleri daha ince öngörülmüştür. Bu da konvansiyonel hattın bu kalemlerde yapım maliyetini azaltmıştır.

**Tablo 4.** Büyükkarıştıran–Babaeski hızlı tren ve Pamukova -Osmaneli konvansiyonel demiryolu hatlarında nötr ve istasyon postalarında bulunan anahtarlama elemanları ve buna bağlı kalemler

N o	İşin Adı	Birim	Birim Fiyat (TL)	HT Miktar	HT Toplam (TL)	Konv. Miktar	Konv. Toplam (TL)
1	Nötr Bölge Postaları Bara, İletken Ve Topraklama Bağlantısı	Set	69.664	1	69.664	1	69.664
2	Nötr Bölge Postaları Güç Ve Kumanda Kablağı	Set	97.323	1	97.323	1	97.323
3	İstasyon Postaları Bara, İletken Ve Topraklama Bağlantısı	Set	71.672	3	215.016	3	215.016
4	İstasyon Postaları Güç ve Kumanda Kablağı	Set	106.631	3	319.893	3	319.893
5	Nötr Bölge Postası, İstasyon Postası ve Makas Postası İçin Posta Binası	Set	67.046	4	268.184	4	268.184
6	Posta Binaları İçin Klima	Adet	15.280	4	61.120	4	61.120
7	Gerilim Trafoları (25/0.1kV)	Adet	16.595	19	315.305	19	315.305
8	Yardımcı Servis Trafosu (25 kV / 230v-30 KVA)	Adet	19.131	0	0	4	76.524
9	Yardımcı Servis Trafosu (25 kV / 230v-100 KVA)	Adet	26.492	4	105.968	0	0
10	230v AC/48V DC Redresör	Adet	12.158	4	48.632	0	0
11	230v AC/110V DC Redresör	Adet	14.890	4	59.560	4	59.560
12	48 V DC Akü Grubu	Set	11.898	4	47.592	0	0
13	110 V DC Akü Grubu	Set	18.339	4	73.356	4	73.356
14	Motor Kumandalı Topraklamasız Ayırıcı (Tek Kutuplu 27.5 kV, 1250 A)	Adet	18.399	13	239.187	13	239.187
15	Yük Ayırıcısı (Tek Kutuplu 27.5 kV, 1250 A)	Adet	22.701	21	476.721	21	476.721
Nötr ve İstasyon Postalarında Bulunan Anahtarlama Elemanları ve Buna Bağlı Kalemler (TOPLAM)					2.397.521 TL		2.271.853 TL

Tablo 4'te Büyükkarıştıran–Babaeski hızlı tren ve Pamukova-Osmaneli konvansiyonel demiryolu hatlarında nötr ve istasyon postalarında bulunan anahtarlama elemanları ve buna bağlı kalemlere ait yapım maliyetleri görülmektedir. Hızlı tren hattında üç istasyon ve bir adet nötr bölgeye karşılık gelen tutar 2.397.521 TL iken aynı şekilde 3 istasyon ve 1 nötr bölgesi olan konvansiyonel hatta bu maliyet 2.271.853 TL'dir. Burada da cer postası sayıları eşit olduğu için hızlı tren ve konvansiyonel hattın yapım maliyeti birbirine oldukça yakındır.

Toplam yapım maliyetine baktığımızda ise; hızlı trende 42,46 km çift hat katener sistemi (trafo merkezi ve SCADA sistemi hariç) yapım maliyeti 73.970.364 TL, konvansiyonel hatta 29,22 km çift hat katener sistemi (trafo merkezi ve SCADA sistemi hariç) yapım maliyeti 52.257.880 TL çıkmıştır. Kilometre başına düşen yapım maliyeti hızlı trende 871.059,40 TL/km, konvansiyonel

hatta 894.061,25 TL/km'dir. Hızlı tren hatlarında iletken tellerin ve kullanılan birçok malzemenin konvansiyonel hattan daha pahalı olmasına rağmen, birim maliyette daha az çıkmasının ana nedeni altyapı imalatlarında kurp yarıçapları büyük seçildiği için direk ve buna bağlı kalemlerin daha az sayıda kullanılmasıdır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada raylı sistemlerde bulunan elektrikli besleme sistemleri tanıtılmış ve farklı besleme sistemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Elektrikli besleme sistemlerinden birisi olan ve şehirlerarası ulaşımda tercih edilen 25 kV AC 50 Hz elektrifikasyon sistemleri incelenmiştir. Bu elektrifikasyon sisteminin tasarım aşamaları ve yöntemleri ortaya konulmuş, TCDD'ye ait biri hızlı ( $V_{max}=200$  km/h) diğeri konvansiyonel ( $V_{max}=120$  km/h) olan iki hattın tasarımı yapılmış, maliyetleri hesaplanarak analiz edilmiştir.

Demiryolu elektrifikasyonunda besleme türü değişikçe kullanılan malzemeler de farklılık göstermektedir. Aynı gerilim seviyelerinde olsa dahi tasarım hızı veya hattın geometrisine bağlı olarak da birçok sistem elemanı değişmektedir. Özellikle AC beslemeli sistemlerde iki trafo merkezi arası mesafenin uzun olması (yaklaşık 50-60 km) ve akım toplama sistem iletkenlerinin DC sisteme göre daha ince olması sistemin kurulum maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Genel olarak bakıldığında ise elektrifikasyon sisteminin yapım maliyeti oldukça yüksektir. Katener sistemlerinde kullanılan bakır iletkenler başta olmak üzere sistemde kullanılan malzemelerin büyük bölümü dövize endeksli ve yurt dışı menşelidir. Bu yüzden yapım maliyetini düşürebilmek için güvenlikten ve işletmeciliğin devamlılığında taviz vermeden ekonomik çözümler bulmak gerekir. Bu bağlamda kullanılacak malzemeleri ve miktarını da belirlediği için elektrifikasyon sistemlerinin tasarımı büyük önem kazanmaktadır.

Elektrifikasyon sistem tasarımı yapılırken piketaj, derüraj ve temel karnesinin bir başlık altında toplanıp çalışmaların tek bir plan üzerinden sürdürülmesi daha faydalı olacaktır. Ayrıca özellikle katener tasarımında önceden belirlenmiş şablon ve tablolar üzerinden devam etmek yerine her direğe özgü farklı değerler belirlenmesi, pandül ve direk açıklıkları gibi parametrelerin standart olmaktan çıkartılıp değişken olması ve imalatın da bu haliyle gerçekleştirilmesi yapım maliyetini azaltacaktır. Ayrıca yapılan statik hesaplamalar bir yazılım uygulaması ile gerçekleştirilebilir, bu uygulama için gerekli veriler bir ara yüzden girilerek sistemdeki tüm verilerin hesaplanması aynı program içinde toplanabilir. Böylece tüm formüller uygulama içerisinde olduğu için hata payı azaltılıp tasarım için en uygun değerlere ulaşılabilecektir.

#### Kaynakça

- [1] E. Şimşek, "Elektrikli raylı sistemlerin incelenmesi ve kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji kalitesi ve geri kazanımı," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 237188.
- [2] TS EN 50163, Demiryolu uygulamaları-Cer sistemlerinin besleme gerilimleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1998
- [3] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider, *Contact Lines For Electric Railways*, Second Edition, Publicis Corporate Publishing, Germany,2009.
- [4] S. Alkaşı, S. Açıkbaz, "Şehir içi raylı ulaşımda gerilim seviyeleri ve enerji iletim sistemleri," *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu*,13-15 Eylül 2006.
- [5] S. Taşdan, "Yüksek hızlı tren uygulamalarında elektrik besleme sistemlerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nisan 2015, 411600.
- [6] E. Karaköse, "Raylı sistemlerde pantograf-katener sisteminin modellenmesi, simülasyonu ve arıza teşhis yöntemlerinin geliştirilmesi," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2014, 373819.

- [7] İ. Özmen, “750 V DC cer gücü tedarik sisteminin bilgisayar destekli modellemesi, benzetimi ve analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2014, 363569.
- [8] TS EN 50119, Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektrikli cer havai temas hatları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013
- [9] E. Özdemirci, M. Uzar, C. Eser, S. Ertürk, S. Nazlı, D. Gürsu, E. Baran, “Hat tasarımında kullanılan temel yapısal faktörlerin diğer ülke sistemlerinde kullanılan kriterler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi,” *Güç Sistemleri Konferansı*, Ankara, 15-16 Kasım 2018.
- [10] M. Yeşiloğlu, “Ankara - İstanbul demiryolu hattı 2. Etap hızlı tren projesi, katener tesisleri eğitimi”, Eskişehir 2015
- [11] M. Sönmez, Gebze-Köseköy Arası Konvansiyonel Hat Katener Sistemleri Projesi, İstanbul, 2019.
- [12] Sarkuysan, “Seyir teli tablosu,” 2020. [Online]. Available: <http://www.sarkuysan.com/tr-TR/seyir-telleri/231.aspx> [Accessed 15 January 2020]
- [13] Sarkuysan, “Taşıyıcı iletken teller,” 2020. [Online]. Available: <http://www.sarkuysan.com/tr-TR/tasiyici-iletken-teller/232.aspx> [Accessed 31 May 2020]
- [14] Borsan, “Kablo Kataloğu,” 2020. [Online]. Available: <https://www.borsan.com.tr/wp-content/uploads/2018/08/borsan-kablo-katalog-2018.pdf> [Accessed 10 November 2020]
- [15] TS EN 50182, Hava hattı iletkenleri-Yuvarlak telli eşmerkez tabakalı örgülü iletkenler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2003

### Özgeçmiş



#### Şule KUŞDOĞAN

Şule KUŞDOĞAN 1967 yılında Nevşehir’de doğdu. Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliğinde lisansını, Yıldız Üniversitesinde yüksek lisansını ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktorasını tamamlamıştır. KOÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları elektrikli ulaşım sistemleri, yenilenebilir enerji, elektrik makinalarıdır.

E-Posta: kusdogan@kocaeli.edu.tr



#### Ömür DOĞRUER

1986 yılı Kayseri doğumludur. Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisi bölümünden 2008 yılında mezun olmuştur. Aynı üniversite ve bölümde Yüksek Lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2010 yılında TCDD’de Elektrik Mühendisi olarak çalışmaya başlamış olup halen TCDD 1. Bölge’de Demiryolu Modernizasyon Müdürü görevini yürütmektedir.

E-Posta: omurdogrue@tcdd.gov.tr

### Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Tüm yazarların eşit oranda katkısı olmuştur.