



**T.C. İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAMVAY SİSTEMLERİNDE KATENERSİZ ÇÖZÜMLERİN
İNCELENMESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE KATENERLİ SİSTEMLER
İLE KIYASLANMASI**

Alper Yavuz BAHADIROĞLU

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Yalçın EYİĞÜN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KENTSEL SİSTEMLER VE ULAŞTIRMA YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
İSTANBUL - 2021**

KABUL VE ONAY SAYFASI

Alper Yavuz BAHADIROĞLU tarafından hazırlanan "**Tramvay Sistemlerinde Katenersiz Çözümlerin İncelenmesi ve İstanbul Özelinde Katenerli Sistemler ile Kıyaslanması**" adlı tez çalışması 07/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde başarı ile savunularak, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yalçın EYİGÜN
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. İbrahim BAZ
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hamit Haluk SELİM
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Onay Tarihi: 29.07.2021

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünün 29.07.2021 tarih ve 2021/317 numaralı Yönetim Kurulu Kararının 2. maddesi gereğince, ders yüklerini ve tez yükümlülüğünü yerine getirdiği belirlenen "Alper Yavuz BAHADIROĞLU" adlı öğrencinin mezun olmasına oy birliği ile karar verilmiştir.

Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Enstitü Müdürü

AKADEMİK VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

29.07.2021

Alper Yavuz BAHADIROĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER.....	v
ÇİZELGELER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemleri	3
2.1.1. Kent İçi Raylı Sistemlerin Tarihçesi.....	3
2.1.1.1. Tramvayın Tarihi Gelişimi	3
2.1.1.2. Metronun Tarihi Gelişimi.....	5
2.1.2. Kent içi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri.....	5
2.1.2.1. Tramvay	6
2.1.2.2. Hafif Raylı Sistemler (LRT).....	8
2.1.2.3. Metro	9
2.1.2.4. Lineer Metro	10
2.1.2.5. Manyetik Levitasyonlu Trenler (Maglev).....	11
2.1.2.6. Banliyö Hatları.....	12
2.1.2.7. Monoray.....	12
2.1.2.8. Füniküler	13
2.2. Katenersiz Tramvaylar	14
2.2.1. Zeminden sürekli beslemeli sistemler.....	14
2.2.1.1. Alstom APS sistemi.....	15
2.2.1.2. Ansaldo Tramwave sistemi	18
2.2.1.3. Bombardier Primove sistemi	22
2.2.2. Enerji depolama şeklinde çalışan sistemler	24
2.2.2.1. Caf Süper kapasitör ve batarya sistemi	24
2.2.2.2. Siemens Sitras HES&MES sistemi.....	28
2.2.2.3. Bombardier Primove hibrit sistemi.....	31
2.3. Bataryalar	33
2.3.1. Kurşun-asit batarya.....	34
2.3.2. Nikel-kadmiyum bataryalar.....	36
2.3.3. Nikel metal hibrit bataryalar	37
2.3.4. Lityum-iyon bataryalar	38
2.4. Süper kapasitörler	39
3. UYGULAMA.....	41
3.1. İstanbul'da Katenerli ve Katenersiz Tramvay Sistemleri.....	41
3.1.1. İstanbul'da katenerli tramvay sistemleri	41
3.1.1.1. Bağcılar-Kabataş tramvay hattı T1	41
3.1.1.2. Topkapı - Mescid-i Selam tramvay hattı T4	42

3.1.2. İstanbul'da katenersiz tramvay sistemleri.....	44
3.1.2.1. Eminönü - Alibeyköy tramvayı T5	44
3.2. Katenerli ve Katenersiz Tramvay Hatlarının İncelenmesi.....	55
3.2.1. Katenerli hatların özellikleri.....	57
3.2.2. Katenersiz hatların özellikleri.....	57
3.2.2.1. Alstom APS sistemi.....	57
3.2.2.2. Ansaldo Tramwave sistemi	59
3.2.2.3. Bombardier Primove sistemi	61
3.2.2.4. Siemens Sitra HES&MES Sistemi	62
3.2.2.5. CAF süper kapasitör ve batarya sistemi	63
3.2.2.6. Bombardier Primove hibrit sistemi ve diğer bataryalı çözümler.....	64
3.3. Katenerli ve Katenersiz Hatların Birlikte Kullanılması.....	65
4. AVANTAJLAR VE DEZAVANTAJLAR	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	79

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TRAMVAY SİSTEMLERİNDE KATENERSİZ ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE KATENERLİ SİSTEMLER İLE KIYASLANMASI

Alper Yavuz BAHADIROĞLU

İstanbul Ticaret Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yalçın EYİĞÜN
2021, 79 sayfa

Dünya genelinde uygulanmakta olan birçok tramvay sistemi vardır. Bu sistemler; geçtikleri güzergâhtaki tarihi önemi, yerleşim yerlerine yakınlığı, halk için oluşturduğu riskler, turistik önemi ve taşıdığı yolcu sayısı gibi birçok sebepten dolayı kullanım avantajları ve dezavantajları kıyaslanarak yalnız birini veya aynı tramvay hattında birkaçının birlikte kullanıldığı entegre sistemler olarak seçilmektedir.

Bu araştırmada; dünya genelinde tramvay sistemlerinde kullanılan katenerli ve katenersiz cer gücü iletim sistemlerinin ayrıntılı incelemesi yapılarak kullanım için tercih edilebilecek sisteme karar verilmesinde kolaylık sağlanması amaçlanmıştır.

Dünya çapında kullanılan veya kullanılması için geliştirilen tramvay sistemlerini ve bunları üreten firmaları kapsamaktadır. Her iki tramvay sisteminin dünyada ve İstanbul'da yapılan örneklerinin anlatılarak kıyaslanması sonrasında avantajları ve dezavantajlarının irdelenmesi bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji depolamalı sistemler, katenerli sistemler, katenersiz sistemler, süper kapasitör, tramvay

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EXAMINATION OF CATENARY-FREE SOLUTIONS IN TRAM SYSTEMS AND COMPARISON WITH CATENARY SYSTEMS SPECIFIC TO İSTANBUL

Alper Yavuz BAHADIROĞLU

**İstanbul Commerce University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Urban Systems and Transportation Management**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yalçın EYİĞÜN

2021, 79 pages

There are many tram systems in use around the world. These systems are seen only one or few of them are used on the same tram line in terms of many characteristics on the route they pass as historical importance, proximity to settlements, risks for the public, touristic importance, number of passengers etc. by comparing the usage advantages and disadvantages for many reasons.

In this research, it is aimed to provide convenience of making the decision of the system that can be preferred for use by making a detailed examination of the catenary or catenary-free traction power transmission systems used in tram systems around the world.

It includes the tram systems which are used or developed for use worldwide and the companies that produce them. It is the examination of the advantages and disadvantages of both tram systems after comparing the examples performed in the world and Istanbul.

Keywords: Energy storage systems, catenary systems, catenary free systems, supercapacitor, tram

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Yalçın EYİĞÜN'e teőekkürlerimi sunarım.

Araştırmanın yürütülmesinde maddi ve manevi yardımlarını gördüğüm başta Ayhan KOYUN, Volkan ÇAKIR, Turgay KADIOĞLU ve Hatice AKKAYA olmak üzere tüm Metro İstanbul T5 personeline teşekkür ederim.

Tezimin araştırma aşamasındaki desteklerinde dolayı Metro İstanbul AŞ'ye teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan eşime ve kızlarıma sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Alper Yavuz BAHADIROĞLU

İSTANBUL, 2021

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 2.1 Taksim Nostaljik Tramvayı.....	5
Şekil 2.2 Zeminden Sürekli Beslemeli Tramvay Aracı.....	7
Şekil 2.3 Katener Beslemeli Tramvay Aracı	7
Şekil 2.4 Hafif Raylı Sistem Aracı.....	8
Şekil 2.5 Metro Aracı	10
Şekil 2.6 Lineer Metro Aracı	11
Şekil 2.7 Maglev Aracı	12
Şekil 2.8 Monoray Aracı	13
Şekil 2.9 Füniküler Aracı.....	14
Şekil 2.10 APS Ray Yerleşimi.....	15
Şekil 2.11 APS Ray Enerji Segmentleri.....	16
Şekil 2.12 İki İletken Segmentten Cer Enerjisi Temini.....	17
Şekil 2.13 Tek İletken Segmentten Cer Enerjisi Temini	17
Şekil 2.14 Ansaldo Tramwave Yerden Besleme Sistemi	18
Şekil 2.15 Besleme Segmenti ve Besleme Kablosu Kesiti	19
Şekil 2.16 Cer Gücü Aktif Tek Kısım (50 cm).....	20
Şekil 2.17 Cer Gücü Aktif Çift Kısım (100 cm).....	20
Şekil 2.18 İletken Segmentte Güç Olması Hali.....	21
Şekil 2.19 İletken Segmentte Güç Olmaması Hali	21
Şekil 2.20 Bombardier Primove Sistem	23
Şekil 2.21 Primove Sistem Primer Besleme Segmentleri	23
Şekil 2.22 Araç Altı Toplama Bobini.....	24
Şekil 2.23 Dahili Enerji Depolama Sistemleri	25
Şekil 2.24 Batarya ve Süper Kapasitör Karşılaştırması	26
Şekil 2.25 Konvansiyonel Katenerli ve CAF Katenersiz Aracının Çalışma Prensibi.....	27
Şekil 2.26 Tayvan Kaohsiung Tramvayı (Eyeontaiwan, 2020).....	28
Şekil 2.27 Siments Sitras MES&HES DCL, NiMH ve Li-ion Batarya Gösterimi ..	29
Şekil 2.28 Sitras MES&HES Durak Arası Olması Gereken Mesafe.....	30
Şekil 2.29 Siments Sitras HES (Hibrit Enerji Depolama) Sistemi Çalışma Gösterimi	31
Şekil 2.30 Siments Sitras HES Education City Tramvayı Doha / Katar	31
Şekil 2.31 PRIMOVE 50: 2 x 24.5 kWh Batarya (sağ) Termal havalandırma Ünitesi (sol)	32
Şekil 2.32 MITRAC ES 500 (1 kWh) ve Boyutlarına göre yerleşimi (0,5/1/1,5 /2 kWh)	33
Şekil 2.33 Kurşun-Asit Batarya Gösterimi	35
Şekil 2.34 Alstom Citadis Tramvayında NiMH Batarya Ünitesi	37
Şekil 2.35 Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Li-ion Batarya Ünitesi	38
Şekil 2.36 Raylı Sistem Araçlarında Süper Kapasitör Depolama Ünitesi	40
Şekil 3.1 T1 Tramvay hattı güzergâhı	42
Şekil 3.2 T4 Tramvay hattı güzergâhı	43
Şekil 3.3 Eminönü-Alibeyköy Proje Güzergâhı	45
Şekil 3.4 APS Rayı Temizleme Fırçası	46
Şekil 3.5 F1 ve F2 B Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili	47
Şekil 3.6 F2 ve F1 B Segmentinde, F2 Enerjili	48

Şekil 3.7 F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili	48
Şekil 3.8 F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F1 Enerjili	48
Şekil 3.9 F2 ve F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili	49
Şekil 3.10 Basitleştirilmiş APS Enerji Temini Mimari Gösterimi	49
Şekil 3.11 Montajı Yapılan Enerji Kutusu (Powerbox).....	50
Şekil 3.12 APS Araç Üstü Ekipman ve Sistem Kesiti	51
Şekil 3.13 Eminönü-Alibeyköy Tramvay Hattı Kesiti	52
Şekil 3.14 Eminönü-Alibeyköy Tramvayı Proje Kesiti	53
Şekil 3.15 Durmazlar Aracı Makinist Kabini	53
Şekil 3.16 Eminönü-Alibeyköy Tramvay Aracı	54
Şekil 3.17 Alstom APS Sistem Elemanları	58
Şekil 3.18 Ansaldo Tramwave Segment Kesiti	60
Şekil 3.19 Primove Sistem Mitrac Bataryası	61
Şekil 3.20 Siments Sitra HES&MES İşletme Sırasında Araç Şarj Prensibi.....	62
Şekil 3.21 Caf Enerji Depolama Sistem Görünüşü.....	64
Şekil 3.22 Sidney Tramvayı Katenersiz (APS) Kısmı	66
Şekil 3.23 Sidney Tramvayı Katenerli Sistem	66
Şekil 3.24 Konya Tramvayı Katenerli Sistem	67
Şekil 3.25 Konya Tramvayı Katenersiz Sistem	67

ÇİZELGELER

	Sayfa
Çizelge 2.1. Enerji Depolama Sistemleri	34
Çizelge 3.1 T1 İşletme Verileri	42
Çizelge 3.2 T4 İşletme Verileri	43
Çizelge 3.3 Eminönü-Alibeyköy Tramvayı İstasyon İsimleri ve Kilometre Bilgileri.....	44
Çizelge 3.4 Ulaşım Sistemlerinden Fiziksel Özellikler ve Trafik Esnekliği	55
Çizelge 4.1. Katenerli ve Katenersiz Sistemler Karşılaştırma Tablosu	74



SİMGELER VE KISALTMALAR

ACR	(Acceleration Charge Accumulator) Hızlı Şarj Akümülatörü
ATO	Otomatik Tren İşletme
CER	(Traction) Çekme-Sürüklenme
CM	(Centimeter) Santimetre
DC	(Direct Current) Doğru Akım
DLC	(Double Layer Capacitor) Çift Katmalı Kapasitör
ERT	(Embedded Third Rail) Gömülü Üçüncü Ray
ESS	(Energy Storage System) Enerji Depolama Sistemi
KHZ	(Kilo Herz)
KM	(Kilo Meter) Kilometre
KWH	(kilowatthours) kilowattsaat
LRT	(Light Rail Transport) Hafif Raylı Taşıma
OCS	(Overhead Contact System) Konvansiyonel Havai Hat Sistemi
OSS	(On-Board Storage System) Araç Üstü Depolama Sistemi
PB	(Powerbox) Güç Kutusu
SMT	Şangay Maglev Treni
V	Volt

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar insan mal varlıklarının hızlı ve güvenli yer değişimi için ulaşımın önemi büyüktür. Ulaşım açısından ulaşım sistemlerindeki en önemli buluşlar sırasıyla tekerleğin, demiryolunun ve uçağın keşfi olmuştur. Demir yollarının temeli ilk defa 19. yüzyılın başında İngiliz maden ocaklarında atılmıştır. Demiryolunun ana mantalitesi metal tekerleğin metal raya teması ile ray tarafından kılavuzlu hareket etmesidir.

Demiryolunun gelişimi, endüstri devriminden ve buharın kullanılmasından sonra başlamıştır. İlk demiryolu hatları 1830'lu yıllarda birçok Avrupa kentinde işlemeye başlamıştır ve birçok demiryolu kurulumu 20. yüzyılın başında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Demiryollarının bu kadar gelişmesindeki en önemli unsur yüksek hız imkânı ile hızlı ve güvenli ulaşımıdır.

20. Yüzyılın başlarında elektrikli cer sistemlerinin devreye girmesi ile demiryolları daha fazla gelişmiş ve 2. Dünya savaşı öncesinde sinyalizasyon ve merkezi kontrol sisteminin devreye girmesi ve gelişimi ile 1950'li yıllarda şimdiki demiryolları şekillenmeye başlamıştır (Öztürk ve Arlı, 2009).

Zamanla diğer ulaşım sistemlerinin de gelişmesi ve daha fazla konfor sunması sebebiyle demiryollarında modernizasyon zorunlu hale gelmiştir. Demiryollarında özellikle hız artırılması, maliyetlerin düşürülmesi ve hizmet iyileştirmeleri yapılmıştır. Bu sebeplerden dolayı günümüzde 250-300 km/sa hızla giden yüksek hızlı trenler kullanılmaya başlamıştır.

Günümüzde gelişen demiryolu taşımacılığı iki ana başlık altında toplanmıştır.

1. Şehirlerarası Demiryolları

a) Yolcu Taşımacılığı

- Konvansiyonel Trenler
- Yüksek Hızlı Trenler

b) Yük Taşımacılığı

2. Kent içi Raylı Sistemler

- a) Tramvaylar
- b) Hafif Raylı Sistemler (LRT)
- c) Metro
- d) Lineer Metro
- e) Magnetik Levitasyonlu Trenler (Maglev)
- f) Banliyö Hatları
- g) Havaray
- h) Füniküler

Ülkemizde şehirlerarası ve şehir içi raylı sistem taşımacılığına özellikle son yıllarda yatırımlar yapılmış ve aynı zamanda eski hatlara ise modernizasyon veya yenileme çalışması yapılmıştır. Artan şehir içi trafik yoğunluğu, hava kirliliği ve maliyet uygunluğu metropol şehirlerde raylı sistemlere olan ilgiyi arttırmıştır. Şehir merkezlerinde en çok kullanılan raylı sistemlerden bir tanesi de tramvay sistemleridir. Tramvay sistemlerinde enerji beslemesi olarak en yaygın ve en ekonomik olan sistemler katener sistemlerdir. Fakat şehir merkezlerinde katener hattının çeşitli sebeplerle kopması, katener direklerine özel araçlar ile çarpmalar kalabalık caddelerde tehlike oluşturabilmektedir. Aynı zamanda birçok katener direği ve katener teli tarihi bölgelerde tarihi dokunun korunmasında negatif bir etki yapmaktadır. Raylı sistem sektöründe faaliyet gösteren firmalar bu olumsuz durumları ortadan kaldırmak için 2000'li yıllarda katenersiz cer gücü iletim sistemi üretmek için çalışmalara başlamıştır.

Tramvaylarda kullanılan bu sistemler;

1. Zeminden sürekli beslemeli sistemler
2. Enerji depolamaya dayalı sistemlerdir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemleri

Artan trafik yoğunluğu, akaryakıt maliyetleri ve kara yolu araçlarının havayı kirletmesi sonucu dünya genelinde ve ülkemizde kent içinde raylı sistemlere olan ilgi arttırmıştır. Ülkemiz geçmiş yıllarda yapılan hatalardan dolayı kent içi raylı sistemlere olan ilgi karayoluna dönmüş olmasına rağmen son yıllarda yapılan yatırımlar ile kent içi raylı ulaşım sistem yatırımları hızlanmıştır.

2.1.1. Kent İçi Raylı Sistemlerin Tarihçesi

Artan şehir içi insan yoğunluğunu taşımak için karayolu araçlarına alternatif birçok ulaşım sistemi geliştirilmiştir. Bunlardan biri birçok ulaşım sistemi ile entegre olan kent içi raylı sistemlerdir.

2.1.1.1. Tramvayın Tarihi Gelişimi

Tramvay ilk olarak 1832 yılında atlar ile Newyork'ta Harlem-Manhattan arasında açılmıştır. 1852 yılında ilk oluklu rayın geliştirilmesi ve yol kaplamasında rayların gömülü olarak kullanılması sonucunda trafiğe engel olmamıştır. Bundan dolayı Boston, Baltimore, Chicago gibi birçok şehirde kullanılmaya başlamıştır. Avrupa'da ilk defa 1853 yılında Fransız mühendis Alphonse Loubat, New York'ta yola gömülü rayları olan ilk kentsel tramvay kullanılmaya başlanmıştır. Londra'da (1861), St. Petersburg (1863), Berlin (1865), Viyana (1865) ve Budapeşte (1866) şehirlerinde Avrupa'nın birçok şehrinde kullanılmaya başlamıştır.

Atlı tramvay maliyetleri yüksek olması ve fazla yolcu kapasitesinin olmamasından dolayı farklı çözüm yolları aranmıştır. 1873 yılında buharla çalışan ilk tramvay geliştirilmiş ve St. Petersburg'da test edilmiştir. Sonrasında 1881 yılında Rus mühendis Fyodor Pirotsky tarafından ilk elektrik motorlu tramvay hattı hizmete açılmıştır. Zamanla elektrikli tramvaylar uygun ve ekonomik olması sebebiyle atlı tramvayların yerini almıştır. Newyork'ta atlı tramvayların sonuncusu 1914 yılında işletmeden kaldırılmıştır.

Murteza (2010) İstanbul'daki ilk tramvayla ilgili:

“İstanbul'da 19. yüzyılın ilk çeyreğine kadar ulaşım yaya olarak veya at ve at arabaları ile gerçekleşmiştir. Osmanlı Devleti, 30 Ağustos 1869 tarihinde gerçekleştirilen bir mukavele ile, İstanbul içinde insan ve eşya nakli için demiryolu inşaatı ile demiryolu üzerinde hayvan çekerli araba işletilmesi hakkını 40 yıl süre ile Dersaadet Tramvay Şirketi'ne vermiştir. 1870 yılında başlanan çalışmalar ile;

1. Azapkapısı-Galata-Beşiktaş-Ortaköy hattı Temmuz 1872'de,
2. Eminönü-Divanyolu-Beyazıt-Aksaray hattı Aralık 1872'de,
3. Aksaray-Samatya-Yedikule hattı 1873'de,
4. Aksaray-Topkapı hattı 1874 yılında tamamlanarak hizmete girmiştir.

Sonraki yıllarda yeni tramvay hatlarının yapımı için çalışmalar yapılmış ve 1881'de 3 yeni güzergâhın yapılmasına karar verilmiştir. Bu güzergâhlardan;

1. Galata-Şişli hattı, 5200 metre uzunluğunda olup 1883 yılında,
2. Galata-Tatavla hattı, 1885 yılında işletmeye açılmıştır.
3. Eminönü-Eyüp hattı ise hayata geçirilememiştir.

İstanbul'da Şubat 1914'te elektrikli tramvay devri başlamıştır. 1928 yılında da Üsküdar-Kısıklı hattı ile Anadolu yakasında da tramvay kullanılmaya başlanmıştır. 1935 yılında tramvaylarla günde 314 bin yolcu taşınırken 1950 yılında tramvay hatlarının toplam uzunluğu 130 kilometreye ulaşmıştır.

1956 yılında trolleybüslerin sefere konmaya başlanması ile ilk olarak Tünel-Maçka hattı ile Topkapı ve Yedikule tarafındaki tramvay seferleri Beyazıt'a kadar iptal edilmiştir. 1961 yılına gelindiğinde ise, hızla artan lastik tekerlekli ulaşım vasıtalarına yol açabilmek adına Avrupa yakasındaki tramvay hatlarının tamamı, 1966 yılı içinde de Kadıköy yakasındaki tüm hatlar kaldırılmıştır (s.20).” demektedir.

1990 yılında Tünel - Taksim arasındaki tarihi tramvay hattının işletmeye açılmasından sonra, 1992 yılında Sirkeci – Ayvansaray - Topkapı, 1994 yılında

Topkapı - Zeytinburnu, 1996 yılında Sirkeci - Eminönü bölümü hizmete açılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Taksim Nostaljik Tramvayı

2.1.1.2. Metronun Tarihi Gelişimi

Dünyada ilk metro hattı 1863 yılında 6 km uzunluğunda Londra'da aç - kapa yöntemi ile yapılan buharlı lokomotifli Metropolitan metro hattıdır. Yine Londra'da 1890 yılında 3. Raydan elektrik alan elektrikli lokomotiflerin kullanıldığı bir metro hattı yapılmıştır. Sonrasında 1896 yılında Budapeşte'de, 1900 yılında Paris'te, 1902 yılında Berlin'de metro hatları açılmıştır.

Ülkemizde 1875 yılında Londra metrosundan sonra ikinci metro Karaköy tüneli yap - işlet modeli ile yapılarak hizmete girmiştir. 114 yıl sonrasında ikinci metro hattı 1989 yılında İstanbul hafif metro (M1 Esenler - Aksaray) hattı işletmeye açılmıştır.

2.1.2. Kent içi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri

Dünyada'da aktif olarak işletilmekte olan sekiz adet kent içi raylı toplu taşıma sistemi vardır. Bu raylı toplu taşıma sistemlerinden 5 tanesi ülkemizde işletme altında iken, kalan üç tanesi ülkemizde kullanılmamaktadır.

2.1.2.1. Tramvay

Tramvay hatları karayolu ulaşım araçlarıyla hemzemin seviyede olan, aynı alanı kullanabilen, trafik ve araç yolu durumuna göre bir makinist tarafından kontrol edilen, enerjisini katenerden veya zeminden gömülü bir enerji rayından alan, yolcu istasyonları daha çok kullanıldığı cadde seviyesinde yer aldığından yer yer karayolu ulaşımı ile karma trafik oluşturan en düşük kapasiteli raylı toplu taşıma sistemleridir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Trafik sıkışıklığı durumunda otobüslerden daha hızlı hareket ettiği için 1950'li yıllardan sonra daha çok tercih edilmiştir. Karayolu ile kesiştiği bölgelerde karayolu araçlarına göre geçiş üstünlüğü vardır. Trafikten ayrı bölgelerde işletmesi yapılan tramvaylar, dar cadde ve yoğun trafikteki tramvaylara karşı daha iyi işletme performansı gösterir.

Baştürk (2014) tramvaylarla ilgi:

“Tramvay yolları inşa edilirken çok büyük çaplı kazı ve inşaat çalışmaları gerekmediği için maliyet açısından diğer sistemlere oranla oldukça ucuz sistemlerdir. Dünyanın pek çok şehrinde kullanılan tramvay sistemlerinde durak olarak mevcut otobüs durakları veya onlara benzer basit tesislerden faydalanılmaktadır. Tramvaylar için inşa edilen durak boyları en fazla 60 metre civarındadır. Araç genişlikleri 2200 mm ile 2650 mm arasında değişebilmektedir. Tipik bir tramvay aracı 4-6 akslı 14-21 metre uzunluğunda 80-180 yolcu kapasiteli, kapasitenin %20-40'ı oturan yolculu araçlardır (s.14).” demektedir.

Tramvay araçlarının cer beslemesi havai katener hat ve yerden besleme hatları olarak sağlanmaktadır. Genellikle 750 VDC akım kullanılır. Tramvay azami işletme hızları havai katenerli sistemlerde (OCS) genellikle 80 km/saat arası değişmektedir. Yerden enerji beslemeli sistemlerde azami işletme hızı Tramvawe'de 70 km/sa iken, APS'de 50km/saat sınırlı olmaktadır. Bu sistemlerin tek yönde maksimum yolcu kapasiteleri ortalama 15.000 yolcu/yön'dür.



Şekil 2.2 Zeminden Sürekli Beslemeli Tramvay Aracı



Şekil 2.3 Katener Beslemeli Tramvay Aracı

2.1.2.2. Hafif Raylı Sistemler (LRT)

Tramvay hatlarının geliştirilmesi ile ortaya çıkan, metro ve tramvayın arasında kalan önemli bir toplu taşıma sistemidir (Şekil 2.4). Yolcu taşıma, oturma kapasitesi ve hızları tramvaylara göre fazladır. Tek yöne yolcu taşıma kapasitesi yaklaşık 40.000 yolcu/yön/saat seviyelerindedir. Bu sistemlerde güzergâh tam korumalı olarak ayarlanmıştır.

Arlı (2010) tramvay araçlarıyla ilgili :

“Yolcuların %20 - 50’si oturandır. 18 - 42 m boyunda araçların yüksek hızlanma - frenleme (1-2 m/s², acil frenleme 3 m/s²) ivmesine sahiptir. Maksimum hız 70 - 80 km/sa arasındadır ama teknik olarak 100 - 125 km/sa hıza çıkabilmektedir. İşletme hızı 18 - 40 km/sa arasındadır. Hafif raylı sistemde aynı güzergâh üstünde çok farklı işletme koşulları vardır, tünel kısımları olduğu gibi yaya bölgelerinde karışık trafikte de çalışmakta, alçak ve yüksek platformlar bulunmakta, sürücülü olduğu gibi tam otomatik kontrol sistemleri ile sürücüsüz de olabilmektedir” demektedir.

Hafif metro sistemlerde cer gücü havai katener hattı veya 3. Ray besleme hattından oluşmakta olup, 750 VDC veya 1500 VDC akım kullanırlar.



Şekil 2.4 Hafif Raylı Sistem Aracı

2.1.2.3. Metro

Metro, şehir içi raylı toplu taşıma sistemleri arasında en fazla yolcu taşıma kapasitesine sahip ulaşım sistemidir. Dünyanın birçok yerinde toplu taşıma sistemi olarak kullanılır. Saatteki maksimum yolcu kapasiteleri ortalama 90.000 yolcu/yön dür. Trafik yoğunluğunun çok olduğu gelişmiş şehirlerde çözüm genellikle metro sistemleri ile olmaktadır. Bu sistemler tramvay sistemleri gibi cadde seviyesinde değil genellikle yer altından tünellerle ve aç kapa sistemleri sayesinde sağlanmaktadır. Metro sistemleri gereklilik durumunda viyadük ve/veya köprü üzerinden de geçmektedir. Metro sistemleri tam korumalı ve gelişmiş sinyalizasyon sistemleri ile ticari işletme yapmaktadır. Ülkemizde de olduğu gibi ATO (Otomatik Tren İşletme) sistemi sayesinde sürücüsüz metrolar da işletmeye açılmıştır. Türkiye’de ve İstanbul’da bunun en önemli örneği Üsküdar-Ümraniye-Sancaktepe (M5) hattıdır ve bu hat (M5) 2017 yılından beri kullanılmaktadır. Aynı zamanda Kabataş – Mecidiyeköy – Mahmutbey (M7) hattı testleri devam etmekte olup Ekim 2020 yılında işletmeye açılmıştır. Bu tarz metroların ilk yatırım maliyetleri fazla olmasına rağmen, işletme maliyetleri daha düşük ve işletme elverişliliği daha yüksektir.

Metro sistemleri ilk yatırım maliyetleri yüksek olsa bile işletme ve yolcu başına düşen yatırım maliyetleri olarak en optimum sistemlerdir. Tam korumalı sistem olmalarından dolayı dış etkenli taşıt kazası yok denecek kadar azdır. Araç uzunluğu genel olarak 16-23 metre, 1 - 10 dizi araçlardır. İşletme hızları 30 - 80 km/saat arasındadır. En yoğun zamanlarda geçen araç sayısı 20 - 40 ad/saat arasındadır.

Metro sistemlerinde cer gücü havai katener hattı veya Şekil 2.5’de görüldüğü gibi 3. Ray besleme hattından oluşmakta olup, 750 VDC, 1500 VDC veya 3000 VDC gerilim kullanılır.



Şekil 2.5 Metro Aracı

2.1.2.4. Lineer Metro

Metro sistemlerinin gelişmesi sonrasında inşaat, işletme ve bakım maliyetlerinin azaltılması için yeni sistemlerinin araştırılması ihtiyacı doğmuştur. Araç tabanının yere alçaltılması sonrasında tünel kesitlerinin %50 ye yakın küçülmesi, adezyonsuz tahrik sistemi sayesinde tekerleklerin sadece yük taşıma ve kılavuzlama işlevlerini yerine getirmesinden dolayı daha az araç ve hat bakım masrafları yapılmıştır. Geleneksel metrolardaki %3,5 tırmanma değerine karşın %6 - 8 eğimlere tırmanabilme, dönmesiz lineer motor kullanımı dolayısıyla sesiz motor, hareketli boji sistemi sayesinde keskin kurpları dönme kapasitesinin arttırılması (min. kurp çapı 160 m'den 50 m'ye indirilmesi) gibi birçok avantajları tercih edilmelerindeki etmenlerdendir.

Arlı (2011) lineer metro araçlarıyla ilgili :

Japonya ve Kanada firmalarının geliştirdiği sistemlerin toplam tek hat uzunluğu günümüz itibari ile yaklaşık 300 km'dir. Dünyadaki ilk LIM (Lineer Endüksiyon Motoru) teknolojisi uygulanan hat Kanada - Vancouver şehrinin SkyTrain projesidir. Sistemin ilk aşaması 1986 yılında açılmıştır ve taşıdığı yıllık yolcu sayısı 40 milyonu aşmaktadır. Sistemi kuran firmanın diğer uygulaması ise Malezya - Kuala Lumpur'da hizmetine devam etmektedir. 1990 yılında Japonya - Osaka şehri lineer metro

sistemine kavuşmuş ve buradaki başarılı uygulamayı Tokyo şehri izlemiştir. Lineer metro sistemi kapasite olarak orta ölçekli yolculuk ve mesafeli taşımalar için uygundur. Ağır metro sistemlerinin yarı kapasitesi olan 35.000 yolcu/saat trafik kapasitesini karşılayabilmektedir” demektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Lineer Metro Aracı (Wowturkey, 2020)

2.1.2.5. Manyetik Levitasyonlu Trenler (Maglev)

Maglev araçlarında taşıyıcı yatak ile araç arasında bir temas yoktur ve hareket manyetik etkiler ile sağlanır. Manyetik levitasyonu trenlerde hareket manyetik itme ve kaldırma gücü ile sağlanır, araç ile taşıyıcı ray arasında bir temas yoktur. Taşıyıcı alt yapı üzerine dizilmiş bobinler, araç içerisine uygun bir şekilde yerleştirilmiş mıknatıslarla, levitasyon, ilerleme ve kılavuzlama için gerekli alternatif akım üretilir. Bu şekilde aracın hızlanması ve yavaşlaması kontrol edilir. Levitasyon ve seyahat işlemi sırasında maglev aracı, ray kılavuzuyla hiçbir mekanik temas olmaksızın sürtünmesiz bir manyetik yastık üzerinde yüzer. Fakat Maglev’de her ne kadar sürtünme olmamasının yanında magnetik levitasyon için çok fazla enerji tüketilmektedir. İşletme maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle dünyada İşletme altında aktif olarak kullanılan tek Maglev hattı Longyang Road İstasyonu - Pudong Uluslararası Havalimanı arasında hizmet veren Çin’deki Şangay Maglev Treni (SMT)’dir (Şekil2.7).



Şekil 2.7 Maglev Aracı (Filgezi, 2020)

2.1.2.6. Banliyö Hatları

Büyük şehirlerde çoğunlukla şehirler arası yolcu taşımada ve şehir dışındaki yerleşim yerlerine yolcu taşımada kullanılan bu hatlar zamanla kent içi raylı toplu taşıma sistemleri olarak da kullanılmaya başlamıştır. Bu sistemler aktarma istasyonları sayesinde yolcularını diğer toplu taşıma sistemlerine entegre bir şekilde çalışırlar. Dünyada bu tip hatlara birçok örnek verilebildiği gibi en bilindik örnekleri Paris banliyö hatları ve Marmaray banliyö hatlarıdır.

2.1.2.7. Monoray

Yapım tercihine göre tek ray altında veya tek ray üstünde hareket edebilen raylı toplu taşıma aracıdır. Rayın kolonlar üzerine yerleştirilmiş kirişlere sabitlenmesi ve bu yol gösterici rayın üzerinde hareket etmesi ile sistem çalışır (Şekil 2.8).

Dünya çapında pek çok uygulama örneği olan monoray uygulamalarında hedef; bireysel araç trafiğinin azaltılması, toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve cazipleştirilmesi, hızlı ve konforlu toplu ulaşım sağlanması, zaman ve enerji tasarrufu sağlayan çevre dostu ulaşım araçlarıdır.

İşletme hızı 80 km/saat dolayında sınırlanan bu sistemde tek vagon ile işletme yapılabildiği gibi birçok vagon ile işletmede yapılabilmektedir.

“Monoraylar temel olarak üç tipe ayrılabilir.

- 1- Kirişin altında asılı (askıda),
- 2- Kiriş yoluna otururan (üst üste binen),
- 3- Kirişli yollarda veya kalın beton yollarda çalışma (konsol tipi)”(Çalış, 2016)



Şekil 2.8 Monoray Aracı (Hürriyet, 2020)

2.1.2.8. Füniküler

Şehir merkezlerinde yüksek kot farkı olan iki farklı bölgeyi birbirine bağlamak için halat yardımıyla çalışan şehir içi raylı sistemdir. İstanbul’da Taksim - Kabataş (F1) arasında günlük ortalama 35.000 yolcu ve 195 sefer/yön olarak hizmet vermektedir (Şekil 2.9). Bu hat 2006 yılında işletmeye açılmıştır.



Şekil 2.9 Füniküler Aracı

2.2. Katenersiz Tramvaylar

Katenerli tramvaylar kent içi toplu taşıma sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Fakat zamanla katener direklerine karayolu taşıtlarının çarpması sonucunda direklerin devrilerek yayalar ve taşıtlar için tehlikeli durum oluşturması, direklerin hat gabarisini artırarak caddelerde oluşturduğu sıkışıklık, zamanla çevredeki ağaçların katener telleri için oluşturduğu riskler, katener telinin çevresel etkilerden dolayı kopması sonucunda işletme kayıpları ve çevresel oluşturduğu tehlikeler, havai hatların tarihi bölgelerde oluşturduğu kötü görüntü vb. olumsuzlukları ortadan kaldırmak için; başta gelen tramvay üretici firmaları, tarafından 1990'larda katenersiz tramvay üretmek için çalışmalara başlamıştır. Bu sistemlere olan ihtiyaçların artması ve teknolojinin gelişmesi ile beraber bu sistemler geliştirilmeye devam etmektedir.

Günümüzde gelinen teknolojik gelişmeler sonucu katenersiz tramvay üretiminde geliştirilen sistemler;

1. Zeminden sürekli beslemeli sistemler,
2. Enerji depolamalı sistemlerdir.

2.2.1. Zeminden sürekli beslemeli sistemler

Bu sistemler, araç için gerekli olan cer gücünün iki ray arasında kalan gömülü bir üçüncü enerji besleme rayından sağlandığı sistemlerdir. Bu sistemi ilk olarak

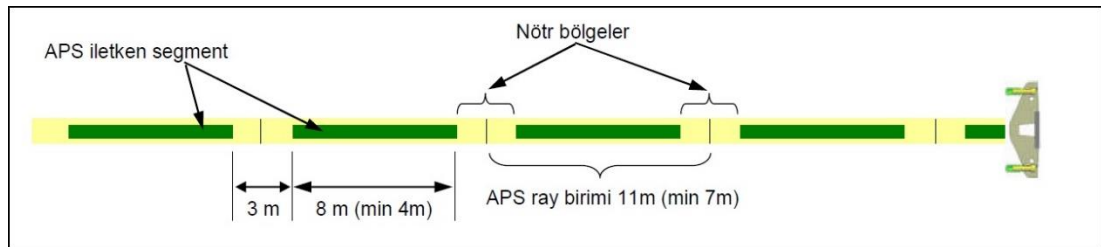
Alstom firması geliştirmiştir. Dnyuda işletme altında olan birçok hat bulunmaktadır. Bu sistemi geliştiren diğer iki firma sırasıyla AnsaldoSTS ve Bombardier firmalarıdır. AnsaldoSTS firması tramvawe sistemini Çinli CRRC firması ile ortak geliştirerek Çin'in Zhuhai kentinde işletmeye almıştır. Bombardier firmasının geliştirdiği Primove sistemi ise daha test aşamasındadır.

2.2.1.1. Alstom APS sistemi

Bu sistemde iki ray arasına gömülü bir nc enerji rayı (ETR) ile sistemin cer gücü sağlanır. Gömülü segmentler 3 metre yalıtkan ve 8 metre iletken olacak şekilde montajı yapılır. Bu parçalar 22 metrede bir gömülü kutular yardımıyla araç ilerledikçe enerjilendirilir. Sistem cer gücü besleme gerilimi seviyesi 750 VDC'dir. Sistem ilk defa 2003 yılında Fransa'nın Bordeaux kentinde 28 km'lik bir hat üzerinde uygulanmıştır. Günümüzde 100 aralık işletmesi devam etmektedir.

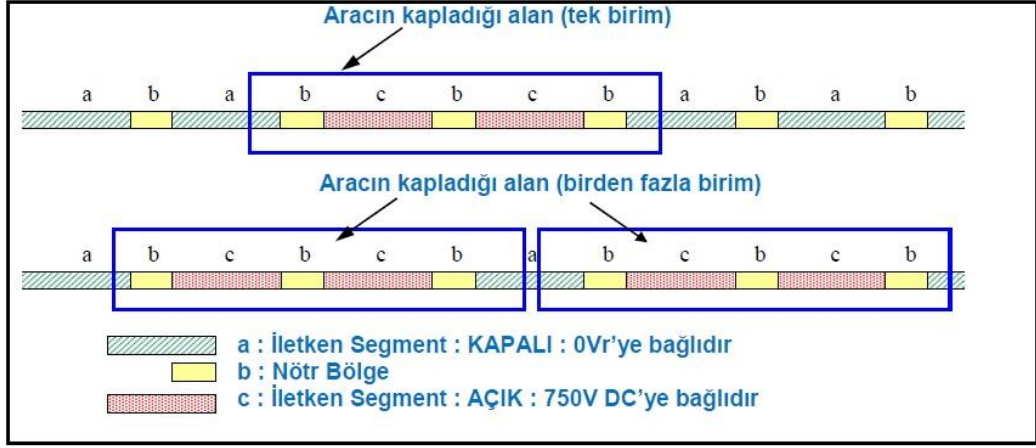
Söz konusu sistem kent içi raylı sistem taşımacılığında Havai temas sistemi (OCS) yerine bölümlere ayrılmış APS raylarının kullanılmasını amaçlar. APS rayları, hat platformu içine iki ray arasında kalacak şekilde tamamen gömülü nc bir enerji rayı (ETR) teknolojisi şeklinde tasarlanmış sistemleridir.

APS rayı, şekil 2.10'da görüldüğü gibi genellikle 8 m iletken ve 3 m nötr segment bölgelerinden oluşur.



şekil 2.10 APS Ray Yerleşimi (Alstom, 2020)

APS sistemi, sadece ilgili APS rayına gerilim beslemesini içerir. Erişilebilir APS raylarında hiçbir zaman enerji olmaz, bundan dolayı insanlara veya başka teçhizatlara zarar gelmez. Enerjili kısım araç altında kalan bölgededir (şekil 2.11).



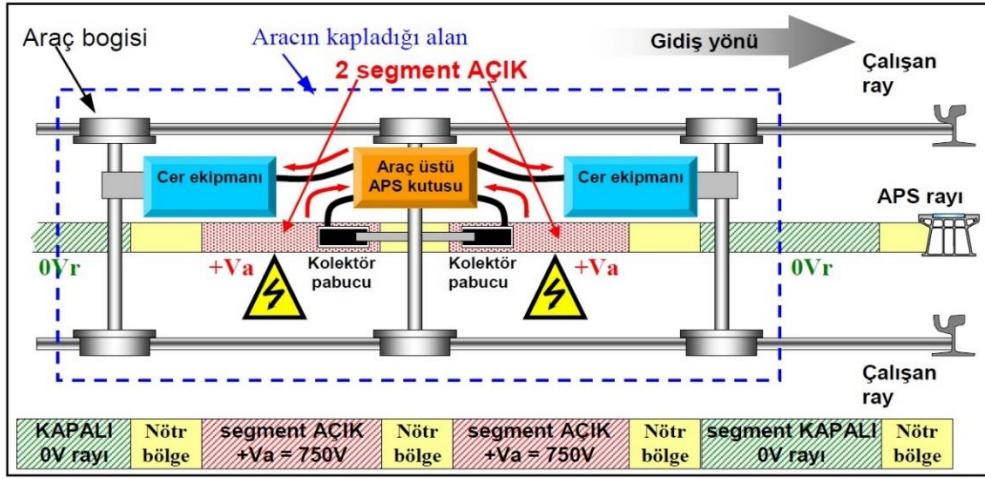
Şekil 2.11 APS Ray Enerji Segmentleri (Alstom, 2020)

Düz bir hat düzeninde APS rayı, iki çalışan ray arasında hattın ortasında yer alır. Kurp bölgelerinde ise APS rayı yana doğru kayıktır ve konumu, araç altında yer alan APS kolektör pabucunun yoluyla belirlenir.

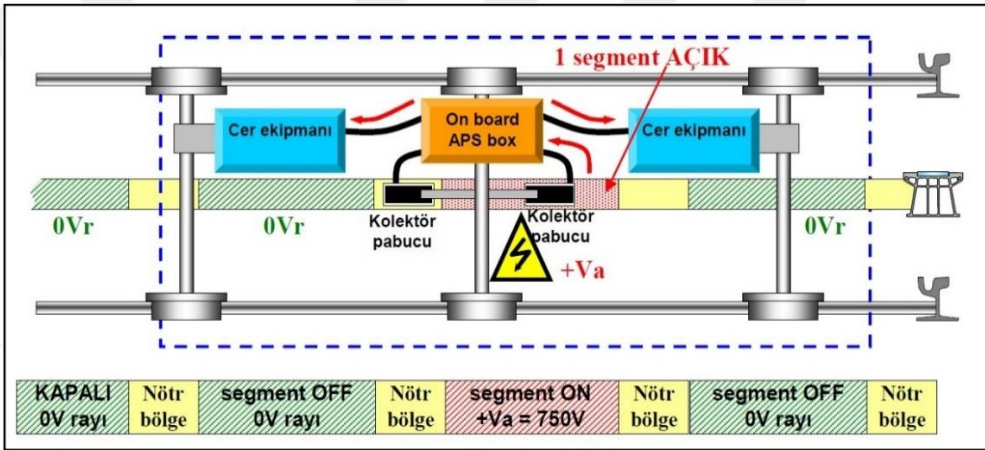
Araç kendi varlığını, yere kodlanmış bir sinyal göndererek işaret eder. Bu sinyal, araç üstü elektronik cihazı tarafından üretilerek, kolektör pabucuna entegre bir anten ile iletilir. Bu kodlanmış sinyal, bir segment üzerinde sürekli ve güvenli bir şekilde algılanır ve böylece bu segmente enerji beslemesi için izin alınır ve enerji beslemesi devam ettirilir.

Bu prensibe dayanarak, sadece tamamıyla aracın kapsadığı alan içinde yer alan segmentler enerji ile beslenir. Dolayısıyla yer üzerinde tüm enerji verilen yüzeyler, araç tarafından bütünüyle korunur ve bu yüzeyler erişilebilir değildir. Araç, kendi altında yer alan kolektör pabuçlar yardımıyla akımı toplar. Bu kolektör pabuçlar arasındaki mesafe, nötr bölgenin uzunluğundan daha fazladır. Dolayısıyla en az bir adet kolektör pabucu, enerjili iletken segment ile sürekli temas halindedir. Cer akımı dönüşü, tekerlekler ve ray yardımıyla gerçekleşir.

Enerji alan bir araç için enerji temin prensibi Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 İki İletken Segmentten Cer Enerjisi Temini (Alstom, 2020)



Şekil 2.13 Tek İletken Segmentten Cer Enerjisi Temini (Alstom, 2020)

Eğer APS segmentlerinde veya enerji kutusunda (PB) arıza durumu var ise, gerekli önlemler alındıktan sonra arızalı enerji kutusu sistemden izole edilerek devre dışı bırakılır. İşletmenin aksamaması için güç kutusunun değiştirilmesine gerek kalmadan sistem çalışabilir. Eğer enerjisiz kalan bölge kısa ise (Örn. 22 m) araç kendi hızı ile bu kısmı geçer. Araç enerjinin tekrar geldiğini algıladığında, cer gücü tekrar kazanılır ve APS sistemi kaldığı yerden çalışmaya devam eder. Eğer enerjisiz kalan bölge aracın kendi hızı ile tekrar geçilemiyor ise araç durdurulur ve makinist tarafından manuel olarak bataryaya geçirilir. APS rayından gelen enerji algılanır algılanmaz batarya devre dışı kalır ve sistem tekrar çalışmaya devam eder.

Tüm APS altyapısı betona gömülü durumdadır. Hem zemin geçişlerde görünen veya yola engel olan bir yapı oluşturmaz. Kamuya açık alanlarda yerdeki hatta enerji olmadığından, havai besleme sisteminin oluşturduğu risk bu sistemde yoktur. Dolayısıyla, bu sistem kamuya açık alanlarda daha avantajlıdır.

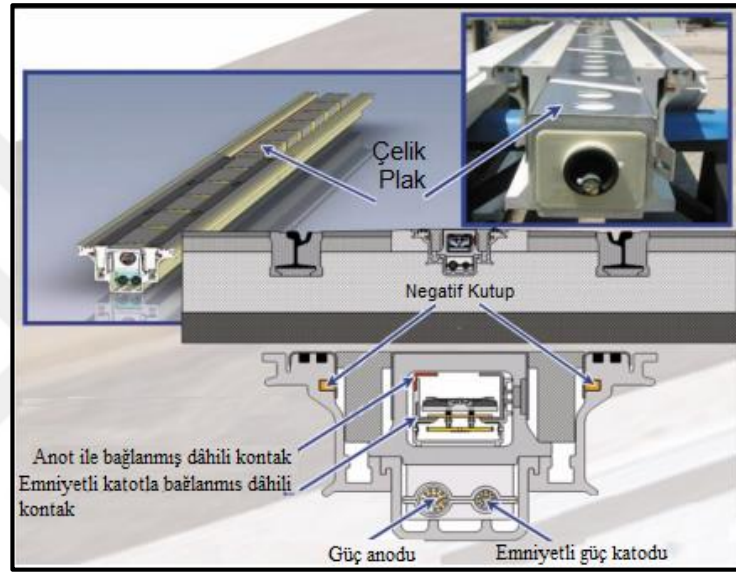
2.2.1.2. Ansaldo Tramwave sistemi

Tramwave sistemi ilk olarak İtalyan Ansaldo firması tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sistem Alstom APS sistemine oldukça benzemektedir. Bu sistemde cer enerjisi; iki seyir rayı arasına gömülü bir üçüncü enerji rayından (ETR) karşılanır. Tramwave sistemi AnsaldoSTS firması tarafından geliştirilen patentli bir üründür. Tramwave sistemi için Napoli'de bir test hattı yapılmıştır. Burada Trieste'nin lastik tekerlekli hibrid araçları başarıyla test edilmiştir. AnsaldoSTS firması tramwave sistemini Çinli CRRC firması ile teknoloji paylaşımı yapılarak ortak geliştirmiştir. 2014 yılının sonlarına doğru Çin'in Zhuhai kentinde aktif olarak uygulamaya başlanmıştır (Şekil 2.14). Kurulan hat 1'in toplam uzunluğu 8,9 km, hattın gidiş geliş toplam uzunluğu ise 17,8 km'dir. Hat 1'in tamamı Meihua Batı Yolu'nda ve Meihua Doğu Yolu'nda yer almakta olup toplamda Shangchong istasyonundan Haitian Park istasyonuna kadar 14 yanaştırma peronlu olarak düzenlenmiştir. Araçlar İtalya'da üretilip Çin'e ithal edilmiştir (Şekil 2.14).



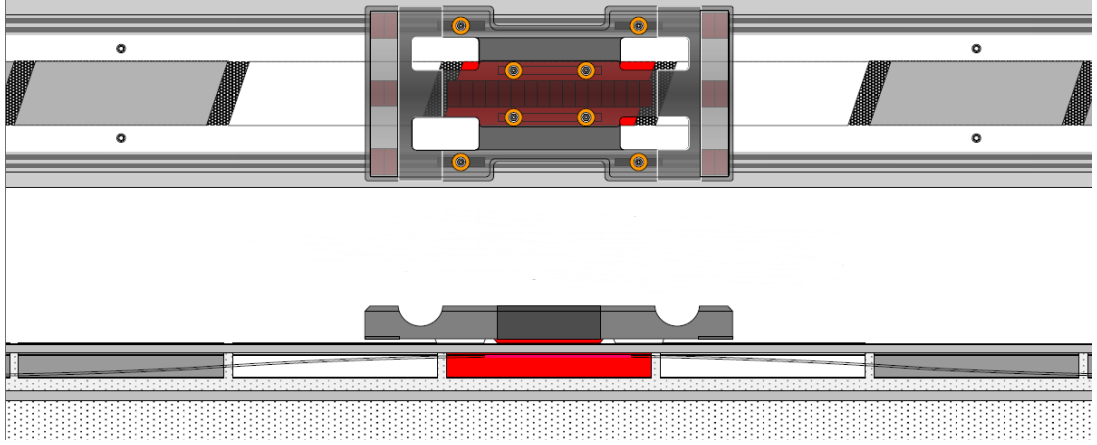
Şekil 2.14 Ansaldo Tramwave Yerden Besleme Sistemi (Ansaldo, 2020)

Besleme sistemi, yer üstü ve yer altı olmak üzere ikiye ayrılır. Tramwave sisteminin yer altı bileşenlerini segmentler oluşturur. Bu segmentler, yol kurp yarıçaplarına göre 2 m, 3 m ve 5 m uzunluklarında olabilirler. Hat eğrilik yarıçapı ≥ 156 m ise 5 m'lik segmentler, 56 - 156 m ise 3 m'lik segmentler ve 25 - 56 m ise 2 m'lik segmentler kullanılır. Besleme segmentleri 50 cm'lik çelik plakalar halinde düzenlenmiştir (Şekil 2.15). Çelik levhanın kalınlığı 2 mm olup materyali paslanmaz çelik SUS304'tür.

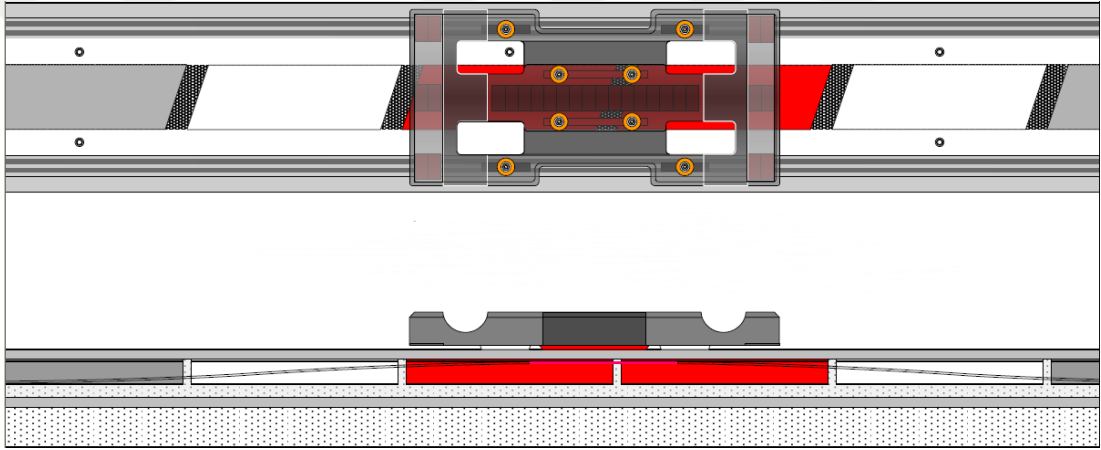


Şekil 2.15 Besleme Segmenti ve Besleme Kablosu Kesiti (Ansaldo, 2020)

Besleme kabloları bu segmentlerin altında olup, yer üstü tramvayın besleme kısmı ile temasını gerçekleştirecek şekilde rayın orta yeri üzerinde doğrudan açıktadır. Yer üstü bölümü, tramvay bojisinin altında kuruludur. Tramvay çalışmadığında, araç üstü kollektör geri çekilir; tramvay çalıştığında, tramvay için kesintisiz ve dengeli elektrik enerjisi sağlayacak şekilde kollektör pabucunun altındaki kapak levhasını açar, kollektör pabucunu aşağı indirir, besleme segmenti ile temas eder ve yer altı bölümü ile yer üstü bölümünün beraber çalışmasını sağlar (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17).

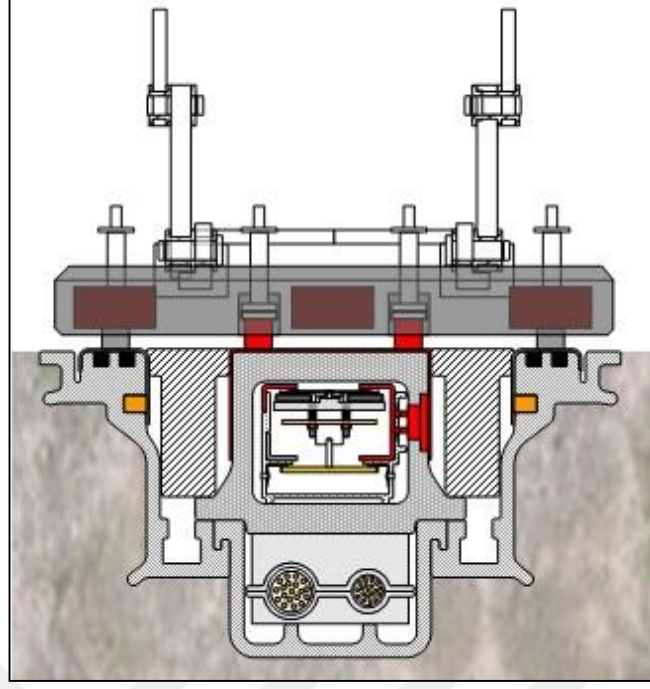


Şekil 2.16 Cer Gücü Aktif Tek Kısım (50 cm) (Ansaldo, 2020)



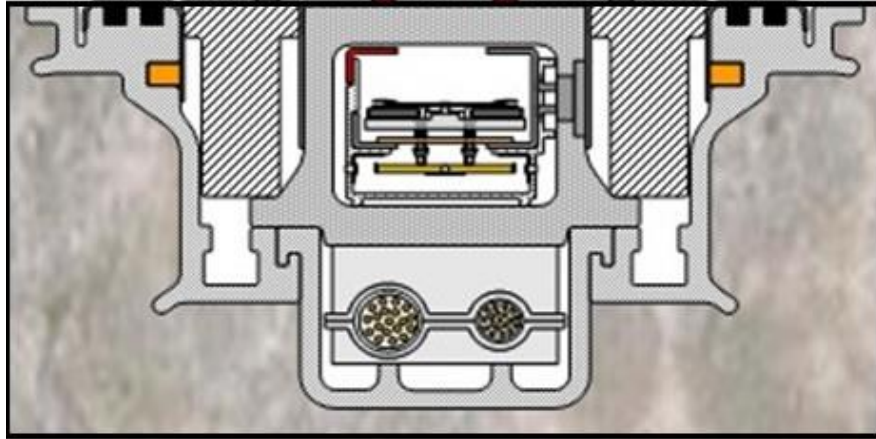
Şekil 2.17 Cer Gücü Aktif Çift Kısım (100 cm) (Ansaldo, 2020)

Araç, besleme modülünün üzerinde seyir halinde iken besleme pabucu araç sistemi manyetik kuvvet yoluyla besleme modülündeki esnek kontak şeridini çeker. Esnek kontak şeridi, kontak şeridi köprüsünün üzerindeki çalışma pozisyonuna çekildiğinde, kontak ile temas halindedir ve devre bağlıdır. Besleme modülünün yüzeyindeki paslanmaz çelik anot kontak levhası elektrikli ve araca besleme sağlar (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 İletken Segmentte Güç Olması Hali (Ansaldo, 2020)

Araç besleme modülünden ayrıldığında ve sonraki besleme modülüne gittiğinde, modül otomatik olarak manyetik kuvvetin etkisi olmadan yer çekimi altında resetlenir ve esnek kontak şeridi emniyetli katot kablosu ile bağlantı durumuna geri döner. Bu durumda cer gücü yoktur (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 İletken Segmentte Güç Olmaması Hali (Ansaldo, 2020)

Modül yüzeyine herhangi bir su birikimi durumunda, katot direnci küçüktür. Ancak, insan bedeninin direnç değeri büyüktür ve insan bedeninden akan akım düşüktür. Bu nedenle, Besleme bölümünün yakınında hiçbir elektrik çarpması

kazası olmamaktadır ve sistem halen normal işletimde olabilmektedir. Kaplama üzerindeki su birikimi 10cm'den daha büyük olmadığında araç sürekli olarak güç besleyebilir. Modül üzerindeki biriken suyun yüksekliği 10 cm'yi aştığında, sistem su birikme süresi 2 saati aştıktan sonra DC 750V güç beslemesini durdurulmaktadır.

Besleme segmentlerinde oluşabilecek arızalar komple tanılama ve algılama sistemi seti ile tespit edilir. Bu arızalar kontrol merkezine iletilir. Kontrol merkezi arızaları sisteme yükler. Segmentlerin bakımı ve motajı hızlı ve kolaydır. Yarım saat içinde besleme modülü yenisi ile değiştirilebilir.

Tramwave sisteminde, rejeneratif frenleme enerjisi sayesinde belirli bir elektrik enerjisi geri kazanabilir ve kullanıcı açısından işletim giderinden tasarrufta bulunacak şekilde elektrik enerjisini doğrudan enerji şebekesine aktarır.

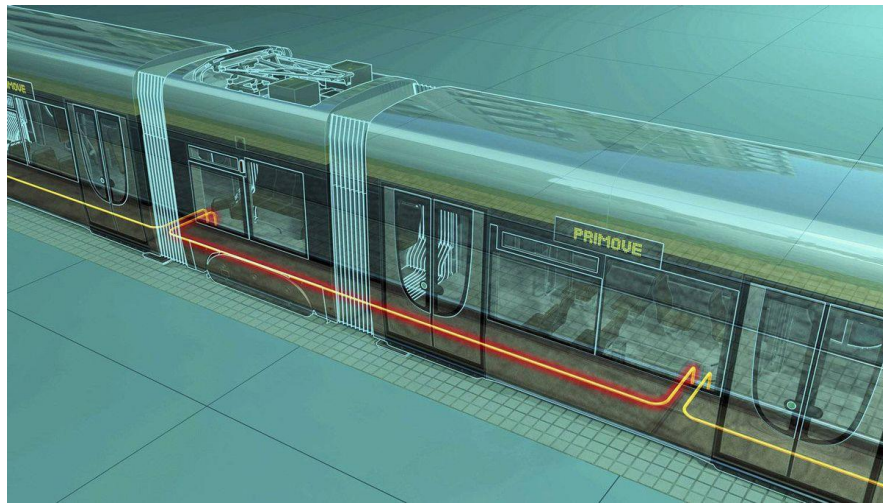
2.2.1.3. Bombardier Primove sistemi

Bu sistemde gömülü bir üçüncü ray yoktur ve araçta enerjiyi üçüncü raydan alacak bir enerji pabucu bulunmamaktadır. Bu yüzden üçüncü ray teknolojisinden ayrılır. Sistem, herhangi bir kontak bulunmadan bir transformatörün indüktif güç transferine dayalıdır. Araç algılama ve segment kontrol anteni tarafından araç algılandığında segmente enerji verilir. Araç hareketi boyunca bir zemin seviyesi segmentine enerji verildiğinde, üç fazlı bir manyetik alan oluşturulur. Manyetik alan üretiminde iki ray arasında kalan primer elektrik devresinde enerji depolanır ve araç altında bulunan sekonder devre bu enerji alanını tramvay hareketi için elektrik enerjisine çevirir. Aracın altındaki bir toplama bobini, kabloların oluşturduğu manyetik alanı çekiş sistemini besleyen bir elektrik akımına dönüştürür (Şekil2.20).



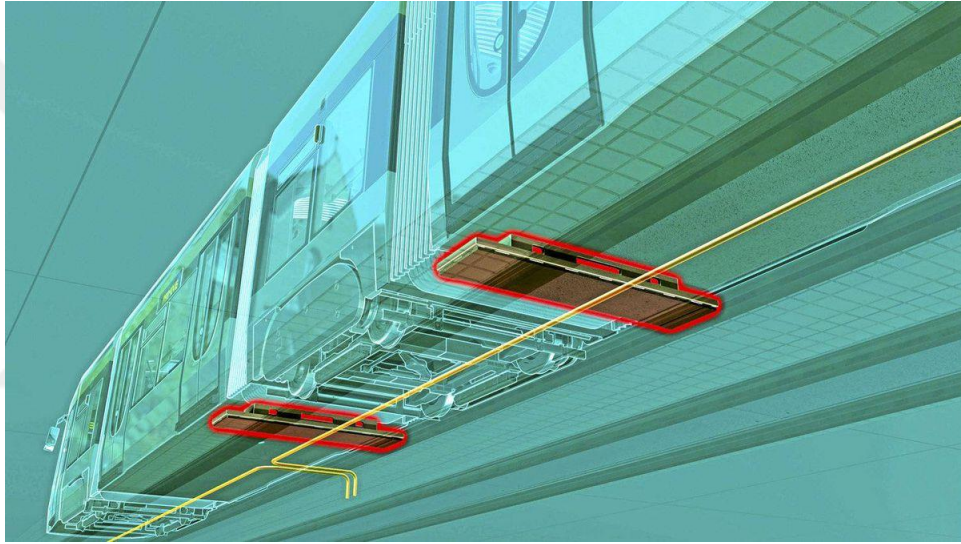
Şekil 2.20 Bombardier Primove Sistem (Bombardier, 2020)

Primove güç segmentleri raylara paralel olarak monte edilir, ancak temassız endüktif güç aktarımını kullanır. Bu sistemde raylar arasına yerleştirilmiş 9,0 m uzunluğunda primer sarmal kablo segmentleri mevcuttur. Sistem cer gücü 750 VDC dir. Zemin seviyesi segmentleri geçiş yolunun %10 - 25'i boyunca kurulur ve sadece tren yukarıdayken antenler tarafından aracın altında kalan segmentlere enerji verilir ve bu enerji yayalar ve diğer araçlar için güvenli hale gelir. Bir zemin seviyesi segmentine enerji verildiğinde, 20 kHz, üç fazlı bir manyetik alan oluşturulur (Şekil 2.21). Oluşan bu manyetik alanın kalp pili, cep telefonları ve diğer elektronik eşyalara hiçbir etkisinin olmadığı Bombardier tarafından bildirilmiştir. Bu sistemde enerji kaybı %1 - 5 olduğu üretici firma tarafından bildirilmiştir.



Şekil 2.21 Primove Sistem Primer Besleme Segmentleri (Bombardier, 2020)

Araç, işletme sırasında fazla olan enerjiyi ve frenleme esnasında açığa çıkan rejeneratif enerjiyi gerektiğinde kullanmak için araç üstü onboard elemanları olan süper kapasitörler ile donatılmıştır. Soğuk havalarda (buz ve kar) ve yoğun yağış altında enerjiyi toplayan bir enerji pabucu bulunmadığından sistemin çalışmasında herhangi bir sorun yaşanmaz (Şekil 2.22). Primove sistemde güç kaynağının yeraltına gömülmesi, araçlar ve yayalar için daha yüksek bir güvenilirlik sunar ve gelecekteki bakım maliyetlerini minimum şekilde olmasını sağlar.



Şekil 2.22 Araç Altı Toplama Bobini (Bombardier, 2020)

2.2.2. Enerji depolama şeklinde çalışan sistemler

Bu sistemler, araç için gerekli olan cer gücünün enerji depolama sistemlerinden sağlandığı sistemlerdir. Dünya genelinde kullanılmakta olan tramvay sistemleri incelendiğinde sektörün öncü firmaları olarak adlandırılabilen CAF, Siemens ve Bombardier gibi üreticilerin birçok farklı çözüm ortaya koyduğu görülmektedir.

2.2.2.1. Caf Süper kapasitör ve batarya sistemi

Firma dahili araç üstü enerji depolama sistemleri (yakıt hücreleri/pilleri, volanlar, bataryalar ve süper kapasitörler) hakkında 7 yıldan fazla araştırma

geliştirme (analiz etme, inceleme ve araca entegre ve test etme) çalışmaları yapmaktadır (Şekil 2.23).



a) Yakıt hücreleri/pilleri



c) Bataryalar



b) Volanlar



d) Süper kapasitörler

Şekil 2.23 Dahili Enerji Depolama Sistemleri (CAF, 2020)

Bu çalışmalarda en faydalı çözümler araştırılarak günümüz şartlarında optimum çözüm seçilmektedir. Günümüz şartlarında firma tarafından belirtilen en optimum çözüm ise süper kapasitör ve bataryalara dayalı hibrit çözümlerdir.

Süper kapasitörler ultra hızlı şarj olabilme kabiliyetleri ile istasyonlarda araçlardan yolcu indi - bindi süresi sırasında şarj edilmesi planlanmaktadır. Süper kapasitörler yüksek akımlarda 20 sn gibi kısa sürelerde kendilerini şarj edebilmektedir. Aynı zamanda aracın frenleme enerjisinin (rejeneratif enerji) büyük bir bölümü süper kapasitörler sayesinde tekrar şarj edilebilir. Bu sistemin araçta oluşturduğu ağırlık yüzünden oluşan ek elektrik sarfiyatı düşüldüğünde %21 - 29 arası enerji tasarrufu sağladığı öngörülmektedir (Şekil 2.26).

Araç ilk hareket enerjisini süper kapasitörden alır. Süper kapasitörde bulunan enerjinin boşalması durumunda araç enerjisini Li-ion veya Nimh bataryalardan alır. İsteğe göre batarya tipi seçilebilir. CAF firması tarafından geliştirilen hızlı şarj akümülatörleri (ACR) sistemi, durak bölgelerinde veya gerekli görülmesi

durumunda ilave şarj bölgelerinde şarj edilmektedir. Bunlar Şekil 2.25’da görüldüğü gibi durak bölgelerinde enerji katener sistem vasıtası ile ya da işverenin istediği doğrultusunda gömülü bir üçüncü ray sistemi sayesinde şarj edilebilir. İki durak arası mesafe güzergâh koşullarına ve duraklar arasındaki performansa(trafiğe ve yayaya bağlı) ve hattaki olaylara bağlı olarak maksimum 1,400 metreye kadar çıkartılabilir.

Süper kapasitörlerin enerji yoğunlukları orta seviyede iken, güç ve yaşam döngüleri yüksek kapasitededir. Nimh bataryalarda ise enerji yoğunlukları yüksek seviyede iken güç ve yaşam döngüleri düşük seviyededir. Şekil 2.24’de batarya süper kapasitör karşılaştırılması verilmiştir. Bu sistemde hem bataryalardan hem de süper kapasitörden alınan enerji yoğun olduğundan dolayı bunları soğutmak için soğutucu ünite bulunmaktadır.

	Enerji Yoğunluğu	Güç	Tahmini Ömür (Yaklaşık Döngü Sayısı)
Bataryalar	Yüksek	Düşük	2000
Süper Kapasitörler	Orta	Yüksek	1000000

Şekil 2.24 Batarya ve Süper Kapasitör Karşılaştırması (CAF, 2020)

Katenerli Sistemler:



Çekiş aşaması: İstasyon arasındaki enerji katenerden alınır.



Frenleme aşaması: Frenleme sırasında oluşan enerjinin bir kısmı katenera verilir.
Enerjinin kalan kısmı fren dirençlerine verilir.

CAF Hızlı Akümülatör Sistemleri (ACR):



Çekiş aşaması: İstasyonlar arası enerji ACR tarafından sağlanır.



Frenleme aşaması: Frenleme sırasında oluşan enerji ACR sisteminde geri kazanılır.



Şarj İstasyonu: İstasyonda duraklama sırasında 20 saniyede tamamen şarj.

Şekil 2.25 Konvansiyonel Katenerli ve CAF Katenersiz Aracının Çalışma Prensibi (CAF, 2020)



Şekil 2.26 Tayvan Kaohsiung Tramvayı (Eyeontaiwan, 2020)

2.2.2.2. Siemens Sitras HES&MES sistemi

Siemens firması on sekiz yılı aşkın süredir araç üstü enerji depolama sistemi (OSS) olan Sitras MES ve Sitras HES sistemleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu sayede minimize altyapı çalışması yaparak, az maliyetli ve yüksek tasarruflu Siemens Sitras MES&HES sistemleri geliştirilmiştir. Siemens sitras MES sistemi araç üzerine yerleştirilen çift katmanlı kapasitörlerden (DLC) oluşmaktadır. Araç ilk hareket enerjisini duraklarda bulunan rijit katenerden alır. İki durak arası katenersiz bölgede hareket için çift katmanlı kapasitördeki enerji kullanılır. Bu kapasitörleri şarj etmek için bir sonraki durakta bulunan rijit katener telleri kullanılır. Çift katmanlı kapasitörler yalnızca 20 saniye gibi kısa sürede şarj olmaktadır. Aynı zamanda frenleme sırasında oluşan rejeneratif enerji bu kapasitörlerde şarj edilir. Bu sayede %20 yakın enerji tasarrufu yapıldığı bilinmektedir.

DLC Depolama Ünitesi



NiMH CER Bataryası



Bataryaların yüksek enerji kapasitesiyle katenersiz uzun seyhat süresi sağlar



Su soğutmalı lityum pil modülü

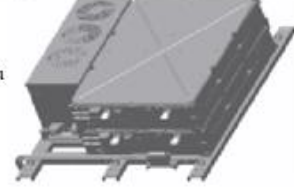


Soğutmalı DCL modülü

DCL- Konteynerları

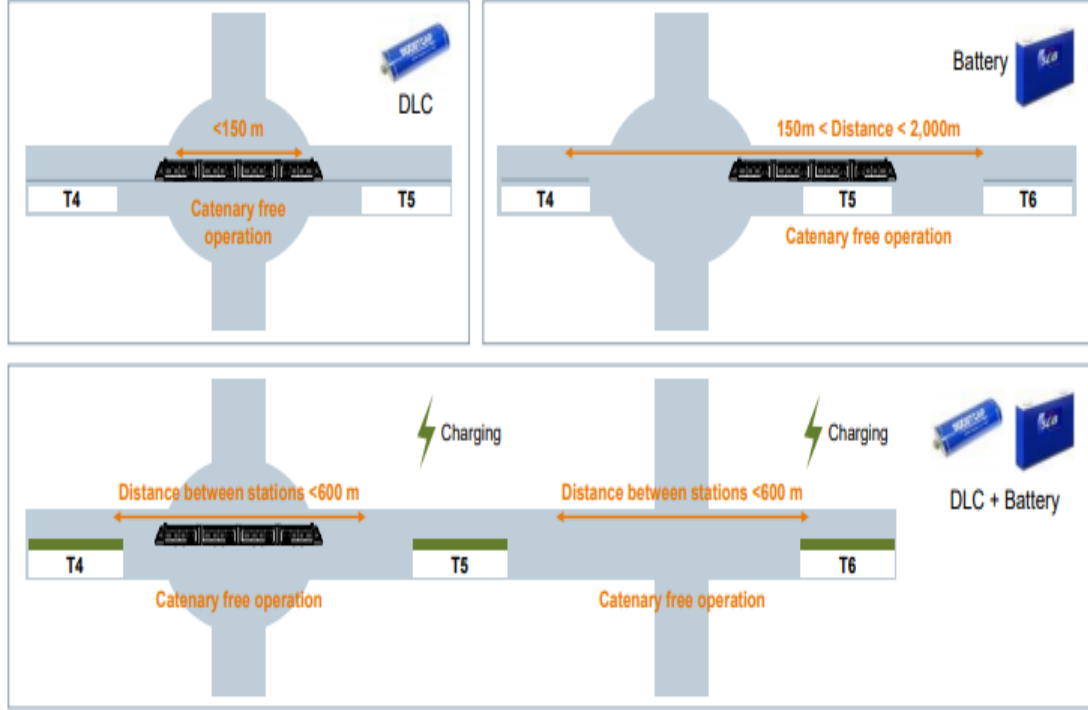


Bataryalar- Soğutuculu konteyner



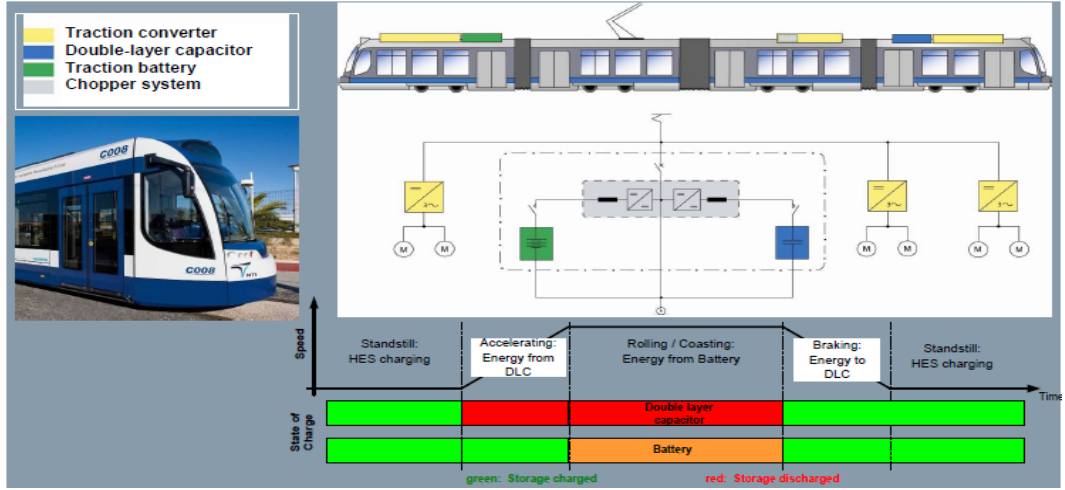
Şekil 2.27 Siments Sitras MES&HES DCL, NiMH ve Li-ion Batarya Gösterimi (Siemens, 2020)

Siemens Sitras HES sistemi yine araç üzerine yerleştirilen çift katmanlı kapasitöre ek olarak isteğe bağlı olarak NiMH batarya veya Li-ion batarya kullanılır (Şekil 2.27). Araç bu sistemde ilk hareket enerjisini çift katmanlı kapasitörlerden (DLC) alır. Sonrasında gerekli durumlarda batarya devreye girer. Duraklar arası mesafe 600 metrenin altında projelendirilmelidir. Şekil 2.28'de gösterildiği gibi sadece çift katmanlı kapasitörler ile 150 metrenin altında katenersiz araç hareketi mümkündür. DLC - Batarya sistemlerinde ise duraklar arası mesafe 600 metreye çıkmaktadır. Fakat, acil durumlarda şirket tramvayların optimum şartlarda yaklaşık 2500 metre katener olmadan hareket edebileceğini üretici firma tarafından garanti edilmektedir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Sitrans MES&HES Durak Arası Olması Gereken Mesafe (Siemens, 2020)

Araç frenleme yaptığıında rejeneratif enerji çift katmanlı kapasitörlerde depolanır. Sistemin şarj süresi 20 saniyedir. Bu sistemlerde araç durağa girerken enerjiyi rijit katenerden almaya başlar, istasyonda şarj işlemine devam eder ve ilk hareketinden istasyonu terk edene kadar enerji teminini rijit katenerden sağlar. Bu sayede araç ilk hareketi için gerekli olan yüksek enerjiyi rijit katenerden alır. Çift katmanlı kapasitörlerdeki enerjinin büyük kısmı aracın normal hareketi esnasında kullanır. Bu sayede hem bataryanın ömrü uzatılır hem de olumsuz ve acil durumlarda kullanılmak üzere gerekli enerji bataryada saklanır (Şekil 2.29). Siments Sitrans HES sistemi sayesinde %25'e yakın enerji tasarrufu edilebilmektedir. Sistemde double - layer kapasitörlerin ve bataryaların ısınmaması ve soğutulması için su ve hava kullanılmaktadır. 50 C° ye kadar sistemin çalışmasında problem yaşanmadığı bilinmektedir (Şekil 2.30).



Şekil 2.29 Siments Sitras HES (Hibrit Enerji Depolama) Sistemi (Siemens, 2020)

Bu sistemlerde aracın trafikli alanlarda dur-kalk yapma durumları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır.



Şekil 2.30 Siments Sitras HES Education City Tramvayı Doha / Katar (Urbantransportmagazine, 2020)

2.2.2.3. Bombardier Primove hibrit sistemi

Bombardier firmasının geliştirdiği Primove hibrit sistemi lityum iyon piller ve çift katmanlı süper kapasitörlerden oluşmaktadır. Gereksinime göre yalnız lityum iyon pil ya da yalnız çift katmanlı süper kapasitörler kullanılabilir. Katenersiz zamanlarda, lityum iyon pillerin yüksek güç çıkışı ve yüksek enerji

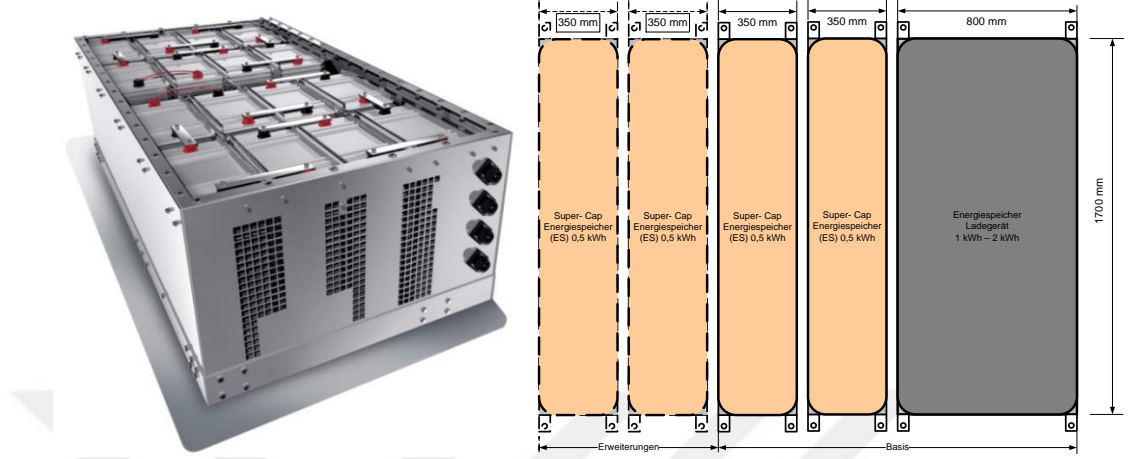
yoğunluğu; araç çekiş gücü, havalandırma (HVAC), aydınlatma, kapılar vb. için güç sağlar. Bu bataryaların sistemleri 2x24,5 kwh batarya ve termal havalandırma ünitesinden oluşmaktadır. Termal klima üniteleri sıcak günlerde su soğutma, soğuk günlerde ısıtma sağlamaktadır. Bataryaların tam güçte ve optimum sıcaklıkta batarya ömürleri firma verilerine göre yaklaşık 9 yıldır. Bu sistemlerde katenerden sağlanan güçle kıyaslandığında performans farkı yoktur. İhtiyaç durumunda batarya sayısı ve termal havalandırma ünitesi iki katına çıkartılabilir (4x24,5 batarya ve 2 adet termal havalandırma ünitesi). Bu sistemi oluşturan batarya ünitelerinin bir tanesinin ağırlığı 667 kg iken termal havalandırma ünitesinin birim ağırlığı ise 170 kg'dır (Şekil 2.31). Frenlemeden dolayı oluşan rejeneratif enerjinin %8-10'u bataryalarda depolanabilmektedir.



Şekil 2.31 PRIMOVE 50: 2 x 24.5 kWh Batarya (sağ) ile Termal havalandırma Ünitesi (sol) (Bombardier, 2020)

Firmanın geliştirdiği çift katmalı süper kapasitörlerde ise yüksek güç çıkışı vardır fakat enerji yoğunlukları sınırlı olduğundan bu kapasitörler kısa süreli enerji depolaması yaparlar (Şekil 2.32). Firma verilerine göre optimum şartlarda yaklaşık ömürleri 15 yıldır. Sık şarj deşarj döngüleri için tasarlanmışlardır. Katenersiz olarak yaklaşık 400 metre gidebileceği firma tarafından öngörülmektedir. Rejeneratif frenleme enerjisinden % 30 civarında enerji tasarrufu beklenmektedir. Enerji beslemesinin zayıf olduğu alanlarda hem

katenerden hem de süper kapasitörlerden gelen enerji ile tam hızlanma sağlanmaktadır.



Şekil 2.32 MITRAC ES 500 (1 kWh) ve Boyutlarına göre yerleşimi (0,5 / 1 / 1,5 / 2 kWh) (Bombardier, 2020)

2.3. Bataryalar

Bataryalar elektrik enerjisini gerektiğinde depolanabilen ve kullanılabilen kimyasal enerjiye dönüştürürler. Bu enerjiler gerekli devreler bağlanarak tekrar elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Kullanılacak uygulama için birçok çeşit enerji depolama sistemi mevcuttur. Bir enerji depolama sisteminin seçimi için bu sistemin gücüne, enerji oranına, ağırlığına, hacmine ve çalışma ortam sıcaklığına dikkat edilmelidir. Çizelge 2.1'de farklı enerji depolama sistemleri tipleri gösterilmektedir.

Burada bataryaların enerji verimliliği, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, hayat döngüsü, şarj hızları ve maliyet parametrelerine göre enerji depolama sistemlerinin seçimi yapılmaktadır.

Çizelge 2.1 Enerji Depolama Sistemleri (Hemmati ve Saboori, 2016)

Sistem	Nominal		Yoğunluk		Yaşam Süresi		Verim (%)	Günlük Kendi Kendine Deşarj (%)
	Güç (MW)	Tipik deşarj zamanı	Güç Yoğunluğu (W/l)	Enerji Yoğunluğu (Wh/l)	Yıl	Devir		
Pompalı hidro	100-5000	1-24h	0.1-0.2	0.2-2	>50	>15000	70-80	Çok küçük
Sıkıştırılmış hava	5-300	1-24h	0.2-0.6	2-6	>25	>10000	41-75	Küçük
Volan	0-0.25	sn-h	5000	20-80	15-20	104-107	80-90	100
Yakıt Pili	0-50	sn-24h	0.2-20	600	10-30	103-104	34-44	0
Süper Kapasitör	0-0.3	msn-1h	(4-12)*10 ⁴	10-20	4-12	>5*10 ⁵	85-98	20-40
SMES	0.1-10	msn-8sn	2600	6	-	-	75-80	10-15
Bataryalar Kurşun-asit	0-20	sn-h	90-700	3-15	3-15	250-1500	75-90	0.1-0.3
Nicd	0-40	sn-h	75-700	5-20	5-20	1500-3000	60-80	0.2-0.6
Li-iyon	0-0.1	dk-h	1300-10000	5-100	5-100	600-1200	65-75	0.1-0.3
NaS	0.05-8	sn-h	120-160	10-15	10-15	2500-4500	70-85	10-20
VRB	0.03-3	sn-10h	0.5-2	5-20	5-20	>10000	60-75	Küçük
ZnBr	0.05-2	sn-10h	1-25	5-10	5-10	1000-3650	65-75	Küçük

2.3.1. Kurşun-asit batarya

Kurşun asit (PbA) bataryalar 1850 - 60'lı yıllarda Fransız Fizikçi Gaston Plante tarafından bulunan en eski ve olgun batarya sistemidir. Kurşun (Pb) ve kurşun dioksit (PbO₂) katot tarafını ve sülfirik asit (H₂SO₄) elektrolitin katot tarafını oluşturur. Dünyada en çok kullanılan batarya çeşididir. Starter aküler en çok

tercih edilen akü tiplerindedir (Şekil 2.33). Araçların ilk başlama, ateşleme, aydınlatma ve bazı araçlarda hareket fonksiyonlarını yerine getirir.



Şekil 2.33 Kurşun-Asit Batarya Gösterimi (Enersys, 2020)

İnce plakalı tipleri, yüksek başlangıç akımı gerektiren yerlerde ince plakaların daha fazla yüzey alanı oluşturmasından dolayı kalın plakalardan daha fazla tercih edilir. Bu tip yüksek demeraj akımı içeren derin döngülü traksiyoner aküler ise forklift, vinç gibi hareketli araçlarda kullanılır. Güç kesilmesinin istenmediği yerlerde ise kalın plakalı sabit bataryalar kullanılır. Kendini kanıtlamış bu eski sistem yedekleme gücünün gerektiği yerlerde (veri merkezleri gibi) kullanılır.

Kuzey ABD’de ise havalandırılmalı kalsiyum alaşımlı kurşun asit batarya çok yaygın kullanılmaktadır. VRLA (valve regulated lead acid) kurşun kalsiyum bataryalarda ise havalandırılmalarına gerek yoktur. Bakım gerektirmeyen bataryalardır. Bu bataryalar iyi performans gerektiren tramvay araçlarında, elektrikli aletlerde ve şebeke güç sistemlerinde kullanılmaktadır.

Absorment glass mat (AGM) bataryalar kurşun içeriği ve elektrolit jel içeriği nedeniyle pahalı bataryalardandır. Daha çok enerji dopolama özelliğine sahiptir.

Kurşun karbon elektrotlu bataryalar ise düşük voltaj altında kısa zamanda şarj ve plakalarda daha az korozyon yüksek döngü sayısı gibi özellikleri vardır.

“Sektöründeki en büyük başarılarından biri Pb-asit bataryaların %98 oranında geri dönüşümünün sağlanmış olmasıdır” (Can Güven ve Gedik, 2019). Kurşun asit bataryalar ağır ve düşük enerji yoğunluğu olmasına karşın uzun yıllar denenmiş ve uygun maliyetli batarya sistemleridir. Fakat 10°C altında çalışma koşullarında güç yoğunluğu ve enerji yoğunluklarında düşüş göstermektedir.

İhtiyaçlara bağlı olarak CER gücü yedeği olarak 750 V (12VX63ad) akü ile donatılan tramvaylarda araçlarında, olağan üstü durumlarda uzun mesafede veya kısa mesafede dik eğimde CER gücü ve araç yardımcı ekipmanların enerjilendirilmesinde kullanılabilirlerdir.

2.3.2. Nikel-kadmiyum bataryalar

Nikel – kadmiyum (NiCd) bataryalar şarj edilebilir bataryalardır. Elektrot kısmı nikel, metal kısmı kadmiyum ve sulu elektrolit potasyum hidroksit kullanılarak yapılmıştır. Düşük sıcaklıkta yüksek performans verir ve tatminkâr bir döngü özelliği vardır. Kendi kendine deşarj özellikleri yüksektir. Fakat kadmiyum zehirli ve ağır bir metaldir. Avrupa komisyonu bu pillerin %75 oranında geri kazanımını amaçlamıştır fakat yasaklayamamıştır. Günümüzde hala kullanılmaya devam etmektedir. Bu piller devamlı olarak tam deşarj ve sonrasında şarj edilmiyorsa belirli aralıklarla tam olarak deşarj şarj döngüsü yapılmalıdır. 1900’lerden sonra medikal ekipmanlarda kullanımı yasaklanmıştır fakat günümüzde hala geniş kullanım alanına sahiptir. Güneş enerjili istasyonlar, uzay araçları, telekomünikasyon sistemleri bunlardan birkaçıdır.

“NiCd bataryalar yapılarında barındırdıkları zararlı toksik maddeler nedeniyle gerek insan sağlığına gerekse çevreye yüksek derecede tehlike arz etmekte, geri dönüşümü doğru yapılmadığı takdirde ise çevreye ciddi zararlar verme riski taşımaktadır. Bu sebepten dolayı NiCd bataryaların üretim tesislerinde maliyeti arttıran su ve hava arıtma sistemi kullanılması zorunlu hale getirilmiştir” (Cura, 2015). Çevreye verdiği zararlardan dolayı tramvay araçlarında kullanılmamaktadır.

2.3.3. Nikel metal hibrit bataryalar

Nikel metal hibrit (NiMH) şarj olabilen bataryalardandır. Yüksek enerji yoğunluklarının yanı sıra çevreye zarar vermemesi en büyük özelliklerindedir. Bu bataryalar hızlı şarj olabilmektedir fakat tam şarj olması ve tam deşarj olması yaşam döngülerini arttırmaktadır.

“NiMH bataryalar %100 geri dönüştürülmektedir. Eritme işleminden önce bu bataryalardan plastik ve metal parçalar ayrılmaktadır. Metaller "yüksek sıcaklık metal geri kazanım prosesi" ile geri dönüşüme kazandırılmaktadır” (Can Güven ve Gedik, 2019).

Nair ve Garimella(2010) nikel metal hibrit bataryalarla ilgili:

Nikel metal hidrit bataryalar, nikel-kadmiyum bataryalara kıyasla %25-30 daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadırlar. Ancak lityum-iyon bataryalara kıyasla bu konuda dezavantajlıdırlar. Ayrıca self - deşarj konusundaki problemleri, nikel metal hidrit bataryalarını uzun zamanlı enerji depolaması açısından oldukça dezavantajlı konuma getirmektedir. Ancak maliyet açısından lityum-iyon bataryalardan daha avantajlı konumdadırlar (s.42).” demektedir.



Şekil 2.34 Alstom Citadis Tramvayında NiMH Batarya Ünitesi (USTG, 2013)

Gelişmiş performansı, çevre dostu olması ve maliyet bakımından da avantajları göz önüne alındığında yenilenebilir enerji alanında kullanılması öngörülmektedir. İhtiyaca ve projelendirilmesine bağlı olarak tramvay

araçlarında kullanılması uygundur. Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur (Şekil 2.34).

2.3.4. Lityum-iyon bataryalar

Lityum iyon bataryalar ticari olarak 1990'lı yılların başında Sony tarafından kullanılması ile yaygınlaşmıştır. Taşınabilir elektronik cihazlar olan cep telefonu, Bluetooth kulaklık, dizüstü bilgisayar vb. cihazlarda lityum – iyon bataryalar dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.35 Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Li-ion Batarya Ünitesi (USTG, 2013)

Lityum – iyon pillerde lityum oksit eksi kutbu, grafit karbon tabakası artı kutbu temsil etmektedir ve lityum tuzu muhteva eden elektrotlar organik karbon ile çözülmektedir. Lityum – iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna, güç yoğunluğuna ve yüksek çevrim döngüsüne sahiptirler. Dolayısı ile yüksek kullanım ömrüne sahiptirler. Bakım gerektirmezler, boyutları küçüktür ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. En önemli dezavantajı ise yüksek kurulum maliyetleri ve kapasite dışı fazla şarj olma riskidir.

Yüksek kullanım ömrü, bakım maliyetleri, geniş sıcaklık çalışma aralığı gibi özelliklerinden dolayı tramvay araçlarında kullanılması uygundur. Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur (Şekil 2.35).

“Li-ion bataryanın üretimi esnasında kullanılan enerji 25-30 kWh kg-1 iken geri dönüşümü için tüketilen enerji 47 kWh kg-1'dir Ancak, neredeyse %99

oranında geri dönüşüm olanağı bulunan Li-ion bataryaların yaklaşık olarak %95'inin düzenli depolama sahalarına gönderildiği belirtilmektedir(s.733)" (Can Güven ve Gedik, 2019).

Yüksek kullanım ömrü, bakım maliyetleri, geniş sıcaklık çalışma aralığı dolayısı ile tramvay araçlarında kullanılması uygundur. Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur.

2.4. Süper kapasitörler

Elektrik enerjisini karbon elektrot ve sıvı elektrolit arasına stoklayan elektrostatik cihazlardır. Burada karbon elektrotlar yüksek yüzey alanına sahiptir. Süper kapasitörler bataryalarla kıyaslandığında yüksek güç yoğunluğu ve yüksek enerji verimine (> %85) sahiptir. Bundan dolayı, 20 - 25 saniye gibi kısa sürede şarj olabilmektedirler. Uzun çevrim sayısından dolayı uzun ömürlüdürler. Fakat enerji yoğunlukları bataryalara oranla düşüktür. Bundan dolayı depolanan enerjiyi kısa zamanda kullanmaz ise çok çabuk deşarj olabilmektedir. Süper kapasitörler geleneksel kapasitörlerin zaman içerisinde daha geliştirilmesi ile üretilmiştir. Bu yüzden güç ve enerji yoğunlukları geleneksel kapasitörlerden daha iyidir. Süper kapasitörler çok düşük sıcaklıklarda ve çok yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmektedir. Bu özelliği ile bataryalardan belirgin bir şekilde ayrılmaktadır.

Cura (2015) süper kapasitör teknolojisi ile ilgili olarak:

"Gerek yapılarında toksik malzeme barındırmamaları (geri dönüşümlerinin tehlike arz etmemesi ve çevre dostu olması), gerek milyon çevrim gibi oldukça uzun ömürlerinin bulunması, yapısal iç dirençlerinin bataryalara göre oldukça düşük olması nedeniyle şarj/enerji kayıplarının çok düşük olması ve bataryalarda görülen hafıza etkisi gibi kapasite kaybı göstermemeleri nedenleriyle süper kapasitör teknolojisinin gelecek vaad ettiği söylenebilir (s.139)." demektedir.



Şekil 2.36 Raylı Sistem Araçlarında Süper Kapasitör Depolama Ünitesi (USTG, 2013)

Süper kapasitörlerin kullanılması ile beraber yeni yeni tecrübe edinilmesi, bataryalara göre ağır olması ve yüksek ilk yatırım maliyetlerinin yanı sıra, çevre dostu bir teknoloji olması, yüksek sıcaklarda çalışabilmesi, bakım masraflarının ve bekleme kayıplarının azlığı ile beraber otomotiv, demiryolu, rüzgâr enerji vb.. sistemlerde hızla kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.36). Tek başına kısa mesafelerde uygulanabilir olmasına rağmen, uzun mesafelerde enerji yoğunluğu yüksek olan bataryalar ile birlikte kullanılabilir.

3. UYGULAMA

3.1. İstanbul'da Katenerli ve Katenersiz Tramvay Sistemleri

İstanbul'da aktif olarak işletilmekte olan beş adet tramvay hattı vardır. Bunlardan dördü katenerli olarak işletilirken bir tanesi katenersiz olarak işletilmektedir.

3.1.1. İstanbul'da katenerli tramvay sistemleri

İstanbul'da toplamda dört adet tramvay hattı hizmet vermektedir. Bunlar (T1) Bağcılar - Kabataş tramvay hattı, Taksim - Tünel tramvay hattı, (T3) Kadıköy - Moda tramvay hattı ve (T4) Topkapı - Mescid-i Selam tramvay hattıdır. Taksim - Tünel ve Kadıköy - Moda tramvay hatları nostaljik olarak hizmet vermektedir.

3.1.1.1. Bağcılar-Kabataş tramvay hattı T1

T1 hattı, İstanbul'a kullanıma açılan ilk modern tramvay hattıdır. Hattın ilk etabı olan Aksaray - Beyazıt - Kapalıçarşı hattı Haziran 1992 yılında inşaatı tamamlanıp kullanıma açılmıştır. Sonrasında sırasıyla Temmuz 1992'de Beyazıt - Kapalıçarşı - Sirkeci, 1992 Aralık'ta Aksaray - Topkapı, Mart 1994'te Topkapı - Zeytinburnu, Nisan 1996'da Sirkeci - Eminönü, Ocak 2005'de Eminönü - Fındıklı - Mimar Sinan Üniversitesi, 2006 Haziran'da Fındıklı - Mimar Sinan Üniversitesi-Kabataş uzatmaları yapılmıştır. 2006 Eylül'de Zeytinburnu - Kabataş Tramvay Hattı işletmeye açılmıştır.

Hattın Bağcılar - Zeytinburnu kısmı ise T2 hattı olarak Eylül 2006'da hizmete açılmıştır. Ocak 2011de Alstom Citadis İstanbul markalı alçak taban araçların İstanbul'a getirilmesi ile Şubat 2011'de T1 ve T2 hatları birleştirilerek T1 (Bağcılar - Kabataş) Tramvay hattına dönüştürülmüştür.



Şekil 3.1 T1 Tramvay hattı güzergâhı

Hattın tamamındaki istasyonlar, hem Alstom Citadis İstanbul araçlarına uyumlu hem de alçak tabanlı araçlara uygun olarak inşa edilmiş olup bu hatlarda engelli erişimi için uygun teknik rampalar mevcuttur. Hattın uzunluğu toplam 19.3 km olup hattaki istasyon sayısı toplam 31'dir (Şekil 3.1). Çizelge 3.1'de T1 işletme verileri verilmiştir.

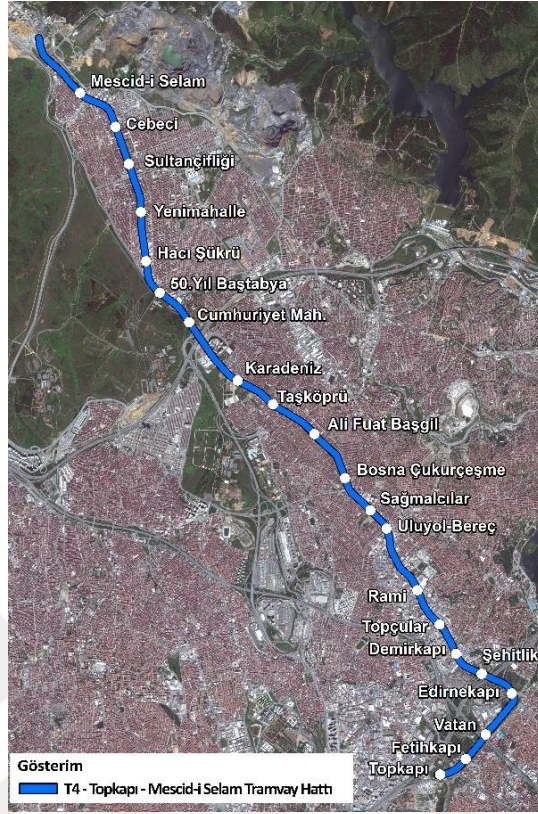
Çizelge 3.1 T1 İşletme Verileri (Metro İstanbul, 2020)

Hat Uzunluğu	19,3 km
İstasyon Sayısı	31
Araç Sayısı	92
Sefer Süresi	65 dk. tek yönde
İşletme Saatleri	06.00 - 00.00
Günlük Yolcu Sayısı	320.000 Yolcu
Günlük Sefer Sayısı	295 Sefer / Tek Yön
Sefer Sıklığı	2 Dk. (Pik Saatte)

3.1.1.2. Topkapı - Mescid-i Selam tramvay hattı T4

T4 hattının toplam hat uzunluğu 15.3 km'dir. Sultançiftliği ve Gaziosmanpaşa bölgesinde bulunan yolcuları taşımak için 7'si yerin altında olmak üzere toplam 22 istasyona sahiptir. Günlük ortalama 190.000 yolcu ile İstanbul raylı sistem ulaşımında en çok kullanılan dördüncü hattır. Hattın 1. etabı Mescid-i Selam - Şehitlik istasyonları arası Eylül 2007'de açılırken 2. Etabı olan Topkapı - Şehitlik

arası Mart 2009'da açılarak iki hat birleştirilip Topkapı-Mescid-i Selam arasında seferler başlamıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2 T4 Tramvay hattı güzergâhı

Yüksek tabanlı tramvay araçlarının kullanıldığı bu hatta 3 farklı araç seti kullanılmaktadır. Bunlar Hyundai Rotem LRV34, Düwag B100, İstanbul(Yerli tramvay) dur. Cumhuriyet istasyonu hariç tüm istasyonlarda engelli ve yaşlı yolcuların için rampalar, yer altı istasyonlar ise yürüyen merdiven ve asansörlerle donatılmıştır. Çizelge 3.2'de T4 işletme verileri verilmiştir.

Çizelge 3.2 T4 İşletme Verileri (Metro İstanbul, 2020)

Hat Uzunluğu	15,3 km
İstasyon Sayısı	22
Araç Sayısı	83
Araç Seti	3
Sefer Süresi	45 dk. tek yönde
İşletme Saatleri	06.00 - 00.00
Günlük Yolcu Sayısı	190.000 Yolcu
Günlük Sefer Sayısı	446 sefer / çift yön
Sefer Sıklığı	3 dk. (Pik Saatte)

3.1.2. İstanbul'da katenersiz tramvay sistemleri

Türkiye'nin ikinci katenersiz tramvay sistemi İstanbul'da yer almaktadır. Alibeyköy'den başlayarak, Haliç kıyısı boyunca devam eden, İstanbul'un tarihi ve turistik bölgelerinden Eyüpsultan ve Eminönü kesimlerinde hizmet veren Eminönü-Alibeyköy tramvay hattı, gelişen teknolojiye ayak uydurmak ve estetik bir raylı sistem hattı oluşturmak üzere katenersiz olarak projelendirilmiş ve inşa edilmiştir.

3.1.2.1. Eminönü - Alibeyköy tramvayı T5

T5 tramvay hattının toplam uzunluğu 10,1 km'dir. Alibeyköy Cep Otogarı durağından başlar, Haliç kıyısında hareket ederek Eminönü'ne kadar devam eder. Toplam 14 istasyondan oluşmaktadır. Minimum yatay kurp yarıçapı 50 metre, duraklarda bekleme 20 sn, maksimum boyuna eğim max. %6,5, hattın tasarım hızı korumalı kesimlerde max. 50 km/saat, ortalama işletme hızı 17 km/sa olarak planlanmıştır. Çizelge 3.3'de istasyon isimleri ve duraklar arası kilometre bilgileri verilmiştir.

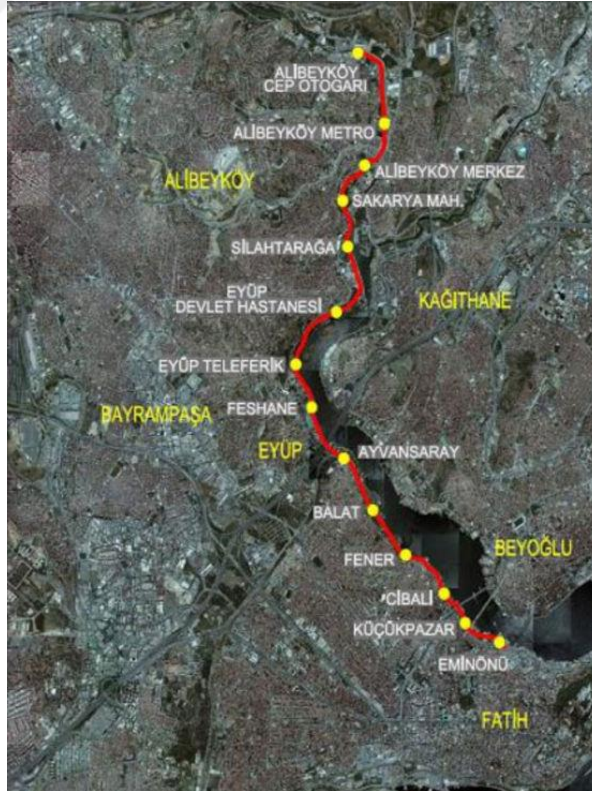
Çizelge 3.3 Eminönü-Alibeyköy Tramvayı İstasyon İsimleri ve Kilometre Bilgileri

İstasyon	Km	Ara Mesafe(m)
Eminönü	0+074	0
Küçükpazar	0+734	660
Cibali	1+186	452
Fener	1+935	749
Balat	2+765	830
Ayvansaray	3+476	711
Feshane	4+342	866
Eyüp Teleferik	4+972	630
Eyüp Devlet Hastanesi	5+899	927
Silahtarağa	7+070	1171
Sakarya Mahallesi	7+668	598
Alibeyköy Merkez	8+232	564
Alibeyköy Metro	8+910	678
Alibeyköy Cep Otogarı	10+138	1228
Hat Sonu	10+148	10

Eminönü – Alibeyköy tramvay hattı (T5) hattı; Bağcılar – Kabataş tramvay hattı (T1) ve şehir hatları (feribot) ile Eminönü istasyonunda, Fener ve Feshane istasyonlarında Şehir hatları ile, Hacı Osman – Yenikapı metro hattı (M2) ile Küçükpazar İstasyonu’nda, Eyüp - Piyer Loti teleferik hattı (TF2) ile Eyüp Teleferik İstasyonu’nda, Mecidiyeköy - Mahmutbey Metro Hattı (M7) ile Alibeyköy Merkez İstasyonu’nda entegre olup raylı sistemler hatları için oldukça önemli bir geçiş noktası olacaktır (Şekil 3.3).

Hattın ilk bölümü olan Alibeyköy Cep otagarı - Cibali arası Ocak 2021 yılında işletmeye açılmış olup kalan kısım olan Cibali - Eminönü arası Unkapanı köprüsü altından yaklaşık 300 m alt geçit açıldıktan sonra Eminönü tarafı inşaatı devam edilecektir.

Hat genel olarak rekreasyon alanı içerisinden geçmektedir. Hem zemin olarak geçilen karayolu kesişim bölgeleri ve yaya erişim yolları sinyalize sistemler ile geçilmiştir.



Şekil 3.3 Eminönü-Alibeyköy Proje Güzergâhı (Metro İstanbul, 2020)

Eminönü – Alibeyköy hattı Türkiye'nin ilk yerden beslemeli katenersiz sistemi olan Alstom APS sistemi ile inşa edilmiştir. Hattın iki yönlü olarak 20,2 kilometresi katenersiz cer gücü olan yerden besleme sistemi ile yapılmıştır. APS sisteminde Cer enerjisini enerji pabucu sayesinde gömülü olan üçüncü bir raydan alır. Enerji rayları alt temel olan betona tespitli olarak yapılmaktadır.

Tramvay araçlarında iki adet fırça bulunur ve biri tramvay aracının bir ucunda diğeri ise diğer ucunda yer alır. Fırçalar, APS rayı üzerindeki pislikleri ve engelleri temizler, kolektör pabuçlarıyla herhangi bir darbe gelmesini engeller. Bu fırçalar, tramvay APS modunda iken aktive olur, yani fırçaların konumu kolektör pabuçlarının konumuna karşılık gelir (Şekil 3.4).

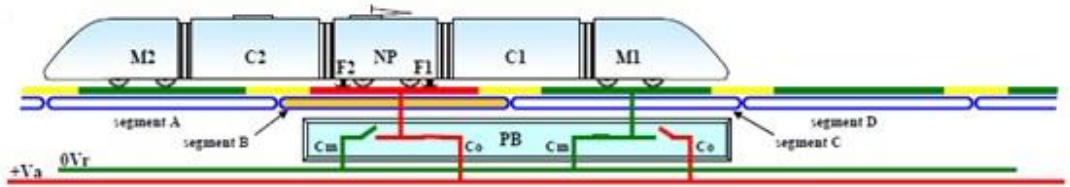


Şekil 3.4 APS Rayı Temizleme Fırçası (Metro İstanbul, 2020)

Düz bir hat düzeninde APS rayı, iki çalışan ray arasında hattın ortasında yer alır. Kurp bölgelerinde ise APS rayı yana doğru kayıktır ve konumu, araç altında yer alan APS kolektör pabucunun yoluyla belirlenir. Araç kendi varlığını, yere kodlanmış bir sinyal göndererek işaret eder. Bu sinyal, araç üstü elektronik cihazı tarafından üretilerek, kolektör pabucuna entegre bir anten ile iletilir. Bu kodlanmış sinyal, bir segment üzerinde sürekli ve güvenli bir şekilde algılanır ve böylece bu segmente enerji beslemesi için izin alınır ve enerji beslemesi devam ettirilir. Bu prensibe dayanarak, sadece tamamıyla aracın kapsadığı alan içinde yer alan segmentler enerji ile beslenir.

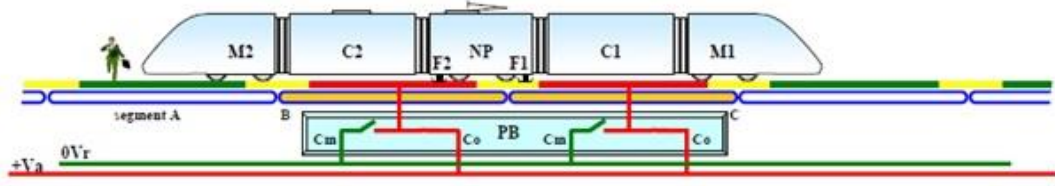
Ray üzerinde tüm enerji verilen yüzeyler, araç tarafından bütünüyle korunur ve bu yüzeyler erişilebilir değildir. Araç, kendi altında yer alan kolektör pabuçları yardımıyla akımı toplar. Bu kolektör pabuçları arasındaki mesafe, nötr bölgenin uzunluğundan daha fazladır. Dolayısıyla en az bir adet kolektör pabucu, enerjili iletken segment ile sürekli temas halindedir.

Sistemi detaylı inceleyecek olursak;



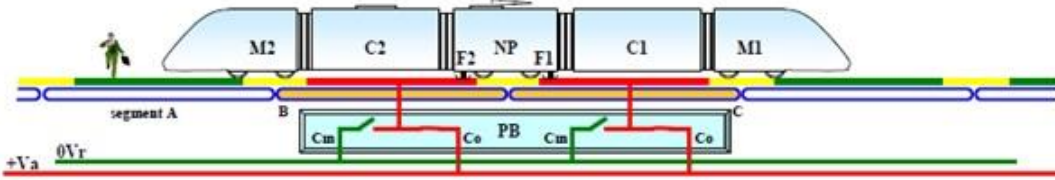
Şekil 3.5 F1 ve F2 B Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araç cer enerjisini elektrikli B segmentinden alır. Ön kolektör pabuçları (F1) ve arka (F2) enerjilenir. B segmenti aracın altında ulaşılabilir değildir. A,C ve D segmentleri 0Vr'ye bağlanır (Şekil 3.5).



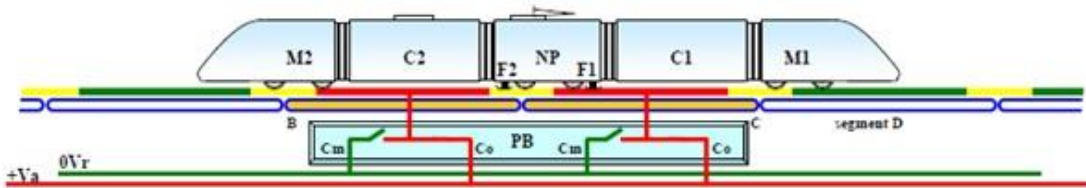
Şekil 3.6 F2 ve F1 B Segmentinde, F2 Enerjili (Alstom, 2020)

Araç, F2 ve B ile enerjilenir. Kolektör pabucu anteni F1, C segmenti üzerinde alış döngüsünü yayımlar. C segmenti enerjilidir ancak kolektör pabucu F1 henüz bu segment üzerinde kaymıyordur. C üzerinden herhangi bir enerji verilmiyorken Co ve Cm anahtarlanır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil 3.6).



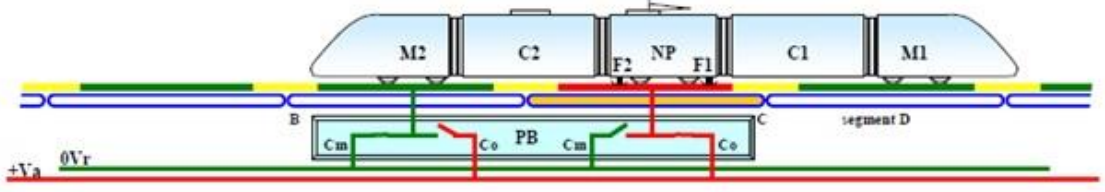
Şekil 3.7 F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araca B ve C segmentlerinden iki adet kolektör pabucu ile enerji verilir. Kolektör pabucu anteni F1, C segmentinde alış döngüsünü yayımlar. Kolektör pabucu anteni F2, B döngüsüne yayın yapar. A ve D, 0Vr'ye bağlanır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil 3.7).



Şekil 3.8 F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F1 Enerjili (Alstom, 2020)

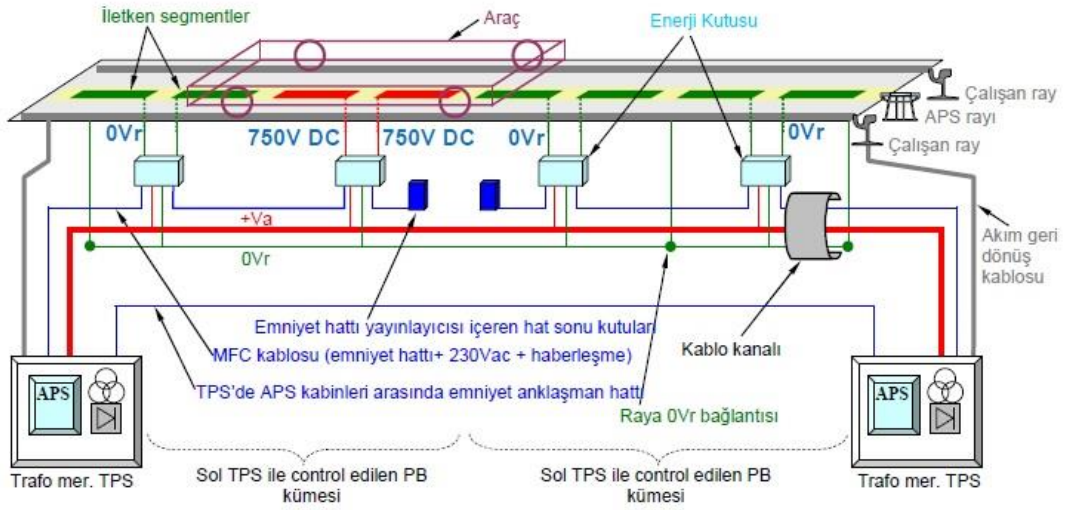
F2, B segmentinin iletken kesiminden ayrılmıştır. Araca F1 kolektör pabucuyla enerji verilir. F2 ile bağlantılı olan anten, enerjili olmaya devam eden alış döngüsü B'ye yayın yapmayı sürdürür. A ve D, 0Vr'ye bağlanır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil 3.8).



Şekil 3.9 F2 ve F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araca C segmentinden alışı gerilimi ile enerji verilir. Ön (F1) ve arka (F2) kolektör pabuçları enerjilidir. Enerjili C segmenti aracın altında ulaşılabilir değildir. A, B ve D segmentleri 0V_r'ye bağlanır (Şekil 3.9).

APS sistemin alt yapı montajında 8 m'si iletken 3 m'si yalıtkan olmak üzere toplam 11 m'lik segmentler, yaklaşık her 20 m'de bir APS menholleri, iki hattın arasında kalan ve APS monhollerini birbirine bağlayan kablo kanalları ve APS menhollerinin dağıtım kutuları (BR) yardımıyla APS rayına bağlanan esnek borulardan oluşur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Basitleştirilmiş APS Enerji Temini Mimari Gösterimi (Alstom, 2020)

Enerji Kutuları APS menholleri içine tesis edilir. Her bir enerji kutusu (PB) ise iki (2) adet APS segmentine enerji beslemesi yapabilecek kapasitededir. Her enerji kutusu (PB), yukarı ve aşağı yönlü segmentlerde tüm anahtarlama ve besleme cihazlarını içerir (Şekil 3.11).

Enerji kutusu (PB) tasarımı arızaya karşı emniyetli bir tasarımıdır. Hiçbir arıza veya hata, APS sisteminin emniyet seviyesini etkilemez, yani enerji olmadığından dolayı her zaman emniyetli kalır. Ayrıca yedekte bekleyen ekipman da emniyetlidir ve sadece aktif devreler enerji segmentlerine gerilim sağlayabilir.

Emniyetli olduğu zaman Enerji Kutuları (PB), APS iletken segmentlerini cer gücü trafo merkezi (TPS)'nden beslenen 750 VDC (+Va) enerjiye bağlar. Standart sistemlerde olduğu gibi, cer akımı geri dönüşü, çalışan raylarla ve hattaki eş potansiyel bağlantılarla sağlanır. 0Vr kablosu, raylar arasında ve hatlar arasında bir eş potansiyel bağlantıya yakın olacak şekilde en yakın raya düzenli aralıklarla (en fazla her 180 metrede bir) bağlanır. Bu kablo enerji kutusuna bir gerilim referansı verilmesini sağlar ve gerilim referansı, yerel çalışma rayının gerilimine eşittir. Bu 0Vr kablosu hiçbir zaman cer akımı geri dönüşünü sağlamak için kullanılmaz. Aracın kapsadığı alan dışındaki APS iletken segmentleri, PB üzerinden bu 0Vr kablosuna zorunlu olarak her zaman bağlı durumdadır.



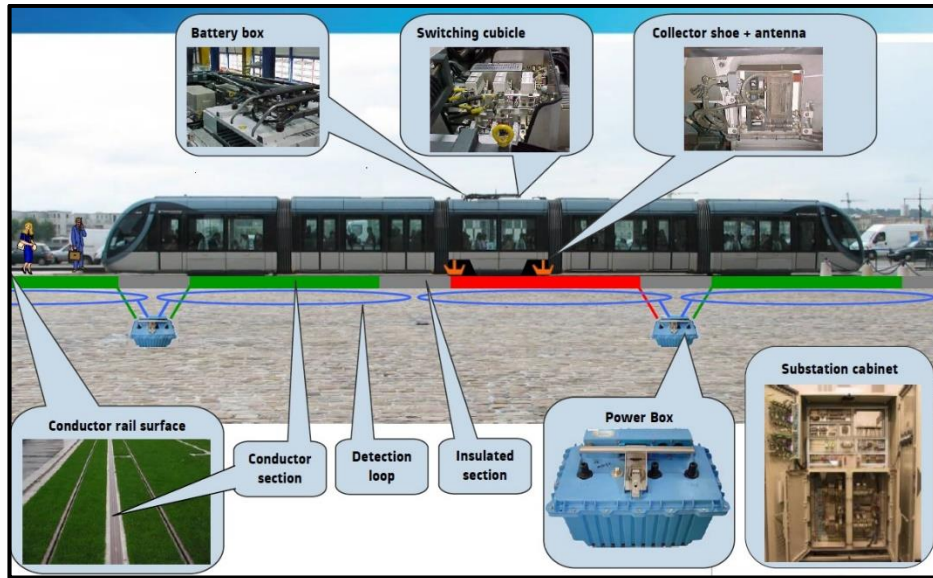
Şekil 3.11 Montajı Yapılan Enerji Kutusu (Powerbox)

Emniyet Hattı (SL) denilen bir kontrol devresi, emniyet etkileyen bir arıza durumu algılandığında bile APS devresinin her zaman emniyetli olmasını sağlar. Böyle bir durumda arıza giderilene veya izole edilene kadar emniyet hattı açılarak emniyetli durum korunur. Bu işlem, söz konusu arıza tehlikeli bir durum yaratmadan önce müdahalede bulunulmasına izin verir. Emniyet hattı, hat sonu (EOL) yayınlayıcısı ile gerçekleşir ve trafo merkezi (TPS)'ndeki ilgili APS kabiniyle izlenir.

Emniyetli durum tek bir segment için:

Ya bir iletken segment üzerinde algılanan tramvay olarak, ya da bu segmentin 0Vr kablosuna bağlanması olarak tanımlanır.

Sadece APS devresi emniyetli bir durumda olduğunda sistem arızalı enerji kutusunun (PB) izole edilmesine izin verir. Arızalı PB izole edildikten sonra arızalı enerji kutusunun (PB'nin) değiştirilmesini beklemeye gerek olmadan APS sistemi kaldığı yerden çalışmaya devam edebilir. Eğer enerjisiz kalan bölge kısa ise (örneğin 22 m), araç kendi hızıyla bu kesimi geçer. Araç enerji temininin geri geldiğini algılar algılamaz, cer gücü tekrar kazanılır ve tren "normal" moda geri döner (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 APS Araç Üstü Ekipman ve Sistem Kesiti (Alstom, 2020)

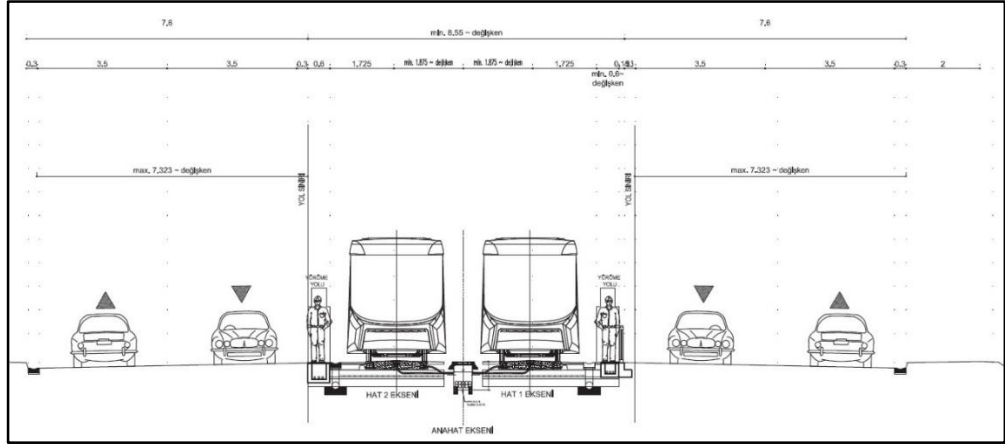
Enerjisiz kalan bölge aracın kendi hızıyla geçilemiyorsa (örneğin enerjisiz bölgenin çok uzun olması, tren düşük hızdayken bir rampa üzerinde olması, istasyonda bulunması gibi), bu durumda tren durur ve makinist, sadece sınırlı bir süreliğine cer modunu APS araç üstü bataryaya manuel olarak geçirir. APS raylarından gelen cer enerjisi, APS enerjili bölgesi tekrar algılanır algılanmaz hemen geri kazanılır.

Tüm APS altyapısı yere gömülü durumdadır, dolayısıyla bu altyapı dışardaki yol yüzeyi için görünen yapı sunmaz ve tren besleme sisteminin kamuya açık alan üzerindeki etkisini azaltır, tüm tramvay hattı boyunca tüm havai engelleri de ortadan kaldırır. Bunun yanı sıra APS sistemi, kamuya açık alanlarda elektrikli iletken bölümleri sakladığı için daha avantajlıdır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Eminönü-Alibeyköy Tramvay Hattı Kesiti (Metro İstanbul, 2020)

Enerji raylarının hata payları 2 mm'dir. Haliç bölgesinin zemin yapısı deniz dolgusu şeklinde killi bir yapıdadır. Haliç gibi bu tarz kötü zeminlerde hat üst yapısında oluşabilecek oturmaların önüne geçmek için zemine kazık çakılmış ve hat üst yapıları bu kazıkların üzerine oturturulmuştur. Zeminin daha mukavim olduğu yerlerde zemin iyileştirme kapsamında kaya dolguları yapılmış ve üzerine hat üst yapılar yapılmıştır. Hatta 4 adet köprü, toplamda 34 adet sinyalize kavşak ve yaya geçidi bulunmaktadır. Sinyalize olmayan 27 adet yaya geçidi bulunmaktadır.



Şekil 3.14 Eminönü-Alibeyköy Tramvayı Proje Kesiti

Yukarıda APS sistemi ile yapılan Eminönü - Alibeyköy hattı proje kesitinde görüldüğü üzere APS sisteminde hatta katener direği olmadığı için hat kesitleri daraltılarak inşaat maliyetleri düşürülmüştür. Aynı zamanda hemzemin bölgelerde kısıtlanan alan düşürüldüğü için yol kesitleri artmıştır (Şekil 3.14).

Depo sahasında ve araç bakım yollarında araçlar enerjiyi genel olarak konvansiyonel katenerden sağlayacaktır. Araçların üst kısmında enerjiyi katenerden alabilmesi için pantograf bulunacaktır. Bu araçlar aynı zamanda diğer tramvay hatlarında da çalışabilecektir. Araçlar yerli firma olan Durmazlar tarafından yapılmaktadır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Durmazlar Aracı Makinist Kabini

Hatta kullanılacak araç özellikleri:

Raylar arası açıklık	1435 mm
Araç genişliği	2650 mm
Araç uzunluğu	32,50 m
Kapı eşik yüksekliği (ray mantarı tepesinden)	350mm
Minimum çift kanat kapı açıklığı	1320 mm
Minimum yatay kurp yarıçapı	50 m
Minimum yatay kurp (yüksüz)	20,5 m
Minimum düşey kurp yarıçapı	300 m
Maksimum eğim	6.5 %
AW3'de Hızlanma ivmesi	1.2 m/s ²
Maksimum frenleme ivmesi (normal servis freni ile)	1.4 m/s ²
Acil fren ivmesi	2.8 m/s ²
Maksimum hız	50 km/h
Hat gerilimi; anma	750 VDC
Akü gerilimi; anma	24 VDC
Aks yükü AW3'te (6 yolcu/ m ²)	≤ 12500 kg



Şekil 3.16 Eminönü-Alibeyköy Tramvay Aracı

Bu projede, Alstom firması dünyada ilk defa Alstom APS sistemini kendi tramvay araçları dışında başka firmanın araçlarına, kendi sistem ekipmanlarının monte edilerek kullanılmasına izin vermiştir. Hazırlanan araçlar Eylül 2020’de hatta getirilmeye başlanmıştır (Şekil 3.16). Hattın ilk kısmı olan Alibeyköy Cep Otogarı – Cibali arasının Ocak 2021 de açılmıştır. Projenin kalan kısmı (Eminönü – Cibali) ise 2021 yılı içerisinde açılması planlanmaktadır.

3.2. Katenerli ve Katenersiz Tramvay Hatlarının İncelenmesi

Tramvay; karayolu ulaşım araçları ile aynı yolu kullanan, güzergâhı üzerinde bulunan raylar üzerinde hareket eden bir makinist tarafından kumanda edilen elektrik enerjisini katener telinden, üçüncü bir enerji rayından veya araç üstü enerji depolama sistemlerinden (ESS) alan, zemine yakın, düşük kapasiteli kentsel raylı toplu taşıma araçlarıdır.

Hem zemin geçitlerde ve kavşaklarda karayolu taşıtları ile aynı yolu kullanma zorunluğu olduğundan mevcut karayolu trafik düzenine uymalıdır. Çizelge 3.4’de ulaşım sistemlerinde fiziksel özerklikler ve trafik esnekliği gösterilmektedir. Buna göre tramvay araçlarının geçitlerde ve kavşaklarda karayolu taşıtlarına karşı geçiş üstünlüğü vardır.

Çizelge 3.4 Ulaşım Sistemlerinden Fiziksel Özerklikler ve Trafik Esnekliği (Baştürk, 2014)

Ulaşım Türü	Fiziksel Özerklik	Esneklik
Otomobil	Yok	Tam
Dolmuş	Yok	Yarım
Minibüs	Yok	Yarım
Otobüs	Yok	Yarım
Metrobüs	Yarım	Yarım
Tramvay	Yarım	Yok
Metro	Tam	Yok
Tren	Tam	Yok
Vapur	Tam	Yarım

Nüfusu fazla olmayan yerleşim yerlerinde tramvay sistemleri ana ulaştırma sistemi olabilir fakat nüfusu fazla olan yerleşim birimlerinde ana ulaşım sistemlerine entegre olarak kullanılan hatlardır. Dünyanın birçok kentinde ana çekirdek ulaşım sistemleri tramvaylar ile sağlanmaktadır. Tramvaylar şehir içi ulaşımı sağlamakla birlikte ana toplu taşıma hatlarına entegre olarak yolcularını bu sistemlere aktarırlar.

Tramvay inşaatları güzergâh özellikleri de göz önüne alınarak diğer sistemlere oranla daha az inşaat maliyetleri getirmektedir. Bu yüzden dünyanın pek çok şehrinde kullanılmaktadır. “Genel olarak bir tramvay aracı; 4 – 6 akslı, 14 – 21 m boyunda 100 – 180 yolcu kapasiteli ve kapasitenin %20 – 40’ı oturan yolculu araçlardır” (Baştürk, 2014). Fakat Avrupa’nın birçok kentinde 35 – 53 m boyunda 5 – 7 akslı aracın köprülerle bağlanması ile 350 kişi kapasiteli tramvay araçları da kullanılmaktadır.

Tramvay, hatları hemzemin yollardaki trafiğin içine girdiğinden dolayı işletme hızları genellikle 25 – 35km/saat ve maksimum işletme hızı 50 – 60 km’de tramvay ve hattın özelliklerine göre değişmektedir.

Tramvay araçlarında cer gücü enerji temini, katener diye adlandırılan havai besleme hatları, yerden üçüncü bir enerji rayı ile besleme yapan hatlar ve araç üstü enerji depolama sistemleri (ESS) tarafından sağlanmaktadır. Yaygın olarak 750 V DC kullanılır ve ray açıklığı 1435 mm’dir.

Türkiye’nin dokuz şehrinde katenerli tramvay hatları hizmet vermektedir. Bunlar Antalya T1, T2 tramvay hatları, Bursa T1, T2, T3 tramvay hatları, Eskişehir hafif raylı sistem işletmesi, Gaziantep T1,T2,T3 tramvay hatları, İzmir T1, T2 tramvay hatları, Kocaeli Akçay tramvay hattı, Konya T1, T2 tramvay hatları, Samsun tramvay hattı ve İstanbul T1, T2, T3, T4 tramvay hatlarıdır (Wikipedia, 2020). İstanbul’da ve Türkiye’de ilk yerden CER gücü beslemeli katenersiz tramvay hattı olan T5’in ise Ocak 2021’de birinci kısmı (Eminönü – Cibali) kullanıma açılmıştır.

3.2.1. Katenerli hatların özellikleri

Katener sistemi orta gerilim enerjisinin yerel elektrik dağıtıcı firmalardan temin edilerek trafo merkezlerinde uygun elektriksel ekipmanlar vasıtasıyla 750 VDC besleme gerilimine dönüştürüldükten sonra raylı sistem hatları boyunca taşınarak araçlara ulaştırıldığı havai hat sistemidir. Araç işletme sırasında katener sisteminden gerekli enerjiyi üstünde bulunan pantograf yardımı ile alır.

Katener sistemleri konvansiyonel katener sistemi ve rijit katener sistemi olarak iki ana kısma ayrılır. Konvansiyonel katener sistemleri de kendi içinde ikiye ayrılır. Bunlar otomatik gergili katener sistemi (ATCS) ve sabit gergili katener sistemidir (FTTW). Otomatik gergili katener sistemi ana hat güzergâhında maksimum hız olan saatte 100 km'ye kadar kullanılır. Sabit gergili katener sisteminde, işletme hızı maksimum hızı saatte 40 km olan nostaljik tramvaylarda, depo ve garaj sahalarında kullanılır.

Rijit katener sistemi, Al kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden oluşmaktadır. Tünellerde üçüncü raya alternatif olsun diye üretilmiştir. Bakımı daha kolay ve üçüncü raya göre daha esnektir. 250 km/saat hıza kadar kullanılabilir. Rijit katener sistemi araç bakım yollarında gergili katener yerine kullanılabilir.

3.2.2. Katenersiz hatların özellikleri

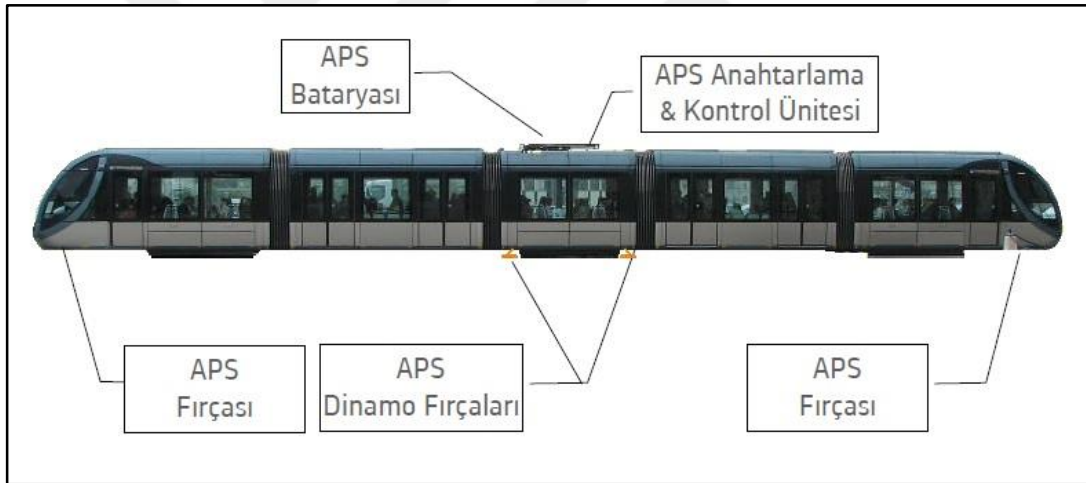
Dünyada raylı sistemlerde elektrifikasyon teknolojilerinin gelişmesi ile beraber katenerli sistemlere alternatif olarak, çoğunlukla yoğun şehir merkezlerinde ve tarihi kentsel alanlarda kullanılmakta olan katenersiz sistemler de geliştirilmiştir. Bu sistemlerin özellikleri, üretici firmalara ve uygulanan yöntemlere göre kendi içerisinde farklılık göstermektedir.

3.2.2.1. Alstom APS sistemi

Enerji rayları kavşaklarda ve hemzemin yol geçişlerinde kara yolu araçlarının yüklerine maruz kalmaktadır. Firma sistemin karayolu araçlarının oluşturduğu

yüklerden hasar görememesi için segmentlerin dayanımını 13,5 ton/aks olarak ayarlamıştır.

Araç üstü enerji depolama sistemlerinde süper kapasitörlerin enerji yoğunlukları düşük olduğu için durak arası mesafe planlamalarında kısa durak planlaması gerekmektedir. Bu yüzden enerji yoğunluklarını yükseltmek ve duraklar arası mesafeyi açmak için araçlara batarya eklenmiştir (Şekil 3.17). Bu da, aracın daha da ağırlaşmasına ve fazla güç harcamasına sebep olacaktır. Bu sistemlerin kullanılması planlanan projelerde durak mesafeleri araç üstü enerji depolama sistemlerinin performansına göre yapılmaktadır. Alstom APS sisteminde araçlar yerden sürekli cer gücü ile beslenmektedir. Bu yüzden Hat ve güzergâh planlamalarında durakların yoğunluk ihtiyacına göre planlamasının önünü açmaktadır. Bu da, ilk yatırım inşaat maliyetlerini düşürmektedir.



Şekil 3.17 Alstom APS Sistem Elemanları (Alstom, 2020)

Tramvay araçları ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadır. Araç üstü enerji depolama sistemlerinde çalışan araçlarda dur kalk yapılması, sıkışık trafik ve beklemler havalandırma sistemlerinde ve aydınlatma sistemlerinde enerji düşüşüne sebebiyet verebilirken, katenerli sistemler gibi araç sürekli cer beslemesinde olduğundan sorun oluşturmamaktadır. Bu beklemler sadece işletme süre kaybına neden olmaktadır. Bu yüzden sürekli yerden beslemeli veya katener sistem beslemeli araçlar araç üstü enerji depolama sistemleri ile çalışan araçlara göre daha avantajlıdır.

Kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumunda kollektör papucu ve iletken segment arasında temas kesildiğinden araç, enerji alamadığı için çalışamayacaktır. Bordeaux hattında bu sebeplerden dolayı işletmede aksamlar meydana gelmiştir. Kar, buzlanma ve aşırı yağmur durumlarında işletme performanslarını güvence altına almak amacıyla enerji kesintileri durumunda tramvayın çalışması için yedek batarya ünitesi araçta bulundurulabilir. Mevsim şartlarının sert geçtiği bölgelerde bu konuya dikkat edilmelidir.

Aşırı yağış sel gibi durumlarda güç kutuları (Power box) Bordeaux Tramvayı'nda devre dışı kalmıştır. Fakat firma sonradan güç kutularını ve kollektörleri su geçirmez kılıf ile kaplamıştır. EN 60529 standardına uygun şekilde 15 gün 1 metre derinliğe kadar suya dayanıklılığını garanti etmektedir.

Alstom APS sisteminde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı yoktur. Ancak ilave bir süper kapasitör ve/veya batarya ile mümkün olmaktadır. İlave araç üstü süper kapasitör ile %25 - 30 arası enerji tasarrufu yapılabilirken, yalnızca batarya ile bu oran %10 seviyelerinde kalmaktadır.

Alstom APS sisteminde araç üzerinde enerji rayını aktif eden anten, enerji kollektörü, ve APS kabinleri araç dışında power box ekipmanları, APS segmentleri vb. gerekli ilave ekipmanlar bulunmaktadır. Katenerli sistemlerde kullanılan altyapı ve ekipmanlar ile APS sisteminde kullanılan alt yapı ve ekipmanların toplam fiyatları kıyaslandığında maliyette 7 - 8 kat bir maliyet artışı olmaktadır.

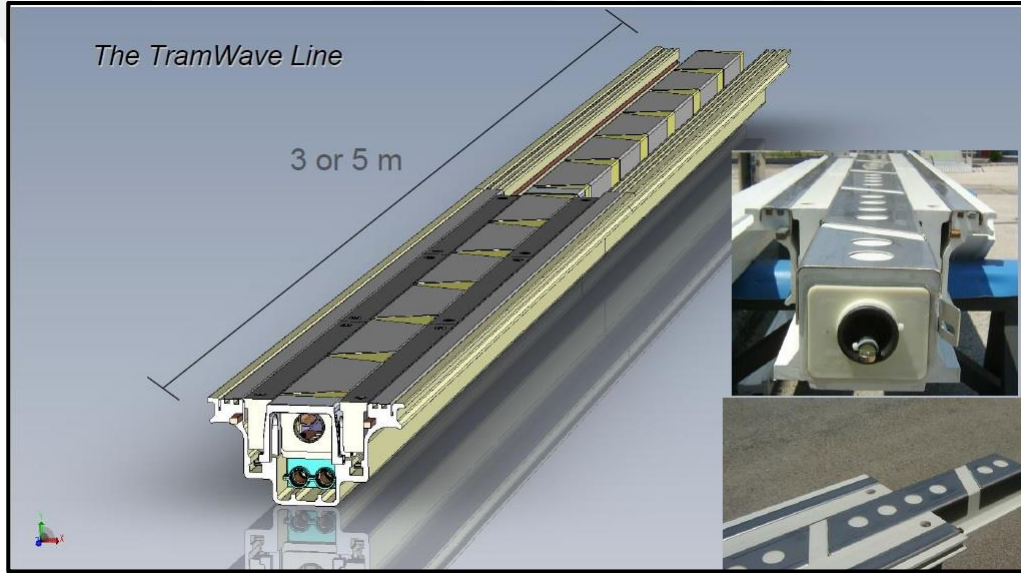
Alstom APS sisteminin parça maliyetleri yüksek olduğu için bakım maliyeti katenerli sistemlere oranla fazladır.

3.2.2.2. Ansaldo Tramwave sistemi

Araçlar ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadırlar. Sıkışık trafik ve kavşak beklemelerinde katenerli sistemler gibi araç sürekli cer beslemesinde olduğundan dur kalk yapması, sıkışık trafik ve beklemeler araç için sorun oluşturmamaktadır.

Enerji kablosu segment içinde olduğundan dolayı bu sistemde su izolasyonu ve drenaj problemi APS sistemine göre daha iyi durumdadır. Kaplama üzerindeki su birikimi 10 cm'den daha büyük olmadığına araç sürekli olarak güç besleyebilir. Modül üzerindeki biriken suyun yüksekliği 10 cm'yi aştığında, sistem su birikme süresi 2 saati aşıttan sonra 750V DC güç beslemesi durmaktadır.

Besleme segmentlerinde oluşabilecek arızalar komple tanılama ve algılama sistemi seti ile tespit edilir. Bu arızalar kontrol merkezine iletilir. Kontrol merkezi arızaları sisteme yükler. Segmentlerin bakımı ve motajı hızlı ve kolaydır. Yarım saat içinde besleme modülü yenisi ile değiştirilebilir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Ansaldo Tramwave Segment Kesiti (Ansaldo, 2020)

Tramwave sisteminde, rejeneratif fren yoluyla belirli bir elektrik enerjisi geri kazanabilir ve kullanıcı açısından işletim giderinden tasarrufta bulunacak şekilde elektrik enerjisini doğrudan enerji şebekesine aktarır. Bu da sistem için bir artıdır.

Kollektör pabucu karlanma ve buzlanma durumunda segmente yeteri kadar temas edemeyeceğinden dolayı cer gücü yeterince araca iletmez ve işletme kayıpları oluşabilir. Aktif olarak sistem 2014 yılının sonlarına doğru Çin'in Zhuhai kentinde teknoloji paylaşımı olarak uygulanmaya başlanmıştır. Maliyet olarak

katenerli sistem ve APS arasında kalmaktadır. Fakat sistemin yurt dışı lisans hakları Ansaldo firmasına aittir. Mevcut sistemi deneyen ve ticari olarak ilk kullanan CRRC firmasının yurt dışı lisans hakkı yoktur. Çin içerisinde geçerli lisans hakkına sahiptir. Bu yüzden firmanın Çin dışında kullanılması Ansaldo - CRRC firmalarının anlaşmasından sonra mümkün olacaktır.

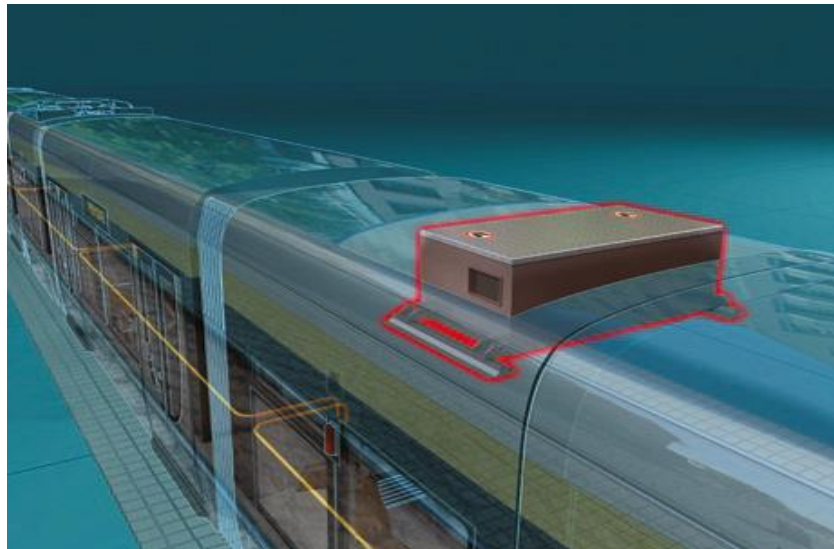
3.2.2.3. Bombardier Primove sistemi

Araçlar ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadırlar. Sıkışık trafik ve kavşak beklemelerinde indüktif güç transferi sayesinde sürekli cer beslemesinde olduğundan dur kalk yapması, sıkışık trafik ve beklemeler araç için sorun oluşturmamaktadır.

Sistem gömülü olmasından dolayı karayolu trafiğinde herhangi bir zarar görmemektedir. Sistem Almanya'da hibrit otobüslerde denenmiş ve başarılı olmuştur.

Cer gücü enerjisini indüktif güç transferi şeklinde aldığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.

Rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı yoktur. Ancak araç üstü enerji depolama sistemleri sayesinde bu enerji kullanılabilir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Primove Sistem Mitrac Bataryası (Bombardier, 2020)

Oluşan 20 kHz üç fazlı manyetik alandan dolayı kalp pili, cep telefonları ve diğer elektronik eşyalara hiçbir etkisinin olmadığı Bombardier tarafından bildirilmiştir.

Cer gücü enerjisini indüktif güç transferi şeklinde aldığından aşırı yağış, sel gibi durumlardan etkilenmez.

Enerji rayı olmamasından dolayı aşınma ve yenileme maliyetleri olmaz.

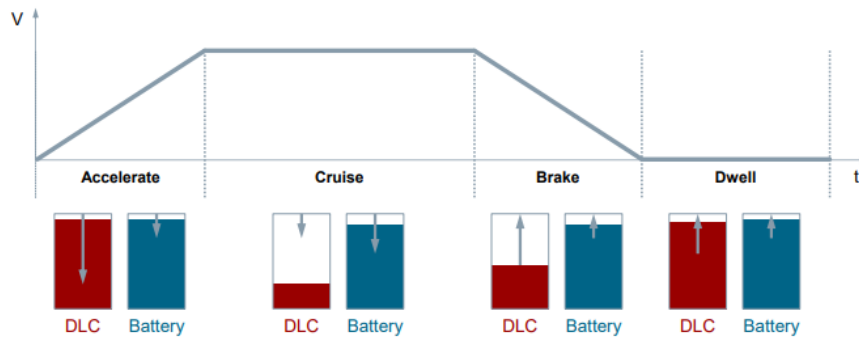
Bombardier Primove sisteminin tramvay araçları üzerinde herhangi bir ticari işletmesi bulunmamaktadır. Bu yüzden yatırım maliyetleri ile bilgi mevcut değildir fakat bu sistem için maliyet; endüktif sistem, batarya sistemi ve süper kapasitör sisteminin kombine maliyeti denilebilir.

3.2.2.4. Siemens Sitra HES&MES Sistemi

Araç frenleme yaptığında rejeneratif enerji double - layer kapasitörlere ve bataryaya şarj edilir. Bu sayede % 20 - 30 arası enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu sistemlerde araç durağa girerken enerjiyi rijit katenerden almaya başlar, istasyonda şarj işlemine devam eder ve ilk hareketinden istasyonu terk edene kadar enerji teminini rijit katenerden sağlar. Sistemin durakta şarj süresi 20 saniyedir.

Double - layer kapasitörlerdeki enerjinin büyük kısmı normal hareket esnasında harcanır. Bu sayede bataryanın ömrü uzatılır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Siments Sitra HES&MES İşletme Sırasında Araç Şarj Prensibi (Siemens,2020)

Cer gücü enerjisini süper kapasitör ve batarya şeklinde sağladığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.

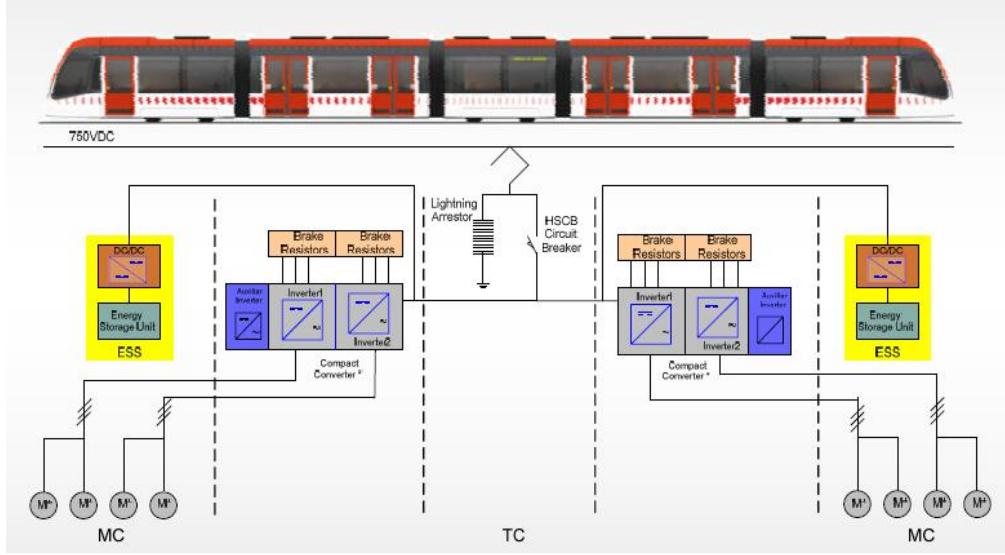
Batarya maliyetleri şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 250000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600000 £ kadardır. Servis ömürleri 10 Yıl gösterilmesine karşın kullanım sıklığı nedeniyle daha az kullanılması muhtemeldir. Hattaki toplam tramvay aracı sayısı göz önüne alındığında son derece yüksek bakım maliyetleri olmaktadır.

Bu sistemlerde aracın trafikli alanlarda dur - kalk yapma durumları, havalandırma ünitesi harcamaları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır.

3.2.2.5. CAF süper kapasitör ve batarya sistemi

Sıkışık trafik ve kavşak beklemelerinde, dur-kalk yapma durumları, havalandırma ünitesi enerji harcamalarını süper kapasitör ve bataryadan yapacağı için enerji harcamaları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır.

Duraklar arası mesafe enerji yönetim hesabına göre yapılmalıdır. Bu sistemde araç ilk hareket enerjisini süper kapasitörden almaktadır. Bu da, duraklar arası mesafenin daha da kısalmasına sebebiyet verebilir (Şekil 3.21). Duraklar arası şarj istasyonları kurmak kaydı ile duraklar arası mesafe uzatılabilir.



Şekil 3.21 Caf Enerji Depolama Sistem Görünüşü (CAF, 2020)

Rejeneratif frenleme enerjisinin büyük bir bölümü bu sistemlerde geri elektrik enerjisine çevrilip süper kapasitör ve batarya tarafından depolanır. Bu sayede sistem %21-29 arası enerji tasarrufu sağladığı öngörülmektedir.

Cer gücü enerjisini süper kapasitör ve batarya şeklinde sağladığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.

Batarya maliyetleri şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 250.000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600.000 £ kadardır. Servis ömürleri 10 yıl gösterilmesine karşın kullanım sıklığı nedeniyle servis ömürlerinin azalması muhtemeldir. Hattaki toplam tramvay aracı sayısı göz önüne alındığında son derece yüksek bakım maliyetleri getirmektedir.

3.2.2.6. Bombardier Primove hibrit sistemi ve diğer bataryalı çözümler

Bombardier firmasının geliştirdiği Primove hibrit sistemi lityum iyon piller ve çift katmanlı süper kapasitörlerden oluşmaktadır. Firmanın tedarikçisi yalnız kendisi olup telifli üründür. Sistem olarak Siments Sitras HES & MES ve CAF süper kapasitör batarya sistemine benzemektedir ve aynı özelliklere sahiptir.

Batarya maliyetleri şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 250.000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600.000 £ kadardır. Servis ömürleri 8 - 10 yıl gösterilmesine karşın kullanım sıklığı nedeniyle servis ömürlerinin azalması muhtemeldir. Hattaki toplam tramvay aracı sayısı göz önüne alındığında son derece yüksek bakım maliyetleri getirmektedir. Aynı zamanda araçlara ekstra yük getirdiğinden araç ağırlığı ve kullandığı enerji de %5 seviyelerinde artmaktadır. Bu sistemlerin tercihinde göz önüne alınması gereken özellikler; ilk yatırım maliyetleri olduğu kadar enerji hesabına göre yapılan inşaat maliyetleri (ek istasyonlar veya şarj istasyonları) ve yüksek bakım maliyetleridir.

3.3. Katenerli ve Katenersiz Hatların Birlikte Kullanılması

Katenerli sistemler katenersiz sistemlere göre daha uygun maliyetli sistemlerdir. Bu sebepten dolayı, dünya genelinde katenerli sistemler katenersiz sistemlere göre daha yaygındır. Fakat, şehir merkezlerindeki katener tellerinden dolayı oluşan kötü görüntüler, elektrik çarpma riskleri, yangın, katener direklerinin kapladıkları alan ve karayolu araçlarının bu direklere çarpması sonucu oluşan risklerin önüne geçmek amacı ile tramvay hattının şehrin çekirdek merkez içinde kalan kısmını katenersiz sistemle, kalan kısımlarını ise maliyet göz önüne alınarak katenerli sistem olarak yapılmıştır. Yani karma sistem uygulanmıştır. Karma sistemlerde Cer gücü, hem katener telinden, üçüncü bir enerji rayı ile yerden besleme sistemlerinden ve/veya araç üstü enerji depolama sistemlerinden (ESS'den) sağlanır.

Karma sistemlerde Sidney tramvayı buna bir örnek olarak gösterilebilir. Sidney tramvayında cer gücü enerjisi hem katenerden hem de yerden besleme sisteminden sağlanır. Toplam hat uzunluğu 12 km'dir. Bu hattın şehir içinde kalan 2 kilometrelik kısmı Alstom tarafından APS olarak yapılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 Sidney Tramvayı Katenersiz (APS) Kısmı (Alstom, 2020)

Hattın kalan 10 kilometrelik kısmı ise yine Alstom tarafından konvansiyonel katenerli hat olarak yapılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Sidney Tramvayı Katenerli Sistem (Alstom, 2020)

Karma sistemlere katener sistem ile birlikte onboard araç üstü enerji depolama sistemleri kullanımı da örnek olarak verilebilir. Ülkemizde yapılmış olan Konya

tramvayı mevcut 23 km'lik kısmı olan Alaaddin - Selçuk Üniversitesi hattı konvansiyonel katener sistemine ek olarak yapılan 5,5 km'lik Alaaddin - Adliye hattının şehir merkezinden geçen 2 km'lik kısmı ilk yatırım maliyetleri ve mevsim özelliklerinden dolayı katenersiz onboard araç üstü depolama sistemleri ile geçilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Konya Tramvayı Katenerli Sistem (Rayhaber, 2020)

Konya şehrinin tarihi kısmından ve şehir merkezinden geçen kısmı olan Alaaddin - Adliye Hattı araç üstü enerji depolama sistemleri (ESS) ile geçilmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Konya Tramvayı Katenersiz Sistem (Rayhaber, 2020)

4. AVANTAJLAR VE DEZAVANTAJLAR

İstanbul'da ilk tramvay hattı 1872 yılında atlı olarak Azapkapı - Ortaköy hattı olarak açılmıştır. İlk elektrikli tramvay hattı 1914 yılında Karaköy - Beşiktaş arasında işletmeye açılmıştır. 1956 yılında trolleybüslerin hizmete alınması ile birçok tramvay hattı kullanımdan kaldırılmıştır. Trolleybüslerin kullanımdan kaldırılması sonrası İstanbul Büyükşehir Belediyesi 1990 yılından sonra birçok elektrikli tramvay hattını hizmete açmıştır. İstanbul'da dört adet katener cer gücü beslemeli tramvay hattı işletme altındadır. Beşincisi olan katenersiz cer gücü beslemeli Eminönü - Alibeyköy tramvay hattının ilk kısmı olan Alibeyköy cep otoparkı - Cibali arası Ocak 2021'de hizmete girmiştir.

Dünyada ve ülkemizde bulunan tramvay sistemleri incelendiğinde en yaygın olarak katener sistemler kullanılmıştır. Fakat teknolojinin gelişmesi ile ihtiyaçlar doğrultusunda katenersiz ve karma sistemler de dünyada ve ülkemizde kullanılmaya başlanmıştır. Konuyla ilgili sistemler;

1. Katener Cer Gücü ile Beslemeli Sistemler
2. Katenersiz Cer Gücü ile Beslemeli Sistemler
 - 2.1. Zeminden Sürekli Cer Beslemeli Sistemler
 - 2.2. Enerji Depolamaya Dayalı Sistemler

olarak iki sisteme ayrılmıştır. Bu sistemlerin kullanımında avantajları ve dezavantajları değerlendirildiğinde;

Katener Cer Gücü ile Beslemeli Sistemlerin Avantajları

- Dünya genelinde çok yaygın kullanılmaktadır. Kendini kanıtlamış bir sistemdir.
- Dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde üretilebilmesinden dolayı kolay tedarik edilebilen sistemlerdir.
- İlk yatırım maliyetleri uygundur. Kolay rekabet ortamı sağlanabilir.
- Yerli olarak üretilebilir, yerli üretimi ve istihdamı teşvik eder.
- Araç katener üzerinden sürekli CER gücü almasından dolayı karayolu araçları ile ortak çalışan yerlerde oluşan plansız bekleme ve sıkışık trafikte

bekleme ve kalma yapma durumlarında sürekli enerji alır. Yolda kalma durumu olmaz.

- Araç üzeri enerji depolama sistemleri ile çalışan araçlar gibi duraklar arası ve hat uzunlukları arası mesafeyi kısıtlamaz.
- Rejeneratif frenleme enerjisinin kısmı geri kazanım ve kullanım yöntemi ile ilgili bir kısıtlama yoktur.
- Kış aylarında tuzlama ve buzlanmadan etkilenmez.
- Aşırı yağmur veya sel durumlarında enerji kesintisi olmadan araç güvenli bölgeye kadar hareket ettirilebilir.
- Araç üstü enerji depolama sistemi ağırlığı olmayacağından araç daha hafif olacaktır. Bu şekilde az enerji kullanımı olacaktır.
- Bakım maliyetleri uygundur.
- Araçlar diğer katenerli hatlarda da kullanılabilir.
- Enerji temini direk Havai hattan almasından dolayı taş, kaya, çöp vb. temizlik kaygısı yoktur.
- Kavşaklarda ve hemzemin geçit bölgelerinde oluşan trafik sıkışıklığından ve dur/kalklardan enerji temini açısından etkilenmez.

Katener Cer Gücü ile Beslemeli Sistemlerin Dezavantajları

- Tarihi sahaların, deniz manzaraları vb. görünürlüğü önemli bölgelerin katener telleri vasıtasıyla görüntü kirliliğine sebebiyet verir.
- Katener direklerinin iki hat ortasına konumlanması hat kesitinde büyümelere sebebiyet verir. Bundan dolayı tramvay hattının oluşturduğu izole bölgelerin büyümesi ve karayolu taşıtların mevcut ulaşım yollarında 30 cm - 40 cm arası daha fazla daralma gerçekleşir.
- Enerji depolama sistemi olmayan araçlarda işletme zaman çizelgesine bağlı olarak (enerjinin hatta tekrar basılması sonrası) rejeneratif frenleme enerjisinin tamamından faydalanılamaması.
- İzole olamayan hat bölgelerinde katener telinin dışarıdan kamyon kasası vb. araç çarpması dolayısı ile kopması sonrasında işletmenin durmasına ve çevredeki insanlara elektrik çarpması ve yangın riskini doğurmaktadır.

Zeminden Sürekli Cer Beslemeli Sistemlerin Avantajları

- Bu sistemler dünya genelinde spesifik projelerde kullanılmaktadır. Kendini kanıtlamış bir sistemdir.
- Tarihi sahaların, deniz manzaraları vb. görünürlüğü önemli bölgelerin katener telleri vasıtasıyla görüntü kirliliğine sebebiyet vermez.
- Tramvay araçları zeminden sürekli cer gücü almasından dolayı karayolu araçları ile ortak çalışan yollarda, sıkışık trafikte bekleme ve kalma yapma durumlarında sürekli enerji alır. Yolda kalma veya enerji yoğunluğu düşme durumu olmaz.
- Yerden beslemeli sistemler duraklar arası ve hat uzunlukları arası mesafeyi kısıtlamaz.
- Ansaldo Tramwave sisteminde rejeneratif frenleme enerjisinin kısmi geri kazanımı vardır.
- Hatta katener direği olmamasından dolayı hat gabarilerinde 90 santime varan küçülmeler olmaktadır. İlk yatırım inşaat maliyetlerinde azalmalara, hattın izole bölgesindeki küçülme ve karayolunda genişlemelere sebebiyet verir.
- Hattın izole olmayan bölgelerinde cer enerjisi yerden sağlanacağı için karayolu araçları tarafından katener direklerine yapılan kazalar yaşanmaz.
- Hattın izole olmayan bölgelerinde katener telinin oluşturduğu güvenlik risklerinden muaftır.
- Elektrik kesintisinde araç üstü enerji depolama sistemi barındıran araçlar güvenle duraklara varabilir.
- Araçlara pantograf eklenmesi durumunda katenerli hatlarda da kullanılabilir.

Zeminden Sürekli Cer Beslemeli Sistemlerin Dezavantajları

- Alstom APS sisteminde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazımı yoktur. Bu da, yaklaşık % 20 - 30 enerji kaybı yaratmaktadır.
- Altom APS ve Ansaldo Tramwave sistemleri kış aylarında tuzlama ve buzlanmadan belli bir miktarda etkilenir.
- Tedarikçileri üretici firmalarıdır ve telifli sistemlerdir. Tedarik sıkıntısı yaşanma ihtimalleri olabilir.

- Yerden beslemeli sistemlerde Ansaldo'nun Tramwave sistemini geliştiren CRRC şirketinin telif hakkı nedeniyle yurtdışı satış hakkı olmaması Alstom APS sistemini tek ve rakipsiz olarak bırakmaktadır. Rekabet yapılamamaktadır.
- Enerji teminini enerji pabucu ile yapan sistemlerde enerji pabucunun zarar görememesi için hattın izole olmayan bölgelerindeki taş, kaya, çöp vb. sürekli temizlenmelidir.
- Yerli üretimleri yoktur. Tamamen ithal malzemelerdir.
- İlk yatırım ve bakım maliyetleri oldukça yüksektir.
- Bu sistemlerde tramvay araçları ve sistemler olarak paket olarak verildiğinden maliyetler büyük ölçüde artmaktadır.
- Bakım parçaları sistemlerin kendine özgü olması sebebiyle tedarik yalnızca üretici firma tarafından sağlanacağı için rekabet yaşamamasından dolayı pahalılık öngörülmektedir.
- Araç üstü enerji depolama sistemi bulunmayan araçlar için işletme sırasında elektrik kesintilerinde jeneratör bulundurma zorunluluğu gerekmektedir.

Araç Üstü Enerji Depolama Sistemleri Avantajları

- Hat geneli gömülü sistemler bulundurmadığı için ilk yatırım maliyetleri düşüktür.
- Rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı vardır. Araç üstü ekipmanlar ile verimliliği yükseltilmektedir.
- Tramvay araçları başka tramvay hatlarında da kullanılabilir.
- Jeneratöre ihtiyaç yoktur.
- Alt yapı işleri kısıtlı olmasından dolayı daha kısa inşaat süreleri içerisinde yapılması mümkündür.
- Tedarikçi sayısı fazladır dolayısı ile rekabet ortamı vardır.
- İzole olmayan hat bölgelerinde ilave güvenlik tedbirlerine ihtiyaç yoktur.
- Kış aylarında tuzlanma ve buzlanmadan etkilenmez.
- Enerji depolama ekipmanlarının geri dönüşümleri vardır.

Araç Üstü Enerji Depolama Sistemleri dezavantajları

- Batarya ve varsa süper kapasitörden dolayı araç ağırlığı artacaktır.
- Araç ağırlığının artmasından dolayı % 5'e varan ekstra enerji harcamaları olacaktır.
- Araç üstü enerji depolama ekipman maliyetleri araç maliyetlerini arttıracaktır.
- Batarya ve süper kapasitör kullanım ömürlerine göre değişim maliyetleri getirmektedir.
- Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda, sıcaklıkların aşırı yükselmesinden dolayı araç üstü enerji depolama sistemlerine ekstra olarak soğutma sistemleri de tahsis edilmesi gerekmektedir.

Dünya ve ülkemizde bu sistemler karma olacak şekilde kullanımları mümkündür. Bunların avantaj ve dezavantajları sıralanacak olursa;

Karma Sistemlerin Avantajları

- Tarihi sahaların, deniz manzaraları vb. görünürlüğü önemli bölgelerin katener telleri vasıtasıyla görüntü kirliliğine sebebiyet vermez.
- İlk yatırım maliyetleri katener sistemler kadar uygun olmasa da kısıtlı bir bölgede yapıldığı için maliyetler yüksek değildir.
- Katener sistem kısmı yerli üretimi ve istihdamı teşvik eder. Rekabeti teşvik eder.
- Araç katener sisteminde veya yerden besleme sistemlerinde sürekli CER gücü almasından dolayı karayolu araçları ile ortak çalışan yerlerde oluşan plansız beklemelerde, sıkışık trafikte bekleme ve kalma yapma durumlarında sürekli enerji alır. Yolda kalma durumu olmaz.
- Araç katener sisteminde veya yerden besleme sistemlerinde sürekli CER gücü almasından dolayı duraklar arası ve hat uzunlukları arası mesafeyi kısıtlamaz.
- APS sistemi (araç üstü enerji depolama sistemi yok ise) hariç kullanılan tüm sistemlerde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı vardır.
- Alstom APS ve Ansaldo Tramwave sistemleri haricinde kış aylarında tuzlama, solüsyon ve buzlanmadan etkilenmez.

- Alstom APS sistemi haricinde aşırı yağmur veya sel durumlarında enerji kesintisi olmadan araç güvenli bölgeye kadar hareket ettirilebilir.
- Araçlar diğer katenerli hatlarda da kullanılabilir.
- Araç katener sisteminde veya yerden besleme sistemlerinde sürekli CER gücü almasından dolayı kavşaklarda ve hemzemin geçit bölgelerinde oluşan trafik sıkışıklığından ve dur/kalklardan etkilenmez.
- Katenersiz sistem kısmı ihtiyaca göre kısıtlanacağından dolayı bakım maliyetlerde önemli ölçüde azalacaktır.

Karma Sistemlerin Dezavantajları

- Araç üstü enerji depolama sistemlerinde aracın trafikli alanlarda dur-kalk yapma durumları, havalandırma ünitesi harcamaları iyi hesaplanıp ona göre enerji yönetim hesabı yapılmalıdır. Beklenmedik dur/kalklarda sistemdeki enerji çok azalacağından araçta havalandırma ünitesi performans kayıpları olabileceği öngörülmektedir. Aracın enerjisiz kalması durumunda başka bir araç ile hattan çekilmesi gerekebilecektir.
- Alstom APS sisteminde (araç üstü enerji depolama sistemi yok ise) rejeneratif frenleme enerjisinden faydalanılamamaktadır. Fakat bu kısım Alstom APS ile kısıtlı olan bölgede geçerli olacaktır.
- Katenerli sistemlerde paralel karayolunda 30 – 40 santimetrelik daralma olmaktadır.
- Enerji teminini enerji pabucu ile yapan sistemlerin oluşturduğu kısıtlı kısımlarda hatta; taş, kaya, çöp vb. temizlik yapılması gerekmektedir.
- Bakım parçaları sistemlerin kendine özgü olması sebebiyle tedarik sıkıntısı yaşanması ve parça alımında rekabet yaşanmaması sonrasında pahalılık öngörülmektedir. Fakat karma sistemlerde bu alanlar sınırlıdır. Yeterli bakım malzemesi stoku yapılabilir.

Yukarıda avantajları ve dezavantajlarından bahsedilen katenersiz sistem çözümlerin uygulanacak tramvay hattı seçiminde dikkate alınması gerekmektedir. Bunları Çizelge 4.1’de tablo halinde bakacak olursak;

Çizelge 4.1. Katenerli ve Katenersiz Sistemler Karşılaştırma Tablosu

	Katenerli Sistem	Alstom APS	Ansaldo Tramwawe	Bombardier Primove	Batarya	Batarya Süperkapasitör
Enerji Toplama	Pantograf	Kollektör papucu	Kollektör papucu	Toplama bobini	Kollektör papucu / toplama bobini /pantograf	Kollektör papucu /toplama bobini /pantograf
Temas Şekli	Fiziksel	Fiziksel	Fiziksel	Endüktif Güç Transferi	Fiziksel veya endüktif güç transferi	Fiziksel veya endüktif güç transferi
Araç Ağırlık Artışı (HVAC ESS)	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Var
Enerji Kaybı	Yok	Yok	Yok	Var*	Var**	Var**
Rejeneratif Frenleme Enerjisi	Var	Yok	Var	Var	Var	Var
Kar, Su, Buzlanma ve Tuzlanmanın etkilenme	Yok	Var	Var	Yok	Yok	Yok
Maliyet	Sistem maliyeti	Sistem maliyeti	Sistem maliyeti	Endüktif Sistem, batarya-süper kapasitör kombine maliyeti	Batarya maliyeti	Batarya ve süper kapasitör maliyeti
İlk Yatırım Maliyeti	Düşük	Yüksek	Orta	Çok yüksek	Orta	Orta
İşletme Maliyeti	Düşük	Orta	Orta	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek
Cer Gücü Enerjisi	750 VDC	750VDC	750VDC	750 VDC	Sistem Gerilimi	Sistem Gerilimi
Geri Dönüşüm	Kontak Teli (Var)	Veri Yok	Veri Yok	Veri Yok	Var	Var
Yerli Üretim	Var	Yok	Yok	Yok	(Çalışma Yapılmaktadır)	Yok
Kamuya Açık Alanda Riskler	Yüksek	Orta	Orta	Az	Az	Az

* Endüktif Güç tranferinden dolayı %5'e kadar enerji kaybı ve Ağırlıktan dolayı %5'e kadar fazla enerji kullanımı

** Ağırlıktan dolayı %5'e kadar fazla enerji kullanımı

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminden sürekli beslemeli ve enerji depolama dayalı katenersiz sistemlerin dünyada ve Türkiye'deki durumu incelenmiş ve her bir sistem üreticisinin teknik analizi yapılarak ihtiyacın durumuna göre hangi sistemin uygun olabileceği tartışılmıştır.

Zeminden beslemeli katenersiz sistemlerde; tramvay aracının sistem ekipmanları(anten, enerji papucu vb.) ve cer gücü enerjisinin altyapısı; araç ve sistem olarak kombine maliyet oluşturmaktadır. Mevcut durumda bu iki temel başlıkta yerli üretim bulunmamakla birlikte, ülkemiz uygulamalarında tümünü ithal etmek yerine teknoloji transferi ile belirli oranlardan başlayarak yerlileştirme yoluna gidilmesi uygun olacaktır. Örnek olarak seçilen Eminönü-Alibeyköy tramvay hattındaki gibi tramvay araçlarının yerlileştirilmesi ve Çinli CRRC firması ile AnsaldoSTS firması arasında tramwave sisteminin teknoloji transferi yapılması gibi; sistemlerin bir kısmının veya tümünün yerlileştirilmesi gerçekleştirilebilir. Bu sayede bir sonraki katenersiz sistem projesinde yerli araç sistem ekipmanı ve/veya gömülü üçüncü ray üretimi yapılabileceğinden dolayı maliyetlerde azalma öngörülebilir. Bu şekilde yapılan projelerde yedek parça üretimleri de yerlileştirileceğinden dolayı tedarik sıkıntısı yaşanma sorunu ortadan kaldıracaktır. Yerli üretim sayesinde istihdam artışı gerçekleşecektir. Aynı zamanda üretilen parçaların yerli üretim olması sebebiyle bakım ve stok maliyetlerinde önemli ölçüde azalma olacağı öngörülmektedir.

Enerji depolama şeklinde çalışan sistemlerde ise altyapı maliyetlerinin düşük olması sebebiyle ilk yatırım maliyetleri düşüktür. Fakat batarya ve süper kapasitörlerin maliyetleri araç maliyetinin 1/3'ü kadar olması sebebiyle araç bakım maliyetleri yüksektir. Son yıllarda TÜBİTAK-RUTE yerli batarya üretimi için Ar-Ge çalışmaları yapmaktadır. Tramvay araçları için üretebilecek Lityum-İyon bataryalar ile kısıtlı bölgelerde enerji depolamaya dayalı katenersiz cer gücü kullanımı yerlileştirilebilir. Rejeneratif enerjiden tam kapasite yararlanmak, durak mesafelerin uzatılması, yüksek güç yoğunluğu ve çabuk şarj olabilmelerinden dolayı kullanabilecek süper kapasitörler için ise yerlileştirme

çalışmalarına başlanabilir. Bu sayede enerji depolama sistemlerinin tedarikinde sıkıntı yaşanma durumu ortadan kaldırılabilir.

Yerli üretimi olmayan katenersiz sistemlerin yerlileştirilmesi dışa bağımlılığı azaltacağı, bu teknolojinin ülkemizde gelişmesini sağlayacağı, başka toplu taşıma sistemlerinde kullanılabilmesi, üretilecek olan yerli bataryanın batarya teknolojisinde gelişmeyi hızlandıracağı, ülkemizde yapılacak başka katenersiz projelerde maliyet düşürmesi ve istihdamı desteklemesinden dolayı dışa bağımlılığı azaltacaktır. Lityum-İyon bataryaların uygun maliyetler ile geliştirilmesi otomotiv sektöründe yerli otomobil için yerlilik oranını arttıracığı ve maliyet düşüreceği gibi kendini kanıtlaması sonrası yerli Lityum-İyon bataryaların raylı sistemlerde kullanımı ve yurt dışı satışları da mümkün olacaktır.

Katenersiz cer gücü sisteminin karar aşamasında sistem değerlendirilmesi yapılmadan önce avantajları-dezavantajları değerlendirilmeli, bakım-yenileme maliyetleri hesaplanmalı, teknoloji paylaşımli proje yapılamaması durumunda hem ekonomik faktörler hem de çevresel faktörler göz önüne bulundurulduğunda tüm hat boyunca katenersiz cer gücü tesis edilmesi yerine çevresel faktörlerin katenersiz sistemlerin yapılması için belirlendiği kısıtlı bölgelerde bu sistemlerin kullanılması en optimum çözüm olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Alstom, 2020. APS Catenary-Free Tramway Operations, Erişim Tarihi 10.02.2020, <https://www.alstom.com>
- Ansaldo, 2020. Tramwave Catenary-Free System, Erişim Tarihi 10.02.2020, <https://www.hitachirail.com>
- Arlı V., 2010. Kentiçi Raylı Sistemler EMO Antalya şubesi Yayını, Erişim Tarihi 10.02.2020, https://www.emo.org.tr/ekler/2c1c8c7efa8da3f_ek.pdf?dergi=3
- Arlı V., 2011. Kentiçi Raylı Sistemler, Sayfa 23, İstanbul Ulaşım A.Ş., İstanbul
- Baştürk G., 2014. Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi ve Dünya Örnekleri ile Karşılaştırılması, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Sayfa 14, Ulaştırma, Denizcilik Ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara
- Bombardier, 2020. Bombardier Primove Teclonogy, Erişim Tarihi 10.02.2020, <https://www.bombardier.com>
- CAF, 2020. Catenary Free Tram System, Erişim Tarihi 10.02.2020, <https://www.caf.net>
- Can Güven E., Gedik K., 2019. Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi Makalesi, Sayfa 733, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Iğdır
- Cura B, 2015. Aktif Karbon ve Grafen Esaslı Süperkapasitörlerin Farklı Desarj Akımı ve İyon Türlerindeki Elektrolitler ile Gösterdiği Performans Değişimleri Tezi, Sayfa 6, 139, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Çalış E. A., 2016, Monoray Ulaşım Sisteminin Özellikleri Ve Diğer Kentiçi Ulaşım Araçları İle Karşılaştırılması yüksek lisans tezi, Sayfa 37 , İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Energys, 2020. Powersafe Sbs Batteries, Erişim Tarihi 20.12.2020, <https://www.energys.com>
- Eyeontaiwan, 2020. Kaohsiung's Light Rail: The Little Engine That Couldn't, Erişim tarihi, 10.02.2020, <https://www.eyeontaiwan.com>
- Filgezi, 2020. Maglev Hızlı Treni, Erişim Tarihi 26.03.2020, <https://www.filgezi.com>

- Hemmati R., Saboori H., 2016. "Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications-A review", pp.11-23, Renewable and Sustainable Energy Reviews 65
- Hürriyet, 2020. İstanbul'a 2019'da Havaray, Erişim tarihi 26.03.2020, <https://www.hurriyet.com.tr>
- Murteza M., 2010, Raylı sistem yatırımları fizibilite etütleri ve yapım yöntemleri yüksek lisans tezi, Sayfa 20 , Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul
- Nair, N. K. C., Garimella, N., 2010. Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration, 42(11):2124-2130, Energy and Buildings
- Öztürk Z. Arlı V., 2009. Demiryolu Mühendisliği, Sembol Basım Baskı Sistemleri Matbaa ve Yayıncılık, 1s, İstanbul
- Rayhaber, 2020. Konya Tramvayı Katenersiz Sistem, Erişim Tarihi 10.02.2020, <https://rayhaber.com>
- Siments, 2020. Siments HES&MES System, Erişim Tarihi 10.10.2020, <https://assets.new.siemens.com>
- Urbantransportmagazine, 2020. Qatar Education City Tram opened, Erişim tarihi 24.03.2020, <https://www.urban-transport-magazine.com/en/qatar-education>
- USTG, 2013. Alternative Analysis Study Report Released, Erişim Tarihi 10.02.2020, <http://unionstationtogeorgetown.com>
- Wikipedia, 2020. Türkiye'deki Tramvay Hatları, Erişim Tarihi 10.02.2020, <https://tr.wikipedia.org>
- Wowturkey, 2020. Sefa Akyol Lineer Metro, Erişim tarihi 26.03.2020, <http://wowturkey.com/forum>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alper Yavuz BAHADIROĞLU

Eğitim Durumu

Lise : Şahika Lisesi, 2002

Ön Lisans : İstanbul Üniversitesi AÖF, Tıbbi Dökümantasyon ve Sekreterlik 2017

Lisans : Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 2007

Yayınları

Bahadıroğlu A.Y., Eyigün Y., 2021. Tramvay Sistemlerinde Katenersiz Çözümlerin İncelenmesi Ve İstanbul Özelinde Katenerli Sistemler İle Kıyaslanması. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 39, 57-95.