

Bir Konvansiyonel Raylı Sistemin Elektrifikasyon Süreci

Besmir Kadrija

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Ağustos 2018



Electrification Process of Conventional Railway System

Besmir Kadrija

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Railway Systems

August 2018

Bir Konvansiyonel Raylı Sistemin Elektrifikasyon Süreci

Besmir Kadrija

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Kontrol ve Sinyalizasyon Mühendisliği Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu

Ağustos 2018

ONAY

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Besmir Kadrija'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Bir Konvansiyonel Raylı Sistemin Elektrifikasyon Süreci” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu

İkinci Danışman:-

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu

Üye: Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Muammer Akçay

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun.....tarih ve
..... Sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bir Konvansiyonel Raylı Sistemin Elektrifikasyon Süreci” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 03.08.2018

Besmir Kadrija
İmza

ÖZET

Açık bir biçimde, her ülkenin ve toplumun ekonomik büyümesinde, ulaşım sistemi önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler karayolu, demiryolu, hava ve su taşımacılığını içermektedir. Bu sistemlerin her birinin kendine özgü özellikleri vardır. Bu ulaşım sistemleri arasında demiryolu sisteminin önemi her geçen gün artmaktadır.

Enerji kaynağına göre, demiryolu sistemleri farklı tiplere sahiptir. Buhar, dizel, elektrik ve hibrid sistemler, enerji türlerine göre demiryolu tipleridir. Günümüzde bu sistemler arasında buharlı demiryolu çok az ülkede kullanılmaktadır ve bazı ülkelerde turistik amaçlı kullanılmaktadır. Dizel sistem bazı ülkelerde ve konvansiyonel demiryolu ağlarında kullanılmaktadır. Bu sistemler arasında elektrikli demiryolu yaygın olarak kullanılmaktadır ve tüm yüksek hızlı hatlarda (YHT) enerji kaynağı elektriktir. Bazı ülkelerde konvansiyonel hatlar, yüksek hızlı hatlara yükseltilir. Bu nedenle dizel lokomotifler, elektrikli lokomotiflere dönüştürülür. Bu tür sistemler, hibrid sistem olarak adlandırılan elektrik ve dizel kaynaklar tarafından çalıştırılmaktadır.

Elektrik kaynağı demiryolu elektrifikasyonu için AC ve DC sistemleri şeklindedir. Bu sistemlerin herbiri olumlu ve olumsuz yönleri sahiptir. Tramvay, Metro ve diğer şehir içi demiryolu hatları için DC sistemi önerilirken, yüksek hızlı ve çok daha yüksek hızlı demiryolları için AC sistemi önerilmektedir. DC sistemi bir havai hatı (katener sistemi) veya üçüncü bir ray ile çalışır ancak AC sistemi sadece havai hatı sistemi tarafından beslenir.

Elektrikli raylar, diğer raylı sistemlere göre daha avantajlıdır. Tez çalışmam sırasında konvansiyonel demiryolu hatlarının elektrifikasyonunun çeşitli önceliklere sahip olduğu çıkarımına varmış bulunmaktayım, söz konusu çıkarımlar arasında yer alan öncelikler şu şekildedir: Çevre kirlenmeyen, daha dayanıklı ve daha uzun süreli kullanım, enerji tasarrufu ile çok yüksek bir hız, daha kısa ve daha rahat bir seyahat ile ağır yüklü taşınmasını gibi öncelikler.

Anahtar kelimeler: AC sistem, DC sistem, Üçüncü ray, Kateneri, Yüksek hızlı tren

SUMMARY

As it obvious, in each country's and society's economic growth, transportation systems play a key role. There are four types of transportation systems around the world. These systems include road, railway air and water transport. Each of these systems has its own characteristics. Among these transportation systems, the importance of the rail system is increasing day by day.

Regarding to the energy source, railway systems have different types. Steam, diesel, electrical and hybrid systems are railway types according to energy source. Nowadays, among these systems, steam railway is used in very few countries and is used in some countries for touristic purposes. The diesel system is used in some countries and in conventional railway networks. Among these systems, the electric railway is widely used and on all high speed tracks the source of power is electricity. In some countries, conventional tracks are upgraded to high speed tracks. Because of this the diesel locomotives are converted to electric locomotives. These kinds of systems are powered both by electric and diesel sources which is called Hybrid system.

The electric source is DC and AC for railway electrification and each of these systems has positive and negative points. For tram and other city railway systems DC, and for high-speed and very high-speed railways AC is suggested. The DC system is powered by an overhead line (catenary system) or by a third rail, but the AC system is fed up just by the overhead system.

Electric rail has more advantages compared to other rail systems. During the work of this topic I came to the conclusion that the electrification of the conventional railway line has many advantages such as: It does not pollute the environment, it is more durable and long-lasting, maintenance is easier, saves energy and has a very high speed, reduces travel time, is comfortable for travel and enables fast transport of heavy loads.

Keywords: AC system, DC system, Third rail, Catenary, High-speed railway

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca, değerli yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve katkılarıyla beni yönlendiren yüksek lisans tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca Yüksek Lisans çalışmam süresince, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmamda bana her türlü desteği sağlayan, yardımcı olan değerli arkadaşım Mohammad Jawed ROSHAN'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Beni bu konuma getiren, en yoğun ve zor anlarımda hep yanımda olan, desteklerini ve güvenlerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili babam Latif KADRİJA, annem Hava KADRİJA ve özellikle de desteği, sabrı ve fedakârlığından dolayı sevgili eşim Arjana SELMANİ'ye gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. YÖNTEM	6
3. 1. AC Enerji Sağlanması	8
3. 1. 1. AC Sistem Besleme Noktaları	9
3. 1. 2. AC Havai Katener Hattı Bileşenleri	10
3. 2. OLE Sistemi	11
3. 2. 1. Tedarik İstasyonları	13
3. 3. AC Sistemlerin Topraklanması	13
3. 3. 1. Elektrik Etkileşimi/Girişim	14
3. 4. DC Alçak Gerilim Sistemleri	15
3. 4. 1. DC Enerji Dağıtımı.....	17
3. 4. 2. DC Sistemler için AC Enerji Dağıtımı	17
3. 5. Elektriklendirmenin Etkileri	19
3. 6. Denetim ve Bakım	20
3. 7. AC ve DC gerilimlerde elektrikleştirme sistemlerinin bileşimi	21
3. 8. Birleşik Krallık'taki demiryolu elektrifikasyonu	22

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. 9. Akım Toplama Sistemleri.....	25
3. 9. 1. Katener Sistemleri	26
3. 9. 2. Rijit Katener Sistemi	28
3. 10. Katenerin Bileşenleri	31
3. 10. 1. Seyir Teli	31
3. 10. 2. Gergi sistemleri	34
3. 10. 3. Taşıyıcı iletken (Portör teli).....	36
3. 10. 4. Pandül	37
3. 10. 5. Elektrik Bağlantıları	38
3. 10. 6. Döner Konsollar	39
3. 10. 7. Toprak Teli	41
3. 10. 8. Direkler.....	42
3.10.9. Beton ve Demir Direklerin Avantajları ve Dezavantajları	44
3. 11. Pantograf.....	45
3. 11. 1. Pantografin Parçaları	46
3. 11. 2. Konvensiyonel ve hızlı demiryolu hatlarında çalışan trenleri	47
3. 11. 3. Pantograf Bakım ve Kontrollerinde Dikkat Edilecek Hususlar.....	49
3. 12. Üçüncü Ray Sistemi	49
3. 12. 1. Üçüncü ray hattının eksileri ve artıları	52
3. 13. Raylı Sistemlerdeki Elektrikli Lokomotiflerin Tarihi Gelişimi	53
3. 13. 1. Elektrikli Lokomotifler.....	55
3. 13. 2. Elektrikli lokomotif türleri.....	56
3. 13. 3. Amerika	56

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. 13. 4. Rusya	57
3. 13. 5. Çin	58
3. 13. 6. Hindistan.....	59
3. 13. 7. Japonya	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	62
4. 1. Genel Bilgiler	62
4. 1. 2. Elektrikli Cer Gücü Tedarik Sistemi (TPS Sistemleri)	63
4. 2. Elektrikli Demiryollarında DC Sisteminin Uygulanması.....	65
4. 3. Elektrikli Demiryollarında AC Sisteminin Uygulanması.....	67
4. 4. Türkiye	70
4. 5. Japonya	70
4. 6. Rusya	71
4. 7. Almanya	72
4. 8. Çin	72
5. SONUÇ VEÖNERİLER	74
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3. 1. Avrupa Ülkeleri Demiryollarında Elektrifikasyon Sistemleri.....	7
3. 2. Güç Tedariği ve Üretiminin Dört Aşaması.....	8
3. 3. Tipik Bir 25 kV Besleme Düzenlemesi Şeması	10
3. 4. Modern 25kV Havai Katener Hattı Bileşenleri	11
3. 5. OLE Sisteminin İşlevselliği.....	12
3. 6. Ototransformatör Sistemi	12
3. 7. Ana Batı Hattı İçin Besleme İstasyonlarının Konumu	13
3. 8. AC Sistemlerin Topraklanması	14
3. 10. Tren akım toplama sistem türleri.....	26
3. 11. Katener hattı ve diğer ekipmanların yerleştirilme mesafeleri	27
3. 12. Standart havai katener sistemi	27
3. 13. Rijit katener parçaları	28
3. 14. Temaskuvveti bakımından rijit ve standart katener karşılaştırması	29
3. 15. Tünel ve diğer tiplerde montaj: (a) Normal askı (b) Etap ortası bağlantı.....	31
3. 16. Seyir teli ve kesiti	31
3. 17. Alüminyum profil ve bakır seyir teli özellikleri.....	32
3. 18. Seyir teli dezeksmanı.....	33
3. 19. Tipik havai katener sistemine ait FEA analizi sonucu	33
3. 20. Tren pantografinin seyir telinde oluşturduğu osilasyon	34
3. 21. (a) Ağırlık sistemi, (b) Sabit gergili, (c) Otomatik gergili sistem.....	35
3. 22. Otomatik gergi sistemi	35
3. 23. Portör teli yapısı	36
3. 24. Portör teli	36
3. 25. Pandül montajı.....	37
3. 26. Pandül Tipleri: a) Esnek kayar pandül, b) Rijit kayar pandül	37
3. 27. Katener hatıları arasındaki elektrik bağlantısı	38
3. 28. Çekiye çalışan konsollar.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3. 30. Portal içindeki konsol	40
3. 32. Açık hattaki borulu döner konsolun yapı elemanları.....	40
3. 34. Direkteki topraklama bağlantısı	41
3. 35. Beton direk temeli	42
3. 36. Çelik direğin temele montajı	43
3. 37 . Portallı beton direk.	43
3. 38. Elmas biçimli bir pantograf.....	45
3. 40. Tipik bir pantografin parçaları ve trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf.....	46
3. 41. Taşıyıcı ray kotu seviyesine yerleştirilen üçüncü ray.....	50
3. 42. Üçüncü ray sisteminin tipleri.....	50
3. 43. (a) Üstten temaslı. (b) Alttan temaslı	51
3. 44. Alttan temaslı sisteme ait tren üstü ekipmanlar.....	51
3. 45. Almanyanın ilk elektrikli lokomotifi 1881	54
3. 46. ABD’de 1895 yılında açılan elektrikli lokomotif hattı.....	54
3. 47. (1898-1902) Valtellina hattında AC lokomotif	55
4. 1. TPS alt sistemleri.....	63
4. 2. DC ve AC sistemler maliyet karşılaştırması	68
4. 3. Dünyada elektrikli demiryolu ağının dağılımı	69
4. 4. AC ve DC sistemi ile Türkiye Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu	70
4. 5. AC ve DC sistemi ile Japon Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu	71
4. 6. AC ve DC sistemi ile Rus Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu	71
4. 7. AC ve DC sistemi ile Alman Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu.....	72
4. 8. AC ve DC sistemi ile Çin Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu.....	73
4. 9. Ülkelere göre demiryolu hatlarının elektrifikasyonu	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3. 1. İzin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri	6
3. 2. AC ve DC'ye göre elektrikleştirme teknolojisinin kriterlerinin karşılaştırılması.....	22
3. 3. 250 km/h hıza uygun seyir telinin özellikleri	32
3. 4. Katener sisteminin detaylı bölümleri.....	39
3. 5. Pantograf Fb700 ve Fb 800 özellikleri	47
3. 6. Pantograf DSA 150 özellikleri	48
3. 7. Pantograf DSA 250 özellikleri	48
3. 8. Üçüncü ray iletkeninin özellikleri	52
3. 9. Amerika'da kullanılan elektrikli trenlerin genel özellikleri sunulmuştur	57
3. 10. Rus lokomotiflerinin özellikleri sunulmuştur.....	57
3. 11. Çin'in bağlantı hattında kullanılan elektrikli trenlerin özellikleri bulunmaktadır	58
3. 12. Hindistan'nın geleneksel demiryolunda çalışan bir lokomotifin özellikleri	59
3. 13. Japonya'da kullanılan elektrikli trenlerin özellikleri sunulmuştur.....	60
3. 14. Avustralya'daki geleneksel demiryolu hatlarında çalışan elektrikli trenleri.....	61
4. 1. Farklı raylı sistem uygulamalarında hat gerilimleri	64
4. 2. İzin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri	65
4. 3. İstanbul'da bazı hatlara ait cer gücü sistemleri	66
4. 4. AC ve DC sistemlerin karşılaştırması	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
OLE	Havai Hattı Elektriklendirme Ekipmanı
MVA	Megavolt-Amper
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
ORCR	Hava Yolu Katı İletken Sistemi
FEA	Sonlu Elemanlar Metodu
EMU	Elektrik Çoklu Ünite
LHC	Lokomotif - Haçlı Antrenörler
YHT	Yüksek Hızlı Tren
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
ERAC	Demiryolları Elektrik Komitesi
DfT	Birleşik Krallık Ulaştırma Bakanlığı

1.GİRİŞ VE AMAÇ

Eski çağlardan beri, insanlar bir yerden bir yere hareket etmeyi önemli bir gereksim olarak görmüşlerdir, bu yüzden tüm hayatları boyunca ulaşımın gelişimi için çabalamışlardır.

18 yy. sonuna kadar Avrupa’da çok sayıda raylı demiryolları yapılmıştı, bu hatlar demirden yapılmıştı ve çeşitli vagonların bir yerden bir diğer yere hareket ettirmek için kullanılıyordu. İskoçya'nın Glasgow şehrinde, bir profesör, bozulan bir buhar makinesini tamire vermişti. Makineyi tamir eden genç adam 19 Ocak 1736'da doğmuş olan James Watt idi. Thomas Newcomen tarafından icat edilen buhar makinesi o devirde çok ilkel bir durumdaydı; çok az bir randıman verebilmek için çok miktarda buhar ve kömür harcıyordu.

Watt, makinenin tasarımı üzerinde çalıştığı sırada, enerji kaybının önlenmesi sonucunda makinelerden büyük yararlar elde edilebileceğini tasavvur etti. Böylece bu konudaki çalışmalarına başlayarak sayısız denemeler yaptı. Uzun çalışmalar neticesinde, 1769 yılında kendi adını taşıyan ilk buhar makinesini tasarladı. 1786 yılında tasarladığı bir diğer makine ise yalnız bir pompayı çalıştırmakla kalmayıp, bir değirmeni veya bir dokuma tezgâhını dahi çalıştırabilecek güce sahipti (Wisniak J., 2007).

Günümüzde Watt kelimesi, makinenin bir saniyede yapacağı belirli bir iş için gerekli olan gücü ölçmeye yarayan birimin adı olarak kullanılmaktadır. Watt kelimesi genel anlamda ampullerin üzerinde yazılı olacak şekilde elektrik ve elektronik alanlarında yaygın bir biçimde rastlanılan bir güç birimidir. Ampullerdeki watt sayısı, ampulün gücünü gösterir. 1 kilovat, bin watt'a eşittir.

Watt sayesinde, İngiliz bir teknisyen olan Richard Trevithick, watt tekniğinde buharla hareket edebilen ilk lokomotifini tasarladı. 1771-1833, İngiltere'nin Cornwall şehrinde yaşayan Richard, bu sayede demiryollarında buharla çalışan ilk lokomotif örneğini geliştirmiştir. Böylelikle, Avrupa'nın önde gelen mühendisleri bu tekniğin gelişimi üzerine çalışmaya başladılar.

Elektrikle çalışabilen ilk lokomotif fikri, 1834 yılında Iskoçyalı mühendis Davidson tarafından ortaya atıldı. Böylece, 1838 yılında Robert Davidson tarafından 6.4 km/s hıza ulaşabilen ilk elektrikli lokomotif örneği üretildi. Kurşun-asit bataryaları 1859 yılından sonra geliştirilmiş ve elektrikli araçlarda kullanım görmeye başlamıştır. Fakat, buharla çalışan lokomotifler, elektrikle çalışan lokomotiflerden hep bir adım önde olup, bu durum 1881 yılına kadar bu şekilde devam etmiştir. Sonuç olarak, mühendislerin yoğun çalışmaları neticesinde, elektrikli lokomotifler için ilk elektrikli ray sistemi 1881 yılının sonlarına doğru Almanya'nın Lichterflede şehrinde kuruldu. 2400m uzunluğunda olan hat, 180V DC basınçla çalışmaktaydı. Ray için gerekli olan enerji alman mühendis Wemer von Siemens tarafından geliştirilen KATENER sistemi ile sağlanıyordu. Siemens'in tasarladığı bu lokomotif üç vagona oluşmakla birlikte, 2.2 kW itici güçte bir motora sahipti. Lokomotifin çıktığı en yüksek hız 13 km/h olarak kaydedilmiştir (Lovland J., 2007).

Günümüzde, yük taşımacılığında halen oldukça önemli bir yere sahip olan demiryolları, coğrafyanın farklı bölgelerinin gelişmesine önemli bir katkı sağlamış ve sağlamaya devam etmektedir. Bugün daha çok gelişen kara, deniz ve hava yolları taşımacılıkta etkin gibi görünse de büyük ve ağır nakliyeler de halen, demiryolları öne çıkmaktadır.

Kara yollarının genişlemesiyle ve hava yollarının yayılmasıyla, ulaşım ve taşımacılıkta önemli ölçüde ilerleme kaydedilmiştir, fakat bilerle beraberinde ulaşımın maliyetini de artırmıştır. Bu tür ulaşım yollarının karşısında, Demiryolları yine önemli bir alternatif olarak görülmektedir, bunun nedeni ekonomik ve pratik olmasıdır (Zheng W., 2012).

Yolcular sürekli hızlı ve ekonomik ulaşım yolları arayışındadırlar. Tam da bu noktada demiryolları ulaşımı bu isteklere en iyi cevap veren bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde bile gelişmiş yerlerde bu alternatif arayışları halen devam etmektedir. Gelişmiş ülkeler demir yollarına sürekli yatırım yapmakta, demiryollu ağlarını genişletilmekte ve modernizasyon yapmaktadırlar. Tüm bu uygulamalar, yolculara hızlı, ekonomik ve pratik bir hizmet sunmak için yapılmakta. Demiryolları pratik ve ekonomik olması dışında aynı zamanda bir doğa dostudur.

Demiryollarının elektrifikasyon süreçleri ve bu süreçlerde atılan adımların hakkında yaptığım literatür araştırmaları, makale incelemeleri ve analizler doğrultusunda vardığım sonuçlara dayanarak, bu konu üzerinde bir araştırma yapma kararı alınmıştır. Böylelikle bir demiryolu hattının elektrifikasyon sürecinde atılması gereken adımları daha iyi kavrayıp anlaşılacağına inanıyorum. Bu araştırmada, demiryolu hattının elektrifikasyon için hangi koşulların yerine getirilmesi gerektiğini detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.



2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Clifford F Bonnett'e göre (2005) dünya'da birçok demiryollu bir geçiş sürecinden geçiyor, farklı çekiçi güçler yerini elektrikli çekiçi güçlere bırakıyor. Demiryollarının elektrifikasyon açısından gelişimlerini gözönünde bulundurursak, bu trendin yakın gelecekte daha da gelişeceğini anlayabiliyoruz.

Demiryollarının elektrifikasyonu genellikle yoğun tren trafiği olduğu yerlerde gerçekleşir, bu da bize trafiğin sabit fiyatların meşrutiye kazanması için yeterli olduğunu gösterir. Elektrifikasyon için AC ve DC kullanımı hakkında genellikle bir tartışma mevcuttur. Yüksek voltaj sistemlerinin (AC) sabit ve uygun fiyatları vardır, fakat bu sistemi kullanan lokomotiflerin maliyeti daha yüksektir. Orta gerilim sistemlerinde ise (DC) sabit araçlar daha pahalıdır. Fakat lokomotiflerin maliyeti, yüksek gerilim kullanan sistemle kıyasla daha uygun bir maliyete sahiptir. Elektrifikasyon sistemli demiryollarında kullanılan enerji genellikle iki çeşittir. Bunlar 50 Hz frekans kullanan yüksek voltajlı sistemler 25kV AC ve orta voltaj kullanan 750V DC sistemlerdir.

Baktığımızda, 25KV AC ve 750V DC sistemleri biribinden çok farklı sistemler olarak değerlendirilebilir fakat bu sistemler aynı özellikleri taşımaktadırlar. Bunun sebebi, şimdiye kadar elektrikli trenlerde kullanılan çekici motorların, 750V DC sistemleri kullanmasından kaynaklanıyor. Bu sistemlerin kullanımı, ray hatlarının kapasitesine ve yoğunluğuna bağlıdır. Şehirler arası ulaşım ve taşımacılık yapan yüksek hızlı trenlerde AC sistemi kullanılır. Yoğun trafik, yüksek kapasite ve düşük hız kullanan trenlerde ise DC sistemi kullanılır. Eğer trenler sadece dakikalar aralıkları ile çalışırsa, o zaman DC sisteminin AC sisteminden daha ekonomik olduğunu söyleyebiliriz.

Ayrıca, ağır raylı sistem olarak tanımlanan demiryollarında, banliyö hizmetleri elektrifikasyon olan yerlerde EMU olarak gerçekleştirilir. Metro ve hafif raylı sistemler günümüzde elektrikli sistemlerdir. Metro sistemlerinde elektrik enerjisi üçüncü ray denilen ve güzergah boyunca uzanan bir elektrik hattından sağlanır. Ancak hafif raylı sistemlerde elektrik enerjisi havai hattın sağlanmaktadır. Gerek banliyö, gerek metro ve gerekse hafif raylı sistemlerde yolculuk süreleri kısa olduğundan oturma yer adedi az, ayakta durma yer adedi fazladır.

Kiessling Friedrich'e göre (2009), Elektrik ile çalışan elektrikli demiryollarının, ekonomik ve ekolojik açıdan daha geniş bir perspektife sahiptir. Bu sistemin güvenilirliği enerji aktarımı için kurulan elektrik hattına bağlıdır, bu hattın çeşitli hava farklı mevsimlerde çeşitli hava koşullarına dayanıklı olması önemli bir unsurdur. Bu hatın sıkça bakıma girmesi önemli bir şarttır. Bu hattı kullanan yüksek hızlı trenler (250 km/h) söz konusu olunca, enerji aktarımının güvenliği önemi iki kat artar.

Railway Reform (2011), Demiryollarının elektrifikasyonu için genellikle yüksek maliyetli olduğu konuşulur, bazı ülkeler de gerçekleştirilmesi mümkün bile değildir. Elektrifikasyonlu demiryolları için trafo merkezleri, genel yapıları ve özel enerji aktarımı için mekanizmalar gerekmektedir. Elektrikli ray sistemlerinin bakımı düşük maliyetlidir. Eğer bir hattın yılda 40 milyon ton brüt yapma kapasitesi yoksa bu sistem bu hatta uygulanamaz. Eğer uygulanırsa zarar yapması kaçınılmazdır. Elektrikli demiryolları, diesel-elektrikli demiryolları ile kıyasla daha ekolojik ve çevre dostudur, çünkü bu tür demiryolları daha az karbon emisyonuna sahiptirler.

Sheilah Frey'e göre (2012), birkaç çeşit elektrifikasyon sistemleri bulunmaktadır. Elektrifikasyonun çok avantajları var fakat bu sistemin uygulanabilmesi için yüksek yatırımlar gerekmektedir. Elektrifikasyonlu demiryollarını kullanan elektrikli lokomotifler, hem daha fazla yük taşıyabiliyor ve dizel lokomotiflere göre 3 te 1 daha ucuz. Bu nedenle ciddi bir çalışma ile sektörde benzin, mazot ve petrol kullanımı % 50 ye düşürülebilir. Almanya diğer ülkeler demiryolu taşımacılığında elektrikli lokomotifleri kullanarak sağladıkları verim ile ekonomilerini daha güçlü kılabilmektedirler. Elektrik enerjisi ile çalışan hızlı trenler, çevreye zarar vermediği gibi diğer ulaşım araçlarına göre sessiz çalışarak gürültü kirliliği de üretmiyor. Hızlı tren hatlarının kapladığı alanlar otoyollarına göre daha azdır. Elektrik enerjisi ile çalışan trenlerin dezavantajları da vardır. Dezavantajların başında, yüksek maliyetleri gelir.

3. YÖNTEM

Elektrik enerjisi ile hareket eden trenlerdeki enerji tedariği genellikle ülkenin ulusal elektrik şebekesi tarafından yapılır. Elektrik enerjisinin sağlanması, elektrik kaynaklarının gerilim türünden ve güç kaynağı sisteminin farklılık göstermesinden dolayı, tüm elektrikli demiryolu hatları için aynı değildir.

Dünya genelinde demiryolu elektrifikasyon sistemleri için kullanılan birçok gerilim sistemi bulunmaktadır, bunların bazıları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir:

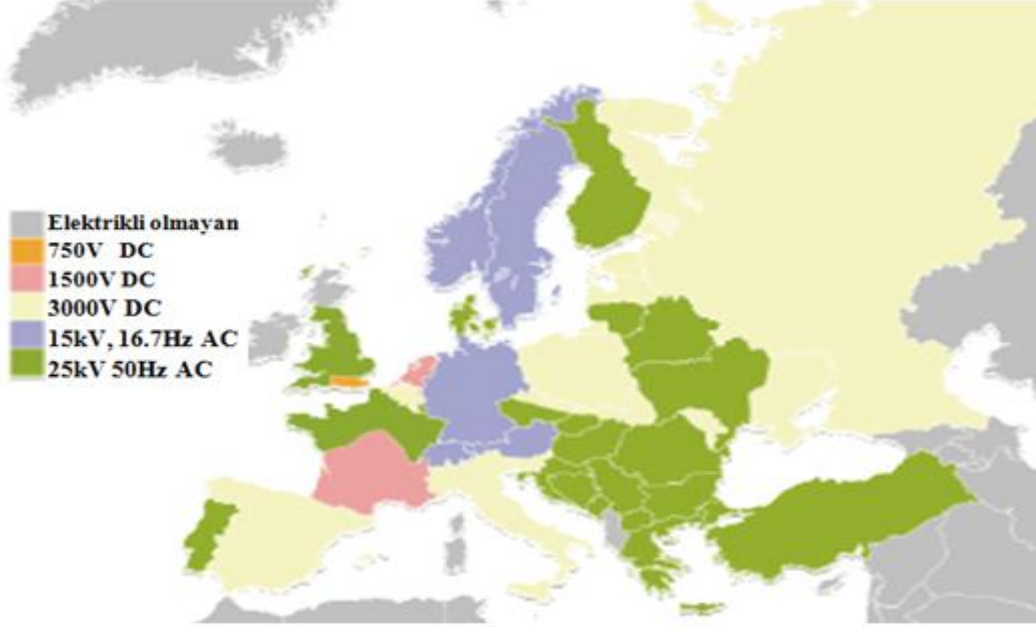
Çizelge 3. 1. İzin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri (Frey, 2012)

Elektrifikasyon Sistemi	En Düşük Gerilim (Geçici)	En Düşük Gerilim (Sürekli)	Nominal Gerilim	En Yüksek Gerilim (Sürekli)	En Yüksek Gerilim (Geçici)
600V DC	400V	400V	600V	720V	800V
750V DC	500V	500V	750V	900V	1kV
1.5kV DC	1000V	1000V	1.5kV	1800V	1950V
3kV DC	2kV	2kV	3V	3kV	3kV
15kV AC/16.7Hz	11kV	12kV	15kV	17.5kV	18kV
25kV AC / 50Hz	17.5kV	19kV	25kV	27.5kV	29kV

Gerilim tipi ve güç kaynağı sisteminin kullanımı için, SR EN 50163 ve IEC 60850 standartları uygulanmalıdır. Bu standartlar, sabit elektrik dönüştürücülerinde bulunan aynı mesafe ve zaman içerisinde elektrik enerjisi ile beslenen trenlerin sayısını dikkate alan güç kaynağı sistemlerinin durumlarını göstermektedir (NeTIRail, 2015).

Elektrifikasyon sisteminin tercihi ile ilgili olarak, 50 Hz endüstriyel frekanslı 25 kV AC faz sistemi ve 750V DC sistemi gibi, ana demiryolu hatlarının bilinen iki elektrik yolu bulunmaktadır. Başta belirli demiryolu hatları olmak üzere, söz konusu olan bu sistemler demiryolu ve tramvay hatları üzerinde daha düşük gerilimler halinde uygulanabilir. Orta Avrupa'da 16.6 Hz'de çalışan 15 kV AC faz sistemi ile Afrika'da 30 kV ve 3000 V'a kadar ulaşabilen gerilimlere sahip bazı DC rayları gibi çeşitli elektrifikasyon sistemleri de bulunmaktadır (Bonnett, 2005).

Ancak, bunlar yukarıda değinilen iki ana tipten daha yaygın değildir. Bu nedenle, Avrupa demiryollarında kullanılan elektrifikasyon sistemlerinin daha kapsamlı bir değerlendirmesi için, aşağıdaki Şekil 3.1'e bakınız.



Şekil 3. 1. Avrupa Ülkeleri Demiryollarında Elektrifikasyon Sistemleri (Frey, 2012)

Elektrikli trenlerde güç analizi 4 aşamaya ayrılır:

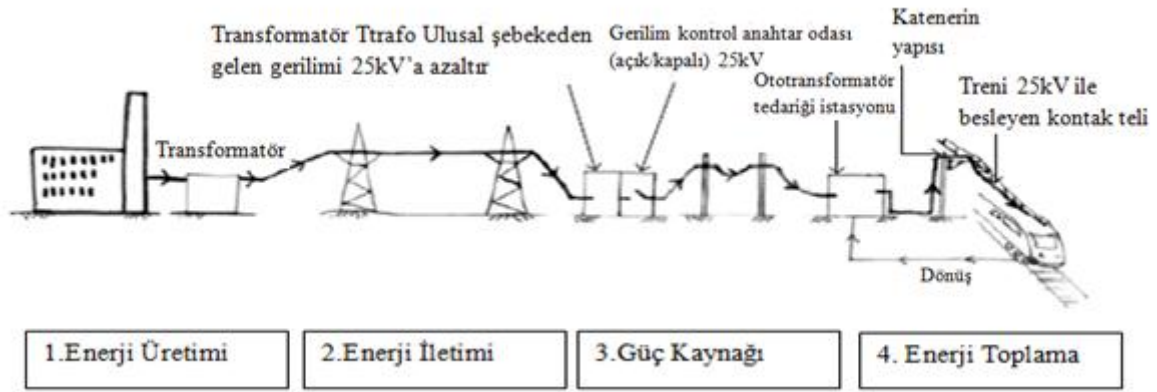
1. Enerji Üretimi
2. Enerji İletimi
3. Güç Kaynağı
4. Enerji Toplama

Güç, elektrik üreten bir kaynaktan yani bir elektrik istasyonunda oluşturulur ve daha sonrasında ulusal şebekenin gerilimi olarak bilinen yüksek gerilimli hatlarda, (yaklaşık 400.000 V) transformatörler yoluyla iletilir.

Besleme, yüksek gerilim sistemi (AC) ile yapılır. DC sisteminin güç iletimi sırasında meydana gelen küçük kayıplardan farklı olarak, AC sistemi uzun mesafeler boyunca elektrik iletimini daha pratik ve daha ekonomik bir yoldan sağlar.

Güç, iletim hatlarının yakınında bulunan ve 25.000 V'a kadar gerilimi azaltan ve katener sistemine güç ileten besleme trafolarındaki ulusal şebekeden alınır. Daha yüksek gerilimlerle elektrik iletmek daha ekonomik olmasına rağmen, artan gerilim ile, tarife ve ekipman maliyeti çoğalır (Baxter A., 2015). Bu nedenle, 25.000V'nin ana hatlar için en uygun gerilim olduğu tespit edilmiştir. Daha detaylı bir anlatım için, güç kaynağı ve güç üretiminin dört aşaması Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Güç, trenin çatısına bağlı olan bir "pantograf" vasıtasıyla trendeki bağlantı teli üzerinden iletilir. Elektrik enerjisi trende, motorları kontrolörler yardımıyla yönetmek için kullanılır.



Şekil 3. 2. Güç Tedariği ve Üretiminin Dört Aşaması (Baxter A., 2015)

3.1. AC Enerji Sağlanması

50 Hz endüstriyel frekansa sahip 25 kV AC sistemi altındaki elektrikli demiryolu şebekesi, sık aralıklarla çeşitli trenler taşıyan hızlı, şehirlerarası, çok-raylı bir demiryolu ağının ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmıştır. Bu sistemi geleneksel üç fazlı ve nötr dağıtım şebekesinden ayıran ana özellik, ray sisteminin kasıtlı olarak topraklanmış tek fazlı bir sistem olmasıdır (White R., 2011).

Demiryolu yönetiminin kendi elektrifikasyon şemaları olmasına rağmen, sistemlerin temel tasarımı aynıdır. Bu nedenle, böyle bir sistemin gerçekleştirilmesi adına, çalışanlar ve yolcular için prensipte güvenli olan ve tren operatörleri için yüksek derecede güç kaynağı sağlayan bir hava sistemi gereklidir. Bu güvenlik önemlidir, güç kaynağı sisteminin, tren tarifelerinin gerektirdiği performansı karşılamak için gerekli olan güç

seviyelerini sağlayabilmesini mümkün kılacaktır. Ayrıca, servis veya yük arttığında, elektrifikasyon sisteminin performansının gözden geçirilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, AC sistemine sahip elektrikli bir raylı sistemde, elektrik genellikle 132 kV veya daha yüksek olan bir ulusal ağdan elde edilir. Elektrik enerjisi, her bir besleme istasyonuna normal gerilimi 25 kV olarak iletilir. Bu besleme istasyonlarının mesafesi yaklaşık 50 km uzaklıkta olmalıdır ve bu gerilimde bir pantograf bağlantısı ile trenden alınan bir üst hava sistemi vasıtasıyla elektrik dağıtımı yapılmalıdır.

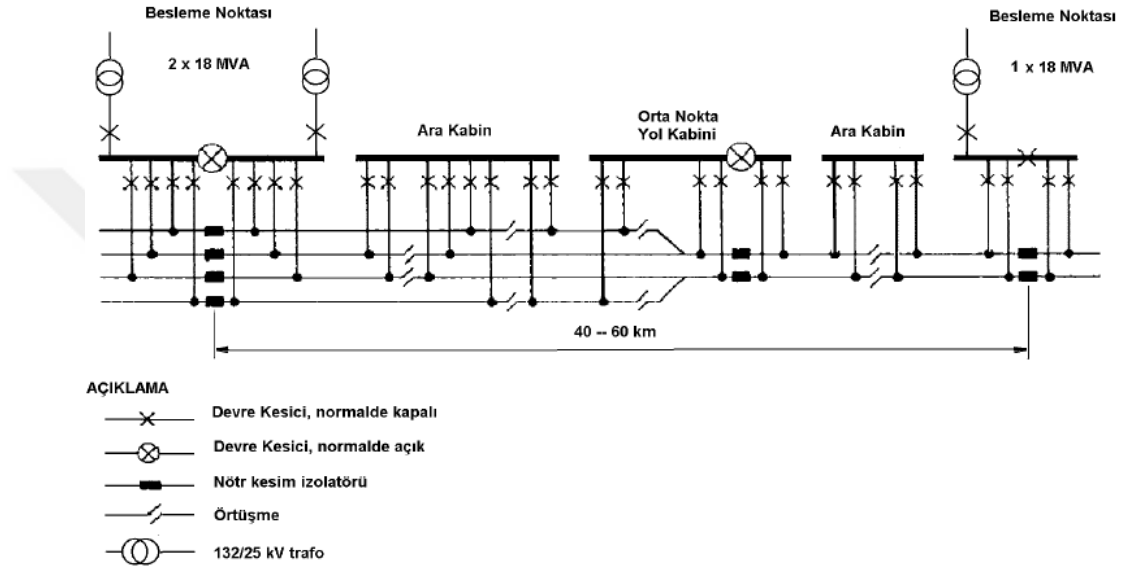
AC yüksek gerilim sistemi ile elektrikli tren yolları için güç kaynağı noktaları 40-60 km mesafede yer almaktadır. Bu mesafe, genel olarak hem normal hem de acil besleme koşulları altında demiryolu hattının uzunluğu boyunca uygun gerilim seviyelerini sağlar. Prensip, demiryolu besleme noktalarını 33 kV ile 400 kV arasındaki herhangi bir gerilimde bağlamak mümkünken, besleme sistemi arızalarını sınırlama ihtiyacı genellikle 132 kV'da veya daha yüksek bir gerilim seviyesinde bağlantı gerektirir (Bonnett, 2005).

Güç kaynağı noktalarının demiryolu hatlarına bağlantı için uygun yerlere kurulması ve maliyetinin hesaba katılması genellikle 132 kV'luk bir gerilim bağlantısı tarafından tercih edilmektedir. Gerilim besleme transformatörleri tek bir fazdan oluşur ve diğer tarafta üç fazlı besleme sisteminin iki fazı arasında bağlanır. Çift fazlar, gerilim dengesizliğini en aza indirmek için seçilir. Bu, bir trafo kullanım dışı olduğunda, her iki taraftaki elektriğe yakın ünitelerin aynı olan çift grubuna bağlanmayacaklarını garanti eder.

3.1.1. AC Sistem Besleme Noktaları

Normal koşullar altında, elektrikle beslenen her nokta, aşağıda Şekil 3.3'te gösterildiği gibi demiryolu elektrik şebekesine bağlı olan iki yüksek gerilim besleme noktasının toplamına yerleştirilir ve oradaki orta nokta tren kabinine güç sağlar. Orta kabinlerde, belirli demiryolu hattının segmentinde elektrik kesintisi durumunda teknik kişi tarafından kontrol edilen kapatma anahtarları bulunmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu olan bu kabinler ayrı ve paralel hatlarda da çalışmaktadır. Hava yolu veya üst kateneri bölme ya da paralelleştirme ara kabinlerde yapılır.

Kontrol rayındaki 25 kV AC besleme sisteminin tamamı, elektrik kontrol operatörü tarafından yapılır. Teknik operatör, göstergeleri denetlemek ve kontrol etmek için bir uzaktan kumanda sistemi (komuta) aracılığıyla, güç kaynağı istasyonlarındaki güç anahtarı ayırıcısı dahil tüm devre kesicilerle de çalışabilir. Bu, elektrik şebekesinin durumunu gösteren en az indirgenmiş bir diyagram aracılığıyla sürekli olarak 24 saat izlenen bir elektrik kontrol odası tarafından yapılır (White R., 2011).



Şekil 3. 3. Tipik Bir 25 kV Besleme Düzenlemesi Şeması (Bonnnett, 2005)

3.1.2. AC Hava Katener Hattı Bileşenleri

Belirli bir demiryolu hattı için hava sahası sisteminin 25 kV'lık bir AC güç kaynağı olarak kullanılması, güç aktarımının rolü ve önemi göz önünde bulundurularak mümkün olan en iyi ve güvenli bir şekilde kurulmalıdır. Bu hava besleme sistemi yatay olarak uzanan bir telden (seyir teli) oluşur ve sıkıca çekilir. Bu tel, daha ince tel sarkıtın (pandül) üzerindeki katener hattına bağlanmış durumdadır. Katener hattı ise, aralarında en fazla 65 m mesafenin bulunduğu direklerde çubuklar veya çerçeveler üzerinde tutturulmuştur. Trenle temas halindeki tel, pantograf bölümünde tek bir noktada aşınma yaratmaması için, katener hattı seyir telinin bulunduğu düzlemde hafif bir zikzak oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır. Düz yoldaki zikzak için sapma, yolun merkezinden 230 mm'lik bir mesafe içinde yapılır (Erkaya, 2005).

Demiryolu rayının üstündeki bağlantı telinin yüksekliği, 4.14m ve 5.94m'lik sınırlar arasında köprünün altından geçerken trenin rahat hareket etmesi ve hemzemin geçitlerde yasal gerekliliklerin karşılanması açısından farklılık göstermektedir. 25kV AC gerilim seviyesine sahip ve elektrik beslemesi için kullanılan katener örneğinin daha detaylı bir anlatımı Şekil 3.4'te sunulmuştur.

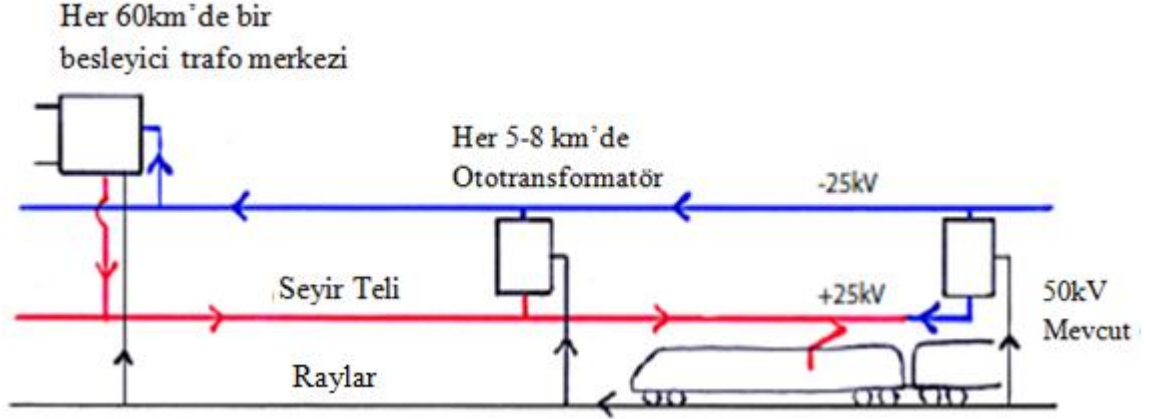


Şekil 3. 4. Modern 25kV Havai Katener Hattı Bileşenleri (Erkaya, 2005)

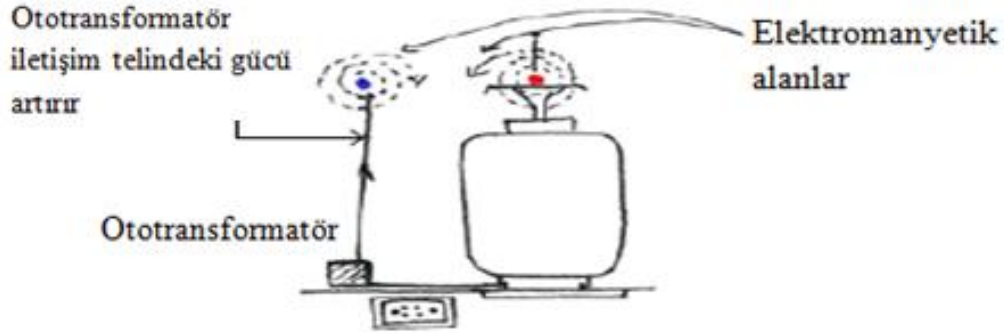
3.2. OLE Sistemi

Son yıllarda, dünyanın birçok ülkesinde, elektrikli tren yollarında yeni OLE (Havai Hattı Elektriklendirme Ekipmanı) sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemler hakkında bilgi sahibi olan kişiler için, söz konusu olan bu yeni sistem daha önce kullanılmış yapılardan farklı bir görünüme sahip değildir. Ancak bu yeni sistemler, kıtalardaki tren etkileşimi için Avrupa standartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmış olup, aynı zamanda bir dizi teknolojik ilerlemeyi de içermektedir. Tel gerilme sistemi, tellerin şiddetli bir havanın etkisi altında düşme ihtimalini azaltmak için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, bu sistemlerde daha az tel kullanımı söz konusudur (Baxter A., 2015).

Bu sistem bağlamındaki en önemli gelişme, Ototransformatör Sistemi olarak bilinir. Bu, elektrik şebekesinin çevrimiçi tedarikçilerinin trafo merkezleri aracılığıyla temin edildiği yoldur. Mevcut sistem, demiryolu hattı boyunca her 5-8 km'de bir kolon üzerinde konumlandırılmış takviye transformatörleri gerektirir. Ayrıca, OLE sisteminin işleyişini daha iyi anlamak için, Şekil 3.5'de daha ayrıntılı bir anlatım sunulmuştur. Şekil 3.6'da ise Ototransformatör Sistemi'nin işleyiş şekli sunulmuştur.



Şekil 3. 5. OLE Sisteminin İşlevselliği (Baxter A.,2015)

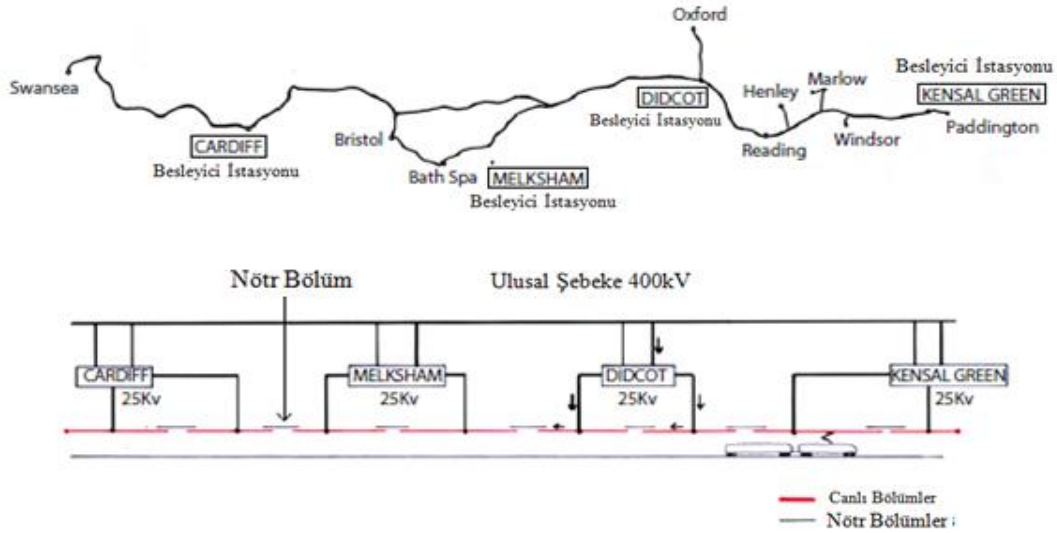


Şekil 3. 6. Ototransformatör Sistemi (Baxter A., 2015)

3.2.1. Tedarik İstasyonları

Ototransformatör Sisteminin kullanımı, gerekli istasyonların sayısını önemli ölçüde azaltır. Örneğin, Batı Kanalı'na giden güç kaynağı, yalnızca dört besleme istasyonu tarafından yapılmaktadır: Londra'daki Kensal Green, Didcot, Melksham ve Cardiff. Daha az bileşen, bina ve kablo gerektiğinden, besleme istasyonlarının sayısının azaltılması, elektrifikasyonun çevreye olan etkisini de azaltır.

Her bir besleme istasyonu, aşağıdaki Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, genellikle ayrı olan iki elektrik raylı kesiti sağlar. Nötr bölümler, farklı çevreleri ayırmak için sağlanmıştır (Baxter A., 2015). Aşağıda gösterilen demiryolu hattındaki besleme istasyonlarının konumu 60 km'lik bir mesafede yer almaktadır.

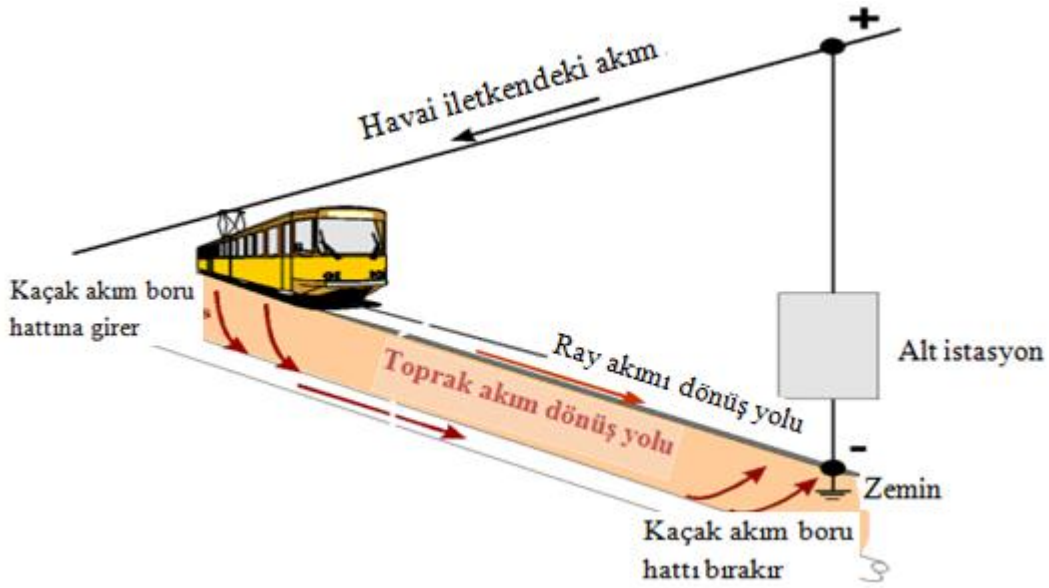


Şekil 3. 7. Batı Ana Hattı İçin Besleme İstasyonlarının Konumu (Baxter A., 2015)

3.3. AC Sistemlerin Topraklanması

Trenden ayrılan akım, ilk olarak demiryolu raylarında geçmektedir. Ana raylar birbirine ve diğer elektrikli aygıtlara düzenli aralıklarla bağlanır, bu nedenle demiryolu hattı boyunca ray bağlantısı kırılır. Bu topraklama bağlantısı, akımların raylardan geçerek en yüksek düzeye geçmesine neden olur ve böylece rayları toprağın potansiyeline yakın tutar. Bu, demiryolu içinde veya çevresinde çalışan personel için riski sınırlamaktadır.

Aynı nedenden dolayı, temas halinde olan ve yanlışlıkla çalıştırılabilen tüm metal öğeler de raylara bağlı durumdadır. Çıplak olan metal bir bileşen, izolatörün iletken hale geçmesiyle ya da kopmuş olan bir enerji hattına kazara temas etmesiyle birlikte yüksek gerilim içerebilir (Erkaya, 2005). Topraklama sistemi belirli bir akım düzeyinde kaçak olması durumunda, ilgili bölüme komuta ederek, arızalanmış olan kısımda enerjinin kesilmesini sağlar. Böylelikle, AC topraklama sisteminin çalışma şekli de, Şekil 3.8'de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3. 8. AC Sistemlerin Topraklanması (Ghazaleh L., 2013)

3.3.1. Elektrik Etkileşimi/Girişim

Elektriksel olarak bir AC faz gerilimi ile çalışan demiryolu hattında hareket eden trenin akımlarından dolayı manyetik alanlar oluşur ve bu manyetik alanlar harici elektrikli cihazlarla temas edebilir ve elektriksel etkileşime neden olabilir. Esas endişe konusu olan sorun, özellikle de demiryolu hattına paralel olduğunda, telekomünikasyon devrelerinin parazitleridir. Bu oldukça önemli bir sorundur ve demiryollarında elektrik ve elektronik ekipman kullanımının artmasına bağlı bir sorun olarak büyümeye devam etmektedir (Bonnett, 2005).

Demiryollarında, bu harici elektrik alanlarının büyüklüğünü kontrol etmek için demiryolu boyunca 3.2km mesafede bulunan yükselteç transformatörleri (trafolar) kullanılmaktadır. Söz konusu olan bu trafoların birincil sargıları katener sistemiyle, ikincil sargıları ise dönüş iletkeniyle seri bir biçimde bağlı durumdadır. Trafo etkisi, dönüş iletkenindeki akımın katener akımıyla aynı fakat ters yönde olmasını sağlar. Geri dönüş iletkeni daha sonra yükselteç transformatörleri arasındaki raylara bağlanır ve bu, dönüş akımının "emiş gücünün" raylardan ve dönüştürücülerin yerleştirilmesinin etkisine sahiptir. Geri dönüş iletkeni, katener sisteminin yakınında bulunur, böylece iki manyetik alan kısmen iptal edilir. Bu nedenle demiryolu tarafından üretilen harici alanın düşürülmesi sağlanır.

3.4. DC Alçak Gerilim Sistemleri

DC alçak gerilim sistemine sahip demiryolu hatları 750V DC, 1500V DC ve 3000V DC gerilimlerle güçlendirilebilir. Aynı enerji talebi için, gerilim ne kadar yüksek olursa, havi hattı (katener) içindeki akım o kadar düşük olur. Daha yüksek gerilimler kullanılırsa, çekici enerji trafoları demiryolu hattı boyunca daha uzun aralıklarla ayarlanabilir ve bu da daha ekonomik bir kurulum sağlayabilir. Herhangi bir elektrifikasyon sisteminde trafo merkezi yerleşimlerinin mesafesi, tren güç gereksinimlerine, tren yönüne, tren tarifesine ve sistem tasarımına bağlı olacaktır (Arup D., 2010).

Bununla birlikte, DC alçak gerilim sistemleri nispeten basit olmakla birlikte, kabaca, 750V DC gerilim sistemleri için tipik trafo merkezinin yaklaşık 1,5-2 km, 1500V DC sistemler için 3-4 km ve 3000V DC sistemler için 6-8 km olmakla birlikte, güç kaynağının trafo merkezleri arasında kalın kablolar ve kısa mesafelerde oluşturulması gerekmektedir. Servis sisteminden elektrik sağlayan trafolar 13.8 kV, 24.9 kV veya 34.5 kV gibi orta gerilimlerden oluşmaktadır. Her trafo merkezinde, kendi tedariğini sağlayan bir veya daha fazla elektrik transformatörü bulunur. Trafo, havai hattı sistemi (üst katener) veya üçüncü ray ile sürüş rayları arasında bağlanır. DC tipi sistemlerde, trafolar elektrifikasyon gerilimine ve trenlerin yüküne bağlı olarak 1 MVA'dan 6 MVA'ya kadar derecelendirilmiştir.

Hem tramvay hem de metro için en yaygın DC gerilimi 600V DC ve 750V DC'dir. Bununla birlikte İngiltere'de bazı demiryolu hatları, 1.5kV DC, 650 / 750V DC ile üçüncü bölme üzerinden bir güç kaynağı ve 3kV DC'den hava yolu veya katener aracılığıyla akım ile elektrikleştirilir. Böylece, üçüncü veya dördüncü hattan güç beslemesi, düşük gerilim için görülen en sık uygulama olmakla birlikte, 1kV üzerindeki gerilim seviyeleri normalde daha fazla güvenlik nedeniyle hava besleme sisteminde ortaya çıkar (NeTIRail, 2015).

Almanya'nın Hamburg kentinde, 1200V DC gerilimli bir güç kaynağı olarak üçüncü ray hatı kullanarak çalışan banliyö trenleri gibi istisnalar da mevcut durumdadır. Ayrıca, Fransa Alpleri'nde Culoze - Modane demiryolu hattında, 1976 yılına kadar üçüncü ray hatı temin edilmiş olan 1500V DC gerilim seviyesi kullanılmış olup, ardından hava hattı kurulmuş ve üçüncü ray hatı demiryolu kullanımdan kaldırılmıştır. DC sistemi ile DC hattının elektrik akımı, teknik olarak 750V DC güç kaynağı ile üçüncü devre sistemi kullanarak yapılabilir, ancak bu sistemdeki temel endişe noktası demiryolu geçişlerindeki güvenlik sorunudur çünkü insan ve hayvanlar için ölümcül sonuçlara yol açabilecek bir durumun söz konusu olması, bu noktalarda temasın gerçekleşmemesini gerektirmektedir.

Nitekim, elektrikli demiryolu için 1500V DC gerilim seviyesini tercih eden ülkeler arasında Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, İrlanda, Avustralya, Hollanda, Fransa, Yeni Zelanda, Portekiz, Danimarka vb devletler yer almaktadır. Ayrıca, 1500V DC sistemi İngiltere ve İngiltere'nin Manchester ve Doğu Londra'daki elektrifikasyonu için de kullanılmış olmakla birlikte, daha sonrasında bu sistem yerini 25kV AC sistemine bırakmıştır. 3kV DC gerilim sisteminin dünya genelindeki en büyük kullanıcıları arasında İtalya, İspanya, Polonya, Çek Cumhuriyeti, Slovakya, Belçika, Slovenya, Hırvatistan, Güney Afrika ve eski Sovyetler Birliği (ayrıca bu ülkelerde ve Amerika Birleşik Devletlerinde de dahil olmak üzere 25 kV AC / 50 Hz gerilim sistemi kullanılmıştır) bulunmaktadır (Frey, 2012).

3.4.1. DC Enerji Dağıtımı

DC gerilim dağıtım sistemi, trafo merkezi ve iletken raylar arasındaki aşağıdaki temel gereksinimleri karşılamalıdır (Bonnett, 2005):

- Demiryolu hattı boyunca herhangi bir yerde en yüksek hızlanma akımına geçmesine izin verilmesi.
- Çalışma saatleri boyunca her trende orta derecede yeterli bir gerilim sağlanması.
- Demiryolu bölümünde bakım ekibi için, tren seferlerini etkilemeksizin elektrik kesintilerine izin verilmesi.
- Herhangi bir elektrik dağıtım ekipmanının arızalanması durumunda bile trenin hareket etmeye devam etmesinin sağlanması.

DC gerilimi ile beslenen DC ray segmentinin tüm parçaları, trenler için gerekli olan güvenlik ve gerilimi sağlamak için genellikle birbirine yakın noktalardan tedarik edilir. Tüm DC güç şalterleri genellikle kapalı bir konumda tutulur. Raylar üzerindeki elektriksel direnç nedeniyle, trendeki gerilimi belirleyen trafo merkezleri arasındaki mesafedir. En ekonomik DC güç dağıtım sistemine, trafo için gerekli gerilimi sağlayabilecek trafo merkezleri arasındaki en geniş alanda ulaşılır. Tipik olarak, istasyonlar maksimum yüke bağlı olarak 4 km'den az olmayan veya 7 km'den fazla olmayan aralıklarla demiryolu hatları boyunca yerleştirilir.

3.4.2. DC Sistemler için AC Enerji Dağıtımı

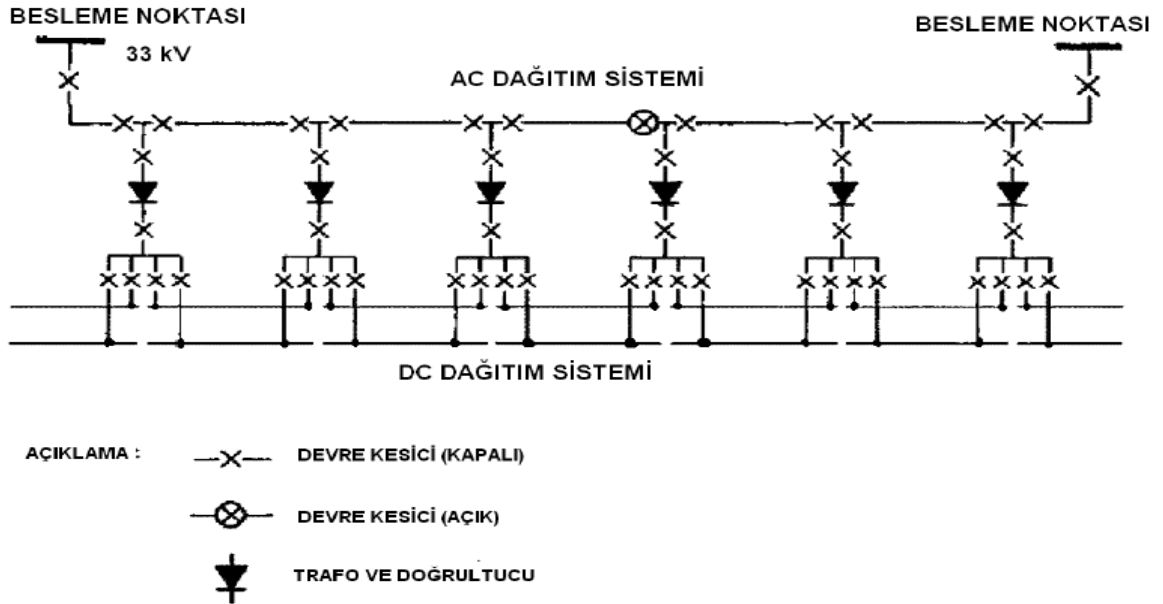
Düşük gerilimli DC elektrifikasyonu için iki ayrı dağıtım sisteminin sağlanması gerekmektedir. Tüm akım trafo merkezi için ulusal şebekelerden veya demiryolu idare istasyonundan enerji dağıtmak için üç fazlı AC dağıtım sistemi gereklidir.

Her çekişte, trafo demiryolu boyunca konumlandırılır, DC'de dönüşüm ve düzeltme yapılır ve daha sonrasında elektrik mevcut akım raylarına doğrudan iletilir. AC Dağıtım Sistemi, her bir trafo merkezine, iki besleme noktası arasında aralıksız bir "ana"

kablo ile yüksek gerilim kaynakları iletmektedir. Tüm giriş ve çıkış kabloları ile her bir ayırıcı için, her trafoda bir devre kesici bulunmaktadır. AC ve DC sistemlerinin elektrik dağıtım şekli daha detaylı bir biçimde Şekil 3.9'da sunulmuştur.

Normal koşullar altında, açık konumda tutulan besleme noktası arasında tek bir devre kesici bulunur ve trafo sadece en yakın besleme noktasından beslenir. Bir arıza durumunda, tüm alt istasyonlar iki besleme noktasından da elektrik alabilir. Bu nedenle, AC güç kaynağı sisteminin tasarımı, trafonun toplam enerji talebine karşın, ulusal elektrik şebekesinin iki besleme noktasından iletilebilecek şekilde olmalıdır. Gerilimin dağılım seçimi, bu toplam enerji talebine ve uygun besleme noktaları arasındaki mesafeye bağlıdır.

Yüksek gerilimlerin kullanılması, sistem tarafından çekilen akımı azaltır, böylece enerji sistemi kayıplarını küçültür, gerilimi azaltır ve besleme noktaları arasında daha büyük mesafeler sağlar. Bununla birlikte, daha zayıf gerilimlerdeki sistemlerin daha düşük ekipman maliyeti vardır, ancak gerilim düşüşünü telafi etmek için veya demiryolu hattı boyunca arzın daha sık alınmasını gerektirecek işlevler söz konusudur.



Şekil 3. 9. DC elektrikleştirme sisteminde AC ve DC enerji dağıtım (Erkaya, 2005)

3.5. Elektriklendirmenin Etkileri

Son yıllarda, dünyadaki birçok demiryolu, farklı çekici güç biçimlerinden, elektrikli çekici güçle çalışan sistemlere dönüştürülmektedir. Eğilimler, bunun uzak bir geleceğe kadar devam edeceğini göstermektedir. Diğer mühendislik alanlarında ve işletme faaliyeti açısından elektriklendirmenin demiryolu sistemlerini büyük ölçüde etkilediği deneyimlenmiştir, buna ek olarak demiryollarının modernizasyonunda büyük bir başarı ifade etmekle birlikte, yolcu ve malların hızlı bir biçimde taşınmasında ve nakliye sırasında rahatlığı sağlamadaki elektriklendirmenin önemi göz ardı edilmemelidir (Bonnett, 2005). AC yüksek gerilim elektrikleştirilmesi ile birçok ciddi etki söz konusudur ve bu sistem genellikle başka bir sistemin olmadığı modern dönüşüm için tercih edilir.

Mevcut bir ray hattı için elektrikleştirme entegrasyonu sırasında dikkate alınması gereken hususlar şu şekildedir (Bonnett, 2005):

- Demiryolu hattının elektrikleştirilmesi için beslenme şekillerinin seçilmesi.
- Demiryolu üstündeki köprü ve üst geçitlerde havai katener hattına yeteri kadar yükseklik sağlanabilmesi için yapısal değişiklik gereksinimi.
- Yaya üst geçitlerinde, koruyucu duvarların yüksekliklerinde değişiklik yapılması.
- İletken rayların kullanımı, yol kenarına yapılacak çitlerin ve yaya geçişine engel olacak yapıların standartlarının yükseltilmesi.
- Yol kenarında kullanılacak olan vinç veya başka hareketli ekipmanların oluşturacağı tehlikeler için alınacak önlemlerin artması.
- Yolda veya raylar üzerinde çalışan personel için koruma ve güvenlik tedbirlerin artırılması.
- Yol devreleri, sinyalizasyon, telefon, bilgisayar, kapalı devre televizyon gibi diğer donanım üzerinde elektrik girişiminin oluşabilmesi.

3.6. Denetim ve Bakım

Demiryolu altyapısının diğer kısımlarında olduğu gibi, demiryolu elektrikleştirilmesi ile ilgili tüm ekipmanların bakımı, hizmetin uzun süre istikrarlı olması adına, ilgili demiryolu idaresi için gerekli ve zorunlu bir uygulamadır. Her bir demiryolu idaresi, hem içte hem de dışta bulunan tüm elektrikli teçhizatı demiryolu donanımındaki ekipmanla birlikte denetlemek ve kontrol etmek için ayrı bir bakım kuruluşu oluşturmaktadır. Standart elektrikli ekipman, nitelikli ve deneyimli personel yönetmelikleri tarafından tanımlandığı şekilde kontrol edilmelidir. Bununla birlikte, elektrikli alanın dışındaki diğer bileşenler de söz konusudur, ancak bunlar ayrıca özel bir denetime ve bakıma tabii tutulmalıdır (Erkaya, 2005).

Bu kategoride incelenecek ve bakımı yapılacak bileşenler şunlardır:

- Üst hava yapıları ve katener tutucuları.
- Sütunlar/portallar için temel prensipler.
- Kablo hatlarının yönü ve destek yapıları.
- Kablo bağlantıları, üst ve yeraltı geçitleri.
- Direksiyon ekipmanlarının kılavuz yuvaları ile elektrik bağlantıları.

Elektrikleştirmenin, raylı sistemde tüm işletme personeline ve görevleri gereği raylara yakın olmak durumunda olanlara yeni bir boyut getirdiğinin altını çizmeliyiz. Tüm çalışanların görevleri sırasında, bir kaza veya olası bir başka durumda karşılaşmaları muhtemel tehlikelerle ilgili alınması gereken tüm önlemler hakkında eğitime tabii tutulmaları ve bilinçli olmaları gerekmektedir. Sinyal lambalarının temizlenmesi, ağaçların budanması veya istasyon gölgeliğinin boyanması gibi basit işler sırasında bile yüksek gerilim taşıyan elektrikleştirme aksamalarının varlığı tehlike arz etmektedir.

3.7. AC ve DC gerilimlerde elektrikleendirme sistemlerinin bileşimi

Demiryolu hatlarında birleşik elektrikleendirilmenin gerçekleştirilmesi, trenlerin farklı hızlarda ve sıkışık bir program içerisinde hareket etmeleri sonucunda mümkündür. Ancak bu durum sabit enerji tedariğini sağlamada bazı zorluklar yaratmakla birlikte, böyle bir güç kaynağı seçimi denetim görevlileri ve operatörleri için büyük bir sorumluluk gerektirmektedir. Böyle bir alternatifin gerçekleşmesi ancak üçüncü ray hattının elektrik tedariğini sağlamak adına monte edilmesiyle birlikte mümkün olabilir. Bunun nedeni de demiryolu hatlarının bir kısmı AC gerilim sistemine sahipken, bir diğer kısmının da alçak gerilimli DC sistemi ile elektrikleendirilmiş olmasından kaynaklıdır (Arup D., 2010).

Bu çeşitli yollarla gerçekleştirilebilir, olası birkaç birleşik sistemin örnekleri aşağıda sunulmuştur(Erkaya, 2005):

- Demiryolu hattının bazı bölümlerinin AC elektrikli havai katener ve bazı bölümlerinin kablo veya üçüncü iletken ray üzerinden DC ile donatılması.
- Yüksek trafik yoğunluğuna sahip AC gerilimli elektrikleendirme ile DC gerilimli düşük trafik yoğunluğuna sahip elektrikleendirme arasındaki farklılıkların ayırt edilmesi.
- Temel istasyonları önemli mesafelerdeki endüstriyel bölgelere bağlayan ve geniş frekansa sahip demiryolu hatlarının bazı segmentleri için AC şebekeli katenerin kullanılmasının yanı sıra diğer demiryolu segmentlerinin üçüncü iletken ray üzerinden DC gerilim sistemi ile donatılması ve bunların bazı istasyonları çift yönlü taşıt talebini önlemek için her iki sistemle birlikte çalışması.

Bu nedenle Çizelge 3.2, AC ve DC sistemlerinin farklılıklarını vurgulamak üzere sunulmuştur.

Çizelge 3. 2. AC ve DC'ye göre elektrikleştirme teknolojisinin kriterlerinin karşılaştırılması (Arup D., 2010)

Teknoloji Türü	Denenmiş Teknoloji	Teknoloji Canlılığı	Ticari Geçerlilik	Referans Vaka Altyapısı ile Uyumluluk	Referans Vaka Servis Seviyeleri ile Uyumluluk
DC Elektrifikasyon Sistemleri	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	EVET
Ticari Frekansta AC Elektrifikasyon Sistemleri	EVET	EVET	EVET	EVET	EVET
Ticari Olmayan Frekansta AC Elektrifikasyon Sistemleri	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	EVET
AC ve DC Elektrifikasyon Sistemlerinin Kombinasyonu	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	EVET
Yol kenarında Enerji Depolama	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	EVET
Yol kenarında Hidrojen Yakıt Hücresi Güç Üretimi	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	EVET

3.8. Birleşik Krallık'taki demiryolu elektrifikasyonu

Birleşik Krallık'taki demiryolu hatlarının elektrikleştirilmesi ilk olarak 1883 yılında İngiltere'nin Brighton kentinde mühendis Magnus Volk tarafından gerçekleştirildi. Daha sonrasında ise, Birleşik Krallık'ta demiryolu elektrifikasyonunun bir artışı söz konusu olmakla birlikte, 1920 yılında Demiryolları Elektrik Komitesi (ERAC) kurularak, bundan yaklaşık bir yıl sonra 1500 V DC sistemi ile demiryollarının elektrifikasyonu için ilk ulusal standartın oluşumu söz konusudur (Anonim, 2018 a).

Elbette ki, demiryollarının ve teknolojinin hızlı gelişimi, oluşturulan bu standartın daha sonrasında değişime uğramasına neden olmuştur. 1956 yılında, 25 kV AC elektrifikasyon sistemi, havai hatlar için yeni bir standart haline geldikten sonra, 1959-66 yılları arasında Londra'yı Manchester ve Liverpool'a bağlayan ana rayın ilk elektrifikasyonu için kullanıldı (Anonim, 2018 a).

Günümüzde, buradaki demiryolu ağının üçte biri elektrikleştirilmiş olup, bu rakam Birleşik Krallık demiryolu hatının yaklaşık 572 km'lik bir kısmını karşılamaktadır. 2010 yılına ait demiryolu ağ raporuna göre, tüm demiryolu hatlarının yaklaşık % 60'ı AC ve DC sistemleri ile elektrikleştirilmiş durumdadır.

Bununla birlikte, daha önceki güç kaynağı standartlarında olduğu gibi, elektrik kesintilerinde de elektrik kayıpları oluşmuş ve dolayısıyla raylı uygulamalar için güvenilir güç transformatörlerine olan talep ortaya çıkmıştır. Söz konusu olan bu transformatörler elektrik akımlarını ölçmeleri ve raylı ulaşım için yüksek akımlarda çalışmaları ile düşük güç kayıpları ve elektrikli trenlerin güvenli çalışmasını sağlamaları için özel olarak tasarlanmıştır.

Gelişmiş elektrik altyapısının bir sonucu olarak elektrik hattı arızalarının sayısında azalma ile demiryolu sektöründe hızlı bir gelişim söz konusudur. Bu gelişmenin büyük bir kısmı, havai hattından (katener) ve üçüncü ray hattının güç kaynağından oluşmaktadır. Üçüncü ray hattının elektrik hattı daha düşük bir gerilime sahip olmasından kaynaklı, havai hattından çok daha kompakt bir yapıya sahip olup, 1500V DC gibi bir güç aktarımı sağlamaktadır. 25 kV AC'den daha yüksek bir elektrikle çalışabilen hava yolu hatları, elektrikle çalışan demiryolları için en yaygın elektrik kaynağı olarak tercih edilmektedir.

Bununla birlikte, Birleşik Krallık Ulaştırma Bakanlığı (DfT) tarafından 2017 yılında alınan kritik bir karar sonucunda Birleşik Krallık'taki demiryollarının tüm elektrifikasyon planlarına olan güvenin azalmasına yol açmıştır. Geçen yıl, İngiltere Ulaştırma Bakanı Chris Grayling Kuzey, Midlands ve Galler'deki üç büyük demiryolu elektrikleştirme projesinin iptal edildiğini açıklamıştır. Bu karar Cardiff ve Swansea, Kettering ve Sheffield ile Windermere ve Oxenholme arasındaki demiryolu hatlarını büyük bir ölçüde etkilemiştir. Ulaştırma Bakanlığı Genel Sekreteri tarafından oluşturulan bir rapora göre, beklenenden daha yüksek olan bu üç ana elektrifikasyon projesinin iptal edilmesinden sonra, bu durumun 433 milyon sterlinlik bir tasarruf sağlayacağı tahmin edilmiştir (Anonim, 2018 b).

Birleşik Krallık Ulaştırma Bakanlığı tarafından, dizel-yolcu trenlerinin yolculara elektrikli trenlerden daha fazla fayda sağlayacağı öne sürülmüştür. Böylelikle, bu durum hakkında daha detaylı bir araştırma yapılmasını talep eden İngiliz Başbakanı, bu konuyu tekrardan gündüme getirmiştir. Bu araştırma doğrultusunda maliyet oranına göre, elektrifikasyon maliyetlerinde 295 milyon sterlin ile 433 milyon sterlin arasında bir artış olduğunu ve bunun sonucunda, bu projelerin iptal edilmesinin Temmuz 2017'de onaylandığı açıklanmıştır. Ancak bu durum herkes tarafından anlayışla karşılanmadı ve Shadow Taşımacılık Sekreteri Andy McDonald, projenin iptalini "felaket" olarak nitelendirirken, gelecekteki hükümetin "bu demiryolu hatlarının tam olarak elektrikleştirilmesini yeniden tesis edeceğini" vurguladı.

Ancak, 2012 yılının raporuna göre, 38 milyar poundluk program açıklandığında, o dönemin Başbakanı David Cameron, Victoria döneminden bu yana yapılan en büyük yatırımın gerçekleştiğini belirtti. Söz konusu demiryolu hattının elektrikleştirilmesinin tüm ülkeyi kapsayacak şekilde yapılacağı açıklanmıştır. Bu plan, daha hızlı ve daha güvenilir yolcu hizmetleri getirecek hayati bir fırsat olarak değerlendirildi. 2012 yılında DfT, 2014-2019 yılları arasında Network Rail tarafından yapılacak geniş bir elektrifikasyon projesini duyurdu. İngiltere ve Galler'deki demiryolları için 34,3 milyar sterlinlik bir bütçeden, 3.7 milyar sterlin yukarıda bahsedilen büyük projeler de dahil olmak üzere oluşturulacak elektrifikasyon planları için harcanacaktı.

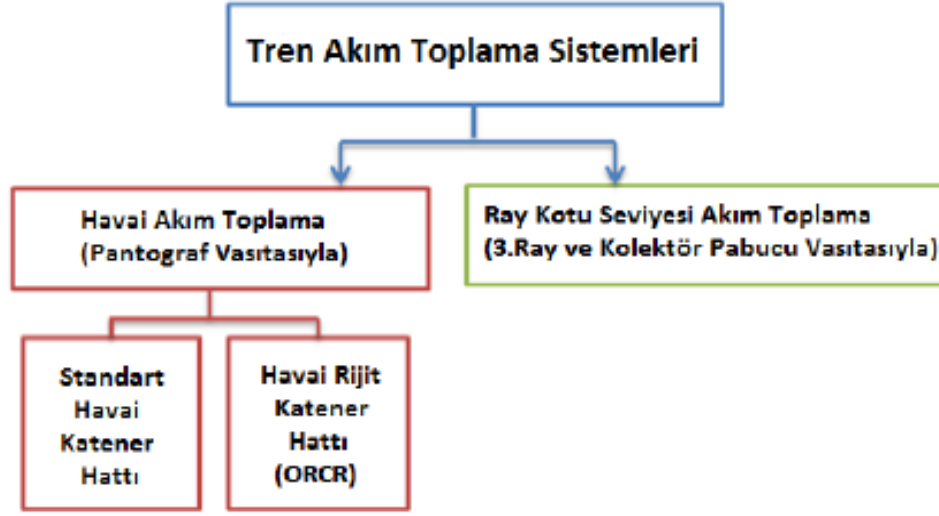
Ancak, Network Rail tarafından sunulan fiyat tahminleri DfT tarafından uygun görülmedi. Örneğin, demiryolu elektrifikasyon planının maliyeti, 2013 yılında 874 milyon sterlin iken, 2015 yılında, Doğu Sahil yolunun elektrifikasyonundan yedi kat daha pahalı hale getirilerek, 2015 yılında 2.8 milyar sterline yükselmiştir. Birleşik Krallık'ın ulaştırma bakanı olan Jon Johnson, İngiltere'nin demiryollarından 2040'a kadar dizel trenleri kaldırmaya yönelik iddialı bir hedefi ortaya sunan kişi oldu. Demiryolu endüstrisindeki pek çok yorumcu, yolcu hizmetleri ile malların yoğun miktarda ve hızlı bir şekilde nakledilmesinde elektrifikasyonun gerekli olacağını öne sürdü. Mühendis Lillian Greenwood, demiryolu kapasitesini arttırmanın en iyi yolunun, Avrupa'daki diğer ülkeler gibi elektrikli hatlara geçişin en etkili çözüm yolu olacağını belirtti. Çünkü tüm Avrupa ülkelerinde elektrik şebekelerinin avantajları gözle görünür bir dereceye sahipti. Bununla ilgili olarak, Mayıs sonunda, Galler Demiryolları Komitesi tarafından hazırlanan bir

raporda, elektrikleştirme ile ilgili hükümet politikasındaki değişiklikler ve özellikle İngiltere'nin demiryolu iyileştirmeleri için harcanan paranın sadece % 1,5'ini alan Galler için ortaya çıkan etkiler hakkındaki kaygılar dile getirildi. Galler Demiryolları Komitesi, Birleşik Krallık hükümetinin büyük elektrifikasyon projelerini iptal ederek en az 433 milyon paund tasarruf ettiğini ve bu paranın Galler demiryolu taşımacılığının finansmanı için yeniden yatırılması gerektiği aktarıldı (Anonim, 2018 c).

3.9. Akım Toplama Sistemleri

Trenlerin hareket etmesi için gerekli olan elektrik enerjisi, demiryolu hattına paralel olarak kurulan kontak transformatörü güç trafosundan iletilir. Şekil 3.10'da iki ana akım toplama sistemi sunulmuştur. Bunlar, elektriğin katener sisteminden beslendiği ve trenin çatısına bir pantograf ile monte edildiği hava yolu sistemleridir ve buna ek olarak, trenin güç kaynağının, trene monte edilen (motor pabucu) bir ekipman aracılığıyla yapıldığı üçüncü bir tren yolu sistemi de söz konusudur.

İki tip havai hattı mevcut durumdadır, bunlardan birincisi standart havai katener hattı (veya esnek), ikincisi ise havai rijit katener hattıdır (Hava Yolu Katı İletken Sistemi, ORCR). Her iki sistemde de elektrik enerjisini trene taşımak için bir pantograf kullanılır, bu ekipman trenin çatısına monte edilmiş olup hava kompresörünün basıncı ile çalışır ve seyir teline ulaşan bu basınç sonucunda tren gerekli olan güç kaynağına sahip olur. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan iki çeşit pantograf türü bulunmaktadır, bunlar 1600 mm veya 1950 mm genişliğe sahip pantograf örnekleridir. Pantograf kömürleri, tek ve çift kollu olarak üretilen pantograf başlıklarına yerleştirilir. Karbon şeritlerini içeren bu pantograf kömürlerinin en önemli avantajı düşük sürtünme katsayısı, düşük katener teli aşınması ve hafiflik gibi özelliklere sahip olmasıdır. Bununla birlikte, karbon kömürünün avantajları arasında aynı zamanda elektriksel ve termal iletkenliğinin oldukça iyi olmasına ek olarak, erimeyen ve en önemlisi de direnç gösteren bir yapıya sahip olmasıdır (Özmen İ., 2014).



Şekil 3. 10. Tren akım toplama sistem türleri (Özmen İ.,2014)

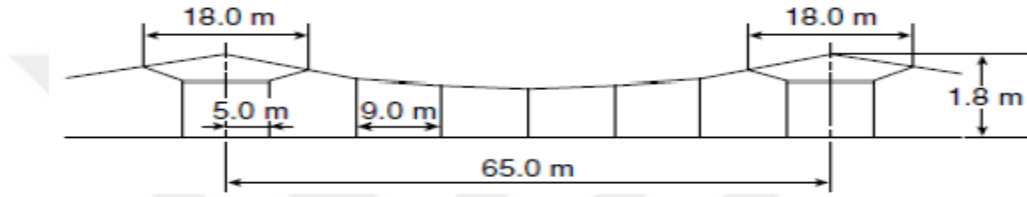
3.9.1. Katener Sistemleri

Havai hat sisteminin (katener) rolü, trafo merkezlerinden demiryolunda hareket eden taşıtlara elektrik aktarımıdır. Elektrik enerjisi, lokomotifler tarafından kullanılır ve söz konusu olan bu elektrik aracın çatısında bulunan pantograftan vasıtasıyla iletilir. Pantograf, üst kontak teli ile doğrudan ve sürekli temas halinde olmalıdır. Bu nedenle, hava hattının her zaman pantograf menziline olması gerekmektedir ve pantograf sürekli olarak kesintisiz güç ve iyi kalite sağlamak için hava yolu hattı ile bağlantı halinde olmalıdır.

Bu koşulları karşılamak için, hava yolu sistemi genel olarak aşağıdaki gereksinimler doğrultusunda tasarlanmalıdır:

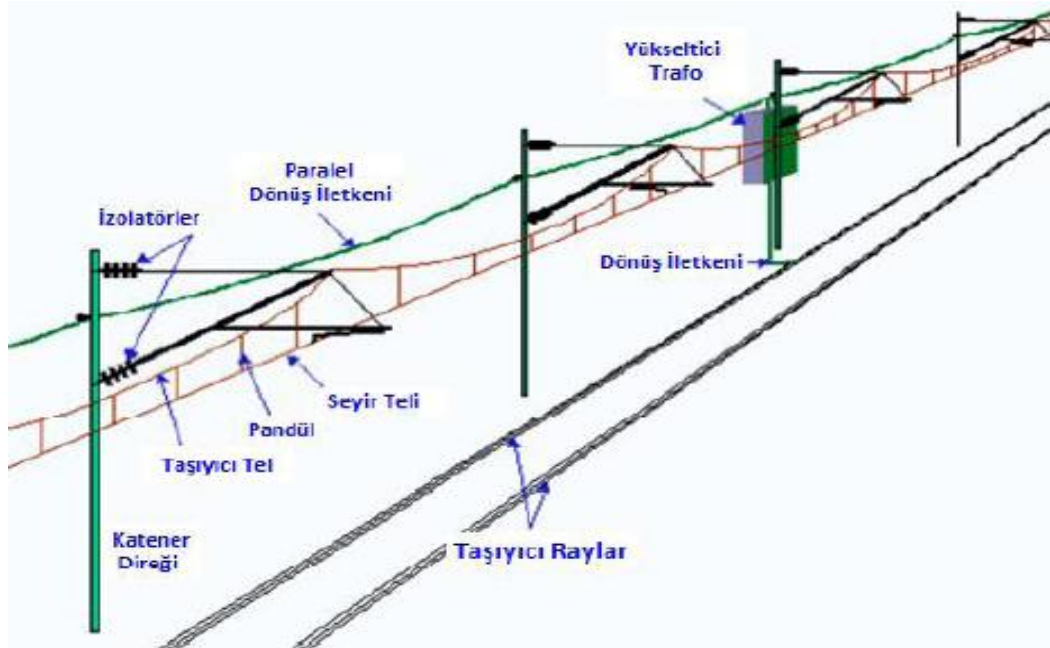
- Demiryolu hattının genel özellikleri ve trenlerin o hat boyunca ilerleyeceği hıza dikkat edilmesi.
- Hava hattının yüksekliği, pantografin elektriği mümkün olan en iyi şekilde toplamasını sağlamak için tek tip olması ve böylece elektrik kaybının en aza indirgenmesi.
- Çalışma hayatında büyük güvenilirlik ihtiyacı duyulan titreşime, korozyona, ısıya vb dayanacak kadar sağlam olması.

Katener, demiryolu hattına yatay olarak monte edilir ve pantografa seyir teli ile birlikte gerdirilmesi ve sıkılması gereken ray hattı boyunca sağlam bir temas temin etmelidir. Bunu sağlamak adına, seyir teli pandül olarak adlandırılan tel üzerinden güç iletim teline bağlanır ve bunlar dikey olacak şekilde aralarında belli bir mesafe ile sabitlenir. Katenerin iki ayağı arasındaki mesafe, demiryolu hattı kategorisine ve çoğunlukla fren bölgelerine (demiryolu eğrilerinde) bağlı olarak düz çizgi başına 22 ila 65 m arasında değişmektedir. Şekil 3.11'de, diğer iletken ekipmanlarla ve hızlı demiryolu hatlarına yönelik olarak monte edildiği mesafelerle bir katener hattı gösterilmektedir (NeTIRail, 2015).



Şekil 3. 11. Katener hattı ve diğer ekipmanların yerleştirilme mesafeleri (NeTIRail, 2015)

Şekil 3.12'de, katenerin tüm parçaları ile birlikte standart bir sistemini göstermektedir, örneğin: Katener Direği, İzolatörler, Paralel Dönüş İletkeni, Taşıyıcı Tel, Pandül, Seyir Teli, Taşıyıcı Raylar, Dönüş İletkeni ve Yükseltici Trafo.



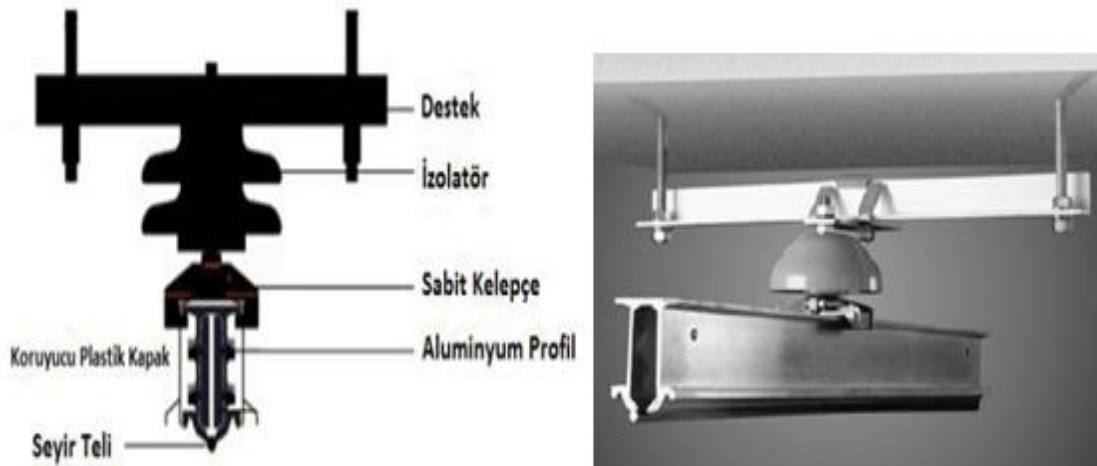
Şekil 3. 12. Standart havai katener sistemi (Özmen İ., 2014)

Ray hattı üzerindeki trenin hızı, katener direkleri arasındaki açıklık ve iklim koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir ve buna ek olarak birkaç farklı türde katener askı sistemi mevcut durumdadır. Basit askı (veya trolley tipi askı) olarak adlandırılan sistemde taşıyıcı tel ve pandüller kullanılmaz. Bunun yerine, yalnızca seyir teli kullanılır. Bu sistem işletme hızının düşük olduğu hatlarda, park sahalarında, atölye ve depo bölgelerinde basit ve ucuz olması sebebiyle tercih edilir. Orta ve yüksek hızlı sistemlerde katener tipi için (pandül ve taşıyıcı telin olduğu sistemlerde) askı sistemi zorunludur (Özmen İ., 2014).

3.9.2. Rijit Katener Sistemi

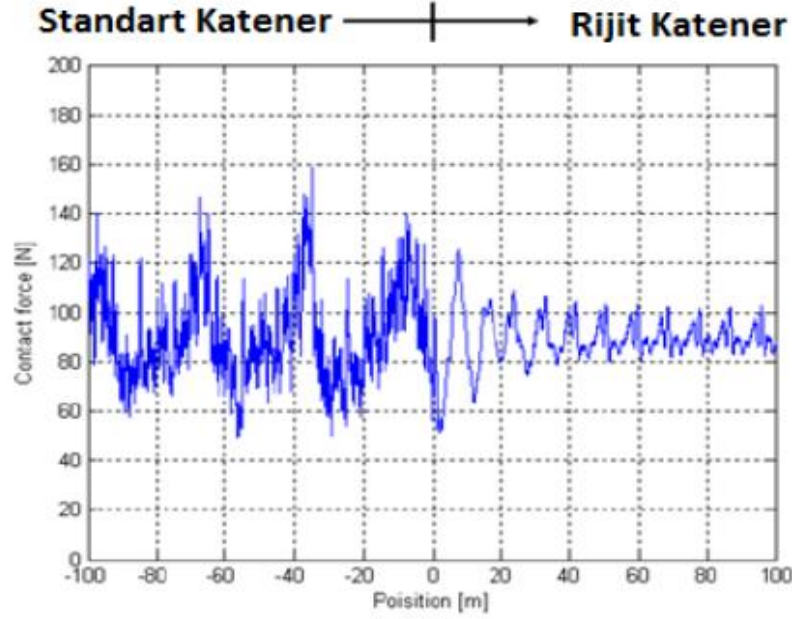
Günümüzde, rijit sistemin kullanımı giderek artmaktadır, zira özellikle tünellerde standart elektrifikasyon hatlarına iyi bir alternatif olarak görülmekte ve elektrifikasyonun ortak katener sistemler ile kolayca uyumlu olmasını sağlamaktadır. Rijit sistem daha esnektir, bakımı daha kolaydır ve üçüncü raydan daha yüksek iletkenliğe sahiptir.

Söz konusu olan bu özellikler, bu sistemin tünellerde kullanılmasında rekabete açık bir duruma sahip olmamasının en büyük etkenleridir. Rijit katener sistemi alüminyum bir profil ve seyir telinden oluşan sade ve basit bir tasarıma sahiptir. Şekil 3.13'te tüm parçaları gösterilen rijit katener sisteminde seyir teli alüminyum profilin en alt ucunda sabitlenmiştir ve standart katener hattında olduğu gibi pantograf alt kısımdan seyir teline baskı uygular (Friedrich, 2009).



Şekil 3. 13. Rijit katener parçaları (Alkaşı S., 2006)

Birçok avantajdan dolayı, rijit katener, metro tünelleri ve hızın nispeten düşük olduğu tüneller gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Rijit ray hattı tarafından kullanılan düşük voltajlı DC 1500 V sistemleri, metrodaki uygulamalar için sektörel bir trend haline gelmiştir. Bu sistem 20 yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Özellikle, Asya ülkelerinde çok yaygın olan rijit sistem, Avrupa da dahil olmak üzere bilhassa İspanya’da kullanılmaya başlamıştır.



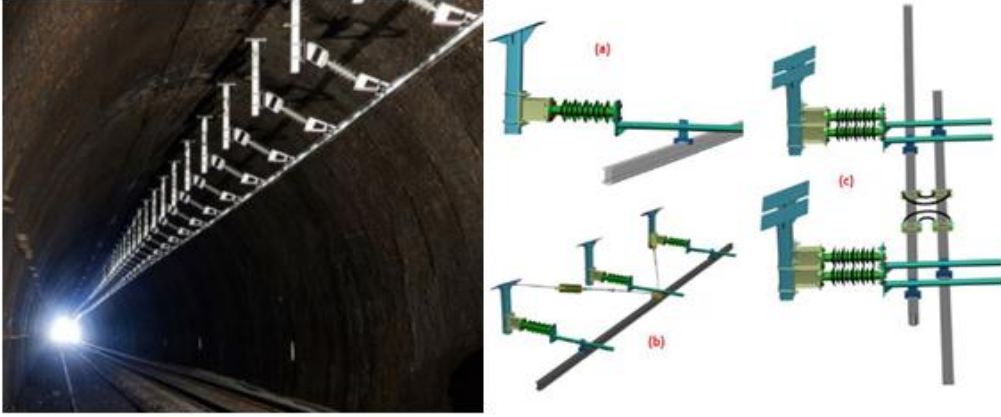
Şekil 3. 14. Temas kuvveti bakımından rijit ve standart katener karşılaştırması (Kiessling, 2009)

Üçüncü ray sistemi ve standart katener sistemine göre rijit katener hattının artıları şu şekildedir (Özmen İ., 2014):

- Şekil 3.14'te gösterildiği gibi çok daha dinamik ve daha iyi bir performansa sahiptir.
- Temas kuvveti standart katenerden daha az ve daha eşittir.
- Daha güçlü, daha güvenilir ve daha az bakım gerektirir. Bakım işinin yükü neredeyse %50 oranında azaltılmıştır.
- Rijit Katener sisteminin montajı için gerekli olan boşluğun az olması ile tasarım aşamasında daha küçük boyutta tünel planlanmasını gerekli kılar. Daha büyük gabarili araçlar için modifiye edilmesi planlanan mevcut tünel hatlarında söz konusu hattın alçaltılmasına gerek kalmaz.
- Böylece, inşaat maliyetlerinde önemli bir ölçüde iskonto elde edilir.
- Geleneksel katener sistemleri ile uyumluluk sağlar.

- g) Seyir (kontak) teli gergisi olmayan bir yapıya sahiptir ve böylece pantograf geçişi sırasında seyir telinde yükselme olmaz. Seyir telinde germe kuvveti bulunmadığı için rijit katener sistemi halka açık istasyon alanlarındaki yüksek seviyeli emniyet standartlarına uyumludur.
- h) Saatte 250 km hıza kadar kullanılabilir.
- i) Yüksek kısa devre dayanıma sahiptir. Bir kısa devre sonucu seyir teli kısmen yanmış olsa dahi, normal bir şekilde çalışmaya devam etmesi sonucunda seyir telinin gergisiz olması sebebi ile bu durum bir tehlike oluşturmaz.
- j) Rijit Katener sistemi yüksek bakır eşdeğeri kesiti ile 40°C’de 3000 A’dan büyük akımları sürekli olarak taşıyabilir.
- k) Makas ve çapraz geçiş bölgeleri gibi kompleks hat bölgelerinde basit bir tasarıma sahiptir.
- l) Önceden bükülmüş iletken profiller/çubuklar ile 40 metrelik minimum kurp yarıçapları gerçekleştirilebilir.
- m) Rijit Katener sisteminde seyir teli nominal kesit alanının %50’si aşınıncaya kadar kullanılabilir. Bu limit diğer geleneksel katener sisteminde %33’lük bir orana sahiptir. Bununla birlikte, oldukça kolay montaj ve düzenleme gerektiren bir sistemdir. Basit bir montaj aleti ile kolay ve sürekli seyir teli montajı sağlanmıştır.
- n) Deneyimler neticesinde tasarımın sağlamlığı sebebi ile sistemin neredeyse bakımsız olduğunu göstermiştir.
- o) Rijit Katener sistemi araç bakım yollarında, konteynir terminallerinde, yükleme veya boşaltma yollarında, açılabilir köprü geçişlerinde vb. yerlerde de kaldırılabilir katener sistemi olarak hizmet verebilir.
- p) En yaygın katener hattından %15 daha ucuzdur.

Rijit katener hattının standart katener üzerinde birçok avantajı olsa da, pratikte rijit katenerin yüksek hızlı hatlara ($> 120\text{ km / s}$) ve açık hatlara uygulanamaması bir dezavantaj olarak düşünülebilir. Buna rağmen, rijit katener Şekil 3.15’te gösterdiği gibi daha çok metro hatları için tercih edilir.



Şekil 3. 15. Tünel ve diğer tiplerde montaj: (a) Normal askı (b) Etap ortası bağlantı (c) Etap sonları (Kiessling, 2009)

3.10. Katenerin Bileşenleri

3.10.1. Seyir Teli

Katener sisteminin bir parçası olan seyir teli, tren adına güç aktarımının sağlanmasında önemli bir role sahiptir, dolayısıyla seyir telinden pantografa iletilen enerji devamında pantograf vasıtasıyla trene en iyi şekile iletilir. Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, seyir teli, çapraz kesiminin 150mm^2 olduğu bakırdan yapılır ve trenin hareket ettiği raylar üzerine paralel olarak yerleştirilir. Şekil 3.17'de ise Alüminyum profil ve bakır seyir teli özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3. 16. Seyir teli ve kesiti (NeTIRail, 2015)

	
Technical Specifications:	
Profil Kesiti	2.220 mm ²
Profil Yüksekliği	110 mm
Profil Uzunluğu	12m
Profil Ağırlığı	6,1 Kg/m
Atalet Momenti I _{xx}	338 x 10 ⁶ mm ⁴
Alalet Momenti I _{yy}	113,7 x 10 ⁶ mm ⁴
Bakır Kesit Eşdeğeri	1.400 mm ²
Lineer Uzama Katsayısı	24 x 10 ⁻⁶
Elastiklik	69.000 N/mm ²

Şekil 3. 17. Alüminyum profil ve bakır seyir teli özellikleri (Kiessling, 2009)

Seyir telinin yatay pozisyonunu koruyacak şekilde uzun mesafelere elektrik iletebilmesi adına seyir teli ve taşıyıcı tel arasında pandüller kullanılmalıdır ve söz konusu pandüller seyir telinin sarkmasına izin vermeyecek şekilde belirli noktalara yerleştirilmelidir. Seyir teli özelliklerine ilişkin bilgiler Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Analysis, FEA), raylı sistem uygulamalarında seyir teli kesit hesaplaması için yapılan analizlerde kullanılır. Tercih edilecek olan seyir telindeki ısınma öngörülen sınırlar arasında kalacak şekilde olmalı ve aynı zamanda seyir teli kesiti tren pantografı ve trafo merkezi arasındaki gerilim düşümü %10'luk bir oranı geçmeyecek şekilde olmalıdır. FEA sayesinde tren işletmesi sırasında seyir telinin dinamik davranış biçimi kolaylıkla incelenebilir (Profillidis, 2000). FEA metoduna göre seyir teli özellikleri, malzeme tipi, dinamik pantograf ağırlığı ile seyir teli temas gücü, pantograf varyasyonları, demiryolu hattı durumu ve hatta aerodinamik etkiler için bu yöntemle göre hesaplanmıştır. Bu analizler, katener sisteminin EN 50119'a uygun olarak, bakır seyir teline yönelik EN 50149'a göre yapılmalı ve demiryolu trafo merkezlerinden gelen gerilim trafo sistemi için EN 50163 standardına uygun olmalıdır.

Çizelge 3. 3. 250 km/h hıza uygun seyir telinin özellikleri (Kiessling, 2009)

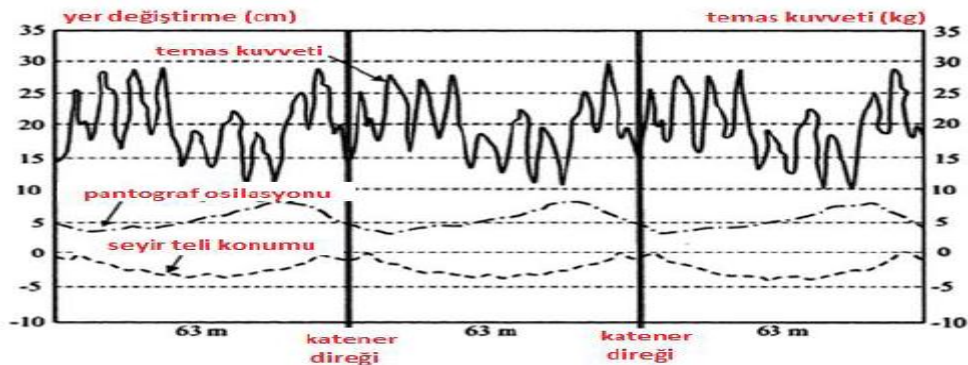
Tel Kesiti	150mm ²
Minimum Mekanik Stres	43 kg/mm ²
Maksimum Lineer Direnç	0.148 Ω/km (20°C de)
İletkenlik	%80

Pantograf ve seyir teli arasında fazla veya kötü temas yerine iyi bir temas sağlamakla görevli olan katener mühendisleri için doğru temas konusu oldukça önemli bir husus teşkil etmektedir. Karbon şeritlerin (pantograf kömürü) pantografin üzerine yerleştirilmesi bu bakımdan oldukça önemli olup, düzenli olarak kontrol ve muhafaza edilmesi gerekmektedir. Karbon şerit malzemesinin seyir teli bakımından daha yumuşak olması ve daha hızlı aşınmasından dolayı belirli bir dereceden sonra karbon şeridinin değiştirilmesini zorunlu kılar.

Şeridin eşit olarak aşınması için Şekil 3.18’de de gösterildiği gibi, seyir telinin birbirini izleyen iki katener direği arasında devamlı olarak sol ve sağ doğrultusunda zikzaklı bir yol oluşturulur (zigzagging veya staggering olarak da adlandırılır). Bu, katener dezeksmanı ayarı olarak bilinen ve pantografin boşa çıkmaması için belirli sınırlar dahilinde yapılan bir uygulamadır (yaklaşık ± 20 cm). Sonlu elemanlar metodu analiziyle elde edilmiş olan 350km/h yüksek hızlı trene ait pantografin seyir teline uyguladığı temas kuvvetinin [kg] etkisi ve seyir telinin uygulanan bu kuvvete bağlı olarak yaptığı salınım santimetre cinsinden olan örnek Şekil 3.19’da gösterilmiştir (Profillidis, 2000).



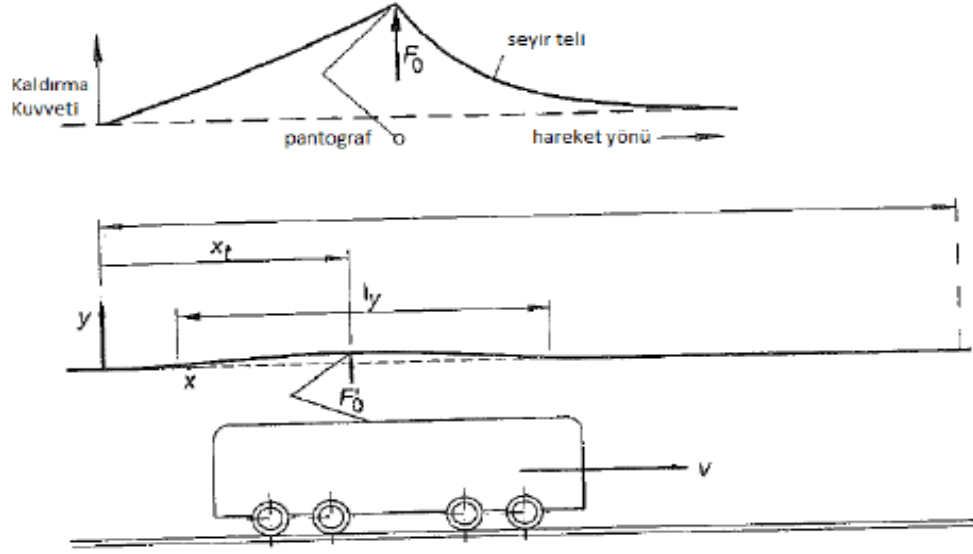
Şekil 3. 18. Seyir teli dezeksmanı (Özmen İ., 2014)



Şekil 3. 19. Tipik havai katener sistemine ait FEA analizi sonucu (Profillidis, 2000)

3.10.2. Gergi sistemleri

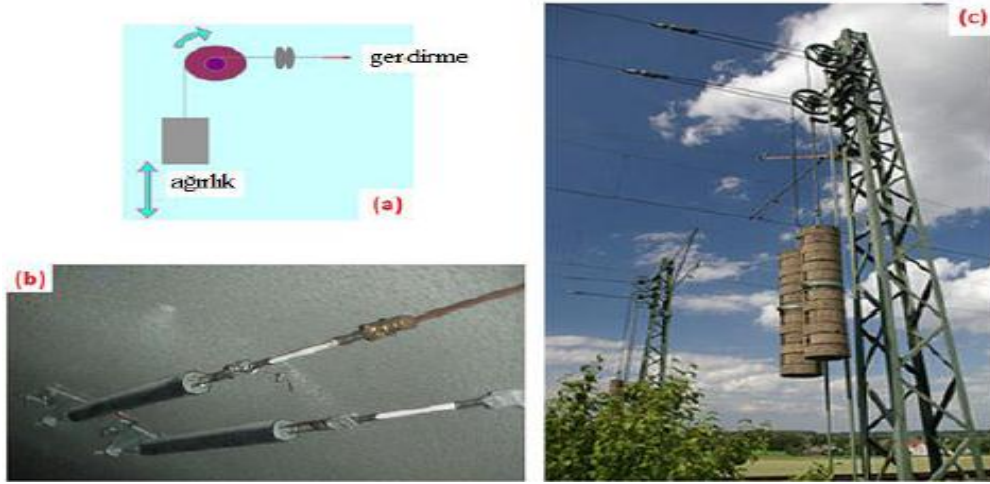
Katener sistemi tasarımı ve yapımı sırasında dikkate alınması gereken bir diğer önemli konu ise gergi sistemleridir. Katener iletkenlerinden aşırı elektrik akışı pantograf ve seyir teli arasında zayıf bir temasın oluşmasına neden olur, böylece tüm katener sistemi bir tutma mekanizması ile sabitlenir. İletkenlerin kendi ağırlığından dolayı, yıl boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri, iletkenlerin sapmasındaki ana nedenlerdir. Buna ek olarak, pantografin elektrik kateneri ile sürekli temas halinde olmasından dolayı, katenerin her zaman belirli bir mekanik kuvvetle gerilmesini gerektirir, aksi takdirde Şekil 3.20'de gösterildiği gibi iletkenin titremesine neden olur. Bu yüzden, titreme dalgasının hızı her zaman trenin hızından daha büyük olmalıdır. Aksi halde, özellikle yüksek hızlı tren hatlarındaki titreme dalgasının büyüklüğü katener veya pantografı hasar oluşturacak kadar tehlikeli olabilir (Friedrich, 2009).



Şekil 3. 20. Tren pantografinin seyir telinde oluşturduğu osilasyon (Kiessling, 2009)

Genel anlamda, Şekil 3.21'de gösterildiği gibi iki tür tutma sistemi mevcut durumdadır, bunlar sabit (sürekli) taşıyıcı sistem ve otomatik taşıma sistemidir. Bu iki sistemin kullanımı, yerleştirme pozisyonlarına ve yerlerine göre değişiklik göstermektedir, örneğin sabit sistemler, sıcaklık değişimlerinin çok büyük olmadığı yerlerde ve tünellerde olduğu gibi düşük hızda tren hareketinin gerekli olduğu yerlerde kullanılabilir. Sabit taşıyıcı sistemde, katener hattı yaklaşık 800m'lik fazlara bölünmüştür. Bu tip bir sistemde, yaklaşık 10 kN'lik bir kuvvet uygulanmaktadır (1000 kg = 1 ton).

Otomatik taşıma sistemi söz konusu olduğunda, çoğunlukla yüksek hızlı tren ve yoğun trafikli demiryolu hatlarında tercih edilirler, bu sisteme ait örnek Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Taşıyıcı için gerekli olan kuvvet, ağırlıklar sayesinde elde edilir. Uygulanan gergi yaklaşık 10 ile 20kN arasındadır (yaklaşık 1 ile 2 ton arasında). Ağırlıklar etap bölgenin başlangıç ve bitiş uçlarına katener direklerine asılır ve rüzgarlı havalarda sallanmaması için katener direğine asılı bir tüp içinden geçirilerek yalnızca yukarı ve aşağı yönlü hareketine izin verilir. Her iki tarafından ağırlık uygulanan otomatik gergili sistemde bir diğer önemli konu ise etabın tam orta noktasından sabitlenmesine yönelik olan gerekliliktir. Aksi halde sıcaklık değişimlerinden dolayı uzayan katener hattı hat boyunca serbestçe hareket edebilir. Ayrıca katener hattının yalnızca tek bir tarafa uzamasını önlemek adına seyir teli taşıyıcı tel üzerine, taşıyıcı tel ise hoban takımına sabitlenmelidir (Puschmann R., 2010).



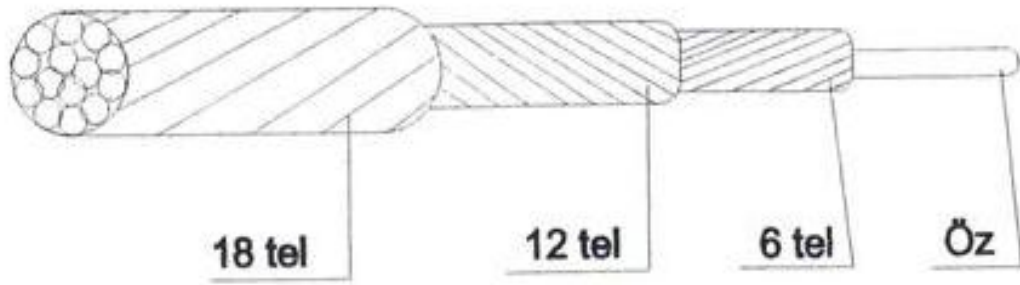
Şekil 3. 21. (a) Ağırlık sistemi, (b) Sabit gergili, (c) Otomatik gergili sistem (Puschmann R., 2010)

TEKNİK VERİLER	
Maksimum gerilme kuvveti	40 kN
Kuvvet kazancı redüksiyon oranı	1:3
Katener ve gergin kontak teli için hareket mesafesi	1.5m
Ağırlık	28 kg
Ortam sıcaklığı	-40... +55 C

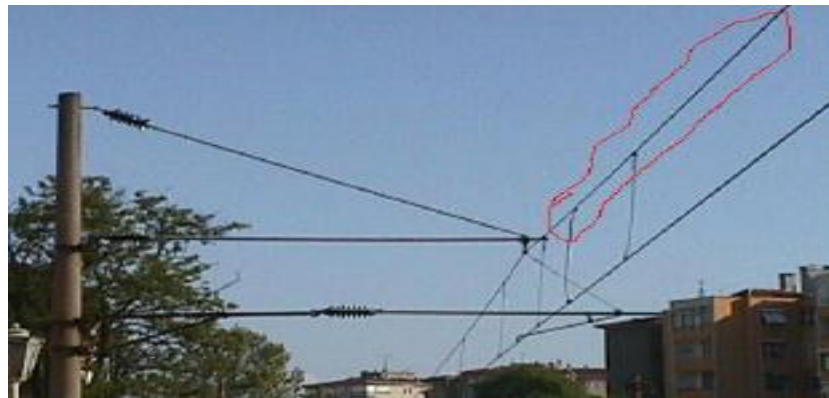
Şekil 3. 22. Otomatik gergi sistemi (Özmen İ., 2014)

3.10.3. Taşıyıcı iletken (Portör teli)

Elektrik enerjisini taşıyan portör teli veya taşıyıcı iletken 65mm^2 çapında bronz bir bölümden (bakır ve kalay karışımı) oluşan katener bileşenidir. Merkezi bir tel ve soldan sağa doğru 6 spiral telle sarılı olan birinci tabakanın aksı yönündeki diğer 12 tel de sarılır ve son olarak, diğer tellerin üst üste 18 telli sarması sonucunda portör teli elde edilir. Portör telinin yapımı Şekil 3.23'te gösterilirken, bu telin montaj işlemi Şekil 3.24'te sunulmuştur. Dış çapı 10.5 mm, cer kopma yükü ise 4300 kg olup, metresinin ağırlığı da 600 gramdır. Birleştirme klemensi taşıyıcı telde kullanılabilir. Birleştirme klemenslerinin ve uç klemens de denen konik bağlantı klemenslerinin çekme dayanımı taşıyıcı telin çekme dayanımının en az iki kat olmalıdır (Puschmann R., 2010).



Şekil 3. 23. Portör teli yapısı (Puschmann R., 2010)



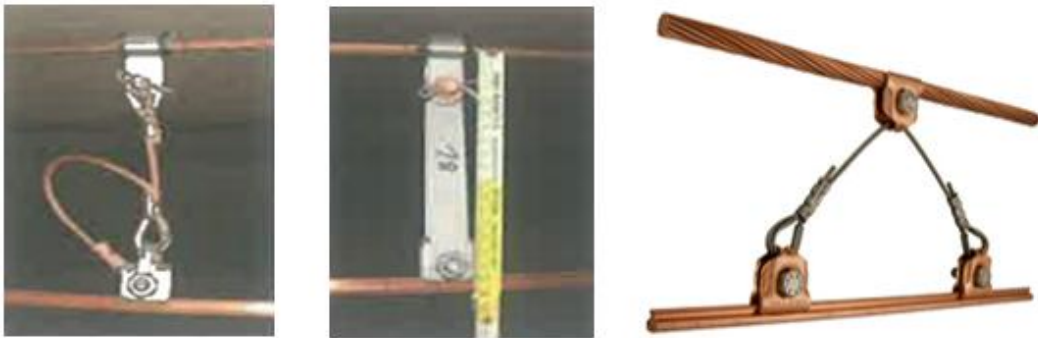
Şekil 3. 24. Portör teli (Puschmann R., 2010)

3.10.4. Pandül

Şekil 3.25'te görüldüğü üzere, portör teli ve seyir teli arasına yerleştirilmiş olan pandül teli katener sisteminde oldukça önemli bir role sahiptir. Pandül telinin görevi seyir telini tutmak ve yatay konumda iyi bir ağırlık merkezi sağlamaktır ve aynı zamanda F5'lik sert bakırdan veya örgülü bakırdan yapılan seyir telinin portör teline asılmasını sağlayan bir tel çesidi olarak da bilinir. Görevi seyir telinin fleşsiz olarak asılmasını sağlamaktır. Seyir teli çekme kuvveti pandül mesafesi doğrultusunda belirlenir. İki pandül arası en uzun mesafe 9 m'dir. Pandül telinin 9 m'den fazla bir mesafeye yerleştirilmesi sonucunda seyir teli fleş yapar. Pandül mesafelerinin seçimiyle diğer yandan seyir telinin kopması halinde seyir telinin raya değmesi ve besleyeci hat güç anahtarının tetiklenmesine neden olur (Puschmann R., 2010). Yaygın olarak kullanılan bazı pandül türleri aşağıda Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 25. Pandül montajı (Puschmann R., 2010)



Şekil 3. 26. Pandül Tipleri: a) Esnek kayar pandül, b) Rijit kayar pandül, c) Serbest Yükselişi üçgen pandül (Puschmann R., 2010)

3.10.5. Elektrik Bağlantıları

Sabit ve anahtarlı elektrik bağlantıları, katener sisteminde elektriksel işlevlerin temin edilmesinde kullanılmaktadır. Akım bağlantısı olarak da bilinen sabit elektrik bağlantıları seyir teli, taşıyıcı tel ile farklı gerdirme bölgelerindeki katenerler arasındaki ve demiryolu enerji hatları ile katenerler arasındaki işletme ve kısa devre akımlarını iletirler. Elektrik bağlantısı olarak:

- Taşıyıcı tel ve seyir teli arasında 1 x BzII mm^2 ,
- Makas bağlantılarındaki katenerler arasında ve bindirmelerde 1 x E-Cu 95 mm^2 (Şekil 3.27 a.),
- Yükselen hat ile katenerler arasında 2 x E-Cu 95 mm^2 (Şekil 3.27 b.),
- Anahtar veya güç kaynağı ile katener arasında 2 x E-Cu 95 mm^2 (Şekil 3.27 c.), kullanılır.

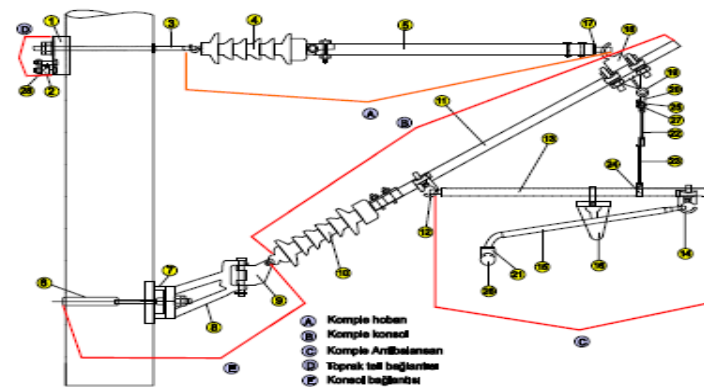
Bunların kesiti minimum düzeyde taşıyıcı tel, seyir teli ve demiryolu enerji hattına ait klemenslerle birleştirdikleri halat ve tellerin kesiti kadardır. Katener ve yükselen hat arasındaki elektrik bağlantıları düzenli aralıklara sahiptir. Bu iletken halatlar çekme altında durmamaları gerekmektedir. Bu halat bağlantılarıyla topraklanmış yapı parçaları arasındaki elektriksel mesafeler, rüzgar ve sıcaklık etkisi altında yaklaşma ve dolayısıyla kısa devre oluşturmayacak şekilde planlanmış olup, kurulum sırasında da böyle imal edilmiştir (Puschmann R. 2010). Katener anahtarı olan anahtarlı bağlantılar devre gruplarını ve yedek güç kaynağı çeşitlerinde de güç kaynağı şubelerini köprülerler. Anahtarlar yatay ve düşey hatlarla yükselen, güç kaynağı ve katener hatlarına bağlanırlar.



Şekil 3. 27. a).Katener hatları arasındaki elektrik bağlantısı b). Katener hattı ve yükselen hat arasındaki elektrik bağlantısı c). Katener anahtarı, taşıyıcı tel ve seyir tel arasındaki elektrik bağlantısı (Puschmann R., 2010)

3.10.6. Döner Konsollar

Döner konsol nasıl yapılır aşağı gösterilmiştir. İlevsel olarak taşıyıcı tel ve seyir teli kısımlarına ayrılır. Askı borusu, rapel kolu, seyir teli grifli rapeli ve askı pandülü seyir telinin kapsadığı kısımlardır. Taşıyıcı telin oluşturduğu kısım ise izolatörlü konsol borusunu, izolatörlü hobanı, taşıyıcı tel klemensini ve diyagonal boruyu kapsar. Konsollar katenerdeki sıcaklığa bağlı uzunluk değişmelerinden kaynaklanan dönme hareketlerine izin veren döner mafsallarla direklere veya askı sütunlarına monte edilirler. Konsol çeşitlerinde, yol eksenine bakıldığında seyir teli konumu konsola doğru olan çekiye göre çalışan konsollar (Şekil 3.28) ile konsoldan öteye doğru olan ve basıya çalışan konsollar (Şekil 3.29) ayırt edilmektedir. Sistem yüksekliği azaltılmış konsollar, katenerlerin köprü altlarından geçirilmesi için kullanılır. Yüksek hızlı hatlarda sistem yüksekliğinin azaltılmasından ve dolayısıyla azaltılmış sistem yüksekliği 1,20m altında olan konsol kullanımından kaçınılmalıdır (Puschmann R., 2010).



Çizelge 3. 4. Katener sisteminin detaylı bölümleri (Puschmann R., 2010)

1. Toprak teli klemensi tespit demiri	15. Rapel kolu
2. Toprak teli klemensi	16. Antivan
3. Hoban bağlantı tiji	17. Delikli hoban tiji
4. Hoban izolatörü	18. Kroşeli portör kepeçesi
5. Hoban tüpü	19. Halkalı kelepçe
6. Kelepçe	20. Portör için kroşeli askı pensi
7. Konsol ayağı bağlantı demiri	21. Seyir teli pensi
8. Tüp konsol için ayak	22. Tutucu pandül
9. Hareketli parça	23. Hareketli pandül
10. Konsol izolatörü	24. Antibalansan tüp için kolye
11. Konsol borusu	25. 10'luk etriye
12. Tüp konsol üzerine antibalansan bağlantısı	26. Seyir teli
13. Antibalansan tüpü	27. Portör
14. Kancalı rapel tutucu	28. Toprak teli



Şekil 3. 28. Çekiye çalışan konsollar
(Puschmann R., 2010)



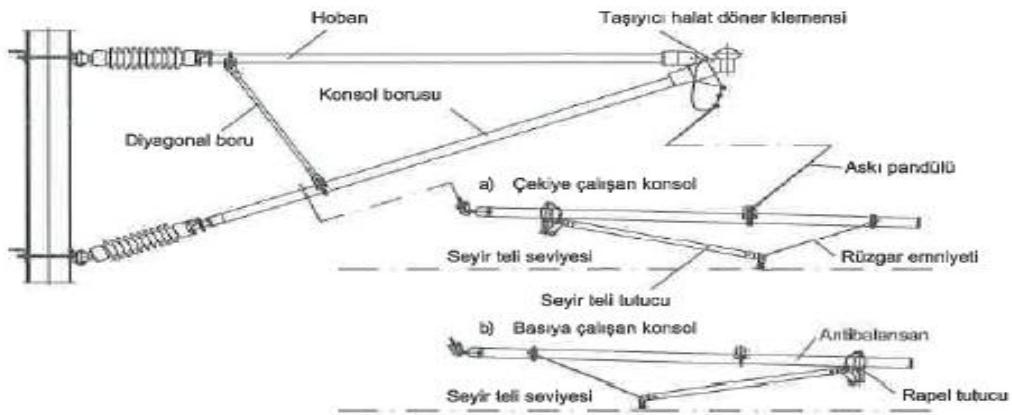
Şekil 3. 29. Basıya çalışan konsollar



Şekil 3. 30. Portal içindeki konsol
(Puschmann R., 2010)



Şekil 3. 31. Tünel içindeki konsol

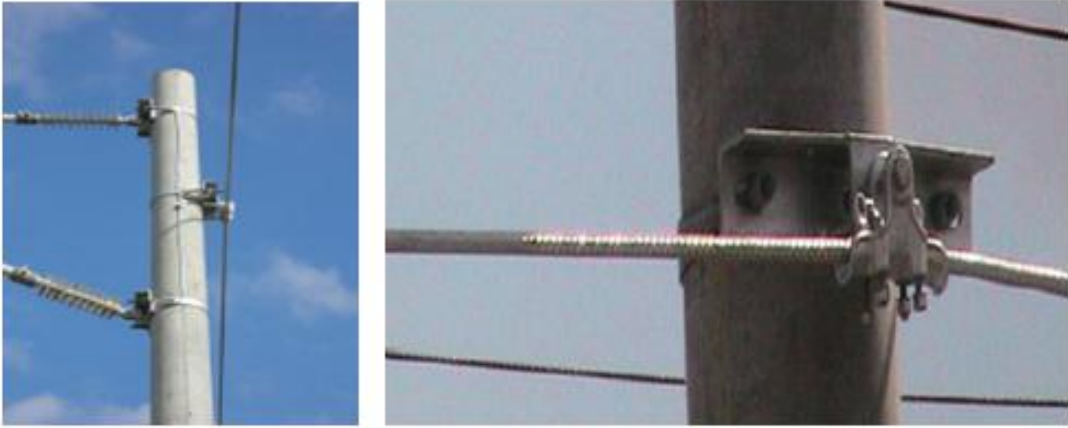


Şekil 3. 32. Açık hattaki borulu döner konsolun yapı elemanları (Puschmann R., 2010)

3.10.7. Toprak Teli

İki istasyon arası katener tesislerinde direkler üzerinde bulunan tüm metal parçaların topraklama işlemi için katener direklerinin arka tarafından çekilen $62,44 \text{ mm}^2$ kesitindeki Al/Ç iletkenler gereklidir. Havai hat toprak iletkeni, direklerin yola göre arka yüzünden çekilmesi sonucunda direklere ankrajlanır. Tüm metal parçalar ve katener direkleri, kolonların üst kısmına yerleştirilen $\varnothing 8 \text{ mm}$ alüminyumun topraklama iletkenine bağlanır.

Topraklama iletkeninin hava hattı, özel tip izolatörler ile yalıtılmıştır olup, bu telin maksimum uzunluğu 1000m'dir, Şekil 3.33'te görüldüğü gibi katener sütununun içinde bulunan sapma teli ile izole edilmesinden sonra Şekil 3.34'te gösterildiği gibi topraklama iletkeni, bulunduğu priz grubuna bağlanarak telin toprakla bağlantısı sağlar. Türkiye demiryolu tesislerinde ise (TCDD) genellikle $\varnothing 10 \text{ mm}$ 'lik galvanizli çelik tel ile direktten prizlere irtibat yapılmıştır.



Şekil 3. 33. Topraklama iletkeni direk bağlantısı (Kiessling, 2009)



Şekil 3. 34. Direkteki topraklama bağlantısı (Kiessling, 2009)

3.10.8. Direkler

Direkler, takviye ve geri besleme hatları ile yatay taşıyıcı ekipmanlarını taşırlar. Bunlar statik gereksinimlere uygun olarak tasarlanmıştır. Kaplamalı profil direkler, beton ve galvanizli çelik direklerle köprü üstlerinde kullanılmaktadır. Direklerin seçiminde katenerden ileri gelen yatay yükler ile yolun enine ve boyuna etki eden ağırlık ve rüzgar yükleri esas alınır.

Kullanılan beton direkler, beton temeller içine oturtularak dökme betonla sağlamlaştırılır. Şekil 3.35'te görüldüğü üzere, direkler beton temeller içine yerleştirilmiştir olup, Şekil 3.36'da ise direk ankrajları beton temel içine bırakılmış olan köşebent demirlere monte edilmiştir, sonuç olarak da temellerin bakım gerektirmeyen tipte olması bakım külfetini azaltmaktadır. Fakat beton direklerin Şekil 3.37'de görüldüğü gibi istasyon bölgelerine portal taşımaları mümkündür. Köprü üzerlerindeki çelik direkler uygun sıkma torkuyla ankraj saplamalarına vidalanmış durumdadır (Puschmann R., 2010).



Şekil 3. 35. Beton direk temeli (Kiessling, 2009)



Şekil 3. 36. Çelik direğin temele montajı (Kiessling, 2009)



Şekil 3. 37 . Portallı beton direk (Puschmann R.,2010).

3.10.9. Beton ve Demir Direklerin Avantajları ve Dezavantajları

Demiryolu hatlarındaki beton direklerin kullanımı, güç kaynağı için hava hattı'nın montajında daha fazla güvence sağlar, fakat beton direklerin kullanımındaki avantajlarının yanı sıra, bunların dezavantajları da söz konusudur, ancak avantajlarına kıyasla bu durum çok daha azdır (Kiessling, 2009). Aşağıda, beton direklerin avantajları ve dezavantajları yer almaktadır.

Beton direklerin avantajları:

- Beton direkler demir direklere göre daha ucuzdur,
- Tepe kuvvetleri büyüktür,
- Uzun ömürlüdür,
- Kaçak akımlara karşı güvenlidir.
- Atmosferik olaylardan fazla etkilenmez.
- Bakım gerektirmez.

Beton direklerin dezavantajları:

- Kırılgan olduklarından taşınırken dikkatli olunmalıdır.
- Ağır olduklarından taşınması ve montajı zordur.

Demiryolu hatlarında kullanılan beton direklerin yanı sıra, uygun nitelikleri ile özellikle alçak gerilimli hatlarda olmak üzere diğer birçok demiryolu hattında kullanılan demir direk örnekleri de söz konusudur. Demir direklerin, beton direklerden daha hafif ve daha uzun ömürlü olmalarının yanı sıra, aynı zamanda herhangi bir sebepten ötürü ortaya çıkabilecek herhangi bir kaza durumunda onarımları daha kolaydır. Bununla birlikte, bakım ve işletme maliyetleri beton direklerden daha yüksektir ve söz konusu olan demir kazıkların avantaj ve dezavantajları şu şekildedir (Kiessling, 2009).

Demir direklerin avantajları:

- Tepe kuvvetleri büyüktür,
- Onarımları kolaydır,
- Ömürleri uzundur,
- Parçalara ayrılabilirdiği için taşınmaları ve montajları kolaydır.

Demir direklerin dezavantajları:

- Maliyeti yüksektir ve bakımları masraflıdır,
- Kaçak akımlara karşı çok güvenli değildir,
- Hava şartlarından etkilenir.

3.11. Pantograf

Trenin çatısına monte edilmiş bir cihaz olan pantogafın başlıca görevi, elektrikli tren veya tramvaylar için elektrik akımını hava yolu hattından (katenerden) toplamaktır. İlk pantograf, 1895 yılında Alman demiryolları üzerinde kullanılan ve Şekil 3.38'de gösterilen Siemens ve Halske tarafından icat edilmiştir. Amerika'da olduğu gibi, bu tür pantograflar San Francisco - California'da 1903'te kullanılmaya başlandı ve sonrasındadünyanın diğer ülkelerindeki demiryollarında da gelişmeye ve kullanım bulmaya devam etti (Frey, 2012).

Şekil 3.39'da görüldüğü gibi, XX yüzyılda pantografların kullanımında yükseltme ve modernizasyona devam edildi. Pantografin rolü seyir teli ile daha iyi temas sağlamak ve büyük bir elektrik kaybına sahip olmamak için mükemmelleştirilmeye devam ediyor. Günümüzde demiryolu hattı türü ve demiryolu hattındaki tren hızına bağlı olarak kullanılan farklı pantograf tipleri bulunmaktadır. Pantografların tasarımları tek veya çift kollu olabilir. Çift kollu pantograflar genellikle daha ağırdır ve yükseltmeyi ya da indirmeyi sağlamak için daha fazla güç gerektirir.

Günümüzde kullanılan en yaygın pantograf türü, daha kompakt ve duyarlı bir tasarım sağlamak adına evrimleşmiş olan yarı-pantograf (bazen "Z" olarak tanımlanır) olarak adlandırılmaktadır. Bu tür yarı pantograf örneklerinin, hızlı trenlerde ve düşük hızlı şehir içi tramvay sistemlerinde kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 3. 38. Elmas biçimli bir pantograf bir pantograf (Frey,2012)



Şekil 3. 39. Z biçimli (asimetrik) modern

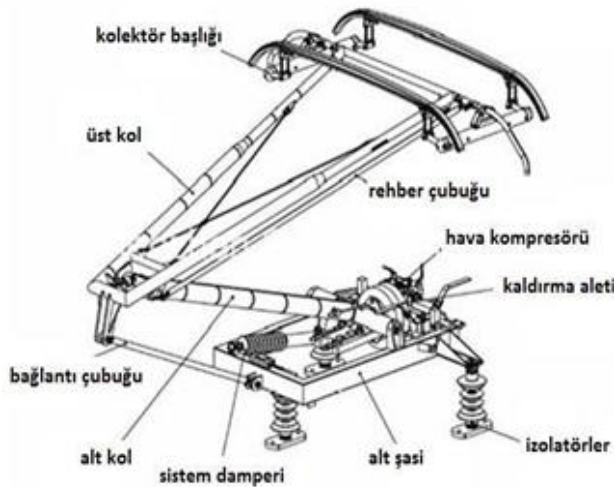
3.11.1. Pantografin Parçaları

Pantograf kömürü, sustalar vasıtasıyla katener teline yaklaşık 7 kg kontak basıncı ile temas etmektedir. Kömür ile katener teli arasında ark oluşmasındaki ana neden pantograf baskı kuvveti ayarının düşük olmasından kaynaklıdır. Arşe'nin 1,7 metre yükseklikte dengede kalması sağlamak adına arşeye 7 kg'lık ağırlık bağlanır. Bu işlemin ayarı susta gergi cıvataları sıkılarak ve gevşetilerek yapılır. Pantografin aldığı enerji, kesiciye mafsal bağlantı noktalarında kamçı diye adlandırılan örgülü iletkenlerle aktarılır. Pantografin mekanik gövdesi de enerjiyi aktarmada iletken olarak kullanılmıştır Türkiye'nin demiryolu hatlarında, elektrikli trenlerde şu özelliklere sahip pantograflar kullanılmaktadır (Sarısakal S., 2015):

Boynuzlar arası mesafe: Büyük 1950 mm, küçük 1600 mm

- Maksimum açılma mesafesi: 2,6 m
- 0,5 m-2,25 m kalkış süresi: 8-10 saniye
- 2,25 m-0,5 m iniş süresi: 6-8 saniye
- Ortalama katener teline baskı kuvveti: 7 kg

Pantografi oluşturan parçaların daha iyi görünümü ve trene monte edilme yöntemi şekil 3.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 3. 40. Tipik bir pantografin parçaları ve trenin çatısına yerleştirilmiş pantograf (Özmen İ., 2014)

3.11.2. Konvensiyonel ve hızlı demiryolu hatlarında çalışan trenlerin pantograf tipi

Güç aktarımı için kullanılan pantograflar genel anlamda benzer tasarım ve kullanım şekline sahiptir, ancak lokomotif ve demiryolu hattı bakımından oluşan farklılıklar da söz konusudur. Aşağıda Çizelge 3.5'te, Fb 700 ve Fb 800 gibi konvensiyonel hatlarda kullanılan yapı verileri ile iki tip pantograf çeşidi sunulmuştur. Pantograf Fb 700, az sayıda bireysel bileşenlerden oluşacak şekilde tasarlanmış ve az ağırlık ile çok daha düşük bir bakım maliyeti temin eder. Pantograf Fb 800'de ise, Fb 700'ün tüm avantajları birleştirilmiş ve bir üst çelik kol ile tren rotasında hareket eden bir kolektör başı ile kombine edilmiştir (Schneider E., 2009)

Çizelge 3. 5. Pantograf Fb700 ve Fb 800 özellikleri (Schneider E., 2009)

	Hız	120km/h
	Temas gücü	60 – 120 N
	Motor ikmali	Elektrikli Makineler Pnömatik Makineler
	Uygun akımlı üst tel	1500V kadar
	Yeterli akım	2700A kadar

Benzer şekilde, pantograf DSA 150 Çizelge 3.6'da görüldüğü gibi, konvensiyonel demiryolu hatlarında çalışan elektrikli trenlerdeki güç temini için kullanılır, bu pantograf çeşidinin en büyük farkı yüksek hızı ve yüksek temas mukavemeti olmak üzeredir ve aynı zamanda bu pantograf türü günlük kullanıma sahip tek kollu pantograf olarak da bilinmektedir (Schneider E., 2009). Bu pantograflar, 1450mm, 1600mm ve 1950mm genişliğindeki kolektör başlarına sahip olmakla birlikte, dünyanın çeşitli yerlerinde de kullanım görmektedir.

Çizelge 3. 6. Pantograf DSA 150 özellikleri (Schneider E., 2009)

	Hız	160km/h
	İşletim sistemi	AC / DC
	Yeterli akım	Proje-Özel
	Statik temas gücü	70 – 120 N

DSA 250 pantografları Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi, kolektör başının düşük kütlesi nedeniyle hızlı demiryolu hatlarında kullanılmakla birlikte, aynı zamanda oldukça dinamik özelliklere sahiptir. Sonuç olarak, sadece tek çekiş ve çift çekiş için değil, aynı zamanda çoklu çekiş için de oldukça uygundur, bu nedenle Türkiye de dahil olmak üzere, pratikte hızlı trenlerde kullanım görmektedir.

Çizelge 3. 7. Pantograf DSA 250 özellikleri (Schneider E., 2009)

	Hız	250km/h
	İşletim sistemi	AC / DC
	Yeterli akım	Proje – Özel
	Statik temas gücü	60 – 140 N
	Kütle	Yaklaşık 125 kg (izolatörsüz)

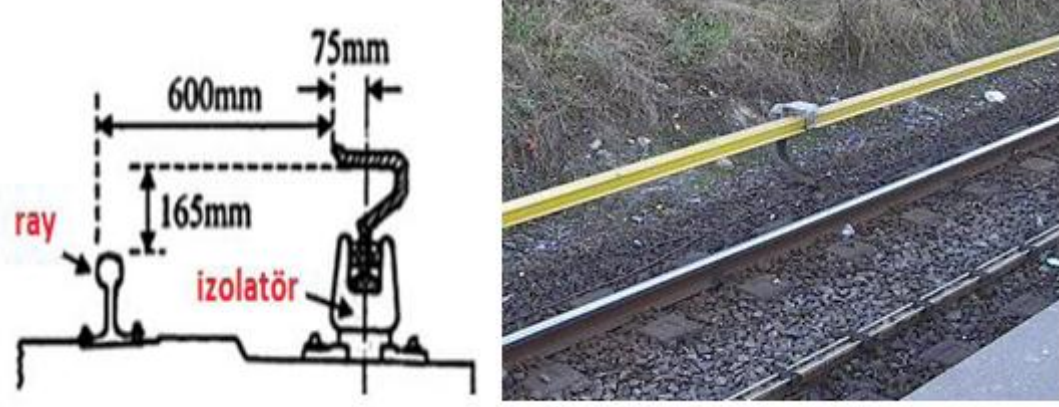
3.11.3. Pantograf Bakım ve Kontrollerinde Dikkat Edilecek Hususlar

Elektrikli trenlerin, elektrik tedariki sırasında elektrik kaybı yaşamaması büyük ölçüde pantograf performansına bağlıdır, bu sebeple tipik olarak bir pantograf 2 metreye kadar dikey hareket mesafesi gerektirir ve tasarımı öyle olmalıdır ki; temas telinin altındaki basınç veya kuvvetin, pantograf ile seyir telinin kopması veya güvensiz teması halinde trenin hızlı hareketi sırasında pantograf tarafından sıkılaştırılmalıdır (Gabbott M., 2007). Bu nedenle, pantografin güç kaynağını trene verimli bir şekilde ulaştırmasını ve uzun ömürlü olmasını sağlamak adına gerekli olan düzenli bakım ve kontrollerin aksatılmaması gerekmektedir, dolayısıyla bunu mümkün kılmak adına aşağıda değinilmiş olan bazı noktalara dikkat edilmelidir:

- Arşe kömür yüzeyinde kırık ve çatlakların olmaması,
- Arşe kömürü ve bağlantı parçası arasında boşluk ve seviye farkının olmaması,
- Pantografin iniş ve kalkış süresi, maksimum açılma mesafesi ve katener teline baskı kuvvetinin kontrol edilmesi,
- Pantograf bağlantı cıvatalarının denetimi,
- Mafsal rulmanları ve yağ sızdırma kapaklarının kontrol edilmesi,
- Mafsalların ve rulmanların bakım periyotlarında yağlama işlemine tabii tutulması,
- Pantograf kamçılarının denetlenmesi.

3.12. Üçüncü Ray Sistemi

Üçüncü bölmeye göre ray hattı elektrifikasyon sistemi, sadece metro ve metro hatları gibi düşük ve orta hızlı hatlarda (maksimum 160 km / saat) tercih edilir. Üçüncü ray sisteminde araçlar, Şekil 3.41'de görüldüğü gibi, trenin hareket ettiği ikili rayların üstünde üçüncü demiryolu rayının yaklaşık 20 cm'lik bir elektrik güç kaynağının konumlandırıldığı kontak modeline göre farklı olabilen güç/enerji raylı kürekler olarak adlandırılan ekipmanlarla donatılmıştır.



Şekil 3. 41. Taşıyıcı ray kotu seviyesine yerleştirilen üçüncü ray (Özmen İ., 2014)

Bu sistem, üçüncü ray sisteminin dünyasında kullanılan en yaygın tiplerin, yukarıdan aşağıya, yukarıdan kanat kısmına, yan yana, plastik koruyucu kapaklı ve yüksek temaslı kürek temas modeline göre farklı şekillerde olabilir. Üçüncü ray sisteminde söz konusu olan bu 4 tipin montajı Şekil 3.42'de gösterilmiştir ve bu montaj sırasında demiryolları için risk oluşturabilecek muhtemel temasları en aza indirmek üzere genellikle üçüncü bölme üst kısmında koruyucu plastik ile kaplanır (Friedrich, 2009).

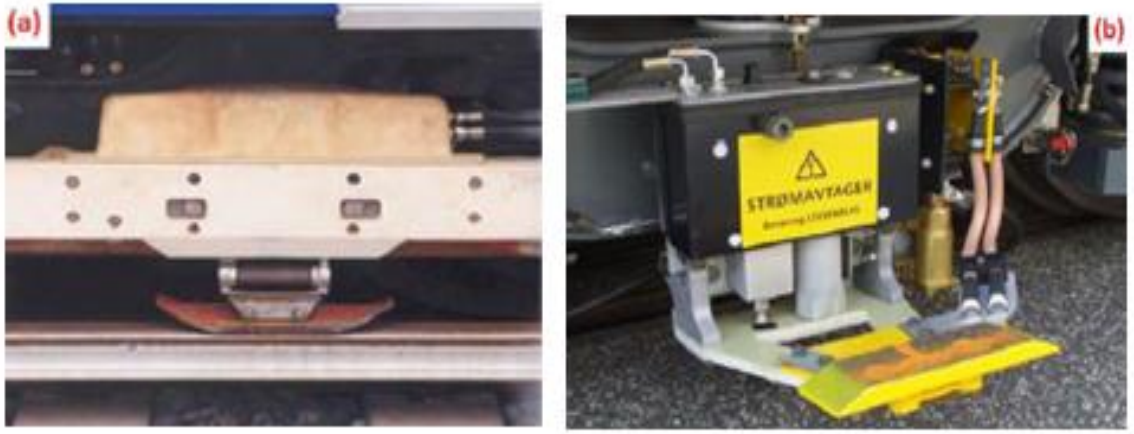
Bununla birlikte, üçüncü ray sistemi genellikle platformun altında gizli veya platform hattına yakın yerleştirilir. Bazı ülkelerde, üçüncü ray sistemi açık hatlarda da kullanılmaktadır. Bunlar, genellikle oldukça eski sistemlerdir. Bu tür hatlarda, geçişteki üçüncü yola ve alınacak ek önlemlere özellikle dikkat edilmelidir. Aksi halde, istenmeyen elektrik kazaları riski oldukça yüksektir.



Şekil 3. 42. Üçüncü ray sisteminin tipleri (Özmen İ., 2014)

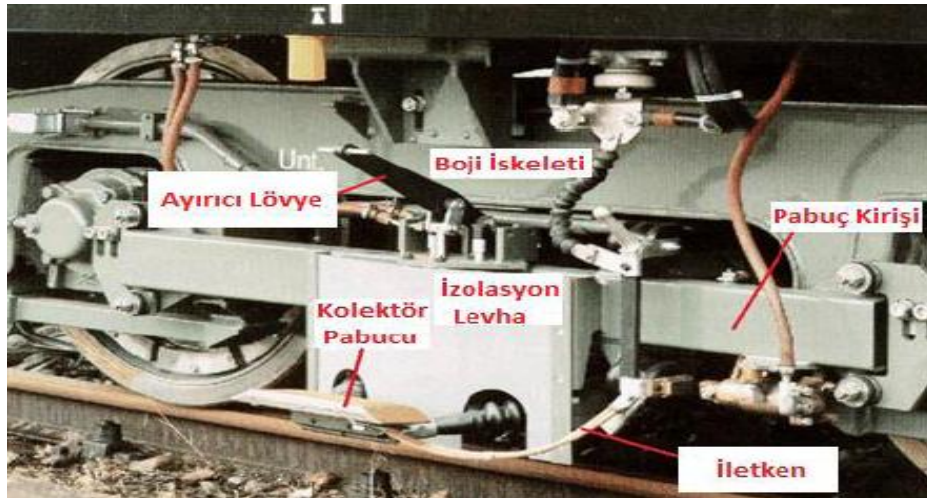
Demiryollu hattı boyunca hareket eden tren, güç kaynağı sistemi olarak üçüncü bölmeye sahiptir ve dolayısıyla enerji trenin bojin kısmına yerleştirilmiş olan kolektör pabucundan geçer. Daha önce kullanılmış olan sistemler genellikle üst kısım ile temas halinde olan sistemlerdi ancak sundukları daha yüksek performans ve güvenilirlik nedeniyle günümüzde yan ve alt kontak sistemleri yüksek oranda tercih edilmektedir.

Şekil 3.43 (a), üçüncü temas kutusu sisteminin yukarıdan nasıl görüldüğünü gösterirken, Şekil 3.43 (b), toplayıcı fişinin alt kısmından üçüncü temas hattı gösterilmektedir.



Şekil 3. 43. (a) Üstten temaslı. (b) Alttan temaslı (Kiessling, 2009).

Şekil 3.44’de, trende bulunan üçüncü ray sisteminin ray ekipmanını detaylı olarak göstermektedir.



Şekil 3. 44. Alttan temaslı sisteme ait tren üstü ekipmanlar (Özmen İ., 2014)

Düşük karbonlu çelikten yapılmış üçüncü raydan güç besleme sistemi 1950 civarında yaygın olarak kullanılmaktaydı. Bu daha sonra demirden yapılan üçüncü ray ile değiştirildi, günümüzde ise bu güç kaynağı sistemi alüminyum ve çelikten oluşmaktadır. Çizelge 3.8’de, üçüncü ray iletkenini oluşturan düşük karbonlu ve paslanmaz çelik bileşimleri hakkında daha detaylı teknik bilgiler gösterilmiştir (Friedrich, 2009).

Çizelge 3. 8. Üçüncü ray iletkeninin özellikleri (Friedrich, 2009)

Malzeme	Kesit mm^2	Ağırlık (kg/m)	Direnç
Az Karbonlu Çelik	5100	40	0.0225
	7600	60	0.0154
	9200	75	0.0128
Alüminyum	2100	6.4	0.0148
Kompozit	5100	15.7	0.0069

3.12.1. Üçüncü ray hattının eksileri ve artıları

Raylı sistemlerde, güç kaynağı için üçüncü ray hattının kullanımı, iletebileceği küçük gerilimler nedeniyle sınırlıdır. Nispeten küçük gerilimler nedeniyle bu sistemin sınırlandırılması, trenlerin büyüklüğünü, hızını ve trenlerin sunabileceği konfor düzeyini de kısıtlamaktadır. Bu, kentsel sistemleri için bile hava yolu sistemini ve alternatif yüksek voltaj gücünü ayrıcalıklı kılan bir neden olabilir. Yapılan testler ve deneyler sonucunda, üçüncü tren yolu sistemi ile maksimum tren hızı 160 km'ye kadar çıkmıştır, bu hız üzerinden, temas pabucu ve ray arasındaki temas, sürdürülebilirliğini koruyamamaktadır (NeTIRail, 2015).

Güç kaynağı sistemleri için, başta ilk yatırım maliyeti olmak üzere, diğer bütün maliyetler de hesaba katılarak, üçüncü ray sisteminin, havai telli sistemlere (katener hattı) kıyasla, kurulması ve çalıştırılması çok daha kullanışlıdır. Ayrıca, üçüncü ray sisteminin artlarından biri de, tıpkı katener sisteminde olduğu gibi telleri tutmak üzere bu sistemde de

yüksek yapılar, kolonlar veya buna benzer başka şeylere ihtiyaç duyulmamasıdır ve buna ek olarak, geniş alan sağlamak adına köprülerin yeniden yapılandırılmasına gerek duyulmamaktadır. Çevre duyarlılığı söz konusu olduğunda ise, üçüncü ray sistemi, çevrede çok daha az görsel müdahaleye sahiptir.

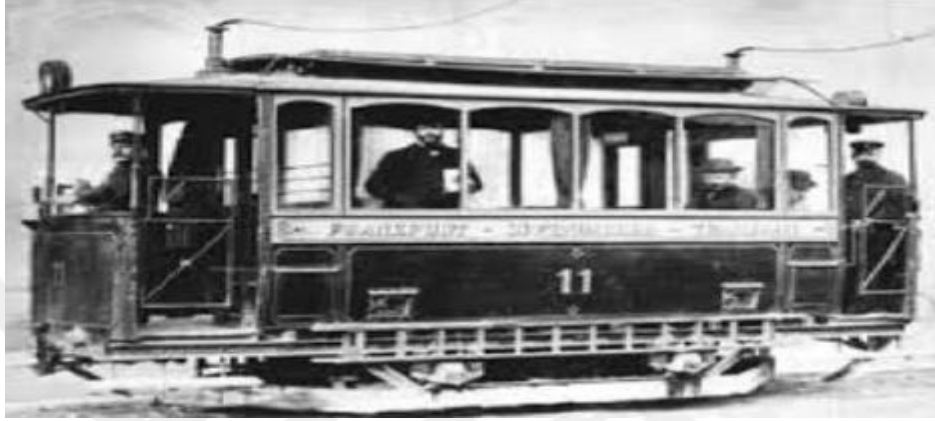
Üçüncü ray sisteminin ana dezavantajı, özellikle 1500 V üzerinde kullanılan tüm gerilimlerin güvenli olmaması ve yerleştirilen pozisyon ve kullanılan gerilimler nedeniyle elektrik çarpması riskini ortaya çıkarmasıdır. Bunula birlikte, üçüncü ray sistemi yaya yolundan tamamen ayrı olmalıdır. Aynı seviyede çalıştırılırsa, insanların demiryolu hatlarında yürümelerini önleyen ve özellikle de üçüncü hat güç kaynağı ile herhangi bir kaza riskinden kaçınmak için demiryolu hattının üzerinden yaya geçidini sağlayan mekanizmalar uygulanmalıdır.

Temas pabucundan yararlanan üçüncü ray sistemi, kar ve buzlara karşı hassastır ve dolayısıyla bu durum işlemleri durdurabilir. Bazı sistemler, demiryolu hatlarında buz birikmesini önlemek için yağ veya antifriz kremi kullanan dondurucu kaplarla birlikte verilen trenlerde tedarik edilir.

3.13.Raylı Sistemlerdeki Elektrikli Lokomotiflerin Tarihi Gelişimi

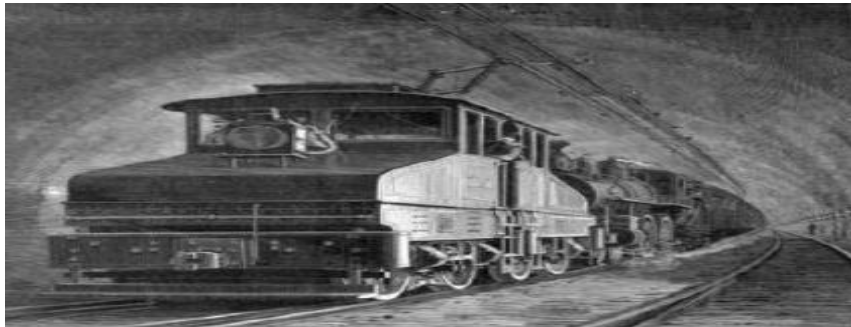
Demiryolu tarihinde, lokomotif panosudaki bataryanın güç kaynağı ile çalışan ilk elektrikli lokomotif 1837 yılında Robert Davidson adında bir İskoçyalı tarafından tasarlandı. Davidson daha sonra, aynı yılın Eylül ayında Edinburgh-Glasgow demiryolu üzerinde test edilmiş olan ancak batarya gücünün sınırlı olması nedeni ile kullanımının mümkün olmadığı Galviana adında daha büyük bir lokomotif tasarlamıştır. Böylece elektrikli lokomotiflerin kullanımı 1879'a kadar Werner von Siemens tarafından Almanya'nın Berlin kentinde ilk yolcu trenini tanıtılmasıyla son bulmuştur. 2.2 kW'lık bir motor ile üç vagonu olan ve maksimum 13 km / s hıza ulaşan elektrikli lokomotiflerden oluşanbu tren ile yaklaşık dört aylık bir süre zarfında toplamda 90000 yolcu taşınmıştır (Frey, 2012).

Böylelikle elektrik gücü, özellikle büyük çekme kuvvetine ve yüksek hızlara ihtiyaç duyan ağır yük trenleri için çok popüler ve önemli hale gelmiştir. Böylece, 20. yüzyılın ilk yirmi yılında ortaya çıkan birçok elektrikli lokomotif modeli söz konusudur. Dünyanın ilk elektrikli tramvay hattı, Almanya'da Berlin yakınlarındaki Lichterfelde bölgesinde 1881 yılında açılmıştır. İlk elektrikli lokomotif örneği, aşağıda Şekil 3.45'te gösterilmiştir. ABD'de ise açılan ilk elektrikli lokomotif hattı Şekil 3.46'da sunulmuştur.



Şekil 3. 45. Almanyanın ilk elektrikli lokomotifi 1881 (Sarısakal S.,2015)

İlk elektrikli AC lokomotifi Charles Brown tarafından tasarlanmıştır. Elektriğin kullanıldığı ilk demiryolu hattı 1895 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde uzunluğu 6km olan Baltimore-Belt kentleri arasında açıldı Şekil 3.46. Havai iletken, esnek hattın geçtiği tünelin en üst noktasında yer almaktaydı. İtalyadaki demiryolları, bir demiryolu hattının tüm uzunluğu dahil olmak üzere, elektrik çekim gücünün ilk uygulandığı ülkedir. Bu elektrikli hat, 4 Eylül 1902'de Valtellina kasabasında açılan ve 106 km uzunluğuna sahip bir hattı. Şekil 3.47, 3 kV 15 Hz'de üç fazlı olan AC elektrik sistemine sahip lokomotif örneği sunulmuştur (Sarısakal S., 2015).



Şekil 3. 46. ABD'de 1895 yılında açılan elektrikli lokomotif hattı (Frey, 2012)



Şekil 3. 47. (1898-1902) Valtellina hattında AC lokomotif (Frey,2012)

3.13.1. Elektrikli Lokomotifler

Elektrikli lokomotifler, trenin elektrik ile beslenen çekiş araçlarıdır ve söz konusu olan elektrik tedariki hava yolu hattı ile (katener) veya üçüncü bölme yoluyla ya da enerjiyi depolamak üzere konumlandırılmış olan bir cihaz aracılığıyla farklı şekillerde yapılabilir. Elektrikle hareket eden ve kendi dizel motorlarına veya gaz türbinlerine sahip elektrikli lokomotifler, gaz türbinli lokomotifler ile elektrikli dizel lokomotifler olarak sınıflandırılır çünkü jeneratör / motor kombinasyonu sadece bir güç iletim sistemi olarak hizmet eder. Lokomotiflerde elektriğin tercih edilmesi, büyük yük trenlerinin çekiciliğinde yüksek verimliliğe işaret etmekle birlikte, aynı zamanda dumanın yok edilmesine ve çevre kirliliğinden korunmasına katkıda bulunmuştur. Buna ek olarak, demiryollarının elektrifikasyonunun yüksek maliyeti, genellikle yolcuların ve yüklerin taşınmasında yoğun derecede kullanılan hat ve aşırı yükler anlamına gelir. Elektrifikasyon ayrıca elektrikli lokomotifler için daha yüksek performans, daha düşük enerji ve bakım maliyetleri ile sonuçlanır (Frey, 2012).

Elektrikli lokomotifler, demiryollarındaki yoğun yolcu servisi için ideal bir çözümdür. Bununla birlikte, Almanya, ABD, Japonya, Çin ve Fransa gibi ülkelerde yüksek hızlı hatlar üzerinde de kullanım görmektedirler. Elektrikli lokomotifler, aynı zamanda devamlı ve yoğun trafiğe sahip malların taşınmasında da tercih edilmektedir.

Avrupa'da demiryolu hatları, karayolu, otoyol ve su yolları gibi, ulusal ulaştırma altyapısının bir parçası olarak düşünülmekte ve genellikle devlet tarafından finanse edilmektedir. Hareketli araç operatörleri, demiryolu kullanımına göre vergi ödeme yükümlülüğüne sahiptirler. Bu, teknik, uzun vadeli ve ekonomik olarak avantajlı elektrifikasyon için gereken büyük yatırımları mümkün kılmaktadır. ABD'de demiryolu altyapısı özel mülkiyete ait olduğu için, gerekli demiryolu elektrifikasyon yatırımlarının gerçekleştirilmesine olarak tanınmamaktadır (Sarısakal S., 2015). Elektrifikasyonun ana dezavantajı, altyapı maliyetidir (yüksek elektrik hatları veya üçüncü elektrikli demiryolu hattı, trafo merkezleri, kontrol sistemleri vb.).

3.13.2. Elektrikli lokomotif türleri

Demiryolları üzerinde elektrikli lokomotiflerin kullanımına başlanması ile birlikte, çeşitli elektrikli lokomotiflerin üretimindeki artış, çekim gücüne ve kullanılan demiryolu hatlarının tipine bağlı olarak değişim göstermekle birlikte, günümüzde manevra kabiliyetli lokomotiflere, yüksek güce sahip ve 350 km / s'ye hızlara kadar varan çok çeşitli lokomotif örneklerinesahibiz. Bu bölümde, Amerika, Rusya, Çin, Hindistan, Japonya, Avustralya gibi dünyanın çeşitli gelişmiş ülkelerinde geleneksel demiryolu hatlarında kullanılan bazı lokomotifler ele alınacaktır.

3.13.3. Amerika

Dünyanın en gelişmiş ve en güçlü devleti olan Amerika Birleşik Devletleri'nde, dünyadaki en büyük 250.000 km'nin üzerinde bir işletme uzunluğuna sahip olan bir demiryolu ağı geliştirmiştir. Amerika'daki demiryolu hattının bir bütün olarak elektrifikasyon maliyetinin yüksek olmasına karşın, buradaki söz konusu ağ sisteminin sadece belirli birkaç kısmının elektrifikasyon maliyetinin karşılanmasıyla sonuçlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, demiryolu hatlarının büyük kısmı dizel trenleri işletirken sadece bazı yoğun kentsel alanlar ve bazı dağlık bölgeler elektrikleştirilmiştir. Ticari hatlar ülkenin toplam demiryolu ağının yaklaşık % 80'ini oluştururken, toplam yolcu şebekesi yaklaşık 35.000 km'dir (Frey, 2012). Amerika Birleşik Devletleri demiryollarında kullanılan veelektrikli trenlerin genel özelliklerini temsil eden elektrikli tren tipi Çizelge 3.9'da sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Amerika'da kullanılan elektrikli trenlerin genel özellikleri sunulmuştur (Frey, 2012)

Sistem	Northend Electrification	
Operatör	NJ Transit	
Ülke	Amerika	
Servis	Banliyö	
Demiryolu Araçları	Electric LHC & EMUs	
Hız / ilerleme	200 km / s	
Elektrifikasyon	25 kV AC, 60 Hz	

3.13.4. Rusya

Diğer ulaşım çeşitlerinin yanı sıra, dünyanın en büyük ülkelerinden biri olan Rusya, başta Avrupa ülkeleri ve en büyük merkezleri olmak üzere St.Petersburg, Moskova, Kazan, Krasnoyarsk ve Khabarovsk' den Çin sınırına kadar olan ülkenin güneybatı kesiminde yer alan demiryolu taşımacılığı da gelişmiş durumdadır. Rusya'nın 87.157 km uzunluğundaki demiryolları arasında, 40.300 km'si elektriklendirilmiştir. Rusya'da, Moskova-Vladivostok kentleri arasındaki demiryolu hattı 9.289 km uzunluğunda olup, dünyanın en uzun ve en yüklü hattı özelliğine sahiptir. Rus demiryollarında 3,300V DC ve 25kV AC gibi iki tip güç kaynağı sistemi kullanılmaktadır (Frey, 2012). Rus demiryollarında kullanılan Rus lokomotiflerinin özellikleri ise Çizelge 3.10'da sunulmuştur.

Çizelge 3.10. Rus lokomotiflerinin özellikleri sunulmuştur (Frey, 2012)

Sistem	Elektrichka	
Operatör	Rus Demiryolları	
Ülke	Rusya	
Servis	Banliyö	
Demiryolu Araçları	EMUs	
Hız / ilerleme	100 km / s ortalama	
Elektrifikasyon	25 kV AC, 50 Hz	

3.13.5. Çin

Çin demiryolu ağı, 100.000 km'nin üzerinde bir alanı kapsayan, Amerika Birleşik Devletleri'nden sonra dünyanın ikinci büyük demiryolu ağıdır. Demiryolları, Çin'in ana ulaşım şeklini oluşturmasının yanı sıra, aynı zamanda ülkenin gelişmesinde de önemli bir role sahiptir. Ülkenin demiryolu ağı, 90.000 km uzunluğundaki geleneksel demiryolları ile yaklaşık 10.000 km yüksek hızlı hatlardan oluşmaktadır. Çin'de, % 60'ın üzerindeki demiryolu ağı elektrikli hale dönüştürülmüştür. Ayrıca Çin'in hedefi, ülkenin toplam demiryolu ağının 2050 yılına kadar 270.000 km uzunluğa ulaşmasına yöneliktir (Züger H., 2013).

Çin demiryolları, 2013 yılında 2.08 milyardan fazla yolcu (Hint Demiryolları'nın ardında en yüksek ikinci rakam) ve 3.22 milyar ton mall (ABD demiryolu ağından sonra en yüksek rakam) taşıyan devlete ait Çin Demiryolları Şirketi tarafından işletilmektedir. Aynı zamanda, Çin'in en yüksek standartta inşa edilen ve 380km / s üzerinde hızlara sahip olan Pekin-Guangzhou şehirleri arasında yer alan 2,288 km uzunluğunda dünyanın en uzun demiryolu hattı da yer almaktadır (Felon C., 2013). Çin demiryollarındaki elektrikli lokomotiflerin özellikleri Çizelge 3.11'de sunulmuştur.

Çizelge 3.11. Çin'in bağlantı hattında kullanılan elektrikli trenlerin özellikleri bulunmaktadır (Frey, 2012)

Sistem	Guangzhou Railway	
Operatör	Çin Demiryolları	
Ülke	Çin	
Servis	Şehirlerarası / Banliyö	
Demiryolu Araçları	EMUs	
Hız / ilerleme	200 km / s	
Elektrifikasyon	25 kV AC, 50 Hz	

3.13.6. Hindistan

Hindistan demiryolları, 1853 yılında Bombay ve Thane şehirleri arasında açılmış olan ve Hint demiryollarının toplam uzunluğunun yaklaşık 115.000 km'sini oluşturduğu bu hat günümüze kadar kullanım bulmaya devam etmiştir ve buna ek olarak, 2014 yılında yapılan ölçümlere göre bu hattın yaklaşık 24.891 km'lik kısmı elektrikleştirilmiş durumdadır. Çizelge 3.12'de, Hint demiryollarındaki elektrikli lokomotiflerin bütün özellikleri sunulmuştur.

Bugün Hindistan'da, AC ve DC olan her iki elektrikli tren sistemi kullanım görmektedir. 2006 yılından bu yana Hint demiryollarında, malların % 80'ini ve yolcu trafiğinin % 85'i elektrikli lokomotifler ile taşınmaktadır.

Çizelge 3. 12. Hindistan'nın geleneksel demiryolunda çalışan bir lokomotifin özellikleri sunulmuştur (Frey, 2012)

Sistem	Mumbai Rajdhani Ekspres	
Operatör	Hint Demiryolları (IR)	
Ülke	Hindistan	
Servis	Şehirlerarası / Banliyö	
Demiryolu Araçları	Lokomotif - Halatlı Trenler	
Hız / ilerleme	120 km / s ortalama	
Elektrifikasyon	25 kV AC, 50 Hz	

3.13.7. Japonya

Günümüz dünyasında Japonya'nın raylı sistemi, uzun hatlardaki demiryolu hatlarının yanı sıra elektrikli lokomotiflerin çok yüksek hızda üretilmesindeki ilerlemelerden dolayı dünyanın en başarılı sistemlerinden biridir. Japonya'nın demiryolları, 22.301 km uzunluğunda olup, bu demiryolu hattının yaklaşık 15.222 kilometrelik kısmı elektrikleştirilmiştir (Rebuyas A., 2012). Japon demiryolu hatlarının yıllar içindeki gelişim sürecinin yanı sıra, elektrikli trenlerdeki gelişimin tüm özellikleri Çizelge 3.13'te sunulmuştur.

Çizelge 3.13. Japonya'da kullanılan elektrikli trenlerin özellikleri sunulmuştur (Frey, 2012)

Sistem	Shinkansen	
Operatör	Japonya Demiryolları	
Ülke	Japonya	
Servis	Şehirlerarası	
Demiryolu Araçları	EMUs	
Hız / ilerleme	320 km / s	
Elektrifikasyon	25 kV AC, 50 Hz / 60Hz	

3.13.8. Avustralya

Avustralya, dünyanın en gelişmiş ülkelerinden biri olup, aynı zamanda 40.000 km'den fazla demiryolu uzunluğuna sahip dünyanın yedinci en büyük demiryolu hattının yer aldığı bir ülkedir. Bu hattın yaklaşık 32.000 km'lik gibi oldukça büyük bir kısmı elektrikleştirilmiş durumdadır. Demiryolu ağ altyapısının çoğu Avustralya hükümetinin mülkiyeti ve bakımı altındadır, ancak şebekedeki trenlerin çoğu özel şirketler tarafından işletilmektedir. Avustralya'daki elektrikleştirme sistemi, diğer ülkelerde olduğu gibi 3000V DC ve 25kV AC güç kaynaklarından oluşmaktadır (Frey, 2012). Avustralya'da geleneksel hatlar üzerinde kullanılan elektrikli trenlerin özellikleri detaylı bir biçimde Çizelge 3.14'te sunulmuştur.

Çizelge 3.14. Avustralya'daki geleneksel demiryolu hatlarında çalışan elektrikli trenlerin özellikleri yer almaktadır (Frey, 2012)

Sistem	Werrimbee Railway Line	
Operatör	Avustralya Demiryolları	
Ülke	Avustralya	
Servis	Banliyö	
Demiryolu Araçları	EMUs	
Hız / ilerleme	115 km / s	
Elektrifikasyon	25 kV AC, 50 Hz	

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Genel Bilgiler

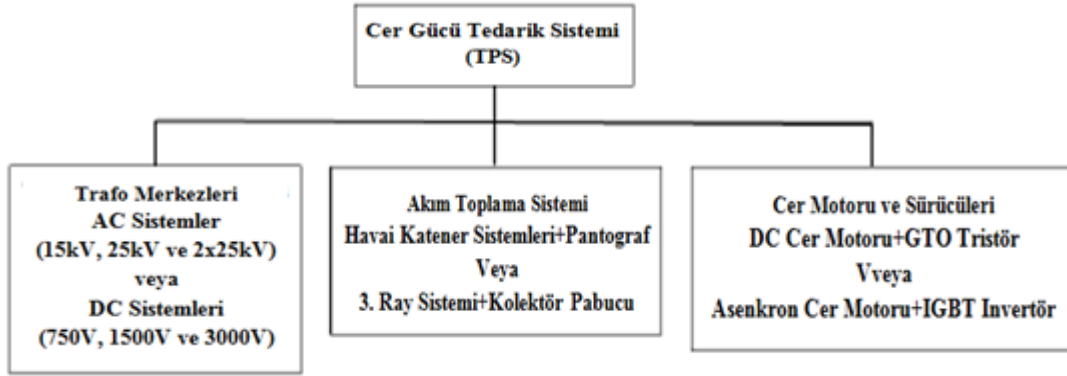
Günümüzde, demiryolu taşımacılığında ve özellikle demiryolu elektrik hatlarındaki gelişmeler ve ilerlemeler göz önüne alındığında, belirli bir demiryolu hattının elektrifikasyonu için kullanılacak elektriğin gerilim seviyesinin seçilmesi hayati bir önem taşımaktadır, böylece son yıllarda tramvay, banliyö, hafif metro, metro, anahat ve yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan başlıca gerilim türleri 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC ve 25 kV AC olmak üzeredir.

Günümüzde 1500 DC gerilim sistemleri, şehir içi hatlarda yüksek güvenilirlik ve düşük işletme maliyetleri nedeniyle uygulanmakta olup, elektrik iletimi hava sistemi ve üçüncü ray yolu üzerinden yapılmaktadır. 25 kV AC 50/60 Hz yüksek gerilim sistemi, esas olarak, yüksek hızlı trenlerde ve hatlarda kullanılırken, bu tip yüksek gerilimli trenlerin elektrik temini, havai katener hattından ve trenin pantograf ile teması sonucunda gerçekleşir ve bu da trenin büyük bir hızla hareket etmesini mümkün kılar, bununla birlikte günümüzde bu tür AC sistemleri dünya genelindeki elektrikli demiryolu hatlarında yaklaşık %60'lık bir oranda kullanım görmektedir (Özmen İ., 2014).

Trafo merkezlerinde üretilen hat gerilimleri trenüstü ekipman olan pantograf veya kolektör pabucu vasıtasıyla cer motorlarına iletilmesi, katener veya üçüncü ray gibi akım taşıyan iletkenlerin kullanılmasıyla gerçekleşir. Cer gücü tedarik sistemi, AC veya DC sistemler olmak üzere iki farklı tipte mevcut durumdadır. Yukarıda belirtildiği gibi, DC düşük gerilimli sistemler daha düşük bir hareket hızı gerektiren tramvaylar ve metrolar için daha fazla tercih edilmekle birlikte, hatların uzunluğu 20-40km'den fazla değildir. Ayrıca, DC sistemi, istasyonlar arasındaki mesafenin birkaç kilometre olduğu ray sisteminin kentsel ulaşımında da kullanım görür. AC sistemi ise, iki istasyon arasındaki mesafenin çok büyük olduğu uzun hatlarda uygulanır, buna örnek olarak banliyö demiryolu hatlarını, anahat ve yüksek hızlı hatları için kullanılmaktadır.

4.1.2. Elektrikli Cer Gücü Tedarik Sistemi (TPS Sistemleri)

TPS Güç Kaynağı Sisteminin ana işlevi, trenlerin kesintisiz çalışmasını sağlamak için tren lokomotifini devamlı olarak yüksek kaliteli elektirik ile besleme üzerine kuruludur. Tipik bir TPS sistemi, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi üç farklı alt sistemden oluşur. Elektrik enerjisinin temin edildiği trafo merkezleri, söz konusu olan bu alt sistemler arasındaki birinci olanıdır.



Şekil 4. 1. TPS alt sistemleri (Özmen İ., 2014)

Trenin hareket etmesi için gerekli olan elektrik enerjisi demiryolu hatları üzerinde uygun aralıklarla yapılan bu yüksek teçhizatlı trafolar aracılığıyla sağlanır. TPS'nin ikinci alt sistemi mevcut toplama sistemidir. Trafo merkezleri üzerinden hareket halindeki trenlere sürekli bir enerji sağlamak adına, AC veya DC temin edilen elektrik gücü hat boyunca kesintisiz devam eden iletkenler üzerinden verilir.

Genel anlamda iki tip akım toplayıcı sistem mevcut durumdadır. Bunlardan birincisi, katener hava hattı ile trenin çatısında yer alan pantografin, katenerin tele temas etmesiyle trene elektrik sağlayan sistemdir, diğer sistem ise güç kaynağı olarak hizmet eden üçüncü ray sistemidir. Üçüncü ray sistemi tren bojisi üzerinde bulunan taşıyıcı raylar ve kolektör pabucu ile yaklaşık olarak aynı seviyeye paralel kurulan üçüncü ray iletkeninden oluşan bir sistemdir. Gerekli olan cer akımı, pabucun üçüncü raya yandan, aşağıdan veya yukarıdan sürekli baskı uygulamasıyla toplanır. Cer elektrik motoru ve sürücü sistemleri ise TPS son alt sisteminde yer alır. Kontrolü daha kolay ve raylı sistem uygulamalarına elverişli olan özelliği sayesinde ilk zamanlarda seri DC motorlar için tercih edilmekteydi (Özmen İ., 2014).

Yukarıda bahsi geçen bu iki sistem, dünyanın farklı ülkelerinin demiryollarında büyük bir uygulama bulmuştur, bunun nedeni şehir içinde olduğu kadar şehir dışında da kullanılan demiryolu taşımacılığı için yoğun nüfusa ve gelişmiş bir ekonomiye sahip ülkelerde, artan ulaşım talebini karşılama amacıyla tercih edilmiştir.

Şehir içi tramvay ve metro kullanımının yanı sıra, şehir dışı yüksek hızlı tren kullanımında söz konusu olan bu iki sistemin daha verimli ve güvenli bir şekilde elektrik sağlamadaki kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Aynı zamanda, güç kaynağı olarak üçüncü ray sisteminin kullanımı, görüntü anlamında demiryolu hattının görseline ve çevre kirliliği adına etkili bir çözüm sunmaktadır.

Daha önce de değindiğimiz üzere, elektrikli bir demiryolu hattının elektrik ile beslemesi için AC ve DC sistemleri gibi iki farklı sistem mevcut durumdadır. Kendi içlerindeki bu sistemler farklı gerilim ve frekans seviyelerine sahip olmalarının yanı sıra, dünya genelinde kullanılan farklı tipte TPS sistemlerinin daha detaylı örnekleri aşağıda Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4. 1. Farklı raylı sistem uygulamalarında hat gerilimleri (Kiessling, 2009)

Kaynak Gerilimi	Akım Toplama Sistemi	Demiryolu Uygulamaları
750 V DC	Havai Hat veya Ray Seviyesi	Metro, Tramvay, Hafif Raylı Sistem
1500 V DC	Havai hat veya Ray Seviyesi	Metro ve Anahat Trenleri
3000 V DC	Havai Hat	Metro, Anahat ve Yüksek Hızlı Tren
15kV AC 16.7Hz	Havai Hat	Ana Hat Trenleri
25kV AC 50/60Hz	Havai Hat	Yüksek Hızlı Tren, Banliyö ve Ana Hat Trenleri
2x25 AC 50/60Hz	Havai Hat	Yüksek Hızlı Tren ve Ağır Yük Hatları

Çizelge 4.2'de ise, EN 50163'e göre bu sistemler için izin verilen maksimum ve minimum gerilim değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4. 2. İzin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri (BS EN 50163, 2007)

Elektrifikasyon Sistemi	En Düşük Gerilim (Geçici)	En Düşük Gerilim (Sürekli)	Nominal Gerilim	En Yüksek Gerilim (Sürekli)	En Yüksek Gerilim (Geçici)
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1000 V
1500V DC	1000 V	1000 V	1500V	1800 V	1950 V
3000V DC	2000 V	2000 V	3000V	3600 V	3900 V
15kV AC, 16.7Hz	11 kV	12 kV	15kV	17.25 kV	18 kV
25kV AC, 50Hz	17.5 kV	19 kV	25kV	27.5 kV	29 kV

Bu sistemlerin kullanımı ülkeden ülkeye değişim göstermektedir, bunun nedeni büyük ölçüde çekme gücüne veya elektrikleştirilen hattın türüne ya da hattın yüküne bağlı olarak farklılıklar içerir, ancak 15kV AC ve 25kV AC sistemi elektrikli demiryollarının birçoğunda kullanım görmektedir. 2x25kV AC sistemi ise ilk olarak Japonya'da hızlı trenlerde kullanılmış ve şu anda da yüksek hızlı trenlerde ve ağır yük hatlarında kullanılmaya devam etmektedir.

4.2. Elektrikli Demiryollarında DC Sisteminin Uygulanması

750V DC ve 1500V DC gerilimlere sahip DC sistemi, dünyanın farklı ülkelerinde yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, 3000V DC sistemi çok yoğun bir kullanım görmemesine karşın, İtalya'daki yüksek hızlı bir tren hattı üzerinde kullanılmış olan örneği mevcut durumdadır. Dünya'da DC düşük gerilim sistemine sahip demiryolu hatlarına göz atacak olursak, raylı sistemlerdeki genel eğilimin metroya uygulanan 1500 V DC rijit katenerin kullanılması olduğunu söyleyebiliriz, öte yandan yüksek gerilimli 25 kV AC sisteminin kullanımı nispeten daha uzun (50 km'den fazla) demiryolu hatları için tercih edilir ve güç kaynağı ya da başka bir deyişle elektrik tedariki havai katener hattından elde edilir.

Türkiye demiryollarında tıpkı diğer ülkelerde olduğu gibi, burada da AC ve DC sistemleri kullanım görmektedir, buna ek olarak yüksek hızlı tren ve çevre birimleri için 25 kV AC sistemi, 750V DC ve 1500V DC sistemi ise şehir içinde tramvay ve metro hatlarında kullanılmaktadır. İstanbul'da demiryolu sisteminde kullanılan gerilim seviyeleri hakkındaki daha detaylı bir anlatım Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4. 3. İstanbul'da bazı hatlara ait cer gücü sistemleri (Özmen İ., 2014)

Hatlar	Kaynak Gerilimi	Akım Toplama Sistemi	Cer Trafo Merkezleri Arası Uzunluk
Marmaray	25 kV AC, 50Hz	Tüpy/Tünel: Rijit Katener Açık Hat: Klasik Havaî Katener	12 - 15 km
M1 Aksaray-Havalimanı	750 V DC	Klasik Havaî Katener	1.5 – 2 km
M2 Yenikapı-Hacıosman	750 V DC	3. Ray Sistemi	1.5 – 2 km
M3 Başakşehir-Olimpiyatköy	1500 V DC	Rijit Katener	2 - 2.5 km
M4 Kadıköy-Kartal	1500 V DC	Rijit Katener	2 - 2.5 km

DC sisteminin uygulanması sırasında, düşük gerilim seviyesi nedeniyle cer merkezleri daha sık aralıklarla konumlandırılır. Bu merkezlerin konumu, kullanılan gerilim seviyesine ve söz konusu ray hattındaki trafik yüküne bağlıdır. Yoğun trafikli hatlarda, 750 V gerilimli DC trafo merkezleri arasındaki mesafenin 1 ila 3 km aralığında olması gerekmektedir, buna ek olarak 1500 V gerilimli DC merkezleri arasındaki mesafe ise 5 km'ye uygun şekilde olmalıdır. Bu nedenle, istasyonlar arası sık mesafelere (tramvay, hafif metro, metro vb.) ve maksimum mesafenin 30-40 km'ye kadar ulaştığı şehir içi raylı sisteme uygulanması için DC sistemleri tercih edilmektedir (Kiessling, 2009).

İki istasyon arasındaki mesafenin 40 km'den daha uzun olduğu örneklerde DC sistemi tercih edilmemektedir, çünkü gerilim düşüşünün ciddi bir oranda azalması ve daha fazla sayıda trafo merkezine ihtiyaç duyulmasına neden olur, bu yüzden, bu tür bir sistem uzun mesafeler için tavsiye edilmez.

4.3. Elektrikli Demiryollarında AC Sisteminin Uygulanması

Geçmişte, trenlerin hareket hızının düşük olmasından kaynaklı, tüm güç kaynağı sistemleri içersinde demiryolu hattı için gerekli olan elektrik tedarigi DC düşük gerilim sistemi tarafından karşılanmaktaydı. Bu durum belli bir süre boyunca devam etmesinin ardından, elektrik mühendisliği teknolojisindeki gelişmeler neticesinde artık demiryollarında yüksek gerilimli ve düşük frekanslı güç kaynağı sistemlerinin kullanılması mümkün bir hale geldi. Böylece, Amerika Birleşik Devletleri'nde yüksek gerilim 12kV AC 25Hz kullanılmaya başladı, Avrupa'da ise 15kV AC 16.7Hz gerilim sistemi kullanım görmeye başladı. Bu frekansların her ikisi de, Avrupa'da (50Hz) ve ABD'de (60Hz) günümüzde kullanılan mevcut elektrik akımından daha düşüktür.

Bunun neticesinde, demiryolu taşımacılığında yüksek gerilim sistemi 25 kV AC ve 50 Hz frekansı ilk kez 1950'de Fransa'nın Valenciennes Thionville hattında kullanılmaya başlandı. Bu tarihten sonra 25kV AC 50 Hz (veya 60hz) yüksek hızlı tren, anahat (ekspres) tren, bölgesel veya banliyö trenleri gibi uzun hatlarda çalışan trenler için bir standart teşkil etmeye başladı ve böylece sektörde sıklıkla tercih edildi (Özmen İ., 2014).

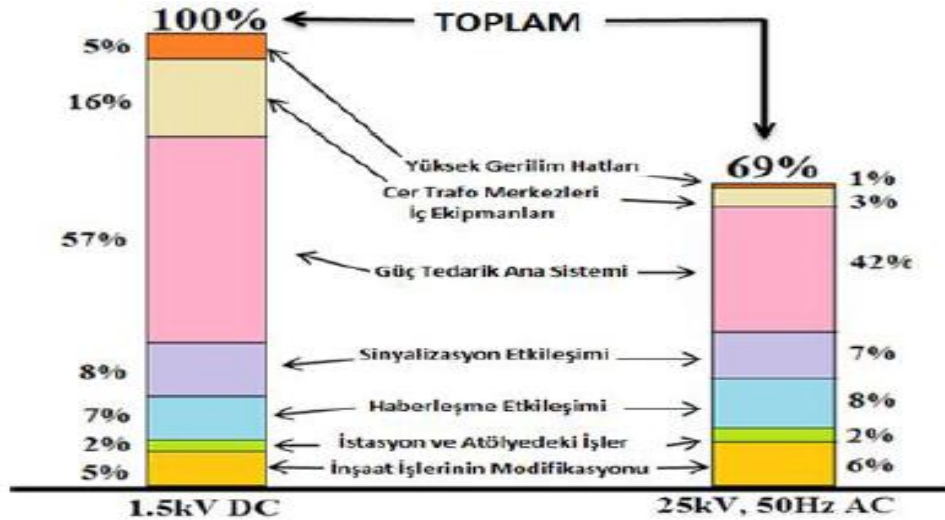
Günümüzde 25kV AC 50Hz'lik yüksek gerilim sistemi, sağladığı büyük avantajlar nedeniyle, dünya genelinde elektrikle çalışan demiryollarının çoğunda kullanılmaktadır. Yüksek AC gerilim sistemi, iki trafo merkezi arasındaki mesafenin DC sisteminkinden önemli ölçüde daha fazla olmasını sağlar. Bu iki tip sistem, sahip oldukları benzerliklerin yanı sıra, hem kurulumları hem de maliyetleri açısından farklı ayrıcalıklara sahip olmakla birlikte, AC yüksek gerilim sistemi ve DC düşük gerilim sistemi arasındaki daha detaylı farklılıklar aşağıda Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Şekil 4.2'de ise, AC ve DC sistemlerinin kurulum maliyetleri açısından oluşturulmuş bir karşılaştırma yer almaktadır (Profillidis, 2000). Bu karşılaştırmada, işletme maliyetleri dahil olmamakla birlikte, sadece inşaat ve kurulum maliyetleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 4. 4. AC ve DC sistemlerin karşılaştırması (Kiessling, 2009)

	AC Sistem	DC Sistem
<i>Ardışık İki Cer Trafo Merkezi Arası Uzaklık</i>	15-50 km arası	2-5 km arası
<i>Akım Toplama Sistemi İletkenleri</i>	Hafif	Çok Daha Ağır
<i>Kullanılan İzolatörler</i>	Çok Daha Büyük İzolatörler	Küçük İzolatörler
<i>Kaçak Akım</i>	Metal Aksamı Etkisi Yoktur	Korozyon vb. ciddi etkileri vardır
<i>Elektromanyetik Girişim (EMI)</i>	Haberleşme ve Sinyalizasyon ekipmanlarına ciddi etkisi vardır	Genellikle Problem Oluşturmaz

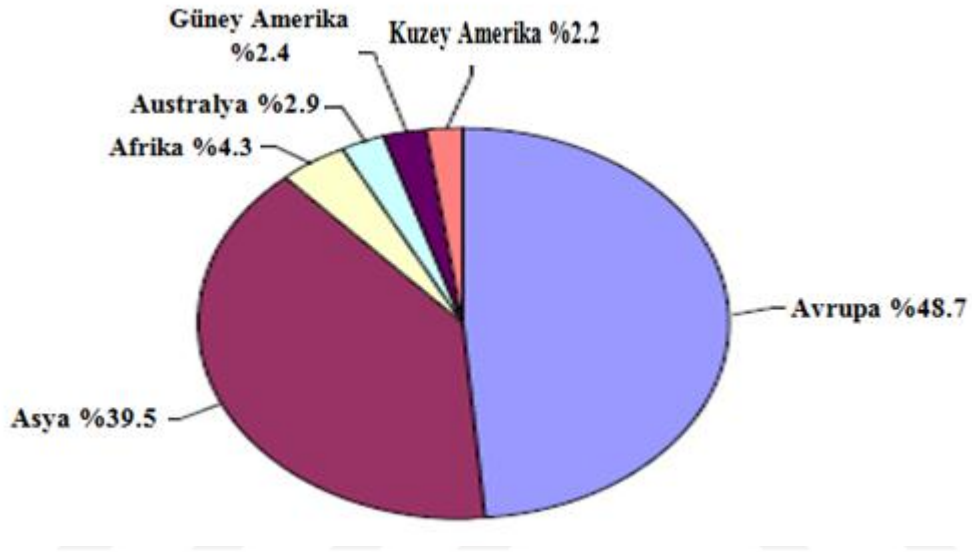
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, AC sisteminin kurulum maliyetleri yaklaşık % 30'luk bir oranda daha düşüktür ve bu iki sistem arasındaki maliyet farklılıkları özellikle trafo merkezleri, güç kaynağı sistemleri ve AC yüksek gerilim hatları için önem arz etmektedir.

Bunun sebebi AC sistemde kullanılan iletken kesitlerinin DC sisteme göre trafo merkezlerinde çok daha az sayıda ekipman, 3-5 kat daha küçük olması, ve iki ardışık trafo merkezi arası uzaklığın çok daha az olmasından kaynaklıdır. V.A. Profillidis'e (2006) göre dünyada işletmede olan elektrikli demiryolu hatlarının yaklaşık %18 i düşük frekanslı AC hat gerilimi (16,7Hz veya 25Hz), %33 ü 25kV AC (50/60Hz) ve yaklaşık %49 ise değişik gerilimlerde DC hat gerilimi kullanmaktadır.



Şekil 4. 2. DC ve AC sistemler maliyet karşılaştırması (Özmen İ., 2014)

Dünya genelinde çoğu ülkede uzun elektrikli demiryolu hatları mevcut durumdadır, dolayısıyla gelecekte elektrikleştirme sistemleri için genişletme planları söz konusudur, buna istinaden Şekil 4.3'te kıtlara göre oluşturulmuş elektrikli demiryolu hatlarının uzunluğu yer almaktadır. İlk olarak, %48.7'lik bir oranda elektrikli demiryolu hatlarına sahip olan Avrupa yer almaktadır, bu kıtayı %39.5 ile Asya izlemektedir, diğer kıtalarda ise elektrikli demiryolları açısından daha düşük bir yüzde söz konusudur.

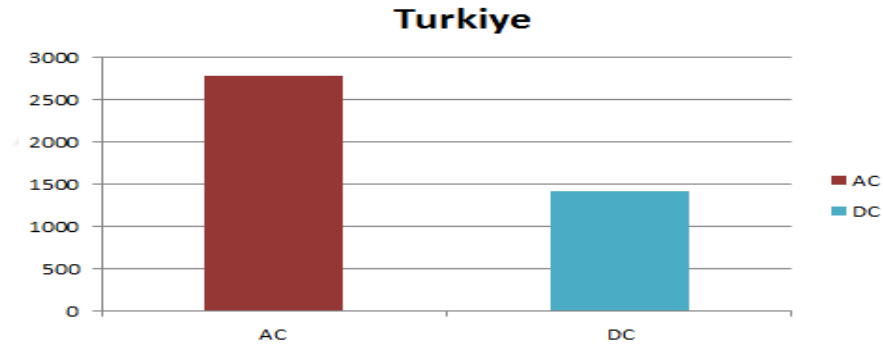


Şekil 4. 3. Dünyada elektrikli demiryolu ağıının dağılımı (Arup D., 2010)

Bu nedenle, yüksek gerilimli AC sistemleri ile düşük gerilimli DC sistemleri için yukarıda vurgulanan özelliklere yönelik, bu sistemin geleneksel demiryolu hatları ve yüksek hızlı tren hatları için ideal olmasının çeşitli nedenleri olduğu sonucuna varabiliriz. İki ardışık güç trafo merkezi arasındaki mesafe çok daha uzun olabilir, aynı hat daha fazla elektrik barındırabilir ve aynı zamanda haberleşme ve sinyalizasyon hattıyla olan elektromanyetik etkileşim minimuma indirilmiş olur ve böylece raylarda toprağa akan kaçak akımların daha iyi kontrol edilmesi mümkün olur.

4.4. Türkiye

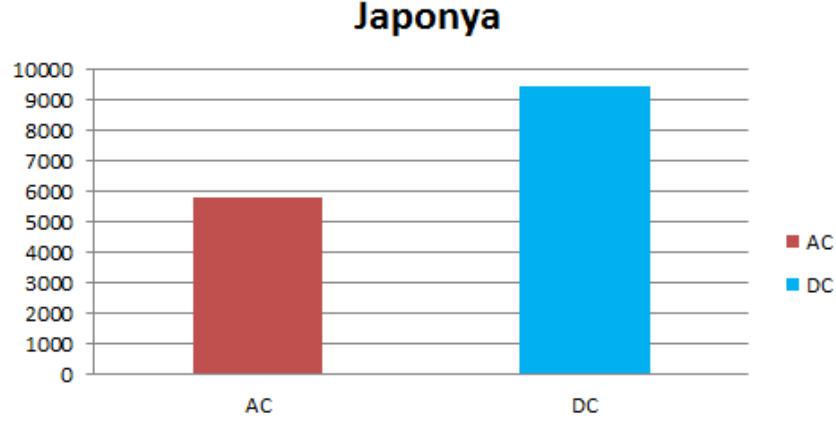
Türk Demiryolları Ağı, devlete ait Ulaştırma ve Telekomünikasyon Bakanlığı tarafından yönetilmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD), konvansiyonel ve Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatlarından sorumludur. Türk Demiryolları 12.532 km uzunluğunda olup, bunların 1.213 km'si de tamamen elektrikli olan demiryolu hatlarıdır, konvansiyonel demiryolu hatları ise 11.319 km uzunluğunda ve sadece 2.970 km'si elektrikleştirilmiş durumdadır. Türk demiryollarında 750V, 1500V DC ve 25kV 50Hz AC gerilimler sahip iki tür güç kaynağı sistemi uygulanmaktadır. Yüksek gerilim sistemi 25kV 50Hz ile elektrikli hatların uzunluğu 2.773 km iken, DC gerilim sistemi ile elektrikli hatların uzunluğu 1410 km'dir. Buradan yola çıkarak, Türkiye'nin elektrikli demiryolu hatlarının toplam uzunluğunun 4 bin 183 km olduğu sonucuna varmak mümkündür. Daha detaylı bir analitik için Şekil 4.4'te grafiksel olarak AC ve DC elektrifikasyon sistemlerinin kullanım oranı gösterilmiştir (TCDD, 2015).



Şekil 4. 4. AC ve DC sistemi ile Türkiye Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu

4.5. Japonya

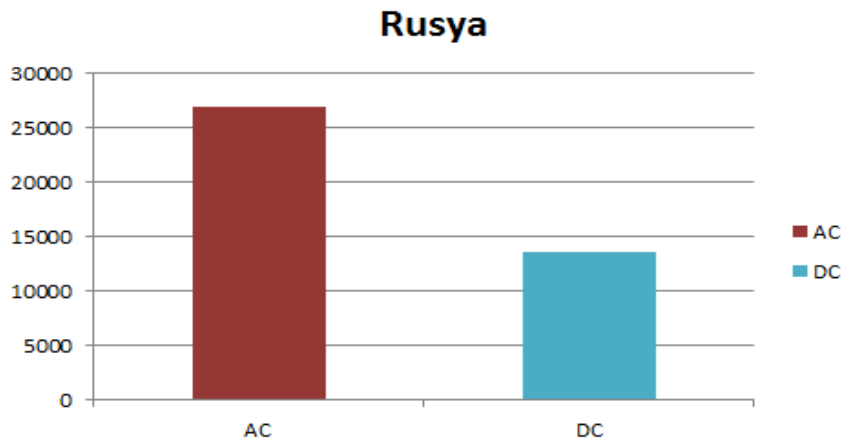
Japonya, en gelişmiş ülkelerden biri olarak, demiryolu taşımacılığında da oldukça gelişmiş durumdadır, buradaki demiryolu hatlarının toplam uzunluğunun 22,301 km olup, bu hatların 15.222 km'si elektrikleştirilmiştir. Japon demiryollarında, en yaygın kullanılan sistemler arasında 1500 V DC ve 25 kV 60 Hz AC gerilim sistemlerine sahip iki tip güç kaynağı sistemi uygulanmaktadır. 25kV 60 Hz AC yüksek gerilim sistemi ile elektrikleştirilen hatların uzunluğu 5.778 km olup, 1500V DC alçak gerilim sistemi ile elektrikli hatların uzunluğu ise 9.444 km'dir. Grafiksel olarak, AC ve DC sistemleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir (Rebuyas A., ve Duallo V., 2012).



Şekil 4. 5. AC ve DC sistemi ile Japon Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu

4.6. Rusya

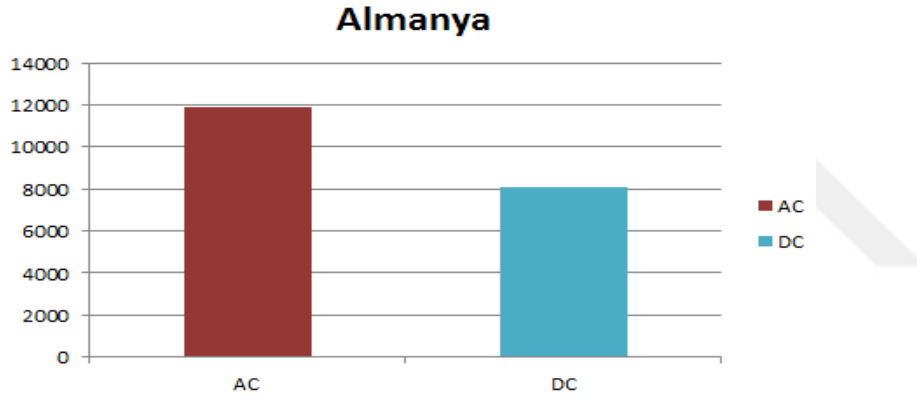
Rusya devleti, dünyanın en gelişmiş ülkelerinden biri olduğu gibi, ulaştırma sektöründe ve özellikle demiryolu taşımacılığında da oldukça gelişmiş durumdadır, buradaki demiryolu hatlarının toplam uzunluğu 87.157 km olup, elektrikleştirilmiş hatların uzunluğu 40.300 km'dir. Rus Demiryollarında, 3.300 V ve 25 kV 60Hz AC sistemleri gibi iki tip güç kaynağı sistemi uygulanmaktadır. 25 kV 60 Hz yüksek gerilim sistemi ile elektrikleştirilen hatların uzunluğu 26.780 km iken, 3.300 V DC alçak gerilim sistemi ile elektrikleştirilen hatların uzunluğu 13.520 km'dir. Grafikselsel olarak, AC ve DC sistemlerinin elektrikli kilometreleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. AC ve DC sistemi ile Rus Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu

4.7. Almanya

Avrupa'nın en gelişmiş ekonomisine sahip ülkelerden biri olan Almanya, demiryolu taşımacılığındaki en son standartlara göre geliştirilmiş bir ulaştırma ağına sahiptir. Alman Demiryolları devlete ait olmakla beraber, birçok özel şirketin de yönetimi altındadır. Alman demiryolu hatlarının toplam uzunluğu 41.315 km olup, bunların 19.998 km'si elektrikleştirilmiş durumdadır. Aynı zamanda Almanya'da da dünyanın diğer ülkelerinde olduğu gibi 1500V DC ve 25kV 50Hz AC gibi iki tip elektrifikasyon sistemi uygulanmaktadır. 1500V DC alçak gerilim sistemi ile elektrikleştirilen hatların uzunluğu 8.113 km olup, 25kV 50 Hz yüksek gerilim sistemi ile elektrikli olan hatların uzunluğu 11.870 km'dir. Grafiksel olarak, AC ve DC sistemlerinin elektrikli kilometreleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

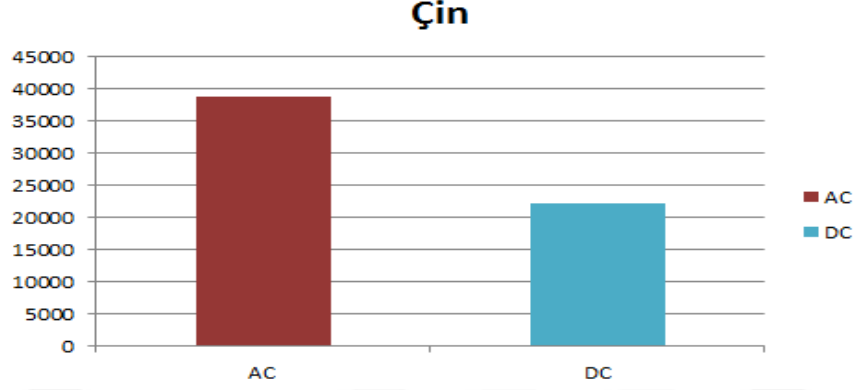


Şekil 4. 7. AC ve DC sistemi ile Alman Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu.

4.8. Çin

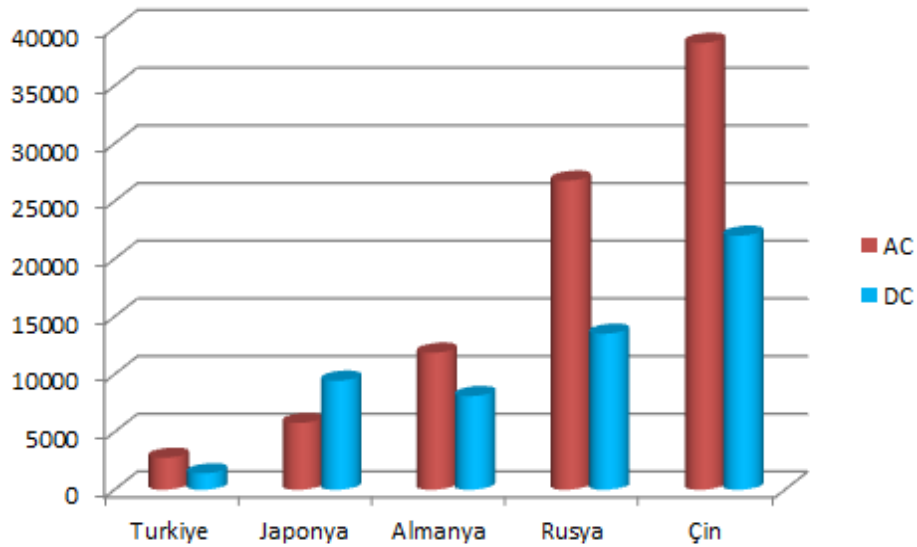
Çin, gelişmiş bir ekonomiye ve ulaşımına sahip bir devlet olarak, günümüzde oldukça gelişmiş bir düzeyde olan demiryolu hatlarına sahiptir, dolayısıyla bu hatların toplam uzunluğu 100.000 km'nin üzerinde olmakla birlikte, Amerika Birleşik Devletleri'nden sonra en büyük demiryolu ağına sahip ikinci ülkedir. Çin demiryolu ağının, 90.000 km'den fazlası konvansiyonel hatlardan oluşmakla birlikte, yaklaşık 10.000 km'lik bir kısım da yüksek hızlı hatlardan oluşmaktadır. Demiryolu hattının 60,742 km'si elektrikleştirilmiş durumdadır. Çin demiryollarında 1500V DC ve 25kV 60Hz AC olmak üzere iki tip elektrifikasyon sistemi kullanılmaktadır. 25kV 60 Hz AC yüksek gerilim

sistemi ile elektrikleştirilen hatların uzunluğu 38.728 km iken, 1500V DC alçak gerilim sistemi ile elektrikli hatların uzunluğu 22.014 km'dir (Felon C., 2013). Grafiksel olarak, AC ve DC sistemlerinin elektrikli kilometreleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 8. AC ve DC sistemi ile Çin Demiryolu Hatlarının Elektrifikasyonu.

Son olarak, Şekil 4.9'da, yukarıda değinilen beş ülkenin demiryolu hatlarının uzunluğu ve bu hatların elektrikleştirilmesi için kullanılan sistemlerin genel grafiği sunulmuştur. Bu grafikte, demiryolu hatlarının toplam uzunluğu ve AC ile DC sistemleri altında elektrikleştirilmiş hatların uzunluğuna göre söz konusu olan ülkelerin karşılaştırmaları yer almaktadır. Demiryolu hatlarının uzunluğuna göre listenin başındaki birinci ülke olan Çin'i, sırasıyla Rusya, Almanya, Japonya ve bu ülkelere kıyasla çok daha kısa demiryolu hatlarına sahip olan Türkiye izlemektedir.



Şekil 4. 9. Ülkelere göre demiryolu hatlarının elektrifikasyonu

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrikli demiryolu diğer demiryolu ve ulaşım sistemlerine göre daha fazla avantajlıdır. Her şeyden önce, demiryolunun elektrikleşmesi için tüm planlar ve tasarımlar yapılmalıdır. Konvansiyonel bir demiryolunun bir elektrikli demiryoluna dönüştürülmesi için her şeyden önce köprü yüksekliği, yol etrafındaki mesafeler vb. gibi kısıtlamalar sorunu çözülmelidir. Daha sonra elektrik direklerin konumu belirlenmelidir.

Demiryolunun elektrikleşmesi, her biri doğru bir şekilde yapılması gereken farklı aşamalara sahiptir. Bu adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Bölgenin kamuoyu araştırması
2. Güç ve elektrik şebekesi üzerinde araştırma
3. Demiryolunun elektrikleşme tipinin belirlenmesi (katener veya üçüncü ray)
4. Elektrikleşme maliyetlerinin hesaplanması
5. Elektrik direklerini kurmak için hattın hazırlanması
6. Hattın elektrikleşmesi için genel planının hazırlanması (güç istasyonun pozisyonu, trafoların pozisyonu, direklerin pozisyonu ve mesafeleri, kablo tipinin belirlenmesi, vb.)
7. Direklerin tasarımı (yüksekliği ve ebatları)
8. Üçüncü rayın tasarımı ve konumlandırılması (eğer havai sistem yerinde kullanılıyorsa).

Demiryolunun elektrikleşmesi için büyük bir yatırıma ihtiyaçtır. Dolayısıyla elektrikleşmeye başlamadan önce, hattan ele edilecek gelir üzerinde kapsamlı bir araştırma lazımdır. Düşük trafik yoğunluğu sahip olan hatların gelecekte düşük gelirler nedeniyle elektrikleşmesi önerilmez. Fakat yoğun trafiğe sahip olan hatlar için tavsiye edilmektedir. Genel olarak demiryolu için ulusal şebeklerinde güç almaktadır fakat güvenilirlik için buna yanı sıra yedek güç kaynağı lazımdır.

Demiryolunun elektrikleşmesi havai ve üçüncü ray olan iki şekilde yapılmaktadır. Elektrikleşme tipinin seçimi, hat tipine ve voltaj miktarına ilişkilidir. Voltaj miktarı yüksek olan hatlar için havai tip ve voltaj miktarı düşük olan hatlar için üçüncü ray kullanılmaktadır. Metro ve tramvay için DC ve yüksek hızlı trenler için AC kullanılmaktadır. Ana hatlar için, 25kV ve 50Hz elektrik kullanılması tavsiye edilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Arup, D., 2010, Electrification Systems Technology Assessment,s. (4-7)

Anonim, 2018 a, Railway Electrification in UK, <http://www.engineersjournal.ie/2016/06/28/railway-electrification-uk-powering-future-rail/>erişim tarihi: 30.06.2018.

Anonim, 2018 b, Rail elektrifikasyon plans cancelled purely for cost reasons, <https://www.theguardian.com/uk-news/2018/mar/29/rail-electrification-plans-cancelled-purely-for-cost-reasons-says-nao-chris-grayling>erişim tarihi: 31.06.2018

Anonim, 2018 d,Will the UK ever get electrification back on track <https://www.railway-technology.com/features/will-uk-ever-get-electrification-back-track/>erişim tarihi: 12.07.2018

Baxter, A., 2015, Network Rail a Guide to Overhead Electrification s.(8-10)

Barlo, J. and Alan, T.,1995, Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems, Northwestern University.

BS EN 50163., 2007, Railway Applications – Supply Voltages for Traction Systems. British Standard Institution.

Bonnett, C., 2005, Practical Railway Engineering s. (137-142)

Department for Transport, 2009, Britain's Transport Infrastructure - Rail Electrification, Printed in Great Britain, DfT Publications.

Erkaya, H., 2005,Raylı Sistemlerin Temelleri, (Practical Railway Engineering), 2nd Ed., London: Imperial College Press, 2005 adlı kitaptan çevrilmiştir.

Erkaya, H., 2016, Raylı Sistemlerde Elektrifikasyon Ders Notları, ESOGÜ.

Frey, Sh., 2012, Railway Electrification Systems & Engineering, 1st Edition, by White Word Publications, s. (33-37)

Felon, C., Ramella, F. and Züger, H., 2013, China's Rail Revolution.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gabbott, M., 2007, Catenary and Pantograph Design and Interface. Balfour Beatty Rail Ltd, England Publishing.
- Honda, M., Kishi, T., Yamamoto, H., 2016, Study of Asset Management Method for Galvanized Steel Railway Electrification Infrastructure in JR-EAST, s. (48-51), The 5th International Conference on Through-life Engineering Services, Publishing.
- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., and Schneider, E., 2009, Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation and Maintenance. England: Publicis Publishing.
- Karamysheva, M., Henttu, V., and Hilmola, O., 2013, Logistics of North-West Russia and Rail Baltica: Standpoints of Private Sector.
- Lovland, J., 2007, A History of Steam Power. s (7- 14) Trondheim, Norway Publishing
- Ministry of Railways, 2015, Indian Railways Whistling Ahead, Story of Growth & Modernisation, Rail Bhawan in New Delhi Publishing.
- NeTIRail-INFRA, 2015, Power supply technologies and practices of low and high-density railways, identifying learning points and future opportunities s.(14-17)
- Ollivier, G., Bullock, R., Jin, Y., and Zhou, N., 2014, High-Speed Railways in China: A Look at Traffic, Beijing Publishing.
- Özmen, İ., 2014, 750 V DC Geri Gücü Tedarik Sisteminin Bilgisayar Destekli Modellemesi, Benzetimi ve Analizi s.(42-48), Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Tarihi Erişimi 10.03.2018.
- Puschmann, R., 2010, Havai Hat Katener Sistemi Bakım Kitabı, Re250 Ankara – Eskişehir
- Profillidis, V., 2000, Railway Management and Engineering. England: Ashgate Publishing.
- Railway Reform, 2011, Toolkit for Improving Rail Sector Performance. s.(191-195)
- Rebuyas, A. and Duallo, V., 2012, Transportation in Japan, University of Tokyo, Publishing

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sarısakal, S., 2015, Rijit Katener Sisteminin Modellenerek Yolcu Üzerindeki Elektrik ve Manyetik Alan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Tarihi Erişimi 18.04.2018.
- Schmid, F., Goodman, C.J., 2005, Electric Railway Systems in Common Use s.(10-15) University of Birmingham Publishing
- Technik, S., 2012, Railway Technology Systems, s(9-12), Schüttorf, Germany Publishing
- Vaahsen, J., and Wilfert, M., 2014, Investment strategy for the railway network of DB group - Focus on electrification strategy, London Publishing.
- Yasu, O., Mochinaga, Y. and Nagasawa H., 1998, Railway Electric Power Feeding System, Editet by Kanji Wak.
- White, R., 2011, AC 25 kV 50 Hz Electrification Supply Design s.(92-95)
- Wisniak J., 2007, James Watt The Steam Engine, s.(327-330), Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel Publishing
- Zheng, W., 2012, Investing in High-Speed Passenger Rail Networks. s.(11-13)