



Araştırma Makalesi / Research Article

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

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

Alper Yavuz BAHADIROĞLU¹ Yalçın EYİĞÜN²

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
alper.bahadiroglu@metro.istanbul

Geliş Tarihi / Received
31.12.2020

Kabul Tarihi / Accepted
02.06.2021

Öz

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 çalışmada; 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. Bu makale, 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

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: Catenary free systems, catenary systems, energy storage systems, supercapacitor, tram.

¹Bu yayın Alper Yavuz BAHADIROĞLU isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. alper.bahadiroglu@metro.istanbul, Orcid.org/0000-0002-8518-1810.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. y.eyigun@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-9931-8294.

1. GİRİŞ

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.

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

Günümüzde gelişen demiryolu taşımacılığı iki ana başlık altında toplanmıştır.

1. Şehirler Arası Demiryolları
 - a) Yolcu Taşımacılığı
 - Konvansiyonel Trenler
 - Yüksek Hızlı Trenler
 - b) Yük Taşımacılığı
2. Kent İçi Raylı Sistemler
 - a) Tramvaylar
 - b) Hafif Raylı Sistemler (LRT)
 - c) Metro
 - d) Lineer Metro
 - e) Manyetik 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 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.

1.1. 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 arttırarak 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 gibi olumsuzlukları ortadan kaldırmak için başta gelen tramvay üretici firmaları, 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.

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

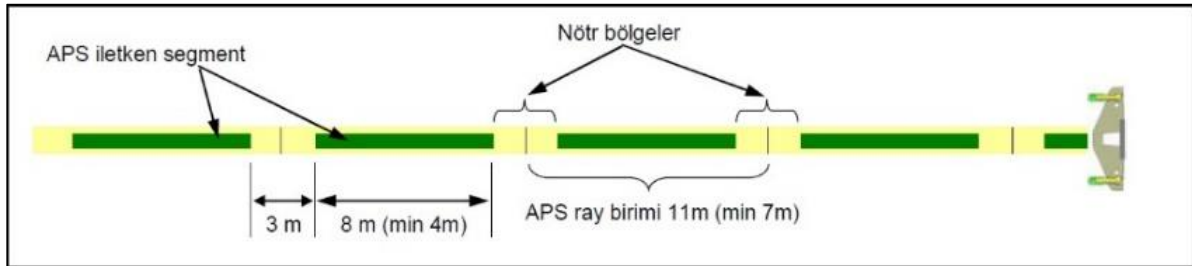
1.1.1.1. Alstom APS sistemi

Bu sistemde iki ray arasına gömülü bir üçüncü enerji rayı (ETR) ile sistemin cer gücü sağlanır. Gömülü segmentler 3 m yalıtkan ve 8 m iletken olacak şekilde montajı yapılır. Bu parçalar 22 m'de bir gömülü kutular yardımıyla araç ilerledikçe enerjilendirilir. Sistem cer gücü besleme gerilimi seviyesi 750 V DC'dir.

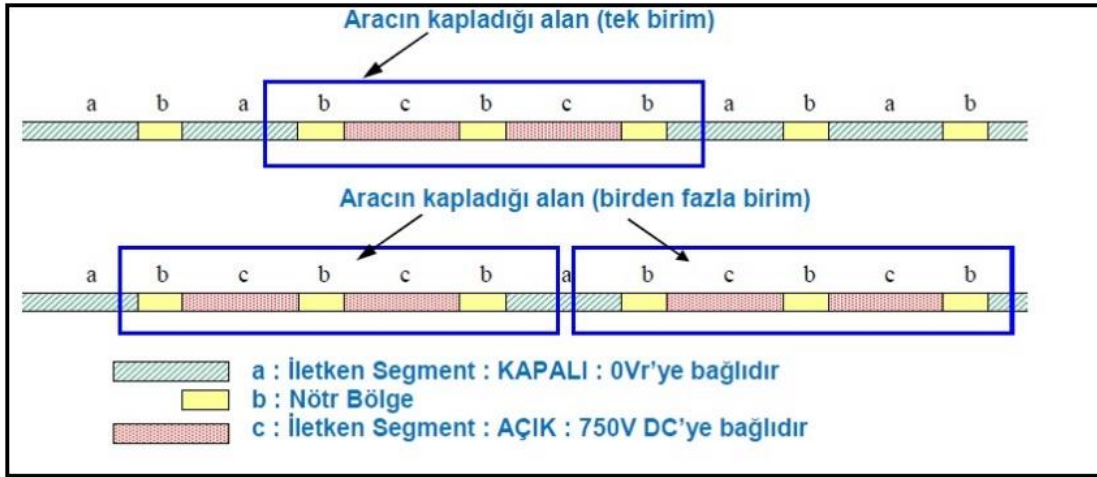
Söz konusu sistem kent içi raylı sistem taşımacılığında Havai Temas Sistemi (OCS) yerine bölümlere ayrılmış APS raylarının kullanılmasını amaçlar. APS rayları, hat platformu içine iki ray arasında kalacak şekilde tamamen gömülü üçüncü bir enerji rayı (ETR) teknolojisi şeklinde tasarlanmış sistemleridir.

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

APS rayı, Şekil 1'de görüldüğü gibi genellikle 8 m iletken ve 3 m nötr segment bölgelerinden oluşur (Şekil 1, Şekil 2).



Şekil 1. APS Ray Yerleşimi (Alstom, 2020)



Şekil 2. APS Ray Segmentleri Gösterimi (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.

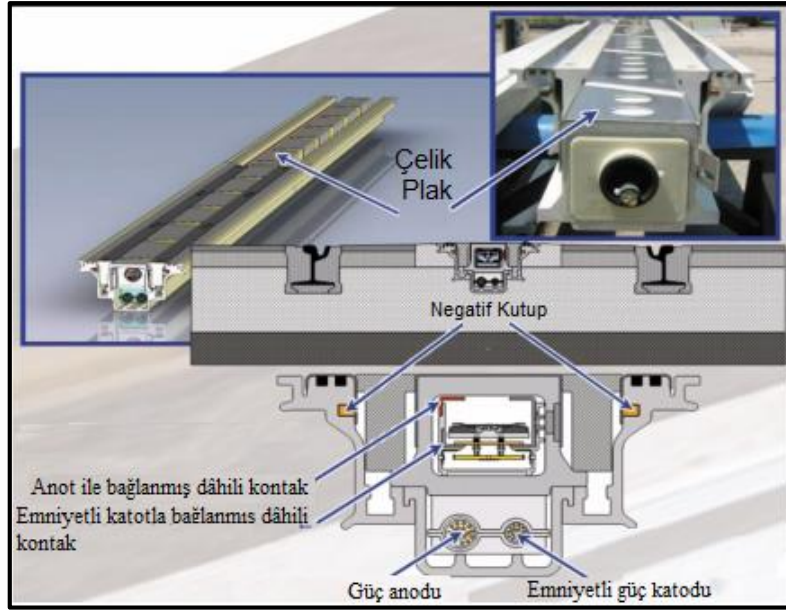
Araç kendi varlığını, yere kodlanmış bir sinyal göndererek işaret eder. Bu sinyal, araç üstü elektronik cihazı tarafından üretilerek kolektör pabucuna entegre bir anten ile iletilir. Bu kodlanmış sinyal, bir segment üzerinde sürekli ve güvenli bir şekilde algılanır ve böylece bu segmente enerji beslemesi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

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.

1.1.1.2. Ansaldo tramwave sistemi

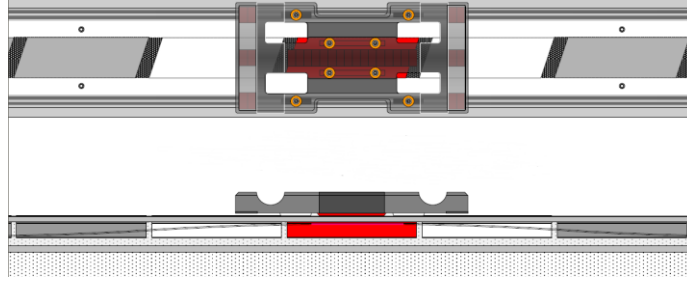
Tramwave sistemi ilk olarak İtalyan Ansaldo firması tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sistem Alstom APS sistemine oldukça benzemektedir. Bu sistemde cer enerjisi; iki seyir rayı arasında gömülü bir üçüncü enerji rayından (ETR) karşılanır.

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 segmetleri 50 cm'lik çelik plakalar halinde düzenlenmiştir (Şekil 3). Çelik levhanın kalınlığı 2 mm olup materyali paslanmaz çelik SUS304'tür.

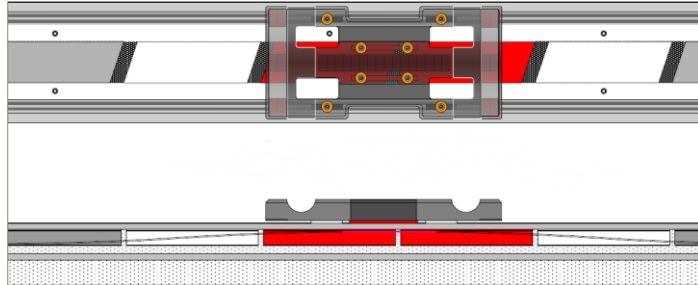


Şekil 3. Besleme Segmenti ve Besleme Kablosu Görünümü (Ansaldo, 2020)

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 4).



Şekil 4. Cer Gücü Aktif Tek Kısım (50 cm) (Ansaldo, 2020)



Şekil 5. 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 5).

Tren 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.

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 işleimde olabilmektedir. Kaplama üzerindeki su birikimi 10 cm'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 durdurmaktadır.

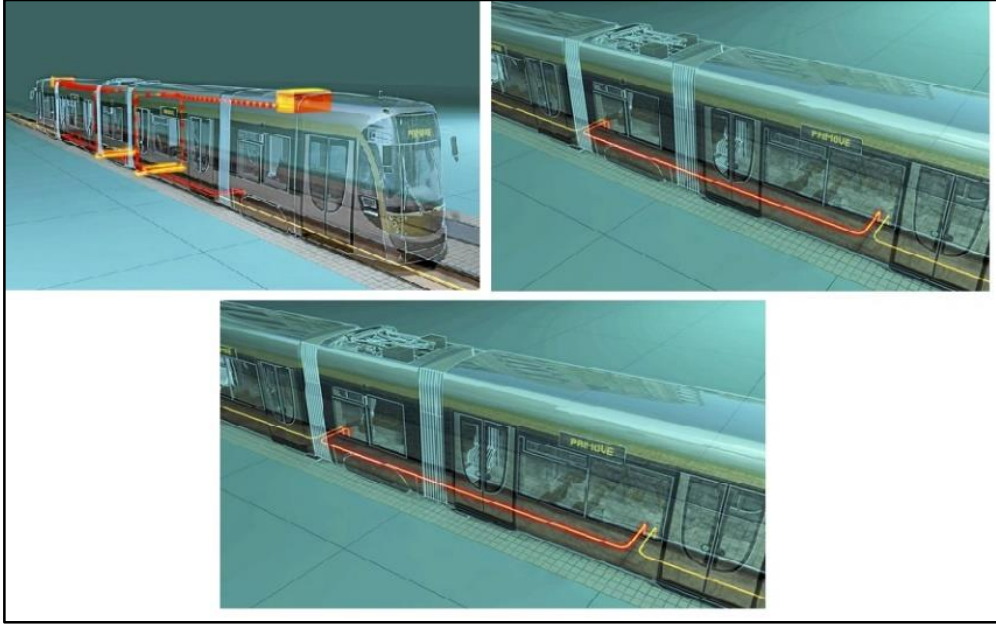
Besleme segmentlerinde oluşabilecek arızalar komple tanılama ve algılama sistemi seti ile tespit edilir. Bu arızalar kontrol merkezine iletilir. Kontrol merkezi arızaları sisteme yükler. Segmentlerin bakımı ve motajı hızlı ve kolaydır. Yarım saat içinde besleme modülü yenisi ile değiştirilebilir.

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

1.1.1.3. Bombardier Primove sistemi

Bu sistemde gömülü bir üçüncü ray yoktur ve araçta enerjyi üçüncü raydan alacak bir enerji papucu bulunmamaktadır. Bu yüzden üçüncü ray teknolojisinden ayrılır. Sistem, herhangi bir kontak bulunmadan bir transformatörün endüktif 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. Elektrik üretiminde primer devre iki ray arasında kalan manyetik kısımda 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 (Şekil 6).

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. 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 6. Bombardier Primove Sistem Gösterimi (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 papucu bulunmadığından sistemin çalışmasında herhangi bir sorun yaşanmaz. Primove sistemde güç kaynağının yeraltına gömülmesi, araçlar ve yayalar için daha yüksek bir güvenilirlik sunar ve gelecekteki bakım maliyetlerini minimum şekilde olmasını sağlar.

1.1.2. 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 adlandırılabilir CAF, Siemens ve Bombardier gibi üreticilerin birçok farklı çözüm ortaya koyduğu görülmektedir.

1.1.2.1. Caf süperkapasitör ve batarya sistemi

Firma, dahili araç üstü enerji depolama sistemleri (yakıt hücreleri/pilleri, volanlar, bataryalar ve süperkapasitörler) hakkında 7 yıldan fazla araştırma – geliştirme (analiz etme, inceleme ve araca entegre ve test etme) çalışmaları yapmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. 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 indirdiği süresi sırasında şarj edilmesi planlanmaktadır. Süper kapasitörler, yüksek akımlarda 20 saniye 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 8).

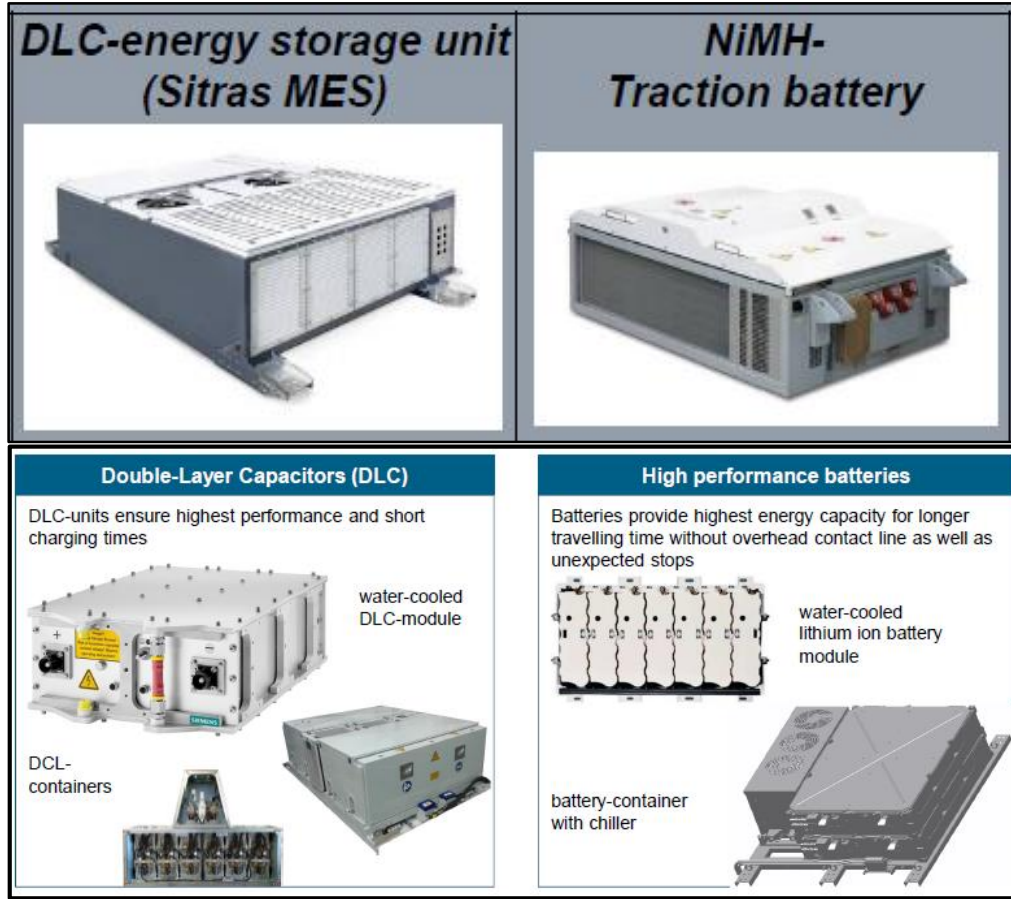
Araç ilk hareket enerjisini süper kapasitörden alır. Süper kapasitörde bulunan enerjinin boşalması durumunda araç enerjisini Li-ion veya NiMH bataryalardan alır. İsteğe göre batarya tipi seçilebilir. CAF firması tarafından geliştirilen hızlı şarj akümülatörleri (ACR) sistemi, durak bölgelerinde veya gerekli görülmesi durumunda ilave şarj bölgelerinde şarj edilmektedir. Bunlar şekil 8’de görüldüğü gibi enerji durak bölgelerinde katener sistem vasıtasıyla 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.



Şekil 8. Katenerli ve CAF Katenersiz Aracının Çalışma Gösterimi (CAF, 2020)

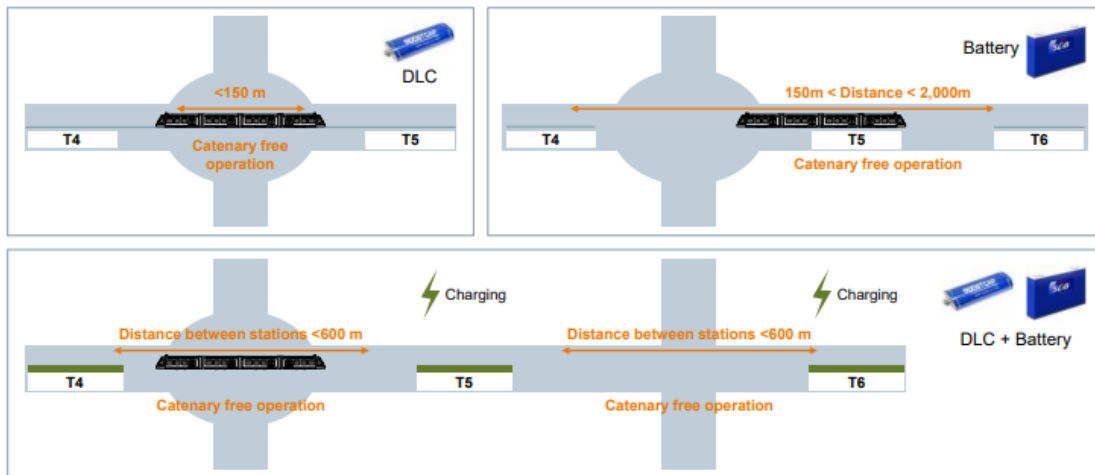
1.1.2.2. Siemens Sitrans HES&MES sistemi

Siemens firması on sekiz yılı aşkın süredir araç üstü enerji depolama sistemi (OSS) olan Sitrans MES ve Sitrans HES sistemleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu sayede, minimize altyapı çalışması yaparak az maliyetli ve yüksek tasarruflu Siemens Sitrans MES & HES sistemleri geliştirilmiştir. Siemens sitrans MES sistemi araç üzerine yerleştirilen çift katmanlı kapasitörlerden (DLC) oluşmaktadır (Şekil 9). 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'ye yakın enerji tasarrufu yapıldığı bilinmektedir.



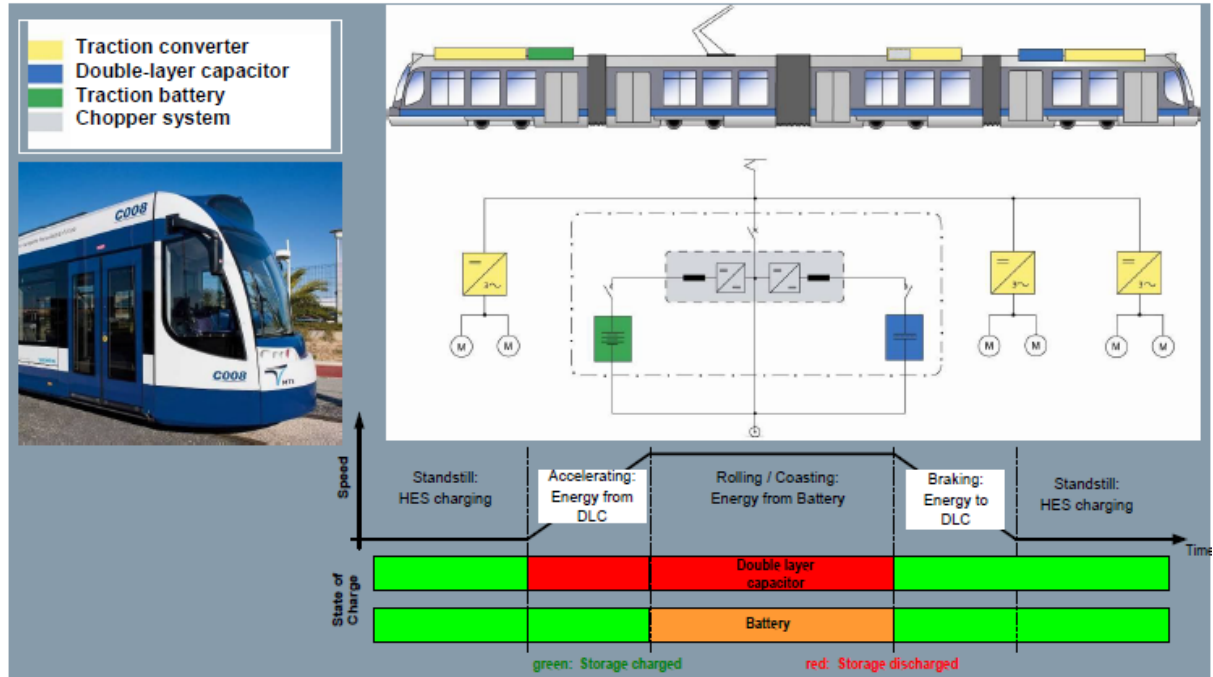
Şekil 9. Siments Sitras MES&HES DCL, NiMH ve Li-ion Batarya Gösterimi (Siments, 2020)

Siemens Sitras HES sistemi yine araç üzerine yerleştirilen çift katmanlı kapasitöre ek olarak isteğ bağlı olarak NiMH batarya veya Li-ion batarya kullanılır. Araç bu sistemde ilk hareket enerjisini çift katmanlı kapasitörlerden (DLC) alır. Sonrasında gerekli durumlarda batarya devreye girer. Duraklar arası mesafe 600 metrenin altında projelendirilmelidir. Şekilde gösterildiğ gibi sadece çift katmanlı kapasitörler ile 150 metrenin altında katenersiz araç hareketi mümkündür. DLC-batarya sistemlerinde ise duraklar arası mesafe 600 metreye çıkmaktadır (Şekil 10). Fakat, acil durumlarda tramvayların optimum şartlarda yaklaşık 2.500 metre katener olmadan hareket edebileceğini üretici firma tarafından garanti edilmektedir.



Şekil 10. Sitras MES&HES Durak Arası Olması Gereken Mesafe

Araç frenleme yaptığında 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 kullanılır. Bu sayede hem bataryanın ömrü uzatılır hem de olumsuz ve acil durumlarda kullanılmak üzere gerekli enerji bataryada saklanır (Şekil 11). Siments Sitras HES sistemi sayesinde %25'e yakın enerji tasarrufu edilebilmektedir. Sistemde çift katmanlı kapasitörlerin ve bataryaların ısınmaması ve soğutulması için su ve hava kullanılmaktadır. 50 C° ye kadar sistemin çalışmasında problem yaşanmadığı bilinmektedir.



Şekil 11. Siments Sitras HES (Hibrit Enerji Dopolama) Sistemi Çalışma Gösterimi (Siments, 2020)

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

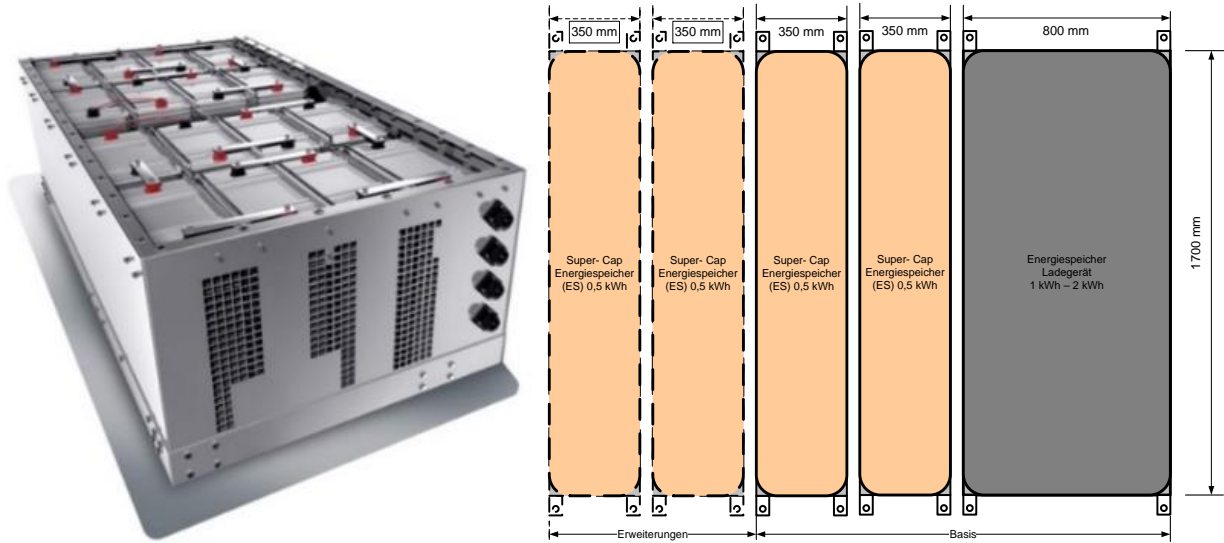
1.1.2.3. Bombardier Primove hibrit sistem

Bombardier firmasının geliştirdiği Primove hibrit sistemi lityum iyon piller ve çift katmanlı süper kapasitörlerden oluşmaktadır (Şekil 12). Gereksinime göre yalnız lityum iyon pil ya da yalnız çift katmanlı süper kapasitörler kullanılabilir (Şekil 13). 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 170kg'dır. Frenlemeden dolayı oluşan rejeneratif enerjinin %8-10'u bataryalarda depolanabilmektedir.



Şekil 12. PRIMOVE 50: 2 x 24.5kWh 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. 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 13. MITRAC ES 500 (1 kWh) Boyutlarına göre yerleşimi (0,5 / 1 / 1,5 / 2 kWh) (Bombardier, 2020)

1.1.3. 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. Tablo 1’de farklı enerji depolama sistemleri tipleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Enerji Depolama Sistemleri (Hemmati, 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

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

1.1.3.1. Kurşun – asit bataryalar

Kurşun asit (PbA) bataryalar 1850 - 60'lı yıllarda Fransız Fizikçi Gaston Plante tarafından bulunan en eski ve olgun batarya sistemidir. Dünyada en çok kullanılan batarya çeşididir. Starter aküler en çok tercih edilen akü tipidir. Araçların ilk başlama, ateşleme, aydınlatma ve bazı araçlarda hareket fonksiyonlarını yerine getirir (Şekil 14).



Şekil 14. 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. “Sektöründeki en büyük başarılarından biri Pb-asit bataryaların %98 oranında geri dönüşümünün sağlanmış olmasıdır” (Can Güven ve Gedik, 2019).

1.1.3.2. 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, telekominikasyon 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.

1.1.3.3. Nikel metal hibrit bataryalar

Nikel metal hibrit (NiMH) şarj edilebilir bataryalardır. 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.

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

“Nikel metal hibrit 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 hibrit bataryalarını uzun zamanlı enerji depolaması açısından oldukça dezavantajlı konuma getirmektedir. Ancak maliyet açısından lityum – iyon bataryalardan daha avantajlı konumdadırlar” (s. 42).

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).



Şekil 15 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 (Şekil 15). Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur.

1.1.3.4. 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.

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.

“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” (Can Güven ve Gedik, 2019). Yüksek kullanım ömrü, bakım maliyetleri, geniş sıcaklık çalışma aralığı gibi özelliklerinden dolayı tramvay araçlarında kullanılması uygundur. Dünyada kullanılan örnekleri mevcuttur.

1.1.4. 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) sahiptirler. 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. Süperkapasitörler çok düşük sıcaklıklarda ve çok yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmektedir. Bu özelliği ile bataryalardan belirgin bir şekilde ayrılmaktadır.

Cura(2015) süperkapasitör 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 süperkapasitör teknolojisinin gelecek vaad ettiği söylenebilir” demektedir.

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 sıcaklıklarda çalışabilmesi, bakım masraflarının ve bekleme kayıplarının azlığı ile beraber otomotiv, demiryolu, rüzgâr enerji vb. sistemlerde hızla kullanılmaya başlanmıştır. Tek başına kısa mesafelerde uygulanabilir olmasına rağmen, uzun mesafelerde enerji yoğunluğu yüksek olan bataryalar ile birlikte kullanılabilirler.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında, İstanbul’da ve dünya genelinde yer alan tramvay işletmelerinde kullanılmakta olan enerjilendirme sistemlerinin özelliklerinin yer aldığı ürün katalogları, konu ile ilgili literatür taramalarında geçen değerlendirmeler ve işletme tecrübelerinden faydalanılmıştır.

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında İstanbul’da ve dünya çapında kullanılan veya kullanılması için geliştirilen katanerli ve katenersiz tramvay enerjilendirme sistemleri ele alınmıştır. Her iki tür sistemde de farklı üreticilerin sunduğu çözümler, estetik, enerji verimliliği, çevresel geri dönüşüm, çevre koşullarından etkilenme, yerlilik oranı, ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti gibi hususlardaki avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bütün bu değerlendirmeler neticesinde, belirtilen kriterler açısından tramvay sisteminin enerjilendirilmesi için optimum sistem tespit edilmiştir.

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 tramvay olarak, turistik ağırlıklı ve kısıtlı kapasite ile hizmet vermektedir. Bu sebeple nostaljik tramvay hatları bu çalışma kapsamında incelenmemiştir.

3.1.1.1. Bağcılar – Kabataş tramvay hattı (T1)

T1 hattı modern olarak İstanbul'da hizmete giren ilk 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, Aralık 1992'de Aksaray – Topkapı, Mart 1994'te Topkapı – Zeytinburnu, Nisan 1996'da Sirkeci – Eminönü, Ocak 2005'de Eminönü – Fındıklı – Mimar Sinan Üniversitesi, Haziran 2006'da Fındıklı – Mimar Sinan Üniversitesi – Kabataş uzatmaları yapılmıştır. Eylül 2006'da Zeytinburnu – Kabataş Tramvay Hattı hizmete girmiştir.



Şekil 16. T1 Tramvay hattı güzergâhı (Metro İstanbul, 2021)

Hattın Bağcılar – Zeytinburnu kısmı ise T2 hattı olarak Eylül 2006'da hizmete açılmıştır. Ocak 2011'de 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.

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

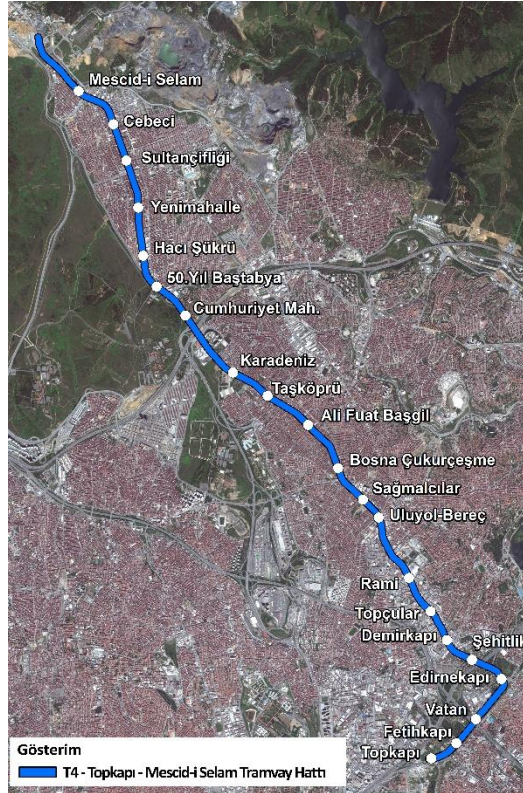
rampalar mevcuttur. Hattın toplam uzunluğu 19,3 km olup hattaki toplam istasyon sayısı 31'dir. Hattın işletme bilgileri aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 2. T1 İşletme Verileri

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 bölgesinin yolcu trafiğini 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 17. T4 Tramvay hattı güzergâhı (Metro İstanbul, 2021)

Yüksek tabanlı tramvay araçlarının kullanıldığı bu hatta 3 farklı araç seti kullanılmaktadır. Bunlar Düwag B100, Hyundai Rotem LRV34, yerli tramvay "İstanbul" dur. Cumhuriyet istasyonu haricindeki tüm istasyonlarda engelli ve yaşlı yolcuların erişimi için rampalar ile yer altı istasyonlarında asansör ve yürüyen merdivenler bulunmaktadır.

Tablo 3. 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)

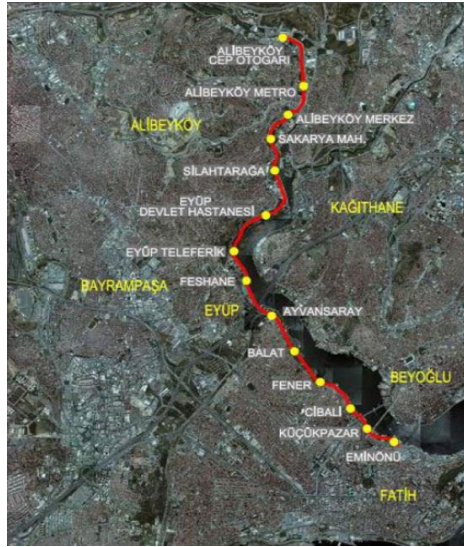
T5 tramvay hattının toplam uzunluğu 10.1 km'dir. Alibeyköy Cep Otogarı durağından başlar, Haliç kıyısında hareket ederek Eminönü'ne kadar devam eder. Toplam 14 istasyondan oluşmaktadır. Minimum yatay karp yarıçapı 50 metre, duraklarda bekleme 20 saniye, boyuna eğim max. %6.5, hattın tasarım hızı korumalı kesimlerde max. 50 km/saat, ortalama işletme hızı 17 km/saat olarak planlanmıştır.

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.

Tablo 4. Eminönü-Alibeyköy Tramvayı İstasyon İsimleri ve Kilometre Bilgileri
(Bahadıroğlu, 2020)

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
Silahtarğa	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

Hattın ilk bölümü olan Alibeyköy Cep otogarı – Cibali arası 2021 yılı içerisinde işletmeye açılacak 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 içerisinde geçmektedir. Hemzemin olarak geçen karayolu kesişim bölgeleri ve yaya erişim yolları sinyalizasyon sistemleri ile geçilmiştir.



Şekil 18. Eminönü-Alibeyköy Proje Güzergâhı (Metro İstanbul, 2020)

Eminönü – Alibeyköy hattı Türkiye'nin ilk katenersiz sistemi olan Alstom APS sistemi ile inşa edilmiştir. Hattın iki yönlü olarak 20.2 kilometresi katenersiz enerji besleme sistemi ile yapılmıştır. APS sisteminde Enerji rayları alt temel olan betona tespitli olarak yapılmaktadır.

Tramvay araçlarında iki adet fırça bulunur ve biri tramvay aracının bir ucunda diğeri ise diğeri ucunda yer alır. Fırçalar, APS rayı üzerindeki pislikleri ve engelleri temizler, kolektör pabuçlarıyla

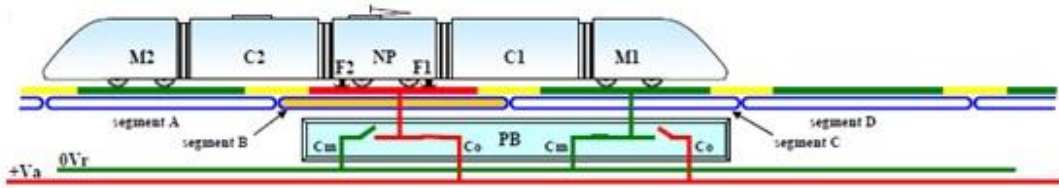
herhangi bir darbe gelmesini engeller. Bu fırçalar, tramvay APS modunda iken aktive olur, yani fırçaların konumu kolektör pabuçlarının konumuna karşılık gelir.



Şekil 19. APS Rayı Temizleme Fırçası (Metro İstanbul, 2020)

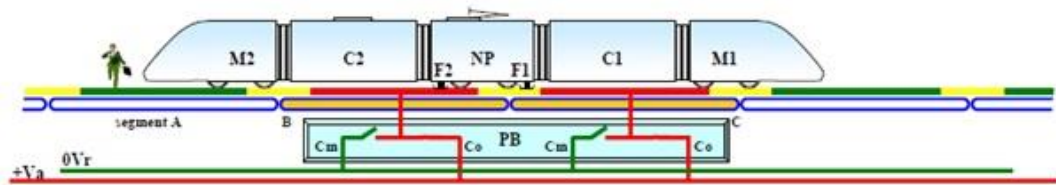
Düz bir hat düzeninde APS rayı, iki çalışan ray arasında hattın ortasında yer alır. Kurp bölgelerinde ise APS rayı yana doğru kayıktır ve konumu, araç altında yer alan APS kolektör pabucunun yoluyla belirlenir. Araç kendi varlığını, yere kodlanmış bir sinyal göndererek işaret eder. Bu sinyal, araç üstü 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.

APS Sistemini detaylı inceleyecek olursak;



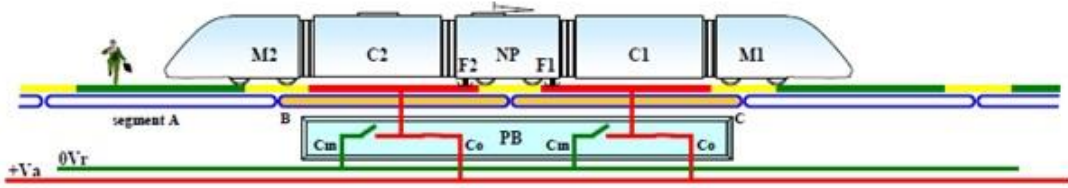
Şekil 20. F1 ve F2 B Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

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 20).



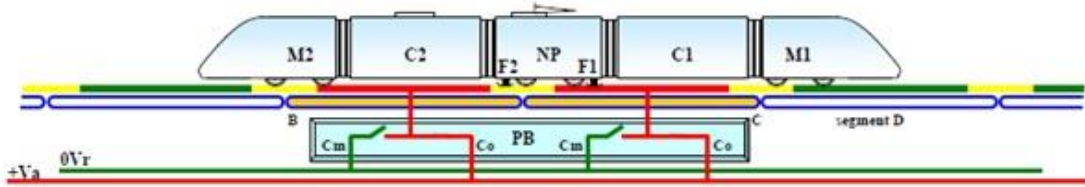
Şekil 21. F2 ve F1 B Segmentinde, F2 Enerjili (Alstom, 2020)

Araç, F2 ve B ile enerjilenir. Kolektör pabucu anteni F1, C segmenti üzerinde alış döngüsünü yayınlamaktadır. C segmenti enerjilidir ancak kolektör pabucu F1 henüz bu segment üzerinde kaymamıştır. C üzerinden herhangi bir enerji verilmeyenken Co ve Cm anahtarlarıdır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil 21).



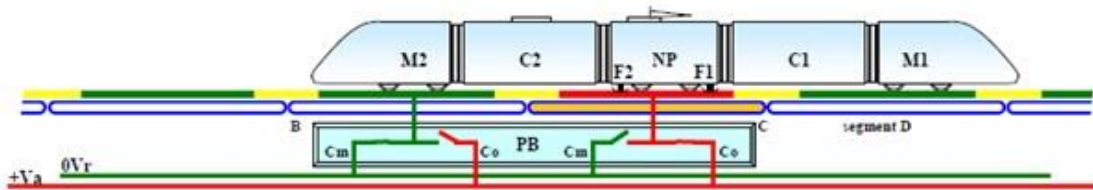
Şekil 22. F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araca B ve C segmentlerinden iki adet kolektör pabucu ile enerji verilir. Kolektör pabucu anteni F1, C segmentinde alış döngüsünü yayınlamaktadır. 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 22).



Şekil 23. F2 B Segmentinde, F1 C Segmentinde, F1 Enerjili (Alstom, 2020)

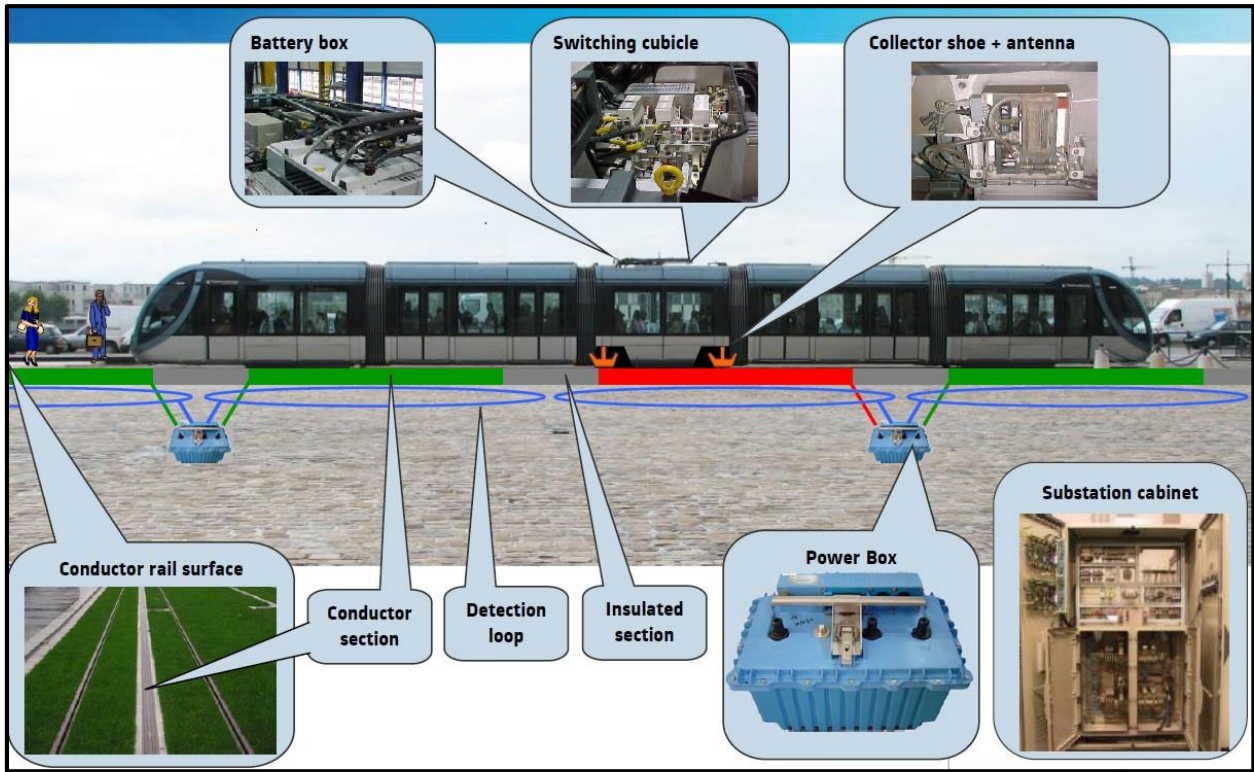
F2, B segmentinin iletken kesiminden ayrılmıştır. Araca F1 kolektör pabucuyla enerji verilir. F2 ile bağlantılı olan anten, enerjili olmaya devam eden alış döngüsü B'ye yayın yapmayı sürdürür. A ve D, 0 Vr'ye bağlanır. Enerjili olan B ve C segmentleri aracın altında ulaşılabilir değildir (Şekil23).



Şekil 24. F2 ve F1 C Segmentinde, F2 ve F1 Enerjili (Alstom, 2020)

Araca C segmentinden alış gerilimi ile enerji verilir. Ön (F1) ve arka (F2) kolektör pabuçları enerjilidir. Enerjili C segmenti aracın altında ulaşılabilir değildir. A, B ve D segmentleri 0 Vr'ye bağlanır (Şekil 24).

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 algılayamaz, cer gücü tekrar kazanılır ve tren "normal" moda geri döner.



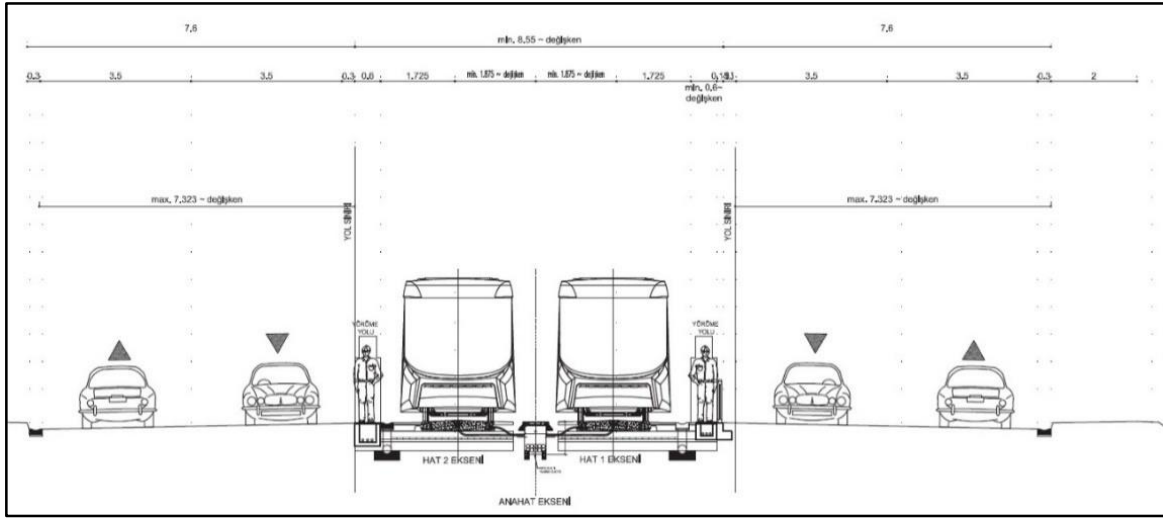
Şekil 25. APS Araç Üstü Ekipman ve Sistem Kesiti (Alstom, 2020)

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.



Şekil 26. Eminönü-Alibeyköy Tramvay Hat Kesiti (Metro İstanbul, 2020)

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 26).



Şekil 27. Eminönü-Alibeyköy Tramvayı Proje Kesiti (Bahadıroğlu, 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, 6 adet trafo merkezi, toplamda 34 adet sinyalize kavşak ve yaya geçidi bulunmaktadır. Sinyalize olmayan 27 adet yaya geçidi bulunmaktadır.

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.

Bu projede, Alstom firması dünyada ilk defa Alstom APS sistemini kendi araçları dışında başka firmanın araçlarına, kendi sistem ekipmanlarının monte edilerek kullanılmasına izin vermiştir. Hazırlanan araçlar Eylül 2020'de hatta getirilmeye başlanmıştır. Hattın ilk kısmı olan Alibeyköy Cep Otogarı – Cibali arasının Ocak 2021 de bitirilmesi planlanmaktadır. Kalan kısmının (Eminönü – Cibali) ise 2021 yılı içerisinde açılması planlanmaktadır (Şekil 28).



Şekil 28. Eminönü-Alibeyköy Tramvay Aracı (Bahadroğlu, 2020)

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.

Hemzemin geçitlerde ve kavşaklarda karayolu taşıtları ile aynı yolu kullanma zorunluğu olduğundan mevcut karayolu trafik düzenine uymak zorunda olup geçitlerde ve kavşaklarda karayolu taşıtlarına geçiş üstünlüğü vardır.

Tablo 5. Ulaşım Sistemlerinden Fiziksel Özellikler 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

Tramvay sistemleri nüfusu fazla olmayan yerleşim birimlerinde ana ulaşım 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. Fakat Avrupa'nın birçok kentinde 35 – 53 metre boyunda 5 – 7 akslı aracın körüklerle 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 enerji temini, katener diye bilinen 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. İstanbul'da ve Türkiye'de ilk yerden CER gücü beslemeli katenersiz tramvay hattı olan T5'in ise Ocak 2021'de birinci kısmı kullanıma açılacaktır.

3.2.1. Katenerli hatların özellikleri

Katener sistemi orta gerilim enerjisinin yerel elektrik dağıtıcı firmalardan temin edilerek trafo merkezlerinde uygun elektriksel ekipmanlar vasıtasıyla 750 V DC 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. Tünelde 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.

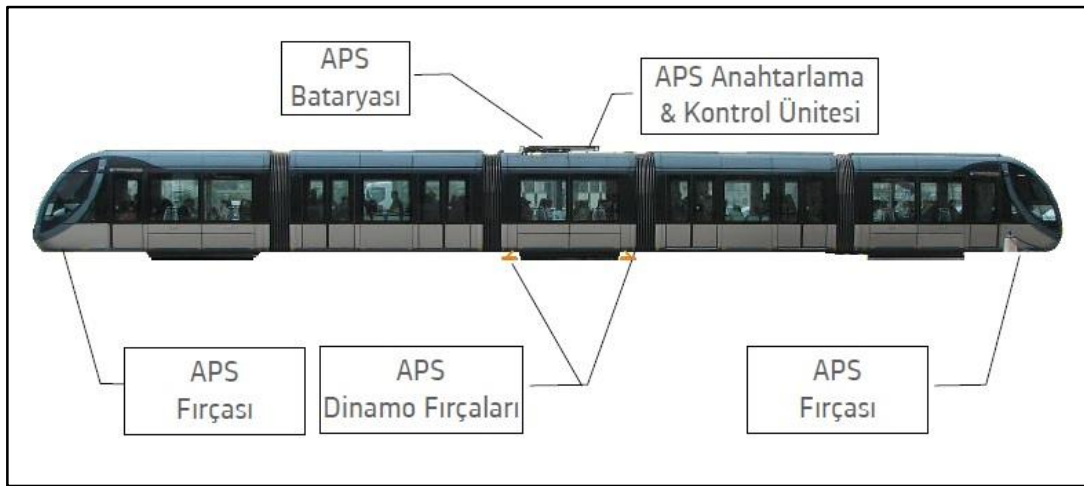
3.2.2. Katenersiz hatların özellikleri

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 eklenmelidir. 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 29 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 tramvayında 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.

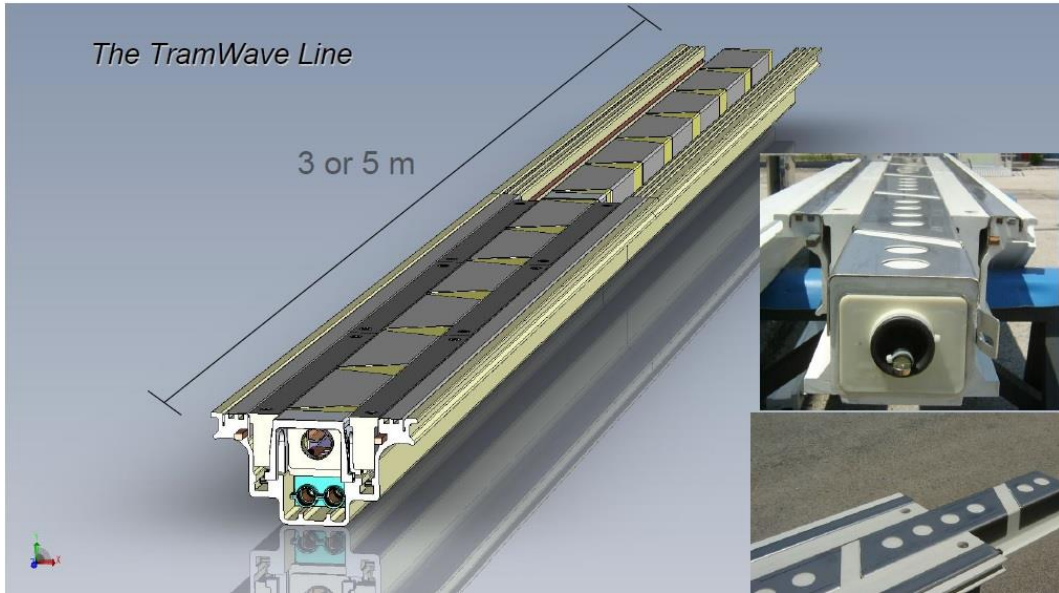
Alstom APS sisteminin parça maliyetleri yüksek olduğu için bakım maliyeti katenerli sistemlere oranla fazladır.

3.2.2.2. Ansaldo Tramwave sistemi

Araçlar ilk kalkış sırasında çok enerji harcamaktadırlar. Sıkışık trafik ve kavşak beklemelelerinde katenerli sistemler gibi araç sürekli cer beslemesinde olduğundan dur kalk yapması, sıkışık trafik ve beklemeleler 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 olmadığında araç sürekli olarak güç besleyebilir. Modül üzerindeki biriken suyun yüksekliği 10cm'yi aştığında, sistem su birikme süresi 2 saati aştıktan sonra DC 750V 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 30 Ansaldo Tramwave Hat 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.

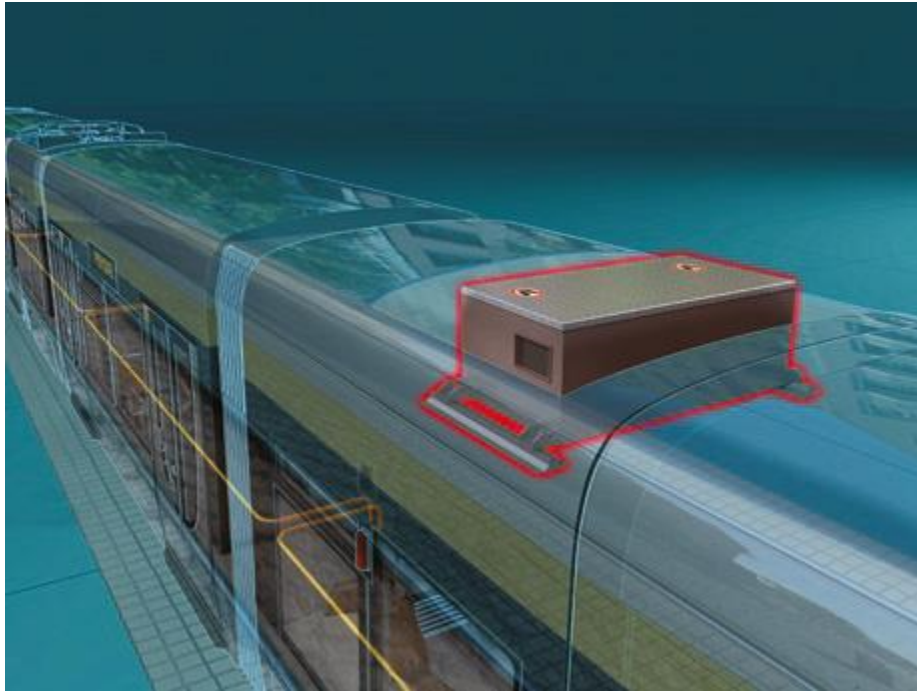
Kollektör papucu karlanma ve buzlanma durumunda segmente yeteri kadar temas edemeyeceğinden dolayı cer gücü yeterince araca iletmez ve işletme kayıpları oluşabilir. Aktif olarak sistem 2014 yılının sonlarına doğru Çin'in Zhuhai kentinde teknoloji paylaşımı olarak uygulamaya başlanmıştır. Maliyet olarak 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 AnsaldoSTS – 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 endüktif 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, endüktif güç transferi şeklinde aldığından kış mevsiminde kar yağması ve buzlanma durumlarından etkilenmez.



Şekil 31 Primove Sistem Mitrac Bataryası (Bombardier, 2020)

Rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımı yoktur. Ancak, araç üstü enerji depolama sistemleri sayesinde bu enerji kullanılabilir.

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 endüktif güç transferi şeklinde aldığından aşırı yağış, sel gibi durumlardan etkilenmez.

Enerji rayı olmamasından dolayı aşınma ve yenileme maliyetleri olmaz.

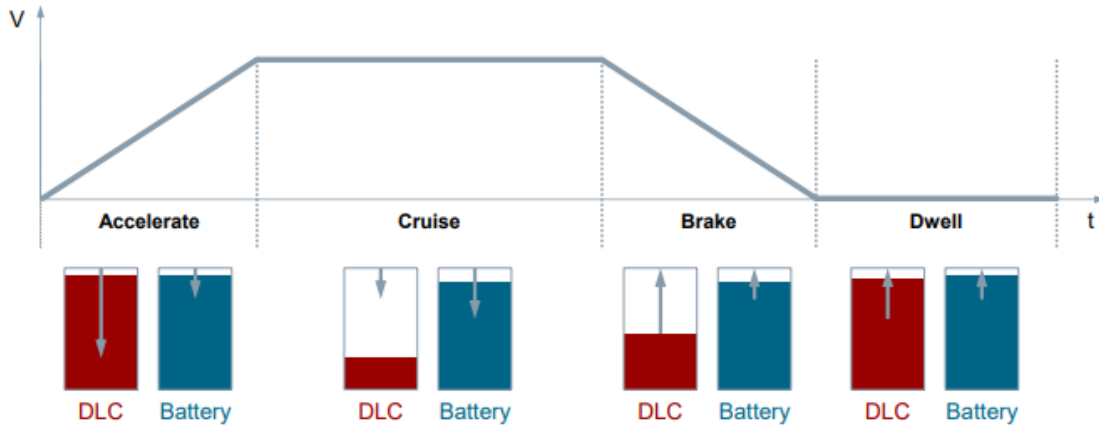
Bombardier Primove sisteminin tramvay araçları üzerinde herhangi bir ticari işletmesi bulunmamaktadır. Bu yüzden yatırım maliyetleri ile bilgi mevcut değildir fakat bu sistem için maliyet; endüktif sistem, batarya sistemi ve süper kapasitör sisteminin kombine maliyeti denilebilir.

3.2.2.4 Siemens Sitra HES & MES sistemi

Araç frenleme yaptığında rejeneratif enerji çift katmanlı 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.

Çift katmanlı kapasitörlerdeki enerjinin büyük kısmı normal hareket esnasında harcanır. Bu sayede bataryanın ömrü uzatılır.



Şekil 32 Siments Sitra HES&MES İşletme Sırasında Araç Şarj Prensibi (Siments, 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 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 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.

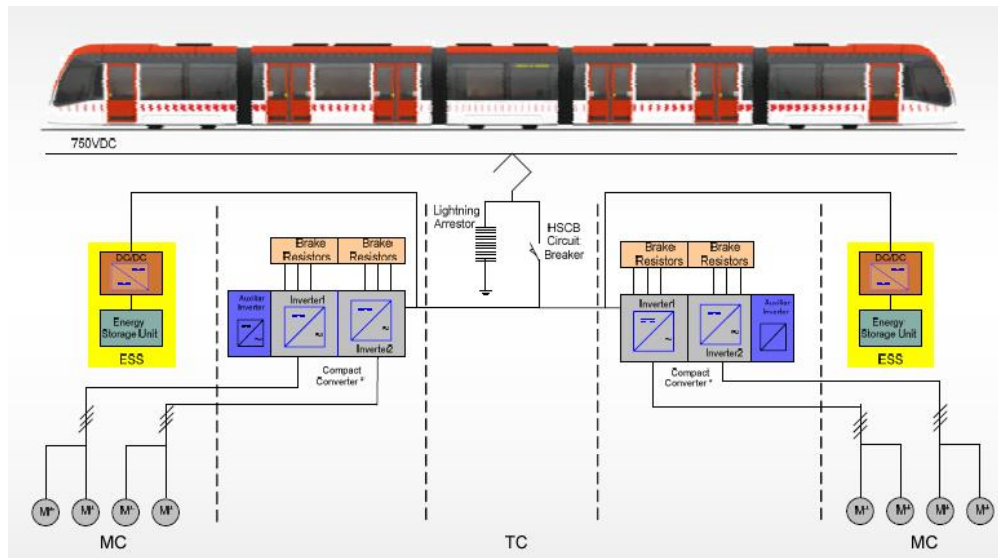
3.2.2.5. CAF süper kapasitör ve batarya sistemi

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. Duraklar arası şarj istasyonları kurmak kaydı ile duraklar arası mesafe uzatılabilir.

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.



Şekil 33 Caf Enerji Depolama Sistem Görünüşü (CAF, 2020)

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 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 250000 £ seviyelerindedir. Batarya süper kapasitör paket fiyatı ise yine şirket bazlı değişiklik göstermesine karşın yaklaşık olarak 600000 £ 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 34. Sidney Tramvayı Katenersiz(APS) Kısım (Alstom, 2020)

Hattın kalan 10 kilometrelik kısmı ise yine Alstom tarafından konvansiyonel katenerli hat olarak yapılmıştır.



Şekil 35. 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 Alaaddin – Selçuk Üniversitesi hattına 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.

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



Şekil 36. Konya Tramvayı Katenersiz Sistem (Rayhaber, 2020)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

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 kalma 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 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.
- İstasyonlar arası mesafe sınırı yoktur.
- Bakım yapılarak değiştirilen kontak telinin geri dönüşü vardır.

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 – 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.
- Hattın izole olmayan bölgelerinde bulunan katener direklerine, karayolu araçları tarafından yapılan kazalar sonucu oluşan elektrik çarpma tehlikesi ve oluşan yangın tehlikesi durumları oluşmaktadır.

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 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 bekleme ve 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 kısıtlayamaz.
- 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 maliyetlerinde 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 bir tablo halinde bakacak olursak;

Tablo 6. Katenerli ve Katenersiz Sistemler Karşılaştırma Tablosu (Bahadıroğlu, 2020)

	Katenerli Sistem	Alstom APS	Ansaldo Tramwave	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	Yok	Var	Var	Yok	Yok	Yok

	Katenerli Sistem	Alstom APS	Ansaldo Tramwave	Bombardier Primove	Batarya	Batarya Süperkapasitör
Tuzlanmanın etkilenme						
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 transferinden dolayı %5'e kadar enerji kaybı ve Ağırlıktan dolayı %5'e kadar fazla enerji kullanımı

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

Katenersiz kısmın yerli üretimleri yoktur. Tamamen ithal malzemelerdir. Bu sistemlerde yerli üretim olmaması sebebiyle tedarik sıkıntısı yaşanma durumları olabilir. Batarya ve süper kapasitörler maliyetleri araç maliyetlerinin 1/3'ü kadar olması sebebiyle araç bakım maliyetleri yüksektir. Fakat son yıllarda TÜBİTAK Sage tramvay araçları için yerli batarya üretim çalışmaları yapılmaktadır. Bu sayede kullanımı daha avantajlı hale gelebilir.

Günümüz koşullarında tramvay sistemleri ulaşım yükünün büyük kısmını almakla beraber ilk yatırım maliyetleri açısından önemli mali yükler getirmektedir. Yerli üretimlerin yurt içi rekabet koşulları olması sebebiyle maliyetleri uygun olduğu gibi aynı zamanda ekonomiye ve istihdama katkısı büyüktür. Hem ekonomik faktörler hem de çevresel faktörler göz önüne bulundurulduğunda tüm hat boyunca katenersiz cer gücü tesis edilmesi yerine, çevresel kriterlerin belirlendiği yerlerde katenersiz sistemlerin kullanılması optimum çözüm olarak düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Yazarlar çalışmada kullanılan verilerin temini için Metro İstanbul'a; veri toplama, kaynak yardımı, analiz ve yorumlama konusunda katkı sağlayan Metro İstanbul çalışanlarına teşekkürlerini sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Alstom, (2020), APS Catenary-Free Tramway Operations, 10.02.2020, <https://www.alstom.com>.

Ansaldo, (2020), Tramwave Catenary-Free System, 10.02.2020, <https://www.hitachirail.com>.

Baştürk, G., (2014), Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi ve Dünya Örnekleri ile Karşılaştırılması, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ankara.

Bombardier, (2020), Bombardier Primove Teclonogy, 10.02.2020, <https://www.bombardier.com>.

CAF, (2020), Catenary Free Tram System, 10.02.2020, <https://www.caf.net>.

Can Güven, E., Gedik, K., (2019), “Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi”, İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 726-737.

Cura, B., (2015), Aktif Karbon ve Grafen Esaslı Süperkapasitörlerin Farklı Desarj Akımı ve İyon Türlerindeki Elektrolitler ile Gösterdiği Performans Değişimleri, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 139, Ankara.

Energysys, (2020), Powersafe Sbs Batteries, 20.12.2020, <https://www.energysys.com>.

Hemmati, R., Saboori, H., (2016), “Emergence of Hybrid Energy Storage Systems in Renewable Energy and Transport Applications-A Review”, Renewable and Sustainable Energy Review, 65, 11-23.

Metro İstanbul, (2020), Hatlarımız, 10.10.2020, <https://www.metro.istanbul>.

Nair, N.K.C., Garimella, N., (2010) “Battery Energy Storage Systems: Assessment for Small-Scale Renewable Energy İntegration”, Energy and Buildings, 42(11), 2124-2130.

Rayhaber, (2020), Konya Tramvayı Katenersiz Sistem, 10.10.2020, <https://rayhaber.com>.

Siments, (2020), Siments HES&MES System, 10.10.2020, <https://assets.new.siemens.com>.

USTG, (2013), Alternative Analysis Study Report Released, 10.02.2020, <http://unionstationtogeorgetown.com>.

Wikipedia, (2020), Türkiye’deki Tramvay Hatları, 10.02.2020, <https://tr.wikipedia.org>.